

## 工学研究所報第 39 号目次

### 巻 頭 言

工学研究所長就任にあたって…………… 井川 学… 1

### 総 説

圧電素子を用いた振動発電手法に関する研究……………	藤本 滋…	2
サービス業務の動的スケジューリング問題……………	石井 信明…	9
一般化集荷配送巡回セールスマン問題とその応用……………	片桐 英樹…	15
自転車の車輪に生じる振れを修正するための作業支援装置の開発……………	松本 光広…	22
旧大竹家煉瓦蔵の再生・利活用に関する研究 ……………	石田 敏明、長尾 亜子、比護 結子、富永 祥子…	30
チャカルタヤ山における宇宙線空気シャワー実験……………	垣本 史雄…	38
暗黒エネルギー問題と修正された重力理論……………	山内 大介…	53
無限次元多様体の位相構造……………	嶺 幸太郎…	61
圧縮性 Navier-Stokes 方程式に対する時間局所的・大域的適切性……………	村田 美帆…	69
暗黒物質探索のための宇宙線反粒子検出器の開発……………	清水 雄輝…	77
放射光 X 線回折によるナノ材料の構造研究……………	客野 遥…	83

### 共同研究

ハドロサウルスの 2 足走行可能性……………	宇佐見 義之、衣笠 竜太、渡辺 祐佳那…	91
多光子イオン化過程を利用する新反応開発 ……………	岩倉 いずみ、赤井 昭二、太田 佳宏…	97
機能維持性能に優れた座屈拘束ブレース付中高層建築物の研究—中間報告— ……………	小谷野 一尚、岩田 衛、荻本 孝久、緑川 光正、坂田 弘安…	104
ペプチド固定化シリカ触媒の不斉アルドール反応特性……………	吉田 曉弘…	110
人工光合成反応を指向した新規 Sn 酸化物光触媒の創製と 合金ナノ粒子助触媒担持による光触媒反応の高効率化 ……………	田邊 豊和、阿部 英樹、宮内 雅浩、松本 太…	116
光架橋型ハイドロゲルを用いた湿性沈着物の簡易分析手法の開発 ……………	南齋 勉、石田 良仁…	126

### プロジェクト共同研究

ミリ波・テラヘルツ波における金属フォトニック結晶構造デバイスの解析と応用に関する研究 ……………	穴田 哲夫、陳 春平、中山 明芳…	130
高安心超安全交通研究所活動報告ドライブレコーダーと自動運転（高度運転支援） ……………	松浦 春樹、堀野 定雄、石川 博敏 龍 重法、石倉 理有、北島 創…	132
座屈拘束ブレースの高サイクル疲労性能の研究 ……………	小谷野 一尚、岩田 衛、荻本 孝久 緑川 光正、中込 忠男、大熊 武司…	139

まちづくり研究所の活動・2016年度

…………… 曾我部 昌史、内田 青蔵、山家 京子、中井 邦夫、吉岡 寛之 重村 力、丸山 美紀、長谷川 明、小幡 知之、香山 篤美…	141
くびれ加工鋼管を用いた円形 CFT 短柱の圧縮性能に関する実験的研究 …………… 林 思奇、齊藤 隆典、趙 衍剛…	143
“新たな低炭素エネルギー社会に対応した新型電池の開発” …………… 松本 太、池原 飛之、田邊 豊和、片岡 利介、大坂 武男 長澤 浩、阿部 英樹、持田 由幸、入井友 海太…	145
時間-周波数分析を用いたトンネル発破音の分析 …………… 山崎 徹、中村 弘毅、伊東 圭昌、田中 俊光…	148
多分岐ポリマー系ナノハイブリッド材料の開発と応用 …………… 横澤 勉、池原 飛之、山田 保治、花畑 誠、工藤 宏人…	150
高速高精度 DNA 増幅装置の開発… 山口 栄雄、鈴木 温、井上 和仁、安積 良隆…	152
刺激応答性材料の開発… 亀山 敦、石田 良仁、川口 春馬、上田 充…	153
グリーンイノベーションの基盤となるナノ構造制御触媒の開発研究 …………… 引地 史郎、内藤 周弑、上田 渉、吉田 暁弘、中澤 順 Shigeo T. Oyama、宮尾 敏広、赤間 弘、星野 真樹…	155
車両等に装備するためのポリカーボネート窓の表面改質に関する研究 …………… 新中 新二、井上 成美、大越 昌幸、野尻 秀智 植田 博臣、岩井 和史、中村 先男…	157
超精密加工による高品位表面の創成に関する研究 …………… 中尾 陽一、林 晃生、Sangkee Min…	159
高周波回路の解析・設計理論の整備と対応ソフト開発—電磁界問題から回路問題へ— …………… 平岡 隆晴、許 瑞邦…	161

テクノサークル活動報告

環境科学テクノサークル 2016 年活動報告…	井川 学…	163
ドラレコ・テクノサークル活動報告 ウェアラブルカメラが記録した 日常交通における自転車行動と道路環境 …………… 松浦 春樹、堀野 定雄、松田 洋、後藤 航太、酒井 聖紘 …………… 高橋 綱喜、金澤 優太、浮穴 浩二…		164
テクノサークル「けんちくをつくる会」2015 年度活動報告 ……………	三笠 友洋、伊藤 将吾…	167
テクノサークル KURAFT15-16 シーズン活動報告…	中村 弘毅…	169
「神奈川大学宇宙ロケット部」活動報告…	高野 敦…	171
神奈川大学ロボットプロジェクト活動報告…	江上 正、榊 恵介、秋谷 尚俊…	174

年次報告…		177
神奈川大学工学研究所所報執筆規程…		182
工学研究所所報執筆要領…		183
編集後記…		187

# CONTENTS

## Preface

Viewpoints as the Director of Research Institute for Engineering .....	Manabu IGAWA	1
---	--------------	---

## Review

Study on Method of vibration Power Generation using Piezoelectric Element .....	Shigeru FUJIMOTO	2
Dynamic Scheduling Problem on Service Operations.....	Nobuaki ISHII	9
Generalized Pickup and Delivery Traveling Salesman Problems and Their Applications .....	Hideki KATAGIRI	15
Development of Task Support Equipment for Correcting Deformed Bicycle Wheel .....	Mitsuhiro MATSUMOTO	22
Research and study on the revitalization/utilization of former Ohtake family's historical brick warehouse .....	Toshiaki ISHIDA Ako NAGAO Yuko HIGO Hiroko TOMINAGA	30
Air Shower Experiments at Mt. Chacaltaya.....	Fumio KAKIMOTO	38
Dark energy problem and modified theory of gravity.....	Daisuke YAMAUCHI	53
Topological structures of infinite-dimensional manifolds .....	Kotaro MINE	61
On the local and global well-posedness for the compressible Navier-Stokes equations .....	Miho MURATA	69
Development of Cosmic Ray Antimatter Detector for Dark Matter Search .....	Yuki Shimizu	77
Structure Analyses of Nanomaterials Using Synchrotron Radiation .....	Haruka Kyakuno	83

## Joint Research

On a possibility of bipedal running of Hadrosaurus .....	Yoshiyuki USAMI Ryuta KINUGASA Yukana WATANABE	91
Development of Novel Reaction using Multiphoton Ionization .....	Izumi IWAKURA Shoji AKAI Yoshihiro Ota	97
Mid-to-high-rise buildings with the Buckling -Restrained Braces with excellent functional maintenance performance- Interim report- .....	Kazuhisa KOYANO Mamoru IWATA Takahisa ENOMOTO Mitsumasa MIDORIKAWA Hiroyasu SAKATA	104
Catalytic performances of peptide-immobilized silica catalysts on the asymmetric aldol reaction .....	Akihiro Yoshida	110
Synthesis of novel tin oxide photocatalyst for artificial photosynthesis and enhanced photocatalytic performance of alloy nanoparticles loaded photocatalyst. .....	Toyokazu TANABE Hideki ABE Masahiro MIYAUCHI Futoshi MATSUMOTO	116
Development of Simple Analytical Method of Wet Deposition by Using Photocrosslinking Hydrogel .....	BenNANZAI Yoshihito ISHIDA	126

## Project Research

Fundamental Study on Metallic Photonic Crystal Devices for Millimeter / Terahertz Frequencies and Its Applications .....	Tetsuo ANADA Chun-Ping CHEN Akiyoshi NAKAYAMA	130
--	---	-----



## 巻頭言

# 工学研究所長就任にあたって

井川 学\*

## Viewpoints as the Director of Research Institute for Engineering

Manabu IGAWA\*

2016年4月より2年間、工学研究所所長を務めさせて頂くことになりました。工学研究所は1975年5月に創設されました。私は1978年に本学の工学部応用化学科(現在は物質生命化学科に名称変更)田中研の助手として赴任しましたが、その頃の工学研究所は3号館と4号館の間のスペースに建てられたプレハブの中に計算機室、会議室、所長室だけが配置されていたのを記憶しています。私が赴任する直前に、田中研の阿部勇輝技術員が電顕室に移動され、その後工学研究所の職員となったわけですが、移動後の空いたポストに助手として赴任した私は工学研究所とは浅からぬ縁があったと言えます。工学研究所はその後、18号館の地下に移り、次第に装置も整備されてきました。そして2001年、23号館地下に移動し現在の状況になったわけです。

これまでの私の工学研究所との関わりは、SEM-EDX等の装置を研究に使用したこと、ICP-AESそしてICP-MSの管理責任者になったこと、工学研究所共同研究を実施させていただいたこと、等でしょうか。また、この間、工学研究所の運営委員をつとめたり工学研究所報の編集に携わったり、あるいはまたテクノサークルの顧問を務めたりしました。同様な形で研究所との何らかの関わりを経験されている工学部構成員の方は多いと思います。

4月に所長に就任し、工学研究所の様々な仕事の責任者を務めています。工学研究所の専属スタッフ(教務技術職員2名、非常勤事務職員1名)のトップという立場でもあります。予想していなかったこととして、研究所長会議(「研究委員会」)が毎月実施され、全学の研究面での議論をするという仕事があります。上部機関として総合学術研究推進委員会もあり仕事内容が重なっていますが、研究委員会で最初に議論されることは多く、本学の研究活動において重要な仕事をするようになります。

工学研究所はこれまでの先人の努力の結果、一定のレベルに達して安定的に運営されており、解決に急を要する懸案の課題はありません。しかし、神奈川大学の大きな発展をみざすなら、研究活動の活性化は重要な課題ですから、将来を見据えて研究所として新たな活動領域を広げ充実させることを考えるべきでしょう。制度的な点では、工学研究所で既に実施しているテクノフェスタや講演会は重要であり、今後も続けていくべきことです。そのほか、共同研究や大型装置の管理等、日常的な業務を地道に充実させていくことも重要な課題です。

私自身のことを振り返ると、大学院を出てすぐ本学応用化学科に赴任した当初、研究室は狭隘でしつ設備も整っていませんでしたが、学科の教員は活力にあふれていました。これまでの私の考え方となじまないところもありましたから学科では激しい議論もしたものです。しかし、活発に議論して決まったことは皆で力を合わせて一丸となって進めるという雰囲気がありました。これは、学科の教員が皆、大学と学生に強い愛着を持っていたことが学科のエネルギーとまとまりの原動力になっていたことによると思います。

時が流れ、私の先輩の教職員の多くは退職されたり他界されたりしました。過去を振り返った時、今、学科にそして学部と同様なあるいはそれ以上の強い職場への愛着があるのかと、自問します。私達はそういった原点に立ち戻って、学部全体で飛躍するためにまとまることができれば、自然に発展できると思います。私自身、気付いてみるといつの間にか年長者の部類に入ってきました。若い方にも率直に意見を言って頂き、共鳴できることは代表して所長の立場で学部外、そして学外にも発言し、行動に移さなければならぬと思っています。是非いいアイデアを持ち寄って、素晴らしい研究所にしていきたいと思います。それがひいては、学部、大学、さらにそこに留まらず広く世界の役に立つことを目指して、工学研究所をさらに発展させていきたいものです。

\*教授 物質生命化学科

Professor, Dept. of Material and Life Chemistry



## 圧電素子を用いた振動発電手法に関する研究

藤本 滋\*

### Study on Method of vibration Power Generation using Piezoelectric Element

Shigeru FUJIMOTO\*

#### 1. 緒言

近年、携帯型の電子機器の普及や環境技術への関心の高まりから、従来は活用されて来なかった構造物や人間の動きに伴う振動を活用した自家発電式の発電手法の開発に注目が集まっている。とりわけ、家屋・建物や橋梁などの構造物や振動する機械設備においては、その振動状態をモニタリングすることで寿命診断や故障診断などが可能となることから、モニター用センサやその電源としての有用性が注目されてきた<sup>(1)~(4)</sup>。また、腕時計においては人体の動きを利用して1  $\mu\text{W}$  程度の発電を行うものが開発されている<sup>(5)</sup>。一方、マイクロデバイスにおいても、振動発電の研究が進んでおり、圧電体を用いた方式とエレクトレットを用いた方式による開発が報告されている<sup>(6)~(7)</sup>。このうち、発電効率の高い圧電素子を用いた振動発電については、簡素な構成により力学エネルギーを直接に電気エネルギーに変換できるという利点があるが、その出力電力が $\mu\text{W}$  レベルであることから、その出力特性の向上が課題となっている。また、チタン酸ジルコン酸鉛(PZT)等の圧電素子の圧電効果については、組成や添加物、素子作製プロセスに依存することが知られているが<sup>(8)~(10)</sup>、発電素子としての活用の際には、周辺回路とのインピーダンス整合を取ることも必要となることが知られている<sup>(11)</sup>。圧電素子を用いた応用として、人間の歩行時に床に作用する踏み込み力を用いた床発電<sup>(12)</sup>、硬球の衝撃力を用いた発電機<sup>(13)</sup>、ドアアラーム<sup>(14)</sup>などがこれまでに報告されている。

これらの圧電素子を用いた発電に関する従来報告においては、以下のような課題がある。

a) 圧電素子は組成や添加剤により圧電効果が変化する

ことは知られているが<sup>(8)</sup>、圧電効果と動荷重および加振振動数による発電特性は詳細には明らかにされていない。

b) これまでのエレクトレットなどの荷電体や圧電素子では、発生電力が小さく各種マイクロデバイスを駆動するには十分でないため、適用範囲が狭い。

c) 適用する全体回路の検討はなされているものの、圧電素子に作用する動荷重に対する発電特性の定式化が行われていない。

d) 上記の理論的な定式と実験的な結果との比較による検証が行われていない。

上記 a) について著者らが、PZT 素子に高い圧電効果を与えることができるニオブ Nb を添加剤として加えた圧電素子<sup>(8)</sup>を用いた振動発電実験を行い、ニオブ Nb の添加濃度、動荷重および振動数が圧電素子の発電出力(電圧、電力)に及ぼす影響を明らかにした<sup>(15)</sup>。

本研究では、上記 b) について発電特性をさらに向上させるためにニオブ Nb を最適添加濃度 1.0 mol% を添加した圧電素子<sup>(8),(15)</sup>を積層した積層圧電素子を用いて、以下のことを目的とした検討を行った。

(1) 動荷重が作用した際の振動条件と積層圧電素子の発電出力(電圧、電力)との関係を明らかにする。

(2) 圧電素子の積層数が発電出力(電圧、電力)に及ぼす効果の定量的な評価を行う。

これにより、実験的な観点から、従来の発電素子にはなかった最適な材料組成と積層構造を組み合わせた積層圧電素子の動荷重に対する電気出力に関する基本的特性を確認するとともに、それらの発電特性向上に資する要因を明らかにする。

#### 2. 積層 PZT 素子の製作および電気的特性

本研究では、PZT 素子に高い圧電効果を与えることができるニオブ Nb を添加剤として最適濃度である 1.0

\*教授 機械工学科

Professor, Dept. of Mechanical Engineering

mol %加えた圧電素子<sup>(8), (9)</sup>を用いてさらなる発電特性向上を図るため、これらを積層化した積層 PZT 素子の試作を行った。本研究では、積層数が 3, 5, 7 層の積層 PZT 素子を試作した。図 1 に単層 PZT 素子および積層 PZT 素子(3, 5, 7 層)の外観と構造を示す。



図 1 積層 PZT 素子の外観

試作した PZT 素子はジルコニウム Zr とチタン Ti の割合を 52 : 48 とし<sup>(8)</sup>、これにニオブ Nb が 1.0 mol% 添加された<sup>(15)</sup>。文献(15)においては、PZT 素子の電気的特性を改善するために、有力と思われるいくつかの添加剤のうち最も優れた Nb が選ばれた。さらに、Nb 添加濃度を 0 mol% から 5.0 mol% までの PZT 素子 8 種類を製作し、それぞれの振動発電特性が調べられた。その結果、PZT 素子は、Nb 添加濃度が 1.0 mol% の場合に最も優れた振動発電特性が得られることが確認されている。

試作した積層 PZT 素子を構成する各 PZT 素子の全ては直径 16 mm、厚さ 2.5 mm の円盤形である。また、各 PZT 素子の両面の電極面に銀ベースの導電性ペーストを塗布し焼成して電極とした。分極は 200 °C のオイルバス中で 2 kV/mm となるように電圧の印加を行って、エージングが行われた<sup>(15)</sup>。

図 2 に 7 層 PZT 素子の詳細な構造を示す。積層 PZT 素子は各 PZT 素子が向かい合う面が同極となるように積み重ねられる。積層 PZT 素子の各層の PZT 素子の間には直径 16 mm、厚さ 0.2 mm の銅板の電極が挿入され、素子の両端には直径 16 mm、厚さ 2 mm の黄銅電極板がそれぞれ導電性接着剤によって貼り付けられている。

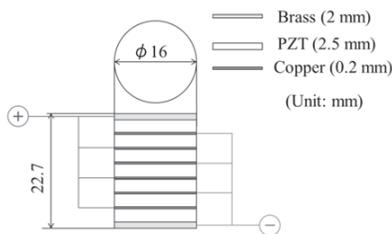


図 2 積層 PZT 素子 (7 層) の構造

同じ極の電極同士はリード線により結線され、+ 極、- 極に分けられている。なお、これら積層 PZT 素子は絶縁のため側面には厚さ約 1 mm のビニールチューブで覆われている。このような電極構造により、各 PZT 素子は

電氣的に並列となる。積層 PZT 素子に軸方向に動荷重が作用すると、各層の PZT 素子はこの動荷重に応じた電荷を放出するので、積層 PZT 素子は、単層 PZT 素子の積層数倍の電荷を放出することのできる効率の良い発電素子である。

このように製作された単層 PZT 素子および積層 PZT 素子(3, 5, 7 層)の圧電定数  $d_{33}$  および静電容量  $C$  の電気的物性が計測された。単層および各積層 PZT 素子の主な電気的物性を表 1 に示す。各物性において、圧電定数  $d_{33}$  は d33 メータ (IACAS 製 MODEL ZJ-6B)、静電容量  $C$  は LRC メータ (網エヌエフ回路設計ブロック製 ZM2353) によって測定された。なお、表 1 の中の 3, 5, 7 層 PZT 素子の  $d_{33}$  は上記 d33 メータで測定された結果を参考値として示したものである。

表 1 積層 PZT 素子の電気的特性

Layer number	Piezoelectric constance $d_{33}$ (pC/N)	Capacitance $C$ (pF)
1	320	1053
3	(952)	2843
5	(1582)	4790
7	(2170)	6726

表 1 に示される結果より、積層 PZT 素子の振動発電特性に影響を及ぼす電気的特性である圧電定数  $d_{33}$  および静電容量  $C$  は、単層 PZT 素子のほぼ積層数倍となっていることが確認された。これは、積層 PZT 素子の各層の PZT 素子が並列接続されているために各素子に発生した電荷が全て寄せ集められているためと考えられる。

以上のように PZT 素子を電氣的に並列に積層することにより、その電気的特性を積層倍できることが確認された。

### 3. 振動発電実験装置および実験方法

製作された単層 PZT 素子および積層 PZT 素子(3, 5, 7 層)の動荷重に対する発電特性を把握するための振動発電実験が行われた。図 3 に振動発電実験に用いた振動発電実験装置の構造を示す。振動発電装置は、振動台、振動台の動荷重を伝達する加力治具および各圧電素子を固定する圧電素子固定装置からなる。振動台の動荷重は加力治具とゴムブロックを介して横置きされた圧電素子に伝達される。圧電素子固定装置においては、左側に設置された初期圧縮調整治具により加えられた圧縮荷重がゴムブロックを介してゴムアダプタに挟まれた圧電素子に静的な初期圧縮荷重として与えられ、保持される。静的な荷重である初期荷重を与えるのは、振動発電実験時に圧電素子に作用する荷重を常に圧縮荷重状態に保つことである。なお、この初期圧縮荷重は静的荷重であるため

PZT 素子の動荷重による発電には寄与しない。ここで用いた積層 PZT 素子に荷重を与える鋼材(SS400)のアダプタは電極面の径よりも大きく、十分密着しているため、積層 PZT 素子の各 PZT 素子には均等に動荷重が与えられる。また、PZT 素子に作用する初期圧縮荷重および動荷重は PZT 素子の右側に設置された荷重計(共和電業製 LUK-A-5kNSA1)によって計測された。

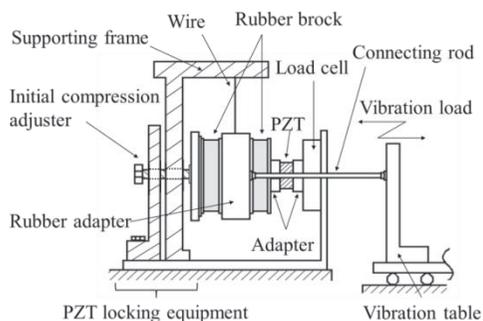


図3 振動発電実験装置

振動台から動荷重を受けることで圧電素子に発生した電圧は、デジタル電圧計(NEC 製 Omnicore RA2300)によって計測、記録された。このような積層 PZT 素子と電圧計との関係、計測される電圧は図4のような抵抗とコンデンサからなる回路図で示される。なお、図中の  $q(t)$  および  $V_p(t)$  は、PZT 素子から発生する電荷および電圧を示す。ここでは、電圧  $V_p(t)$  は、発生する電圧により生ずる電界の影響は小さく、主に動荷重印加の影響により PZT 素子が電圧を発生する電源と見なし計測を行う。また、 $C_p$ ,  $R_l$ ,  $V_l(t)$  は PZT 素子の静電容量、電圧計の抵抗および計測電圧を示す。電圧計の抵抗  $R_l$  の実測値は 1.012 M $\Omega$  である。これら計測されたデータはデジタルデータとして集録される。

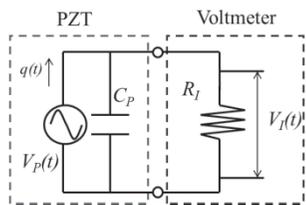


図4 積層 PZT 素子と電圧計の等価回路

また、発生電力については、単位時間当たりのエネルギー量であり電圧計の計測電圧  $V_l(t)$  と実測抵抗  $R_l$  より以下の式を用いて数値的に求められた<sup>(15)</sup>。

$$W = \int_{t_0}^{t_0+1} \{V_l(t)^2 / R_l\} dt \quad (1)$$

なお、式(1)の  $t_0$  は計測電圧  $V_l(t) = 0$  V となる時刻とし

た。このような装置を用いて圧電素子に作用する初期圧縮荷重として 1.0 kN を保持したまま振動台を動作させて、各 PZT 素子に正弦波動荷重を与えた。

振動発電実験においては、次のような実験条件のもとで実験が行われた。初期圧縮荷重 1.0 kN は、各 PZT 素子の軸方向の断面において 4.97 MPa の圧縮応力に相当する。この初期圧縮荷重の目的は、各 PZT 素子が常時圧縮荷重状態を保ち、安定した変動圧縮荷重を受けられるようにすることである。各 PZT 素子の発電出力(電圧、電力)に及ぼす影響を把握するため、正弦波加振条件は、  
(1) 加振振動数は 5, 10, 15, 20, 25, 30 Hz の 6 ケース  
(2) 動荷重は 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 N の 8 ケース

の組み合わせである合計 48 ケースとした。

これらの加振条件は、産業施設において振動源となっているエアコンプレッサー、ディーゼル・ガソリンエンジン、ポンプなどが稼働した際に支持脚を介して床に伝わる動荷重や人間が床や階段などを通行する際に床に伝わる動荷重を参考にして決定した。なお、動荷重は次のような条件を考慮して設定された。文献(16)によると PZT 素子に数百回程度の繰り返し圧縮応力を与えると 50 MPa 前後で電気的物性の劣化が生じ始める。このため、本実験では、長期動荷重に対して電気的物性に劣化が生じないよう PZT 素子に作用する最大圧縮応力が 10 MPa を下回るように安全側の動荷重を設定した。最大動荷重ケースである 400 N においては、PZT 素子断面に作用する動的な最大圧縮応力は 2.0 MPa 程度である。初期圧縮応力を加えると最大圧縮応力は約 7.0 MPa となるが、十分安全側の応力である。なお、PZT 素子の縦弾性係数は 30 GPa 程度であるため、10 MPa の応力が作用しても PZT 素子 1 枚に対するひずみは  $3.3 \times 10^{-4}$ 、変位は  $8.3 \times 10^{-7}$  m と非常に小さいため、変形量の影響は無視できる。ただし、積層 PZT 素子については電極と各 PZT 素子を導電性接着剤で張り付けた構造であるため、作用する初期圧縮応力や動的な応力が積層構造に及ぼす影響は不明であるが、この実験条件で実験を行い、振動発電特性を把握することとする。

以上の実験条件のもとで振動発電実験が行われ、各 PZT 素子に作用する動荷重および PZT 素子から発生する電圧が時刻歴データとして計測された。

#### 4. 実験結果

振動発電実験結果の例として、1, 3, 7 層 PZT 素子の動荷重振幅 400 N、加振振動数 30 Hz の場合における積層 PZT 素子に作用する動荷重振幅および発生電圧の時

刻歴を図5~7示す。本実験では、目標の動荷重を振動台の振動出力を手動により調整している。このため、ここで示されている動荷重は荷重計の実測値である。これらの図に示されるように、動荷重が正弦波であると7層PZT素子の出力電圧も正弦波となる。なお、図5~7においては、実際の測定波形には電気ノイズなどが含まれているためバンドパスフィルターによってフィルタリング処理が行われ、動荷重および発生電圧の加振振動数の±5 Hzの範囲の成分が取り出されている。この周波数範囲では加振振動数成分が卓越しており、ほぼ正弦波状の波形である。各PZT素子には、初期圧縮荷重1.0 kNが静荷重として作用しているが、静的荷重であり振動発電に寄与しないため、荷重時刻歴には含まれていない。

図5~7における、動荷重時刻歴と発生電圧時刻歴には約90°の位相差がある。これは、積層PZT素子からの発生電圧が荷重の時間的変化(荷重速度)に比例して発生するためであると考えられる<sup>15)</sup>。この結果は、PZT素子の発生電圧は荷重の時間変化とほぼ同位相の関係にあることを示している。

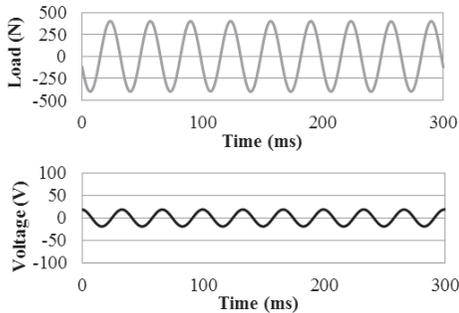


図5 単層PZT素子に作用する動荷重と発生電圧時刻歴 (動荷重30Hz, 400Nの場合)

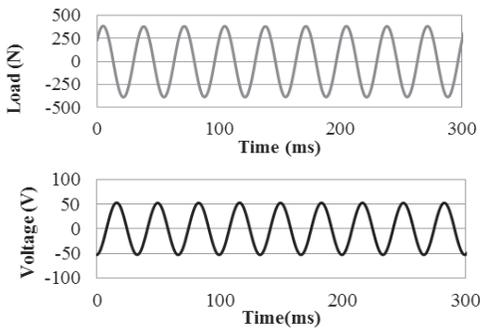


図6 3層PZT素子に作用する動荷重と発生電圧時刻歴 (動荷重30Hz, 400Nの場合)

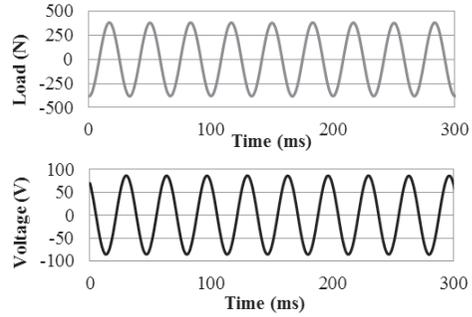


図7 7層PZT素子に作用する動荷重と発生電圧時刻歴 (動荷重30Hz, 400Nの場合)

4種類のPZT素子について、加振振動数30 Hzにおける動荷重に対する各PZT素子の発生電圧および発生電力の関係をそれぞれ図8, 9に示す。なお、発生電力は発生電圧より式(1)を用いて求めた。また、動荷重に対する発生電圧の関係を示した図8中では、実験プロットに対し、最小二乗法で求めた近似直線を図示した。動荷重に対する発生電力の関係を示した図9中では、実験プロットに対し、最小二乗法で求めた近似2次関数曲線を図示した。ここには示されていないが、この回路を流れる電流については示されている図8の電圧特性を電圧計の抵抗値  $R_V$  (1.012 M $\Omega$ )で除することにより推定ができる。7層PZT素子を例とすると、その値は本実験の範囲では3.9  $\mu$ A~87  $\mu$ A程度である。

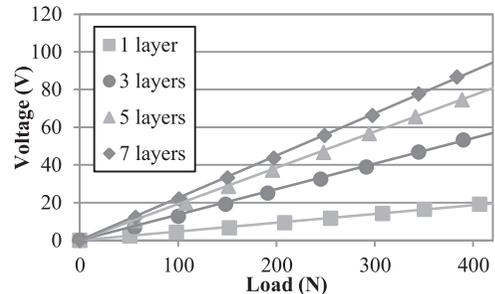


図8 動荷重が積層PZT素子の発生電圧に及ぼす影響 (動荷重30 Hzの場合)

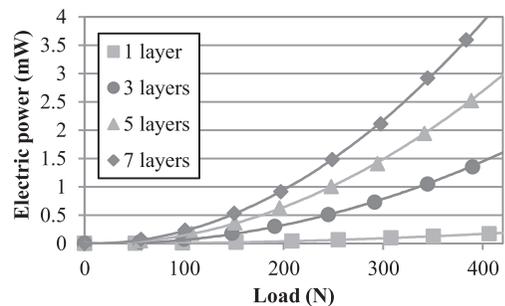


図9 動荷重が積層PZT素子の発生電力に及ぼす影響 (動荷重30 Hzの場合)

以上の結果より、以下のようなことが明らかにされた。

- (1) 動荷重に対して、積層 PZT 素子の発生電圧は比例して増加し、発生電力はほぼ 2 乗に比例して増加する。発生電力について、このような結果となったのは、式 (1)でも示されているように、発生電力は発生電圧の 2 乗に比例するためであると考えられる。このように、発電特性は、動荷重の大きさに依存するものと考えられる。
- (2) 発生電圧に関して、各積層 PZT 素子は単層 PZT 素子の場合に比べ、3 層 PZT 素子は 2.9 倍、5 層 PZT 素子は 4.1 倍、7 層 PZT 素子は 4.8 倍に増加する。これは、発生電圧の増加率は積層数に比例せずに低下することを示している。
- (3) 発生電力に関して、7 層 PZT 素子においては加振振動数 30 Hz、動荷重が 400 N の場合、約 3.8 mW であり、単層 PZT 素子に比べ約 23 倍の電力が得られた。発生電圧と同様に、積層数の増加割合に対して発生電力の増加率は低下する。

次に、動荷重振幅が 200 N、400 N の場合における加振振動数に対する各 PZT 素子の発生電圧および発生電力の関係を図 10～13 に示す。また、加振振動数 30 Hz、動荷重 400 N における PZT 素子の積層数に対する各 PZT 素子の発生電圧の関係を図 14 に示す。

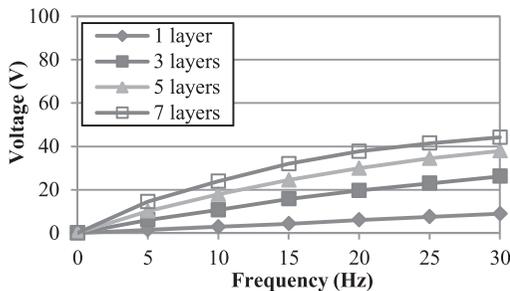


図 10 動荷重振動数が積層 PZT 素子の発生電圧に及ぼす影響 (動荷重 200 N の場合)

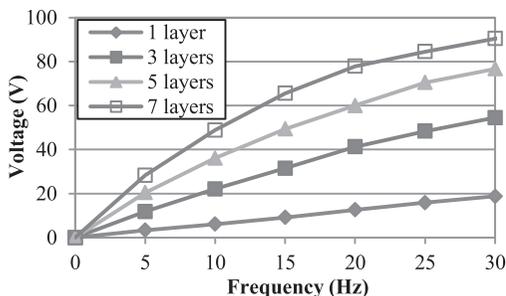


図 11 動荷重振動数が積層 PZT 素子の発生電圧に及ぼす影響 (動荷重 200 N の場合)

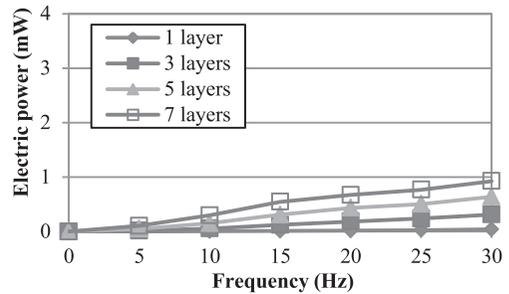


図 12 動荷重振動数が積層 PZT 素子の発生電力に及ぼす影響 (動荷重 200 N の場合)

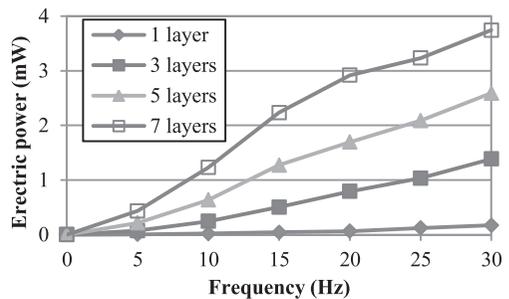


図 13 加振振動数が積層 PZT 素子の発生電力に及ぼす影響 (動荷重 400 N の場合)

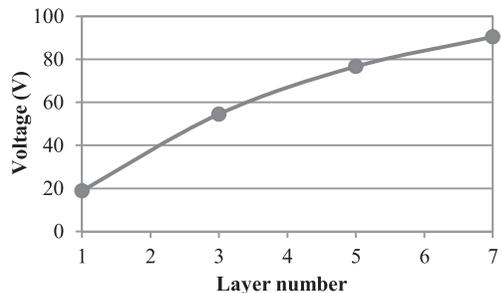


図 14 PZT 素子の積層数が発生電圧に及ぼす影響 (動荷重 30 Hz、400 N の場合)

これらの結果より、以下のようなことが明らかにされた。

積層数および加振振動数が増加すると、発生電圧、発生電力ともに増加する。これは、加振振動数が大きくなると荷重速度すなわち動荷重振幅と振動数の積は大きくなり、電荷が荷重速度に比例して増加するためである。ただし、増加率は飽和する傾向にある。これは、次のように説明できる。図 4 に示された積層 PZT 素子のコンデンサ (静電容量  $C_p$ ) と電圧計の抵抗  $R_v$  で構成される RC 回路全体のインピーダンスは、積層 PZT 素子の積層数が

増え静電容量が大きくなると、周波数依存性が強くなる。すなわち、積層数が増え、静電容量が大きくなるとインピーダンスが大きくなり、発生電圧の増加率は低下すると考えられる。また、動荷重の振動数が増加すると、同様にインピーダンスが大きくなり、発生電圧の増加率は抑制されるため、その周波数特性は加振振動数が増加するに連れて飽和する傾向にあると考えられる。図 10, 図 11 に示されるように、動荷重 200 N, 400 N 両方において同様の傾向があることから、積層 PZT 素子の発電特性は動荷重に関わらず加振振動数にも依存するものと考えられる。

以上の結果より、積層 PZT 素子は単層に比べ、大幅に発生電圧、発生電力を向上させることができた。その中でも 7 層 PZT 素子は単層、3, 5 層の PZT 素子に比べ、発電出力が高振動数帯で飽和する傾向にあるが、積層化によって発生電圧、発生電力ともに大幅な向上を確認できた。

## 5. 結言

PZT 素子の発電特性を向上させるため、Nb を添加した PZT 素子を積層し、それらの電気的物性を調べるとともに、振動発電実験を行い、動荷重下での PZT 素子の発生電圧を計測し、評価した。その結果、本実験結果の範囲では、以下の結論を得た。

- (1) 単層 PZT 素子および 3, 5, 7 層の積層 PZT 素子を製作し、電気的物性としてそれぞれの圧電定数  $d_{33}$ 、静電容量  $C$  を計測した。その結果、PZT 素子を積層すると圧電定数  $d_{33}$ 、静電容量  $C$  は積層数倍に増加することがわかった。
  - (2) 積層数を増加させると発電特性は大きく向上する。また、全ての素子において発生電圧は動荷重に対してほぼ比例して増加し、発生電力は 2 乗に比例して増加する。また、7 層 PZT 素子においては、本試験範囲(加振振動数 30 Hz, 動荷重 400 N まで)では最大 3.8 mW 程度の発電能力があり、単層の約 23 倍の電力を得た。
  - (3) PZT 素子の積層数および加振振動数の増加に伴い発生電圧および電力は飽和して行く。これは、PZT 素子の積層数を増加させると積層数に比例して圧電定数は大きくなるが、静電容量も比例して大きくなることから積層 PZT 素子のインピーダンスが増加し、加振振動数が大きい領域では発生電圧を強く抑制するようになるためである。このような特性は、PZT 素子の積層数には、最大電圧および最大電力を得るための最適値が存在し得ることを示している。
- 以上より、PZT 素子を積層することにより効率的に大

幅な電力が得られる見通しを得た。このように、動荷重が作用している場所に積層 PZT 素子を設置すると mW クラスの電力を得ることができるので、加速度センサ、圧力センサ、温度センサおよび送受信デバイスなどの様々なマイクロデバイスの駆動が可能となる。これらを組み合わせると外部電力不要の機器設備やインフラ施設の状態モニタリングシステムの構築も可能となり、産業施設のメンテナンス効率化や安全性の向上を図ることができるので、積層 PZT 素子の有用性は大きい。

なお、本研究は平成 25~27 年度文部科学省科学研究費補助金(基盤研究 C 課題番号 25420196)により実施されたものである。

## 参考文献

- (1) Glynne-Jones, P., Beeby, S.P. and White, N.M.: Towards a Piezoelectric Vibration-Powered Microgenerator, IEEE Proc. Science, Measurement and Technology, 148, 2 (2001), 68.
- (2) Arms, S.W., Townsend, C.P., Churchill, D.L., Galberath, J.H. and Mundll, S.W.: Power Management for Energy Harvesting Wireless Sensor, Smart Structures and Materials 2005: Smart Electronics, MEMS, BioMEMS and Nanotechnology, edited by Varadan, V.K., Proc. SPIE, 5763 (2005), 267.
- (3) Ng, T.H. and Liao, W.H.: Sensitivity Analysis and Energy Harvesting for a Self-Powered Piezoelectric Sensor, J. Intelligent Material Systems and Structures, 16, 10 (2005), 785.
- (4) Adachi, K. and Tanaka, T.: A Preliminary Study Piezoelectric Vibration Energy Harvester for Vibration Condition Monitoring Applications of Rotating Machinery, Proc. ASME Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, SMASIS2008-483 (2008), 739.
- (5) 春日政雄: 腕時計にみるマイクロエネルギー技術の最前線, マイクロメカトロニクス(日本時計学会誌), 44, 4 (2000), 1.
- (6) Shu Y.C. and Lien I.C.: Efficiency of energy conversion for a piezoelectric power harvesting system, J. Micromech. Microeng. 16 (2006), 2429.
- (7) Beeby, S.P. Tudor M. J. and White N.M.: Energy harvesting vibration sources for microsystems applications, Meass. Sci. Technol. 17 (2006), 175.
- (8) Kulсар, F.: Electromechanical properties of lead titanate zirconate ceramics modified with certain three or five- valent additions, J. the American Ceramic Society, 42(1959), 343.
- (9) Chu, S.Y., Chen, T.Y., Tsai, I.T. and Water, W.: Doping effects of Nb additives on the piezoelectric and dielectric properties of PZT Ceramics and its application on SAW device, Sensors and Actuators, 113(2004), 198.

- 
- (10) Fujii, T., Hishinuma, Y., Mita, T. and Arakawa, T.: Preparation of Nb doped PZT film by RF sputtering, *Solid State Communications*, 149(2009), 1799.
  - (11) Lefeuvre, E., Badel, A., Richard, C., and Guyomar, D.: Piezoelectric Energy Harvesting Device Optimization by Synchronous Electric Charge Extraction, *J. Intelligent Systems and Structures*, 16, 10 (2005), 865.
  - (12) 速水浩平: 圧電素子一究極のエコ発電, *マテリアルインテグレーション*, 21, 9 (2008), 20.
  - (13) Umeda, M. Nakamura, K. and Ueha, S.: Analysis of the transformation of Mechanical Impact Energy to Electrical Energy Using Piezoelectric Vibrator, *J. J. Applied Physics.*, Vol.35, (1996), 3267.
  - (14) 梅田幹雄,坂井康弘,中村健太郎: 圧電素子を用いた衝撃・振動による自己発電型ドアアラームシステム, *電気学会誌*, 123, 12, (2003), 534.
  - (15) 藤本滋, 一木正聡, 矢野聡, 北原時雄, “圧電素子を用いた振動発電手法に関する研究(第1報, 添加剤を加えた圧電素子の圧電素子の発電特性)”, *日本設計学会誌, 設計工学*, 47, 12, (2012), 54.
  - (16) 水野篤, 小田切望, 岡安光博: 圧電セラミックスの機械的負荷による材料特性変化と内部損傷評価, *日本機械学会論文集 A編*, 74, 739 (2008), 167.



## サービス業務の動的スケジューリング問題

石井 信明

### Dynamic Scheduling Problem on Service Operations

Nobuaki ISHII

#### 1. はじめに

最終製品の姿が明確なモノ作りと異なり、顧客対応、営業活動など、いわゆるサービス業務には、業務が完了した際の状況、すなわちゴールの姿が明確で無い場合が多い。また、ゴールが明らかであっても、そこに至るまでのプロセスと投入する資源は状況によりまちまちである。たとえば営業活動では、顧客から注文を得ることがゴールと言えるが、どのようなアプローチで時間と手間を何処まで掛けるかは状況しだいといえる。標準的な営業プロセスとマニュアルがあっても、プロセスの途中で受注に成功する、あるいは、営業活動を断念する場合もある。多くの資源を投入しても、受注に至らない、あるいは、受注をしても大きな損失をとまなうこともある。

このような営業活動をはじめとして、これまでサービス業務は、経験と勘に依存した管理が中心であった。しかし、サービス産業に限らず、第一次産業、第二次産業においても、現在はモノを売るだけに留まらず、サービス業務が成長の要になっている。そのため、サービス業務の生産性向上が求められる。例として取り上げた営業活動においても、プロセスの合理化、情報の一元化、投入資源管理が求められており、クラウドサービスのSalesForce.com (<https://www.salesforce.com/jp/>)をはじめとして多数の営業支援システムが業種を問わず急速に普及している。経済産業省においても、サービス産業の底上げのためには経験と勘だけに頼った経営ではなく、より効率化・標準化・正確化された経営プロセスを実践し、さらなる付加価値向上をめざす必要のあることから、中小企業をはじめとしたサービス事業者のイノベーションを促進することを目的に生産性向上の標準的な改善手法

として「サービス業務改善標準」を広めている。

([http://www.meti.go.jp/policy/servicepolicy/service/about\\_METI/](http://www.meti.go.jp/policy/servicepolicy/service/about_METI/))すなわち、経験と勘に依存した現在の管理を改め、サービス業務の生産性向上が急務であるといえる。

本報では上記の状況を背景に、サービス業務のスケジューリング問題について検討する。すなわち、(1)サービス業務の特性を考えたシミュレーションモデル、(2)限られた資源を効果的にサービス業務に投入する動的スケジューリング手法を検討する。

また、サービス業務のスケジューリング問題としてプロジェクト見積業務を取り上げ、シミュレーションモデルの見積業務プロセスへの適用と、動的スケジューリング手法の有効性について考察する。

#### 2. サービス業務のスケジューリング問題

一般にスケジューリング問題<sup>1)</sup>は、納期、各種資源を制約として、滞留時間最小費用最小を実現する計画を立案する問題と言える。その際の条件として、工程条件、各工程の作業時間などが与えられる。モノ作りを対象とした生産スケジューリングでは、生産システムの構成、工程順序により、ジョブショップスケジューリング、フローショップスケジューリング等の問題がある。また、スケジューリングで扱うデータの性格により、確定的スケジューリングと確率的スケジューリングに分類される。さらに、スケジューリング対象となるジョブ(オーダー)の到着の仕方から、全てのジョブの情報が予め明らかである静的スケジューリング問題と、ジョブが確率的かつ連続的に到着する動的スケジューリング問題に分類される。いずれの場合も、生産スケジューリング問題では成果物を得る工程は決まっており、その途中段階で終えても成果物を得られない。

これに対しサービス業務を対象としたスケジューリン

\*教授 経営工学科

Professor, Dept. of Industrial Engineering and Management

グでは、その目的、制約条件など、生産スケジューリングとは異なる観点が求められる。特に得られる成果について、モノ作りでは生産対象の仕様と数量は予め決まっているが、サービス業務の場合、投入する資源、工数、時間により、成果物の価値が変化する。また、サービス業務の場合、状況に応じて工程を省略することができる。

たとえば営業業務の場合、時間をかけて丁寧に顧客に対応することで、継続的に有利な条件の受注ができる可能性が高まる。しかし、他により有望な顧客が現れた場合、そちらに資源を振り分け、既存顧客への営業活動を縮小することも出来る。このようにサービス業務の場合、投入する資源、工数を変更することが出来、その結果として成果物に期待される価値が変化する。そのためスケジュールの評価についても、数量と価値が予め決まっている生産スケジューリングで滞留時間最小あるいは費用最小が評価の基本となるのに対し、サービス業務では、顧客満足度最大化、受注額最大化など、生み出す価値の最大化が評価尺度となる。サービス業務と生産スケジューリングの違いについて、表1に概要を示す。

表1 サービス業務と生産スケジューリングの比較

	サービス業務	生産スケジューリング
評価	期待利益、受注額、顧客満足度、など	コスト、滞留時間
工程	状況により工程を変更、省略	工程は固定
成果物	投入する資源と工数により価値が変化	仕様により予め決定

### 3. サービス業務のモデル化

前節に示したサービス業務の特徴から、図1に示す様に、サービス業務の一般モデルを設定する。

すなわちサービス業務では、業務をクラスNから1までの業務に分け、クラスNからはじめて、徐々に業務が詳細化すると想定する。状況により工程（業務プロセス）の省略、すなわち、クラス1になる前に業務を終える場合、終了となったクラスまでの業務で得た成果物により評価を行い、評価に応じて目標の設定を変更する。成果物評価を終えると、そのジョブはモデルから離れるものとする。また、工程はジョブに必要な資源が割り当てられたときに開始される。必要な資源が割り当てられるまで、ジョブは  $Q_N \sim Q_1$  の待ちファイルにて待機する。評価をうける期限までに必要な資源が割り当てられないジョブは、その時点で待ちファイルから抜け、その段階までの成果物により評価を受けることになる。

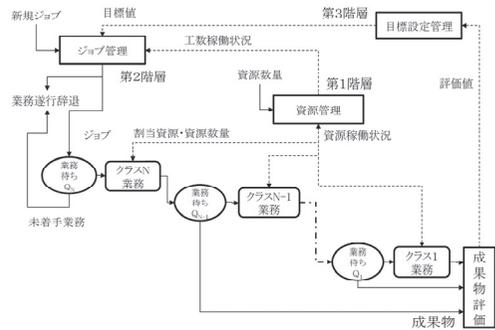


図1 サービス業務の一般モデル

また一般モデルでは、サービス業務を次ぎの3階層で管理することを想定している。

- ・第1階層（資源管理）：利用出来る資源の範囲内で、待ちファイル内の各ジョブに対し業務遂行に必要な資源を配分する。
- ・第2階層（ジョブ管理）：到着するジョブについて、設定された目標値から、業務行うか辞退するかを判断する。
- ・第3階層（目標設定管理）：サービス業務遂行の結果から、目標値を逐次修正する。

### 4. スケジューリング手法

スケジューリングについては、これまでに多数の手法が提案されている。本報では、サービス業務モデルの特徴に合わせ、柔軟性の高い動的スケジューリング手法として、シミュレーションを利用したスケジューリングを示す。

図2に、スケジューリング・シミュレーションの基本的な仕組みを示す。すなわち、サービス業務モデルを利用して、新規にジョブが到着する、あるいは、工程のいずれかが終了すると、シミュレーションルールに従いサービス業務の進行をシミュレーションする。シミュレーションルールとは、前節に示した各管理階層で用いるルールである。たとえば第1階層（資源管理）では、待ちファイル内の各ジョブへの資源の配分方法がルールとなる。

シミュレーションは、サービス業務がどの様に進行するのかを予測することになる。シミュレーション結果に改善の余地がある場合はシミュレーションルールを変更し、新たにシミュレーションを行う。改善の余地がないと判断されると、その際のシミュレーションルールが実環境における最適な動的スケジューリングのルールとなる。

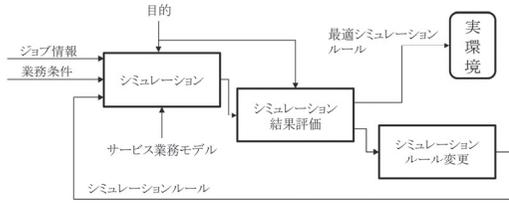


図2 スケジューリング・シミュレーションの仕組み

5. プロジェクト見積業務への適用

プロジェクト見積業務は、入札期限を納期とするプロジェクト<sup>(6)</sup>といえる。ただし通常の繰り返し業務と異なり、成果物への要求品質、投入工数は、見積りの都度決めることができる。品質の高い見積りを行うには多くの工数を投入するが、その必要が無い場合は、ほどほどになる。すなわちプロジェクト見積業務では、出来るところまでで終了とし、入札に臨むことが出来る。ただし、不十分な工数では見積精度が低く、受注をしても期待利益は大きくなく、赤字プロジェクトの可能性も高まる。このようなプロジェクト見積業務の特徴は、サービス業務と類似点が多い。以下では、先示したサービス業務の一般モデルとスケジューリング手法を、プロジェクト見積業務に適用した例を示す。

5.1 プロジェクト見積業務のモデル化

本報では、見積業務を図3に示す見積業務モデルに表現する<sup>(46)</sup>。ここでは、図1で示した「ジョブ」を「見積案件」と見なしている。また、AACE International<sup>(47)</sup>では見積りに5段階のクラスを設定しているが、本モデルでは、入札までの見積業務として3段階のクラスを設定する。ここで、クラス4が最も見積精度が低く、クラス3、クラス2の順に精度が高くなる。

なお本モデルでは、3節示した管理階層を、以下の様に、見積工数配分、見積案件選択、見積目標設定の3階層に置き換えている。

- ・第1階層（見積工数配分）：予め設定した工数制約の範囲内で、見積り待ちの案件に各クラスの見積りに必要な工数を配分する。工数が配分された最終の見積りクラスにより、案件の期待利益が定まる。
- ・第2階層（見積案件選択）：到着する見積案件について、受注額目標、期待利益目標の観点から、見積りを行うか、辞退するかを判断する。
- ・第3階層（見積目標設定）：入札結果、受注残から、受注額目標、期待利益目標を逐次設定し、プロジェクト受注量と利益を確保する。

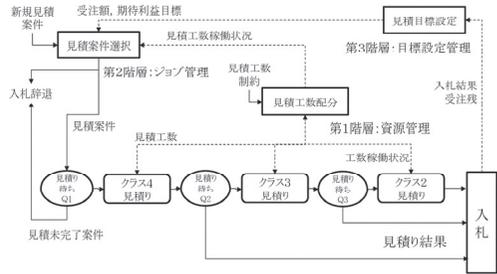


図3 見積業務モデル

本モデルでは見積り待ち Q1 の状態のまま入札期限までに見積工数が配分されない見積案件については、入札辞退としている。また、見積り待ち Q2, Q3 から入札を行う状況は、見積工数制約から入札期限までクラス2までの見積りに必要な工数が確保出来ず、クラス4、あるいは、クラス3の見積り結果で入札に臨んでいることを示す。これらの場合、クラス2の見積りによる入札に比べ延べ見積工数が少ないため、プロジェクトからの期待利益も小さくなる事が知られている<sup>(76)</sup>。

5.2 ヒューリスティック手法

見積業務モデルを前提に、確率分布に基づき動的に到着する見積案件からの期待利益最大化を目的とした、見積案件への見積工数配分と見積案件選択に関する簡易なヒューリスティック手法<sup>(48)</sup>を示す。なお、ここでは、以下の前提条件を設定する。

前提条件

- ・見積案件は確率分布に従い到着する
- ・予め、各見積案件の期待利益、見積工数、見積期間が、見積りクラス別に決まっている
- ・見積案件の受注確率が予め設定される

(1) 見積案件選択

見積案件選択では、売上、利益など財務上の視点だけでなく、顧客との長期的な関係、新規分野開拓など、多くの要素を考慮した意思決定が必要とされる。ここでは、あくまでも期待利益最大化を目指した見積業務の視点から、次の様に選択を行う。

Step 1：到着した新規見積案件  $i$  に投入する延べ見積工数 (MH: Man-Hour; 人時) 当たりの期待利益として、見積工数期待利益 [¥/MH]  $EPPC_i$  を(1)式により求める。ただし、期待利益、見積工数は、クラス2の見積りによる値を用いる。

$$EPPC_i = EP_i + EC_i \quad (1)$$

ここで、 $EPPC_i$  は見積案件  $i$  の見積工数期待利益、 $EP_i$  は見積案件  $i$  の期待利益、 $EC_i$  は見積案件  $i$  の延べ見積工数を示す。

Step 2：見積案件  $i$  が到着した時の稼働中見積工数  $NU$  (MH 稼働数) が、 $EPPC_i$  の値により定める見積工数稼働上限  $NU_{up}$  ( $EPPC_i$ ) より小さい場合、見積りを行う。 $NU$  が、 $NU_{up}$  ( $EPPC_i$ ) 以上である場合、入札を辞退する。すなわち、見積工数に余裕が無い場合は、期待利益の大きな案件のみに見積りを制限し、余裕がある場合は、期待利益の制約を緩和することで、見積工数の適度な稼働と新規見積案件数をバランスさせ、見積案件からの期待利益最大化を実現する。たとえば図 4<sup>9)</sup> の場合、見積り実施と入札辞退の領域を分ける線が、 $NU_{up}$  ( $EPPC_i$ ) を示している。

$NU_{up}$  ( $EPPC_i$ ) は、見積案件の到着順序など、多くの条件により変化するため、最適値の決定は簡単ではない。本報では、図 4 に示すように、探索する点を 3 点とし、見積業務モデルを用いたシミュレーション実験により、見積案件からの期待利益の平均値が最大となる  $NU_{up}$  ( $EPPC_i$ ) を試行錯誤的に探索する方法を採用する。探索では、 $(N_2, E_2)$ 、 $(N_3, E_3)$ 、 $(N_1, E_1)$  の順に期待利益の平均値が最大となる点を求め、徐々に、入札辞退範囲を広めていく。

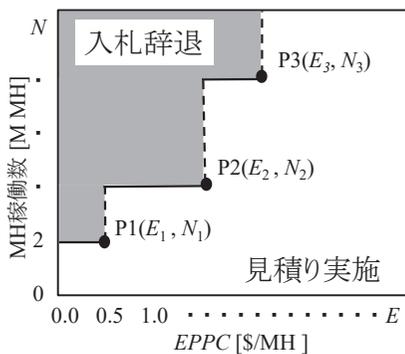


図 4 見積り実施と入札辞退の領域

(2) 見積工数配分

見積工数配分では、見積りの終了により見積工数が解放された場合に、 $Q1$ 、 $Q2$ 、 $Q3$  で見積り待ちの案件の中からディスパッチングルールにより案件を選択し、見積工数を配分する。適用するディスパッチングルールとしては、最も公平な選択を行うとされる FIFO (First-In

First-Out) ルール、期待利益基準のルール、納期基準のルールなどが考えられる。

5. 3 シミュレーション実験

図 3 の見積業務モデルを基に見積業務シミュレータを作成し、シミュレーション実験により提案手法を検証する。シミュレーションモデルの作成と実験には、離散系シミュレーションシステムの VisualSlam<sup>®</sup>を使用した。また、 $NU_{up}$  ( $EPPC_i$ ) の決定は、 $(N_2, E_2)$ 、 $(N_3, E_3)$ 、 $(N_1, E_1)$  の順で値を仮定し、複数回のシミュレーションから得られる見積案件期待利益の平均と分散から、Nelson らによる最適シナリオの選別方法<sup>10)</sup>を使用して行った。なお、利用可能な見積工数を 1 期あたり 16 [M\_MH] (16,000MH) とした。また、シミュレーション期間は 1200 [期] とした。

シミュレーション実験では、見積案件の期間あたり到着数を変更したケース A、ケース B、ケース C を表 2 のように設定した。それぞれのケースでは、見積案件を小規模、中規模、大規模とし、見積クラス別の期待利益、受注確率、見積期間、見積工数などを表 3、4、5 のように設定した<sup>9)</sup>。

各ケースでは、「成り行き」、「案件選択」の 2 つの方法による比較を行った。ここで「成り行き」とは、見積案件の選択を行わず、到着する案件全てを見積する方法である。これに対し「案件選択」では、5.2 節のヒューリスティック手法により、到着した案件の選択を行う。ただしどちらの場合も、見積工数配分は、FIFO ルールに従うものとする。

図 5 に、各ケースの 1 期当たり平均期待利益を示す。また表 6 に、各見積案件に対する見積クラスと入札辞退の割合を示す。

図 5 から、全ケースにおいて見積案件の選択を行う「案件選択」が見積案件の選択を行わない「成り行き」の場合と比べ期待利益が大きく、5.2 節のヒューリスティック手法による見積案件の選択が期待利益向上に有効であるといえる。また表 6 から、全ケースにおいて、「案件選択」では「成り行き」に比べ入札辞退とクラス 2 による見積りの割合が大きくなる。

表 2 見積案件到着間隔 [見積案件/期間]

	三角分布 パラメータ	見積案件規模		
		小	中	大
ケース A	最小値	1.05	2.70	3.15
	最頻値	1.50	3.00	4.50
	最大値	1.95	3.90	5.85
ケース B	最小値	0.84	1.68	2.52
	最頻値	1.20	2.40	3.60
	最大値	1.56	3.12	4.68
ケース C	最小値	0.70	1.40	2.10
	最頻値	1.00	2.00	3.00
	最大値	1.30	2.60	3.90

表3 見積案件期待利益 [MM\$] (10<sup>6</sup>\$)

	見積案件規模		
	小	中	大
クラス4	0.5	1.0	1.5
クラス3	5.0	10.0	15.0
クラス2	20.0	40.0	60.0

表4 見積案件受注確率 (全ケース)

		見積案件規模		
		小	中	大
三角分布 パラメータ	最小値	0.05	0.05	0.05
	最頻値	0.20	0.30	0.40
	最大値	0.90	0.90	0.90

表5 見積り条件 (全ケース)

		見積案件規模		
		小	中	大
見積り期間		8	8	8
見積期間	クラス4	1	1	1
	クラス3	2	2	2
	クラス2	3	3	3
見積MH [MMH]	クラス4	1	2	3
	クラス3	2	3	4
	クラス2	3	4	6

特に、見積案件の到着数が最も多いケースCで、他のケースに比べて期待利益の改善効果が大い。すなわちケースCでは、期待利益が98から166と68改善しており、改善額32および51のケースA、Bに比べ、およそ1.3~2倍の改善となっている。これは表6に示す様に、見積案件の到着が最も多いケースCでは、「成り行き」の場合、見積工数の不足からクラス3の見積りの割合が87.0%と最も多いが、「案件選択」では入札辞退により見積案件数を制御することで、期待利益の大きいクラス2の見積り率が31.8%と「成り行き」に比べて増加したことが、期待利益の改善につながったと言える。対照的に、見積案件の到着が最も少ないケースAでは、「成り行き」の場合でもクラス2の見積り率が49.9%であり、ある程度効果的な見積りを行っているといえる。すなわち見積案件が少ない場合は、「案件選択」による期待利益向上の効果が小さいと言える。さらに図5から、今回のシミュレーション条件の場合、見積案件の到着数が増加するに従い「案件選択」では期待利益が増加するが、「成り行き」では期待利益が減少することがわかる。

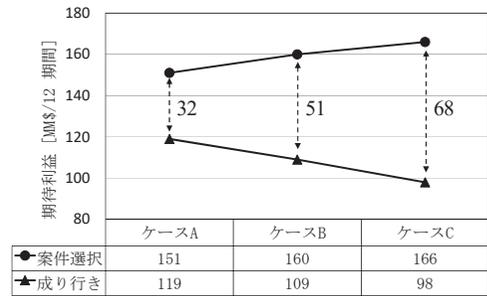


図5 各ケースの期待利益

表6 見積りのクラス別割合 [%]

	ケースA		ケースB		ケースC	
	案件 選択	成り 行き	案件 選択	成り 行き	案件 選択	成り 行き
入札辞退	38.7	0.0	50.4	0.0	62.0	0.0
クラス4	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.6
クラス3	7.6	50.1	8.5	71.9	6.2	87.0
クラス2	53.7	49.9	41.2	28.1	31.8	12.3

図6<sup>(5)</sup>は、ケースAにおける $NU_{up}$  (EPPC)を示す3点(0.4, 8) (0.8, 11) (1.0, 15)と、それらの点を結んだ入札辞退範囲を示している。たとえば、図6においてEPPCが0.7の新規の見積案件が到着した場合、 $NU$ が11以上であれば入札を辞退し、11未満であれば、見積りを実施することを示している。

また図7と8<sup>(5)</sup>は、ケースBおよびCの入札辞退範囲を示している。図6, 7, 8より、見積案件の到着数が増加するに従い、入札辞退の範囲が拡大することがわかる。その際、MH稼働数制約の方が期待利益率を基にしたEPPCよりも感度が高いことから、今回のシミュレーション実験のデータ設定においては、入札辞退の判断は、MH稼働数が支配的であると想定できる。

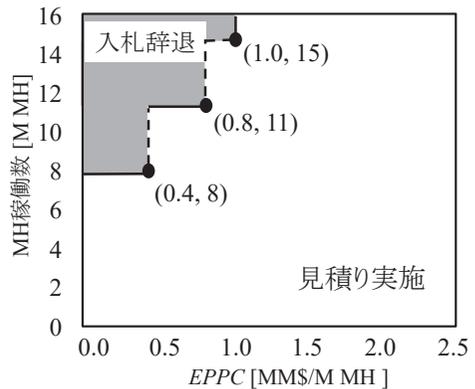


図6 入札辞退範囲 (ケースA)

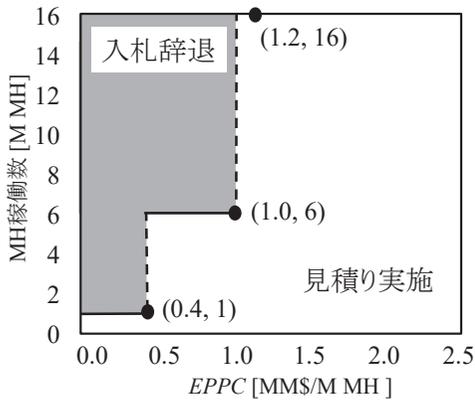


図7 入札辞退範囲 (ケースB)

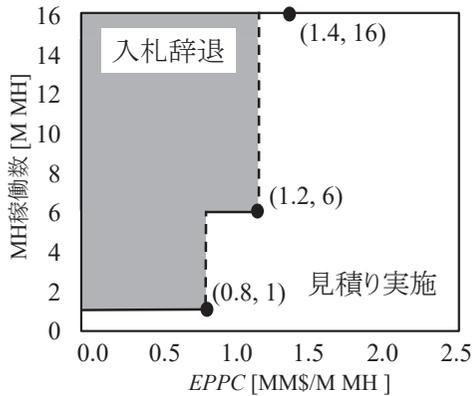


図8 入札辞退範囲 (ケースC)

## 6. まとめ

本報では、生産性向上が急がれているサービス業務を取り上げ、サービス業務を効率化するためのスケジューリング問題について検討した。すなわち、サービス業務の特性を考えたモデルを示し、限られた資源を効果的にサービス業務に投入する動的スケジューリング手法を検討した。さらに、サービス業務のスケジューリング問題の例としてプロジェクト見積業務を取り上げ、一般モデルとして示したサービス業務のモデルを見積業務に適用し、動的スケジューリング手法とその有効性について考察した。

今後の課題として、例として示したプロジェクト見積業務を含め、事例の蓄積によるモデルの検証と改良があげられる。サービス業務には、プロジェクト見積業務と同様に、納期の設定はあるが成果物の最終の姿が一樣でなく、資源量と時間をかけることでより多くの成果が期待出来る問題がさまざまな分野に存在する。たとえば、営業活動、メンテナンス、トレーニング、ソフトウェア

テストなどは、期待される成果が投入する資源量と時間に依存する。これらの問題は、これまで管理技術の分野において中心的な研究対象とはなっていなかったが、サービス業務の生産性向上の観点から、今後、新たな管理技術としての研究の可能性を検討する必要がある。

## 謝辞

本報をまとめるにあたり、東京工業大学名誉教授 村木正昭先生、専修大学 高野祐一先生から有益な助言をいただきました。ここに感謝をいたします。

## 参考文献

- (1) 田中克己, 石井 信明, "スケジューリングとシミュレーション", (1995), コロナ社.
- (2) 日本プロジェクトマネジメント協会, "改訂3版 P2M プログラム&プロジェクトマネジメント標準ガイドブック", (2014), 日本能率協会マネジメントセンター.
- (3) Turner, J. R., Handbook of project-based management, (2014), McGraw-Hill.
- (4) 石井信明, 高野祐一, 村木正昭, "プロジェクト見積業務の動的スケジューリング問題", スケジューリング・シンポジウム2015講演論文集, (2015), pp. 119-124.
- (5) Ishii, N., Takano, Y., and Muraki, M., "A dynamic scheduling problem in cost estimation process of EPC projects," Proceedings of the 6th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications, (2016), pp. 187-194, Lisbon, Portugal.
- (6) The Association for the Advancement of Cost Engineering, "Cost estimate classification system – As applied in Engineering, Procurement, and Construction for the process industries," AACE International Recommended Practice No. 18R-97, (2011)
- (7) Ishii, N., Takano, Y., and Muraki, M., "A revised algorithm for competitive bidding price decision under limited engineering Man-Hours in EPC projects," Oukan, Journal of Transdisciplinary Federation of Science and Technology, (2016), 10-1, pp. 47-56.
- (8) Ishii, N., Takano, Y., and Muraki, M., "A Heuristic bidding price decision algorithm based on cost estimation accuracy under limited engineering man-hours in EPC projects," Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications Advances in Intelligent Systems and Computing, (2015), 319, pp.101-118.
- (9) 森戸 晋, 相沢りえ子, 貝原俊也, "Visual SLAM によるシステムシミュレーション", (2001), 構造計画研究所.
- (10) Nelson, B. L., Swann, J., Goldsman, D., and Song, W., "Simple procedures for selecting the best simulated system when the number of alternatives is large," Operations Research, 49-6 (2001), pp. 950-963.

# 一般化集荷配送巡回セールスマン問題とその応用

片桐英樹\*

## Generalized Pickup and Delivery Traveling Salesman Problems and Their Applications

Hideki KATAGIRI\*



### 1. はじめに

巡回セールスマン問題(TSP: Traveling Salesman Problem)[1, 4, 32]とは, 複数の訪問先を一度ずつ巡回するときに, 全ての経路の中で最も短い巡回路を求める問題である. TSPはNP困難な組合せ最適化問題の一つであり, 基盤配線, 配送計画, スケジューリング, X線による結晶実験, タンパク質の構造解析, VLSI設計など多くの応用をもつ.

巡回セールスマン問題には様々なバリエーションがあり[10], その中の一つに一般化巡回セールスマン問題(GTSP: Generalized TSP)[8, 20, 14]が挙げられる. 一般化巡回セールスマン問題とは, 訪問先が複数のグループに分かれており, 各グループに属する点を1点ずつ訪問する巡回路の中で最も短い巡回路を求めるTSPである.

別のバリエーションとして, 集荷配送巡回セールスマン問題(PDTSP: Pickup and Delivery TSP)[7]がある. 集荷配送巡回セールスマン問題とは, ある訪問先(配送点)に行く前に対応する訪問先(集荷点)に行かなければならないという先行順序制約が付加されたTSPである. 著者ら[15, 17, 18, 19]はプリント基板検査経路最適化問題をPDTSPでモデル化し, 効率的な解法を開発した. 共同研究企業が販売する基板検査機器に開発アルゴリズムを組み込み[24], 最大で40%の検査時間が短縮[22]され, 現場で大きな成果が得られている.

GTSPとPDTSPの2つの問題を組合せると, クラスタ間の先行順序制約を考慮した一般化集荷配送巡回セールスマン問題(GPDTSP: Generalized Pickup and Delivery TSP)を考えることができる. この問題は, 近年に著者らによって, 新しいタイプの検査機器を用いたプリント基板検査経路最適化問題[15]を応用例として導入された. 本稿では, GPDTSPについて, 関連研究と著者らの

研究成果を概説する.

本稿の構成は以下の通りである. まずGPDTSPを導入するための準備として, 2節, 3節では, それぞれGTSP, PDTSPの定式化とその応用について述べる. 4節では, 本題であるGPDTSPを導入し, 5節でGPDTSPでモデル化される現場の問題として, プリント基板検査経路最適化問題について紹介する. 6節でまとめと今後の課題について述べる.

### 2. 巡回セールスマン問題(TSP)

TSPとは, 都市の集合と各2都市間の移動コスト(距離など)が与えられたとき, 全ての都市を一度ずつ巡り出発地に戻る巡回路の総移動コストが最小の巡回路を求める組合せ最適化問題である.

TSPの定式化にはいくつかの方法があるが, ここでは紙面の制約により, その中の一つを紹介する.  $V$ を都市(訪問先)を表す点集合,  $c_{ij}$ を点 $i, j$ 間のコスト(距離など)とする. また,  $x_{ij}$ を点 $i, j$ 間の枝を経路に含める場合に1, 含めない場合に0の値をとる0-1決定変数とする. このとき, TSPは次の数理計画問題として定式化できる.

$$\min \sum_{i \in V} \sum_{j \in V \setminus \{i\}} c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{j \in V \setminus \{i\}} x_{ij} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{i \in V \setminus \{j\}} x_{ij} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$\sum_{i, j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1, \quad \forall S \subset V, S \neq V, |S| \geq 2 \quad (4)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j \in V (i \neq j) \quad (5)$$

ここで, (2)式は点 $i$ から出る枝が丁度1本であること, また, (3)式は, 点 $j$ に入る枝が丁度1本であることを規定す

\*教授 経営工学科

Professor, Dept. of Industrial Engineering and Management

る。(5)式は部分巡回路が形成されることを避けるための制約式である。

巡回セールスマン問題の名前の起源は明確ではなく、1940年代後半のランド社のFloodによるプロジェクトで取り上げられたのが最初と言われている。TSPの歴史や背景等に興味のある読者は他の著書[1, 4, 32]を参照されたい。

3. 一般化巡回セールスマン問題(GTSP)

一般化巡回セールスマン問題(GTSP : Generalized TSP)とは、TSPにおいて、点が複数のグループ(ここではクラスタと呼ぶ)に分かれており、各クラスタに属する点をつずつ通ってできる巡回路の中で最短のものを求める問題である。

TSPが全ての点を通る最短巡回路を求める問題であるのに対し、GTSPは全てのクラスタを通る最短巡回路を求める問題であり、点をクラスタに”一般化”している。GTSPにおいて全てのクラスタが頂点1つから構成される場合はTSPとなるため、GTSPはTSPと同じくNP困難に属する問題である。

GTSPは1960年代に、コンピュータ記録のバランシングや福祉事務所の訪問経路を決定する問題でHenry-Labordere[12], Saskena[28], Srivastavaら[31]によって広められた。簡単な例として、図1に示されるように都市ごとに営業区域が分割されている状況での配送問題が考えられる。

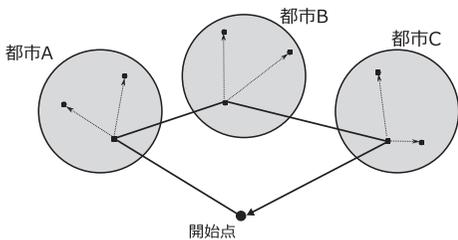


図1 GTSPとなる配送問題の例

この例では、各都市(営業区域)に複数の拠点となる営業所が存在しており、各都市でいずれか1つの営業所に訪問して配送すればよい(各都市内への配送はその営業所に任せる)という状況で最短巡回路を求めることが目的である。営業所を点、都市をクラスタと見なせば、この配送問題はGTSPとなり、図の実線矢印が最適解(最適巡回路)となる。

GTSPの定式化にはTSPと同様、いくつかの定式化の方法がある。ここでは、一例として、Noonら[23]が提案した定式化を紹介する。点集合 $V$ と枝集合 $E$ から構成されるグラフ $G = (V, E)$ において、点集合がクラスタ $C_p$ ,

$p = 1, 2, \dots, m$ にグループ化されているものとする。実行可能な経路 $T$ を構成する枝の集合を $E_T$ 、点集合を $N_T$ とする。このとき、GTSPは次のような数理計画問題として定式化できる[23]。

$$\min \sum_{i \in V} \sum_{j \in V \setminus \{i\}} c_{ij} x_{ij} \tag{6}$$

$$\text{s. t. } \sum_{i \in C_p} \sum_{j \in V \setminus C_p} x_{ij} = 1, p = 1, 2, \dots, m \tag{7}$$

$$\sum_{i \in V \setminus C_p} \sum_{j \in C_p} x_{ij} = 1, p = 1, 2, \dots, m \tag{8}$$

$$\sum_{i \in V} x_{ij} - \sum_{k \in V} x_{jk} = 0, \forall j \in V (i \neq j \neq k) \tag{9}$$

$$\sum_{(i,j) \in E_T} x_{ij} - \sum_{k \in N_T} \sum_{(k,l) \in E} x_{kl} \leq |A_T| - 1 \tag{10}$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in V (i \neq j) \tag{12}$$

(7)式はクラスタ $C_p$ からそれ以外のクラスタに出る枝は1本のみ、(8)式は逆に入る枝が1本のみ、(9)式は点 $j$ について入る枝と出る枝の数が等しいという制約である。(11)式は、部分巡回路を排除し、同じ枝を2度通ることを禁止している。GTSPの詳細や応用に興味のある読者は他の文献(例えば[10])を参照されたい。

4. 集荷配送巡回セールスマン問題(PDTSP)

集荷配送巡回セールスマン問題(PDTSP: Pick and Delivery TSP)とは、商品が置いてある場所(集荷点)を訪問して商品を受け取ってから顧客がいる場所(配達点あるいは配達点)にその商品を届けるというように、集荷点と配達点の間に先行順序制約が存在するTSPである。

図2においては、点 $A, B$ で集荷した荷物をそれぞれ点 $A', B'$ へ配送する状況を考えており、点 $A'$ の前に点 $A$ 、また点 $B'$ の前に点 $B$ を訪問しなければならないという先行順序制約が存在する。

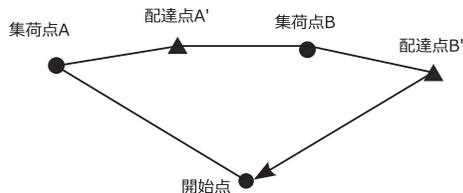


図2 PDTSPとなる配送問題の例

TSPにおいて「ある点 $A$ を訪問する前に、必ず点 $B$ を訪問しなければならない」という先行順序制約を追加された問題は一般に先行順序制約付き巡回セールスマン問題[2](TSPPC: TSP with Precedence Constraints)と呼

ばれる。PDTSPでは集荷点と配送点がペアになっており（ある集荷点で集めた商品の配送先は一つのみ）、一方で、TSPPCでは必ずしもペアになっている必要はない。したがって、PDTSPはTSPPCの特殊なケースと見なすことができる。PDTSPにおいて、集荷点と配送点の区別を取り除けばTSPとなるため、PDTSPはNP困難な組合せ最適化問題である。

次にPDTSPの定式化について紹介する。集荷点の集合を  $P = \{1, 2, \dots, n\}$ 、配送点の集合を  $D = \{n+1, n+2, \dots, 2n\}$  とする。ここで、集荷点  $i \in P$  と配送点  $n+i \in D$  は1対1に対応しており、集荷点の番号に  $n$  を加えた点が対応する配送点とする。また、始点（出発点）を  $0$ 、終点を  $2n+1$  とする。始点と終点が一致する場合は、始点と終点の距離を  $0$  とすればよいから、このようにしてもモデルとして一般性は失わない。任意の部分集合  $S \subseteq V$  に対して、 $\delta(S) \triangleq \{(i, j) \in E : i \in S, j \notin S \text{ or } i \notin S, j \in S\}$  と定義する。また、点  $i$  に対して、 $\delta(i) \triangleq \delta(\{i\})$  とする。このとき、PDTSPは次のように定式化される[7]。

$$\min \sum_{i \in V} \sum_{j \in V \setminus \{i\}} c_{ij} x_{ij} \quad (13)$$

$$\text{s. t. } x_{0, 2n+1} = 1 \quad (14)$$

$$x(\delta(i)) = 2, \forall i \in V \quad (15)$$

$$x(\delta(S)) \geq 2, \forall S \subseteq V, 3 \leq |S| \leq |V|/2 \quad (16)$$

$$x(\delta(S)) \geq 4, \forall S \in \mathcal{U} \quad (17)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in V (i \neq j) \quad (18)$$

ここで、 $\mathcal{U}$  は  $0 \in S, 2n+1 \notin S, 3 \leq |S| \leq |V| - 2$  を満たし、 $i \notin S$  かつ  $n+i \in S$  となる集荷点  $i \in P$  が存在するような集合  $S \subseteq V$  の族である。また、枝集合  $E'$  に対して  $x(E')$  は  $x(E') \triangleq \sum_{(i,j) \in E'} x_{ij}$  で定義される。(14)式は始点と終点が接続されていること、(15)式は各点に接続する枝が2本であることを規定する制約であり、(16)式は部分巡回路除去制約である。(17)式は集荷点  $i \in P$  と対応する配送点  $n+i \in D$  の間で満たされるべき先行順序制約であり、 $\mathcal{U}$  の定義から集合  $S$  と  $S$  以外の点集合の間には4本以上接続する必要がある（詳細は[7]を参照）。

著者ら[15, 17, 18]はプリント基板検査経路最適化問題が集荷配送巡回セールスマン問題[3, 7, 13, 27]の一種してモデル化できることを示し、先行順序制約付き巡回セールスマン問題[29]として定式化した。また、実用時間内に良質の準最適解を得るためのメタ戦略に基づくアルゴリズムも提案している[19]。著者らが開発したアルゴリズムは共同研究先のプリント基板検査機器に組み込まれ[24]、最大で約40%の検査時間の短縮化に成功し[22]、現場で大きな成果が得られている。

## 5. 一般化集荷配送巡回セールスマン問題(GPDTSP)

4節で紹介したPDTSPでは、(集荷点と配送点という)点の間に先行順序制約が課されていたが、これを(集荷クラスタと配送クラスタという)クラスタ間の先行順序制約に拡張したものがGPDTSPである。つまり、ある配送クラスタ  $A$  のいずれかの点を訪問する前に、対応する集荷クラスタ  $B$  のいずれかの点を訪問しなければならないという制約が存在するTSPを考える。

このようにして、4節のPDTSPと3節のGTSPの2つのTSPを組み合わせたのが、一般化集荷配送巡回セールスマン問題(GPDTSP: Generalized Pickup and Delivery Traveling Salesman Problem) [15]である。GPDTSPはクラスタ間に先行順序関係が存在するTSPであるため、先行順序制約付き一般化巡回セールスマン問題(GTSPPC: generalized traveling salesman problems with precedence constraints)である。ただし、GPDTSPでは集荷クラスタで集荷した荷物の配送先(配送クラスタ)は1つのみが対応しており、GTSPPCではそのような強い制約は無いから、GPDTSPはGTSPPCと特殊型と見なせる。

以下ではGPDTSPの定式化を導入する。 $0^-, 0^+$  をそれぞれ始点と終点とする。配送クラスタが  $m$  個あるとし、 $D_l, l = 1, 2, \dots, m$  で与える。配送クラスタ  $D_l$  に対応する集荷クラスタが  $\alpha_l$  個存在するものとし、集荷クラスタを  $P_l^{\alpha_l}, l = 1, 2, \dots, m, \alpha_l = 1, 2, \dots, \alpha_l$  で与える。集荷クラスタ  $P_l^{\alpha_l}$  の配送先は対応する  $D_l$  に固定されており、一つの集荷クラスタが複数の配送先(配送クラスタ)をもたない。クラスタの集合  $\cup_{l=1}^m D_l \cup \cup_{l=1}^m \cup_{\alpha_l=1}^{\alpha_l} P_l^{\alpha_l}$  の部分集合の全ての集まりを  $\mathcal{C}$  とする。このとき、GPDTSPは次の数理計画問題として定式化できる。

$$\min \sum_{(i,j) \in E} c_{ij} x_{ij} \quad (19)$$

$$\text{s. t. } x_{+0, -0} = 1 \quad (20)$$

$$x(\delta(v)) = 2y_v, \forall v \in V \quad (21)$$

$$\sum_{v \in D_l} y_v = 1, l = 1, \dots, m \quad (22)$$

$$\sum_{v \in P_l^{\alpha_l}} y_v = 1, \\ l = 1, 2, \dots, m, \alpha_l = 1, 2, \dots, \alpha_l \quad (23)$$

$$x(\delta(S_C)) \geq 2, \\ \forall S_C \subset \mathcal{C}, 2 \leq |S_C| \leq m - 2 \quad (24)$$

$$x(\delta(S)) \geq 4, \forall S \subset V, \\ \{D_l \cup \{+0\}\} \subset S, \{P_l^{\alpha_l} \cup \{-0\}\} \not\subset S, \\ l = 1, 2, \dots, n, \alpha_l = 1, 2, \dots, \alpha_l \quad (25)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \forall (i, j) \in E \quad (26)$$

$$y_v \in \{0, 1\}, \forall v \in V \quad (27)$$

(20)式は始点と終点を結ぶ枝は必ず通るという制約である。(21)式は経路として通る頂点には必ず2本の枝が存在するという制約である。(22)式、(23)式はクラスタ内の頂点の1つのみを通るという制約である。(24)式は部分巡回路の形成や経路の分断を避けるための式で、 $S_C$ はクラスタの部分集合を表す。(25)式はクラスタ間の先行順序制約を表す式である。

GTSPPCの応用については複数の論文[6, 9]で扱われているが、GPDTSPPCの応用に限ると、著者が知る限りではプリント基板検査経路最適化問題[16]以外には見当たらず、今後の進展が期待される。次節では、著者らの論文[16]を基にGPDTSPPCの応用例を紹介する。

## 6. GPDTSPPCの応用例：プリント基板検査経路最適化

本節では、前節で導入したGPDTSPPCの現実問題への応用例として、プリント基板検査経路の最適化問題を紹介する。

図3はプリント基板の検査で用いるプローブ治具（検査治具）とプリント基板（個片）を表している。プリント基板の配線に異常（断線や短絡）がないかを調べるために、プローブ治具の中心を個片の検査点に合わせる導通検査を行う。

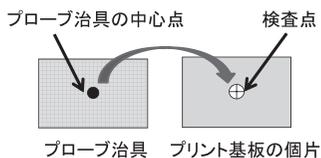


図3 プリント基板（個片）の導通検査

近年の電子機器の小型化に伴い、基板も小型化しており、基板の配線ピッチは数十マイクロメートルとなっている。プリント基板のたわみによって、検査点の位置がずれるため、近年の検査機器では、導通検査をする前に「アライメント撮像」の操作が加わり、アライメントマークをカメラで撮像することで個辺のたわみ具合を測定して個辺の検査点の正確な位置情報を得る。すなわち、まず「アライメント撮像」の作業を行ってから導通検査の作業を行うというように、2つの作業間に先行順序制約が存在する。

著者らは[16]は、プリント基板検査経路最適化問題において、プローブ治具に取り付けられたカメラが1台の場合[15]を拡張し、カメラを複数取り付けられた新しい検査機器を提案している。著者らはカメラが複数台になるとき、5節で導入したGPDTSPPCとして定式化できることを示した。図4の左は検査ユニットを表している。この図の場合、検査ユニットはアライメント撮像のための2台のカメラが取

り付けられている。また同図の右は個片1つにつき、アライメントマークが2点ある状況を表している。

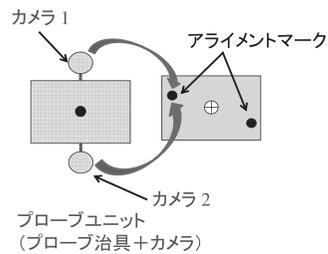


図4 カメラによるアライメント撮像

前述の通り、導通検査の前にカメラによるアライメント撮像を行う必要がある。図4に示す通り、アライメント撮像においては、1つのアライメントマークは2つのカメラのいずれかで撮像される。アライメントマークAを2つのカメラのいずれかで撮像することは、検査ユニットの中心を点A'あるいはA''のいずれかに移動させることに等しい。すなわち、元の個片のアライメントマークAは2つの点A'とA''に置き換えればよいことになる。2点A'、A''のどちらか一方を訪問すればよいという条件を考慮して、A'とA''をひとまとめにする（図5参照）。このアライメントマーク2点の集合を「アライメントクラスタ」と呼ぶことにする。図5では示していないが、アライメントマークBについても同様に、2点B'、B''に置き換えられ、この2点B'、B''もひとまとめにしてアライメントクラスタとする。一方で、検査点は検査ユニットの中心を合わせるため、カメラが1台のときと何ら変わらず、アライメントマークと異なり位置の移動させる必要もない。検査点はアライメントマークと異なり、複数の点とはならないが、ここでは便宜上、1点から構成されるクラスタとして、検査クラスタと呼ぶことにする。

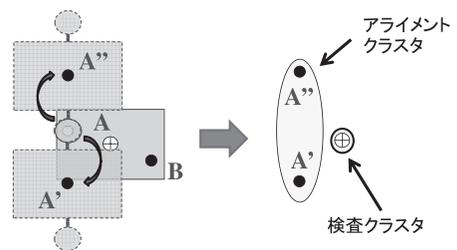


図5 アライメントクラスタと検査クラスタ

一般に基板シートには数多くの個片が並べられており、最少で4個程度、最多で200個程度になる。図6は4個片（縦2×横2）の場合を表している。

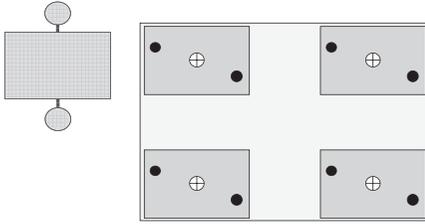


図6 4個片から構成される基板シート

図6を用いて、この問題が一般化集荷配送計画問題としてモデル化できることを示す。図5と同様に、アライメントマークは2点からなるクラスタであるアライメントクラスタとして置き換えられる。図7の右図において、アライメントクラスタに含まれる点のいずれかを訪問した後に検査クラスタに含まれる検査点を訪問するという先行順序関係が存在する。一般に、アライメント撮像用のカメラが $k$ 台搭載されている場合、アライメントクラスタに含まれる要素数は $k$ 個となる。このようにして、アライメント撮像用カメラが複数台搭載された検査機器を使った場合のプリント基板検査経路最適化問題はGPDTSPとしてモデル化できることがわかる。

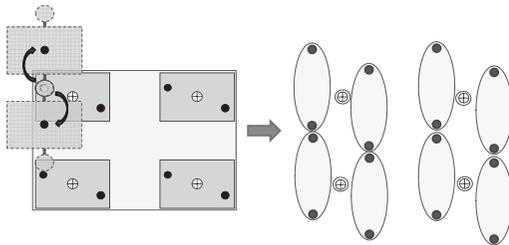


図7 4個片の基板シートに対するモデル化

図7は、アライメント撮像と導通検査を併せた検査経路の一例を表している。

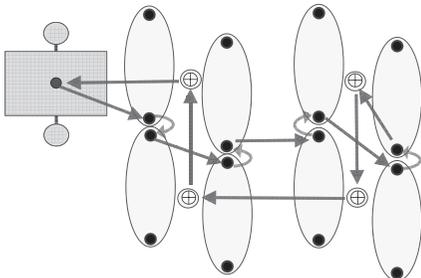


図7 アライメント撮像と導通検査を併せた検査経路の一例

前述の通り、プリント基板検査の現場では、最多で200個程度の個片から成る基板シートを検査する。中規模程度の検査工場で大凡20台程度の検査機器があり、1台あたり1日数千枚の基板シートを検査する。したがって、検査経路を短くすることで基板シート1枚あたりの検査時間が短くなり、コスト削減に繋がる。一方で、GPDTSPは $N_p$ 困難な問題であるため、個片数の多い基板シートに対する厳密な最適検査経路を実用時間で求めることは実質不可能である。このような状況を考慮し、著者ら[16]は、クラスタ内の訪問点を固定した状態で2-opt[5]及びOr-opt[25]による局所探索を行うステップと、クラスタの訪問順序を固定した状態でクラスタ内で選択する点を探索するステップを交互に繰り返すメタ解法を提案している。ただし、2-optやOr-optを用いて検査経路の枝をつなぎ換えることにより、アライメント点と検査点の間の先行順序制約を満たさない解（検査経路）が生成される可能性がある。過去の研究では、先行順序制約を満たすようなつなぎ換えを高速に見つけて最良解を更新していく逐次的な局所探索法[26]が提案されている。一方、Renaudら[27]は通常の巡回セールスマン問題と同様の局所探索を行って、一旦は先行順序制約を考慮しないで解を生成した後、「各時点での最良解よりも良い（経路長が短い）解が見つかったときのみ」先行順序制約のチェックを行うことにより高速に良質な近似解を導出する方法を提案している。この操作を加えている部分がRenaudら[27]の従来法と異なっていると同時に局所探索として効果が大きいことが数値実験で示されている。

6. おわりに

本稿では、一般化集荷配送巡回セールスマン問題(GPDTSP)に焦点をあて、数理計画問題に基づく定式化とその解法、また現実問題への応用について概説した。理論の詳細や数値実験結果については、著者らの論文[15, 16, 17, 18, 19]を参照されたい。

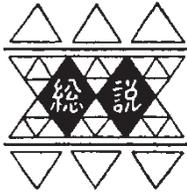
GPDTSPの研究に対する今後の展開としては、より効率的なアルゴリズムの開発が挙げられる。巡回セールスマン問題に対するヒューリスティクスとして古くからLin-Kernighan法[21]やその改良版[11]など膨大な数の研究があり、最新の成果を組み込むことで、より高性能なアルゴリズムの構築が期待できる。また、厳密解法については現在、GPDTSPに対する分枝カット法の開発を取り組んでおり、別の機会に発表する予定である。

参考文献

[1] D.L. Applegate, R.E. Bixby, V. Chvatal, W.J. Cook, “The traveling salesman problem com-

- putational study,” *Princeton University Press*, 2007.
- [2] E. Balas, M. Fischetti and W.R. Pulleyblank, “The precedence-constrained asymmetric traveling salesman polytope,” *Mathematical programming*, **68**-1-3, 1995, p. 241–265.
- [3] C. Berbeglia, J.-F. Cordeau, I. Gribkovskaia, G. Laporte, “Static pickup and delivery problems: a classification scheme and survey,” *TOP*, **15**-1, 2007. p. 1–31.
- [4] ウィリアム・J・クック (著), 松浦俊輔 (翻訳), “驚きの数学 巡回セールスマン問題,” 青土社, 2013.
- [5] G.A. Croes, “A method for solving traveling salesman problems,” *Operations Research*, **6**-6, 1958, p. 791-812.
- [6] R. Dewil, P. Vansteenwegen, D. Cattrysse, “Construction heuristics for generating tool paths for laser cutters,” *International Journal of Production Research*, **52**-20, 2014, p. 5965–5984.
- [7] I. Dumitrescu, S. Ropke, J.-F. Cordeau, G. Laporte, “The traveling salesman problem with pickup and delivery: polyhedral results and a branch-and-cut algorithm,” *Mathematical Programming*, **121**-2, 2010, p. 269–305.
- [8] M. Fischetti, J.-J. Salazar-Gonzalez, P. Toth, “A branch-and-cut algorithm for the symmetric generalized traveling salesman problem,” *Operations Research*, **45**-3, 1997, p. 378–394.
- [9] A.H. Gharehgozli, G. Laporte, Y. Yu, R. de Koster, “Scheduling twin yard cranes in a container block,” *Transportation Science*, **49**-3, 2015, p. 686–705.
- [10] G. Gutin and A.P. Punnen (Eds.), “The Traveling Salesman Problem and Its Variations,” Springer, 2006.
- [11] K. Helsgaun, “An effective implementation of the Lin-Kernighan traveling salesman heuristic,” *European Journal of Operational Research*, **126**-1, 2000, p. 106–130.
- [12] A.L. Henry-Labordere, “The record balancing problem: a dynamic programming solution of a generalized traveling salesman problem,” *RAIRO-Operations Research*, **B**-2, 1969, p. 43–49.
- [13] H. Hernandez-Perez, J.-J. Salazar-Gonzalez, “The multi-commodity pickup-and-delivery traveling salesman problem,” *Networks*, **63**-1, 2014, p. 46–59.
- [14] D. Karapetyan, G. Gutin, “Lin-Kernighan heuristic adaptations for the generalized traveling salesman problem,” *European Journal of Operational Research*, **208**-3, 2011, p. 221–232.
- [15] H. Katagiri, Q. Guo, H. Wu, H. Hamori, and K. Kato, “Path optimization for electrically inspecting printed circuit boards with alignment marks,” *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2015*, **2**, 2015, p. 979–984.
- [16] H. Katagiri, G. Qingqiang, W. Bin a, T. Muranaka, H. Hamori, K. Kato, “Path optimization for electrical PCB inspections with alignment operations using multiple cameras,” *Procedia Computer Science*, **60**, 2015, p. 1051–1060.
- [17] H. Katagiri, H. Wu, Y. Kakiuchi, H. Hamori, K. Kato, “A route optimization problem in electrical PCB inspections with alignment operations,” *Scientiae Mathematicae Japonicae*, Online, 2016.
- [18] H. Katagiri, Q. Guo, H. Wu, H. Hamori, K. Kato, “A route optimization problem in electrical PCB inspections: Pickup and delivery TSP-based formulation,” In *Transactions on Engineering Technologies* (pp. 193–205), Springer, Singapore, 2016.
- [19] 片桐英樹, 呉宏偉, 羽森寛, 垣内洋介, 加藤浩介, “カメラによるアライメント補正を考慮したプリント基板の検査経路最適化,” *日本経営システム学会論文誌*, **32**-3, 2016, p. 341–351.
- [20] G. Laporte, Y. Nobert, “Generalized traveling salesman through  $n$  sets of nodes: an integer programming approach,” *INFOR: Information Systems and Operational Research*, **21**-1, 1983, p. 60–75.
- [21] S. Lin, B.W. Kernighan, “An effective heuristic algorithm for the traveling-salesman program,” *Operations Research*, **21**-2, 1973, p. 498–516.
- [22] 日本経済新聞2015.8.15 朝刊, 35面.
- [23] C.E. Noon and J.C. Bean, “An efficient trans-

- formation of the generalized traveling salesman problem,” *INFOR: Information Systems and Operational Research*, **31**-1, 1993, p. 39–44.
- [24] オー・エイチ・ティー (株), 広島大学, 目崎, 片桐, “接触型回路パターン検査装置及びその検査方法,” 特開2015-166680, 2015-9-24.
- [25] I. OR, “Traveling Salesman-Type Combinatorial Problems and their Relation to the Logistics of Regional Blood Banking”, *Ph.D. Thesis, Department of Industrial Engineering and Management Sciences, Northwestern University*, Evanston, IL, 1976.
- [26] H.N. Psaraftis, “ $k$ -interchange procedures for local search in a precedence-constrained routing problem,” *European Journal of Operational Research*, **13**-4, 1983, p. 391–402.
- [27] J. Renaud, F.F. Boctor, G. Laporte, “Perturbation heuristics for the pickup and delivery traveling salesman problem,” *Computers & Operations Research*, **29**-9, 2002, p. 1129–1141.
- [28] J.P. Saskaena, “Mathematical model for scheduling clients through welfare agencies,” *Canadian Operational Research Society Journal*, **8**-3, 1970, p. 185–200.
- [29] S.C. Sarin, H.D. Sherali, A. Bhootra, “New tighter polynomial length formulations for the asymmetric traveling salesman problem with and without precedence constraints,” *Operations Research Letters*, **33**-1, 2005, p. 62–70.
- [30] H.D. Sherali, S.C. Sarin, P.-F. Tsai, “A class of lifted path and flow-based formulation for the asymmetric traveling salesman problem with and without precedence constraints,” *Discrete Optimization*, **3**-1, 2006, p. 20–32.
- [31] S.S. Srivastava, S. Kumar, R.C. Garg, P. Sen, “Generalized traveling salesman problem through  $n$  sets of nodes,” *Canadian Operational Research Society Journal*, **7**, 1969, p. 97–101.
- [32] 山本芳嗣, 久保 幹雄, “巡回セールスマン問題への招待,” 朝倉書店, 1997.



# 自転車の車輪に生じる振れを修正するための 作業支援装置開発

松本 光広\*

## Development of Task Support Equipment for Correcting Deformed Bicycle Wheel

Mitsuhiro MATSUMOTO\*

### 1. はじめに

自転車のホイールは、自転車における安定した走行を実現するために、重要な役割を果たす部品である。ホイールは、ハブ、スポーク、ニップルおよびリムにより構成される。ホイール中心部のハブおよび外周部のリムは、ハブに接続されてハブから放射状に伸びる複数のスポーク、およびスポークの先端にねじで取り付けられたニップルによりリムに接続されて、相互に固定される[1]。ホイールは、ハブを中心としたリムの形状がほぼ真円となることで、自転車の安定した走行を実現できる。リムの形状が真円から変形して、許容限界の範囲から外れた状態を振れと呼ぶ。ホイールの振れは、主にホイールの組み立てにおいて生じる[2]。リムの振れを修正する振れ取りは、ニップルを回転させてリムを弾性変形させることで、振れを許容限界の範囲に収める。スポーク先端のニップルを回転させることでハブとリムの距離を変化させて、スポークに発生する張力を変化させる。スポークの張力を変化させると、他のスポークとの力の相互作用により平衡が保たれるまでリム全体が変形する[3]。

人の手でホイールを組み立ててリムの振れを取る場合、一つのニップルを回転させることでリム全体が変形して、振れが許容限界の範囲に収まるかどうかを確認する。これをリム全体について様々な位置のニップルを何度も回転させて、これを繰り返すために手間がかかる[4]。これを解消するために、工場におけるホイールの組み立てでは、リムに振れを生じさせないために、全てのニップルを同時に締付ける装置を用いる[5]。装置は複雑かつ大型である。

一つのニップルの回転量に対するリム全体の振れ量の関係を事前に把握できれば、この関係を用いて一ヶ所のリムが振れている位置に対して必要な回転させるニップルの位置と回転量を予測できる。リム全体の振れを許容限

界の範囲に収めるために予測したニップルの位置と回転量を振れを取る人に指示できれば、振れ取りにおける繰り返し作業を減らし、必要なニップルの回転のみを行えばよい。

本研究では、自転車のホイールの組み立てにおいて生じるリムの振れを対象として、人の手でニップルを回転させてリムの振れを取り、繰り返し作業を減らして効率よく作業するために、回転させるニップルの位置と回転量を人に指示する支援装置の開発を目的とする。一ヶ所のリムが振れている位置の振れ量について回転させるニップルの位置と回転量を事前に予測するために、一つのニップルの回転量におけるリム全体の振れ量の関係を明らかにする。支援装置では、ニップルの回転量におけるリム全体の振れ量の関係を用いて、実際に計測したリム全体の振れ量に対して、振れを許容限界の範囲に収めるために回転させるニップルの位置と回転量を予測する。提案した予測方法を支援装置に実装して、装置を構成する。構成した支援装置を用いて、実際に振れが生じたリムに対して、支援装置が示した振れを許容限界の範囲に収めるために必要な回転させるニップルの位置と回転量を用いて実際に人が振れを取り、その性能を確認する。

### 2. 自転車のホイール

#### 2.1 ホイールの構造

図1に自転車のホイールの構造を示す。ホイールは、ハブ、スポーク、ニップルおよびリムにより構成される。本研究では、多くの自転車のホイールに採用されている、各スポークを交差してリムに固定するタンジェント組を対象とする。ホイール中心部のハブおよび外周部のリムは、複数のスポークおよびニップルを介して相互に固定される。スポークは、ハブの外形接線上に接続されて、中心部からほぼ放射状に伸びる。ニップルは、スポークの先端に

\*准教授 経営工学科

Associate Professor, Dept. of Management  
Engineering

ねじで取り付けられて、リムの円周上に等間隔で接続される。断面図A-Aおよび断面図B-Bから、リムの円周上において隣り合うスポークは、ハブの軸方向における左右から交互にリムに接続される。ホイールでは、各スポークにおける各ニップルを回転させることで、ハブとリムの距離を変化させてスポークに張力を発生させて、ハブとリムを強く固定している。ニップルを回転させてスポークの張力を変化させると、他のスポークとの力の相互作用により平衡が保たれるまでリムが変形する。ハブを中心としたリムの形状が真円から変形して、許容限界の範囲から外れた状態を振れと呼ぶ。

図2に本研究で用いるホイールの座標系を示す。ホイール、ハブおよびリムの中心を原点 $O_W$ とし、原点からリムの半径方向を $X_W$ 軸、リム上において $X_W$ 軸に直交する軸を $Y_W$ 軸、ハブの軸方向を $Z_W$ 軸とした座標系を $X_W$ - $Y_W$ - $Z_W$ とする。 $X_W$ - $Y_W$ 平面上において、 $X_W$ 軸

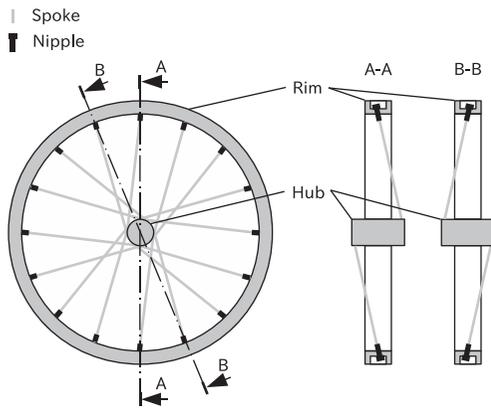


図1 自転車のホイールの構造

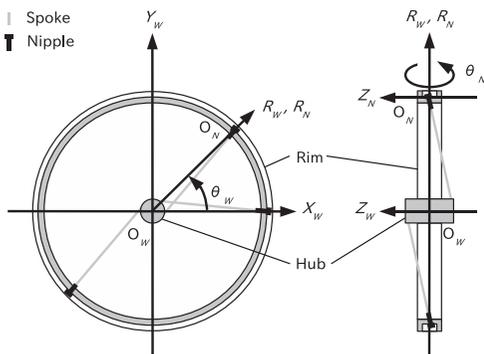


図2 ホイールの座標系

から角度 $\theta_W$ の軸を $R_W$ 軸とする。スポークの先端に設置されたニップルについて、 $R_W$ 軸方向におけるニップルとリムの接触点を原点 $O_N$ とし、原点からリムの半径方向を $R_N$ 軸、 $R_N$ 軸におけるニップルの回転方向を $\theta_N$ 、リムの厚さ方向を $Z_N$ 軸とする。なお $R_W$ 軸は $R_N$ 軸と同軸上にあり、 $Z_W$ 軸は $Z_N$ 軸と平行とする。

2.2 リムの振れの特徴

2.2.1 測定装置

図3に、リム全体の変位を測定するホイールおよびセンサを示す。ホイール調整スタンドにホイール、リム変位センサおよびスポーク検出センサを取り付ける。 $Z_N$ 軸方向におけるリムの幅は27.4mm、原点 $O_W$ から原点 $O_N$ におけるリムの半径は325mmである。リムの材質はアルミニウムである。 $Z_N$ 軸方向プラス側、 $R_N$ 軸方向および $Z_N$ 軸方向マイナス側のリムの変位をそれぞれ測定する。 $Z_N$ 軸方向プラス側のリム変位センサ、 $R_N$ 軸方向のリム変位センサおよび $Z_N$ 軸方向マイナス側のリム変位センサをリムの回りに設置する。測定範囲は30mm±5mm、分解能は1μmである。スポーク検出センサは、スポークを検出する。検出距離の範囲は1.5m、レーザのスポット径は1.5m先でφ2mmである。

表1に測定で用いたホイールのスポーク数 $p$ 、 $Z_N$ 軸方向プラス側のリム変位センサの $Z_N$ 軸上の位置 $s_{Z_N+}$ 、 $R_N$ 軸方向のリム変位センサの $R_N$ 軸上の位置 $s_{R_N}$ 、および $Z_N$ 軸方向マイナス側のリム変位センサの $Z_N$ 軸上の位置 $s_{Z_N-}$ を示す。リム変位センサは、測定面をそれぞれ位置 $s_{Z_N+}$ 、位置 $s_{R_N}$ および位置 $s_{Z_N-}$ に固定して用いた。スポーク検出センサがスポーク番号 $i$ のスポークを検出したときに、リム変位センサが $Z_N$ 軸方向プラス側、 $R_N$ 軸方向および $Z_N$ 軸方向マイナス側のリムの位置を測定する角度 $\theta_W$ は、

$$\theta_W = \frac{2\pi}{p}i \tag{1}$$

と表せる。式(1)を満たす位置に、スポーク検出センサを設置した。なお $R_N$ 軸方向のリムの変位は、ニップルのすぐ横のリム部を測定した。

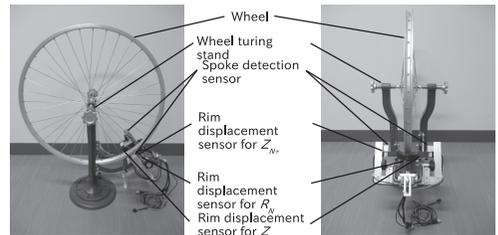


図3 ホイールおよびセンサ

表1 ホイールのスポーク数 $p$ , リム変位センサの位置 $s_{ZN+}$ ,  $s_{RN}$ および $s_{ZN-}$

$p$	$s_{ZN+}$	$s_{RN}$	$s_{ZN-}$
36	43.6mm	31.9mm	-43.6mm

### 2.2.2 測定方法

測定では、ホイールを $-\theta_W$ 方向に手で回す。スポーク検出センサがはじめに検出したスポークのスポーク番号 $i$ を0として、 $\theta_W$ 方向について1から $p-1$ まで検出した順番にスポーク番号 $i$ をつける。また $-\theta_W$ 方向について、 $-1$ から $-(p-1)$ までスポーク番号 $i$ をつける。なお本測定では、スポーク番号 $i$ が0であるスポークが図2における $Z_N$ 軸方向マイナス側に位置することとした。スポーク検出センサがスポーク番号 $i$ のスポークを検出したときに、リム変位センサがスポーク番号 $i$ における $Z_N$ 軸方向プラス側のリム変位センサの測定値 $m_{ZN+}(i)$ 、スポーク番号 $i$ における $R_N$ 軸方向のリム変位センサの測定値 $m_{RN}(i)$ 、およびスポーク番号 $i$ における $Z_N$ 軸方向マイナス側のリム変位センサの測定値 $m_{ZN-}(i)$ を測定する。スポーク番号 $i$ が0から $p-1$ まで測定する。

測定値 $m_{ZN+}(i)$ 、測定値 $m_{RN}(i)$ および測定値 $m_{ZN-}(i)$ から、 $Z_N$ 軸方向プラス側のリムの位置 $z_{N+}$ 、 $R_N$ 軸方向のリムの位置 $r_N$ および $Z_N$ 軸方向マイナス側のリムの位置 $z_{N-}$ は、

$$z_{N+}(i) = s_{ZN+} - m_{ZN+}(i) \quad (2)$$

$$r_N(i) = s_{RN} - m_{RN}(i) \quad (3)$$

$$z_{N-}(i) = s_{ZN-} - m_{ZN-}(i) \quad (4)$$

と表せる。

### 2.2.3 測定結果

スポーク番号 $i$ が0におけるニップルの回転角度 $\theta_N(0)$ について、これを変化させたときのスポーク番号 $i$ と $Z_N$ 軸方向のリムの位置 $z_N$ および $R_N$ 軸方向のリムの位置 $r_N$ の関係を調べた。図4にニップルの回転角度 $\theta_N(0)$ が0、図5にニップルの回転角度 $\theta_N(0)$ が $6\pi$ 、図6にニップルの回転角度 $\theta_N(0)$ が $-6\pi$ における、スポーク番号 $i$ とリムの位置 $z_N$ およびリムの位置 $r_N$ の関係を示す。図5は、スポーク番号 $i$ が0のニップルについて、ニップルを回転させて、回転角度 $\theta_N(0)$ を $6\pi$ とした。この場合、 $Z_N$ 軸方向プラス側および $Z_N$ 軸方向マイナス側のリムの位置 $z_N$ が、図4と比較してプラス側に変化していることが分かる。図6は、スポーク番号 $i$ が0のニップルについて、ニップルを回転させて、回転角度 $\theta_N(0)$ を $-6\pi$ とした。この場合、 $Z_N$ 軸方向プラス側および $Z_N$ 軸方向マイナス側のリムの位置 $z_N$ が、図4と比較してマイナス側に変化していることが分か

る。スポーク番号 $i$ が0であるスポークが図2における $Z_N$ 軸方向プラス側に位置する場合、 $Z_N$ 軸方向プラス側および $Z_N$ 軸方向マイナス側のリムの位置 $z_N$ は、図5および図6において $Z_N$ 軸方向プラス側と $Z_N$ 軸方向マイナス側の値を入れ替えることで示される。図5および図6から、 $Z_N$ 軸方向プラス側および $Z_N$ 軸方向マイナス側のリムの位置 $z_N$ の変化は同じであり、 $R_N$ 軸方向のリムの位置 $r_N$ の変化は小さい。したがって、以後 $Z_N$ 軸方向プラス側のリムの位置 $z_N$ のみを用いる。

リムの振れについて、 $Z_N$ 軸方向プラス側のリムの許容限界位置 $l_{ZN+}$ 、および $Z_N$ 軸方向マイナス側のリムの許容限界位置 $l_{ZN-}$ とする。本研究では、これらの許容限界位置を越えたりみを振れているとした。表2に本測定で用いたリムの許容限界位置 $l_{ZN+}$ およびリムの許容限界位置 $l_{ZN-}$ を示す。27.4mmのリムの幅から、 $Z_N$ 軸方向プラス側のリムの理想の位置は13.7mmとなり、リムの理想の位置から $\pm 0.4$ mmを許容限界位置とした。図4から、0から $p-1$ の各スポーク番号 $i$ について $Z_N$ 軸方向プラス側のリムの位置 $z_N$ は、表2に示すリムの許容限界位置 $l_{ZN+}$ およびリムの許容限界位置 $l_{ZN-}$ と比較して、この範囲に収まりリムの変形が小さく、リムが振れていないことが分かる。図5から、表2に示すリムの許容限界位置 $l_{ZN+}$ およびリムの許容限界位置 $l_{ZN-}$ と比較して、この範囲から外れてリムの変形が大きく、リムが振れていることが分かる。

ニップルの回転角度 $\theta_N(0)$ を $-6\pi$ から $6\pi$ まで変化させたとき、スポーク番号 $i$ と $Z_N$ 軸方向プラス側のリムの変位 $d_{ZN+}$ の関係を調べた。図7にスポーク番号 $i$ とリムの変位 $d_{ZN+}$ の関係を示す。リムの変位は、図4に示すリムの位置からの差を示す。ニップルの回転角度 $\theta_N(0)$ を変化させると、リムの変位 $d_{ZN+}$ は、スポーク番号 $i$ が0のリムの位置で大きく変化することが分かる。また、スポーク番号 $i$ が8、18および28のリムの位置についても、小さく変化することが分かる。したがって、スポーク番号 $i$ におけるニップルの回転角度 $\theta_N(i)$ を変化させると、スポーク番号 $i$ の周辺の変位のみならずリム全体の変位が変化する。

0から $p-1$ の各スポーク番号 $i$ について、ニップルの回転角度 $\theta_N(0)$ とリムの変位 $d_{ZN+}$ の関係を調べた。図8にニップルの回転角度 $\theta_N(0)$ とリムの変位 $d_{ZN+}$ の関係を示す。図8から、ニップルの回転角度 $\theta_N(0)$ およびリムの変位 $d_{ZN+}$ の関係は、ほぼ線形であることが分かる。

0から $p-1$ の各スポーク番号 $i$ について、ニップルの回転角度 $\theta_N(0)$ とリムの変位 $d_{ZN+}$ の関係を線形近似式として表す。図8からニップルの回転角度 $\theta_N(0)$ とリムの変位 $d_{ZN+}$ について、線形近似式の傾きを $a_{ZN+}(i)$ 、切片を $b_{ZN+}(i)$ とする。スポーク番号 $i$ が0であるスポークが

図2における $Z_N$ 軸方向マイナス側に位置する場合は、

$$d_{ZN+}(i) = a_{ZN+}(i)\theta_N(0) + b_{ZN+}(i) \quad (5)$$

と表せる。また、スポーク番号 $i$ が0であるスポークが図2における $Z_N$ 軸方向プラス側に位置する場合は、傾き $a_{ZN+}(i)$ および切片 $b_{ZN+}(i)$ を用いて、

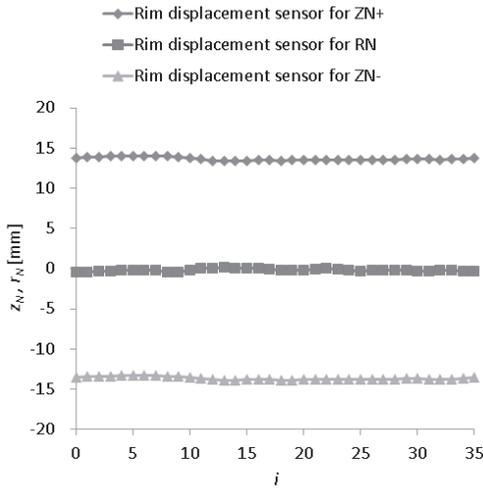


図4 ニップルの回転角度 $\theta_N(0)$ が0におけるスポーク番号 $i$ とリムの位置 $z_N$ およびリムの位置 $r_N$ の関係

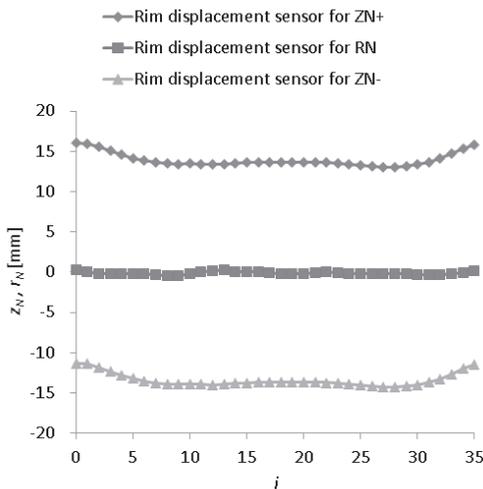


図5 ニップルの回転角度 $\theta_N(0)$ が $6n$ におけるスポーク番号 $i$ とリムの位置 $z_N$ およびリムの位置 $r_N$ の関係

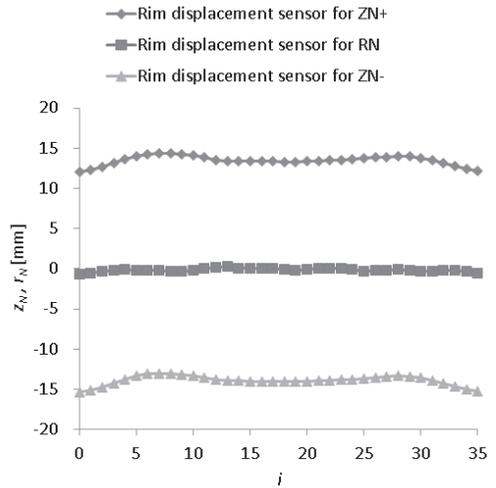


図6 ニップルの回転角度 $\theta_N(0)$ が $-6n$ におけるスポーク番号 $i$ とリムの位置 $z_N$ およびリムの位置 $r_N$ の関係

表2 リムの許容限界位置 $l_{ZN+}$ およびリムの許容限界位置 $l_{ZN-}$

$l_{ZN+}$	$l_{ZN-}$
14.1mm	13.3mm

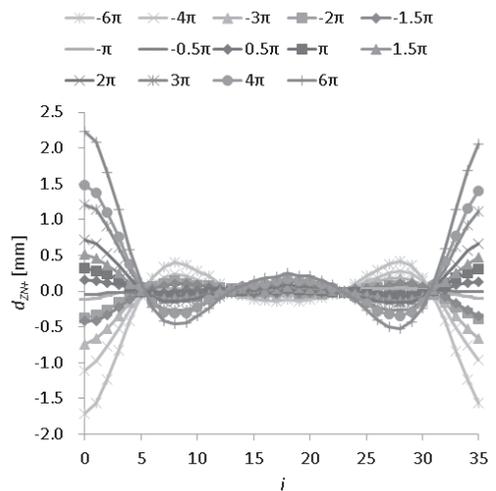


図7 スポーク番号 $i$ とリムの変位 $d_{ZN+}$ の関係

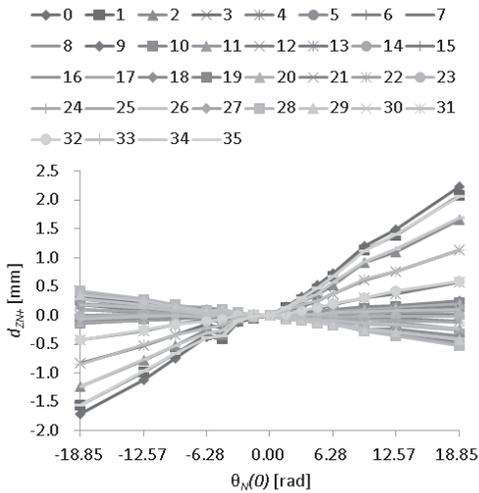


図8 ニップルの回転角度  $\theta_N(0)$  とリムの変位  $d_{ZN+}$  の関係

$$d_{ZN+}(i) = -a_{ZN+}(i)\theta_N(0) - b_{ZN+}(i) \quad (6)$$

と表せる。

### 3. 支援装置

自転車のホイールの組み立てにおいて生じるリムの振れを対象として、人の手でニップルを回転させてリムの振れを取るために、回転させるニップルの位置と回転量を人に指示する支援装置を構成する。支援装置では、ニップルの回転量におけるリム全体の振れ量の関係を用いて、実際に計測したリム全体の振れ量に対して、振れを許容限界の範囲に収めるために回転させるニップルの位置と回転量を予測する。人が振れを取る場合に、同じニップルを何度も回転させないために、回転させるニップルの位置と回転量を事前に予測して、この予測をもとに個々のニップルを回転させることを考える。支援装置では、リムの許容限界位置に対して、リムにおけるアルミニウムの表面について変位センサによる測定の誤差を許容するために、許容限界位置よりも範囲の小さい許容目標位置を設定する。回転させるニップルの位置と回転量を予測するために、リムの位置と許容目標位置の差が最も大きいリムの変位から、これを一つずつ修正するために必要な回転させるニップルの回転量を、リムの変位と回転量の関係から計算する。リムの位置が許容目標の範囲を満たすまで、計算を繰り返して、計算されたニップルの回転量を合計して、この値を示す。構成した支援装置を用いて、実際に振れが生じたリムに対して、支援装置が示した振れを許容目標の範囲に収めるために必要な回転させるニップルの

位置と回転量を用いて実際に人が振れを取り、リムの許容限界の範囲に収まるかを確認する。

### 3.1 装置の構成

#### 3.1.1 ハードウェアの構成

図9に実際の支援装置を示す。装置の測定部の詳細は、2.2.1節の測定装置に示す。なお、 $R_N$ 軸方向のリム変位センサおよび $Z_N$ 軸方向マイナス側のリム変位センサは用いない。 $Z_N$ 軸方向プラス側のリム変位センサおよびスポーク検出センサは、それぞれ $Z_N$ 軸方向プラス側のリム変位センサコントローラおよびスポーク検出センサコントローラに接続される。リム変位センサコントローラおよびスポーク検出センサコントローラはデータコントローラに接続される。データコントローラはUSBを介して、メインコントローラに接続される。

リム変位センサコントローラのサンプリング周期は100  $\mu\text{s}$ であり、リム変位センサで計測した値をアナログ電圧値として出力できる。スポーク検出センサコントローラの応答速度は500  $\mu\text{s}$ であり、物体を検出すると制御出力として電圧を出力する。データコントローラのクロック数は48MHzであり、ADコンバータ、割り込み処理およびシリアル通信の各機能を有する。シリアル通信は、USBシリアル変換器を介してメインコントローラとUSBで接続される。メインコントローラのCPUのクロック数は2.4GHzであり、USB接続端子を有する。

#### 3.1.2 ソフトウェアの構成

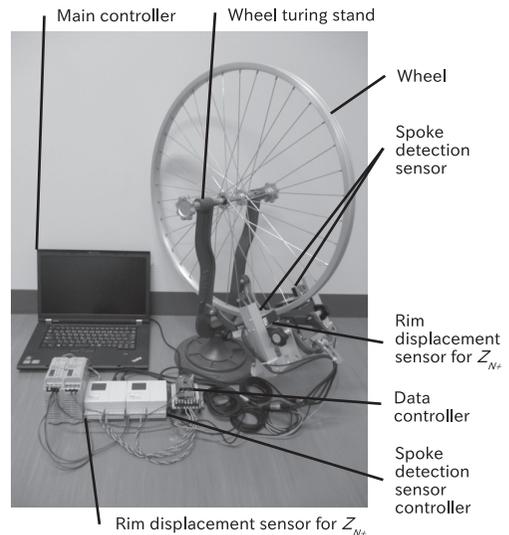


図9 支援装置

回転させるニップルの位置と回転量を予測する方法を以下に示す。人の手で一方向に回転させた自転車のホイールについて、0から $p-1$ の各スポーク番号 $i$ についてリムの位置を測定する。測定された位置から、0から $p-1$ の各スポーク番号 $i$ について、リムの位置が許容目標位置の範囲に収まるか外れるかを判断する。収まる場合は、回転させるニップルについてスポーク番号 $i$ および回転角度を0として表示する。外れる場合は、リムの位置を許容目標位置の範囲に収めるために、線形近似式を用いて最も大きなリムの位置との差からニップルの回転角度を算出する。算出したニップルの回転角度は、スポーク番号 $i$ について積算される。算出した回転角度を用いてニップルを回転させた場合の、0から $p-1$ の各スポーク番号 $i$ におけるリムの位置を計算する。計算された0から $p-1$ の各スポーク番号 $i$ における位置が、許容目標位置の範囲に収まるか外れるかを再び判断する。収まる場合は、回転させるニップルについてスポーク番号 $i$ および回転角度を表示する。外れる場合は、許容目標位置の範囲に収まるまで、リムの位置の計算を繰り返す。

データコントローラは処理を開始した後、スポーク検出センサコントローラから制御出力を取得する。はじめに制御出力を得たときのスポーク番号 $i$ を0とする。 $Z_N$ 軸方向プラス側のリム変位センサコントローラから、スポーク番号 $i$ における $Z_N$ 軸方向プラス側のリム変位センサの測定値 $m_{ZN+}(i)$ を取得する。測定値 $m_{ZN+}(i)$ をメインコントローラへ出力する。

図10にメインコントローラの処理を示す。メインコントローラは処理を開始した後、2.2.2節の測定方法を用いて、リムの位置 $z_{N+}(i)$ を取得する。0から $p-1$ の各スポーク番号 $i$ について、リムの位置 $z_{N+}(i)$ と、リムの許容目標位置 $t_{ZN+}$ およびリムの許容目標位置 $t_{ZN-}$ をそれぞれ比較する。リムの位置と2つの許容目標位置を比較して、許容目標位置よりリムの位置が小さい場合、回転させるニップルに接続されたスポークのスポーク番号 $j$ およびスポーク番号 $j$ について必要なニップルの回転角度 $\theta_N(j)$ を0として、メインコントローラの画面に表示して、終了する。許容目標位置よりリムの位置が大きい場合、 $Z_N$ 軸方向プラス側のリムの位置と許容目標位置の差 $e_{ZN+}(i)$ および $Z_N$ 軸方向マイナス側のリムの位置と許容目標位置の差 $e_{ZN-}(i)$ は、

$$e_{ZN+}(i) = z_{N+}(i) - t_{ZN+} \quad (7)$$

$$e_{ZN-}(i) = z_{N+}(i) - t_{ZN-} \quad (8)$$

と表せる。0から $p-1$ の各スポーク番号 $i$ について差 $e_{ZN+}(i)$ および差 $e_{ZN-}(i)$ を比較して、最も大きな差

におけるスポーク番号 $i$ を $j$ とする。最も大きな差におけるスポーク番号 $j$ について差 $e_{ZN+}(j)$ および差 $e_{ZN-}(j)$ から、最も大きな差を打ち消すために必要なニップルの回転角度 $n_{\theta N}(j)$ を計算する。スポーク番号 $i \neq 0$ であるスポークが図2における $Z_N$ 軸方向マイナス側に位置する場合において、差 $e_{ZN+}(j)$ が最も大きい場合は式(5)を用いて、

$$n_{\theta N}(j) = -\frac{e_{ZN+}(j) + b_{ZN+}(0)}{a_{ZN+}(0)} \quad (9)$$

と表せる。差 $e_{ZN-}(j)$ が最も大きい場合は式(6)を用いて、

$$n_{\theta N}(j) = \frac{e_{ZN-}(j) - b_{ZN+}(0)}{a_{ZN+}(0)} \quad (10)$$

と表せる。また、スポーク番号 $i \neq 0$ であるスポークが図2における $Z_N$ 軸方向プラス側に位置する場合において、差 $e_{ZN+}(j)$ が最も大きい場合は式(6)を用いて、

$$n_{\theta N}(j) = \frac{e_{ZN+}(j) - b_{ZN+}(0)}{a_{ZN+}(0)} \quad (11)$$

と表せる。差 $e_{ZN-}(j)$ が最も大きい場合は式(5)を用いて、

$$n_{\theta N}(j) = -\frac{e_{ZN-}(j) + b_{ZN+}(0)}{a_{ZN+}(0)} \quad (12)$$

と表せる。スポーク番号 $j$ について必要なニップルの回転角度 $\theta_N(j)$ は、

$$\theta_N(j) = \theta_N(j) + n_{\theta N}(j) \quad (13)$$

と表せる。リムの位置 $z_{N+}(i)$ は、スポーク番号 $i \neq 0$ であるスポークが図2における $Z_N$ 軸方向のマイナス側に位置する場合は式(5)を用いて、

$$z_{N+}(i) = z_{N+}(i) + \{a_{ZN+}(i-j)n_{\theta N}(j) + b_{ZN+}(i-j)\} \quad (14)$$

と表せる。スポーク番号 $i \neq 0$ であるスポークが図2における $Z_N$ 軸方向のプラス側に位置する場合は式(6)を用いて、

$$z_{N+}(i) = z_{N+}(i) + \{-a_{ZN+}(i-j)n_{\theta N}(j) - b_{ZN+}(i-j)\} \quad (15)$$

と表せる。0から $p-1$ の各スポーク番号 $i$ について、リムの位置 $z_{N+}(i)$ と、リムの許容目標位置 $t_{ZN+}$ およびリムの許容目標位置 $t_{ZN-}$ をそれぞれ比較する。リムの位置と2つの許容目標位置を比較して、許容目標位置よりリムの位置が大きい場合、上記の計算を繰り返す。リムの位置と2つの許容目標位置を比較して、許容目標位置よりリムの位置が小さい場合、回転させるニップルに接続されたスポークのスポーク番号 $j$ およびスポーク番号 $j$ について必要なニップルの回転角度 $\theta_N(j)$ をメインコントローラの画面に表示して、終了する。この表示を作業する人が確認して、指示されたニップルを回転させて振れ取りを行う。

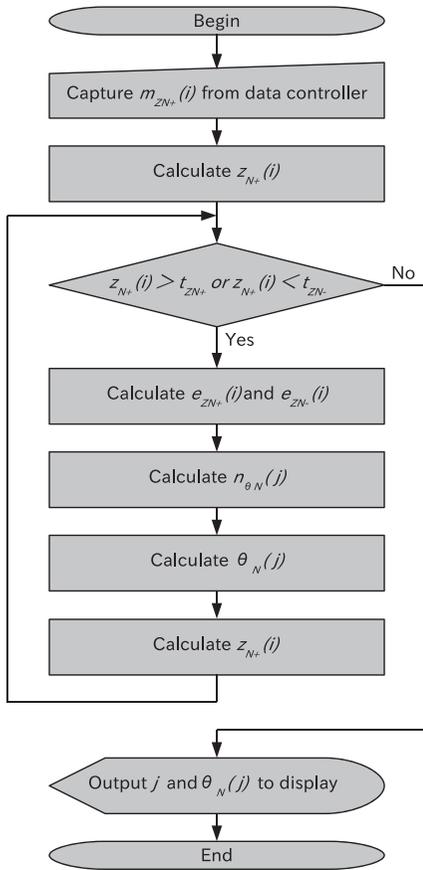


図10 メインコントローラの処理

表3  $Z_N$ 軸方向プラス側のリムの許容目標位置 $t_{Z_{N+}}$ および $Z_N$ 軸方向マイナス側のリムの許容目標位置 $t_{Z_{N-}}$

$t_{Z_{N+}}$	$t_{Z_{N-}}$
14.0mm	13.4mm

3.2 装置の性能確認

3.2.1 実験方法

振れが大きく複数ヶ所に生じているリムを用いて、構成した支援装置を運用して、振れ取りを行った。支援装置を運用する前に、0から $p-1$ の各スポーク番号 $i$ についてリムの位置 $z_N$ を測定した。支援装置を運用してメインコントローラの画面に表示されたスポーク番号 $j$ およびニップルの回転角度 $\theta_N(j)$ を用いて、人の手でニップルを回転させてリムの振れを取った。振れを取った後に、0から $p-1$ の各スポーク番号 $i$ についてリムの位置 $z_N$ を再び測定して、各位置が表2に示すリムの許容限界位置 $l_{Z_{N+}}$ お

よびリムの許容限界位置 $l_{Z_{N-}}$ に収まっているか確認した。なお生じたリムの振れは、図8に示すニップルの回転角度 $\theta_N(0)$ とリムの変位 $d_{Z_{N+}}$ における線形の関係が成り立つ範囲とした。表3に本実験で用いた $Z_N$ 軸方向プラス側のリムの許容目標位置 $t_{Z_{N+}}$ 、および $Z_N$ 軸方向マイナス側のリムの許容目標位置 $t_{Z_{N-}}$ を示す。27.4mmのリムの幅から、 $Z_N$ 軸方向プラス側のリムの理想の位置は13.7mmとなる。リムの理想の位置から $\pm 0.4$ mmを許容限界位置としたことに対して、リムの理想の位置から $\pm 0.3$ mmを許容目標位置とした。

3.2.2 実験結果

支援装置を運用する前におけるリムに振れが生じる、および支援装置を運用した後におけるリムの振れを取った、0から $p-1$ の各スポーク番号 $i$ についてリムの位置 $z_N$ について、図11に振れが大きく複数ヶ所に生じているリムについて示す。支援装置を運用してメインコントローラの画面に表示されたスポーク番号 $j$ およびニップルの回転角度 $\theta_N(j)$ について、表4に振れが大きく複数ヶ所に生じているリムについて示す。図11から、表4に示すスポーク番号 $j$ およびニップルの回転角度 $\theta_N(j)$ を用いて、人の手でニップルを回転させてリムの振れを取った後、0から $p-1$ の各スポーク番号 $i$ についてリムの位置 $z_N$ は、表2に示すリムの許容限界位置 $l_{Z_{N+}}$ およびリムの許容限界位置 $l_{Z_{N-}}$ に収まることを確認した。

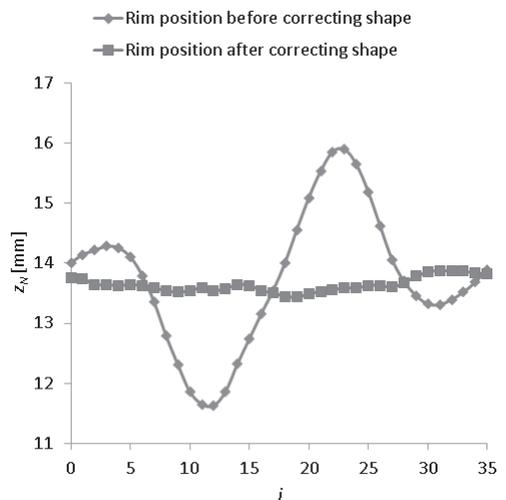


図11 振れが大きく複数ヶ所に生じているリムについて0から $p-1$ の各スポーク番号 $i$ についてリムの位置 $z_N$

表4 メインコントローラの画面に表示されたスポーク番号 $j$ およびニップルの回転角度 $\theta_N(j)$

$j$	$\theta_N(j)$
11	-2.79
22	-0.67
23	2.81
24	-0.32

4. おわりに

本研究では、自転車のホイールの組み立てにおいて生じるリムの振れを対象として、人の手でニップルを回転させてリムの振れを取り、繰り返し作業を減らして効率よく作業するために、回転させるニップルの位置と回転量を人に指示する支援装置の開発した。一ヶ所のリムが振れている位置の振れ量について回転させるニップルの位置と回転量を事前に予測するために、一つのニップルの回転量におけるリム全体の振れ量の関係を明らかにした。本研究で用いたホイールでは、ニップルの回転量とリムの変位量の関係は線形であった。支援装置において、ニップルの回転量におけるリム全体の振れ量の線形の関係を用いて、実際に計測したリム全体の振れ量に対して、振れを許容限界の範囲に収めるために回転させるニップルの位置と回転量を予測する方法を提案した。提案した予測方法を支援装置に実装して、装置を構成した。構成した支援装置を用いて、実際に振れが大きく複数ヶ所に生じたリムに対

して、支援装置が示した、振れを許容限界の範囲に収めるために必要な回転させるニップルの位置と回転量を用いて実際に人が振れを取った。振れを取った後に、リムの位置を測定して、振れが許容限界の範囲に収まっていることを確認して、支援装置の有効性を確認した。

今後、リムの大きさや材質の違いにおいても対応できる支援装置を開発していく。

謝辞

本研究は競輪の補助 (25-120) を受けて実施した。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] 井上重則, 車輪の組み方の話, 自転車技術情報, No.68 (1995), pp.1-6.
- [2] 藤川尚, 河治宏泰, 吉野秀雄, 服部四土主, 鈴木重義, 横山克義, 岡安征雄, 長谷川一秋, 車輪組立方法の調査研究, 自振協技術研究所報告, No.8 (1977), pp.57-81.
- [3] 自転車産業振興協会, 車輪自動狂い取り装置の自動化について, 自転車技術情報, No.34 (1987), pp.46-48.
- [4] 横山克義, 鈴木重義, 服部四土主, 自転車車輪組立機, 機械設計, Vol.23, No.12 (1979), pp.48-51.
- [5] 自転車産業振興協会, 車輪締上機の高性能化の調査研究, 自転車技術情報, No.65 (1994), pp.49-50.



## 旧大竹家煉瓦蔵の再生・利活用に関する研究

石田 敏明\* 長尾 亜子\*\* 比護 結子\*\* 富永 祥子\*\*

### Research and study on the revitalization/utilization of former Ohtake family's historical brick warehouse

Toshiaki ISHIDA\* Ako NAGAO\*\* Yuko HIGO\*\* Hiroko TOMINAGA\*\*

#### 1. 研究の背景と目的

英国では 30 年程前（1980 年代）の経済不況の折に、失業者の雇用対策の一つとして文化財修復作業に力を入れることで結果的に観光客が増え、「文化財に投資すべき」という認識が定着した。これを機に文化財保護に対する国・国民の考え方に画期的な変革が進み、現在では英国国民の 6%が「ナショナル・トラスト」の会員となっているとの報告がある。このことから、歴史的建造物の保存と利活用は「まちおこし」の一環としてまた、経済的見地からも充分、機能していることが分かる。群馬県前橋市全体では煉瓦造建築は 16 棟あり、現在も倉庫や飲食店などに活用されているため、歴史の記憶や市民の愛着の拠り所になっていると考えられる。本研究の対象である旧大竹家煉瓦蔵は、1923 年頃の時期に酒醸造のために建設された歴史的建造物である。2006 年（平成 18 年）に前橋市土地開発公社が窓口となり、保存と利活用を目的として土地・建物が購入された経緯がある。このような煉瓦造建築をまちの資産と捉え、まちおこしに有効に利用したいと考えている。

#### 2 研究の視点-都市的視点に立った旧大竹家煉瓦蔵を含む施設および敷地の位置付け-

##### 立地について

旧大竹家煉瓦蔵（以下、煉瓦蔵）は市街地ゾーンにあり、JR 前橋駅より北北東方向の徒歩 15 分程度の広瀬川河畔に位置している。（図 1）この市街地ゾーンでは、2013 年 10 月に開館したアーツ前橋（市立美術館）によ

て市街地活性化が期待されている。開館を機に、まちなかに点在している観光拠点も含め広瀬川で繋がれた美術館、まちなか、煉瓦蔵などの「まち歩きネットワーク」を構築し、まちの魅力を再発見する仕掛けやシティプライドの育成が期待できる。特に煉瓦蔵は、前橋ゆかりの文化施設などと美術館のアネックスとして積極的な連携を図れば、まち歩きの拠点として最適な立地となると思われる。また煉瓦蔵の在る三河町エリアは古くは寺町で、庶民の生活の匂いのする下町である。煉瓦蔵の敷地は、周辺に比べ比較的余裕のある配置計画となっており、それを巧く利用し、外構も含めた計画とすれば、広瀬川沿いの遊歩道と一体となった市民広場になると思われる。

（図 2）



図1 市街地ゾーンにおける旧大竹家煉瓦蔵の位置



図2 広瀬川と一体に計画した旧大竹家煉瓦蔵

\*教授 建築学科  
Professor, Dept. of Architecture  
\*\*建築家  
Architect

敷地について

煉瓦蔵の魅力の一つは、南北に抜ける配置計画にある。酒造所であった敷地は約1,774㎡あり、煉瓦蔵を中心として酒造作業場（煉瓦蔵）、居宅・物置（木造平屋）、店舗・居宅（木造2階建）、車庫の4棟が機能的に配置されている。それに加え周辺風景を形成している地域のシンボルとしての煉瓦煙突と屋敷神、井戸と水の豊富な地域での酒造作業所の姿が残されている。酒造の機能的要因から敷地西側に建物が配置されているため東側が外部作業空間として空いており、広瀬川からまちをつなぐ動線が確保できることも今後の利活用に有利である。

(図 3-4)

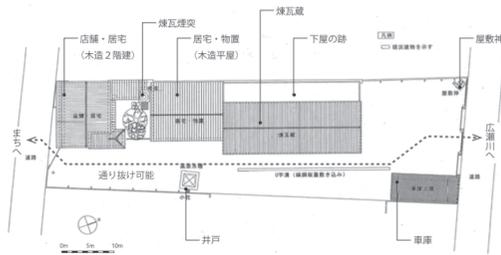


図3 旧大竹家煉瓦蔵の現況配置



図4 煉瓦と煙突のある風景

建築の空間的特徴

煉瓦蔵の建築的特徴は、「外壁が煉瓦でありながら内部は和小屋組」という点にある。世界遺産に登録された富岡製糸場の木骨煉瓦造とはまた違った「和+洋様式」として、原型を保存しつつ有効に活用すべき建築と考える。もう一つは現存する他の煉瓦蔵とのスケールの違いがあり、教室（約8m×8m）約二つ分のコンパクトな床面積に丸柱の列柱が立ち並び、それが内部空間の魅力になっている。（図5）これは、前述の様式の特徴に依って歴史的な意味も持ち合わせており、広く一般市民が体験・学習するにふさわしい内部空間であると考え。ま

た作業スペース1には、下屋が掛かっていた痕跡が見られ、現存しない下屋を再現することで、内部の使用方法に幅が広がるものと思われる。



図5 旧大竹家煉瓦蔵の内部空間

動線の特徴

酒造所であったことから、内部と外部の作業スペースが対応しているのが動線の特徴である。具体的には、蔵の周囲には4つの作業スペースがあり、出入口がそれぞれ設けられているので内外のアクティビティが高く有機的な関係となっている。（図6）

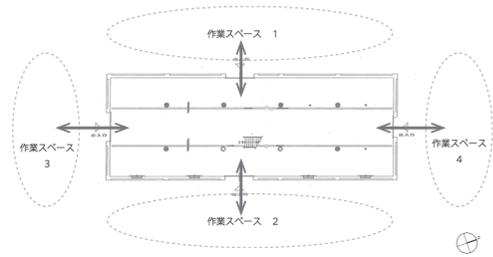


図6 旧大竹家煉瓦蔵の内部と外部の関係

3. 既往の研究-旧大竹家煉瓦蔵に関する既往研究報告書から-

竣工年代 と 構造基準

本建物の竣工年代は「店舗が棟札より大正12年4月30日とあり同時期と見られるが、設備等の設置、及び仕込み等を考えると店舗より数年遡っての建設と思われる。」（資料1/p21）とある。よって本建物の竣工年は大正12年（1923年）9月1日の関東大地震（M7.9）以前であり、濃尾地震（1891年/M8.0）以後であるが、濃尾地震の被害を踏まえて制定された「市街地建築物法の煉瓦蔵に関する規定」（1919年）の構造基準を満たしていないと考える。よって本建物の建設後、前橋市に於ける遭遇した主な地震は関東大地震（1923年/震度4）、西埼玉地震

(1931年/震度5)、新潟地震(1964年/震度3)、中越地震(2004年/震度3)、東日本大地震(2011年/震度5)程度であったが、辛うじて被害を免れている。これは本建物が建つ地層が広瀬川砂礫層であり、比較的地盤が安定していることや地震の入力方向も倒壊を免れた要因とも考えられる。しかしながら、「震度4の中程度以上の地震を受けると倒壊する恐れがある。」(資料3/p58)と指摘されている。

### 基礎

煉瓦基礎である。「建物周囲に設けられた地中梁の天端レベルのレベル差調査では、3~5mmのレベル差があるが、これは当初の施工精度によるものであり、不同沈下によらないとの判定が出ている。(資料3) 支持地盤は広瀬川砂礫層であり、基礎の状態は良好であると考えられる。」(資料3/p16)

### 煉瓦壁

「壁が長く、壁厚が薄いため、地震力に対してほとんど抵抗することなく倒壊する恐れがある。」「耐震性能は非常に低い。」「煉瓦壁(東側)の亀裂の伸展が異常である。」「(煉瓦壁)の亀裂の原因は不明である。」「煉瓦壁の劣化は少なく、状態は良いと診断できる。」「耐力壁長さを短くする、パットレスを設けること、壁厚を増すことである。」(資料3/p58)

### 木造小屋架構

「母屋受け梁を支持する梁が強度不足である。」「南東位置の母屋受け梁は端部が腐朽しており、屋根面が10cm程度たわんでおり、崩壊するのは時間の問題と思われる。この梁は積雪荷重や風荷重で崩壊する恐れがあり、早急に補強、補修が必要である。」(資料3/p52-53)

### 煉瓦造煙突

「亀裂が著しく、補修は困難であると判断した。現状を維持するためには周囲を鉄板や鉄筋でバンド状に補強する必要がある。」(資料3/p3)、「亀裂の進行を防止するためには、フープの緊張力、フープの間隔を相当小さくする必要がある。」(資料3/p54)、「基礎の重量は非常に小さいものと推測され、支柱の引き抜きで転倒する恐れがある。」(資料3/p55)「中心市街地とその周辺には、歴史を刻んだものが少なくないが、製糸場関連の煉瓦倉庫、煙突など多くのものが失われ、軽視されている。(中略)シンボリックな煙突、明かりのともる煉瓦蔵を、広くいろいろな人にまちづくりの一部として公開されることで、

「まち」と「人」の会おう「点」の一つとなり、「まちの記憶」と会おう場にもなり得る。」(資料1/p29-30)

## 4. 研究の方法-既往研究・実地調査を通じた知見を基にした評価と提案-

旧大竹家煉瓦蔵は、2006年(平成18年)に前橋市に移管した翌年の2007年(平成19年)以降、いくつかの研究機関により、文化財としての価値や温熱環境、耐震診断、利活用等々の調査・研究報告が作成されている。本研究はこれらの知見を基に、新たに実地調査と都市的な視点に立って、対象建物及び敷地内のデザイン要素を評価した上で空間の特徴を活かした建築用途や構造補強、および自然エネルギーを活かした環境に優しい、合理的な設備計画の方法を提案する。また、地方自治体の取り組み事例研究(文献)やヒヤリングを基に「まちおこし」や「シティプライドの育成」について提言を行っているが、ここでは紙面の制約もあり割愛する。

## 5. 実地調査

2011年11月10日に建物の北東角の基礎を掘削し、基礎の現状を確認した。基礎は4段の煉瓦(厚60mm×4段)とコンクリートの下部には玉石らしき石が確認できた。最上段の煉瓦は焼過煉瓦と見られ、2~4段目は普通煉瓦であった。外壁からは北側へ70mm程せり出し、3段目から下は東側へも60mm程せり出していた。コンクリートの厚みは約170mmで、煉瓦最下段から北東方向にそれぞれ110mm程出していた。コンクリートに鉄筋が入っているかどうかは確認できなかった。内部の床は掘削できず、目視によると排水溝(落とし口)の断面から厚さ160mm程度のコンクリートが打設されているものと推計できる。煉瓦蔵の基礎形状は四周同じ形状であることが多いということから、図7、図8のような基礎が連続していると考えられる。

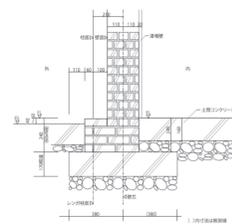


図7 基礎断面詳細図

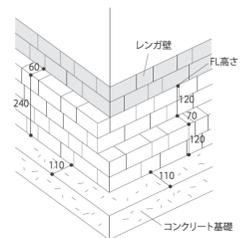


図8 基礎アイソメ図

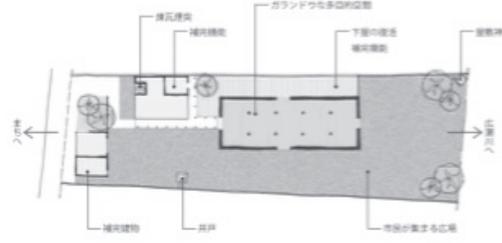
## 6. 利活用の方針

前橋ゆかりの文化施設と連携した利活用

本建物はアクセスにおいても、JR 前橋駅やアーツ前橋（市立美術館）とは徒歩圏内にあり、更にまちなかを巡回するマイバスのルートに参入することで、広瀬川美術館、前橋文学館、朔太郎記念館、蚕糸記念館など前橋ゆかりの文化施設と歩行者ネットワークを構築することで観光客や市民の日常的な文化施設として関連付けられることが望ましい。（図1）

**敷地内の利活用の方針**

本敷地の利活用では、煉瓦蔵だけでなく敷地全体の外構及び補完機能を整備していくことが、活発な利活用を生むきっかけとなると考えられる。具体的には、煉瓦蔵を多目的に利用できるガランドウな空間として確保し、建物四周にそれぞれに特徴を持たせた外部・半外部の空間を確保していく。陽の当たる南東広場から屋敷敷のある北東の庭には地域の人々が集まる機能を、西北のスペースには下屋を復活させ、蔵内部の補完的な空間にし、南西のエリアには煉瓦煙突を地域のシンボルとして、また蔵の補完機能を持つ建物を新築することで多目的利用を促進させるべきである。（図9）



現代の社会においてホスピタリティの高い空間に人々は集まりやすい。蔵だけを整備するのではなく、敷地内を有効に使用出来る計画を立てることが、地域のみならず遠方からの観光客にとって利活用される場になる方法である。また、そのような敷地全体でつくりだす「煉瓦蔵と煙突のある風景」として整備することが、前橋市の文化を後世に引き継ぐことと考える。

**既存施設を活かした環境への配慮**

敷地内には、煉瓦蔵以外にも既存の井戸や煙突、高架貯水槽などが残されている。これらの現況を調査し、活用可能と判断されれば、積極的に整備計画に取り組んでいくべきと考える。地域のランドマークとしてだけでなく、実際のまちの中で生き続ける施設として、以下のような利活用の新しい可能性を指し示すような環境整備計画（設備システム）とすべきである。

- ・井戸水を熱源とした新鮮空気(OA)の供給システムの構

**築**

- ・井戸水をヒートポンプの熱源として利用した床冷暖房システムの構築
- ・煙突の高低差を利用した自然換気システムの構築

**7. 具体的な再生手法の提案**

**7-1 用途の提案**

**アネックスギャラリー**

2013年度閉館予定のアーツ前橋（市立美術館）のアネックスとして、ある特定のジャンルに限定した展示を行う。古い架構や落ち着いた暗さを持つ煉瓦蔵空間と一体的な演出を行うことで、アーツに親しみながら歴史を感じられるギャラリーとなる。この場所でしかできない空間演出が、他地域の美術館との差異化につながる。

（図10）

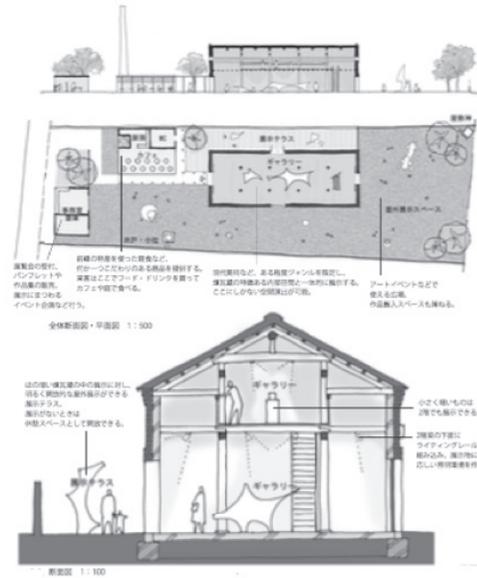


図10

**小劇場**

演劇やミニコンサート、朗読会など年齢層を問わずに市民が気楽に使える発表の場としての小劇場。柱のある空間を舞台装置として利用するなど、個性的な演出が期待できる。客席の向きは演目によって長手方向・短手方向を選択し、カフェに通じる出入り口やテラスは演者の登退場としても使える。（図11）

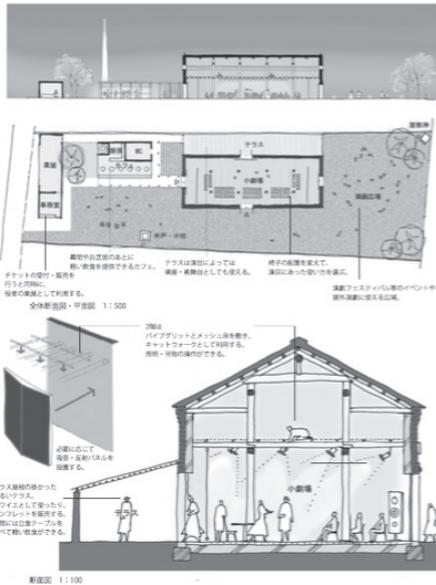
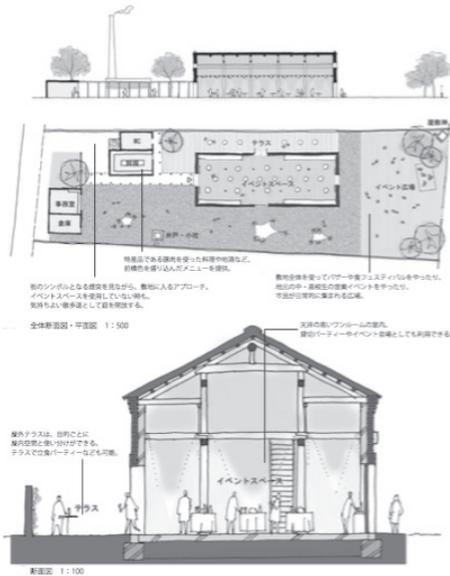


図11

イベントスペース

披露パーティーや講演会や懇親会などいろいろな催し物に対応するイベントスペース。煉瓦蔵という印象的な空間でイベントに参加することで、前橋の歴史を皆で共有し、地元への意識を高めることができる。別棟に厨房を設けて地元色豊かな食事を提供すると共に、大規模イベントの際には敷地全体を利用してお祭りの拠点にもなる。(図12)



7-2 構造補強の提案

構造補強の種類

構造補強の最も重要なことは、対象建物の特性に見合った補強方法を採用することである。構造的、歴史的、空間的特徴を把握し、個別に対応していく必要がある。「本建物の特徴として、外周部に煉瓦壁があり、室内にある8本の丸太柱が2階床、屋根を支えている構造であり、接合部の形式からこの丸太柱は地震力(水平力)に対しては抵抗できない。地震力は外壁の煉瓦壁が全て負担する構造である。煉瓦造耐力壁の特徴として、面内方向の力に対しては抵抗できるが、面外方向の力に対しては非常に脆弱である。」(資料3)とあるように、煉瓦蔵の特徴は、外壁が煉瓦造、内部の丸太柱、木造小屋組、2階木床組という混構造であり、外壁は固い構造であるが、屋根及び2階床は剛性が小さい。また、内部の丸太柱は水平力を負担せず、垂直荷重のみを負担し外壁部分で水平力を負担するという構造特性である。煉瓦壁が受ける水平力は図13のようになる。さらに、前述の歴史的、空間的特徴も踏まえ、煉瓦蔵の特性である煉瓦壁+木架構を保存しながら



図13

煉瓦壁の保持

煉瓦壁の厚さは22cmと一般的な煉瓦造としては非常に薄いため、歴史的価値の高い煉瓦壁を良好な状態で保存するためには、構造補強だけではなく既存煉瓦壁の保持と崩落防止についても配慮すべきである。また、既存の煉瓦壁の内部仕上げは漆喰であるため、内部に煉瓦を露出させて保存する必要性が低いことも他の煉瓦建築とは異なる点である。

木造架構の保持

和小屋組による内部空間は、他の煉瓦蔵には見られない重要な要素である、丸太柱を含めた木造架構を保存できる補強方法を選択すべきである。

空間の利便性(ユーザビリティ)

煉瓦蔵は間口約9.6mの間に上記の丸太柱が2本ずつ並んでおり、丸太柱間距離は約3.9m、丸太柱から煉瓦壁内法までは約2.5mと比較的狭い。単なる保存ではなく、フ

レキシブルに利用できる建築とするために、内部空間に過剰な構造材が出てこないよう配慮が必要である。

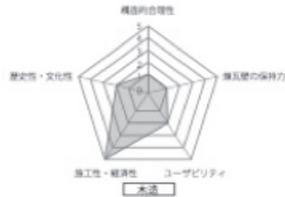
### 7-3 構造補強の種類別比較

前項の構造特性を配慮した上で、構造補強の種類ごとに以下の5項目について比較検討を行う。

1. 構造的合理性
2. 歴史性・文化性
3. 煉瓦壁の保持力
4. 施工性・経済性
5. ユーザビリティ

#### 木造

構造的には煉瓦造は固く、木造は柔らかい。煉瓦と補強材の動き（揺れの周期）が異なるため、構造的合理性は低い。また線材による構造のため、煉瓦壁の保持力は低い。加えてブレースなどが室内に必要なため、内部空間を広く使えない点はユーザビリティが低いと言える。(図 14)



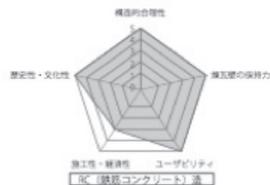
#### 鉄骨造

一般的に鉄骨造は構造補強に適している。しかし、本建物は地震時の煉瓦壁面外方向の力に対する補強が必要であり、煉瓦壁に発生する地震力を補強材まで伝達させる必要がある。壁面に発生する地震力を補強部材まで伝達する方法を考えると、鉄骨造による補強は構造的合理性が高いとは言えない。また、木造同様に線材であるため、煉瓦壁の保持力は低い。内部に鉄骨フレームが出てくるため、見た目にも使い勝手としても空間を圧迫する可能性が高い。(図 15)



#### 鉄筋コンクリート造 (RC 造)

RC 造は固さや揺れの周期などの特性が煉瓦造と類似しているため、煉瓦造の補強に適していると言える。面的に補強すれば、煉瓦壁の保持力が高く、内部空間を有効利用できる他、内部を漆喰で仕上げることで既存の空間性を活かした補強が可能となる。(図 16)

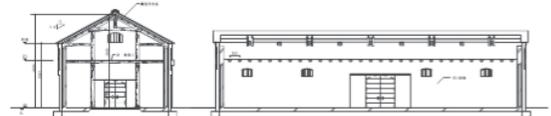
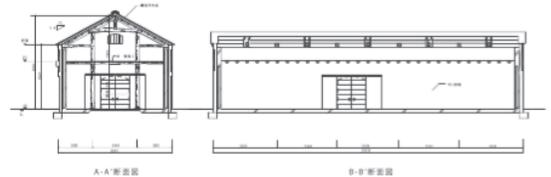
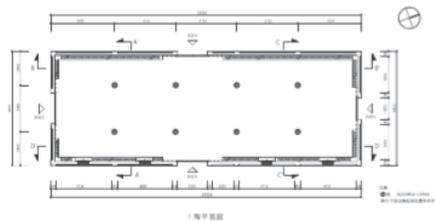
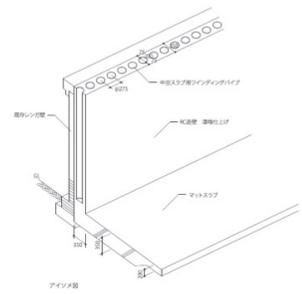


#### 小結

以上のように、「構造的合理性」、「歴史性・文化性」、「煉瓦壁の保持力」、「施工性・経済性」、「ユーザビリティ」といった5項目から、本建物の構造補強としては、RC造が最も適していると言える。

### 7-4 RC 造の壁による補強 (中空スラブ用ワインディングパイプ) 案

中空スラブ用ワインディングパイプ (以下、ボイド管) を採用することで地震時の変位量を面的に許容するとともに型枠及び根切り量が少なく、全体の重量も軽減できて経済的である。壁面から柱型等の出っ張りが無く、平面計画や壁面展示の自由度が大である。意匠的には壁面が平滑なため、丸太柱の象徴性と既存の空間性が保持できる。また、設備的にもボイド管を利用して配管スペースや輻射面としても利用できる。以上のことにより、この構法を最適な構造補強方法として提案する。(図 17-18) 図 17



平面図・断面図 1:250

図 18

7-5 煉瓦煙突の補強方法

現存する煉瓦造煙突の規模は高さ15.7m、直径(外径)は上部0.8m(内径Φ0.4m)、下部1.55mで鉄製補強バンド(フープ)が@2m~@1.375mのピッチで入っているが、煉瓦壁厚は不明である。また、煉瓦造煙突は鉄製のフレームで外部から補強されているが、計算によると地震時には補強支柱は座屈するという結果が出ている。また基礎の重量は非常に小さいものと推測されており、支柱の引抜きで転倒する危険性が指摘されている。(資料3)いづれにせよ、煉瓦煙突は構造的にはかなり耐震補強が必要であるが、地域の風景を形成している重要な工作物であるため、煉瓦蔵の補完的な施設と一体となった計画が望ましい。

7-6 煉瓦煙突基礎と鉄製フレームによる補強

煙突の基礎はサービス棟を新築する際、引き抜き転倒防止の重量のあるコンクリート耐圧版とし、新築サービス棟の基礎も兼ねることで全体計画の中で計画することが望ましい。また、煙突の既存鉄製フレームを撤去し、新たに地震時に対応可能な鋼材で再構築するとともに鉄製補強バンド(フープ)のピッチを半分にし、脚部は新設する基礎(耐圧版)に埋め込む。

8. 環境・設備計画の提案

8-1 井水利用について

既存の井戸の構造は組石造(外径1.6m、内径1.2m)・配管外径Φ60mm・水面高さGL-5m程度・取水量の制限は特になく、今回の設備計画に十分利用できると思われる。また井戸水をヒートポンプの熱源あるいは熱交換器を介したOAの温度調整などの利用も考えられる。(図19-20)



図19 左図：井戸外観 右図：井戸内部見下げ

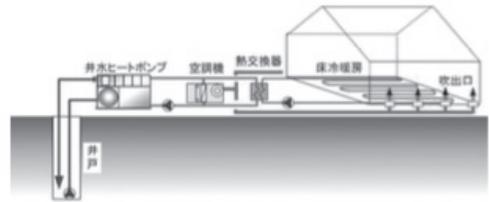


図20 井水利用空調システム概念図

8-2 煙突利用について

風道の状況を調査し利用可能と判断できる場合、煙突の高低差を利用した自然換気システムに利用する。

(図21)

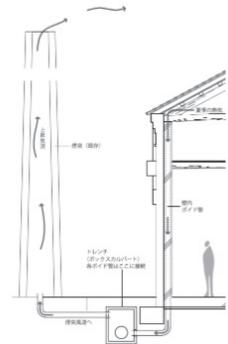


図21 煙突と壁内ボイド管を利用した自然換気システム

8-3 建物内空調について

天井高が高く気積が大きい空間なので、効率的に居住域を空調する計画とする。具体的には、コンクリートスラブ下に断熱材25mmを敷きこみ、スラブ内に冷温水管を打ち込んだ「輻射熱冷暖房(床冷暖房)」を提案する。また構造壁のボイド管を壁面からのOA吹き出しと自然換気の両方に利用する。ヒートポンプ、熱交換器の設備機器は新築別棟に設置し、煉瓦蔵はできるだけ純粋な形を保つ。(図22-23)

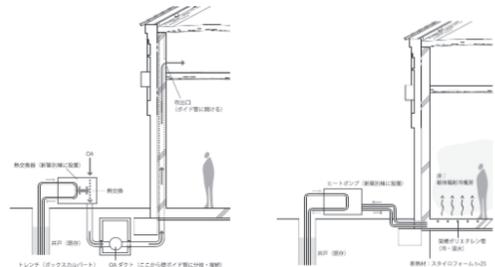


図22 左図：井戸水を利用した輻射熱冷暖房システム

図23 右図：井水・壁内ボイド管を利用したOAの供給

9. 外構デザインの提案

9-1 外構計画の方針

・南北に長い敷地形状を活かし、南側道路から北側の広瀬川河畔緑地へ遊歩道のように通り抜けられる庭園とする。

・煉瓦蔵をはじめ井戸・屋敷神など土地の歴史を感じられる既存の要素を生かしつつ、新築別棟・煉瓦舗装・植栽などの新しい要素を組み合わせた修景とする。

・駐車場は敷地内には設けず、敷地周辺に公共駐車場を設置するのが望ましい。



図24 たたきブロック作りワークショップ

\*出典 東京理科大学・小布施まちづくり研究所 活動記録2009年



図25 土煉瓦の制作風景

\*写真提供 遠野未来建築事務所

## 小結

敷地内は煉瓦舗装を基本とし、煉瓦蔵本体や植栽との調和を図る。また、市民参加型のワークショップで作った日干し煉瓦を利用するなど、地元住民にも工事過程に積極的に参加してもらうことで「自分たちの手で育てていく施設」という意識と愛着を育めるようにする。

(図24-25)

## 10. まとめ

本研究は前橋市内にある文化施設との連携をとりつつ広瀬川やまちあるきネットワークを整備し、まちの魅力の再発見やシティプライドの育成を考慮した提案である。具体的な用途については今後の市場調査や研究を待たねばならないが、青森県弘前市にある「弘前吉井酒造煉瓦倉庫」を活用したアートプロジェクトである奈良美智展の成功事例もあるように、公共施設としてのアーツ前橋のアネックス（別館）としての利用や芝居小屋としての利用形態も十分に考えられる。また、煉瓦蔵の上部構造については詳細な既往調査報告書があるが、基礎部に関しては現時点では調査資料が不十分であり、煉瓦煙突については外観目視調査に留まっているため、不明な箇所が多く、継続した調査が望まれる。

本研究の目的であり、提案する構造補強方法は何もないガランドウで魅力的な空間を尊重する構法である。この空間はガランドウであることで様々な用途に適応することが可能であり、この空間を担保するためには、これを補完するために別棟としてサービス棟（トイレ、キッチン、事務所などの用途上必要な機能）を新築すべきである。

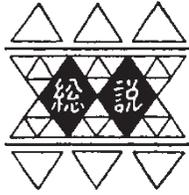
築後100年近くを経た本建物を通して前橋市の産業史や生活史を後世に伝えるためには、極力、本来の空間を保つ保存方法が重要であり、まちの資産となる。

## 執筆協力者

構造計画監修 林貞夫 元前橋工科大学工学部建築学科 教授  
設備計画監修 森山修治 日本大学工学部建築学科 教授

## 参考文献・引用文献

- (1) 前橋市教育委員会編、旧大竹家煉瓦蔵文化財調査報告書、文化財保護課、2006年度
- (2) 前橋工科大学 地域開発センター編、旧大竹家レンガ蔵及びレンガ煙突の耐震診断に関する研究、平成20年9月
- (3) 関口正男、前橋工科大学、旧・大竹家煉瓦蔵の温熱環境調査について、平成19年12月
- (4) 前橋市都市計画部建築指導課監修、旧大竹家木造母屋の耐震性について、平成21年4月
- (5) 群馬高専環境都市工学科編、地域活動への利用意向に着目した歴史的建築物の活用に関する研究-前橋市三河町レンガ蔵を例として-、平成21年7月、
- (6) 前橋の街と文化財を考える会編、(仮称)旧大竹家煉瓦蔵再生プロジェクト、平成22年2月



## チャカルタヤ山における宇宙線空気シャワー実験

垣本 史雄\*

### Air Shower Experiments at Mt. Chacaltaya

Fumio KAKIMOTO\*

#### 1. はじめに

1912年オーストリアの科学者V. Hessは、検電器を携え、自由気球に乗り込み、高度約5 kmまで上昇しながら空間電離度の測定を行った。高度が高くなるにつれて電離度が増加する結果から、宇宙から飛来する高エネルギー放射線が存在すると結論し、これを宇宙線と名づけた<sup>1)</sup>。その後の観測で、宇宙線の主成分は、陽子をはじめとする原子核であり、この他に電子成分などが1%以下あることがわかった。また、そのエネルギーは、 $10^8$ から $10^{20}$  eVを超えるものまで観測されている。太陽は、数 GeVまでの宇宙線加速源であることが確認されているが、ここで注目している $10^{13}$  eV以上の高エネルギー宇宙線の起源は、いまだに確立されておらず、この解明こそが宇宙線研究における最大の研究テーマなのである。

本稿では、宇宙線研究の目的と筆者が特に関わった南米ボリビア・チャカルタヤ山宇宙物理学研究所での研究内容を紹介する。この研究所では、Kneeと呼ばれる $10^{15}$  eV領域を含む $10^{13}$ から $10^{18}$  eVにわたるエネルギーを有した宇宙線の研究を行った。

#### 2. チャカルタヤ山宇宙物理学研究所

南米ボリビア付近のアンデス山脈は、東西二つに分かれ、これらに挟まれて標高約4,000 m、東西約200 km、南北約800 kmにわたって極めて平坦な高原アルティプラノが広がっている。ボリビアの首都ラパス市は、このアルティプラノにできたすり鉢状の谷間に位置し、その北西約35 kmの位置に標高5,286 mのチャカルタヤ山がある(写真1)。本報告で紹介するチャカルタヤ山宇宙物理学研究所(以後、本研究所と称す)は、この山の山頂近く

にあり、常設するこの種の観測所の中で世界最高高度5,200 m(大気の深さ550 g/cm<sup>2</sup>)に位置している。

本研究所は、1941年ボリビアの気象学者で、その後、宇宙線研究者となったI. Escobarによって開設された。本研究所が世界にその名を知られるようになったのは、C. F. Powell達が原子核乾板を用いて、 $\pi$ 中間子が $\mu$ 粒子(当時は $\mu$ 中間子と呼ばれていた)に崩壊する軌跡を発見したことからである<sup>2)</sup>。この $\pi$ 中間子は、湯川秀樹によりその存在が予言されていた粒子であり、この功績により、1947年C. F. PowellとG. P. S. Occhialiniにノーベル賞が授与された。

本研究所に発電機が設置され、本格的に宇宙線観測が始まったのは1952年3月からであり、1954年7月には1,200 kw供給可能な商用電力線がラパス市との間に敷設された。さらに、1959年モスクワで開催された宇宙線国際会議のおり、小田稔(元宇宙科学研究所所長)と米国MITのB. Rossiとの間で、日本・米国・ボリビアの国際共同研究として、本研究所での宇宙線観測が計画された。以後、菅浩一(元東京大学宇宙線観測所所長)が責任者



写真1. アルティプラノから見たチャカルタヤ山。

\*教授 物理学教室  
Professor, Dept. of Physics

となり、準備期間を経て、1962年に本観測が開始された。その後、1967年ベトナム戦争の影響による米国の経済的問題によりMITが参加を中止し、それ以後は日本ボリビア共同研究として継続された<sup>3,4,5)</sup>。

### 3. 宇宙線観測

現在までに観測されている宇宙線のエネルギー上限値は $10^{20}$  eV (=16 J) 代に到達しており、これは、宇宙における単一粒子としては、最も高いエネルギーを有した成分である。ちなみに、16 Jは、1.6 kgの物体を1 mの高さから落下させたとき、地表での物体の運動エネルギーに相当する。これだけのエネルギーを1粒子が有していることは、誠に驚くべきことである。さて、この宇宙線の主要な成分は、陽子をはじめとする原子核であり、直接測定による $10^{10}$  eV程度エネルギー領域における組成は、太陽系の平均原子核組成とほぼ一致している。

図1には宇宙線の微分エネルギースペクトル測定結果を示した。横軸は宇宙線のエネルギー $E$  (eV) で、縦軸には、 $E$  (GeV) 以上のエネルギーを有した宇宙線の積分到来頻度を $F$  ( $\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$ ) であるとして、 $dF/dE$ をとってある。この図からわかるように、きわめてよい近似で $F \propto E^{-3}$ と表せる。

以上の結果から、宇宙線の生成は、非熱的であり、また、宇宙における最も激烈な現象と関わっているものと

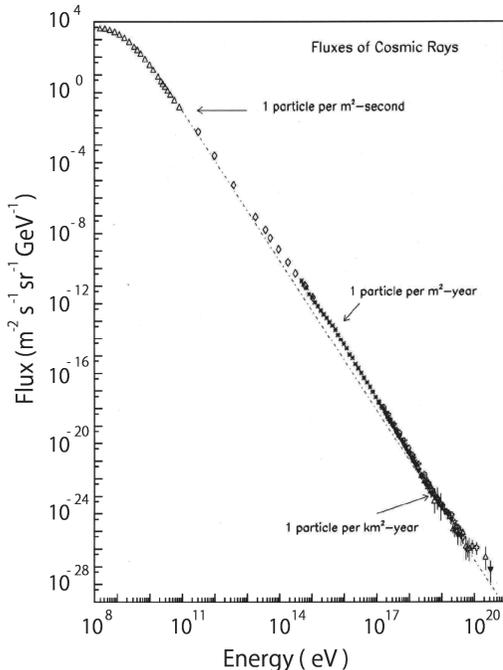


図1. 宇宙線の微分エネルギースペクトル。

推定できる。さらに、この宇宙線のエネルギースペクトルから得られる宇宙線が銀河系内で占めているエネルギー密度は、約 $1 \text{ eV}/\text{cm}^3$ と求まり、銀河系内で最も大きな値を示す成分である。これに次いで大きなものは、磁場と乱流成分で $0.3 \text{ eV}/\text{cm}^3$ 程度である<sup>6)</sup>。このことから銀河系内において、宇宙線がいかに重要な成分であることが理解できる。

さて、このような形状のエネルギースペクトルを示す唯一の加速モデルとして、E. Fermiにより提案されているものがある<sup>7)</sup>。詳細は省略するが、磁場を帯びた運動する領域との衝突・反射によって荷電粒子が加速されるというものである。このような状況がどのような天体で実現されているのかなど、加速機構の詳細を解明するためには、宇宙線のエネルギースペクトルと質量組成の情報は極めて重要ということになる。

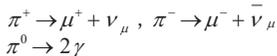
ところで、宇宙線発見以来約100年を経過しているにもかかわらず、その起源が未だに不明であることの原因は次の点にある。すなわち、主成分である原子核が電荷を帯びており、これが長時間、磁場が存在する宇宙空間を伝播する間に、進行方向が曲げられ、観測時の入射方向からは、起源天体が同定できないのである。このことは、早くから天文学として発展を遂げた可視光と宇宙X線、 $\gamma$ 線と比べて決定的に不利な点である。この状況を改善するには、銀河系磁場の影響が少なくなる、できるだけ高エネルギーの宇宙線を観測すればよいことになる。まさに、宇宙線発見以来の宇宙線研究は、より高いエネルギーの宇宙線の観測の追求の歴史を辿ってきたと言ってもよい。ちなみに、銀河系内の平均磁場強度は $3 \mu\text{G}$ 程度であり、この影響が無視できるためには、エネルギーが $10^{19}$  eV以上の宇宙線である必要がある。ここで問題となるのが、宇宙線の積分到来頻度が $E^{-2}$ に比例する点である。すなわち、 $10^{12}$  eV程度までの宇宙線は、飛行体や科学衛星に搭載した検出器で直接測定が可能であるが、 $10^{19}$  eV以上の宇宙線を高い統計量で収集するためには、関東平野程度の検出面積を実現しなければならないということになってしまうのである。また、たとえこれが実現できたとしても、このような観測装置を宇宙空間で展開することは不可能であり、しかたなく地上での観測を行うことになる。

ところで、宇宙から地球大気に突入する宇宙線を一次宇宙線と呼ぶが、これが地球大気に突入すると、大気原子核と相互作用を起こし、中間子などの多重発生を行い、種々の過程を経て多量の粒子群(二次宇宙線と呼ぶ)を形成する。これを空気シャワー現象と呼ぶ。このため、地表での観測では、一次宇宙線そのものの直接測定は不

可能で、それが生成する空気シャワーを観測、すなわち間接測定をすることになる。そこで、空気シャワー観測結果から大気へ突入した一次宇宙線の情報を導き出す操作が必要となる。ここで、宇宙線起源の解明に欠かすことができない情報は、一次宇宙線のエネルギー、到来方向と原子核種である。これらの情報から、宇宙線エネルギースペクトル、到来方向異方性と質量組成の結果を得ることになる。もちろん、この導出手法を開発するには、膨大なシミュレーション計算を行うことが不可欠となる。以上のように、宇宙線の研究には、克服すべき多くの難問があることがご理解いただけると思う。

#### 4. 空気シャワーとその縦方向・横方向発達

大気へ突入した一次宇宙線は、大気原子核と相互作用し、主に大量の $\pi$ 中間子を多重発生させる。この $\pi$ 中間子の一部はさらに相互作用を行い、また、残りは下記に従い崩壊する。



さらに、 $\mu$ 粒子は、次式で崩壊する。



これにより生成された電子・陽電子や $\gamma$ 線（以上まとめて電磁成分と呼ぶ）は、大気中を進行するにつれて、制動放射、電子対生成を繰り返し、多量の電磁成分を生成していく。電磁成分の次に多いのは $\mu$ 粒子である。このように、物質中を進行するにつれて相互作用・崩壊を繰り返し、粒子生成を行う様子をカスケードと呼ぶが、このうち原子核・中間子成分に関しては核カスケード、電磁成分に関しては電磁カスケードと呼ぶ。以上の結果、宇宙線の大气突入直後においては、空気シャワー粒子総数（シャワーサイズ： $N_e$ ）は指数関数的に増大し、これに伴い、一次宇宙線のエネルギーはシャワー粒子に細分化されていくことになる。ところで、空気シャワー粒子の大部分は、電磁成分であることから、 $10^8$  eV以下になると電子と陽電子の電離損失により、急速に大気中に吸収されていく。従って、空気シャワーサイズは、大気のある深さ（最大発達深さ： $X_{\max}$ と呼ぶ）で最大値に達し、それ以降は減衰していく。この増減の様相を空気シャワー縦方向発達と呼ぶ。図2には、一次宇宙 $\gamma$ 線が大気へ突入した場合に生成される電磁カスケードの縦方向発達の計算結果を示す。この結果から、生成される総粒子数、特に最大発達時の空気シャワーサイズ $N_{\max}$ は、一次 $\gamma$ 線のエネルギー $E$ に比例すること、また、 $X_{\max}$ の値は、 $E$ が大きくなるにつれて大きくなるのがわかる。

一方、生成された電子・陽電子は、大気中を進むにつ

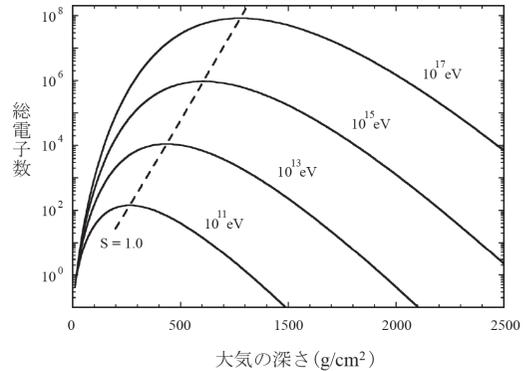


図2. 一次宇宙 $\gamma$ 線が入射したときの空気シャワー縦方向発達の様子。曲線に沿ってある数字は、一次宇宙 $\gamma$ 線のエネルギー。破線は最大発達の深さを連ねたもの。 $s$ は発達段階を表すパラメータで、最大発達では1.0。

れて多重散乱をうけ、進行方向にたいして垂直な方向に広がっていく。これを空気シャワー横方向発達と呼ぶ。この結果、シャワー粒子数密度 $\rho_e$ は、シャワー中心軸からの距離 $r$ とモリエール長 $r_m$ との比 $x=r/r_m$ を用いて、次式のNKG関数で表される<sup>8)</sup>。

$$\rho_e(x)/N_e = C(s)x^{s-2}(1+x)^{s-4.5}$$

ここで、 $C(s)$ は規格化定数、 $s$ はシャワーの発達段階を表すパラメータでageパラメータと呼ばれる。その値は、空気シャワー発生日で0、最大発達では1.0であり、大気中を進行するに従い大きな値をとることになる。このように、電磁成分が一次宇宙線である場合の発達の様相は、良い精度で解析的に計算できるが、実際の宇宙線の場合は、主な入射粒子が原子核成分であるため、より複雑な縦方向・横方向発達をすることになる。これを計算するには、原子核相互作用に関する詳細な情報を考慮する必要がある。もちろん、これは加速器実験から得られるわけであるが、次のような問題点がある。すなわち、研究対象とする宇宙線のエネルギーが加速器で情報が得られるエネルギー領域をはるかに越えていること、また、加速器を用いた相互作用の情報は、主に陽子-陽子衝突に関するものである一方、空気シャワー計算に必要なのは、少なくともターゲット成分は空気原子核の場合の情報である。したがって、実際の計算では、得られる加速器データから高エネルギー原子核相互作用モデルを構築し、これを組み込むことになる。この結果、高エネルギー宇宙線の研究では、得られた結論に対して、常に、採用する高エネルギー相互作用モデルに関する不定性がつきまとうこととなる。また、原子核相互作用は、すべて確率過程として取り扱う必要があるため、解析的な計算は不

可能であり、シミュレーション計算を行う必要がある。しかも、膨大な量のシャワー粒子を取り扱うことから、入射宇宙線のエネルギーが増大するにつれて、1 事象の計算に日単位の計算時間を要するようになる。一方、確率過程に伴うフラクチュエーションを強く反映するため、同じ条件で計算を行ったとしても、その結果は、大きく異なることになる。従って、実際の実験結果と比較すべき有意な計算結果を得るためには、膨大な事象数のシミュレーション計算結果を得ておく必要がある。図3には、多量のシミュレーション計算結果を平均して得られた縦方向発達の結果を示した。この図から、一次宇宙線が陽子の場合と鉄原子核の場合とは一致しないことがわかる。このことは、この発達の様相の違いを利用して、一次宇宙線質量組成が決定できることを意味する。

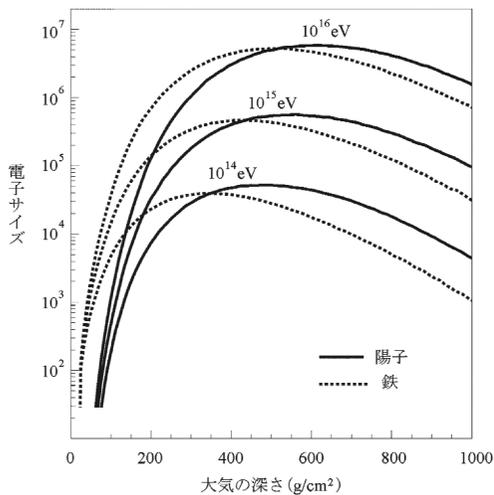


図3. 一次宇宙線が陽子（実線）と鉄（点線）の場合の空気シャワー縦方向発達の様相。曲線に沿ってある数字は、一次宇宙線のエネルギー。

#### 4. 空気シャワーの観測

空気シャワーが横方向発達することにより、空気シャワー粒子は、シャワー軸を中心に円対称に広く分布する(図4)。その範囲は、一次宇宙線のエネルギーや観測高度によって変化するが、数10 m から数 km におよぶ。これにより、空気シャワー粒子測定装置は、広い観測領域一面に敷き詰める必要はなく、研究対象エネルギー領域に最適な距離を隔てて設置することになる。このような観測施設を空気シャワーアレイと呼ぶ。個々の検出器は、面積数 m<sup>2</sup>、厚さ 5 cm 程度のプラスチックシンチレータと光電子増倍管で構成される。図5には、一般的に用いられるシンチレーション検出器の模式図を示した。検出器

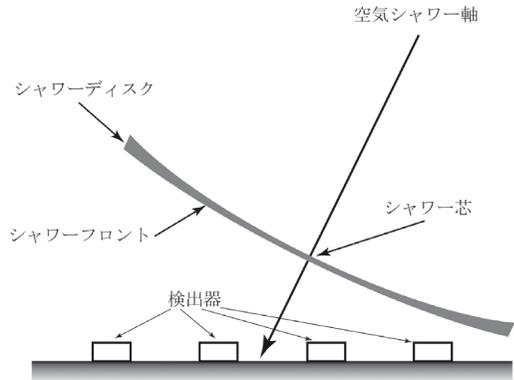


図4. 空気シャワーの模式図と空気シャワーアレイ。

に入射した空気シャワー荷電粒子は、シンチレータ通過軌道に沿ってシンチレーション光を放射する。この光を光電子増倍管で受光し、これを電気信号にかえ、同軸ケーブルを介して計測室に伝送する。空気シャワー粒子群は、ほぼ数十 ns 幅で、前面がわずかに曲がった円板状をなしており、個々の空気シャワー粒子は、ほぼ同時刻に検出器に入射することになる。そこで、各検出器からの出力信号を用いて、同時計数法によりトリガー信号を発生させ、すべての検出器情報を記録する。その主な内容は、各検出器に入射した粒子数とその到来時刻である。この記録結果をオフラインで解析し、到来時刻情報から空気シャワー軸の方向、すなわち一次宇宙線の到来方向を、この決定した到来方向と粒子数情報からは、主に一次宇宙線のエネルギーを推定することとなる。現在の空気シャワーアレイでは、一次宇宙線の到来方向とエネルギーの決定精度は、それぞれ、0.1 度から数度と 10% 程度である。エネルギー決定精度が悪い原因は、空気シャワー縦方向発達のフラクチュエーションによるところが大きい。

残る一次宇宙線核種の情報であるが、これには、観測した空気シャワーの縦方向発達の情報を得る必要がある。一般的な空気シャワーアレイでは、アレイ設置高度にお

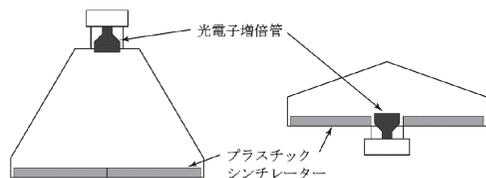


図5. 空気シャワー粒子検出器の模式図。検出器容器内面は、高光反射率を有する塗料が塗布されている。

ける空気シャワー情報しか得ることができないため、この測定結果から入射核種情報を得ることは難しい。その解決方法として、等頻度法と呼ばれるものがある。その原理図を図6に示した。これは、特に高高度に位置する空気シャワーアレイにおいて、宇宙線の平均質量組成を決定するのに用いられる。これには、宇宙線が地球に等方的に入射しており、ある到来頻度  $I_0$  を示す一次宇宙線のエネルギー  $E_0$  と質量組成が入射方向には依存しないことを大前提とする。ここで、空気シャワーアレイが位置する大気深さを  $X_0$  g/cm<sup>2</sup> とすると、このアレイに天頂方向から入射する宇宙線は、もちろん大気を  $X_0$  g/cm<sup>2</sup> だけ通過して観測される。一方、同じ頻度で天頂角  $\theta$  から入射してくる宇宙線は、大気の厚さ  $X_0 \times \sec \theta$  g/cm<sup>2</sup> を通過してから観測されることになる。従って、同じ頻度で観測される空気シャワーのサイズを縦軸に、通過した大気深さ  $X_0 \times \sec \theta$  g/cm<sup>2</sup> を横軸として描けば、これは、エネルギーが  $E_0$  の一次宇宙線の平均的な縦方向発達曲

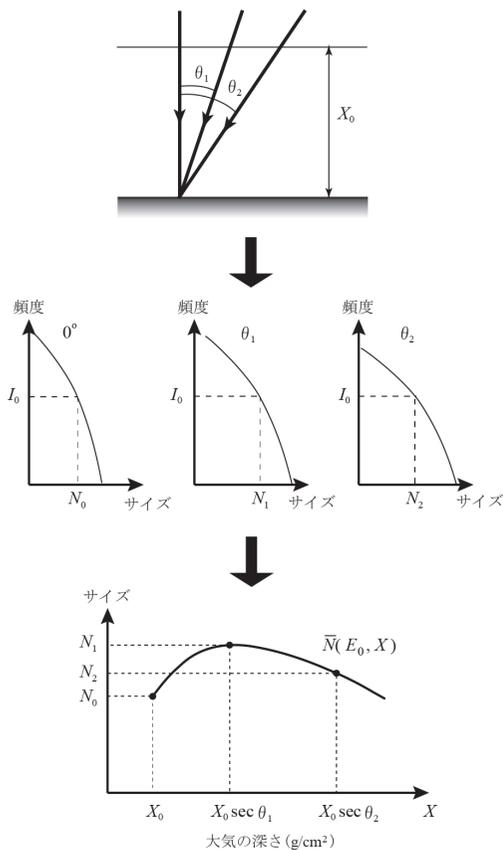


図6. 等頻度法による平均的な縦方向発達曲線測定の実験原理図。詳細は本文参照。

線ということになる。

次に多く用いられる方法は、空気シャワー荷電粒子によって生成される放射光を測定する方法である。この放射光には二種類ある。その一つは空気チェレンコフ光であり、他は空気シンチレーション光である。空気チェレンコフ光は、空気シャワー荷電粒子（主に電子・陽電子）が屈折率  $n$  の空气中を、ほぼ光速  $c$  で通過することにより、粒子の進行方向に対して角度  $\theta = \cos^{-1}(1/n)$  の方向に放射される光である。ここで、空気の屈折率  $n$  は、極めて1に近いので、空気チェレンコフ光は、空気シャワー荷電粒子の進行方向に放射されることになる。

この空気チェレンコフ光を空気シャワー軸から離れた地点にある光測定装置で観測する場合を考えてみる。図7には、大気中上空から発達をはじめた発達の早い空気シャワー（図(a)）と、より長く大気を進んでから発達をはじめた発達の遅いもの（図(b)）をシャワー軸から離れた位置Pで観測する場合を描いてある。光測定装置には、観測高度より上空で生成された空気チェレンコフ光が入射してくるが、検出器に入射する時刻は、その発生高度に応じて異なることになる。なお、空気シャワーが大気中を進行する速度は、ほぼ光速  $c$  であるとする。さて、この到着時刻に異なりが生じるのは、たとえば位置AおよびCで発生された空気チェレンコフ光が測定装置に到着する時間差は、次のようにして理解できる。すなわち、位置Aで発生した空気チェレンコフ光が検出器に入射するまでの通過距離を  $l_{AP}$  とし、さらに位置Cまで空気シャワーが進行する距離を  $l_{AC}$ 、それから放射される空気チェレンコフ光が検出器に到達するまでの距離を  $l_{CP}$  とすると、明らかに、 $l_{AP} < l_{AC} + l_{CP}$  である。これより、AとCで発生したチェレンコフ光が検出器に到達する時間差は、 $((l_{AC} + l_{CP}) - l_{AP})/c$  となるのである。したがって、各時刻に

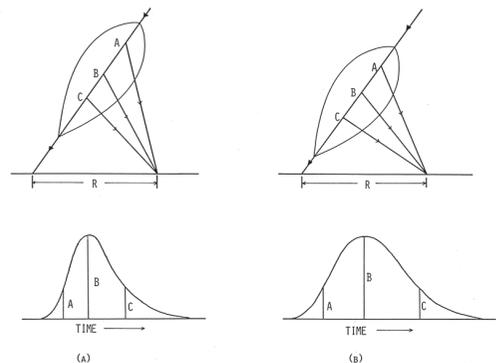


図7. シャワー軸遠方の検出器に入射する空気チェレンコフ光の到着時間分布と縦方向発達の様子との関係。

測定装置に入射する光の量は、それぞれに対応した高度における空気シャワー電子・陽電子の総数と、それらの角度分布によって決まる。以上の結果、空気チェレンコフ光到着時間分布波形に縦方向発達の様相が反映されることになるのである。図からわかるように、発達が早い（遅い）空気シャワーほど測定される空気チェレンコフ光到着時間分布波形は狭い（広い）ものとなる。すなわち、光測定装置の出力信号波形を解析することにより、個々の空気シャワーの縦方向発達情報を得ることができることになるのである。また、同じように、空気チェレンコフ光の横方向分布にも空気シャワー縦方向発達の情報が反映されることになる。すなわち、発達が早い（遅い）空気シャワーの場合ほど空気チェレンコフ光横方向分布は広く（狭く）なるのである。なお、この手法は、空気チェレンコフ光の代わりとして、生成以後直進する空気シャワー $\mu$ 粒子を用いることができる。ただし、 $\mu$ 粒子数は少ないため、大面積のシールド検出器が必要とするなどの欠点がある。

次に、空気シンチレーション光を測定する手法がある。空気シンチレーション光は、空気シャワー荷電粒子が大気中の原子・分子を励起し、これが脱励起するときに放射される光で、空気シャワーの軌跡に沿って等方的に放射される。ただし、これを精度よく測定するためには大面積の集光鏡を用いた光測定望遠鏡と、その焦点面に多数の光センサーを設置した装置を用いる必要がある。現在では、一次宇宙線のエネルギーが  $10^{18}$  eV 程度の空気シャワーに対して、数十 km 遠方においても観測が可能である。この場合、軌跡に沿った光量測定結果から、ほぼ直接的に空気シャワーの縦方向発達の様相が得られることになる。図 8 には、米国ユタ州で行われている宇宙線望遠鏡実験で得られた測定結果の一例を示した<sup>9)</sup>。

このように、空気シャワーに伴う光を観測することによって、個々の縦方向発達に関する情報が得られるが、どちらの手法にしても発達のフラクチュエーションの影響が大きく、残念ながら個々の一次宇宙線の核種を決定できる状況にはない。従って、多くの観測結果を蓄積し、質量組成として結果を示すことになる。また、このような光観測は、月の無い晴天夜を選んで実施する必要がある。また、放射された光が検出器に到達するまでの間に受ける大気による散乱吸収の影響を高精度で見積もるために、大気の状態を上空に至るまで把握しなければならないなどの欠点を有している。そこで、これらの欠点を克服する方法として、空気シャワーに伴って放射される電波を測定する方法が検討されている。

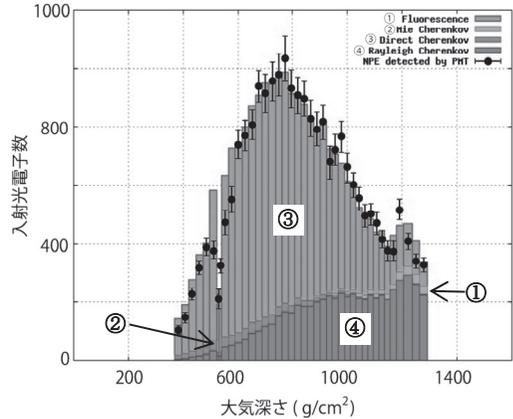


図 8. 空気シンチレーション光測定結果による空気シャワー縦方向発達再構成の結果。各測定結果 (●) は、光電子増倍管一本ごとで検出された光電子数を表している。得られた光子量には、空気チェレンコフ光等の成分も含まれている。各分量を分離するため、事象ごとにシミュレーション計算による評価を行う必要がある。図中、濃淡が異なるヒストグラム(①～④)がそれを表している。

## 5. 本研究所における宇宙線研究

以上からわかるように、宇宙線空気シャワー実験を行うには、研究対象とするエネルギー領域の一次宇宙線空気シャワーが最大発達になる高度付近に空気シャワーアレイを設置することが望まれる。これが不可能である場合、特に対象エネルギー領域が低い場合などは、できるだけ高高度での観測を行う必要がある。時には、航空機に検出器を搭載して測定を行うこともある。

チャカルタヤ山空気シャワーアレイは、この種の観測所としては、世界最高高度である標高 5,200m に位置している。その大気深さ 550 g/cm<sup>2</sup> は、地表のほぼ半分であり、 $10^{15}$  から  $10^{16}$  eV 付近の宇宙線空気シャワーが最大発達を迎えるため、これ以下のエネルギー領域の宇宙線観測に最適な場所であるといえる。また、南緯 16 度 21 分にあることから、北半球では不可能な銀河中心方向を観測することができる、などの特徴を有している。

### 5.1. 1990 年代前半までの研究成果

設立当初の目的は、銀河系内磁場の影響を受けない一次宇宙 $\gamma$ 線を観測し、その到来方向から  $10^{14}$  eV 以上の高エネルギー宇宙線起源を解明することであった。ここで重要なのが、多数の原子核成分の一次宇宙線の中から、その 1/100 以下程度しか存在しない一次宇宙 $\gamma$ 線をいかに選別するかということである。そこで着目したのが、

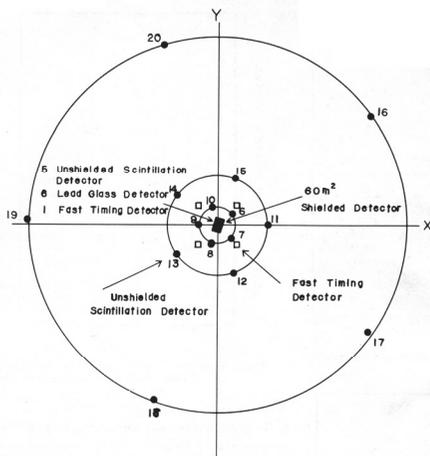


図9. チャカルタヤ山宇宙物理学研究所に初めて設置された空気シャワーアレイの検出器配置図. 座標原点に $\mu$ 粒子測定のための $60\text{ m}^2$ のシールド検出器がある.

一次宇宙 $\gamma$ 線から出発した空気シャワー中の $\mu$ 粒子数は一次宇宙原子核のそれに対して、極めて少ないという事実である。そこで、空気シャワー $\mu$ 粒子を測定するために、図9に示すように、当時としては世界最大面積 $60\text{ m}^2$ を有したシールド検出器を建設し、それを中心として、面積約 $1\text{ m}^2$ の40台のシンチレーション検出器を半径 $150\text{ m}$ の範囲に設置した空気シャワーアレイを完成させた<sup>10)</sup>。このシールド検出器では、 $600\text{ MeV}$ 以上の $\mu$ 粒子が検出できる。さて、この $\mu$ 粒子数による一次宇宙 $\gamma$ 線選別法は、現在でも用いられている手法であることを指摘しておきたい。

この空気シャワーアレイが完成した1960年代前半は、まだ大型計算機は普及しておらず、空気シャワーの解析からして、ほぼ手計算で行われており、現在要求されるような精度の高い結果を得ることは不可能な状況であった。それをふまえた上で、図10に観測結果を示す<sup>12)</sup>。これは、 $\mu$ 粒子数が少ない空気シャワー(mu-less showers)のみを選別し、その到来方向の赤経値の頻度分布を描いたものである。なお、このmu-less showers数は、全体の空気シャワー数の約 $1/1000$ である。この結果を見ると、赤経 $200$ から $220$ 度の方向から到来する宇宙線の事象数が平均より約 $3.8\sigma$ の過剰を示していることがわかる。この選別されたmu-less showersが一次宇宙 $\gamma$ 線であるとすると、広い領域から高エネルギー宇宙 $\gamma$ 線が到来していることになり、さらなる観測精度の向上、統計量の増大が期待された。

つぎに、観測所高度における生き残り陽子の測定を行った。一次宇宙線陽子は大気原子核と相互作用するが、

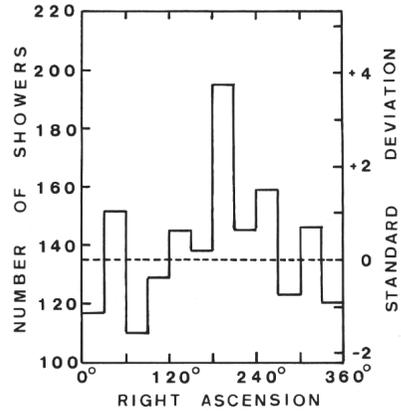


図10.  $\mu$ 粒子をほとんど含まない空気シャワー到来方向の赤経分布. 縦軸左は事象数, 右は標準偏差値を単位とした平均からのずれを表す.

観測所高度まで相互作用せずに到来する頻度は、その相互作用断面積の大きさによる。従って、この生き残り陽子の頻度を測定すれば、陽子-大気原子核相互作用断面積を求めることができる。この生き残り陽子の測定は、 $\mu$ 粒子用のシールド検出器をハドロン検出器として用いることにより可能となった。すなわち、生き残り陽子が検出器シールド物質と相互作用したときに期待される多量のハドロン生成を確認することによって行った。この結果、当時の加速器では、到達できなかった $10^{13}\text{ eV}$ エネルギー領域における陽子-空気原子核衝突断面積がエネルギーの増加とともに大きくなっているとの結論を得た<sup>13)</sup>。その結果を図11に示す。この結果は、その後、加速器実験によって得られた陽子-反陽子衝突断面積がエネルギーとともに増加しているとの結論に先駆けるものであった。この図には、その後、宇宙線と加速器により

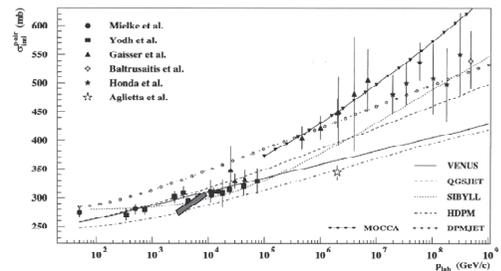


図11. 陽子-大気原子核相互作用断面積の測定結果(黒枠内). 横軸は、実験室系での陽子の運動量( $\text{GeV}/c$ )で、縦軸は相互作用断面積( $\text{mb}$ )である。他の測定結果は、その後、宇宙線と加速器を用いて得られた結果である。曲線は理論モデルによる計算結果。

現在までに得られた陽子-大気原子核相互作用断面積の測定結果, および理論による計算結果を示してある. 我々の結果が, 極めて良い結果であったことがお分かりいただけると思う.

次に, 一次宇宙線の積分エネルギースペクトル  $I$  の測定結果を得た.  $I \propto E^{-\alpha}$  としたときの  $\alpha$  値が  $10^{15}$  eV 付近を境にして, それ以下では, 1.6 から 1.7, それ以上  $4 \times 10^{17}$  eV までは,  $2.2 \pm 0.2$  であることを示した. すなわち, 微小ながら, エネルギースペクトラムに折れ曲がりがあることを, 世界に先駆けて示唆した<sup>14, 15)</sup>. この結果は, その後, 多くの観測所で確認され, この折れ曲がり (Knee と呼ぶ) の原因究明は, 現在の重要な課題の1つである.

さて, 私がチャカルタヤ山での研究に参加を開始したのは, 1975 年からである. 当時の空気シャワーアレイにおける検出器配置を図 12 に示す. このように検出器配置範囲を  $700 \text{ m} \times 700 \text{ m}$  に拡張し,  $5 \times 10^{16}$  から  $3 \times 10^{18}$  eV の宇宙線観測を行っていた. その研究主目的は, 超高エネルギー相互作用の解明であった. この頃になると, データ収集系に PC を用いることや, データ解析に大型計算機を用いるなど, ハード系やソフト系の開発が精力的に行われた. ここでは, この時期の観測結果の一例を紹介するとどめる. すなわち, 上空での縦方向発達の情報を得るため,  $60 \text{ m}^2$   $\mu$  粒子検出器に, 当時としては最も

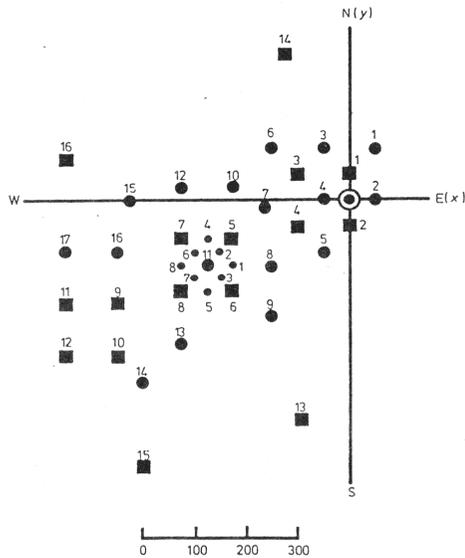


図 12. 1970 年代の本研究所の空気シャワーアレイ. ●, ■ はシンチレーション検出器の配置位置を示している. 座標原点には  $60 \text{ m}^2$  の  $\mu$  粒子検出器がある.

応答特性が良い光電子増倍管を付加し, 空気シャワー  $\mu$  粒子の到着時間分布を測定した. 空気シャワー軸と検出器までの垂直距離 (core distance) に対する光電子増倍管出力信号波形の立ち上がり時間と半値幅の測定結果とシミュレーション計算結果とを比較した一例が図 13 である. 実線は種々の相互作用モデルを仮定したときのシミュレーション計算結果である. 図からわかるように測定結果は, H モデルを用いたときの結果とほぼ一致している. このモデルは, 加速器で得られた陽子-陽子間相互作用の結果から陽子-大気原子核相互作用モデルを構築した場合 (A モデル) より, より多くの  $\pi$  粒子多重発生が起こるもので, 入射宇宙線原子核を陽子ではなく原子番号 20 程度の原子核とした場合に相当する. 当時は, 一宇宙線の質量組成に対する情報は少なく, 結果として, 対象エネルギー領域において, 加速器で得られた結果から予想されるより  $\pi$  粒子多重発生数が多い相互作用が起こっているか, 一次宇宙線の質量組成が, 原子番号  $A=20$  程度の中重核である可能性があると結論した<sup>16)</sup>.

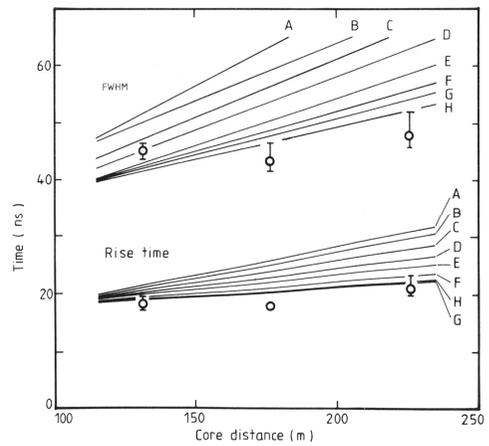


図 13. 空気シャワー  $\mu$  粒子の到着時間波形の立ち上がり時間 (Rise Time) と半値幅 (FWHM) とシャワー軸からの距離との関係. 実線は, 種々の相互作用モデルを用いた計算結果.

また,  $10^{18}$  eV を越えるような超高エネルギー宇宙線の新観測方法の開発を行った. その1つとして, 空気シャワーに伴う電波の観測を行った. これは, 現在の電波観測の潮流に先駆けるものであった. なお, この間の詳細は, 参考文献を明記するとどめさせていただきます<sup>17, 18)</sup>.

このように, 1970 年代から 1980 年代前半にかけては, 世界的に見ても宇宙線を用いた高エネルギー相互作用の研究が主に行われていた. この状況を一変させたのが,

1983年に発表された M. Samorski and W. Stumm の論文である<sup>19)</sup>。彼らは、ドイツ・キール大学の空気シャワーアレイを用いて観測を行い、はくちょう座 X-3 (中性子星と普通の星との連星系: Cyg X-3) と呼ばれる天体方向から到来する空気シャワーの中から、age パラメータが 1.1 以上を示す  $2 \times 10^{15}$  から  $2 \times 10^{16}$  eV の空気シャワーを選別し、その到来時刻と Cyg X-3 の連星周期 4.8 時間との同期性を解析した。その結果、あるフェーズのところの事象数が、他のフェーズの事象数分布から予想される事象数より約  $4.4 \sigma$  の過剰を示した、というものである。age  $\geq 1.1$  は、一次宇宙  $\gamma$  線が作る空気シャワーは原子核成分宇宙線より発達早いという特徴があることに基づく選別条件である。この結果は、Cyg X-3 が高エネルギー宇宙線の起源天体であることを示唆するものであった。ただし、現在までに、この結果を支持するような他の観測結果は得られていないが、1987 年に出現した超新星 1987A で加速されることが期待される高エネルギー宇宙線の観測が各地で行われたこともあって、宇宙線を用いた天体物理学的研究が一気に主流となり、現在まで続いている。本研究所でも、視野内にある X 線連星、パルサーや 1987A 等の興味深い天体からの  $10^{13}$  eV 以上の一次宇宙  $\gamma$  線の観測を行ったが、到来頻度の上限値を報告することにどまった<sup>20)</sup>。

その後、大規模な空気チェレンコフ望遠鏡を用いた観測が各地で実施されるようになり、大きな進展を見せ、X 線連星やパルサー、超新星残骸において少なくとも高エネルギー電子が加速されているとの確証が得られている。現在さらに大型の望遠鏡施設が建設中であり、高エネルギー原子核成分の加速の解明に向けて研究が進められている。

## 5.2. 1990 年代後半以後における研究成果

ここでは、1990 年代後半から現在に至るまでの研究内容について紹介させていただく。まず、1996 年当時の空気シャワーアレイでの検出器配置図を図 14 に示す。 $10^{13}$  eV 程度の空気シャワーを観測するため、シンチレーション検出器は約半径 60m の範囲内に配置した<sup>21)</sup>。さらに、空気チェレンコフ光測定装置 (図中★) 8 台を配置した。この空気チェレンコフ光測定装置には、立ち上がり応答 2ns と極めて特性の良い光電子増倍管を用いた。以上の構成で、空気シャワー観測を行うと同時に、空気チェレンコフ光の到着時間分布および横方向分布を測定し、観測高度上空での縦方向発達の情報を得た。

### (1) 到来方向異方性

宇宙線が銀河系内磁場の影響を受け、その進行方向が

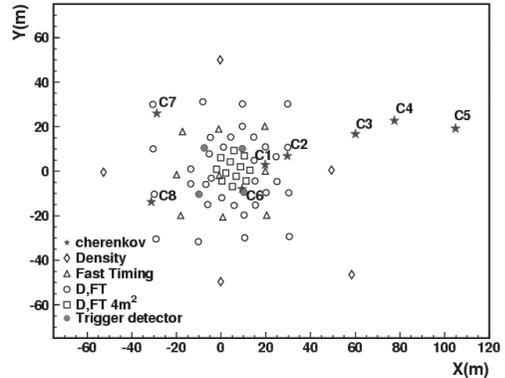


図 14. 1996 から 2005 年までの空気シャワーアレイ。○, △, □ はシンチレーション検出器。★ は空気チェレンコフ光測定装置。座標原点には、 $60\text{m}^2$  粒子検出器がある。

変化することから、加速源を同定することが困難であることは既に述べた。しかし、仮に、宇宙線加速源が太陽系の近傍に存在しているならば、その天体とそれほど異なる方向に宇宙線到来方向異方性が期待できる。理論計算によれば、その異方性の強度は 0.1 % の数倍程度である。これを検出するためには、気圧や気温の変動や測定装置の不安定性などによる測定結果への影響を高い精度で較正可能な実験を行う必要がある。第 15 図には、本研究所で観測した宇宙線過剰の有無の測定結果を各銀経毎に示してある。各図の横軸は銀緯を表し、すなわち、値 0 が銀画面を表し、縦軸は観測された宇宙線の事象数

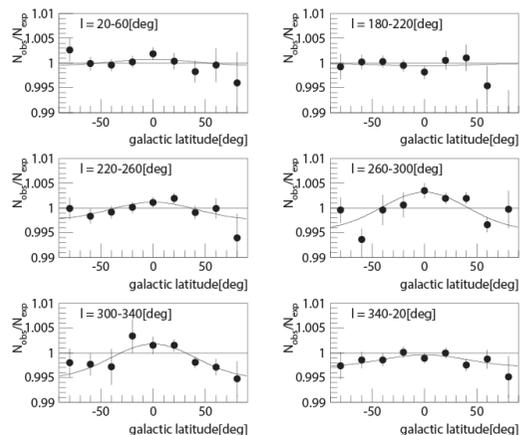


図 15. 銀河座標系を用いた宇宙線到来方向異方性測定結果。各図は銀経幅 40 度ごとに区切った結果。横軸は銀緯、縦軸は、観測された事象数/期待される事象数。実線はデータ点を関数フィットしたもの。詳細は本文参照。

$N_{\text{obs}}$  と、宇宙線が一様等方的に到来すると仮定したときのその期待値  $N_{\text{exp}}$  との比である。銀経 220 から 340 度にかけて銀河面方向に有意な宇宙線過剰があることがわかる<sup>22,23)</sup>。この方向は、銀河系で最も強いガンマ線源である帆座超新星残骸 (Vela SNR) の方向に近く、非常に興味深い。しかし、観測された宇宙線過剰が Vela SNR の寄与によるものかどうかは、詳細なシミュレーション計算結果との比較により検討しなければならない。なぜなら、このようなエネルギー領域の宇宙線は、銀河系磁場にまきつきながら伝播してくるため、過剰を示す方向は、太陽近傍の銀河系磁場構造の詳細に強い影響を受けるからである。一方、太陽近傍の銀河系磁場方向の測定結果は、銀経で 245 から 280 度までの値のみが報告されており、いまだ確立されていないのが現状である<sup>24)</sup>。また、宇宙線過剰の強度は、起源天体までの距離とその年齢に強く依存する。ここで注目している Vela SNR についていえば、その距離は 500 から 600 pc が定説であるが、最近では、その半分の 250 pc であるとの報告がなされている<sup>25)</sup>。また、超新星爆発の時期は、 $10^4$  年前と言われているが、同じ場所で  $10^5$  年前にも超新星爆発があったとの報告もある<sup>26)</sup>。そこで、太陽系近傍における銀河磁場の方向を測定結果の範囲以内で変えながら、Vela SNR を起源天体と仮定して、宇宙線伝播のシミュレーション計算を行った<sup>27)</sup>。ここでは、Vela SNR までの距離を 600 pc と設定している。図 16 には、計算の結果得られた超新星の誕生以後の本天体起源宇宙線の拡散の様子を示した。図中の座標(0,8500)に太陽系があり、(-596,8564)に Vela SNR があるとしている。また、図中に示してある数字は、超新星爆発後の経過時間の値である。図からわかるように、Vela SNR の年齢が  $10^4$  年で、太陽までの距離が約 250 pc であるか、または、距離が 600 pc であっても、年齢が  $10^5$  年であれば、太陽系で、この天体起源の宇宙線が観測できることになり、その強度もほぼ観測結果と一致することがわかった。また、過剰を示す方向は、太陽系近傍での銀河磁場方向を銀経 260 度程度に仮定すると、観測結果をよく再現できることもわかった。

(2) 質量組成と一次宇宙線エネルギースペクトル

宇宙線質量組成の情報は、起源天体の同定や銀河系内伝播に関する情報を得る上で極めて重要である。しかし、何代にもわたる相互作用を経て観測される空気シャワーの情報から、一次宇宙線質量組成を導出するには、膨大なシミュレーション計算が必要であり、その分、多くの不確定要素が影響してくる。そこで、最終結果の信頼性を確立するために重視した点が 2 つある。1 つ目は、直接測定が得られているエネルギー領域で、空気シャワー

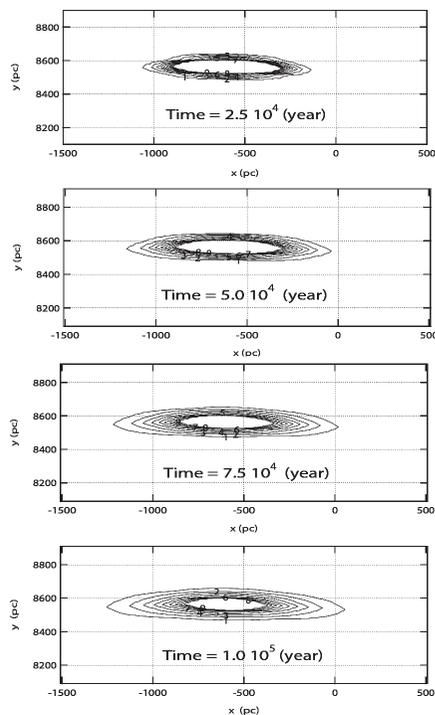


図 16. シミュレーション計算による Vela SNR 起源の宇宙線の拡散の様子。時間(Time)は、超新星爆発後の時間 (単位: 年) を表す。

観測による質量組成測定を行い、直接測定結果と同じ結果が得られていることを示し、その手法の信頼性を確認する。その上で、同じ手法を用いて、より高いエネルギー領域の結果を得る。第二に、できるだけ独立な測定手法によって結果を得、それぞれの一致性を示めし、測定結果に対する信頼度を向上させる。

まず、空気シャワーアレイのみの測定結果からは、等頻度法を用いて、観測高度より深い大気深さでの縦方向発達の情報を得、それらの結果から一次宇宙線質量組成についての情報を導き出した。等頻度法によって得られた縦方向発達の結果を図 17 に示す<sup>28)</sup>。図中波線は観測結果を最もよく説明できる質量組成を仮定したときに期待される等頻度曲線である。ただし、測定の精度を考慮し、シミュレーション計算で仮定した一次宇宙線は、陽子と鉄原子核のみの混合であるとし、その混合比の最適値を用いた場合の計算結果を示したものである。この最適値を用いて  $\ln A$  の平均値を算出する。

次に、空気チェレンコフ光の到着時間分布と横方向分布測定結果を用いて、それぞれ独立に質量組成を導出した。この場合、測定結果と比較するシミュレーション計

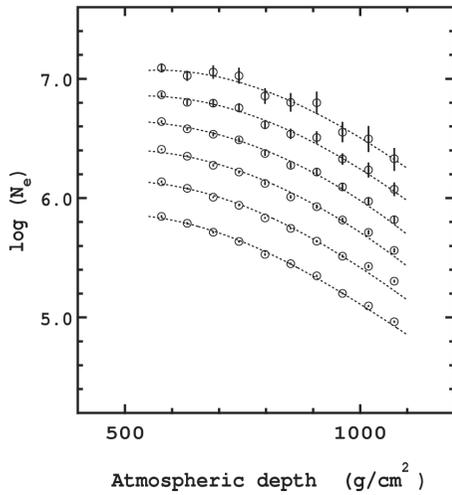


図 17. 等頻度法による縦方向発達測定結果. 点線は、一次宇宙線核組成を陽子と鉄の混合と仮定したとき、最も測定結果を再現する混合比を用いたときのシミュレーション計算結果

算では、一次宇宙線が陽子、鉄の他にヘリウム、炭素、シリコン、それぞれの原子核の混合であると仮定した<sup>29)</sup>。まず、空気チェレンコフ光到着時間波形の立ち上がり時間  $T_{10-90}$  の測定結果とシミュレーション計算結果の比較を描いたのが図 18 である。最終的には、エネルギーごとに最尤法を用いて陽子、ヘリウム、炭素、シリコン、鉄の混合比を決定した<sup>30)</sup>。

次に、空気チェレンコフ光の横方向分布測定結果についてであるが、まず、測定で得られた一次宇宙線が陽子、および鉄と考えられる事象を図 19 に示した。陽子の場合の横方向分布は、鉄の場合のそれと比較して全体的にシャワー軸からの距離  $r$  が大きくなるにつれて、光子数  $\rho$  の減少が早いことがわかる。この空気チェレンコフ光横方向分布測定結果を次式で解析することにより、個々の事象に対して  $\beta$  値を得る。

$$\rho(r) = A \cdot (r/R_0)^{-(\beta+r/R_0)}$$

この  $\beta$  値の分布とシミュレーション計算結果とを比較することにより、一次宇宙線エネルギーの関数として一次宇宙線核の混合比を決定する<sup>31)</sup>。測定結果の 1 例を図 20 に示す。

以上のように、等頻度法、空気チェレンコフ光到着時間分布と空気チェレンコフ光横方向分布、これら 3 つの測定結果を用いて独立に得られた一次宇宙線質量組成の結果を図 21 に示す。縦軸は、 $\ln A$  (ここで  $A$  は原子番号)

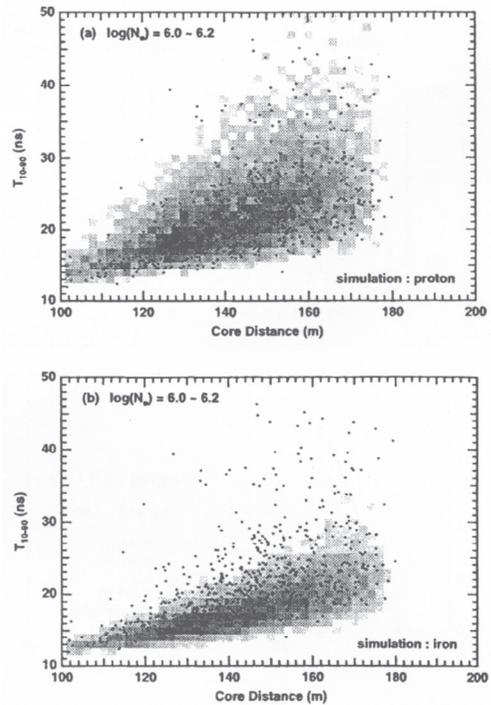


図 18. 空気チェレンコフ光到着時間波形の立ち上がり時間  $T_{10-90}$  の測定結果 (図中黒点) とシミュレーション計算結果 (図中モザイク部分) の比較. 図(a)は、一次宇宙線が陽子である場合の計算結果との比較. 図(b)は同じく一次宇宙線が鉄である場合.

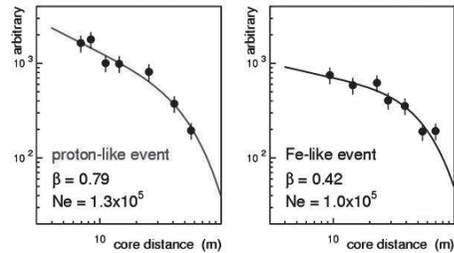


図 19. 空気チェレンコフ光横方向分布測定結果の例. 横軸は空気シャワー軸からの距離、縦軸は光子数に比例. (a)一次宇宙線核種が陽子と考えられる事例 (b)同じく鉄と考えられる事例.

を表している。我々の結果のほか、低エネルギー側での直接測定の結果や他のグループによる間接測定の結果も示してある。まず、3 つの手法による我々の結果 (図中、等頻度法: □, 空気チェレンコフ光到着時間分布: □, 空気チェレンコフ光横方向分布: ■, ●) は、測定

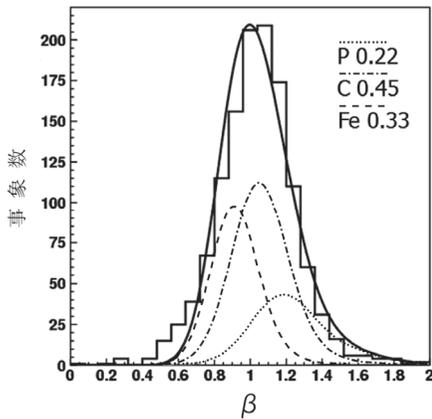


図 20. 空気チェレンコフ光横方向分布測定結果の  $\beta$  分布 (実線ヒストグラム). 陽子 22% (点線), 炭素 45% (一点鎖線), 鉄 33% (破線) の場合の計算結果とそれらの合計の分布 (黒曲線).

精度内でよく一致している. また,  $10^{14}$  eV 領域では, 我々の結果と直接測定の結果 (□, ◇) が良く一致しているのがわかる. 一方, 空気シャワー観測による他のグループの結果との一致性は極めて良くない. この点は, 相互の検討を深めていくなど, 今後の課題である.

我々の結果は, エネルギーが大きくなるにしたがって, 重い原子核成分に変化していることを明瞭に示している. そして, Knee 領域付近では, ほぼ一定となっている. 成分ごとの解析では, この付近でヘリウム成分が優勢となっているようだ. その後は, さらに重い成分へと変化している.

以上述べてきたように, 多くの点で各グループ間の結果の不一致が解消されておらず, 宇宙線起源に関する統一的な見解が確立できる段階には至っていない. 我々の結果だけから判断すると, 超新星および超新星残骸を起源とするモデルが予言する結果と矛盾しないようである. 特に, Knee 領域でヘリウム成分が優勢となる結果は, ウォルフレーイ星のような重い星の超新星爆発の寄与が大きいという理論的指摘<sup>39)</sup>に合致している.

次に, 我々の一次宇宙線質量組成の結果を考慮して得られた一次宇宙線エネルギースペクトルが図 22 である. なお, 一次宇宙線質量組成の情報を考慮することにより, 観測される空気シャワーサイズからエネルギーへの変換精度が向上することを, 特に断っておきたい. 図中黒丸が我々の結果であり, 比較のため他のグループの結果も示してある. なお, 縦軸は, エネルギースペクトルの微細な形状がわかりやすくなるように  $E^{2.5}$  (GeV<sup>2.5</sup>) を乗じ

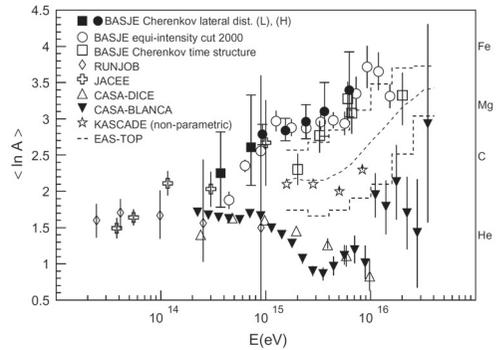


図 21. 一次宇宙線核組成測定結果. 我々の結果は, ○: 等頻度法, □: 空気チェレンコフ光到着時間分布, ■, ●: 空気チェレンコフ光横方向分布によるもの. 直接測定は, □: JACEE<sup>32)</sup>, ◇: RUNJOB<sup>33)</sup>. 他は, 他の空気シャワー実験グループの結果.

である. 図からわかるように,  $3 \times 10^{15}$  eV 付近に折れ曲がり方が確認できる<sup>28)</sup>. この形状から Knee と呼ばれている訳であるが, 加速現領域, または銀河系円盤からの漏れの影響であると予測される. 今後, 銀河系内や活動的天体内の磁場の情報がより深まれば, それを考慮した精密なシミュレーション計算結果との比較が行われることが期待される.

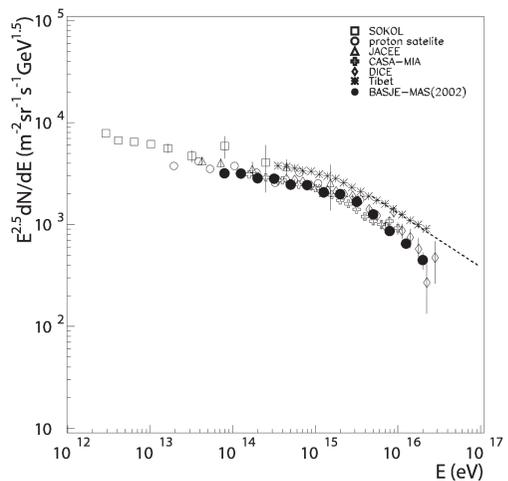


図 22. Knee 領域一次宇宙線の微分エネルギースペクトラム測定結果. 我々の結果は●印. 比較のため他のグループによる測定結果も描いてある.

### 5.3. 今後の研究

一次宇宙線の最高エネルギーは  $10^{20}$  eV 代に到達しているが, このような超高エネルギー宇宙線は, 銀河系磁場の影響をほとんど受けずに到来することが期待される.

一方、その到来方向分布測定結果は、ほぼ一様であり、また、銀河系内活動天体の磁場強度や規模を考えると、このような宇宙線は銀河系外から到来するものと考えられている。そうであれば、どこかのエネルギー領域で高エネルギー宇宙線起源が銀河系内から系外に移行していることになる。しかしながら、図1に示した宇宙線のエネルギースペクトルを見る限り、この移行を示すような大きな変化は見当たらない。しかし、一次宇宙線質量組成には大きな変化が起こる可能性がある。これは、超高エネルギー宇宙線が銀河系外活動天体を起源とすると、たとえ加速された核種が重い原子核であったとしても、その天体内の強い光子場や銀河間物質との相互作用によって、太陽系に到達するまでに陽子などの軽い核に変化してしまうことになるからである。これを支持する結果の一例を図23に示す<sup>35)</sup>。これは、宇宙線望遠鏡実験で得られた予備的な測定結果であるが、一次宇宙線のエネルギーが $10^{18}$  eVを越えると、一次宇宙線核種が陽子などの極めて軽い核になることは間違いないようである。また、到来方向分布は、ほぼ一様であり、また、個々の超高エネルギー宇宙線到来方向に銀河系内活動天体が見当たらないなど、これらの宇宙線は銀河系外起源であることを強く示唆している。一方、 $10^{18}$  eVよりエネルギーが小さくなるにつれて、次第に重い核種に移行している徴候が窺える。このまま、Knee領域までスムーズに重い核に変化していくのか、または、どこかのエネルギー領域で急激に変化しているのか、極めて興味深い。運良く急激な変化が発見できれば、このエネルギー領域こそ銀河系内起源天体における宇宙線加速限界を示すものであり、銀河系内起源天体の解明に大きく貢献する結果となる。

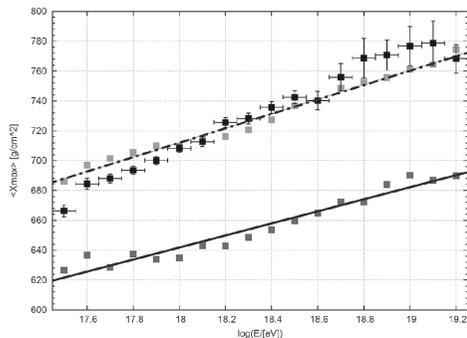


図23. 一次宇宙線エネルギーに対する $X_{\max}$ 測定結果。実線は、一次宇宙線核種を仮定したシミュレーション計算結果、一点鎖線と■：陽子100%の場合、実線と●：鉄原子核100%の場合。

そこで、我々は、対象とするエネルギー領域を $10^{16}$  eV以上に設定し、新たな空気シャワーアレイを建設した<sup>36)</sup>。その検出器配置図が図24である。この空気シャワーアレイには、さらに空気チェレンコフ光測定装置7台を配置し、今までと同様、空気チェレンコフ光到着時間と横方向分布を測定している。現在、測定結果を解析中であり、できるだけ早く最終結果を得るべく努力している。

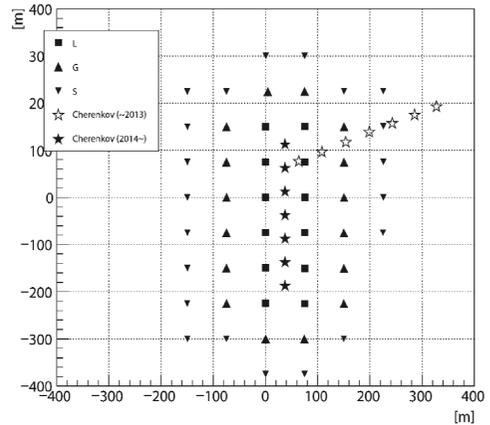


図24.  $10^{16}$  eV以上の一次宇宙線質量組成を測定するために設置した新空気シャワーアレイ。三角、四角印はシンチレーション検出器。星印は、7台の空気チェレンコフ光観測装置。前半の配置場所★、後半の配置場所☆。

## 6. 最後に

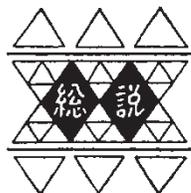
高エネルギー宇宙線の観測は、多数の相互作用を経た結果である空気シャワーの測定、すなわち、間接測定に頼らざるを得ない状況にある。また、一次宇宙線が陽子や鉄などの原子核が主成分であり、銀河系内や銀河間の磁場の影響を受け、その起源天体、加速機構や伝播機構など、まさに根本的な課題の解明になかなか到達できない。しかし、宇宙における宇宙線の重要さは、宇宙線が有する総エネルギー量の多さばかりでなく、最高で $10^{20}$  eVを越えていることからしても、宇宙の激しい現象の解明には極めて重要な存在であることは疑う余地もない。近年、宇宙ニュートリノや重力波の検出によって、宇宙における現象の理解が格段に進んできているが、その中で、唯一残されている課題が、この高エネルギー宇宙線の起源の解明である。今後、若い世代の優秀な研究者の参加によって、さらに優れた成果がもたらされることを期待したい。

以上、チャカルタヤ山宇宙物理学研究所における宇宙線空気シャワー実験を紹介してきたが、宇宙線研究の内容の一端でもご理解いただけたのであれば幸いです。

## 参考文献

- (1) V. F. Hess, "Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten", *Physikalische Zeitschrift*, **13**(1912), p.1084.
- (2) C. M. G. Lattes, G. P. S. Occhialini and C. F. Powell, "Observations on the tracks of slow mesons in photographic emulsions", *Nature*, **160**(1947), p.453.
- (3) 菅浩一, "チャカルタヤ山上の宇宙線観測事業", *学術月報*, **21-8**(1968), p.514.
- (4) 鎌田甲一, "ボリビアにおける宇宙線研究について", *学術月報*, **23-1**(1970), p.21.
- (5) 村上一昭, "最近のボリビアと宇宙線研究", *学術月報*, **24-5**(1971), p.304.
- (6) 高エネルギー宇宙線に関する一般的な解説書. M. S. Longair, "High Energy Astrophysics", Cambridge University Press, (2011).
- (7) E. Fermi, "On the origin of the cosmic radiation", *Phys. Rev.*, **75**(1949), p.1169.
- (8) J. Nishimura, "Theory of Cascade Showers", *Handbuch der Physics*, **48-2**(1967), p.1.
- (9) 多米田裕一郎, "The Mass Composition of Ultra-High Energy Cosmic Rays Observed by Telescope Array Observatory", 博士論文 (東京工業大学, 2010) .
- (10) K. Suga, G. Clark, and I. Escobar, "Scintillation Detector of 4-m<sup>2</sup> Area and the Transisterized amplifier with Logarithmic Response", *Review of Scientific Instruments*, **32**(1961), p.1187.
- (11) K. Suga, et al., "Bolivian Air Shower Joint Experiment", *Journal of Physical Society of Japan*, **17**[Supplement A-3](1962), p.138.
- (12) K. Kamata, et al., "Predominantly Electromagnetic Air Showers of Energy 10<sup>14</sup> eV to 10<sup>16</sup> eV", *Canadian Journal of Physics*, **46**(1968), p.72.
- (13) C. Aguire, et al., "Energy Spectrum of Surviving Primary Protons with Energies 3-30 TeV at 5200m a.s.l. and the Cross Section for Proton-Air-Nucleus Collisions", *Nuovo Cimento*, **27B**(1975), p.263.
- (14) H. Bradt, et al., "The Primary Energy Spectrum from 8 × 10<sup>14</sup> to 4 × 10<sup>17</sup> eV", *Proceedings of 9<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference*, **2**(1965), p.715.
- (15) M. La Pointe, et al., "Note on the Primary Energy Spectrum", *Canadian Journal of Physics*, **46**(1968), p.68.
- (16) F. Kakimoto, et al., "Longitudinal Development of Muons in Large Air Showers at 5200m above sea level", *Journal of Physics*, **G9**(1983), p.339.
- (17) F. Kakimoto, et al., "Acoustic Detection of Super Giant Showers", *Proceedings of 17<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference*, **11**(1981), p.715.
- (18) T. Kaneko, et al., "Acoustic and VLF-ELF Radio Detection of Super Giant Air Showers", *Proceedings of 18<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference*, **11**(1983), p.428.
- (19) M. Samorski and W. Stumm, "Detection of 2 × 10<sup>15</sup> to 2 × 10<sup>16</sup> eV gamma-rays from Cygnus X-3", *Astrophysical Journal*, **268**(1983), p.L17.
- (20) H. Yoshii, et al., "Searches for Ultra-High-Energy Gamma Rays from SN 1987A and Centaurus X-3", *Astrophysical Journal*, **472-2**(1996), p.800.
- (21) F. Kakimoto, et al., "A Small Air-Shower Array at Mount Chacaltaya", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **A373-2** (1996), p.282.
- (22) F. Kakimoto et al., "Enhancement of Cosmic Rays from the Vela Region at E > 10<sup>12</sup> eV", *Proceedings of 26<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference*, **4**(1999), p.279.
- (23) N. Gironde, "Search for Diffuse Gamma Rays in the Southern Hemisphere", 博士論文 (東京工業大学, 1998) .
- (24) Y. Sofue and M. Fujimoto, "A Bisymmetric Spiral Magnetic Field and the Spiral Arms in our Galaxy", *Astrophysical Journal*, **265** (1983), p.459.
- (25) E.A. N. Cha et al., "The Distance to the Vela Supernova Remnant", *Astrophysical Journal Letter*, **515-1** (1968-3), p.L25.
- (26) B. Aschenbach, R. Egger and J. Trümper, "Discovery of Explosion Fragments Outside the Vela Supernova Remnant Shock-Wave Boundary", *Nature*, **373-7** (1995), p.587.
- (27) D. Senda, S. Ogio and F. Kakimoto, "Simulation of Primary Cosmic Rays with Energies of 500 TeV Accelerated at Vela SNR", *Proceedings of 25<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference*, **4**(1997), p.269.
- (28) S. Ogio et al., "The Energy Spectrum and the Chemical Composition of Primary Cosmic Rays with Energies from 10<sup>14</sup> to 10<sup>16</sup> eV", *Astrophysical Journal*, **612-1**(2004), p.268.
- (29) Y. Shirasaki and F. Kakimoto, "Monte Carlo simulation of air shower development for the study of cosmic ray composition", *Astroparticle Physics*, **15-3** (2001), p.241.
- (30) Y. Shirasaki et al., "Chemical Composition of Primary Cosmic Rays with Energies from 10<sup>15</sup> to 10<sup>16.5</sup> eV", *Astroparticle Physics*, **15-4** (2001), p.357.
- (31) H. Tokuno et al., "The Cosmic Ray Primary Composition at the Knee Region from Lateral Distributions of Atmospheric Čerenkov Photons in Extensive Air Showers", *Astroparticle Physics*, **29-6** (2008), p.453.
- (32) K. Asakimori et al., "Cosmic-Ray Proton and Helium Spectra: Results from the JACEE Experiment", *Astrophysical Journal*, **502-1** (1998), p.278.
- (33) A. V. Apanasenko et al., "Composition and Energy Spectra of Cosmic-Ray Primaries in the Energy Range 10<sup>13</sup>-10<sup>15</sup> eV/particle Observed by Japanese-Russian Joint Balloon experiment", *Astroparticle Physics*, **16-1** (2001), p.13.

- (34) P. L. Biermann, "The Cosmic Ray Spectrum between  $10^4$  GeV and  $3 \times 10^9$  GeV", *Astronomy and Astrophysics*, **271** (1993), p.649.
- (35) 小倉潤, "TA 実験 ハイブリッドトリガーデータを用いた一次宇宙線質量組成測定結果", 修士論文 (東京工業大学, 2015).
- (36) Y. Tsunesada et al., "New Air Cherenkov Light Detectors to Study Mass Composition of Cosmic Rays with Energies above Knee Region", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **A763** (2014), p.320.



## 暗黒エネルギー問題と修正された重力理論

山内 大介\*

### Dark energy problem and modified theory of gravity

Daisuke YAMAUCHI\*

#### 1. 標準宇宙論と未解決問題

□本稿の最初に、現代宇宙論の一つの到達点である標準的な宇宙モデル、「標準宇宙論」について概観し、残された未解決問題について議論する。

##### 1. 1. 宇宙論の現状\*

□宇宙論とは、宇宙全体やその内部に存在する構造物が、どのように形成され、そして発展してきたのかについて、科学的手法を用いて理論的・観測的に解明していく学問である。特に、近年の観測技術の発展により、標準的な宇宙モデルはほぼ確立しており、それは次のようなものである。

□まず、大局的なスケール（超銀河団を超えるスケール、約 100 [Mpc] 以上）で宇宙を平均して見た場合、特別な場所は存在せず（一様性）、また特別な方向も存在しない（等方性）という一様等方宇宙モデルを採用している。

この一様性・等方性については、ビッグバン後約 38 万年頃に原子が形成され、光が直進できるようになった時期の残光である宇宙マイクロ波背景放射（Cosmic Microwave Background : CMB）の精密観測が行われたことにより、妥当性が確認されている。CMB とは、天球上の全方向からほぼ等方的に観測されるマイクロ波であり、そのスペクトルは 2.725 [K] の黒体放射に極めてよく一致することが知られている。重要な点としては、CMB には約  $10^5$  程度の非等方性が含まれている点である（図 1 参照）。この揺らぎは宇宙論パラメータや宇宙の幾何学を定めることで理論的に予言することが出来、実際の観測と比較することで宇宙モデルを決定することが可能となる。

□最新の CMB 観測衛星 Planck の観測結果<sup>1)</sup>によると、通常物質を構成するバリオンの量は、宇宙全体の約 5% 程度に過ぎず、約 27% がほぼ重力相互作用しか行わない冷たい暗黒物質で構成され、残りの約 68% が宇宙を加速させる原因となる正体不明のエネルギー（暗黒エネルギー）であることが分かっている（図 2 参照）。またこのモデルでは一定の空間曲率が許容されているが、CMB の観測からこの曲率は非常に小さく制限されており、この宇宙は極めて平坦に近い宇宙であることが判明している。

□このような一様等方宇宙モデルは、観測を非常に良く説明するモデルであるが、そもそもなぜこのような条件の宇宙が生じたのかという疑問が生じてくる。その疑問に対し説明を与える最も有力なモデルが宇宙初期における指数関数的急膨張（インフレーション）を仮定するモデルである。このインフレーションモデルは、ビッグバン宇宙論におけるいくつかの問題（地平線問題、平坦性問題、モノポール問題）を一挙に解決する解法として導入された。宇宙初期の光速を超える急膨張によって、当初因果関係を持っていた小さな領域を現在観測可能な範囲を超えて拡大することにより、非常に一様等方な宇宙を実現することが出来る。さらに、インフレーションモデルでは、インフレーションを生じさせる場としてインフラトンという場を仮定するが、その場の量子的な揺らぎから、超銀河団、銀河団、銀河のような大規模構造の種となるわずかな密度揺らぎを生成することも可能にしている。

##### 1. 2. 宇宙論の未解決問題

□標準的な宇宙モデルは観測を非常に良く再現するが、依然として多くの本質的な疑問も多く残されている。未解決問題の中でも重要な課題としては次のようなものが考えられる：実際に宇宙最初期で起こったインフレーション

\*特別助教 物理学教室  
Assistant professor, Institute of Physics

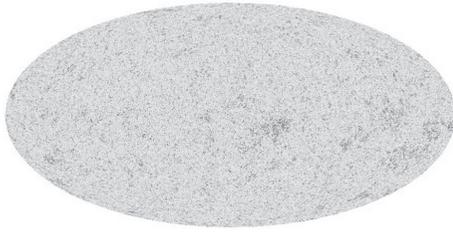


図 1. 宇宙マイクロ波背景輻射の温度揺らぎマップ<sup>(1)</sup>. 全天に亘って 10<sup>-5</sup> 程度の揺らぎを持つ.

の具体的なモデルは何か？原始密度揺らぎの生成機構は何か？暗黒物質の正体とは？宇宙の加速膨張の物理的な原因は何か？これらの謎に物理的に自然な説明を与えることが現代宇宙論の目標と言えるだろう。

□インフレーションモデルの検証に関して、最も基本的な検証法は宇宙の密度揺らぎの測定が挙げられる。この揺らぎはモデルの違いによって特徴のある空間スケール依存性を示す。よって、その特徴を観測的に捉えることが、各インフレーションモデルを制限していく上で非常に有効な手段となる。将来観測においては、インフレーション起源の原始重力波の観測が計画されている。その振幅はインフレーションのエネルギースケールと直接関係づけることが知られており、もし観測出来ればインフレーションモデルにとって決定的な証拠となりえる。

□暗黒物質については、素粒子理論の分野において活発な研究がなされており、既に多様な候補が提案されている。その正体を探る方法としては、暗黒物質がわずかに行う可能性のある通常物質との相互作用を検出する直接検出実験や、暗黒物質が対消滅や崩壊をする際に生成するガンマ線や高エネルギーの粒子を観測する間接検出実験、さらには加速器による実験が多数行われている状況である。それらは加速器実験等を通じて検証を待っている段階であり、近い将来重要な示唆が得られるものと期待している。

□その一方で、宇宙の加速膨張の原因、つまり暗黒エネルギーについては未だその解決の糸口すら全く見つかっていない。本稿では、この暗黒エネルギーの正体について議論したい。

### 1. 3. 宇宙観測

□CMB 観測以外にも様々な宇宙論観測が行われている。その中でも銀河サーベイについて言及しておくことにする。銀河の空間的な分布は背後にある密度揺らぎの分布

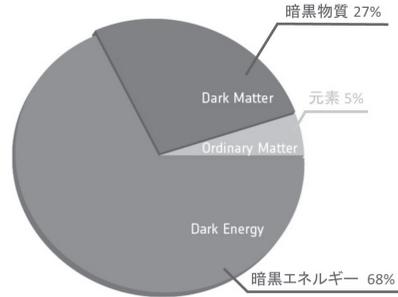


図 2. 宇宙の構成要素<sup>(1)</sup>. 通常の物質である元素は 5%に過ぎず、残りの 95%は未知の物質。

を反映していると考えられる。そこで、銀河の空間分布地図を作り、その性質を調べることで密度揺らぎ、ひいては宇宙論の情報を引き出すことが出来る。銀河サーベイとは、多数の銀河の位置を一つ一つ定め、観測している手法のことである。

□銀河サーベイを用いた代表的な観測手法として、バリオン音響振動 (Baryon Acoustic Oscillation : BAO) が知られている。これは宇宙の再結合以前的光子とバリオンがトムソン散乱とクーロン相互作用を通じて混合流体として存在していた時期の音波振動と、再結合後に音波振動が光子から脱結合したバリオンと暗黒物質の重力相互作用を通じて宇宙大規模構造に反映された振動パターンを指す。後者の BAO 振動パターンのスケール (音響ホライズン) は、再結合から現在に至るまで不変であることがわかっており、宇宙の大規模構造を測定する際の距離指標として使うことが可能である。そのため、宇宙の大規模構造観測で BAO を検出することで宇宙の空間的な幾何学や膨張の履歴を小さな系統誤差で導くことが出来、暗黒エネルギーの物理的性質および重力理論の検証などの宇宙に関する基礎的問題を調べる手段となっている。

□加えて、銀河の相関関数の非等方性として観測される赤方偏移変形 (Redshift Space Distortion : RSD) も非常に有用な手法として盛んに利用されている。RSD とは個々の銀河の固有速度によって生じた赤方偏移による効果で、たとえ実空間における銀河の分布が等方であっても、実際に観測される赤方偏移空間上では非等方な揺らぎになってしまうことから発生する。この固有速度の影響は、密度揺らぎの成長率と関係づいており、その成長に対する暗黒エネルギーの影響を調べることに利用することが出来る。

□最後に、重力レンズ効果を利用した方法を説明する。重力レンズ効果とは、サーベイ対象の銀河からの光が経路上の物質場による重力によって経路が直線からずれる

ことを指す。特に、弱重力レンズ効果は宇宙の物質分布、つまり密度揺らぎの情報を保持しており、暗黒物質や暗黒エネルギーの密度揺らぎに与える影響などについて詳細に調べるために利用することが出来る。

□これらの多様な宇宙観測を組み合わせて観測的な制限を得る。暗黒エネルギーの性質を観測的に明らかにするために、次のような状態方程式パラメータがよく使われる：

$$w = \frac{p}{\rho}, \quad (1)$$

ここで、 $\rho$  および  $p$  は空間平均した暗黒エネルギーのエネルギー密度と圧力である。後で述べるように暗黒エネルギーが宇宙項であった場合には厳密に  $w = -1$  となることから、標準宇宙論においてはこれが仮定されている。宇宙項でない場合には一般に時間に依存することから、 $w$  を赤方偏移等で展開したパラメータが使われる。現在までに、CMB、超新星、BAO、重力レンズ効果等の既存の観測を組み合わせてこれらを検討しているが、現在において  $w = -1$  からの有意なずれの証拠は見つかっていない<sup>(2)</sup>。

## 2. 暗黒エネルギー

□現代宇宙論における最も大きな謎の一つとして、宇宙の加速膨張の物理的な起源の解明が挙げられる。本章では、暗黒エネルギーに関して、よく知られた宇宙項問題について言及した後に、その代替要素として注目を集めている修正重力理論について議論する。

### 2. 1. 宇宙項問題

□宇宙の加速膨張の原因となるエネルギーを一般に「暗黒エネルギー」と呼ぶが、その存在が決定的になったのは、1990年代末の Ia 型超新星を用いた宇宙膨張の観測<sup>(3)(4)</sup>以降である。それらの観測により、観測された超新星の見かけの光度が減速膨張宇宙の場合と比べて暗いという事実が発見された。これは同じ後退速度で運動する、もしくは同じ赤方偏移を示す超新星までの距離が減速膨張しているときに比べて相対的に大きいことを意味する。このことから、宇宙が加速膨張しているということが判明した。

□暗黒エネルギーの物理的な原因について議論する前に、標準宇宙論の根幹をなしている一般相対性理論（以下、一般相対論と呼ぶ。）について言及しておく。一般相対論はアインシュタインにより 1915 年に発表された古典的な重力場を記述する理論体系である。基礎方程式であるアインシュタイン方程式は次のような形をしている：

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}. \quad (2)$$

ここで、左辺はアインシュタインテンソルと呼ばれる量で時空の曲率を表す幾何学量を表している。一方、右辺は物質場のエネルギー運動量テンソルであり、物質場の分布を表している。このことから、物質場の分布を与えることでその物質の周りの時空がどのように曲がっているかを表現していると言える。一般相対論は mm スケールのような日常的なスケールから Gpc スケールのような宇宙論的なスケールに亘る広範な検証が現在においてもなおなされているが、その差異は見つかっていない<sup>(5)</sup>。□これを踏まえ、暗黒エネルギーの最も単純な候補として、アインシュタインが 100 年前に導入した「宇宙項」を考えることが出来る。これは先ほどのアインシュタイン方程式に

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}. \quad (3)$$

となる項を加えることに対応している。アインシュタインの宇宙項にはもともと物理的意味はなく、余分な項として導入されたものであった。現代的には、宇宙項を右辺に移項することで物質場として理解される。時間変化せず、その圧力はエネルギー密度と振幅が同じで負の値を持つ、つまり  $w = -1$  の物質場と振る舞う。そのような性質を持ち、既存の物理学に含まれるエネルギー源として、量子場の真空のエネルギーが考えられている。しかし、この模型には「宇宙項問題」と呼ばれる理論的な困難があることが知られている<sup>(6)</sup>。真空のエネルギーによる宇宙項の大きさは、典型的にはプランクスケールの紫外発散以下のエネルギースケールでの各量子場の寄与を足し合わせたものとして理論的に評価することが出来る。一方で、宇宙論的に観測された宇宙項の大きさは理論的に評価された値に比べて実に  $10^{120}$  桁以上も小さい値になる。そのため、宇宙項を厳密にゼロにする様々な機構が提案されている<sup>(7)</sup>。しかし、宇宙項の大きさがゼロではなく、極めて小さいがゼロではない値が残るとすると、一層深刻な問題となる。もし真空のエネルギーが暗黒エネルギーであるならば、 $10^{120}$  桁にも及ぶ値のキャンセルが起こりつつ、そのような小さな宇宙項の値が実現しているのかについて自然に説明しなくては行けない。しかし、これまでにおいてうまい方法論は提案されていない。

### 2. 2. 代替模型

□宇宙項問題により、既存の素粒子模型の枠内においては真空エネルギーによる宇宙の加速膨張の説明は難しいと考えられている。そのため、暗黒エネルギーが宇宙項

ではない別の代替要素によって実現している可能性が盛んに議論されている。最も単純な方法の一つとして、宇宙の加速膨張を引き起こす新しい場を導入するモデルが提案されている。その中でも最も有名なものとしてクインテッセンス<sup>(7)</sup>と呼ばれるポテンシャルを転がるスカラー場のモデルが知られている。これらのモデルは典型的にはアインシュタイン方程式の右辺側に新たな場のエネルギー運動量テンソルを導入する形で実現する。つまり、

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} + X_{\mu\nu}, \quad (4)$$

加えたエネルギー運動量テンソルが漸近的に宇宙項と同じような振る舞いをすることで暗黒エネルギーを代替することが可能となる。しかし、一般に新たな場は宇宙膨張に従って進化するため、状態方程式パラメータ  $w$  は時間に依存する。よって、この時間依存性を観測データから探査することでモデルを峻別することが出来る。

### 2. 3. 宇宙論スケールでの重力理論の修正

□別のシナリオとして、宇宙論的スケールにおいて一般相対論自体を修正することにより加速膨張を説明するというアプローチも存在し、それらは一般に修正（もしくは拡張）重力理論と呼ばれている。なぜならば、暗黒エネルギーの存在を示す観測的な証拠は宇宙論的距離・時間離れた遠方の重力の物理によって決まっているからである。また、そのような距離・時間スケールにおいては一般相対論の検証がなされていないため、このような可能性の検証が重要になってくる。

□これまで、既存の観測的制限を満たす多様な修正重力理論が多数提案されている。その中でも有名な模型として、 $f(R)$ 重力理論<sup>(8)</sup>、DGP 重力理論<sup>(9)</sup>、ガリレオン理論<sup>(10)</sup>、質量を持つ重力理論<sup>(11)(12)</sup>がある。修正重力理論においては、一般相対論においても現れるテンソル自由度に加えて、宇宙の加速膨張を引き起こす新しい自由度を含むことが多い。この中で最もシンプルな修正として、一般相対論に単一のスカラー自由度を加えたスカラー・テンソル理論がある。興味深い点として、多様に存在する修正重力理論の理論空間の中で、小さくない理論のクラスが、ある極限においてホルンデスキー理論と呼ばれるスカラー・テンソル理論<sup>(13)</sup>（及び、その拡張理論<sup>(14),(15)</sup>）によって記述することが出来る点である（3. 1. 章参照）。その一方で、修正重力理論は太陽系における一般相対論の精密なテストによって厳しく制限されている。そのため、小スケールにおいて一般相対論の予言を大きく変更する力（「第5の力」と呼ばれる。）を媒介しうる余剰の自由度が励起することは許されない。実際、これら

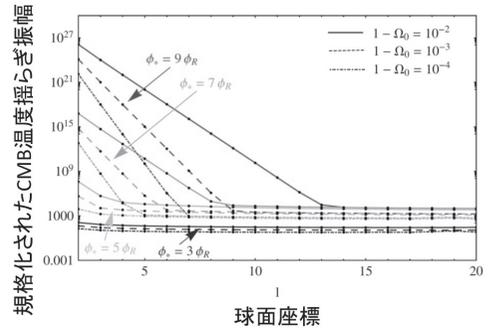


図3. 量子的遷移を含むインフレーションにおけるCMB温度揺らぎスペクトル。色の違いはモデルパラメータの違い。量子遷移により低い球面座標モードで大きな増幅が起こる。量子論的な宇宙創成シナリオ、および、ストリングランドスケープシナリオは観測から探査しうるものであることを指摘<sup>(18)</sup>。

の理論には、小スケールにおいて第5の力を遮蔽する機構が存在することが期待されており（3. 2. 章，3. 3. 章を参照），観測と矛盾することなく理論構築を行うことが出来る。

### 2. 4. 人間原理的解釈

□基礎理論を修正することで暗黒エネルギーの正体に迫る研究がある一方で、人間原理を用いた提案もなされている。人間原理的解釈とは、量子的な宇宙創成シナリオによると、基本物理定数や宇宙パラメータの異なる宇宙が無数に存在する。そんな中で適切な条件を満たす限られた宇宙だけに知的生命体が生まれる。従って、我々の宇宙の基本物理定数は、知的生命体が生まれる条件からある程度決まるはずだ、という主張である。実際に、宇宙項が我々の観測する値より遥かに大きな値であった場合、観測者たる我々人類が存在出来ないため、そのような宇宙は選ばれない<sup>(16)</sup>。近年では、素粒子統一理論の候補である超弦理論の文脈において、 $\sim 10^{500}$ 個もの莫大な数の異なる基本物理定数を持つポケット宇宙を生成することが示唆されており、これらが結びつくことで、宇宙項を宇宙全体に亘るランドスケープ上において人間原理的に解釈する可能性が議論されている<sup>(17)</sup>。この描像をストリングランドスケープと呼ぶ。

□これまでにおいて、この提案は推論の域をはずし、観測的に検証のしようがないと考えられてきた。しかし、本研究において、量子論的な宇宙の創成モデルの特殊性を通じてこの可能性を探ることが出来ることを見出した<sup>(17)</sup>。

(18). 量子論的な宇宙生成の結果、我々の宇宙は微小ながらゼロではない負の空間曲率を持つことが予言されることから、空間曲率の精密観測を通じて探査しよう。さらには、CMB や他の宇宙論的な観測量にも特異な振る舞いが表れることを指摘した。これは、このシナリオおよび解釈を観測的に検証することが可能になることを示している (図3参照)。

### 3. 修正重力理論

□前章までに述べたように暗黒エネルギーの代替要素として、重力理論が一般相対論と異なっている可能性が盛んに議論されている。本章では修正重力理論に関する近年の進展およびその中で筆者の寄与について簡単に概観する。

#### 3. 1. ホルンデスキー理論

□修正重力理論の大きなクラスは、ある種の極限においてスカラー・テンソル理論に帰着することが知られている。この事実から、修正重力理論を俯瞰的な立場から検証するために、(不安定性を持たない) 一般的なスカラー・テンソル理論を記述出来る理論の構築が盛んに研究されている。その中でもホルンデスキー理論はこれまでの理論研究において中心的な役割を果たしてきた。スカラー場と計量をダイナミカルな自由度とするホルンデスキー理論のラグランジアン密度は次のように与えられる<sup>(13)</sup>：

$$L_H = K(\phi, X) - G_3(\phi, X)\nabla^2\phi + L_4 + L_5, \quad (5)$$

ここで、 $X$ はスカラー場の運動項を表す。 $L_4, L_5$ はスカラー場の高次微分項を含む項であるが、煩雑になるので詳細は省く。この理論の特色として、「スカラー場と計量の両者の運動方程式が高々2階微分となる最も一般的なスカラー・テンソル理論」である点が挙げられる。一般に、運動方程式に時間について高次微分を含む理論は不安定になることが知られており、現実的な理論モデルとしては不適格である。従って、ホルンデスキー理論は(少なくとも高次微分を含まないという意味で)不安定性を明らかに含まない最も一般的なスカラー・テンソル理論と言える。そのため、安定なあらゆるスカラー・テンソル理論、ひいては極限的にスカラー・テンソル理論に帰着する修正重力理論のクラスを網羅的に探求することが出来ると考えられている。

#### 3. 2. 遮蔽機構

□既に述べたように、これまで提案されてきたほとんど

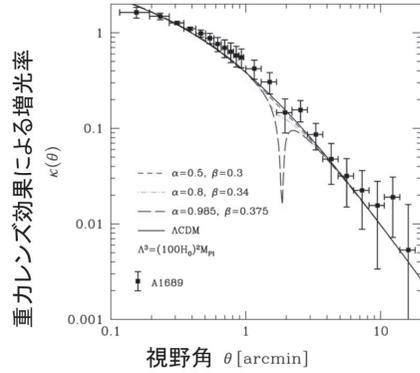


図4. 修正重力理論の遮蔽機構を銀河の重力レンズ効果をもちいて観測的に制限する。色は理論モデルの違い。エラーバー付きのドットは実際の観測データを表す。この手法により、いくつかのパラメータは観測から既に排除されていることがわかる<sup>(20)</sup>。

全ての修正重力理論においては、太陽系スケールでの観測的制限を自然に回避する遮蔽機構を持つと期待しているが、露わには示されていない。本研究においてはホルンデスキー理論における遮蔽機構を探ることで、露わにこれを示すことに成功した<sup>(20)</sup>。ここでは、紙面の関係上、簡便な場合でその概略を議論する。簡単のため、球対称な密度分布を考える。対応する計量として次のようなものを考えれば十分である：

$$ds^2 = -(1+2\Phi(r))dt^2 + (1-2\Psi(r))\delta_{ij}dx^i dx^j. \quad (6)$$

ここで、 $\Phi, \Psi$ は重力ポテンシャルに対応する量であり、太陽系における重力のテストから $|\Phi - \Psi|/\Phi < 10^{-4}$ となることが知られている<sup>(6)</sup>。簡便な状況として、静止した物質場に結合した次のようなスカラー場のラグランジアン密度を考える：

$$L = -\frac{1}{2}(\partial\phi)^2 + \frac{1}{4\Lambda^3}(\partial\phi)^2\nabla^2\phi - \frac{1}{M_{Pl}}\phi\rho_{mat}. \quad (7)$$

このときスカラー場の運動方程式を積分することで、以下の代数方程式に従うことを示すことが出来る。

$$\frac{1}{\Lambda^3}\frac{\phi'}{r} + \left(\frac{1}{\Lambda^3}\frac{\phi'}{r}\right)^2 = \frac{1}{M_{Pl}\Lambda^3}\frac{M}{4\pi r^3}, \quad (8)$$

また、重力ポテンシャルはスカラー場と次の関係式を満たす：

$$\Phi' = \frac{GM}{r^2} - \frac{\phi'}{M_{Pl}}, \quad \Psi' = \frac{GM}{r^2} + \frac{\phi'}{M_{Pl}}, \quad (9)$$

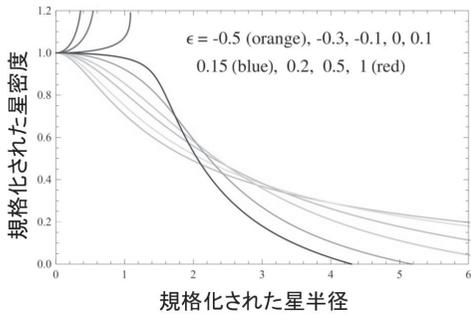


図5. 拡張ホルンデスキー理論における星構造への影響. 遮蔽機構の破れによって, 密度勾配を通じて補正が表れる<sup>(21)</sup>. 星のような構造を生成できないパラメータが存在することを指摘<sup>(22)</sup>.

ここで, (9)式の右辺第2項がニュートン重力に対応しており, 残りのスカラー場からの寄与がニュートン重力には表れない第5の力を媒介していることを表している. これらの式から遮蔽機構の有無を探索することが出来る. まず十分遠方を考えると, (8)式から

$$\phi' \approx \frac{M}{4\pi M_{Pl} r^2}, \quad (11)$$

となることがわかり, これを(9)式に代入すると $\Phi$ と $\Psi$ が一致しないことがわかる. この事実は, 遠方では第5の力がニュートン重力と同程度の寄与をするため, 一般相対論からのズレが顕著になることを表している. 一方で, 十分短距離では(7)式左辺の高次項が支配的になる. これにより, スカラー場の寄与(第5の力)は重力ポテンシャルに比べて小さくなる(遮蔽される)ことで $\Phi=\Psi$ が実現し, 一般相対論の結果を再現する. このようにスカラー自由度の非線形作用によって, スカラー自由度自身が実効的に誘起されなくなる機構を特にバインシュタイン機構と呼ぶ. 実際にこれをホルンデスキー理論に拡張した場合であっても同様の機構が働くことを確認することが出来る.

□興味深い点として, 遮蔽機構が働いている場合であっても, 振る舞いが変わる境界では第5の力の振る舞いが大きく変化することで観測量に影響する. 本研究において, 一般的な遮蔽機構の存在を示す一方で, 図4に示すように, 実際の観測データ, 特に銀河団の重力レンズ効果を通して, 遮蔽機構の存在を観測からテストすることが出来ることを見出した<sup>(20)</sup>(図4参照).

### 3. 3. ホルンデスキー理論を超えて.

□最も一般的なスカラー・テンソル理論を構築することは, 暗黒エネルギー問題に対して網羅的な探査が可能になる, という点において非常に重要である. 近年までホルンデスキー理論が最も一般的なスカラー・テンソル理論であると考えられてきた. これは不安定性を回避しつつ「運動方程式が高々2階微分」という条件を緩和することは不可能だと信じられていたからである. しかし, この条件を緩和しつつ安定な理論の存在が示唆された<sup>(14)</sup><sup>(15)</sup>. 理論空間は非常に広範であるが, 典型的には以下のような項が新たに許容される:

$$F(\phi, X)\varepsilon^{\mu\nu\sigma\alpha}\varepsilon_{\alpha\beta\gamma\delta}\nabla^\alpha\phi\nabla_\mu\phi\nabla^\beta\phi\nabla^\gamma\nabla_\rho\phi\nabla^\delta\nabla_\sigma\phi. \quad (12)$$

明らかにこの項の存在により, 運動方程式に高次微分を一般に含む. それでもなお適切にゲージ自由度を選ぶことで不安定性がないことを示すことが出来る.

□本研究では, この一般化された理論においてバインシュタイン遮蔽機構が適切に働けるかについて探った<sup>(21)</sup>. 物質場の近傍を考える限りにおいて, ホルンデスキー理論においては常にバインシュタイン遮蔽機構が働くのに対し, 拡張理論を考えると一般には $\Phi=\Psi$ は成立せず, 遮蔽機構が部分的に破れるという特異な性質があることを見出した. 特に, 近距離における重力ポテンシャルは次の式に従う:

$$\Phi' = G\left(\frac{M}{r^2} + \varepsilon M''\right), \quad (13)$$

$$\Psi' = G\left(\frac{M}{r^2} - \tilde{\varepsilon}\frac{M'}{r}\right), \quad (14)$$

ここで,  $\varepsilon$ は拡張理論の典型的なパラメータである. これらの式から, 密度勾配が存在する領域において一般相対論からのずれが大きくなることがわかる. 密度に依存して遮蔽が破れるという例はこれまで存在せず, この特異性を通じて拡張されたホルンデスキー理論を制限することが可能になる.

□遮蔽機構の破れは密度勾配が大きいところで重要な役割を果たす. 実際に, 星構造の進化に鋭敏であることを示すことが出来る<sup>(22)</sup>. 図5に示すように, 特定のパラメータにおいては星のような構造を作ることを出来ない. 本研究により, 拡張ホルンデスキー理論自体は安定で整合的であっても, 実際的には現実を再現しない可能性を初めて指摘した. さらに, 星構造のような宇宙論的なスケールに比べて小さなスケールの重力の物理の精密測定を通じて, 宇宙論スケールの重力の物理を探求出来る

いう例を与えたという点でも興味深い。これまで必ず実現すると思われていた遮蔽機構に破れが存在する可能性が指摘されたことで、既存の理論についても再考を迫ることになった。

### 3. 4. 質量を持つ重力理論とその拡張

□最後に、スカラー・テンソル理論以外の理論研究の進展について言及しておく。修正重力理論において、近年の最も大きな進展は質量を持つ重力理論の発見が挙げられる。重力子が整合的に質量を持つ可能性については1930年代から盛んに調べられてきた<sup>(11)</sup>。しかし、不安定性の存在が指摘されてからこれまで重力子は質量を持つことが出来ないと考えられてきた。近年の研究の進展により、この問題を解決する手法が確立され、実際に重力子が整合的に質量を持つ理論が提唱されるに至った<sup>(12)</sup>。ラグランジアン密度は次のように与えられる：

$$L = \frac{M_{Pl}^2}{2} \left[ R + m^2 \left( (K^\mu{}_\mu)^2 - K^\mu{}_\nu K^\nu{}_\mu \right) + \dots \right] \quad (15)$$

ここで、第一項はアインシュタイン方程式を導く項であるのに対し、第二項は新たに見出された質量項である。特に、質量項に現れる  $K$  テンソルは

$$K^\mu{}_\nu = \delta^\mu{}_\nu - \sqrt{g^{\mu\rho} \eta_{\rho\nu}}, \quad (16)$$

である。テンソル量のルートという特殊なテンソルが表れるなど、興味深い理論構造を持つ。

□提唱された理論を用いた宇宙論についても活発に議論がなされた。その中でも、実際に重力子の質量項が実効的に宇宙項を与える解が得られており、暗黒エネルギーの謎と密接に関連していると考えられている。

□この理論には自然な拡張が存在することが示唆されていたが、これまで見つかっていなかった。特に、微分結合型の相互作用は、アインシュタイン方程式を導く項以外は見つかっていなかった重力子の運動項を与える。本研究において、微分結合型の相互作用を持つ自然な拡張を系統的に探索する方法論を定式化し、実際に許される相互作用の一部を同定することに成功した<sup>(23)</sup>。次に示すような構造が候補として許容される：

$$\varepsilon^{\mu\nu\rho\sigma} \varepsilon^{\alpha\beta\gamma\delta} R_{\mu\nu\alpha\beta} K_{\rho\gamma} (\alpha g_{\sigma\delta} + \beta K_{\sigma\delta}). \quad (17)$$

ここで、 $\alpha$ 、 $\beta$  は定数である。理論の構築法自身には、 $K$  テンソル構造は陽には含まれていないにも関わらず、自然に  $K$  テンソルが表れることを見出した。この意味において、有質量重力理論と密接な関連があると推測される。本研究で提案した運動項はパラメータによっては不安定

性を持つことがわかっているが、このクラスの安定な運動項が存在した場合、質量を持つ重力理論における宇宙論での問題点を解決しようと期待されており、さらなる深い検討を行う必要がある。

### 4. 将来観測

□これまで、CMB や超新星の測定を通じて暗黒エネルギーという宇宙論における最大の謎の存在が明らかとなった。今後、観測はさらなる高精度化・大規模化が進むことで、暗黒エネルギーの性質をも探査出来るようになるかと期待している。次世代計画の中でも、国際超大型電波宇宙観測計画 Square Kilometre Array (SKA)<sup>(24)</sup> は、暗黒エネルギー問題を含む宇宙論の未解決問題に決定打を与える計画として注目を集めている。SKA は南アフリカとオーストラリアに設置される予定の超大型電波望遠鏡であり、その名が示すように有効集光面積が  $1 \text{ km}^2$  にも達する。大陸規模で観測機器を設置することにより、電波域においては高感度・高視野・広帯域・高分解能というこれまでにない比類のない特徴を備えている。

□宇宙論観測モードとして、1. 2. 章で述べた銀河サーベイを行う予定である。10億個もの銀河を観測することが計画されており、これまでにない精度・規模の宇宙大規模構造の3次元地図を描くことが出来る。重要な点として、電波域を用いた宇宙論はこれまでになく、既存の可視光域における宇宙論の探査と相補的な情報を提供できる。一方で、SKA 計画の特色として、中性水素の超微細構造遷移によって放出される 21cm 線を用いて宇宙の構造の進化に迫っていくことが出来る。特に、中性水素は銀河団や銀河、星のような構造がなくても存在するため、物質場の密度揺らぎそのものをトレースする。これにより、これまで観測されたことのない、いわゆる暗黒時代を観測しうる唯一の観測装置となる。宇宙開闢からほとんど時間の経っていない原始的な宇宙を探求し、暗黒エネルギーの性質や一般相対論のテストを行うことが出来るようになる<sup>(25), (26), (27)</sup>。

### 5. まとめ

□本稿では、CMB に代表される精密宇宙観測を通じて確立された宇宙論の到達点の1つ、標準宇宙論を概説した。このモデルは、少数のパラメータで既存の観測データの殆ど全てを非常によく説明してくれる。しかし、そこから導かれた宇宙像には、既存の物理法則では説明することが容易でない未知の物質やエネルギーで我々の宇宙が埋め尽くされていることを示唆している。その中でも最大の謎の一つである暗黒エネルギーに注目し、その

問題点と提案されているいくつかの解決法を解説した。

□後半では、暗黒エネルギー問題の解決のため、暗黒エネルギーの代替要素として大きな注目を集めている修正重力理論についての近年の進展を概観した。特に、修正重力理論が最低限持つべき、小スケールで余分な自由度を遮蔽する機構の存在について重点的に議論した。

□本稿が、宇宙論研究の一端を伝える一助となれば幸いです。

□本研究は、Andrei Linde 教授 (Stanford University), 佐々木節教授 (京都大学), 田中貴浩教授 (京都大学), 小林努准教授 (立教大学), 渡辺悠貴講師 (群馬高専), 水野俊太郎助教 (早稲田大学), 斎藤遼博士 (京都大学基礎物理学研究所), 成子篤博士 (東京工業大学), 成川達也博士 (大阪市立大学), 木村蘭平博士 (東京工業大学) をはじめとする多くの方との共同研究として行われたものである。共同研究者の方々に深く感謝いたします。

#### 参考文献

- (1) P.A.R Ade et al. [Planck Collaboration], "Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters", *Astron. Astrophys.*, **571**, A16 (2014-10), p.66.
- (2) P.A.R. Ade et al. [Planck Collaboration], "Planck 2015 results. XIV. Dark energy and modified gravity", arXiv:1502.01590, (2015-2), p.33
- (3) A.G.Riess et al. [Supernova Search Team Collaboration], "Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant", *Astron. J.* **116**, 1009 (1998-9), p.27.
- (4) S. Perlmutter et al. [Supernova Cosmology Project Collaboration], *Astrophys. J.* **517**, 565 (1999-6), p.21
- (5) C. M. Will, "The Confrontation between General Relativity and Experiment", *Living Rev. Rel.* **17**, 4 (2014-4), p.113
- (6) S. Weinberg, "The cosmological constant problem", *Rev. of Mod. Phys.*, **61**, 1 (1989-1), p.23
- (7) S. Coleman, "Why There Is Nothing Rather Than Something: A Theory of the Cosmological Constant", *Nucl. Phys. B* **310**, 643 (1988-4), p.25
- (7) B. Ratra, P.J.E. Peebles, "Cosmological Consequences of a Rolling Homogeneous Scalar Field", *Phys. Rev. D*, **3406** (1988-6), p.
- (8) A. De Felice, S. Tsujikawa, "f(R) theories", *Living Rev. Rel.* **13**, 3 (2010-3), p.156
- (9) G.R. Dvali, G. Gabadadze, M. Porrati, "4-D gravity on a brane in 5-D Minkowski space", *Phys. Lett. B*, **485**, 208 (2000-7), p.6
- (10) A. Nicolis, R. Rattazzi, Trinchieri, "The Galileon as a local modification of gravity", *Phys. Rev. D* **79**, 064036 (2009-3), p.36
- (11) M. Fierz, W. Pauli, "On relativistic wave equations for particles of arbitrary spin in an electromagnetic field", *Proc. Roy. Soc. Lond.* **173**, 211 (1939), p.22
- (12) C. de Rham, G. Gabadadze, A. J. Tolley, "Resummation of Massive Gravity", *Phys. Rev. Lett.*, **106**, 231101 (2011-6), p.4
- (13) G. W. Horndeski, "Second-order scalar-tensor field equation in a four-dimensional space", *Int. J. Phys.*, **10**, 363 (1974-9), p.21
- (14) J. Gleyzes, D. Langlois, F. Piazza, F. Vernizzi, "Healthy theories beyond Horndeski", *Phys. Rev. Lett.*, **114**, 21, 211101 (2015-5), p.4
- (15) X. Gao, "Unifying framework for scalar-tensor theories of gravity", *Phys. Rev. D* **90**, 081501 (2014-10), p.5
- (16) S. Weinberg, "Anthropic Bound on the Cosmological Constant", *Phys. Rev. Lett.*, **59**, 2607 (1987-11), p.4
- (17) L. Susskind, "The Anthropic landscape of string theory", in B. Carr (ed.); "Universe or multiverse?", p.19
- (18) D. Yamauchi, A. Linde, A. Naruko, M. Sasaki, T. Tanaka, "Open inflation in the landscape", *Phys. Rev. D* **84**, 043513 (2011-8), p.14
- (19) K. Sugimura, D. Yamauchi, M. Sasaki, "Non-Gaussian bubble in the sky", *EPL* **100**, 29004 (2012-10), p.7
- (20) T. Narikawa, T. Kobayashi, D. Yamauchi, R. Saito, "Testing general scalar-tensor gravity and massive gravity with cluster lensing", *Phys. Rev. D* **87**, 124006 (2013-6), p.10
- (21) T. Kobayashi, Y. Watanabe, D. Yamauchi, "Breaking of Vainshtein screening in scalar-tensor theories beyond Horndeski", *Phys. Rev. D* **91**, 064013 (2015-3), p.12
- (22) R. Saito, D. Yamauchi, S. Mizuno, J. Gleyzes, D. Langlois, "Modified gravity inside astrophysical bodies", *JCAP* **06**, 008 (2015-6), p.14
- (23) R. Kimura, D. Yamauchi, "Derivative interactions in de Rham-Gabadadze-Tolley massive gravity", *Phys. Rev. D* **88**, 084025 (2013-10), p.7
- (24) <http://www.skatelescope.org>
- (25) 例えば G. Zhao, D. Bacon, R. Maartens, M. Santos, A. Raccanelli, "Model-independent constraints on dark energy and modified gravity with the SKA", *PoS AASKA* **14**, 165 (2015-4), p.13
- (26) T. Kitching et al., "Euclid & SKA Synergies", *PoS AASKA*, **14**, 146 (2015-4), p.17
- (27) D. Yamauchi et al., "Cosmology with the Square Array by SKA-Japan", arXiv:1603.01959, (2016-3), p.17



## 無限次元多様体の位相構造

嶺 幸太郎\*

### Topological structures of infinite-dimensional manifolds

Kotaro MINE \*

#### 1. はじめに

位相幾何学 (トポロジー) の研究対象となる空間や図形を位相空間と呼ぶ。ここで位相 (トポロジー) とは、写像の連続性や点列の収束発散を規定する際に用いる数学的構造のことを指し、位相を構成する集合を開集合と呼ぶ。二つの図形においてそれらの位相構造の間に本質的な違いが見られないとき、それらは同相であるという。本稿では位相空間の中でも無限次元多様体と呼ばれる対象に話題を絞り、その位相構造について考察する。

$n$  次元ユークリッド空間  $\mathbb{R}^n$  と局所的に同相な空間を  $n$  次元多様体という。多様体は、現代幾何学において主要な研究対象となる基本的な空間 (図形) である。1 次元多様体は直線または円のいずれかであり、2 次元多様体は曲面とも呼ばれている。そして高次元多様体の研究は、宇宙の形の可能性を追及する幾何学と見なすことができる。本稿で論じる空間は、これの無限次元版に相当する。すなわち、何らかの無限次元空間と局所的に同相な空間のことであり、このような空間を総称して無限次元多様体と呼ぶ。有限次元の多様体との大きな違いは、 $n$  次元線形空間の位相が唯一つだけ定まるのに対して、無限次元線形空間には無数の位相構造が入るという点にある。本論の前半では、いくつかの無限次元位相線形空間を取り上げ、それらを近傍モデルとする多様体の特徴づけや分類定理について紹介する。また後半においては、図形の空間と写像の空間の位相構造について論じながら、無限次元の構造をもつ幾何学的対象のうち実際に多様体となることが判明した例について報告する。

本論において、位相空間はすべてハウスドルフの分離公理を満たすものと仮定する。つまり、与えられた点列の極限が 2 点以上定まることがないような空間のみ

を考える。また技術上の都合により、多様体にはパラコンパクト性を要求する。

#### 2. 多様体概念の一般化

$n$  次元多様体の定義から、次の概念が容易に類推されよう:

**定義.**  $E$  を等質な位相空間とする。各点が、 $E$  の開集合と同相な近傍を持つような位相空間を  $E$ -多様体という。このとき、 $E$  を多様体のモデル空間と呼ぶ。

$n$  次元多様体とは  $\mathbb{R}^n$ -多様体のことにほかならない。一般論としては、モデル空間  $E$  がどんな等質空間であろうとも上のようにして  $E$ -多様体なる概念が定義できる。しかしながら本論では、 $E$  が主に線形空間となる場合について論じる。ただし、関連する研究としてヒルベルト立方体  $Q = [0, 1]^N$  をモデルとする  $Q$ -多様体についても部分的に紹介する。

無限次元位相線形空間の最も典型的な例は完備内積構造を持つヒルベルト空間である。距離空間として完備な無限次元多様体のトポロジーを研究する立場からすると、ヒルベルト多様体のみを論じればよいことが次の定理 1 により分かる。ここで、完備距離づけ可能な局所凸位相線形空間をフレシェ空間 (Fréchet space) と呼ぶ。ヒルベルト空間やバナッハ空間はフレシェ空間である。

**定理 1 (Kadec-Anderson).** 稠密度の等しい無限次元フレシェ空間はすべて同相 ( $\approx$ ) である。

稠密度とは、稠密部分集合の最小濃度を指す。位相空間  $X$  の稠密度が可算無限濃度  $\aleph_0$  以下になるとき、 $X$  は可分であるという。定理 1 の非可分な場合を含めた証明は [29] にある。

\*特任助教 工学部数学教室

Assistant Professor, Dept. of Mathematics

### 3. ヒルベルト多様体の諸性質

$\tau$  を無限濃度, 稠密度  $\tau$  の無限次元ヒルベルト空間を  $\ell_2(\tau) = \{(x_t)_{t \in \tau} \in \mathbb{R}^\tau \mid \sum_{t \in \tau} x_t^2 < \infty\}$  とし, とくに可分な場合について  $\ell_2(\aleph_0)$  を  $\ell_2$  と略記する.  $\ell_2(\tau)$ -多様体について次が成り立つ (Henderson-Schori[13]).

**定理 2** (埋蔵定理). 任意の連結な  $\ell_2(\tau)$ -多様体は開部分空間として  $\ell_2(\tau)$  自身に埋め込める.

**定理 3** (分類定理). 連結な  $\ell_2(\tau)$ -多様体どうしが同相であるための必要十分条件はホモトピー同値となることである.

**定理 4** (三角形分割定理). 任意の連結な  $\ell_2(\tau)$ -多様体  $M$  に対して,  $M \approx |K| \times \ell_2(\tau)$  となるような局所有限次元多面体  $|K|$  が存在する. ここで,  $|K|$  には距離から定まる位相が入っているとす.

これらの基本的事実を背景として, ヒルベルト空間とは異なるモデル空間による多様体の研究においては, 上述の定理群に類似するような良い性質を満たすようにモデル空間を設定することが望ましいとされてきた. 例えば, ノルム空間  $E$  が  $E \approx E^{\aleph}$  または  $E \approx E_f^{\aleph}$  を満たすならば, 定理 2 及び 3 と同様の性質が  $E$ -多様体においても成立することが知られている. ここで,  $E_f^{\aleph}$  は  $\sigma$ -積を表す. すなわち,

$$E_f^{\aleph} = \{(x_n)_{n \in \mathbb{N}} \in E^{\aleph} \mid \text{有限個の } n \text{ を除いて } x_n = 0\}.$$

次に, 普遍空間としての  $\ell_2(\tau)$ -多様体の特徴づけを述べよう. ある位相空間のクラス  $C$  に対して, 位相空間  $X$  が  $C$  の普遍空間 (あるいは万有空間) であるとは,  $C$  の任意の元が  $X$  に埋め込めることをいう. 次の定理を見れば, 完備距離空間の“強い意味”での普遍空間として  $\ell_2(\tau)$ -多様体の特徴づけられることが分かる.

**定理 5** (Toruńczyk [29]). 完備距離 ANR 空間  $M$  が  $\ell_2(\tau)$ -多様体となるための必要十分条件は, 稠密度  $\tau$  以下の任意の完備距離空間  $X$  に対して,  $X$  から  $M$  への任意の連続写像が埋埋蔵写像で近似できることである.

### 4. 完備距離を持たない多様体

この節では, 完備距離が入らない線形距離空間について述べる. その典型的な例は前ヒルベルト空間

$$\ell_2^f = \{(x_n)_{n \in \mathbb{N}} \in \ell_2 \mid \text{有限個の } n \text{ を除いて } x_n = 0\}$$

である.  $\ell_2^f$  を含め, 次に挙げる空間は, 特別な位相空間のクラスに関する普遍空間となることが知られる:

$$\begin{aligned} \ell_2^f & \text{--- } \sigma\text{-有限次元コンパクト距離空間の普遍空間,} \\ \ell_2^f \times Q & \text{--- } \sigma\text{-コンパクト距離空間の普遍空間,} \\ \ell_2 \times \ell_2^f & \text{--- 可分な } \sigma\text{-完備距離空間の普遍空間.} \end{aligned}$$

ここで,  $\ell_2^f \times Q$  は線形空間ではないが, この空間と同相な位相線形空間の存在が分かっている. 上に挙げた空間をモデル空間とする多様体も, 次の定理 6 によって“ある種”の普遍空間として特徴づけられる. いくつかの定義が複雑なため各用語の詳細は省略するとして, 定理 6 の意図を大雑把に述べれば次のようになる: モデル空間として吸収的集合 (absorbing set) と呼ばれる特別な普遍空間を定義し, “強普遍”なる概念によって多様体の特徴づけを与える. もちろん上に挙げた三つの空間は, いずれも対応するクラスの吸収的集合である.

**定理 6** (Theorem 2.5 of [18]).  $C$  を閉集合に関する有限和や遺伝性で閉じた位相的クラスとし, さらに任意の  $n \in \mathbb{N}$  について  $\tau$  個の  $n$  次元立方体の直和空間を  $C$  が含んでいるとする. このとき,  $C$  に関する  $\ell_2(\tau)$  の吸収的集合を  $E$  とすれば, ANR 空間  $X$  が  $E$ -多様体となるための必要十分条件は  $X$  が  $C$  に関して強普遍的な  $Z_\sigma$  空間であり, かつ  $X \in C_\sigma$  となることである.

上の定理により, 良い性質を満たす位相空間のクラス  $C$  とその吸収的集合 (普遍空間)  $E \subset \ell_2(\tau)$  が与えられれば,  $E$ -多様体の特徴づけが得られることが分かった. このようなクラス  $C$  と吸収的集合  $E$  の組について, いくつもの例があることを次に紹介しよう.

開集合 (閉集合) の可算共通部分 (可算和) で書ける集合を  $G_\delta$ -集合 ( $F_\sigma$ -集合) と呼び, いかなる距離空間に埋め込んでも, その空間の中で  $G_\delta$ -集合 ( $F_\sigma$ -集合) となるような距離空間を絶対  $G_\delta$ -空間 (絶対  $F_\sigma$ -空間) と呼ぶ. そして, いかなる距離空間に埋め込んでも, その空間の中でボレル集合となるような距離空間を絶対ボレル空間と呼ぶ. よく知られる事実として, 位相空間が完備距離空間と同相であるための必要十分条件は, それが絶対  $G_\delta$ -空間となることである. コンパクト距離空間は絶対閉-空間である. また,  $\sigma$ -コンパクト距離空間と同相であることと, 可分な絶対  $F_\sigma$ -空間であることは必要十分である. 蛇足ではあるが, 絶対開-空間は空集合のみである.

先に挙げた三つの普遍空間の例と、いま述べた事実を組み合わせた一般化を考えることで、可分な絶対ボレル空間の各ボレル階層に対する普遍空間が存在することを Bestvina-Mogilski[6] は示した。更に、Sakai-Yaguchi[27] や Mine[18] により、非可分な絶対ボレル空間に対しても同等の事実が証明され、これらの普遍空間をモデルとする多様体も定理 2 や 3, 4 にあるような性質を満たすことが分かっている。

また、可分なクラスについては、解析集合 (analytic subset) やその補集合 (coanalytic set)、それらの一般化である射影集合 (projective set) の各階層に対する普遍空間の存在が Cauty[7] により得られている。

## 5. LF-空間と箱位相

次に、距離づけ不可能なモデル空間の例として、LF-空間と呼ばれる位相線形空間を挙げる。LF-空間とは、次で定義される、局所凸位相線形空間におけるフレシェ空間の帰納的極限 (inductive limit) のことである。

**定義.** フレシェ空間の増大列  $F_1 \subsetneq F_2 \subsetneq F_3 \subsetneq \dots$  に対して、各  $F_n$  から  $F = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} F_n$  への自明な写像が連続となるような  $F$  の局所凸線形位相の中で最強のものを導入した空間  $F$  を **LF-空間** と呼び、 $\text{ind-lim } F_n$  と書く。

注意したいのは、位相空間における帰納的極限  $\varinjlim F_n$ 、すなわち  $U \subset \varinjlim F_n$  が開集合であることを各  $U \cap F_n$  が  $F_n$  の開集合であることと定義する位相と  $\text{ind-lim } F_n$  の位相は一般には一致せず、 $\varinjlim F_n$  のほうが強いということである。二つの位相が一致するための必要十分条件は各  $F_n$  が局所コンパクト (すなわち有限次元) となることであり、実際、局所コンパクトでない  $F_n$  が一つでもあると和の操作が  $\varinjlim F_n$  では連続にならず、したがって  $\varinjlim F_n$  は位相群にすらならない。

LF-空間の位相は、箱位相と呼ばれる特殊な積位相と関係が深い。

**定義.** 積集合  $\prod_{n \in \mathbb{N}} X_n$  において、集合族

$$\left\{ \prod_{n \in \mathbb{N}} U_n \mid U_n \text{ は } X_n \text{ の開集合} \right\}$$

で生成される位相を箱位相と呼び、この箱位相空間を  $\square X_n$  と書く。更に、基点  $*_n \in X_n$  に対して定義され

る部分空間

$$\{(x_n)_{n \in \mathbb{N}} \in \square X_n \mid \text{有限個の } n \text{ を除いて } x_n = *_n\}$$

を弱箱位相空間と呼び、これを  $\square X_n$  で表す。

弱箱位相空間は集合としては  $\sigma$ -積と等しい。有限積の場合、箱位相空間および弱箱位相空間は通常の積位相空間と一致する。本節では  $X_n$  として主に線形空間を考えるので、基点  $*_n$  は原点とする。

箱位相空間の位相は複雑で、 $\square \ell_2$  ですら正規空間にはならず、連結でも局所連結でもなく、特に位相線形空間ではない。しかしながら、その部分空間である弱箱位相空間は比較的良好なふるまいをする。実際、フレシェ空間の有限積による増大列、

$$F_1 \subset F_1 \times F_2 \subset F_1 \times F_2 \times F_3 \subset \dots,$$

に関する LF-空間は弱箱位相空間に一致する：

**命題 7.**  $\text{ind-lim } \prod_{i=1}^n F_i = \square F_n$ . とくに、 $\varinjlim \mathbb{R}^n = \text{ind-lim } \mathbb{R}^n = \square \mathbb{R}$ .

Mankiewicz によれば、稠密度が等しい LF-空間の位相は 2 種類以下に分類される：

**定理 8** (Mankiewicz[17]). 可分な LF-空間は、 $\square \ell_2$  および  $\square \mathbb{R}$  のいずれかと同相になる。更に、稠密度が非可算濃度  $\tau$  の LF-空間は、 $\square \ell_2(\tau)$  および  $\square \ell_2(\tau_n)$  のいずれかと同相になる。ここで、各  $\tau_n$  は  $\tau_1 < \tau_2 < \tau_3 < \dots$  および  $\sup_{n \in \mathbb{N}} \tau_n = \tau$  を満たす濃度とする。

**系 9.** 任意の無限濃度  $\tau$  について、 $\square \ell_2(\tau) \approx \ell_2(\tau) \times \square \mathbb{R}$ .

したがって、LF-空間をモデル空間とする多様体 (以下、これを総称して **LF-多様体** と呼ぶ) を考える場合、位相的には 2 種類のモデル空間のみを考えればよい。 $\square \mathbb{R}$ -多様体については、Heisey[12] や Sakai[25] の研究によって定理 2 や 3, 4 と同等の性質が成り立つことが分かっている。それ以外の LF-多様体についてはそこまでは分かっていないが、LF-空間の開部分空間に対して次が得られている。

**定理 10** (M-Sakai[19]).  $\square \ell_2(\tau)$  の開部分空間どうしが同相であるための必要十分条件はホモトピー同値となることである。

**定理 11** (M-Sakai[20]). LF-空間  $F$  の任意の開部分空間  $U$  には,  $U \approx |K| \times F$  となるような局所有限次元多面体  $|K|$  が存在する. ここで,  $|K|$  には距離から定まる位相が入っているとす.

## 6. 無限次元多様体となる幾何学的対象

ここから先は, どのような数学的対象が無限次元多様体になり得るのかについて論じる. 実は, 1854 年に Riemann[23] が多様体の概念を提唱した際, 無限次元多様体の存在について次のように言及している (引用中の下線部は嶺によるもので, 邦訳は [24] による):

“位置の規定が有限個の量規定ではなく, 無限数列をなす量規定, あるいは連続多様体をなす量規定を要求するような多様体もある. そのような多様体をなすのは, 例えば, ある与えられた領域に対する [この領域を定義域とする] 関数の可能な規定 や, 空間図形の可能な形 などである.”

つまり, 無限次元多様体の候補には, 関数の空間や図形の空間が挙げられるわけである. 本論では, 図形の空間として幕空間について, 写像 (関数) の空間として連続写像空間について, 一体どのような条件の下でこれらが無限次元多様体になるのか検討しよう.

## 7. 幕空間

本節では, 位相空間  $X$  は 2 点以上からなる集合とし,  $X$  の閉集合全体を  $\text{Cl}d(X)$  で表す. また, その部分集合として  $X$  のコンパクト集合全体を  $\text{Comp}(X)$ ,  $X$  の有限集合全体を  $\text{Fin}(X)$  と書く. 本論では割愛するが, これ以外にも有界閉集合全体や凸閉集合全体, ペアノ連続体全体などを考える場合もある. ここでペアノ連続体とは, 閉区間  $\mathbf{I} = [0, 1]$  の連続像となる空間のことを指す. これは局所連結な連結コンパクト距離空間になることと同値である.

ヴィエトリス位相をはじめとして,  $\text{Cl}d(X)$  にはいくつかの位相が定義されている. ここではハウスドルフ距離による位相を導入しよう.

**定義.** 距離空間  $(X, d)$  に対して, 次で定義される  $\text{Cl}d(X)$  における距離  $d_H$  をハウスドルフ距離と呼ぶ.

$$d_H(A, B) = \inf\{\varepsilon > 0 \mid B \subset N(A, \varepsilon) \text{ かつ } A \subset N(B, \varepsilon)\}.$$

ここで,  $N(A, \varepsilon)$  は集合  $A$  の  $\varepsilon$ -開近傍を表す.

ハウスドルフ距離による位相は,  $X$  の距離  $d$  に依存する点に注意しなければならない. つまり,  $(X, d) \approx (X, d')$  だからといって  $(\text{Cl}d(X), d_H) \approx (\text{Cl}d(X), d'_H)$  とは限らないということである. 部分空間  $\text{Comp}(X)$  については距離によらずに位相が決まることが知られる.

幕空間の多様体性に関する有名な結果としては, 例えば次の定理が挙げられよう. 幕空間は多様体になるというだけではなく, 実際にはモデル空間そのものと同相であることが多い.

**定理 12** (Curtis-Schori[11]).  $\text{Comp}(X)$  が  $Q$  と同相であるための必要十分条件は  $X$  がペアノ連続体となることである.

**定理 13** (Curtis[8]).  $\text{Comp}(X)$  が  $\ell_2$  と同相であるための必要十分条件は  $X$  が局所連結な連結完備距離空間であり, かつ  $X$  の各点がコンパクトな近傍を持たないことである.

$(X, d)$  がコンパクトでない場合は  $\text{Cl}d(X)$  の位相的分類はよく分かっておらず, とくに完備距離空間でない場合は  $\text{Comp}(X)$  ですら扱いが難しい. 例えば,  $X$  が  $\sigma$ -コンパクトな場合でも  $\text{Comp}(X)$  は絶対ボレル空間ではない:

**定理 14** (Banach-Cauty[2]). coanalytic クラスの普遍空間  $\Pi_2$  と  $\text{Comp}(X)$  が同相であるための必要十分条件は,  $X$  が第 1 類かつ局所・連続体-連結な連結 coanalytic set となることである. とくに,  $\text{Comp}(\ell_2^f)$  は  $\Pi_2$  と同相である.

ここで, 距離空間  $X$  が連続体-連結 (**continuum-connected**) であるとは,  $\{x, y\}$  を含む  $X$  の連結コンパクト部分集合 (連続体) の存在が任意の 2 点  $x, y \in X$  について言えることである. 更に, 連続体-連結な部分集合による開基を持つ空間を局所・連続体-連結 (**locally continuum-connected**) であると定める.

有限部分集合による幕空間については次が知られている. ここで, 有限次元閉部分空間の可算和で書ける空間を強可算次元空間と言う.

**定理 15** (Curtis-Nhu[10]).  $\text{Fin}(X)$  が  $\ell_2^f$  と同相であるための必要十分条件は  $X$  が局所連結な強可算次元  $\sigma$ -コンパクト連結距離空間となることである.

$X$  のボレル階層が高くなると  $\text{Fin}(X)$  の特徴づけを探すのは難しく、定理 15 のような綺麗な結果は得られていない。それでも特定の位相空間に関する冪空間の位相的決定は興味深く、例えば、 $\text{Fin}(Q) \approx \text{Fin}(\ell_2^f \times Q) \approx \ell_2^f \times Q$  (Curtis[9]),  $\text{Fin}(\ell_2(\tau)) \approx \ell_2(\tau) \times \ell_2^f$  (Yaguchi[33]) などが得られている。更に、 $X$  をある位相的クラスの普遍空間と見なし一般化することで次を得る。

**定理 16** (M-Sakai-Yaguchi[22]).  $E$  を 4 節で挙げた完備距離づけ可能でない吸収的集合とし、 $M$  を連結な  $E$ -多様体とする。このとき  $\text{Fin}(M)$  は  $E$  と同相である。

このほか、最近になって定理 13 および 15 の非可分化に相当する次が示されている。

**定理 17** (Koshino[14]).  $\text{Comp}(X)$  が  $\ell_2(\tau)$  と同相であるための必要十分条件は  $X$  が局所連結な連結完備距離空間であり、かつ  $X$  の空でない任意の開集合が稠密度  $\tau$  の非相対コンパクト集合となることである。

**定理 18** (Koshino[15]).  $\text{Fin}(X)$  が  $\ell_2^f(\tau)$  と同相であるための必要十分条件は  $X$  が局所連結な強可算次元  $\sigma$ -局所コンパクト連結距離空間であり、かつ  $X$  の任意の空でない開集合の稠密度が  $\tau$  となることである。

## 8. 連続写像空間

位相空間  $X$  から  $Y$  への連続写像全体を  $C(X, Y)$  で表す。 $C(X, Y)$  上に定められる自然な位相として、コンパクト開位相や一様収束位相、limitation 位相、グラフ位相などが知られている。これらの位相の強弱は次のようになっている (ただし、一様収束位相は  $Y$  が距離空間のときに限り定義される位相である):

コンパクト開位相  $\subset$  一様収束位相

$\subset$  limitation 位相  $\subset$  グラフ位相。

これらの位相は、 $X$  がコンパクトでない場合に本質的に意味を持つ。すなわち、定義域  $X$  がコンパクトならば上の四種類の位相はすべて一致する。本節では、各位相ごとに  $C(X, Y)$  の多様体性について論じる。

### 8.1. コンパクト開位相

この位相は、解析学における広義一様収束位相に相当する概念である。

**定義.**  $X$  のコンパクト部分集合  $K$  および  $Y$  の開集合  $U$  を動かして定義される集合たち  $[K, U] = \{f \in C(X, Y) \mid f(K) \subset U\}$  によって生成される  $C(X, Y)$  上の位相をコンパクト開位相と言う。

定義域  $X$  が局所コンパクトであると集合  $[K, U]$  による情報量は豊かになり、コンパクト開位相は位相的に扱いやすくなる。 $X$  や  $Y$  を最も一般化した場合における  $C(X, Y)$  の多様体性について、次の定理がある。

**定理 19** (Sakai [26]). 有限集合でないコンパクト距離空間  $X$  および孤立点を持たない可分完備距離 ANR 空間  $Y$  について、 $C(X, Y)$  はコンパクト開位相において  $\ell_2$ -多様体である。

$X$  がコンパクトでない場合は  $C(X, Y)$  の ANR 性が問題になる。例えば、 $X$  が CW 複体の場合については Smrekar-Yamashita[28] を見よ。

### 8.2. 一様収束位相

次で定めるような無限大の値も許す距離を考えよう:

**定義.**  $(Y, d)$  を距離空間とする。上限距離  $d_S(f, g) = \sup\{d(f(x), g(x)) \mid x \in X\}$  から定まる  $C(X, Y)$  上の位相を一様収束位相と言う。

ハウスドルフ距離と同様に、この位相も  $Y$  の距離に依存することに注意したい。 $C(X, Y)$  の ANR 性を確保するために、次の定理では、 $Y$  の条件に ANRU と呼ばれる性質を要求している。

**定理 20** (Yamashita [34]). コンパクトでない可分距離空間  $X$  および可分完備距離 ANRU 空間  $Y$  に対して、 $Y$  の各連結成分の直径による下限が正数であるならば  $C(X, Y)$  は一様収束位相において  $\ell_2(2^{\aleph_0})$ -多様体となる。

### 8.3 Limitation 位相

**定義.**  $Y$  の開被覆  $\mathcal{U}$  に対して、 $\{f(x), g(x)\} \subset U$  なる  $U \in \mathcal{U}$  の存在が任意の  $x \in X$  について言えるとき、 $f, g \in C(X, Y)$  は  $\mathcal{U}$  だけ近い ( $\mathcal{U}$ -close) と定義し、 $f$  と  $\mathcal{U}$  だけ近い  $g \in C(X, Y)$  の全体を  $\mathcal{U}(f)$  で表す。集合族  $\{\mathcal{U}(f) \mid \mathcal{U} \text{ は } Y \text{ の開被覆}\}$  を各  $f \in C(X, Y)$  の近傍基とするような  $C(X, Y)$  の位相を limitation 位相と言う。

$Y$  が距離空間かつ  $f \in C(X, Y)$  が定数関数である場合、 $f$  の近傍は一様収束位相による近傍と一致し、ゆえに  $f$  は可算近傍基を持つ。ところが、 $f$  が同相写像である場合、 $f$  は可算近傍基を持たないことが分かる(詳しくは定理 24 の後で述べる)。したがって、 $X = Y = \mathbb{R}$  の場合ですら  $C(\mathbb{R}, \mathbb{R})$  は多様体になり得ない。

#### 8.4 グラフ位相

次で定義されるグラフ位相は、0 階連続的微分可能な関数におけるホイットニー位相とも見なせる。

**定義.** 各  $f \in C(X, Y)$  に対して、 $f$  のグラフを  $\Gamma_f = \{(x, f(x)) \in X \times Y \mid x \in X\}$  とする。更に、 $X \times Y$  の部分集合  $U$  に対して、グラフが  $U$  に含まれるような連続関数全体を  $\Gamma_U$  で表す。グラフ位相とは、集合族  $\{\Gamma_U \mid U \text{ は } X \times Y \text{ の開集合}\}$  で生成される  $C(X, Y)$  上の位相のことである。

この位相は箱位相と相性が良く、例えば空間の連結性についてその様子が見て取れる。まず、次のような  $\square\mathbb{R}$  の部分集合  $U$  を考えると、

$$U = \left\{ (x_n)_{n \in \mathbb{N}} \in \square\mathbb{R} \mid \lim_{n \rightarrow \infty} x_n = 0 \right\},$$

これは原点  $(0, 0, 0, \dots) \in \square\mathbb{R}$  の clopen な近傍であり、 $U$  は  $(1, 1, 1, \dots) \in \square\mathbb{R}$  を含まない。ゆえに、 $\square\mathbb{R}$  は不連結である。さて、

$$U' = \left\{ f \in C(\mathbb{R}, \mathbb{R}) \mid \lim_{n \rightarrow \infty} f(n) = 0 \right\}$$

とすると、 $U'$  も原点(すなわち定数関数  $g = 0$ ) の clopen な近傍であり、 $g$  以外の定数関数を含まない。したがって、 $C(\mathbb{R}, \mathbb{R})$  もまた不連結となる。連結成分を記述するために定義を続けよう。

基点  $* \in Y$  に関する  $f \in C(X, Y)$  の台 (support) を次で定める:

$$\text{supp } f = \text{cl}\{x \in X \mid f(x) \neq *\}.$$

台がコンパクトな関数全体からなる  $C(X, Y)$  の部分空間を  $C_c(X, Y)$  と書く。連結成分に関して次の命題が成り立つ。

**命題 21.**  $\square\mathbb{R}$  の原点の連結成分は  $\square\mathbb{R}$  に一致し、 $C(\mathbb{R}, \mathbb{R})$  のグラフ位相における原点の連結成分は  $C_c(\mathbb{R}, \mathbb{R})$  に一致する。

$Y$  が群構造を持つ場合について、 $C_c(X, G)$  が LF-多様体となることを我々は示した:

**定理 22** (Banach-M-Sakai-Yagasaki [5]). コンパクトでない局所コンパクト可分距離空間  $X$  および可分完備距離 ANR 位相群  $G$  に対して、グラフ位相による写像空間のペア  $(C(X, G), C_c(X, G))$  は、箱位相空間のペア  $(\square\ell_2, \square\ell_2)$  と局所的に同相である。とくに  $C_c(X, G)$  は LF-多様体である。

#### 9. 同相群の位相

$C(X, Y)$  の自然な部分空間がいくつか考えられる。例えば  $X = Y = \mathbb{R}$  の場合は、有界関数空間や PL 関数空間、微分可能関数空間、多項式空間などがある。本節では、特別な部分空間として同相写像のなす群(同相群)の研究の一部を報告したい。

位相空間  $X$  上の同相写像とは、 $X$  のトポロジーを保つような入れ替えのことを指す。このような入れ替え全体による集合が同相群であり、したがって同相群は  $X$  の対称性を記述する幾何的概念である。

##### 9.1. 同相群予想

位相空間  $X$  に対して、 $X$  の同相写像全体からなる群  $H(X)$  を  $X$  の同相群と呼ぶ。 $C(X, X)$  の部分空間として  $H(X)$  には様々な位相が入る。一般に、各位相において、 $H(X)$  が位相群になるための必要十分条件を見つけるのは容易ではない。しかしながら、後述する同相群はすべて位相群である。

さて、同相群の多様体性についてであるが、実はその証明は困難を極め、とくに ANR 性を示すのが難しく、 $X$  がコンパクト多様体の場合ですら分かっていない。次は Homeomorphism group problem と呼ばれる未解決問題である。

**問題.**  $n$  次元立方体  $\mathbf{I}^n$  ( $n \geq 3$ ) の同相群  $H(\mathbf{I}^n)$  は ANR 空間であるか?

なお、2 次元以下の多様体については同相群の多様体性が示されている:

**定理 23** (Luke-Mason[16]). コンパクト 2 次元多様体の同相群は  $\ell_2$ -多様体である。

次に、底空間がコンパクトでない場合について、写像空間の各位相と同相群の多様体性との関係を見よう。

##### 9.2. コンパクト開位相と一様収束位相

コンパクト開位相については、コンパクトでない連結 2 次元多様体の同相群が  $\ell_2$ -多様体となるための必要十分条件が Yagasaki[30] により得られている。更に、その連結成分の位相的分類も完了している (Yagasaki[31])。

一様収束位相においては同相群が位相群でないことから、位相群となり得る部分群である一様同相群について論じるのが自然である。ここでは底空間の位相構造のみならず距離関数が与える情報にも左右されることから、多様体性の決定は特殊なケースに限って研究されている。例えば実数直線  $\mathbb{R}$  の一様同相群とその部分群の多様体性について Mine-Sakai-Yagasaki-Yamashita[21] で論じられている。また、曲面の一様同相群の局所可縮性について、Yagasaki[32] がある。

### 9.3. グラフ位相と limitation 位相

台がコンパクトな同相写像による部分群を  $H_c(X)$  と書く。ただし、同相写像  $h$  の台は次で定義される集合であり、連続関数版との違いに注意したい:

$$\text{supp } f = \text{cl}\{x \in X \mid f(x) \neq x\}.$$

グラフ位相に関する同相群の研究は、次の Banakh による結果が発端となった。

**定理 24** (Banakh[1]). グラフ位相について  $H_c(\mathbb{R}) \approx \square\ell_2$

実は、グラフ位相と limitation 位相は同相群に限ると一致することが分かる。 $\square\ell_2$  は第 1 可算公理を満たさない空間であるから、したがって、limitation 位相における  $C(\mathbb{R}, \mathbb{R})$  上の同相写像も可算近傍基を持たないのである。

8.4 項で述べた通りグラフ位相は箱位相空間と相性が良かった。これに対して、コンパクト開位相は通常の積位相空間と相性が良い。その事実を象徴するのが次に紹介する定理である。 $\Gamma$  を 1 次元多面体 (すなわちグラフ) とし、 $\Gamma$  にはホワイトヘッド弱位相が入っているとす。向きを保つ同相写像による部分群を  $H_+(\Gamma)$  と書き、 $H_0(\Gamma) = H_+(\Gamma) \cap H_c(\Gamma)$  と定義する。ここで、向きを保つ同相写像  $h \in H(\Gamma)$  とは、 $\Gamma$  に如何なる向き付けを行っても  $h$  が有向グラフ自己同型を誘導するもののことを指す。

**定理 25** (Banakh-M-Sakai[3]). コンパクトでない連結 1 次元多面体  $\Gamma$  について次が成立する:

- コンパクト開位相について  
 $(H_+(\Gamma), H_0(\Gamma)) \approx (\ell_2^{\mathbb{N}}, \ell_2^{\mathbb{N}})$ ,
- グラフ位相について  
 $(H_+(\Gamma), H_0(\Gamma)) \approx (\square\ell_2, \square\ell_2)$ .

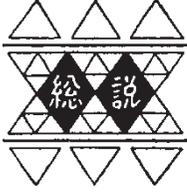
最後に、定理 24 の 2 次元への拡張を述べよう。

**定理 26** (Banakh-M-Sakai-Yagasaki[4]). コンパクトでない連結 2 次元多様体  $X$  のグラフ位相による同相群のペア  $(H(X), H_c(X))$  は箱位相空間のペア  $(\square\ell_2, \square\ell_2)$  と局所的に同型である。とくに  $H_c(X)$  は LF-多様体である。

### REFERENCES

- [1] T. Banakh, *On hyperspaces and homeomorphism groups homeomorphic to products of absorbing sets and  $\mathbb{R}^\infty$* , Tsukuba J. Math. **23** (1999) 495–504.
- [2] T. Banakh and R. Cauty, *Hyperspaces of nowhere topologically complete spaces*, Mat. Zametki **62** (1997), 35–51; translation in Math. Notes **62** (1997), 30–43 (1998).
- [3] T. Banakh, K. Mine and K. Sakai, *Classifying homeomorphism groups of infinite graphs*, Topology Appl. **156** (2009), 2845–2869.
- [4] T. Banakh, K. Mine, K. Sakai and T. Yagasaki, *Homeomorphism and diffeomorphism groups of non-compact manifolds with the Whitney topology*, Topology Proc. **37** (2011), 61–93.
- [5] T. Banakh, K. Mine, K. Sakai and T. Yagasaki, *Spaces of maps into topological group with the Whitney topology*, Topology Appl. **157** (2010), 1110–1117.
- [6] M. Bestvina and J. Mogilski, *Characterizing certain incomplete infinite-dimensional absolute retracts*, Michigan Math. J. **33** (1986), 291–313.
- [7] R. Cauty, *Ensembles absorbants pour les classes projectives*, Fund. Math. **143** (1993), 203–206.
- [8] D.W. Curtis, *Hyperspaces homeomorphic to Hilbert space*, Proc. Amer. Math. Soc. **75** (1979), 126–130.
- [9] D.W. Curtis, *Hyperspaces of finite subsets as boundary sets*, Topology Appl. **22** (1986), 97–107.

- [10] D.W. Curtis and Nguyen To Nhu, *Hyperspaces of finite subsets which are homeomorphic to  $\aleph_0$ -dimensional linear metric spaces*, Topology Appl. **19** (1985), 251–260.
- [11] D.W. Curtis and R.M. Schori, *Hyperspaces of Peano continua are Hilbert cubes*, Fund. Math. **101** (1978), 19–38.
- [12] R.E. Heisey, *Manifolds modelled on the direct limit of lines*, Pacific J. Math. **102** (1982), 47–54.
- [13] D.W. Henderson and R.M. Schori, *Topological classification of infinite-dimensional manifolds by homotopy type*, Bull. Amer. Math. Soc. **76** (1970), 121–124.
- [14] K. Koshino, *On a hyperspace of compact subsets which is homeomorphic to a non-separable Hilbert space*, Topology Appl. **206** (2016), 166–170.
- [15] K. Koshino, *Hyperspace of finite subsets, homeomorphic to pre-Hilbert spaces*, Topology Appl. **210** (2016), 133–143.
- [16] R. Luke and W.K. Mason, *The space of homeomorphisms on a compact two-manifold is an absolute neighborhood retract*, Trans. Amer. Math. Soc. **164** (1972), 275–285.
- [17] P. Mankiewicz, *On topological, Lipschitz, and uniform classification of LF-spaces*, Studia Math. **52** (1974), 109–142.
- [18] K. Mine, *Universal spaces of non-separable absolute Borel classes*, Tsukuba J. Math. **30** (2006), 137–148.
- [19] K. Mine and K. Sakai, *Open subsets of LF-spaces*, Bull. Polish Acad. Sci. Math. **56** (2008), 25–37.
- [20] K. Mine and K. Sakai, *Simplicial complexes and open subsets of non-separable LF-spaces*, Canad. J. Math. **63** (2011), 436–459.
- [21] K. Mine, K. Sakai, T. Yagasaki and A. Yamashita, *Topological type of the group of uniform homeomorphisms of the real line*, Topology Appl. **158** (2011) 572–581.
- [22] K. Mine, K. Sakai and M. Yaguchi, *Hyperspaces of finite sets in universal spaces for absolute Borel classes*, Bull. Polish Acad. Sci., Math. **53** (2005), 409–419.
- [23] B. Riemann, *Ueber die Hypothesen, welche der Geometrie zu Grunde liegen*, Abhandlungen der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, **13**, (1867).
- [24] B. Riemann, 『リーマン論文集』(数学史叢書) 足立恒雄・杉浦光夫・長岡亮介編訳, 朝倉書店 (2004).
- [25] K. Sakai, *On  $\mathbb{R}^\infty$ -manifolds and  $Q^\infty$ -manifolds*, Topology Appl. **18** (1984), 69–79.
- [26] K. Sakai, *The space of cross sections of a bundle*, Proc. Amer. Math. Soc. **103** (1988), 956–960.
- [27] K. Sakai and M. Yaguchi, *Characterizing manifolds modeled on certain dense subspaces of non-separable Hilbert spaces*, Tsukuba J. of Math. **27** (2003), 143–159.
- [28] J. Smrekar and A. Yamashita, *Function spaces of CW homotopy type are Hilbert manifolds*, Proc. Amer. Math. Soc. **137** (2009), 751–759.
- [29] H. Toruńczyk, *Characterizing Hilbert space topology*, Fund. Math. **111** (1981), 247–262.
- [30] T. Yagasaki, *The homeomorphism groups of noncompact 2-manifolds*, Mem. Fac. Engrg. Design Kyoto Inst. Tech. Ser. Sci. Tech. **47** (1998), 41–48.
- [31] T. Yagasaki, *Homotopy types of homeomorphism groups of noncompact 2-manifolds*, Topology Appl. **108** (2000), 123–136.
- [32] T. Yagasaki, *Groups of uniform homeomorphisms of covering spaces*, J. Math. Soc. Japan **66**, (2014), 1227–1248.
- [33] M. Yaguchi, *Hyperspaces of finite subsets of non-separable Hilbert spaces*, Tsukuba J. Math. **30** (2006), 181–193
- [34] A. Yamashita, *Non-separable Hilbert manifolds of continuous mappings*, arXiv:math.GN/0610214.



# 圧縮性 Navier-Stokes 方程式に対する 時間局所的・大域的適切性

村田 美帆

## On the local and global well-posedness for the compressible Navir-Stokes equations

Miho MURATA\*

### 1. 緒言

水や空気などを総称して流体と呼ぶ。圧縮や膨張などの密度変化を無視できる現象を解析する場合は非圧縮性流体として扱い、流体が高速で流れている場合や温度変化が大きい場合など密度変化を無視できない現象を解析する場合は圧縮性流体として扱う。これまで圧縮性流体の流れを支配する圧縮性 Navier-Stokes 方程式に対する時間局所的適切性、および時間大域的適切性について研究を行ってきた。 $\mathbb{R}^N$  における圧縮性 Navier-Stokes 方程式は次の準線形双曲・放物型方程式系で記述される。

$$\begin{cases} \partial_t \rho + \operatorname{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 & \text{in } \mathbb{R}^N \times J_T, \\ \rho(\partial_t \mathbf{u} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}) - \operatorname{Div} \mathbf{S}(\mathbf{u}) + \nabla P(\rho) = 0 & \text{in } \mathbb{R}^N \times J_T, \\ (\rho, \mathbf{u})|_{t=0} = (\rho_* + \theta_0, \mathbf{u}_0) & \text{in } \mathbb{R}^N. \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{u} = \mathbf{u}(x, t) = (u_1(x, t), \dots, u_N(x, t))$  と  $\rho = \rho(x, t)$  はそれぞれ流速と密度を表す未知関数 ( $N \geq 2$  は次元を表す)、 $\mathbf{S}(\mathbf{u}) = \alpha \mathbf{D}(\mathbf{u}) + (\beta - \alpha) \operatorname{div} \mathbf{u} \mathbf{I}$ 、 $\mathbf{D}(\mathbf{u}) = \nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T$ 、 $\alpha, \beta$  はそれぞれ第一、第二粘性係数を表す正定数、 $\mathbf{I}$  は  $N \times N$  の単位行列、 $P(\rho)$  は圧力とし  $C^\infty(\mathbb{R}_+)$ 、 $P'(\rho) > 0$  ( $\forall \rho > 0$ ) を満たすと仮定する。また  $\rho_*$  は正定数、 $J_T = (0, T)$  とする。

(1) に対し、特に次の二つの問題について適切性を考察した。第一にスリップ境界条件下における圧縮性 Navier-Stokes 方程式、第二に圧縮性流体と剛体の連成問題である。スリップ境界条件下では、一般領域における時間局所的適切性と初期値が十分小さい場合に有界領域における時間大域的適切性を、連成問題に対しては時間局所的適切性を得た。(cf. [7], [9], [6]) ここで、一般領域とは一様  $W_q^{k-1/q}$  ( $k \in \mathbb{N}$ ) 領域を指し、境界の点の取

り方によらず一様な球で領域を覆うことができるという性質をもち、半空間、摂動半空間、チューブ領域、層領域、外部領域のような非有界領域も含むものである。また、圧縮性流体と剛体の連成問題に対しては、時間局所的適切性を得た。以下、これらの結果について述べる。

### 2. スリップ境界条件下における圧縮性 Navier-Stokes 方程式

#### 2.1 導入

スリップ境界条件下における圧縮性 Navier-Stokes 方程式は次で記述される。

$$\begin{cases} \partial_t \rho + \operatorname{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 & \text{in } \Omega \times J_T, \\ \rho(\partial_t \mathbf{u} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}) - \operatorname{Div} \mathbf{S}(\mathbf{u}) + \nabla P(\rho) = 0 & \text{in } \Omega \times J_T, \\ \mathbf{D}(\mathbf{u}) \mathbf{n} - \langle \mathbf{D}(\mathbf{u}) \mathbf{n}, \mathbf{n} \rangle \mathbf{n} = 0, \quad \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0 & \text{on } \Gamma \times J_T, \\ (\rho, \mathbf{u})|_{t=0} = (\rho_* + \theta_0, \mathbf{u}_0) & \text{in } \Omega. \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $\Omega$  は境界  $\Gamma$  をもつ一般領域、 $\mathbf{n}$  は  $\Gamma$  上の単位外法線ベクトルとする。

スリップ境界条件下における圧縮性 Navier-Stokes 方程式の時間局所的適切性・時間大域的適切性に関する先行研究は [2], [8] の 2 つのみである。これらの論文では有界領域で、初期値は  $(\theta_0, \mathbf{u}_0) \in H^{1+\alpha}(\Omega)$ 、 $\alpha \in (1/2, 1)$  であり、解のクラスは時間空間ともに  $L_2$  枠である。 $L_2$  枠で扱う場合、ソボレフのうめこみの観点から可微分性の高い空間から初期値をとる必要がある。そこで、本研究では先行研究に比べ、初期値に対し低い可微分性と少ない整合条件の下、解を得るために解を時間  $L_p$  空間  $L_q$  枠の最大正則性が成立するクラスで構成した。従って、本研究で重要となるのは  $L_p$ - $L_q$  枠における最大正則性である。

流体方程式に限らず、発展方程式を解くために重要な理論として半群理論がある。実際、非圧縮性粘性流体方程式はディリクレ境界条件下で半線形方程式であるた

\* 特別助教 数学教室

Assistant Professor, Dept. of Mathematics

め、半群理論のみで解くことができる。一方、圧縮性粘性流体方程式は準線形方程式であるため正則性の損失 (regularity loss) が生じ、半群の評価のみでは解くのが困難である。この困難を解消するために、半群の生成だけでなく最大正則性も証明する必要がある。最大正則性とは、放物型または双曲・放物型の方程式  $du/dt + Au = f$  ( $u$  を未知関数、 $f$  を既知関数、 $A$  を有界解析的半群の生成作用素とする) に対し、左辺が時間について右辺と同じ正則性をもつことをいい、このとき得られる評価式によって準線形方程式を解くことができる。しかし、オイラー座標系で書かれた非線形問題 (2) には質量保存を表す双曲型の方程式に質量微分の項があるため、最大正則性で扱うことはできない。そこでまず、オイラー座標  $x$  からラグランジュ座標  $\xi$  への変数変換

$$x = \xi + \int_0^t \mathbf{v}(\xi, s) ds$$

によって質量微分の項を密度の時間微分のみに変える手法を用いた。ここで、 $\mathbf{v}(\xi, s)$  はラグランジュ座標上で見た流速とする。ラグランジュ座標への変換と線形化により得られる線形化方程式

$$\begin{cases} \partial_t \rho + \rho_* \operatorname{div} \mathbf{u} = f & \text{in } \Omega \times J_T, \\ \rho_* \partial_t \mathbf{u} - \operatorname{Div} \mathbf{S}(\mathbf{u}) + P'(\rho_*) \nabla \rho = \mathbf{g} & \text{in } \Omega \times J_T, \\ \alpha [\mathbf{D}(\mathbf{u})\mathbf{n} - \langle \mathbf{D}(\mathbf{u})\mathbf{n}, \mathbf{n} \rangle \mathbf{n}] = \mathbf{h} - \langle \mathbf{h}, \mathbf{n} \rangle \mathbf{n} & \text{on } \Gamma \times J_T, \\ \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = h & \text{on } \Gamma \times J_T, \\ (\rho, \mathbf{u})|_{t=0} = (\rho_0, \mathbf{u}_0) & \text{in } \Omega \end{cases} \quad (3)$$

に対し  $L_p$ - $L_q$  枠で最大正則性を示す。  $L_p$ - $L_q$  最大正則性を得るためには線形化問題 (3) に対応する次のレゾルベント問題の解作用素に対し  $\mathcal{R}$  有界性という概念が必要となる。

$$\begin{cases} \lambda \rho + \gamma_2 \operatorname{div} \mathbf{u} = f & \text{in } \Omega, \\ \gamma_0 \lambda \mathbf{u} - \operatorname{Div} \mathbf{S}(\mathbf{u}) + \nabla(\gamma_1 \rho) = \mathbf{g} & \text{in } \Omega, \\ \alpha [\mathbf{D}(\mathbf{u})\mathbf{n} - \langle \mathbf{D}(\mathbf{u})\mathbf{n}, \mathbf{n} \rangle \mathbf{n}] = \mathbf{h} - \langle \mathbf{h}, \mathbf{n} \rangle \mathbf{n}, \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = h & \text{on } \Gamma. \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 $\gamma_i = \gamma_i(x)$  ( $i = 0, 1, 2$ ) は一様連続な関数とする。最後に、 $\mathcal{R}$  有界性と  $L_p$ - $L_q$  最大正則性を得るために用いた Weis の作用素値 Fourier multiplier theorem [10] を導入する。

**定義 1.**  $\mathcal{T} \subset \mathcal{L}(X, Y)$  が  $\mathcal{R}$  有界であるとは、正定数  $C$  と  $p$  ( $1 \leq p < \infty$ ) が存在して、任意の  $m \in \mathbb{N}$ ,  $T_j \in \mathcal{T}$ ,  $f_j \in X$ ,  $[0, 1]$  上の独立、対称な任意の  $\{-1, 1\}$ -値確率変数  $\{r_j(u)\} (j = 1, \dots, N)$  に対し

$$\int_0^1 \left\| \sum_{j=1}^m r_j(u) T_j f_j \right\|_Y^p du \leq C \int_0^1 \left\| \sum_{j=1}^m r_j(u) f_j \right\|_X^p du$$

が成立するときをいう。定数  $C$  の下限を  $\mathcal{R}$ -bound といい、 $\mathcal{R}(\mathcal{T})$  で表す。ここで、 $\mathcal{L}(X, Y)$  は Banach 空間  $X$  から  $Y$  への有界線形作用素全体とする。

**定理 1.**  $X, Y$  を UMD 空間とし、 $M(\tau) \in C^1(\mathbb{R} \setminus \{0\}, \mathcal{L}(X, Y))$  であり、

$$\begin{aligned} \mathcal{R}(\{M(\tau) \mid \tau \in \mathbb{R} \setminus \{0\}\}) &= c_0 < \infty, \\ \mathcal{R}(\{\tau | M'(\tau) \mid \tau \in \mathbb{R} \setminus \{0\}\}) &= c_1 < \infty \end{aligned}$$

を満たすとし、 $1 < p < \infty$  とする。このとき、作用素

$$[T_M f](t) = \mathcal{F}^{-1}[M(\tau)\mathcal{F}[f](\tau)](t)$$

は  $L_p(\mathbb{R}, X)$  から  $L_p(\mathbb{R}, Y)$  への有界線形作用素であり、

$$\|T_M f\|_{L_p(\mathbb{R}, X)} \leq C(c_0 + c_1) \|f\|_{L_p(\mathbb{R}, Y)} \quad (f \in L_p(\mathbb{R}, X))$$

が成立する。ここで  $C$  は  $p, X$  へのみ依存する定数である。

## 2.2 主定理

本研究では、(2) に対し、初期値を次の整合条件を満たす空間からとることで、一般領域において時間局所的適切性を  $L_p$ - $L_q$  枠で得ることができた。

$$\begin{aligned} \mathcal{D}_q(\Omega) &= \{(\rho, \mathbf{u}) \in W_q^{1,2}(\Omega) \mid \\ &\quad \mathbf{D}(\mathbf{u})\mathbf{n} - \langle \mathbf{D}(\mathbf{u})\mathbf{n}, \mathbf{n} \rangle \mathbf{n} = 0, \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0 \text{ on } \Gamma\}. \end{aligned}$$

ここで、

$$W_q^{\ell,m}(\Omega) = \{(f, \mathbf{g}) \mid f \in W_q^\ell(\Omega), \mathbf{g} \in W_q^m(\Omega)\}.$$

**定理 2.**  $2 < p < \infty$ ,  $N < q < \infty$ ,  $R > 0$ ,  $\Omega$  を一様  $W_q^{3-1/q}$  領域とする。  $\rho_*$  を正定数、 $P(\rho)$  は  $\rho > 0$  について  $C^\infty$  関数で、ある正定数  $\rho_1, \rho_2$ , 任意の  $\rho \in (\rho_*/4, 4\rho_*)$  に対し  $\rho_1 < P(\rho) < \rho_2$  を満たすとする。このとき、 $R$  に依存するある  $T$  が存在して

$$\begin{aligned} \|\theta_0\|_{W_q^1(\Omega)} + \|\mathbf{u}_0\|_{B_{q,p}^{2(1-1/p)}(\Omega)} &\leq R \\ \rho_*/2 < \rho_* + \theta_0(x) < 2\rho_* &\quad (x \in \Omega) \end{aligned}$$

を満たす任意の初期値

$(\theta_0, \mathbf{u}_0) \in (W_q^{1,0}(\Omega), \mathcal{D}_q(\Omega))_{1-1/p,p}$  に対し、(2) の一意解が次のクラスで存在する。

$$\begin{aligned} \rho &\in W_p^1(J_T, L_q(\Omega)) \times L_p(J_T, W_q^1(\Omega)), \\ \mathbf{u} &\in W_p^1(J_T, L_q(\Omega)) \times L_p(J_T, W_q^2(\Omega)). \end{aligned}$$

ここで、 $B_{q,p}^{2(1-1/p)}(\Omega) = (L_q(\Omega), \mathcal{D}_q(\Omega))_{1-1/p,p}$ .

時間大域的適切性について述べるためにまず、rigid space を導入する。

$$\mathcal{R}_d = \{\mathbf{p} \mid \mathbf{D}(\mathbf{p}) = 0 \text{ in } \Omega, \mathbf{p} \cdot \mathbf{n} = 0 \text{ on } \Gamma\}.$$

$\{\mathbf{p}_\ell\}_{\ell=1}^M$  を  $\mathcal{R}_d$  の正規直交基底とする.

**定理 3.**  $2 < p < \infty$ ,  $N < q < \infty$ ,  $\Omega$  を有界な一様  $W_q^{4-1/q}$  領域, 粘性係数  $\alpha, \beta$  は次を満たすとする.

$$\alpha > 0, \quad \beta > \frac{N-2}{N}\alpha.$$

さらに, 初期値  $(\theta_0, \mathbf{u}_0) \in (W_q^{1,0}(\Omega), \mathcal{D}_q(\Omega))_{1-1/p,p}$  に対し次を仮定する. ある  $\epsilon > 0$  が存在し,

*smallness condition:*

$$\|\theta_0\|_{W_q^1(\Omega)} + \|\mathbf{u}_0\|_{B_{d,p}^{2(1-1/p)}(\Omega)} \leq \epsilon,$$

*orthogonal conditions:*

$$\begin{cases} (\theta_0, 1)_\Omega = 0, & ((\rho_* + \theta_0)\mathbf{u}_0, \mathbf{p}_\ell)_\Omega = 0 \quad (\ell = 1, \dots, M) \\ \text{if } \Omega \text{ is rotationally symmetric,} \\ (\theta_0, 1)_\Omega = 0 \\ \text{if } \Omega \text{ is not rotationally symmetric.} \end{cases}$$

このとき, (2) は一意解を次のクラスでもつ.

$$\begin{aligned} \rho &\in W_p^1(J_\infty, L_q(\Omega)) \times L_p(J_\infty, W_q^1(\Omega)), \\ \mathbf{u} &\in W_p^1(J_\infty, L_q(\Omega)) \times L_p(J_\infty, W_q^2(\Omega)). \end{aligned}$$

さらに, 正定数  $\gamma$  が存在し, 次の評価が成り立つ.

$$\begin{aligned} &\|e^{\gamma t} \partial_t \rho\|_{L_p(J_\infty, L_q(\Omega))} + \|e^{\gamma t} \rho\|_{L_p(J_\infty, W_q^1(\Omega))} \\ &+ \|e^{\gamma t} \partial_t \mathbf{u}\|_{L_p(J_\infty, L_q(\Omega))} + \|e^{\gamma t} \mathbf{u}\|_{L_p(J_\infty, W_q^2(\Omega))} \leq C\epsilon. \end{aligned}$$

### 2.3 証明の概略

まずレゾルベント問題 (4) に対する解作用素の  $\mathcal{R}$  有界性を示す. 領域が全空間または半空間の場合は部分フーリエ変換を用いレゾルベント問題の解表示を行い, 一般領域においては境界近傍を半空間からの摂動, 境界から離れた部分を全空間として捉え, 半空間と全空間における解を cut-off 関数でつなぎ合わせるにより  $\mathcal{R}$  有界な解作用素の存在を得ることができる. 以下, 簡単のため  $\lambda$  が十分大きい場合のみ考える.

**定理 4.**  $1 < p < \infty$ ,  $N < q < \infty$ ,  $0 < \epsilon < \pi/2$ ,  $\Omega$  を一様  $W_q^{3-1/q}$  領域,

$$\begin{aligned} X_q(\Omega) &= \{(f, \mathbf{g}, \mathbf{h}, h) \mid f \in W_q^1(\Omega), \mathbf{g} \in L_q(\Omega), \\ &\quad \mathbf{h} \in W_q^1(\Omega), h \in W_q^2(\Omega)\}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{X}_q(\Omega) &= \{F = (F_1, \dots, F_7) \mid F_1 \in W_q^1(\Omega), F_5 \in L_q(\Omega), \\ &\quad F_2, F_3, F_6 \in L_q(\Omega), F_4, F_7 \in L_q(\Omega)\} \end{aligned}$$

とする. このとき,  $\lambda_0 \geq 1$  と作用素の族  $R(\lambda) \in \text{Hol}(\Lambda_{\epsilon, \lambda_0}, \mathcal{L}(\mathcal{X}_q(\Omega), W_q^{1,2}(\Omega)))$  が存在し, 任意の  $\lambda \in \Lambda_{\epsilon, \lambda_0}$ ,  $(f, \mathbf{g}, \mathbf{h}, h) \in X_q(\Omega)$  に対し  $(\rho, \mathbf{u}) = R(\lambda)(f, \mathbf{g}, \lambda^{1/2}\mathbf{h}, \nabla\mathbf{h}, \lambda h, \lambda^{1/2}h, \nabla^2 h)$  は方程式 (4) の

一意解を与え, さらに作用素  $R(\lambda)$  は次の評価を満たす.

$$\begin{aligned} \mathcal{R}_{\mathcal{L}_1}(\{(\tau\partial_\tau)^\ell(\lambda R(\lambda)) \mid \lambda \in \Lambda_{\epsilon, \lambda_0}\}) &\leq C, \\ \mathcal{R}_{\mathcal{L}_1}(\{(\tau\partial_\tau)^\ell(\gamma R(\lambda)) \mid \lambda \in \Lambda_{\epsilon, \lambda_0}\}) &\leq C, \\ \mathcal{R}_{\mathcal{L}_2}(\{(\tau\partial_\tau)^\ell(\lambda^{1/2}\nabla P_v R(\lambda)) \mid \lambda \in \Lambda_{\epsilon, \lambda_0}\}) &\leq C, \\ \mathcal{R}_{\mathcal{L}_2}(\{(\tau\partial_\tau)^\ell(\nabla^2 P_v R(\lambda)) \mid \lambda \in \Lambda_{\epsilon, \lambda_0}\}) &\leq C. \end{aligned}$$

ここで,  $\mathcal{L}_1 = \mathcal{L}(\mathcal{X}_q(\Omega), W_q^{1,0}(\Omega))$ ,  $\mathcal{L}_2 = \mathcal{L}(\mathcal{X}_q(\Omega), L_q(\Omega))$ ,  $\lambda = \sigma + i\tau$ ,  $\ell = 0, 1$ ,  $P_v R(\lambda)(f, \mathbf{g}, \lambda^{1/2}\mathbf{h}, \nabla\mathbf{h}, \lambda h, \lambda^{1/2}h, \nabla^2 h) = \mathbf{u}$ ,  $\Lambda_{\epsilon, \lambda_0} = \Sigma_{\epsilon, \lambda_0} \cap K_\epsilon$ ,  $\gamma = \sup_{x \in \bar{\Omega}} \gamma_1(x)\gamma_2(x)$ ,

$$\begin{aligned} \Sigma_{\epsilon, \lambda_0} &= \{\lambda \in \mathbb{C} \mid |\lambda| \geq \lambda_0, |\arg \lambda| \leq \pi - \epsilon\}, \\ K_\epsilon &= \{\lambda \in \mathbb{C} \mid \\ &\quad (\lambda + \frac{\gamma}{\alpha + \beta} + \epsilon)^2 + (\text{Im } \lambda)^2 \geq (\frac{\gamma}{\alpha + \beta} + \epsilon)^2\}. \end{aligned}$$

証明. 領域  $\Omega$  が全空間, 半空間, 摂動半空間, 一般領域の場合の順に考えていくが, 摂動半空間と一般領域については perturbation method により示すことができるので, ここでは全空間と半空間の場合のみを扱う. レゾルベント問題 (4) の第一式より,  $\lambda \neq 0$  とすれば  $\rho = \lambda^{-1}(f - \gamma_2(x)\text{div } \mathbf{u})$  であるので, これを (4) の第二式に代入すれば,

$$\begin{aligned} \lambda \mathbf{u} - \gamma_0^{-1} \text{Div } \mathbf{S}(\mathbf{u}) - \lambda^{-1} \gamma_0^{-1} \nabla(\gamma_1 \gamma_2 \text{div } \mathbf{u}) \\ = \mathbf{g} - \lambda^{-1} \gamma_0^{-1} \nabla(\gamma_1 f) =: \mathbf{f} \end{aligned}$$

が得られる. よって, 次の方程式が得られる.

$$\begin{cases} \lambda \mathbf{u} - \gamma_0^{-1} \text{Div } \mathbf{S}(\mathbf{u}) - \lambda^{-1} \gamma_0^{-1} \nabla(\gamma_3 \text{div } \mathbf{u}) = \mathbf{f} & \text{in } \Omega, \\ \alpha[\mathbf{D}(\mathbf{u})\mathbf{n} - \langle \mathbf{D}(\mathbf{u})\mathbf{n}, \mathbf{n} \rangle \mathbf{n}] = \mathbf{h} - \langle \mathbf{h}, \mathbf{n} \rangle \mathbf{n} & \text{on } \Gamma, \\ \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = h & \text{on } \Gamma. \end{cases} \quad (5)$$

ただし,  $\gamma_3 = \gamma_1 \gamma_2$ . 変数係数をもつ (5) は定数係数からの摂動として扱うことができるので, 全空間と半空間では  $\gamma_0, \gamma_3$  は正定数として考えれば十分である. 従って, 次のレゾルベント問題を考察する.

$$\begin{cases} \gamma_0 \lambda \mathbf{u} - \alpha \Delta \mathbf{u} - (\beta + \gamma_3 \lambda^{-1}) \nabla \text{div } \mathbf{u} = \mathbf{f} & \text{in } \Omega, \\ \alpha[\mathbf{D}(\mathbf{u})\mathbf{n} - \langle \mathbf{D}(\mathbf{u})\mathbf{n}, \mathbf{n} \rangle \mathbf{n}] = \mathbf{h} - \langle \mathbf{h}, \mathbf{n} \rangle \mathbf{n} & \text{on } \Gamma, \\ \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = h & \text{on } \Gamma. \end{cases} \quad (6)$$

(i) 全空間の場合

(6) の解表示は Fourier 変換と Fourier 逆変換により

$$\begin{aligned} u_j &= \frac{1}{\alpha} \sum_{k=1}^N \mathcal{F}_\xi^{-1} \left[ \frac{\delta_{jk} - \xi_j \xi_k |\xi|^{-2}}{\alpha^{-1} \gamma_0 \lambda + |\xi|^2} \hat{f}_k \right] (x) \\ &\quad + \frac{1}{\alpha + \beta + \gamma_3 \lambda^{-1}} \sum_{k=1}^N \mathcal{F}_\xi^{-1} \left[ \frac{\xi_j \xi_k |\xi|^{-2}}{(\alpha + \beta + \gamma_3 \lambda^{-1})^{-1} \gamma_0 \lambda + |\xi|^2} \hat{f}_k \right] (x) \end{aligned} \quad (7)$$

となる。定理 4 を示すために次の定理を用いた。

**定理 5.**  $1 < q < \infty$ ,  $\Lambda$  を  $\mathbb{C}$  の集合とする。  $m(\lambda, \xi)$  は  $\Lambda \times \mathbb{R}^N \setminus \{0\}$  上の関数で、任意の多重指数  $\alpha \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$ ,  $(\lambda, \xi) \in \Lambda \times (\mathbb{R}^N \setminus \{0\})$  に対し、

$$|D_\xi^\alpha k(\lambda, \xi)| \leq C_\alpha |\xi|^{-|\alpha|}$$

を満たすとする。このとき、作用素  $K_\lambda$  を

$$[K_\lambda f](x) = \mathcal{F}_\xi^{-1}[m(\lambda, \xi)\hat{f}(\xi)](x)$$

で定義すれば、

$$\mathcal{R}_{\mathcal{L}(L_q(\mathbb{R}^N))}(\{K_\lambda \mid \lambda \in \Lambda\}) \leq C_{q,N} \max_{|\alpha| \leq N+1} C_\alpha.$$

(7) の kernel は定理 5 の仮定を満たすので、定理 4 が得られる。

(ii) 半空間の場合

領域  $\Omega$  が半空間のとき、単位外法線ベクトル  $\mathbf{n}$  は  $\mathbf{n} = (0, \dots, 0, -1)$  であるので、(6) は次で表される。

$$\begin{cases} \gamma_0 \lambda \mathbf{u} - \alpha \Delta \mathbf{u} - (\beta + \gamma_3 \lambda^{-1}) \nabla \operatorname{div} \mathbf{u} = \mathbf{f} & \text{in } \mathbb{R}_+^N, \\ \alpha(\partial_N u_j + \partial_j u_N) = -h_j, \quad u_N = -h & \text{on } \mathbb{R}_0^N. \end{cases} \quad (8)$$

ここで、 $j = 1, \dots, N-1$ 。簡単のため、 $h = 0$  として示す。全空間へ拡張した解の第  $N$  成分が 0 となるように  $\mathbf{f}$  を  $\mathbf{F} = (f_1^e, \dots, f_{N-1}^e, f_N^e)$  で拡張する。ここで、

$$f_j^e(x) = \begin{cases} f_j(x) & (x_N > 0), \\ f_j(x', -x_N) & (x_N < 0). \end{cases}$$

$$f_N^e(x) = \begin{cases} f_N(x) & (x_N > 0), \\ -f_N(x', -x_N) & (x_N < 0). \end{cases}$$

ここで、 $x' = x_1, \dots, x_{N-1}$ 。全空間での結果により次を満たす  $\mathbf{U}$  が存在する。

$$\begin{cases} \gamma_0 \lambda \mathbf{U} - \alpha \Delta \mathbf{U} - (\beta + \gamma_3 \lambda^{-1}) \nabla \operatorname{div} \mathbf{U} = \mathbf{F} & \text{in } \mathbb{R}_+^N, \\ U_N = 0 & \text{on } \mathbb{R}_0^N. \end{cases}$$

$\mathbf{u} = \mathbf{U} + \mathbf{v}$  とおくと、 $\mathbf{v}$  が満たす補正方程式は次のようになる。

$$\begin{cases} \gamma_0 \lambda \mathbf{v} - \alpha \Delta \mathbf{v} - (\beta + \gamma_3 \lambda^{-1}) \nabla \operatorname{div} \mathbf{v} = 0 & \text{in } \mathbb{R}_+^N, \\ \alpha(D_N v_j + D_j v_N) = -h_j, \quad v_N = 0 & \text{on } \mathbb{R}_0^N. \end{cases}$$

ただし、 $h_j + \alpha(D_N U_j + D_j U_N)$  を改めて  $h_j$  とした。  $\mathbf{U}$  については全空間の結果から  $\mathcal{R}$  有界な解作用素の存在が示されているので、 $\mathbf{v}$  についてのみ解表示を行い、 $\mathcal{R}$  有界な解作用素の存在を示せばよい。以下、 $v_N$  についても同様に示されるので、特に  $v_j (j = 1, \dots, N-1)$  についてのみ考えることにする。部分 Fourier 変換と部分

Fourier 逆変換により

$$\begin{aligned} u_j(x) &= \frac{1}{\alpha^2} \int_0^\infty \mathcal{F}_{\xi'}^{-1} \left[ \frac{\lambda^{1/2}}{B^3} B e^{-B(x_N + y_N)} \mathcal{F}_{x'}[\lambda^{1/2} h_j](\xi', y_N) \right] (x') dy_N \\ &\quad - \sum_{k=1}^{N-1} \frac{1}{\alpha} \int_0^\infty \mathcal{F}_{\xi'}^{-1} \left[ \frac{i \xi_k}{B^3} B e^{-B(x_N + y_N)} \mathcal{F}_{x'}[\partial_k h_j](\xi', y_N) \right] (x') dy_N \\ &\quad - \frac{1}{\alpha} \int_0^\infty \mathcal{F}_{\xi'}^{-1} \left[ \frac{1}{B^2} B e^{-B(x_N + y_N)} \mathcal{F}_{x'}[\partial_N h_j](\xi', y_N) \right] (x') dy_N \\ &\quad + \frac{\beta}{\alpha(\alpha + \beta + \lambda^{-1})} \sum_{k=1}^{N-1} \left\{ \int_0^\infty \mathcal{F}_{\xi'}^{-1} \left[ \frac{(i \xi_j)(i \xi_k)}{A(A+B)B^2} B^2 M(x_N + y_N) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \mathcal{F}_{x'}[\partial_N h_k](\xi', y_N) \right] (x') dy_N \right. \\ &\quad - \int_0^\infty \mathcal{F}_{\xi'}^{-1} \left[ \frac{(i \xi_j)(i \xi_k)}{A(A+B)B^2} B e^{-B(x_N + y_N)} \mathcal{F}_{x'}[\partial_N h_k](\xi', y_N) \right] (x') dy_N \\ &\quad \left. - \int_0^\infty \mathcal{F}_{\xi'}^{-1} \left[ \frac{i \xi_k}{(A+B)B^2} B^2 M(x_N + y_N) \mathcal{F}_{x'}[\partial_j h_k](\xi', y_N) \right] (x') dy_N \right\} \quad (9) \end{aligned}$$

ここで、 $A = \sqrt{(\alpha + \beta + \gamma_3 \lambda^{-1})^{-1} \gamma_0 \lambda + |\xi'|^2}$ ,  $B = \sqrt{\alpha^{-1} \gamma_0 \lambda + |\xi'|^2}$ ,  $M(x_N) = \frac{e^{-B x_N} - e^{-A x_N}}{B - A}$ 。定理 4 を示すために、次の定理を用いた。

**定理 6.**  $0 < \varepsilon < \pi/2$ ,  $1 < q < \infty$ ,  $\lambda_0 > 0$  とし、 $m(\lambda, \xi')$  は  $\Lambda_{\varepsilon, \lambda_0} \times \mathbb{R}^{N-1} \setminus \{0\}$  上の関数で、任意の多重指数  $\alpha' \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$ ,  $(\lambda, \xi') \in \Lambda_{\varepsilon, \lambda_0} \times (\mathbb{R}^{N-1} \setminus \{0\})$  に対し、

$$|D_{\xi'}^{\alpha'} (\tau \frac{d}{d\tau})^\ell m(\lambda, \xi')| \leq C_{\alpha'} (|\lambda|^{1/2} + |\xi'|)^{-2-|\alpha'|}$$

を満たす。このとき、作用素  $K_i(\lambda)$  を

$$[K_1(\lambda)f](x) = \int_0^\infty \mathcal{F}_{\xi'}^{-1} [m(\lambda, \xi') B e^{-B(x_N + y_N)} \hat{f}(\xi', y_N)] (x') dy_N,$$

$$[K_2(\lambda)f](x) = \int_0^\infty \mathcal{F}_{\xi'}^{-1} [m(\lambda, \xi') B^2 M(x_N + y_N) \hat{f}(\xi', y_N)] (x') dy_N$$

で定義すれば、

$$\mathcal{R}_{\mathcal{L}(L_q(\mathbb{R}_+^N))} \left( \left\{ (\tau \frac{d}{d\tau})^\ell (G_\lambda K_i(\lambda)) \mid \lambda \in \Lambda_{\varepsilon, \lambda_0} \right\} \right) \leq C.$$

ただし、 $G_\lambda \mathbf{u} = (\lambda \mathbf{u}, \lambda^{1/2} \nabla \mathbf{u}, \nabla^2 \mathbf{u})$ ,  $\ell = 0, 1, i = 1, 2$ 。

(9) の kernel は定理 6 の仮定を満たすので、半空間の場合にも定理 4 が示される。  $\square$

$\mathcal{R}$  有界性の定義から作用素の族が  $\mathcal{R}$  有界ならば一様有界であるので、レゾルベント評価を得ることができる。これより  $W_q^{1,0}(\Omega)$  上で線形化問題に対する解析半群が生成されることが分かる。さらに  $\mathcal{R}$  有界な解作用素の存在により定理 1 を適用でき線形化問題 (3) に対し次の  $L_p$ - $L_q$  最大正則性を得る。

定理 7.  $1 < p < \infty$ ,  $N < q < \infty$ ,  $\Omega$  を一様  $W_q^{3-1/q}$  領域とする. このとき, ある  $\gamma_0$  が存在して任意の初期値  $(\theta_0, \mathbf{u}_0) \in (W_q^{1,0}(\Omega), \mathcal{D}_q(\Omega))_{1-1/p,p}$  と  $e^{-\gamma_0 t} f \in L_p(\mathbb{R}, W_q^1(\Omega))$ ,  $e^{-\gamma_0 t} \mathbf{g} \in L_p(\mathbb{R}, L_q(\Omega))$ ,  $e^{-\gamma_0 t} \mathbf{h} \in L_p(\mathbb{R}, W_q^1(\Omega))$ ,  $e^{-\gamma_0 t} \Lambda_\gamma^{1/2} \mathbf{h} \in L_p(\mathbb{R}, L_q(\Omega))$ ,  $e^{-\gamma_0 t} h \in L_p(\mathbb{R}, W_q^2(\Omega)) \cap W_p^1(\mathbb{R}, L_q(\Omega))$  に対し, (3) は一意解を次のクラスでもつ.

$$\begin{aligned} \rho &\in W_p^1(J_\infty, W_q^1(\Omega)), \\ \mathbf{u} &\in W_p^1(J_\infty, L_q(\Omega)) \cap L_p(J_\infty, W_q^2(\Omega)). \end{aligned}$$

さらに, 任意の  $\gamma \geq \gamma_0$  に対し次の評価を満たす.

$$\begin{aligned} &\|e^{-\gamma t}(\gamma\rho, \rho_t)\|_{L_p(J_\infty, W_q^1(\Omega))} + \|e^{-\gamma t}(\gamma\mathbf{u}, \mathbf{u}_t)\|_{L_p(J_\infty, L_q(\Omega))} \\ &\quad + \|e^{-\gamma t}\mathbf{u}\|_{L_p(J_\infty, W_q^2(\Omega))} \\ &\leq C(\|\theta_0\|_{W_q^1(\Omega)} + \|\mathbf{u}_0\|_{(L_q(\Omega), W_q^2(\Omega))_{1-1/p,p}} \\ &\quad + \|e^{-\gamma t}(f, \mathbf{g})\|_{L_p(\mathbb{R}, W_q^{1,0}(\Omega))} \\ &\quad + \|e^{-\gamma t}(\nabla\mathbf{h}, \Lambda_\gamma^{1/2}\mathbf{h})\|_{L_p(\mathbb{R}, L_q(\Omega))} \\ &\quad + \|e^{-\gamma t}h\|_{W_p^1(\mathbb{R}, L_q(\Omega))} + \|e^{-\gamma t}h\|_{L_p(\mathbb{R}, W_q^2(\Omega))}. \end{aligned}$$

ただし,  $f = h = 0$ ,  $\mathbf{g} = \mathbf{h} = 0$  ( $t < 0$ ),  $\Lambda_\gamma^{1/2}\mathbf{h}(t) = \mathcal{L}^{-1}[\lambda^{1/2}\mathcal{L}[\mathbf{h}](\lambda)](t)$  とする.

定理 7 の最大正則性に関する評価式と縮小写像の原理により定理 2 を得ることができる.

また, 領域  $\Omega$  が有界であるとき, 線形化問題 (3) に対する次の解の指数減衰評価を用い, 定理 2 で得た時間局所解を時間について延長することにより, 定理 3 を得ることができる.

定理 8.  $1 < p < \infty$ ,  $N < q < \infty$ ,  $T > 0$ ,  $\Omega$  を有界な一様  $W_q^{3-1/q}$  領域とする. このとき, ある  $\gamma_1$  が存在して次の整合条件を満たす任意の初期値  $\theta_0 \in W_q^1(\Omega)$ ,  $\mathbf{u}_0 \in B_{q,p}^{2(1-1/p)}(\Omega)$ ,

$$\begin{aligned} \mathbf{D}(\mathbf{u}_0)\mathbf{n} - \langle \mathbf{D}(\mathbf{u}_0)\mathbf{n}, \mathbf{n} \rangle \mathbf{n} &= \mathbf{h}|_{t=0} - \langle \mathbf{h}|_{t=0}, \mathbf{n} \rangle \mathbf{n}, \\ \mathbf{u}_0 \cdot \mathbf{n} &= h|_{t=0} \quad \text{on } \Gamma, \end{aligned}$$

任意の  $f \in L_p(J_T, W_q^1(\Omega))$ ,  $\mathbf{g} \in L_p(J_T, L_q(\Omega))$ ,  $\mathbf{h} \in L_p(J_T, W_q^1(\Omega)) \cap W_p^1(J_T, \mathbf{W}_q^{-1}(\Omega))$ ,  $h \in L_p(J_T, W_q^2(\Omega)) \cap W_p^1(J_T, L_q(\Omega))$  に対し, (3) は一意解を次のクラスでもつ.

$$\begin{aligned} \rho &\in W_p^1(J_T, W_q^1(\Omega)), \\ \mathbf{u} &\in W_p^1(J_T, L_q(\Omega)) \times L_p(J_T, W_q^2(\Omega)). \end{aligned}$$

さらに, 任意の  $\gamma \in (0, \gamma_1)$ ,  $t \in (0, T]$  に対し次の評価を

満たす.

$$\begin{aligned} &\|e^{\gamma s}\rho\|_{W_p^1(J_t, W_q^1(\Omega))} + \|e^{\gamma s}\partial_s\mathbf{u}\|_{L_p(J_t, L_q(\Omega))} \\ &\quad + \|e^{\gamma s}\mathbf{u}\|_{L_p(J_t, W_q^2(\Omega))} \\ &\leq C_\gamma \left\{ \|\theta_0\|_{W_q^1(\Omega)} + \|\mathbf{u}_0\|_{B_{q,p}^{2(1-1/p)}(\Omega)} \right. \\ &\quad + \|e^{\gamma s}(f, \mathbf{g})\|_{L_p(J_t, W_q^{1,0}(\Omega))} + \|e^{\gamma s}\mathbf{h}\|_{L_p(J_t, W_q^1(\Omega))} \\ &\quad + \|e^{\gamma s}\partial_s\mathbf{h}\|_{L_p(J_t, \mathbf{W}_q^{-1}(\mathbb{R}^N))} + \|e^{\gamma s}h\|_{L_p(J_t, W_q^2(\Omega))} \\ &\quad + \|e^{\gamma s}h\|_{W_p^1(J_t, L_q(\Omega))} + \left( \int_0^t (e^{\gamma s}|\langle \theta(\cdot, s), 1 \rangle_\Omega|^p ds) \right)^{1/p} \\ &\quad \left. + \delta(\Omega) \sum_{\ell=1}^M \left( \int_0^t (e^{\gamma s}|\langle \mathbf{v}(\cdot, s), \mathbf{p}_\ell \rangle_\Omega|^p ds) \right)^{1/p} \right\}. \end{aligned}$$

ここで,  $\delta(\Omega)$  は  $\delta(\Omega) = 1$  (if  $\Omega$  is rotationally symmetric),  $\delta(\Omega) = 0$  (if  $\Omega$  is not rotationally symmetric),  $W_q^{-1}(\mathbb{R}^N)$  は  $W_q^1(\mathbb{R}^N)$  の双対空間とし

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_q^{-1}(\Omega) &= \{f \in L_{1,\text{loc}}(\Omega) \mid \\ &\quad \|f\|_{\mathbf{W}_q^{-1}(\Omega)} = \|\iota f\|_{W_q^{-1}(\mathbb{R}^N)} < \infty\}, \end{aligned}$$

作用素  $\iota$  は,  $L_{1,\text{loc}}(\Omega)$  から  $L_{1,\text{loc}}(\mathbb{R}^N)$  への拡張とする.

### 3. 圧縮性流体と剛体の連成問題

#### 3.1 導入

3次元全空間上に広がる圧縮性流体中に回転や平行移動する剛体がある場合の流体と剛体, 双方の運動について考察した. 流体の運動は圧縮性 Navier-Stokes 方程式, 剛体の運動は線形運動量と角運動量のバランスを表す常微分方程式, 境界条件は, 剛体が動くときに流体との間に真空ができないことを仮定するため, 剛体の速度と流体の速度のつり合いを表す式とし, これらを連立した以下の連立方程式系を扱った. これを連成問題と呼ぶことにする. 剛体は有界領域  $\mathcal{B}(t)$  で表すものとし, 流体が占める領域は外部領域  $\mathcal{D}(t) = \mathbb{R}^3 \setminus \overline{\mathcal{B}(t)}$ , その境界を  $\Gamma(t)$ , 初期領域を  $\mathcal{D} = \mathcal{D}(0)$  とする.

$$\begin{cases} \partial_t \varrho + \operatorname{div}(\varrho \mathbf{u}) = 0 & \text{in } \mathcal{D}(t) \times J_T, \\ \varrho(\partial_t \mathbf{u} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}) - \operatorname{Div} \mathbf{T}(\mathbf{u}, P) = 0 & \text{in } \mathcal{D}(t) \times J_T, \\ \mathbf{u}(t, x) = \eta(t) + \omega(t) \times (x - x_c(t)) & \text{on } \Gamma(t) \times J_T, \\ m\eta'(t) - \int_{\Gamma(t)} \mathbf{T}(\mathbf{u}, P)\mathbf{n}(t, x) d\sigma = \mathbf{F}(t) & t \in J_T, \\ (J\omega)'(t) & \\ - \int_{\Gamma(t)} (x - x_c) \times \mathbf{T}(\mathbf{u}, P)\mathbf{n}(t, x) d\sigma = \mathbf{M}(t) & t \in J_T, \\ (\rho, \mathbf{u})|_{t=0} = (\rho_0, \mathbf{u}_0) & \text{in } \mathcal{D}, \\ (\eta, \omega)|_{t=0} = (\eta_0, \omega_0). & \end{cases} \quad (10)$$

ここで,  $\mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3)$ ,  $\rho, P$  は先に定義したものと同様,  $\eta, \omega$  はそれぞれ重心  $x_c(t)$  の速度, 角速度を表す未知関数,  $\mathbf{T}(\mathbf{u}, P) = \alpha \mathbf{D}(\mathbf{u}) + (\beta - \alpha) \operatorname{div} \mathbf{u} \mathbf{I} - P(\rho) \mathbf{I}$ ,  $m$  は剛体の質量を表す正定数,  $J(t)$  は慣性モーメント,  $\mathbf{F}, \mathbf{M}$  はそれぞれ既知の外力とトルクを表す. この問題の先行研

究として, [1] は初期値が<sup>3</sup>  $(\rho_0 - \bar{\rho}, \mathbf{u}_0) \in H^3(\mathcal{D}) \times H^3(\mathcal{D})$  (ここで,  $\bar{\rho}$  は  $\rho_0$  の平均値を表す正定数), かつ整合条件  $\partial_t^i \mathbf{u}|_{t=0} = \partial_t^i (\eta + \omega \times (x - x_c))|_{t=0}$  ( $i = 0, 1$ ) を満たすとき  $L_2$ - $L_2$  枠で時間局所的適切性と時間大域的適切性を得ている.

### 3.2 主定理

(10) に対し, 次の  $L_p$ - $L_q$  枠における時間局所的適切性を得た.

**定理 9.**  $1 < p < \infty, 3 < q < \infty, R > 0$  とし,  $\mathcal{D} \subset \mathbb{R}^3$  を  $C^{2,1}$  級の境界をもつ外部領域とする.  $\mathbf{F}, \mathbf{M} \in L_p(J_T, \mathbb{R}^3)$  とし, 初期値  $(\rho_0 - \bar{\rho}, \mathbf{u}_0) \in \mathcal{D}_q(\mathcal{D})$ ,  $\eta_0, \omega_0 \in \mathbb{R}^3$  は  $\|\rho_0 - \bar{\rho}\|_{W_q^1(\mathcal{D})} + \|\mathbf{u}_0\|_{B_{3,p}^{2(1-1/p)}(\mathcal{D})} + |\eta_0| + |\omega_0| \leq R$  を満たすとする. このとき,  $R$  に依存する  $T > 0$  が存在し (10) は次のクラスの一意解をもつ.

$$(\eta, \omega) \in W_q^1(J_T, \mathbb{R}^6),$$

$$\rho \in W_p^1(J_T, L_q(\mathcal{D}(\cdot))) \cap L_p(J_T, W_q^1(\mathcal{D}(\cdot))),$$

$$\mathbf{u} \in W_p^1(J_T, L_q(\mathcal{D}(\cdot))) \cap L_p(J_T, W_q^2(\mathcal{D}(\cdot))),$$

ここで,  $\mathcal{D}_q(\mathcal{D}) = \{(\rho_0 - \bar{\rho}, \mathbf{u}_0) \in W_q^{1,2}(\mathcal{D}) \mid \mathbf{u}_0 = \eta_0 + \omega_0 \times x \text{ for } \eta_0, \omega_0 \in \mathbb{R}^3\}$  とする.

### 3.3 証明の概略

スリップ境界条件の場合と同様, 線形化問題に対し  $L_p$ - $L_q$  最大正則性を証明し, 縮小写像の原理により定理 9 を得る. 線形化問題を得る手順は (10) を固定領域  $\mathcal{D} \times (0, T)$  に変換し, 次にラグランジュ座標上の問題に変換する. これについて詳細を述べる.  $m(t)$  を次を満たす交代行列とする:

$$m(t)x = \omega(t) \times x.$$

まず次の微分方程式を考える.

$$\begin{cases} \partial_t X_0(t, y) = m(t)(X_0(t, y) - x_c(t)) + \eta(t), & \mathbb{R}^3 \times (0, T), \\ X_0(0, y) = y, & y \in \mathbb{R}^3. \end{cases} \quad (11)$$

$\eta, \omega \in W_p^1(0, T)$  であれば, (11) の解はある行列  $Q(t) \in SO(3)$  を用い  $X_0(t, y) = Q(t)y + x_c(t)$  と表せる. ここで  $Q \in W_p^2((0, T), \mathbb{R}^{3 \times 3})$ .  $X_0(t)$  の逆写像  $Y_0(t)$  は

$$Y_0(t, x) = Q^T(t)(x - x_c(t))$$

で与えられ, 以下の微分方程式を満たす.

$$\begin{cases} \partial_t Y_0(t, x) = -M(t)Y_0(t, x) - \xi(t), & \mathbb{R}^3 \times (0, T), \\ Y_0(0, x) = x, & x \in \mathbb{R}^3. \end{cases}$$

ここで

$$M(t) = Q^T(t)m(t)Q(t), \quad \xi(t) = Q^T(t)\eta(t).$$

とした. 次に, 回転, 平行移動する剛体の近傍でのみ  $X_0, Y_0$  と一致するような微分同相写像を構成する. そこで

$X_0$  に対応する新しい写像を  $X$  とし, 次の方程式を考える.

$$\begin{cases} \partial_t X(t, y) = b(t, X(t, y)), & \mathbb{R}^3 \times (0, T), \\ X(0, y) = y, & y \in \mathbb{R}^3. \end{cases} \quad (12)$$

ここで,  $b$  は次のように定義する:  $\bar{B} \subset B_1 \subset \bar{B}_1 \subset B_2$  を満たす開球  $B_1, B_2 \subset \mathbb{R}^3$  をとり cut-off 関数

$$\chi(y) = \begin{cases} 1 & \text{if } y \in \bar{B}_1, \\ 0 & \text{if } y \in \mathcal{D} \setminus B_2, \end{cases}$$

に対し  $b: [0, T] \times \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$

$$b(t, x) = \chi(x - x_c(t))[m(t)(x - x_c(t)) + \eta(t)]$$

とする. これより,  $b \in W_p^1(J_T, C_0^\infty(\mathbb{R}^3))$ ,  $b|_\Gamma = m(x - x_c) + \eta$  を得る.

Picard-Lindelöf の定理より, 既知の  $\eta, \omega \in W_p^1(J_T)$  に対し, (12) は一意解  $X \in C^1(J_T, C^\infty(\mathbb{R}^3))$  をもつ.  $X$  のヤコビ行列  $J_X$  の成分は

$$(J_X)_{ij} = \delta_{ij} + \int_0^t \frac{\partial b_i}{\partial y_j} ds$$

で表され,  $T > 0$  が十分小さければ次を満たす十分小さい正定数  $c$  が存在する:

$$\max_{i,j=1,2,3} \left\| \int_0^t (\partial b_i / \partial y_j)(s, \cdot) ds \right\|_{L^\infty(\mathbb{R}^3)} < c \text{ for } t \in (0, T).$$

これより,  $J_X$  の逆行列の存在が示されるので  $X$  の逆写像  $Y$  は次の方程式を満たすことがわかる.

$$\begin{cases} \partial_t Y(t, x) = b^{(Y)}(t, Y(t, x)), & (0, T) \times \mathbb{R}^3, \\ Y(0, x) = x, & x \in \mathbb{R}^3. \end{cases}$$

ここで,

$$b^{(Y)}(t, y) = -J_X^{-1}(t, y)b(t, X(t, y)).$$

これらの考察から,  $X \equiv X_0, Y \equiv Y_0$  in  $B_1, X \equiv Y$  in  $\mathcal{D} \setminus B_2$  を得るので, 目標とする微分同相な写像を構成することができる.

この変換を用い (10) を書き換える. 圧縮性の効果が現れる (10) の第一式について述べることにする.  $\tilde{\mathbf{u}}(t, y) = \mathbf{u}(t, X(t, y))$ ,  $\tau(t, y) = \rho(t, X(t, y)) - \bar{\rho}$ ,  $\kappa(t) = Q^T(t)\eta(t)$ ,  $\Omega(t) = Q^T(t)\omega(t)$  とおけば

$$\partial_t \tau + ((\nabla X)^{-1}(\tilde{\mathbf{u}} - \partial_t X)) \cdot \nabla \tau + \bar{\rho} \operatorname{div} \tilde{\mathbf{u}} = F_0(\tilde{\mathbf{u}}, \tau, \kappa, \Omega).$$

ここで,  $F_0(\tilde{\mathbf{u}}, \tau, \kappa, \Omega) = \bar{\rho} \operatorname{tr}(\nabla \tilde{\mathbf{u}}(\mathbf{I} - \nabla X)^{-1}) - \tau \operatorname{tr}((\nabla \tilde{\mathbf{u}})(\nabla X)^{-1})$ . さらにラグランジュ座標を用いるために,  $\mathbf{w}(t, y) = (\nabla X)^{-1}(\tilde{\mathbf{u}}(t, y) - \partial_t X)$  とおけば

$$\partial_t \tau + \mathbf{w} \cdot \nabla \tau + \bar{\rho} \operatorname{div} \mathbf{w} = F_0'(\mathbf{w}, \tau, \kappa, \Omega).$$

ここで,  $F'_0(\mathbf{w}, \tau, \kappa, \Omega) = -\bar{\rho}\{(\nabla X - \mathbf{I})\operatorname{div} \mathbf{w} + (\Delta X)\mathbf{w} + \operatorname{div}(\partial_t X)\} + F_0((\nabla X)\mathbf{w} + \partial_t X, \tau, \kappa, \Omega)$ .

最後にラグランジュ座標  $\xi \in \mathcal{D}$  を用い変換する.  $\mathbf{v}(t, \xi) = \mathbf{w}(t, Y_{\mathbf{v}}(t, \xi))$  に対し

$$y = \xi + \int_0^t \mathbf{v}(t, \xi) ds \equiv Y_{\mathbf{v}}(t, \xi)$$

とおく. 変換  $y = Y_{\mathbf{v}}(t, \xi)$  の逆の存在は  $\max_{i,j=1,2,3} \|\int_0^t (\partial v_i / \partial \xi_j)(s, \cdot) ds\|_{L^\infty(\Omega)} \leq \sigma$  を満たす十分小さい  $\sigma > 0$  が存在することから示される. さらに,  $\theta(t, \xi) = \tau(t, Y_{\mathbf{v}}(t, \xi))$  とおけば第一式は

$$\partial_t \theta + \operatorname{div} \mathbf{v} = f_0(\mathbf{v}, \theta, \kappa, \Omega)$$

となる. ここで,

$$f_0(\mathbf{v}, \theta, \kappa, \Omega) = -V_1 \left( \int_0^t \nabla \mathbf{v}(s, \xi) ds \right) \operatorname{div} \mathbf{u} + F'_0(\mathbf{v}, \theta, \kappa, \Omega).$$

$V_1(\int_0^t \nabla \mathbf{v}(s, \xi) ds)$  は

$$\operatorname{div} y = (\mathbf{I} + V_1 \left( \int_0^t \nabla \mathbf{v}(s, \xi) ds \right)) \operatorname{div} \xi$$

を満たす.

以上をまとめると,  $\mathbf{v}(t, \xi) = (\nabla X)^{-1}(\mathbf{u}(t, X(t, y)) - X_t)$ ,  $\theta(t, \xi) = \rho(t, X(t, y)) - \bar{\rho}$ ,  $\Omega(t) = Q^T(t)\omega(t)$ ,  $\kappa(t) = Q^T(t)\eta(t)$ ,  $N(\xi) = Q^T(t)\mathbf{n}(t, X(t, y))$ ,  $I = Q^T(t)J(t)Q(t)$ ,  $\mathcal{T}(\mathbf{v}, \theta) = Q^T(t)\mathbf{T}(\mathbf{v}, \theta)Q(t)$  とおくことにより (10) は次のように書き換えられる.

$$\left\{ \begin{array}{ll} \partial_t \theta + \bar{\rho} \operatorname{div} \mathbf{v} = f_0(\mathbf{v}, \theta, \kappa, \Omega) & \text{in } J_T \times \mathcal{D}, \\ \partial_t \mathbf{v} - \operatorname{Div} \mathcal{T}(\mathbf{v}, \theta) = \mathbf{f}_1(\mathbf{v}, \theta, \kappa, \Omega) & \text{in } J_T \times \mathcal{D}, \\ \mathbf{v} = 0 & \text{on } J_T \times \Gamma, \\ \mathbf{v}(0) = \mathbf{w}_0, \quad \theta(0) = \rho_0 - \bar{\rho} & \text{in } \mathcal{D}, \\ m\kappa' - \int_{\Gamma} \mathcal{T}(\mathbf{v}, \theta) N d\sigma = \mathbf{g}_0(\mathbf{v}, \theta, \kappa, \Omega) & t \in J_T, \\ I\Omega' - \int_{\Gamma} \xi \times \mathcal{T}(\mathbf{v}, \theta) N d\sigma = \mathbf{g}_1(\mathbf{v}, \theta, \kappa, \Omega) & t \in J_T, \\ \kappa(0) = \eta_0, \quad \Omega(0) = \omega_0. & \end{array} \right. \quad (13)$$

ここで  $\mathbf{w}_0 = \mathbf{u}_0 - X_t|_{t=0}$ ,  $f_0, \mathbf{f}_1, \mathbf{g}_i (i = 0, 1)$  は非線形項を表す. 先に述べた 2 つの変換はそれぞれ微分同相写像なので (10) を考える代わりに (13) に対し解の一意存在性を考えればよい.

(13) に対応する次の線形化問題に対する  $L_p$ - $L_q$  最大

正則性を示す.

$$\left\{ \begin{array}{ll} \partial_t \rho + \gamma_1 \operatorname{div} \mathbf{u} = f_0 & \text{in } J_T \times \mathcal{D}, \\ \partial_t \mathbf{u} - \operatorname{Div} \mathbf{T}(\mathbf{u}, \rho) = \mathbf{f}_1 & \text{in } J_T \times \mathcal{D}, \\ \mathbf{u} = 0 & \text{on } J_T \times \Gamma, \\ \mathbf{u}(0) = \mathbf{u}_0, \quad \rho(0) = \rho_0 - \bar{\rho} & \text{in } \mathcal{D}, \\ m\kappa' - \int_{\Gamma} \mathbf{T}(\mathbf{u}, \rho) \nu d\sigma = \mathbf{g}_0 & t \in J_T, \\ I\Omega' - \int_{\Gamma} \xi \times \mathbf{T}(\mathbf{u}, \rho) \nu d\sigma = \mathbf{g}_1 & t \in J_T, \\ \eta(0) = \eta_0, \quad \omega(0) = \omega_0. & \end{array} \right. \quad (14)$$

ここで,  $f = (f_0, \mathbf{f}_1)$  and  $g = (\mathbf{g}_0, \mathbf{g}_1)$  は既知の関数,  $\nu$  は  $\Gamma$  上の単位法線ベクトル. (14) に対し次を得る.

**定理 10.**  $\mathcal{D}$  を  $C^{2,1}$  級の境界をもつ外部領域とし,  $1 < p, q < \infty$ ,  $T > 0$  とする. 初期データと外力について  $\eta_0, \omega_0 \in \mathbb{R}^3$ ,  $\mathbf{v}_0 \in B_{q,p}^{2(1-1/p)}(\mathcal{D})$ ,  $\rho_0 - \bar{\rho} \in W_q^1(\mathcal{D})$ ,  $f_0 \in L_p(J_T, W_q^1(\mathcal{D}))$ ,  $\mathbf{f}_1 \in L_p(J_T, L_q(\mathcal{D}))$ ,  $\mathbf{g}_0, \mathbf{g}_1 \in L_p(J_T, \mathbb{R}^3)$  を仮定する. このとき, (14) は次の一意解をもつ.

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &\in X_{p,q}^T := W_p^1(J_T, L_q(\mathcal{D})) \cap L_p(J_T, W_q^2(\mathcal{D})), \\ \rho &\in Y_{p,q}^T := W_p^1(J_T, W_q^1(\mathcal{D})), \\ \kappa, \Omega &\in W_p^1(J_T, \mathbb{R}^3). \end{aligned}$$

さらに, 次の評価を満たす定数  $C > 0$  が存在する.

$$\begin{aligned} \|\mathbf{u}\|_{X_{p,q}^T} + \|\rho\|_{Y_{p,q}^T} + \|\kappa\|_{W_p^1(J_T)} + \|\Omega\|_{W_p^1(J_T)} \\ \leq C(\|f_0\|_{L_p(J_T, W_q^1(\mathcal{D}))} + \|\mathbf{f}_1\|_{L_p(J_T, L_q(\mathcal{D}))} \\ + \|\mathbf{g}_0\|_{L_p(J_T)} + \|\mathbf{g}_1\|_{L_p(J_T)} + \|\mathbf{u}_0\|_{B_{q,p}^{2(1-1/p)}(\mathcal{D})} \\ + \|\rho_0 - \bar{\rho}\|_{W_q^1(\mathcal{D})} + |\eta_0| + |\omega_0|). \end{aligned}$$

証明. (14) にあるように, 流体方程式を変換して得られた線形方程式には未知数として  $\kappa, \Omega$  を含まないので, 流体方程式に対する最大正則性を示したあと, 剛体との連立方程式について考えればよい.

次の圧縮性 Navier-Stokes 方程式を考える.

$$\left\{ \begin{array}{ll} \partial_t \rho + \gamma_1 \operatorname{div} \mathbf{u} = f_0 & \text{in } J_T \times \mathcal{D}, \\ \partial_t \mathbf{u} - \operatorname{Div} \mathbf{T}(\mathbf{u}, \rho) = \mathbf{f}_1 & \text{in } J_T \times \mathcal{D}, \\ \mathbf{u} = 0 & \text{on } J_T \times \Gamma, \\ \mathbf{u}(0) = \mathbf{u}_0, & \text{in } \mathcal{D}, \\ \rho(0) = \rho_0 - \bar{\rho} & \text{in } \mathcal{D}. \end{array} \right. \quad (15)$$

[3], [4] より次の結果を得る.

**命題 2.**  $1 < p, q < \infty$ ,  $\mathbf{u}_0 \in B_{q,p}^{2(1-1/p)}(\mathcal{D})$ ,  $\rho_0 - \bar{\rho} \in W_q^1(\mathcal{D})$ ,  $f_0 \in L_p(J_T, W_q^1(\mathcal{D}))$ ,  $\mathbf{f}_1 \in L_p(J_T, L_q(\mathcal{D}))^3$  とする. このとき, (15) は次を満たす一意解  $(\mathbf{u}, \rho) \in X_{p,q}^T \times Y_{p,q}^T$  をもつ. さらに, 次を満たす  $f_0, \mathbf{f}_1, \mathbf{u}_0$ ,

$\rho_0 - \bar{\rho}$  に依存しない定数  $C > 0$  が存在する.

$$\begin{aligned} & \| \mathbf{u} \|_{X_{p,q}^T} + \| \rho \|_{Y_{p,q}^T} \\ & \leq C (\| f_0 \|_{L_p(J_T, W_q^1(\mathcal{D}))} + \| \mathbf{f}_1 \|_{L_p(J_T, L_q(\mathcal{D}))} \\ & \quad + \| \mathbf{u}_0 \|_{B_{q,p}^{2(1-1/p)}(\mathcal{D})} + \| \rho_0 - \bar{\rho} \|_{W_q^1(\mathcal{D})}). \end{aligned}$$

連立方程式に対し最大正則性を得るために, 次の  $X_{p,q}^T$  に対する埋め込みを用いる.(cf. [5])

**補題 3.**  $\mathcal{D} \subset \mathbb{R}^3$  を  $C^{1,1}$  級の境界をもつ領域,  $1 < p, q < \infty$ ,  $0 < \alpha < 1$ ,  $T > 0$  とする. このとき

$$X_{p,q}^T \hookrightarrow H_p^\alpha(J_T, H_q^{2-2\alpha}(\mathcal{D})).$$

ここで,  $[\cdot, \cdot]_\theta$  ( $0 < \theta < 1$ ) は複素補間を表し,  $H_q^s(\mathcal{D}) = [L_q(\mathcal{D}), W_q^m(\mathcal{D})]_{s/m}$ .

ここで,  $6 \times 6$  の定数行列  $\mathbf{I}_6$  を次で定義する.

$$\mathbf{I}_6 = \begin{pmatrix} m\mathbf{I} & 0 \\ 0 & \mathbf{I} \end{pmatrix}.$$

さらに,  $0 < \epsilon \leq 1 - 1/q$  に対し, 作用素  $\mathcal{J}_{\epsilon,\nu}$  を次で定義する

$$\mathcal{J}_{\epsilon,\nu} : W_{q,\text{loc}}^{\epsilon+1/q}(\mathcal{D}, \mathbb{R}^{3 \times 3}) \rightarrow \mathbb{R}^6, h \mapsto \begin{pmatrix} \int_\Gamma h \nu d\sigma \\ \int_\Gamma \xi \times h \nu d\sigma \end{pmatrix}.$$

これらを用いれば, (14) は次で書き直される.

$$\mathbf{I}_6 \begin{pmatrix} \kappa' \\ \Omega' \end{pmatrix} - \mathcal{J}_{\epsilon,\nu} \mathbf{T}(\mathbf{u}, \rho) = \begin{pmatrix} \mathbf{g}_0 \\ \mathbf{g}_1 \end{pmatrix}, \quad (16)$$

$$\kappa(0) = \eta_0, \quad \Omega(0) = \omega_0.$$

$\mathbf{I}_6$  は逆写像をもつので,  $\kappa, \Omega$  は次で表される.

$$\begin{pmatrix} \kappa \\ \Omega \end{pmatrix} = \int_0^t \mathbf{I}_6^{-1} \left[ \begin{pmatrix} \mathbf{g}_0 \\ \mathbf{g}_1 \end{pmatrix} + \mathcal{J}_{\epsilon,\nu}(\mathbf{T}(\mathbf{u}, \rho)) \right] (s) ds + \begin{pmatrix} \eta_0 \\ \omega_0 \end{pmatrix}.$$

右辺を命題 2, 補題 3, トレース作用素  $\gamma : H_{q,\text{loc}}^{\epsilon/2+1/q}(\mathcal{D}) \rightarrow L_q(\partial\mathcal{D})$  の有界性から得られる  $|\mathcal{J}_{\epsilon,\nu} h| \leq C \|\gamma h\|_{L_q(\Gamma)} \leq C \|h\|_{W_q^{\epsilon+1/q}(\mathcal{D})}$  ( $h \in W_q^{\epsilon+1/q}(\mathcal{D})$ ) を用いて評価すれば, 定理 10 を得る.  $\square$

#### 4. 結論

スリップ境界条件下での圧縮性 Navier-Stokes 方程式に対する時間局所的・大域的適切性と, 圧縮性粘性流体と剛体の連成問題に対する時間局所的適切性をこれまで扱われてきた  $L_2$  枠ではなく,  $L_p$ - $L_q$  枠で得た. 先行研究と比較し,  $L_p$ - $L_q$  最大正則性を用いたことで, 初期値の正則性と整合条件に対し最小な条件の下, 適切性を証明することが出来た.

#### 参考文献

- [1] M. Boulakia and S. Guerrero, *A regularity result for a solid-fluid system associated to the compressible Navier-Stokes equations*. Ann. Inst. H. Poincaré Anal. Non Linéaire, **26** (2009), No. 3, 777–813.
- [2] M. Burnat and W. Zajączkowski, *On local motion of a compressible barotropic viscous fluid with boundary slip condition*, Topological Methods in Nonlinear Analysis Journal of the Julisz Schauder Center **10** (1997), 195–223.
- [3] R. Denk, M. Hieber, J. Prüss,  *$\mathcal{R}$ -boundedness, Fourier Multiplier and Problems of Elliptic and Parabolic Type*, Memoirs of AMS, Vol 166, No. 788 (2003).
- [4] R. Denk, M. Hieber, J. Prüss, *Optimal  $L^p - L^q$  estimates for parabolic boundary value problems with inhomogeneous data*, Math. Z. **257** (2007), 193–224.
- [5] M. Geissert, K. Götze and M. Hieber,  *$L^p$ -theory for strong solutions to fluid-rigid body interaction in Newtonian and generalized newtonian fluids*. Trans of AMS, **365** (2013), 1393–1439.
- [6] M. Hieber and M. Murata, *The  $L_p$ -approach to the fluid-rigid body interaction problem for compressible fluids*. Evol. Control Theory, **4** (2015), 69–87.
- [7] M. Murata, *On a maximal  $L_p$ - $L_q$  approach to the compressible viscous fluid flow with slip boundary condition*. Nonlinear Anal, **106** (2014), 86–109.
- [8] T. Kobayashi and W. Zajączkowski, *On global motion of a compressible barotropic viscous fluid with boundary slip condition*, Applicaciones Mathematicae, **26**, **2** (1999), 159–194.
- [9] Y. Shibata and M. Murata, *On the global well-posedness for the compressible Navier-Stokes equations with slip boundary condition*. J. Differential Equations, **260** (2016), no. 7, 5761–5795.
- [10] L. Weis, *Operator-valued Fourier multiplier theorems and maximal  $L_p$ -regularity*. Math. Ann. **319** (2001), 735–758.



## 暗黒物質探索のための宇宙線反粒子検出器の開発

清水 雄輝\*

### Development of Cosmic Ray Antimatter Detector for Dark Matter Search

Yuki Shimizu\*

#### 1. 緒言

最近の宇宙マイクロ波背景放射非等方性の高精度観測により、宇宙の組成は正体不明の暗黒物質および暗黒エネルギーが主成分であることが明らかとなってきた。宇宙組成のうち、通常物質を構成するバリオン（陽子や中性子）はわずか5%程度であり、残りの成分は暗黒物質が約27%、暗黒エネルギーが約68%を占める<sup>(1)</sup>。そのうちの暗黒物質については、宇宙論および素粒子論的な研究から、通常物質とほとんど相互作用をしないが質量を持つ粒子（Weakly Interacting Massive Particle, WIMP）として存在する可能性が示唆されている<sup>(2)</sup>。WIMP は定義上、光を放射せず、物質を何の痕跡も残さずに通過してしまうため、その検出は困難である。一方、宇宙空間を飛び交う WIMP の存在を何らかの方法で確認することは、宇宙物理学のみに止まらず、素粒子物理学の領域においても大きなインパクトがあることから、世界中で様々な観測の試みが行われている。これまで、WIMP を直接的に検出する試みとして、地下の低バックグラウンド環境を利用した実験が世界各地で行われてきた。これは、WIMP が物質中の原子核に衝突する極めて稀な現象を捉える手法を用いており、宇宙線由来の放射線を防ぐため地下で実験を行うのが通例である。1998年、イタリアのグランサッソ研究所にて実験を行った DAMA グループが、WIMP の存在の証拠となる、地球の公転運動から期待される WIMP 散乱スペクトルの季節変化(～数%)を捉えたと報告した<sup>(3)</sup>。しかし、後続の実験によりそのパラメータ領域は棄却されている<sup>(4)</sup>。著者自身もシンチレーション検出器等を利用した地下での WIMP 探索実験を行ってきたが<sup>(5,6)</sup>、この手法は最も直接的な探索手段

ではあるものの、WIMP 由来の信号と環境放射線によるバックグラウンドを根本的に区別する方法がないという難しさがあり、未だ検出には至っていないというのが現状である。

WIMP は前述のように正体は不明であるが、素粒子標準理論を超える複数の理論モデルにおいて、WIMP として存在し得る未発見の粒子が予言されている。そのうちの有力候補である、超対称性理論から予言されるニュートラリーノなど、各種理論モデルにて WIMP はマヨラナ粒子である可能性が指摘されている。マヨラナ粒子とは、自身が自身の反粒子を兼ねる性質を持つ粒子であり、同種粒子同士が衝突すると対消滅を引き起こす。また、WIMP は宇宙初期から存在できる程度に安定であるが、有限の寿命を持つとする理論モデルもある。前者では WIMP 同士の対消滅、後者では単一の WIMP の崩壊によって、観測可能な別の種類の粒子が発生する可能性があり、それらの二次的な粒子を捉える方法が近年注目されている。これまでに、Fermi や AMS-02 等の宇宙実験による電子・陽電子の観測<sup>(7)</sup>、スーパーカミオカンデや IceCube 等の地下からのニュートリノの観測<sup>(8)</sup>がある。また、著者が開発に参加した、現在国際宇宙ステーション「きぼう」日本実験棟船外実験プラットフォームで運用が行われる CALET では、未開拓であった 10TeV 領域までの電子・陽電子観測が現在進められている<sup>(9)</sup>。しかし、これまでのところ WIMP に由来する事象の有意な兆候は見られていない。これらの実験では、観測対象の粒子が宇宙空間にありふれた粒子であり、バックグラウンド事象が元々多いことが観測を困難とする一因となっている。ところで、WIMP の対消滅や崩壊事象で生成される可能性のある粒子のうちで、同種粒子のバックグラウンドが十分少ないものとして、反重陽子がある。反重陽子は、陽子と中性子が結合した重陽子と対になる反粒子で

\*准教授 物理学教室  
Associate professor, Dept. of Physics

ある。図1に、複数の理論モデルから予想されるWIMPに由来する反重陽子のスペクトルおよび、宇宙空間に存在する高エネルギー宇宙線から生じる重陽子バックグラウンドの推定量を示す。100~300MeVのエネルギー領域では、WIMP由来の重陽子がバックグラウンドよりも2桁以上多く存在すると考えられ、WIMP由来事象の有意な検出が可能と言える<sup>(10)</sup>。

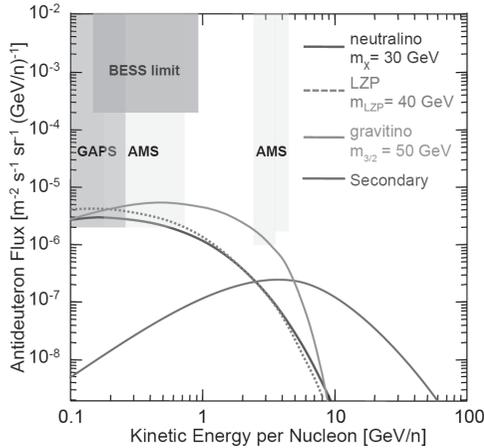


図1 予想される反重陽子フラックスとGAPSの感度<sup>(10)</sup>

反重陽子を含む反粒子の観測では、AMS-02に代表される強磁場磁石 (~1T) を利用した粒子飛跡測定が一般的である。これは、粒子・反粒子が逆の極性の電荷を持つことを利用し、観測装置中で磁場によって飛跡が曲がる方向を測定することによって識別を行う手法である。宇宙から飛来する反粒子の測定には、大気の影響を避けられる環境での実施が必要である。そのため、人工衛星や高高度気球といった飛翔体を利用した実験を行う必要がある。飛翔体実験において大質量の磁石を用いることは、搭載重量の制約に加え、検出器の有効面積・視野角が限られることもあり、予想される存在量の少ない反重陽子の検出に必ずしも最適とは言えない。

著者らが現在開発を進める GAPS (General Antiparticle Spectrometer) は、数百 MeV 領域の宇宙線反粒子検出を目的とする、長期間気球の利用を想定した実験計画である。これまでに例のない、反粒子が形成するエキゾチック原子の崩壊過程を利用した検出原理を用いることにより、大面積・広視野角での反重陽子測定が可能である<sup>(12)</sup>。GAPS 計画では、太陽風の影響の少ない太陽活動極小期となる、2020年の観測実施を目指している。地磁気によるカットオフエネルギーが低い高緯度地域で観測を行うため、アメリカ航空宇宙局 (NASA) の南極周回気球へ

の搭載を想定している。2012年、観測装置の要素試作モデルで構成されたプロトタイプ(pGAPS)を宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所(JAXA/ISAS)の大気球に搭載した実験が実施され、実際の成層圏環境下での技術実証を成功させている<sup>(13)</sup>。現在は、本実験の実現に向け、観測装置のさらなる研究開発が進められている段階である。

本稿では、この GAPS 計画の概要に加え、開発を進めている主要検出器の一つ、粒子飛行時間 (Time of Flight, TOF) 計測カウンタに関する研究の現状について紹介する。

## 2. エキゾチック原子崩壊を利用した反粒子検出

GAPS での反粒子検出の原理を図2に示す。反粒子は通常の荷電粒子と同様、真空中から観測装置を構成する物質に入射すると、電離損失過程によって運動エネルギーを失う。反粒子は運動エネルギーの減少に伴って徐々に速度を落とし、最終的に物質中の原子の周りの電子軌道に補足されて、エキゾチック原子を形成する。このエキゾチック原子は、形成された瞬間は励起状態にあり、時間が経過するとより低いエネルギー準位の状態に段階的に落ち込む。この状態遷移に伴い、複数の特性 X 線が放出される。そして、最終的には原子核に落ち込み、核子対消滅を起こして  $\pi$  粒子や陽子等のハドロン粒子を放射状に発生させる。この特性 X 線およびハドロン粒子の測定によって、高精度の反粒子同定を行うことが GAPS の特徴である。

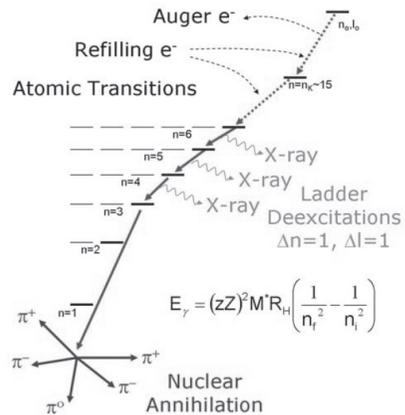


図2 GAPSによる反重陽子測定原理<sup>(12)</sup>

GAPS の観測装置概要を図3に示す。観測装置を構成する主要要素は、中央に配置されたリチウムドリフト型シリコン半導体検出器 (Si (Li)) および、それらを取り

囲むように配置されたプラスチックシンチレーション TOF 計測カウンタ (TOF カウンタ) の 2 種類の放射線検出器である。どちらも複数の特性 X 線ならびにハドロン粒子を識別するため、細分化されたアレイ構造となっている。観測装置内での反重陽子の反応とその検出の仕組みを図 4 に示す。Si (Li) は、エキゾチック原子から生じる特性 X 線の検出を行うと同時に、入射反粒子の減速・吸収材としての機能を持つ。また、TOF カウンタで

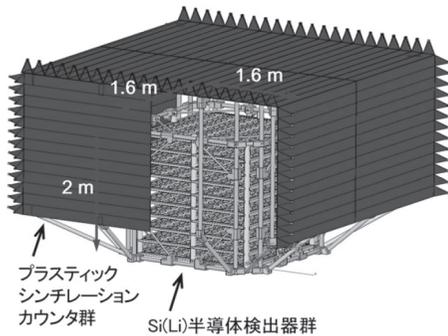


図3 GAPSの観測装置概略図

は、入射反粒子の飛行時間測定に加えて、核子対消滅で生じるハドロン粒子の検出を行う。

前述のように、GAPS による暗黒物質の探索では、反重陽子が直接の測定対象となる。反重陽子の検出においては、反陽子が主要なバックグラウンドとなる。反陽子は、陽子と対になる反粒子であり、宇宙空間におけるフラックスが反重陽子に比べて 1000 倍以上である。反陽子と反重陽子はともに GAPS の観測装置内でエキゾチック原子を生成するが、脱励起過程で放出される特性 X 線のエネルギー、核子対消滅によって発生するハドロンの粒子数、質量の違いに由来する飛行速度などの違いが生じ

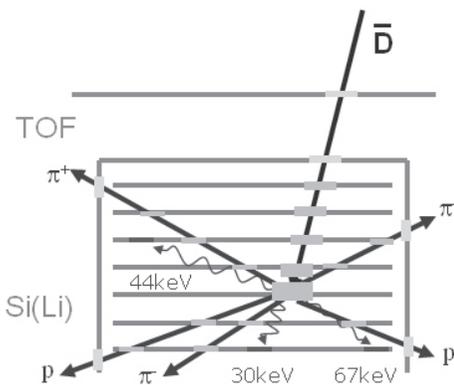


図4 反重陽子の観測装置内での反応<sup>00</sup>

る。GAPS では、これらのパラメータについての詳細な事象解析によって、反重陽子と反陽子の識別を行う。十分な識別性能を得るには、エネルギー分解能、飛行時間分解能等の検出器性能に加え、生成粒子のマルチヒット抑制のための検出器細分化を必要とする。同時に、フラックスの極めて少ない反重陽子を捉えるため、検出器の大容積化が求められる。

### 3. 飛行時間 (TOF) 計測カウンタの開発

現在著者は、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所、青山学院大学、東海大学等と共同で、GAPS の観測装置を構成する TOF カウンタの開発を進めている。TOF カウンタは、観測装置の中心部を構成する Si (Li) 検出器全体を取り囲むように配置され、内層・外層の 2 層構造となる。この TOF カウンタは、反粒子の観測において主に以下の役割を担う。

- ・入射する反粒子の TOF 測定による速度決定
- ・核子対消滅で生じる  $\pi$  粒子・陽子等ハドロンの検出
- ・反粒子の通過位置の測定による到来方向の決定

比較的安価に大面積の検出器製作が可能であり、光速に近い入射粒子の飛行時間を測定可能な速い時間応答特性を持つ検出器として、プラスチックシンチレータを用いる。プラスチックシンチレータは、荷電粒子が通過するときに損失するエネルギーを受け取り、シンチレーション光を放出する。シンチレーション光の検出には光電子増倍管 (Photomultiplier tube, PMT) を用いる。GAPS で用いるプラスチックシンチレータ、EJ200 (ELJEN 社) の基本特性を表 1 に示す。

表 1 EJ200の基本特性

光量	64% (アントラセン比)
立ち上がり時間	0.9 ns
減衰時間	2.1 ns
ピーク波長	425 nm
屈折率	1.58

反重陽子と反陽子を飛行時間から識別するためには、0.5ns 以下の時間分解能が要求される。TOF カウンタの最適な設計およびその性能を見積もるため、計算機による粒子相互作用シミュレーションおよび装置試作による評価実験を並行して行った。本章ではその研究の概要を報告する。

### 3.1 計算機シミュレーションによる光伝播の評価

プラスチックシンチレータでは、内部を通過する粒子が電離損失により物質中で失ったエネルギーの一部が光子となり、減衰時間に従って放出される。その光パルスを PMT で検出することによって、粒子が通過したときに失ったエネルギーおよび通過時刻を測定する。GAPS では、同一の入射粒子が外層および内層に位置する TOF カウンタを通過した時刻をそれぞれ計測し、その差から飛行時間を決定する。粒子の通過時刻は、シンチレータ内で発生した光が PMT で検出されたタイミングから求められる。シンチレータでの光の発生や伝播は確率過程であるため、入射粒子の通過から PMT での光検出までの時間にはばらつきが生じる。このばらつきが飛行時間測定に誤差を生む。そこで計算機を用い、放射線の物質中での相互作用および、発生した光子が PMT まで伝播する過程をシミュレーションによって評価した。

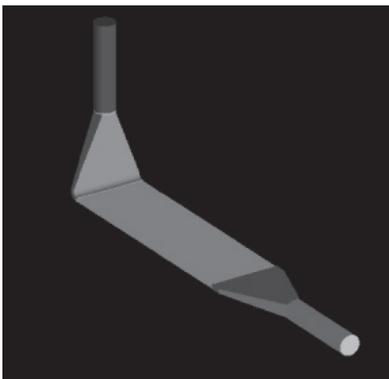


図5 GEANT4 でモデリングした TOF カウンタ<sup>(18)</sup>

シミュレーションには、放射線相互作用の計算に広く使われる、ヨーロッパ原子核研究機構の提供するモンテカルロシミュレーションコード GEANT4<sup>(14)</sup>を用いた。GEANT4 でモデリングした TOF カウンタを図5に示す。板状のプラスチックシンチレータ (500mm×5mm×16mm) の両端に、それぞれアクリルライトガイドを介して PMT を取り付ける設計となっている。2本の PMT への光の到達時間の差を用いて、シンチレータ内の入射位置の測定が可能である。GAPS では気球搭載時のサイズの制約のため、検出器は可能な限りコンパクトな形状にすることが望ましい。後述の試作検出器の設計と条件を合わせるため、プラスチックシンチレータの片側端にはストレート型ライトガイド、反対側の端にはカーブ

型ライトガイドを接続している。また、光の収集効率を上げるため、プラスチックシンチレータとライトガイドの周囲にアルミナイズドマイラーを模擬した薄いアルミ板を設置した。

シミュレーションでは、プラスチックシンチレータの各位置に、1GeV のミュー粒子を 5000 回ずつ入射させた。ミュー粒子の選択は、後述の宇宙線測定を模擬するためである。ミュー粒子をプラスチックシンチレータ中央部に入射させたときの、各 PMT へ最初の光子が到達した時刻の分布を図5に示す。ミュー粒子を発生させた時刻を時間の基準としている。図の分布幅が検出時刻のばらつきを示しており、各 PMT における時刻決定精度に相当する。ストレート型、カーブ型ライトガイドの両者で、時間分解能は約 0.15ns(1 $\sigma$ )という結果が得られた。装置サイズ制約を考慮したカーブ型ライトガイドを用いた場合でも、ストレート型と比べて遜色のない性能が得られることが分かった。入射粒子の通過時刻は両 PMT の計測時刻の平均値により決定するため、その分解能は約 0.11 ns となり、要求性能を十分満たしている。

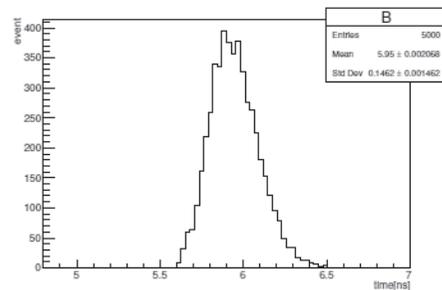
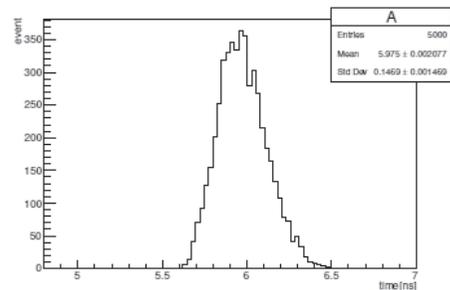


図6 シンチレーション光の PMT への到達時間分布<sup>(18)</sup>  
(上がストレート型、下がカーブ型)

### 4.2 TOF カウンタの試作および性能評価

シミュレーションによる評価は一般的に、実機では避けられない製品のばらつきや物質の不均一さ等を取り入れることが困難なため、性能を過大評価することが多い。

シミュレーションによる評価と実機の比較のため、TOFカウンタを試作し、時間分解能の評価を行った。試作に用いた主要な材料を表2に示す。

表2 TOFカウンタの主要材料

	型番	サイズ
プラスチックシンチレータ	EJ200	500mm×5mm×160mm
ライトガイド	アクリライト	160mm (長さ)
オプティカルセメント	EJ500	-
PMT	H6410	-

製作中のTOFカウンタの写真を図6に示す。シンチレーション光の収集効率を上げるため、シンチレータおよびライトガイドには反射材としてアルミナイズドマイラーを巻いた。その後、環境からの光を遮るため、ブラックシートで全体を覆っている(図7)。

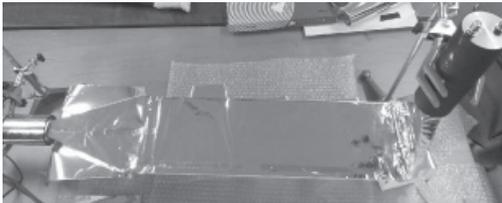


図7 製作中のTOFカウンタ<sup>(6)</sup>

プラスチックシンチレータの時間分解能の評価試験は、宇宙線ミュオン粒子を利用して行った。ミュオン粒子は、地球の外から到来する高エネルギー宇宙線が大気と衝突して生じた二次粒子であるが、大気や物質中で電離損失以外の反応を起こしにくいいため、十分高いエネルギーを持ったまま地表まで到来すると同時に、プラスチックシンチレータを貫通できる。試作したTOFカウンタの宇宙線測定時セットアップを図8に示す。TOFカウンタの上側・下側にそれぞれ、1cm角立方体のプラスチックシンチレータを重ねて配置してある。上空から到来したミュオン粒子がこの2本のシンチレータを通過したときにトリガ信号を発生することで、物質を貫通して直進するミュオン粒子とガンマ線等の環境放射線を識別すると同時に、プラスチックシンチレータ中のミュオン粒子が通過した位置を特定する。時間測定には、40psの時間分解能を持つ、Time-to-Digital Converter (TDC) のRPC-170 (林業精器)を使用した。

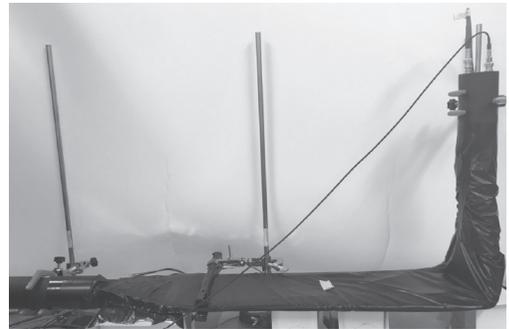


図8 TOFカウンタの宇宙線ミュオン粒子測定セットアップ<sup>(6)</sup>  
(写真右がカーブ型、左がストレート型ライトガイド)

上下のトリガ用シンチレータの同時計測タイミング信号をTDCのスタートとし、ストレート型およびカーブ型ライトガイド接続のPMT出力パルスをそれぞれストップ信号として、シンチレーション光が各PMTに到達したタイミングを測定した。両PMT出力のTDCによる測定結果を図8に示す。GEANT4によるシミュレーションの結果(図5)同様、分布の幅が時刻決定精度に相当する。TDC出力は約0.026ns/countに相当するので、時間分解能はストレート型とカーブ型それぞれで0.52nsと0.57ns(1 $\sigma$ )となる。TOFカウンタを粒子が通過した時刻は、両PMTの測定時刻の平均から求める。よって、その時間分解能は約0.39nsとなり、装置要求性能を満たしている。また、2種類のライトガイド形状による顕著な時間分解能の差は見られなかった。シミュレーションの結果と比べて有意な差異が見られるが、今回スタート信号の生成に利用した、トリガ用シンチレータに用いたPMTの応答速度が要因の一つと考えられる。トリガ用シンチレータの影響を取り除き、より正確な時間分解能の評価を行うことが今後の課題である。また、長期間気球による観測の実現に向けて、検出器の大型化およびアレイ化が必須であり、そのための研究開発を今後速やかに進めていく必要がある。

## 7. 結言

著者らは、高精度の宇宙線反粒子測定を行うため、GAPS計画を進めている。GAPSでは、これまでに例のないエキゾチック原子崩壊過程の測定により、反陽子や反重陽子の高感度検出を可能とする。これらの反粒子は、宇宙に存在する物質の大半を占める暗黒物質の対消滅や崩壊過程で生じることが予想される。特に反重陽子については、高エネルギー宇宙線に由来するバックグラウンド事

象が十分少なく、反重陽子 1 事象の検出であっても十分インパクトがある。未だ例のない反重陽子の観測によって、現代の物理学における重要課題の一つである、暗黒物質の正体解明につながる成果が期待できる。

本稿では、観測装置を構成する主要な検出器のうち、入射粒子の飛行時間測定を行う TOF カウンタの研究開発について紹介した。GEANT4 を用いたシミュレーションおよび試作検出器による性能評価を行い、長さ 500mm のプラスチックシンチレータを用いた場合、要求される時間分解能 0.5ns 以下を満たすことが確認された。一方、試作検出器の宇宙線測定による性能評価結果は、シミュレーションから予想された時間分解能には及ばなかった。測定時に併用したトリガ用シンチレータの影響が疑われるが、試験方法の改善が求められる。また、観測装置の実機製造に向けて、より長いサイズの TOF カウンタの開発が必要であり、シミュレーションによる性能見積もりおよび再現性の向上と合わせて、今後の課題である。

GAPS による反粒子観測は、太陽活動の影響を考慮し、活動極小期にあたる 2020 年の実験実施が望ましい。長期間気球による反粒子観測の実現に向け、搭載装置の開発が急務な状況である。

#### 参考文献

- (1) P.A.R. Ade et al., *Astronomy and Astrophysics*, 594 (2016) A13
- (2) J.D. Lewin and P.F. Smith, *Astropart. Phys.* 6 (1996) 87
- (3) R. Bemabei et al., *Phys. Lett. B*, 424 (1998) 195
- (4) A. Abusaidi et al., *Phys. Rev. Lett.* 84 (2000) 5699
- (5) Y. Shimizu et al., *Nucl. Instr. Meth Phys. Res. A*, 496 (2003) 347
- (6) Y. Shimizu et al., *Phys. Let. B*, 633 (2006) 195
- (7) L. Accardo et al., *Phys. Rev. Lett.* 113 (2014) 121101
- (8) T. Tanaka et al., *Astrophys. J.* 742 (2011) 78
- (9) Y. Asaoka et al., to be submitted to *Astropart. Phys.*
- (10) H. Fuke et al., *Advances in Space Research*, 53 (2014) 1432
- (11) T. Aramaki et al., *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A*, 682 (2012) 90
- (12) C.J. Hailey et al., *New J. Phys.* 11 (2009) 105022
- (13) S.A.I. Mognet et al., *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A*, 735 (2014) 24
- (14) <https://geant4.web.cern.ch/geant4/>
- (15) 和田拓也, 青山学院大学卒業論文, 2016
- (16) 蓑島温志, 青山学院大学卒業論文, 2016
- (17) 橋本岳, 青山学院大学卒業論文, 2016

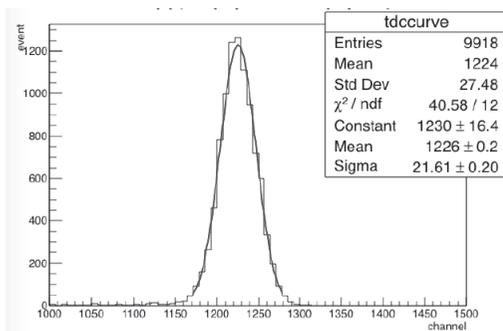
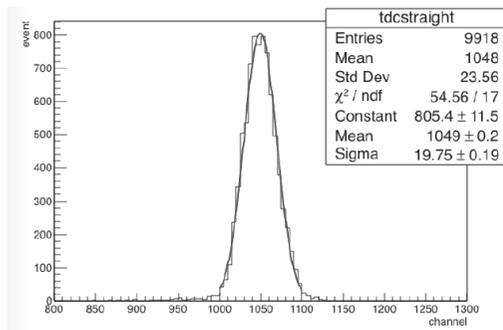


図9 宇宙線ミュオン測定における TDC 出力分布<sup>(17)</sup>

(ストレート型：上、カーブ型：下)



# 放射光 X 線回折によるナノ材料の構造研究

客野 遥\*

## Structure Analyses of Nanomaterials Using Synchrotron Radiation

Haruka Kyakuno\*

### 1. 緒言

X 線回折 (XRD) 法は、バルクサイズの物質の構造解析の標準的な手法であり、一般的な結晶性物質では、格子定数や結晶サイズなどの情報はもちろん、原子座標の詳細情報を比較的容易に得ることができる。例えば機能性新物質の構造同定<sup>(1)</sup>やタンパク質の立体構造解析<sup>(2)</sup>など、その適用分野の幅は広い。

しかしながら、結晶性の低い物質や、結晶サイズの小さい物質の構造解析に XRD 法を用いる場合には注意が必要である。このような物質では、回折線のピークが広がり、その結果回折パターンが大きく変調され、従来の標準的な手法を用いると誤った結果が導かれることがある。しかし筆者らは、カーボンナノチューブ (CNT)<sup>(3)(4)</sup>などの結晶性の低いナノ材料、およびそのナノ材料が有する微細空間内に閉じ込められた物質の構造物性に着目した研究を行い、このようなナノ物質の構造解析においても XRD 法が極めて有用であることを報告してきた<sup>(5)(10)</sup>。ごく最近では、高純度かつ単一構造の CNT からなる粉末状試料が得られるようになったが、筆者らはこのような高純度試料を用いると、結晶性が悪くても CNT 自体の構造 (炭素原子の配列など) を同定することができることを見出した<sup>(9)</sup>。そこで本報では、筆者らによる放射光 XRD 実験を用いた CNT の構造解析手法を紹介する。

### 2. カーボンナノチューブ (CNT) の基礎

CNT はグラフェンのリボンを筒状に丸めてつなげた中空円筒空間を有する一次元性のナノ炭素物質である。(グラフェンとは、グラファイトを構成する蜂の巣構造の炭素原子層 1 枚からなる物質である。)特に 1 層からなるものを単層カーボンナノチューブ (SWCNT) と呼び、その直径はサブナノメートルから数ナノメートル程度である。SWCNT には、グラフェンシートの巻き方 (グラ

フェンリボンの切り出し方)に応じて多数の螺旋構造 (カイラリティ) が存在し、その構造はカイラル指数と呼ばれる整数組  $(n, m)$  で一義的に指定される。SWCNT は、構造により金属または半導体の性質を示す。

SWCNT の発見から 25 年余りが経過するにも関わらず、その詳細な構造 (炭素原子間結合長など) や、バルクサイズの SWCNT 固体 (単結晶) の本質的な物性はまだ十分に解明されていない。これは、バルクサイズの SWCNT 材料中には様々な構造の SWCNT が混在しているためである。典型的な SWCNT 材料では、SWCNT の“直径”はある程度制御されているものの、カイラリティ (構造) は制御されていない。SWCNT は数十から数百本が束となった「バンドル」と呼ばれる結晶を形成しているが、そのバンドル内には様々な構造の SWCNT が混在している (図 1)。ごく最近になり、バルク SWCNT 材料の精製・分離技術の進歩により、高純度の金属型 (または半導体型) SWCNT、さらに単一カイラリティの SWCNT の抽出が可能になった<sup>(11)(13)</sup>。これらはそれぞれ、第 1, 2, 3 世代 SWCNT と呼ばれる (図 2)。

SWCNT 材料の評価や、SWCNT 構造を同定するための実験手法には従来、走査型プローブ顕微鏡による直接観察、電子線回折法、および光吸収やラマン散乱、フォトルミネッセンス (PL) などの分光法が広く用いられてきた<sup>(14)(17)</sup>。しかし、これらの方法には定量的見積の限界や精度の不十分さ、更に場合によっては試料準備に複雑なプロセスが必要であるなどといった弱点がある。これらの手法の代替もしくは補完となり得るものが、本報で紹介する XRD 法である。

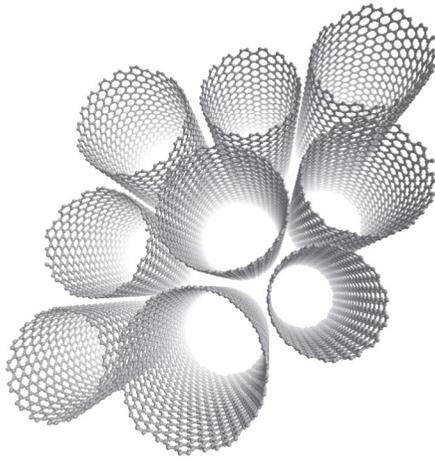


図1 SWCNT のバンドル構造の模式図。バンドル内には、様々な構造のSWCNT が混在している。

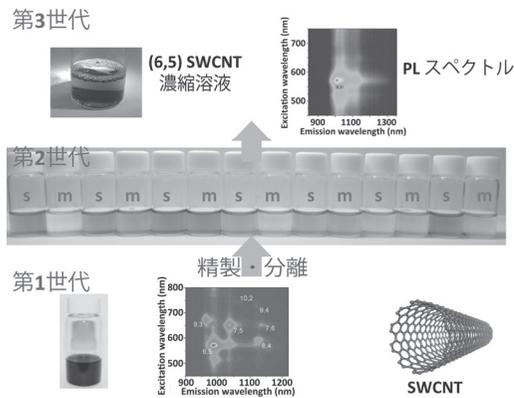


図2 第1, 2, 3世代SWCNT材料。カイラル(6,5)のSWCNTを濃縮した試料については、濃縮前後のフォトルミネッセンス(PL)スペクトルを示す。金属(半導体)型SWCNTの濃縮試料は“m(s)”と標記している。

([http://pfwww.kek.jp/acr/2014pdf/part\\_a/14ah1\\_6.pdf](http://pfwww.kek.jp/acr/2014pdf/part_a/14ah1_6.pdf))

### 3. X線回折の理論

X線回折(XRD)法では、物質にX線を照射して回折されたX線を測定することにより、未知試料の同定や、結晶構造を調べることができる。ここではXRD法の一般的な理論の概要を述べる(詳細は、文献(18), (19)などの専門書を参照)。

#### 3.1 一般的な物質からの回折

X線回折では、物質中の電子の分布の様子が分かる。物質中の電子による弾性(トムソン)散乱を考える。散乱されたX線の振幅はその点の電子密度に比例するので、物質中に分布している全電子からの散乱波の合成振幅 $A$ は次のように表せる。

$$A = \int \rho(\vec{r}) \exp(-i\vec{Q} \cdot \vec{r}) dV \quad (1)$$

ここで、 $\vec{r}$ は物質内の位置を示すベクトル、 $\rho(\vec{r})dV$ は体積 $dV$ 内の電子数、指数項は位相因子である。 $\vec{Q}$ は散乱ベクトルであり、入射X線と散乱X線の波数ベクトルをそれぞれ $\vec{k}$ 、 $\vec{k}'$ としたとき $\vec{Q} = \vec{k}' - \vec{k}$ で表される。

またX線の散乱角を $2\theta$ 、波長を $\lambda$ とすると、 $Q = \frac{4\pi \sin \theta}{\lambda}$ と表せる。一方 $\rho(\vec{r})$ は、物質中の $i$ 番目の原子に属する電子分布関数 $\rho_i$ の重ね合わせと近似

する。すると、 $i$ 番目の原子の中心までのベクトルを $\vec{r}_i$ とし、(1)式は次のように書き換えられる。

$$A = \sum_i \int \rho_i(\vec{r} - \vec{r}_i) \exp(-i\vec{Q} \cdot \vec{r}) dV \\ = \sum_i \exp(-i\vec{Q} \cdot \vec{r}_i) \int \rho_i(\vec{r}') \exp(-i\vec{Q} \cdot \vec{r}') dV' \quad (2)$$

ここで、 $\vec{r}' \equiv \vec{r} - \vec{r}_i$ とした。さらに原子散乱因子を、

$$f_i = \int \rho_i(\vec{r}') \exp(-i\vec{Q} \cdot \vec{r}') dV' \quad (3)$$

と定義すると、(2)式は次のように書ける。

$$A = \sum_i f_i \exp(-i\vec{Q} \cdot \vec{r}_i) \quad (4)$$

この式は、物質中の全電子からの散乱の重ね合わせは、各原子からの散乱の重ね合わせとして近似できることを示している。

観測されるX線回折強度 $I(\vec{Q})$ は、(4)式の絶対値の二乗に比例する。 $n$ 番目の原子の位置を $\vec{r}_n$ 、原子散乱因子を $f_n$ と表せば、

$$I(\vec{Q}) \propto A^* A = \sum_m \sum_n f_m f_n \exp[i\vec{Q} \cdot (\vec{r}_m - \vec{r}_n)] \quad (5)$$

となる。粉末(無配向)試料では、ベクトル  $\vec{r}_{mn} \equiv \vec{r}_m - \vec{r}_n$

はあらゆる方向をとりうるので、 $\vec{Q}$  と  $\vec{r}_{mn}$  のなす角を  $\alpha$  として位相因子の平均をとると次のようになる。

$$\begin{aligned} \langle \exp(i\vec{Q} \cdot \vec{r}_{mn}) \rangle &= \frac{1}{4\pi} 2\pi \int_{-1}^1 \exp(iQr_{mn} \cos \alpha) d(\cos \alpha) \\ &= \frac{1}{2} \frac{\exp(iQr_{mn}) - \exp(-iQr_{mn})}{iQr_{mn}} \\ &= \frac{\sin(Qr_{mn})}{Qr_{mn}} \end{aligned} \quad (6)$$

したがって、散乱ベクトル  $\vec{Q}$  における散乱強度として次式が得られる。

$$I(\vec{Q}) = \sum_m \sum_n f_m f_n \frac{\sin(Qr_{mn})}{Qr_{mn}} \quad (7)$$

これはデバイの式と呼ばれ、一般的な物質(原子の集まり)からの回折について成り立つ。

### 3.2 結晶からの回折

次に、対象とする物質が結晶である場合を考える。結晶は単位格子を周期的に無数に並べたものなので、1 個の単位格子からの散乱を考えればよい。単位格子からの散乱振幅を結晶構造因子  $F$  と呼び、(4)式を単位格子内の原子からの散乱の和として書き直すことで得ることができる。仮に、単位格子内に原子が  $s$  個あるならば、

$$F = \sum_i^s f_i \exp(-i\vec{Q} \cdot \vec{r}_i) \quad (8)$$

となる。よって、結晶からの全散乱波は周期的に並んだ単位格子からの散乱波の重ね合わせとして、次のように書ける。

$$A = \sum_{\vec{R}} F \exp(-i\vec{Q} \cdot \vec{R}) \quad (9)$$

ここで  $\vec{R}$  は格子点位置を示すベクトルであり、和は全ての格子点(すなわち、結晶全体)にわたってとる。結局、観測される X 線回折の散乱強度は次のように書ける。

$$I(\vec{Q}) \propto |A|^2 = |F|^2 \left| \sum_{\vec{R}} \exp(-i\vec{Q} \cdot \vec{R}) \right|^2 \quad (10)$$

この式の、全ての格子点にわたる指数関数の和の絶対値の二乗は、ラウエ関数と呼ばれる。ラウエ関数は、結晶

の逆格子ベクトル  $\vec{G}$  と散乱ベクトル  $\vec{Q}$  が一致したとき

にピークをもつ関数であり、いわゆるブラッグの条件  $2d \sin \theta = n\lambda$  ( $d$  は格子面間隔、 $n$  は整数) を満たしている。

## 4. SWCNT の XRD

### 4.1 SWCNT 材料の評価法(均一電子モデル)

前節で述べた XRD の基礎理論をふまえ、SWCNT の X 線回折を考える。まず、一本の SWCNT は均一の電子密度を持った中空シリンダーであると仮定する(均一電子モデル)<sup>(20),(21)</sup>。このような中空シリンダーが集まって最密な 2 次元三角格子を組みバンドルを形成していると考えられる。SWCNT 試料内には無数のバンドルが存在する。そこで、 $i$  番目のバンドルに属する SWCNT の平均直径を  $2R_i$ 、バンドル内で隣り合う SWCNT の間のギャップ距離を  $g_i$ 、格子定数を  $a_i = 2R_i + g_i$  とおくと、SWCNT の粉末 X 線回折強度  $I(Q)$  は、各バンドルからの回折の和として次のように表せる。

$$\begin{aligned} I(Q) &\propto \sum_i \left| \int_{V_i} \rho_i(\vec{r}) \exp(-i\vec{Q} \cdot \vec{r}) dV_i \right|^2 \\ &= \sum_i |F_i|^2 \left| \sum_{l_i} \exp(-i\vec{Q} \cdot \vec{r}_{l_i}) \right|^2 \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、 $i$  番目の SWCNT バンドルの体積を  $V_i$ 、SWCNT の構造因子を  $F_i$  とした。 $l_i$  についての和は、 $i$  番目のバンドルの全ての格子点  $\vec{r}_{l_i}$  についての和であり、その絶対

値の二乗は、十分に大きな結晶の場合にはラウエ関数を与える。ここで、ラウエ関数を逆格子点  $G$  で極大値を持つピーク関数  $P_{G(i)}$  で近似し、等価な散乱の数を表す多

重度因子を  $N_{G(i)}$  とすれば、(11)式は次のように近似できる。

$$I(Q) \approx \sum_i |F_i|^2 \sum_{G(i)} (P_{G(i)} N_{G(i)}) \quad (12)$$

図 3 に示すように、SWCNT バンドルの 2 次元三角格子の逆格子は、やはり 2 次元三角格子であり、その基本逆格子ベクトルを  $(\vec{b}_1, \vec{b}_2)$  とおくと回折の条件式は、 $(h, k)$

を整数として  $\vec{Q} = \vec{G} = h\vec{b}_1 + k\vec{b}_2$  となり、回折ピークは

指数  $(h, k)$  で表すことができる。

さらに、十分に長い中空チューブでは、 $F_i$  は  $\vec{Q}$  がチューブ軸に垂直な場合のみ有限となり、その大きさは円筒ベッセル関数  $J_0$  に比例する。すなわち、 $R$  を SWCNT の半径、 $\vec{r}'$  を SWCNT の中心軸からの位置ベクトルとして、

$$F_i = \int \rho(\vec{r}') \exp(-i\vec{Q} \cdot \vec{r}') dV = 2\pi R \rho_0 J_0(RQ) \quad (13)$$

となる。ここで、 $\rho_0$  は SWCNT の側壁の面電荷密度である。

以上に加えて、実際の試料の回折パターンを再現するためには、ローレンツ偏向因子や試料に含まれる SWCNT の直径分布などを考慮せねばならない<sup>(5)</sup>。直径分布には、たとえばガウス分布を仮定する。更に、試料中に太さの異なる多数の SWCNT バンドルが存在する場合は、幅が異なるピーク関数  $P_{G(i)}$  の足し合せによって表現する。(細いバンドルは、幅広の回折線、したがって幅広のピーク関数  $P_{G(i)}$  を与える。)

SWCNT バンドル試料の XRD パターンの特徴は、バンドルが細い (100 Å 程度) こと、そしてバンドルを構成する SWCNT の直径が太い (10–20 Å) ことに起因する。バンドルが細い、すなわち coherence 長が短いために、各ピーク関数の半値全幅は  $0.06 \text{ \AA}^{-1} - 0.09 \text{ \AA}^{-1}$  程度まで広がる。一方、SWCNT の構造因子  $F_i$  の絶対値の二乗は、 $0.5 \text{ \AA}^{-1}$  程度の短周期で振動する。観測される回折強度は両者の積であるから、 $F_i$  の振動によって強く変調された非対称のピークプロファイルが観測されることになる。このため、例えば、ピーク位置を単純に格子定数に対応させることは危険である。一例として、典型的な直径 (13.6 Å) の SWCNT に対して計算された XRD パターンを図 4 に示す。図より、計算された XRD パターンのピーク位置は、ピーク関数のピーク位置に対して著しくシフトしていることが分かる。

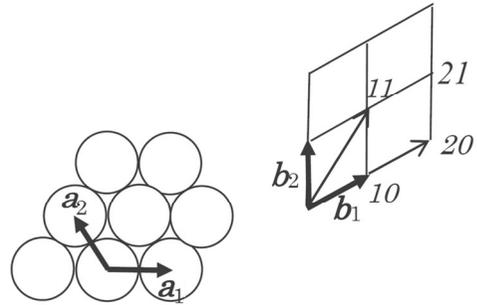


図 3 SWCNT バンドルの断面 (2 次元三角格子) と、その逆格子の模式図。

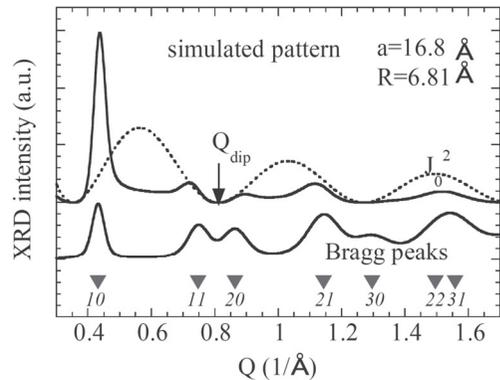


図 4 均一電子モデルを用いた XRD パターン計算の例。点線は二乗されたベッセル関数、下部の実線はピーク関数。上部の実線が、これらの積として得られる XRD パターンである。ピーク関数が幅広なのは、バンドルの細さを反映している。

#### 4.2 SWCNT の精密構造解析法

均一電子モデルからは SWCNT 内部の炭素原子の座標の情報は得られない。そこでごく最近、筆者らは SWCNT を構成する炭素原子の幾何学構造やバルク SWCNT 試料のカイラリティ分布を同定するための粉末 XRD 法を確立した<sup>(9)</sup>。その手法の概要を以下に述べる。

まず図 5 に、デバイの式 (3.1 節を参照) を用いて計算した XRD パターンと、均一電子モデル (4.1 節を参照) を用いて計算した XRD パターンの比較を示す。この 2 つの回折パターンの決定的な違いは、 $Q=3.0 - 4.0 \text{ \AA}^{-1}$  と  $Q=5.0 - 6.0 \text{ \AA}^{-1}$  付近に現れている。これらは、グラフェンの 10, 11 ブラッグピークの出現位置とよく一致する。

すなわち、デバイの式による計算では、SWCNT を構成する炭素原子の蜂の巣構造に由来する回折パターンが出現する。

次に、グラフェン、およびカイラリティの異なる 5 種類の SWCNT について計算された XRD パターンを図 6 に示す。計算は全て、デバイの式を用いて行われた。図より、XRD パターンは SWCNT のカイラリティによって敏感に変化することが分かる。すなわち、 $m = n$  や  $m \equiv n$  の SWCNT の回折は  $Q=5.0 - 6.0 \text{ \AA}^{-1}$  付近 (グラフェンの 11 ブラッグピーク位置近傍) で鋭いピークをもつ。一方で、 $m = 0$  や  $m \equiv 0$  では、 $Q=3.0 - 4.0 \text{ \AA}^{-1}$  付近 (グラフェンの 10 ブラッグピーク位置近傍) において類似の鋭いピークが見られる。これらの特徴は、SWCNT を構成する炭素原子の配列を反映している。すなわち、SWCNT のチューブ軸方向に依存して、グラフェン構造に由来する 10 と 11 ブラッグピークの微細構造が変化することが分かった。したがって、このような XRD パターンに着目することにより、SWCNT のカイラル指数を特定することができるのだ。いわば、SWCNT の“指紋認証法”である。

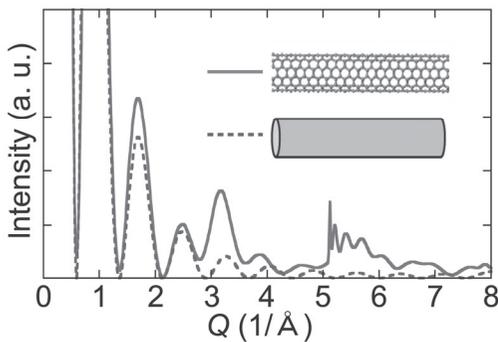


図 5 デバイの式を用いて計算した XRD パターン (実線) と、均一電子モデルを用いて計算した XRD パターン (破線) の比較。デバイの式による計算は、カイラル指数(6,6)の SWCNT 構造 (炭素原子間結合長を  $1.418 \text{ \AA}$  と仮定)、均一電子モデルによる計算は直径  $8.12 \text{ \AA}$  の中空円筒について行われた。

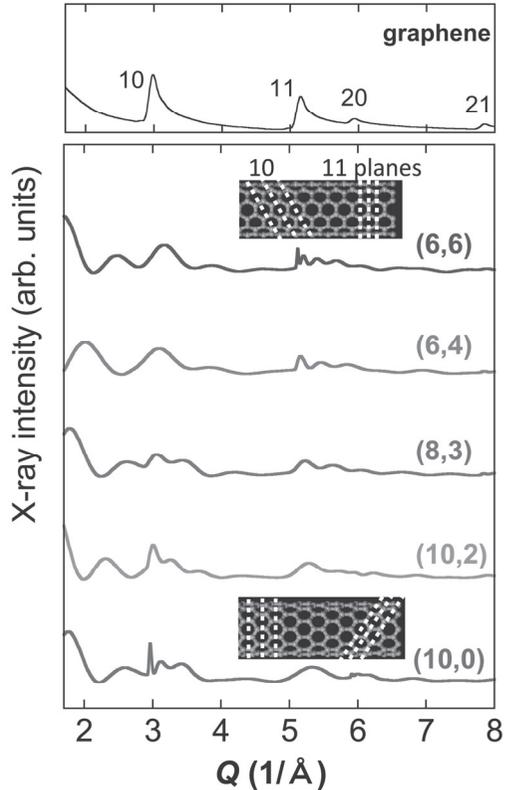


図 6 デバイの式を用いて計算された XRD 回折パターン。上図はグラフェン、下図はカイラリティの異なる 5 種類の SWCNT に対する計算結果を示す。計算に用いたグラフェンと SWCNT の炭素原子間結合長は  $1.418 \text{ \AA}$  である。各回折パターンは、縦方向にシフトして表示している。挿入図は、(6, 6)、(10, 0)SWCNT におけるグラフェン構造の(10)、(11)面を示している。

## 5. X 線回折実験

### 5.1 放射光 X 線回折実験の概要

筆者らは、高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 放射光施設内、構造物性研究用ビームライン BL8A, 8B の共同利用実験課題として、SWCNT やその他ナノ材料の粉末 X 線回折実験を行っている。放射光の特徴の 1 つが高輝度性であり、微量の試料 (SWCNT 試料であれば、 $0.1 \text{ mg}$  程度) であつても高分解能な精密構造解析を行うことが可能である。試料により散乱された X 線は、試料を囲い込むように配置されたイメージングプレート (IP) を感光させる。図 7 は IP から読み取った 2 次元回折像である。1 次元の X 線回折強度-散乱角 ( $I - 2\theta$ ) プロットは、この回折像の中心を通る細い

短冊状の領域内で回折強度を積分することにより求める。実験に用いる放射光の波長は  $1.00 \text{ \AA}$  である。

XRD 測定用の SWCNT 試料は、 $0.5 \text{ mm}\phi$  または  $0.7 \text{ mm}\phi$  の石英キャピラリーに詰め、SWCNT の空洞内部や外部の吸着物質を除去するために、ロータリーポンプで真空引きを行いながらライターの炎（温度  $770 \text{ K}$  程度）などで加熱する必要がある<sup>(2)</sup>。処理後、試料はそのままキャピラリーに真空封入する。

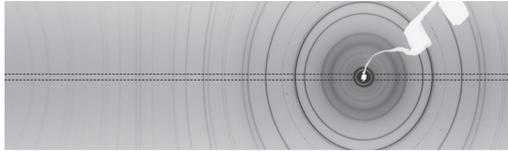


図7 SWCNT 試料の2次元回折像。X線回折強度は、ダイレクトビーム中心を通る幅  $1 \text{ cm}$  ( $100$  ピクセル) の細い短冊状の領域（図中の点線の内側）について読み取り、積分することによって求める。白い部分は、ダイレクトビームから IP を守るダイレクトビームストッパーの影。

## 5.2 SWCNT バンドル試料の評価

試料評価の一例として、実験により得られた XRD パターンと、均一電子モデルによって計算された XRD パターンの比較を図8に示す。図より、均一電子モデルは実際の SWCNT バンドル試料の XRD パターンをよく再現することが分かる。この計算によって決定された、試料を特徴づけるパラメータを表1に示す。

それぞれの回折ピークは SWCNT バンドルの2次元三角格子で指数付けできる。試料 B, C, D では、指数 11 にあたるブラッグピークが消失しているように見えるが、これには2つの要因がある。1つ目は、これらの試料では SWCNT の直径分布が大きいため、ピークがブロードになることである。2つ目は、SWCNT 直径が大きくなるにつれて、ベッセル関数  $J_0(RQ)$  の振動周期が短く

なり、 $J_0(RQ) = 0$  となる位置が 11 ピーク位置に接近することである。

一方、 $Q = 0.3 - 0.4 \text{ \AA}^{-1}$  近傍の顕著なピークは、指数 10 にあたるブラッグピークであり<sup>(20)</sup>、SWCNT の平均直径の増加に従ってピーク位置が低  $Q$  方向にシフトしていることが分かる。図9は、様々な SWCNT 試料の測定で得られた 10 ピーク位置を、その平均直径に対してプロット

したものである。10 ピーク位置はバンドルの太さにも影響されるが、現状の SWCNT 試料については、図中のフィッティング式を用いて 10 ピーク位置からの平均的な直径を近似的に見積もることができる。

以上のように、バンドル（結晶）が小さい、直径分布をもつなど、X線結晶構造解析には不向きとも思える SWCNT 試料であるが、その XRD パターンの特徴とそれがどのようにして決まるのかを正しく把握することができれば、試料内の SWCNT の平均直径とその直径分布、バンドルの格子定数、バンドルの太さなど、極めて有用な情報を得ることができる。

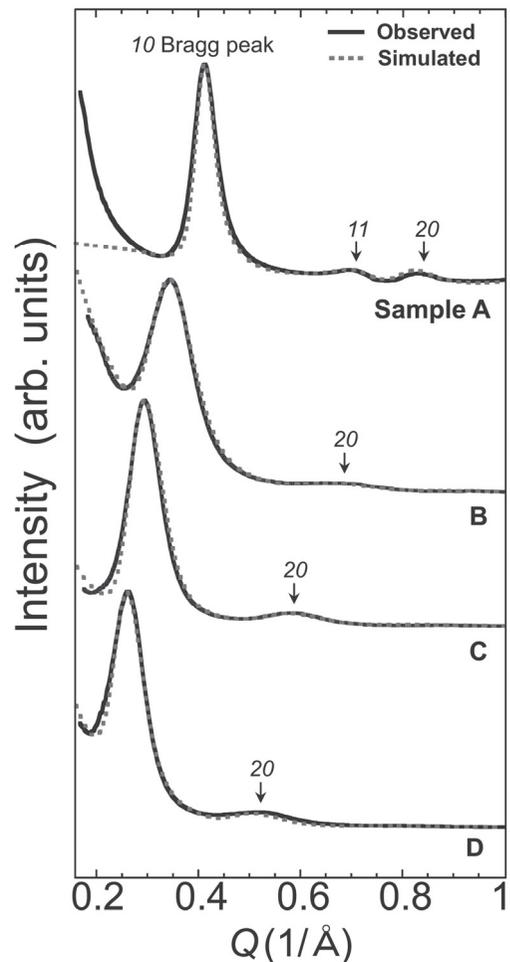


図8 4種類の SWCNT バンドル試料の XRD パターン。実線は実験、点線は均一電子モデルを用いた計算によって得られた。各回折パターンは、縦方向にシフトして表示している。

表1 XRD パターン計算 (図8) に用いたパラメータの一覧。ギャップ距離は、バンドル内で隣り合う SWCNT の間の距離である。直径とギャップ距離の和は、SWCNT バンドルの格子定数を与える。計算では、試料内に様々な厚みの SWCNT バンドルが存在することを表現するために、半値全幅の異なる複数のピーク関数を足し合わせる。表には、その平均値を示した。ピーク関数の半値全幅は、SWCNT バンドルの厚みに反比例する。

試料	平均直径 (Å)	直径分布 (Å)	ギャップ距離 (Å)	ピーク関数の半値全幅の平均値 (1/Å)
A	14.6	±0.6	3.0	0.059
B	16.8	±2.5	3.2	0.095
C	20.0	±2.9	3.2	0.062
D	24.0	±2.6	3.2	0.095

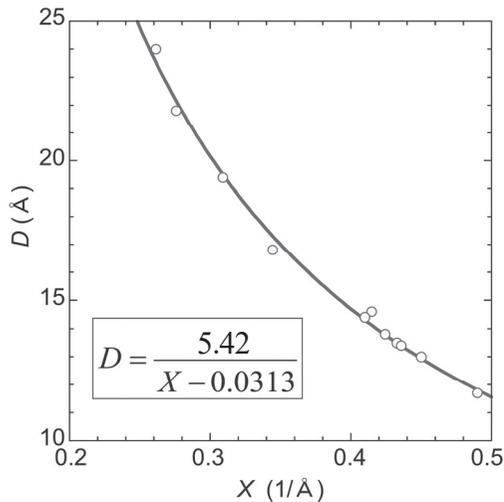


図9 10 ピーク位置  $X$  と SWCNT 直径  $D$  の関係。縦軸は XRD パターン計算から得られた SWCNT 平均直径、横軸は実験から得られたパターンの 10 ピーク位置。図中の式は、最小二乗フィットにより求めた。

### 5.3. SWCNT の精密構造解析

2節で述べたように、一般的な SWCNT 材料は様々なカイラリティの SWCNT を含有しているため、SWCNT 自体の構造 (炭素原子の配列など) の精密な測定には適していない。そこで筆者らは、単一構造の SWCNT を濃縮した試料、および金属型 SWCNT を濃縮した試料を製作し、それらに XRD 法を適用した。その結果、SWCNT 自体の構造を精密に同定することに成功した。以下では、

カイラル(6, 5)SWCNT 濃縮試料を用いた研究について、その概要を紹介する。

まず、カイラル(6, 5)の SWCNT は、ゲルカラム分離法<sup>(13)</sup>と密度勾配超遠心法<sup>(11)(12)</sup>を組み合わせることで、市販の SWCNT 原料 (CoMoCAT 704148 SG 65, SIGMA-ALDRICH) から抽出された。図10に、その XRD パターンを示す。XRD パターンの計算では、光吸収スペクトルから特定されたカイラリティ分布に基づいて複数の XRD パターンを足し合せ、さらに炭素原子間結合長を SWCNT の円筒方向およびチューブ軸方向に膨張・収縮させることにより、実験で得られた XRD パターンを再現した。結果として、(6, 5)SWCNT は、炭素原子間結合長が 1.418 Å のグラフェンを丸めた構造において、チューブ軸方向にはほとんど変化させず、円筒方向に 0.9±0.3 %ほど膨張させた構造であることが明らかになった。図10の下部には、円筒方向に 1 %膨張させた(6, 5)SWCNT の模式図を示した。結合長  $d_2 = d_3 = 1.421$  Å は、グラファイトの結合長とほぼ等しい。一方で、チューブ軸とほぼ垂直である  $d_1$  は、グラファイトよりわずかに大きい。この結果は、 $m = n$  の SWCNT の炭素原子間結合長に対する第一原理計算の結果<sup>(23)(24)</sup>と半定量的に一致している。

同様の手法を用いて、金属型 SWCNT 濃縮試料のカイラル同定を行った。その結果、用いた試料の主成分はカイラル(6, 6)と(7, 4)の SWCNT であり、その割合が 42 : 58 であることが明らかになった。カイラル(6, 6)と(7, 4)は光吸収スペクトルでは区別できないため、これは本手法によりはじめて得られた情報である。このように XRD 法は、従来の SWCNT 構造同定法の代替もしくは補完となり得る。

## 6. 結言

本報では、XRD を用いた SWCNT の構造解析法について述べた。その活用法の一つ目は、SWCNT バンドル試料の評価である。一般的な SWCNT 試料は、バンドル (結晶) が小さく、SWCNT が直径分布をもつなど、X 線結晶構造解析には不向きとも思えるが、その XRD パターンの特徴を正しく把握すれば、試料内の SWCNT の平均直径とその直径分布、バンドルの格子定数、バンドルの太さなど、極めて有用な情報を得ることができる。二つ目は、高純度 SWCNT 試料のカイラル同定である。XRD パターンは、SWCNT 内の炭素原子の配列に非常に敏感であり、SWCNT カイラリティの“認証法”として活用できる。この手法により、SWCNT の構造がグラフェンを円筒状に巻いた理想的な構造から大いに逸脱しているこ

とも明らかになった。以上のように、XRD法は従来のSWCNT材料評価法・SWCNT構造同定法の代替もしくは補完となり得る極めて有用な手法なのである。

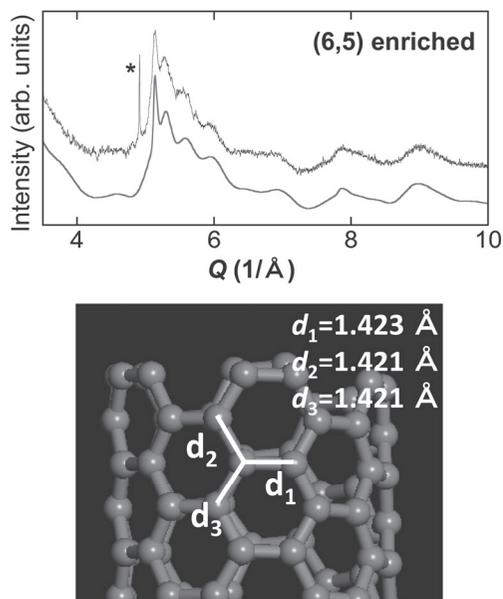


図10 SWCNTの精密構造解析の例。上図:(6,5)SWCNT濃縮試料のXRDパターン。ノイズの入った細い実線は実験、滑らかな太い実線は計算から得られた。下図:グラフェンを丸めてつなげた構造から、円筒方向(チューブ軸に垂直方向)に1%膨張させた(6,5)SWCNTの模式図。

#### 謝辞

本研究は、真庭豊教授、柳和宏准教授(首都大学東京)、片浦弘道博士、斎藤毅博士(産業技術総合研究所)をはじめとする多くの方々との共同研究として行われたものである。共同研究者の方々へ深く感謝いたします。

#### 参考文献

(1) K. Fujii, Y. Esaki, K. Omoto, M. Yashima, A. Hoshikawa, T. Ishigaki, J. R. Hester: *Chem. Mat.*, **26** (2014) 2488.  
 (2) M. Senda, T. Hayashi, M. Hatakeyama, K. Takeuchi, A. Sasaki, T. Senda: *Cryst. Growth Des.*, **16** (2016) 1565.  
 (3) S. Iijima: *Nature*, **354** (1991) 56.  
 (4) S. Iijima, T. Ichihashi: *Nature*, **363** (1993) 603.

(5) M. Abe, H. Kataura, H. Kira, T. Kodama, S. Suzuki, Y. Achiba, K. Kato, M. Takata, A. Fujiwara, K. Matsuda, Y. Maniwa: *Phys. Rev. B*, **68** (2003) 041405.  
 (6) Y. Maniwa, H. Kataura, M. Abe, S. Suzuki, Y. Achiba, H. Kira, K. Matsuda: *J. Phys. Soc. Jpn.*, **71** (2002) 2863.  
 (7) H. Kyakuno, K. Matsuda, H. Yahiro, Y. Inami, T. Fukuoka, Y. Miyata, K. Yanagi, Y. Maniwa, H. Kataura, T. Saito, M. Yumura, and S. Iijima, *J. Chem. Phys.*, **134** (2011) 244501.  
 (8) H. Kyakuno, K. Matsuda, Y. Nakai, T. Fukuoka, Y. Maniwa, H. Nishihara, T. Kyotani: *Chem. Phys. Lett.*, **571** (2013) 54.  
 (9) R. Mitsuyama, S. Tadera, H. Kyakuno, R. Suzuki, H. Ishii, Y. Nakai, Y. Miyata, K. Yanagi, H. Kataura, Y. Maniwa: *Carbon*, **75** (2014) 299.  
 (10) H. Kyakuno, M. Fukasawa, R. Ichimura, K. Matsuda, Y. Nakai, Y. Miyata, T. Saito, Y. Maniwa: *J. Chem. Phys.*, **145** (2016) 064514.  
 (11) M.S. Arnold, A.A. Green, J.F. Hulvat, S.I. Stupp, M.C. Hersam: *Nature Nanotech.*, **1** (2006) 60.  
 (12) K. Yanagi, Y. Miyata, H. Kataura: *Appl. Phys. Express*, **1** (2008) 034001.  
 (13) H. Liu, D. Nishida, T. Tanaka, H. Kataura, *Nature Commun.* **2** (2011) 1.  
 (14) T.W. Odom, J.L. Huang, P. Kim, C.M. Lieber: *Nature* **391** (1998) 62.  
 (15) X.F. Zhang, X.B. Zhang, G. Van Tendeloo, S. Amelincx, M. Op de Beeck, J. Van Landuyt: *J. Cryst. Growth*, **130** (1993) 368.  
 (16) A. Hagen, T. Hertel: *Nano Lett.*, **3** (2003) 383.  
 (17) R.B. Weisman: *Anal. Bioanal. Chem.* **396** (2010) 1015.  
 (18) 今野豊彦, “物質からの回折と結像”共立出版, (2003)  
 (19) B.D.カリティ, “X線回折要論”アグネ承風社, (1980)  
 (20) A. Thess, R. Lee, P. Nikolaev, H.D. Pierre, J. Robert, C. Xu, Y.H. Lee, S.G. Kim, D.T. Colbert, G. Scuseria, D. Tomanek, J.E. Fischer, R.E. Smalley, *Science* **273** (1996) 483.  
 (21) H. Kadowaki, A. Nishiyama, K. Matsuda, Y. Maniwa, S. Suzuki, Y. Achiba, H. Kataura: *J. Phys. Soc. Jpn.* **74** (2005) 2990.  
 (22) Y. Maniwa, R. Fujiwara, H. Kira, H. Tou, H. Kataura, S. Suzuki, Y. Achiba, E. Nishibori, M. Takata, M. Sakata, A. Fujiwara, H. Suematsu: *Phys. Rev. B*, **64** (2001) 241402.  
 (23) K. Kanamitsu, S. Saito: *J. Phys. Soc. Jpn.*, **71** (2002) 483.  
 (24) K. Kato, S. Saito: *Physica E*, **43** (2011) 669.



## ハドロサウルスの2足走行可能性

宇佐見 義之\* 衣笠 竜太\*\* 渡辺 祐佳那\*\*

### On a possibility of bipedal running of Hadrosaurus

Yoshiyuki USAMI\* Ryuta KINUGASA\*\* Yukana WATANABE\*\*

#### 1. はじめに

草食恐竜のひとつのグループとして、ハドロサウルスと呼ばれるグループがある。本稿では、まずハドロサウルスの紹介から入り、次に、ハドロサウルスの一種であるパラサウロロフスの走行可能性について検討する。

#### 2.1 ハドロサウルスとは

ハドロサウルスは大きなグループで、一般にもかなり良く知られている。この名前の由来であるがハドロというのは古代ギリシャ語で  $\acute{\alpha}\delta\rho\acute{o}\varsigma$  (*hadrós*, “thick”)と書き、厚い・かさばった・重いという意味がある。*sauros* はトカゲという意味なので、骨格からの復元からの推測として重いトカゲという程のニュアンスを持つ言葉であろう。日本語の文献では丈夫なトカゲと紹介されている場合が多い。ところで、筆者が所属する物理学の世界ではハドロロンという言葉がある。もちろん、ハドロロンと言えば物理学では重い粒子を指す言葉として有名であるが、恐竜のハドロサウルスと物理学のハドロロンとは語源が同じであることはなかなか一般には認識されていないであろう。

ハドロサウルスは4足歩行の草食恐竜であり、鳥盤目・鳥脚下目・ハドロサウルス科に属する。鳥盤目はステゴサウルスなどの草食恐竜を含むグループであり、ブラキオサウルスやスーパーサウルスなどの首の長い大型の草食恐竜を含む竜盤目とは異なるグループに属する。

ハドロサウルスの化石は世界中の白亜紀層に多産する。例えばカナダのプリティッシュ・コロンビア州、アメリカのモンタナ州などでは、ハドロサウルス科の一種エドモントサウルスの化石は非常に多く見られるようだ。

#### 2.2 日本のハドロサウルス類

日本におけるハドロサウルスとしては1934年、当時の日本領、樺太豊栄郡川上村からかなりまとまったハドロサウルス属の化石が見つかり、ニッポノサウルス・サハリエンシスと命名されて記載された。また、北海道のむかわ町で、後部大腿骨周辺のまとまったハドロサウルス類がごく最近発見された。北海道においては白亜紀の地層が露出する。川の周辺部に行けばイノセラムスが多産し、海棲の貝類をすぐに見つけることができる。また、アンモナイトも多産し化石コレクターが多くのアンモナイトを発掘し収集している。脊椎動物では、むかわ町でモササウルスの化石が見つかった。むかわ町の博物館が提供する標本を元に新種のモササウルスとして記載し発表された(1)。このように、北海道の白亜紀の地層からは海棲生物の化石がみつかるので、脊椎動物でも海棲の動物しか見つからないと思われていた。

この状況を変えたのが佐藤たまきである。佐藤はむかわ町博物館の保管庫にある脊椎の骨を見て、恐竜の特徴である血管弓があることを見出し、これが陸棲の恐竜の化石であることを発見した。その後、むかわ町学芸員櫻井和彦と北海道大学の小林次次らが共同で研究を行い、これがランベオサウルス亜科のオロロティタン属に最も近いという見解を出した(図1、図2)。

\*准教授：物理学教室

Associate Professor, of Institute of Physics

\*\*准教授：人間科学部

Associate Professor, Dept. of Human Science

\*\*\*学部学生、総合工学プログラム

Undergraduate student



図1 むかわ町博物館による2013年第一次発掘の様子(むかわ町徳別博物館)。



図3 Faro レーザースキャナーによるParasauroplophusの3次元スキャン計測

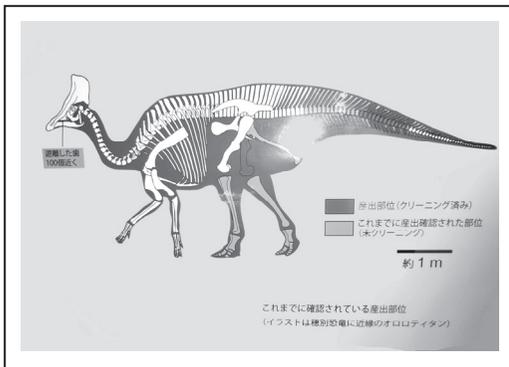


図2 近縁と思われるオロロティタンの骨格図に、発掘した部位の骨格を示したもの(むかわ町徳別博物館)。



図4 シカゴ・フィールズ博物館にマウントされているハドロサウルス類 Parasauroplophus. 頭骨が最大 1.2m にもなるのが特徴。音を出す器官としての機能があるとの研究報告がある。

### 2.3 ハドロサウルスは走行時に2足になるか?

一般によく知られているハドロサウルス類としてパラサウロロフスがいる。パラサウロロフスは属名であり、1922年に Parks により *Parasauroplophus walkeri* として記載されたのがこのグループの最初の記載となる。一般によく知られているパラサウロロフスであるが、他に *P. tubicen*, *P. cytocristatus* の2種が記載されているだけであり、化石産出としては珍しいグループである。この恐竜は頭部の長い頭骨が特徴で、良く知られており、映画ジュラシックパーク III の群れのシーンにも登場している。ここで問題となるのが、パラサウロロフスの歩行・走行の歩容である。一般にハドロサウルスの四肢は、前肢と後肢が非対称であるのが大きな特徴である。ハドロサウルスの後肢は前肢に比べて大きく発達している。他方で前肢は後

後肢に比べると非対称にかなり小さい。とは言えティラノサウルスほどになんの役にも立たなかったと思われる程には退化していない。このような後肢と前肢の非対称は何故生じたのであろうか? また、実際のところ、どのように歩いたり走ったりしたのであろうか?

歩行に関しては足跡の生痕化石が見つかっていて、4足で歩いた痕を遺す生痕化石が残されている。一方で、走る様子はどうか、というと、何も明らかになっていないのが現状である。映画「ジュラシックパーク III」では危機的な状況では後肢2脚で立つ様子が描かれている。しかし、学術的には後肢のみで立てたか、また、後肢2脚で走ったかどうかの検討はなされていない。

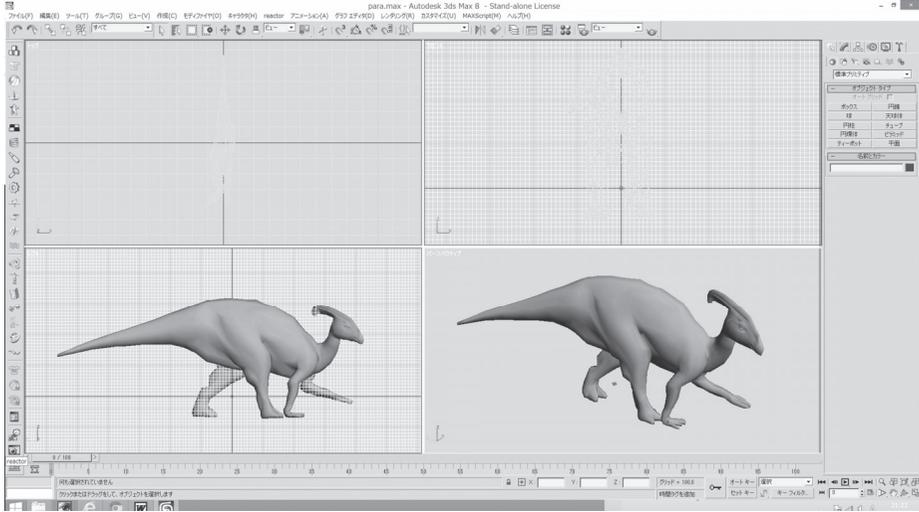


図5 3次元レーザースキャンをしたパラサウロロフスの骨格データを元に、3次元CGソフト 3dsmax 上で3Dのモデル化を行った様子。

本研究ではこの点を調べる為にまずパラサウロロフスの三次元計測を行った。標本としてはシカゴ・フィールズ博物館のマウント標本を用いた。三次元測定装置はFARO社のレーザ三次元測定装置を用いた。FARO社のレーザ三次元測定装置は位置のキャリブレーションとして3つの基準点を置く。これだけで、専用ソフト上でスキャンした物体の3次元形状がデータ化される(図3、4)。

FARO社製の三次元スキャナーでキャプチャした三次元形状をソフトウェアで加工する為に、xyz三次元上のデータポイントにまず変換した。そのデータを三次元

CGソフト 3dsmax 上で3Dのモデリング作業を行った(図5)。次に後肢のみにて立つ可能性を探る為、図6のような姿勢をとるようにパラサウロロフスのモデルを変形した。このような正確な体重分析の際に必ず必要な作業が密度0、すなわち空気の部分を筋・骨格・内臓などの密度 1g/cc の器官から減じることである。肺、気管などの部分をモデリングして、このような空気部分の体積を図6のように減じた。この時点で、重心の位置を探ると、後肢の先端にあることがわかった。この図の表示では矢状面の表示となるので、重心を鉛直のラインとして表現してある(図7)。

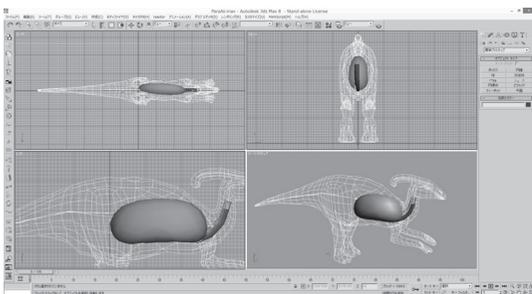


図6 肺、気管など、密度ゼロの部分モデリングし、全体の容積から減ずる作業を行った。

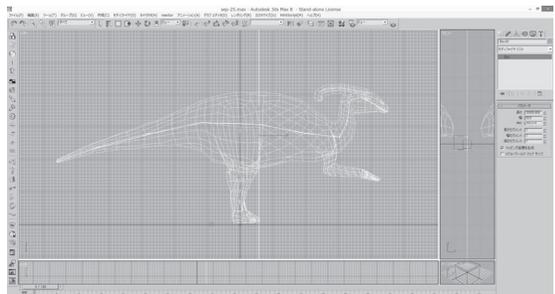


図7 パラサウロロフスの重心がどこにあるか?この姿勢においても重心が後肢の先端にあることがわかった。矢状面での記述の為、重心位置は鉛直のラインとして表現してある。

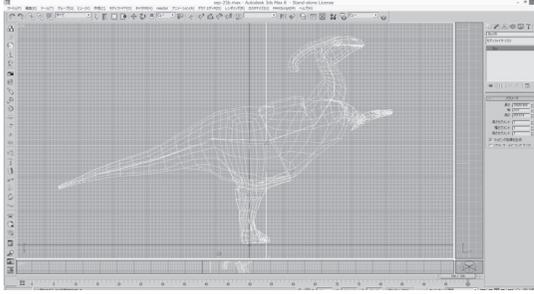


図8 立ち上がった姿勢におけるパラサウロロフスの重心。図4の状態よりわずかに後方に重心が移動する。矢状面での記述の為、重心位置は鉛直のラインとして表現してある。

更に、立った姿勢の重心位置を探るため、CG作成上のボーンを作成し、その周りでCG用のエンベロープを設定し、ボーンを動かすとパラサウロロフスのモデルの姿勢が変わるように3dsmaxのアニメーションを設定した。

CG上のボーンは図7ではパラサウロロフスの体幹と首、頭部に入っていることがわかる。このボーンを回転させて、パラサウロロフスの姿勢が立つようにアニメーション設定を作成した。このようにして、パラサウロロフスのモデルを立った姿勢にしたのが図8である。このような姿勢の変化をつけて分かったことは、上半身を立てる動作だけでは重心の前後位置はわずかにしか変わらないということである。他方において、わずかに変化した重心の前後位置をみると、後肢の足の位置に重なるように重心位置があることが分かる。この図から、パラサウロロフスは、上体を反らすことにより、後肢の2脚で立つことが可能であることが分かった。

### 3 恐竜の2足走行能力

#### 3.1 動的運動計算

予備的な結果であるが、パラサウロロフスの2足での走行性能の力学計算を行った。計算手法はこれまでの筆者が行ってきた手法と同様であるが、改めてここに手法を記述する。まず、2足走行の運動を純粋に数理的に作るのは非常に難しい。そこで、予め人間の2足走行のモーションキャプチャを行った。Vicon Motion Systems社製のVICONシステムを用いて人間の2足走行の足の動きをデータ化した。次に、この動きは周期的な運動なので、

フーリエ級数として表す。

$$\theta_i(t) = a_i^0 \sin(0t + \delta_i^0) + a_i^1 \sin(\omega t + \delta_i^1) + \dots + a_i^5 \sin(5\omega t + \delta_i^5) \quad (1)$$

フーリエ級数の時間に関して5次までの項を取り入れることにより、誤差が1%以内でモーションキャプチャのデータを再現することができた。この(1)式において、係数  $a$  は回転する角度の大きさ、 $\delta$  が運動の違いを表す。係数  $a$  も本来は最適計算の内のパラメータとみなすべきであるが、本計算では、ある範囲で変化させて最適な運動を見つけることにした。最適な運動とは、床反発力が過大にならない範囲で速く前進することを指す。次に、 $\delta$  が運動の違いを表すので、 $\delta$  について最適化の計算を行うことにした。

2足の動力学として、本来は各関節を動かす5自由度×2程度のラグランジアンを作り、ラグランジュ運動方程式を解くことが正道である。しかし、本研究では、10自由度のラグランジアンを解く煩雑さを避け、1体近似を行って簡略に走行運動の様子を探ることにした。

1体近似においては、動物の重心の併進運動と回転運動のみを考える。

$$m_{body} \frac{d^2 \bar{X}}{dt^2} = -m_{body} g \Big|_y + \bar{F}(\bar{r}) \quad (2)$$

$$I \frac{d^2 \Phi}{dt^2} = \bar{r} \cdot \bar{F}(\bar{r}) \quad (3)$$

ここで  $\bar{X}$  と  $\Phi$  は重心位置と回転角である。運動は矢状面の2次元面内に限るとする。 $I$ ,  $g$  and  $\bar{r}$  は慣性モーメント、重力加速度、重心から接地位置へのベクトルである。 $-m_{body} g \Big|_y$  は鉛直方向の重力の作用を表す。

2足の後肢の各セグメントの力学は次のようなものになることが良く知られている。

$$\bar{F}_1 - \bar{F}_2 - m_1 g \Big|_y = m_1 \bar{a}_1 \quad (4)$$

$$\bar{x}_{1g} \times \bar{F}_1 - \bar{x}_{2g} \times \bar{F}_2 + M_1 - M_2 = I_1 \dot{\omega}_1 \quad (5)$$

$\bar{F}_1$ ,  $\bar{F}_2$ ,  $\bar{a}_1$  はセグメントの下部からの力と上部からの力、セグメント全体が動く加速度を表す。 $\bar{x}_{1g}$ ,  $\bar{x}_{2g}$  セ

グメントの中心からの力の働く方向への位置ベクトル、 $M_1, M_2, \dot{\omega}_1$  は回転モーメント力、角速度の時間微分を表す。ここで、足先が接地している状態では、ほとんど力が鉛直方向にかかるので、角速度の時間微分はこれに比べてごく小さい。そこで、(5) 式の右边をゼロとする近似を行う。この近似は水平方向の加速度があまり変化しない走行運動では妥当な近似であると考えられる。

また接地の条件式として以下を考える。

$$F_y(y) = -ky - \gamma y \quad (6)$$

ここで  $y, v_y, F_y$  は鉛直方向の位置と速度ベクトル、鉛直方向の力を表す。 $k$  と  $\gamma$  が接地の力学を決めるパラメーターとなる。本研究では  $k=1.0 \times 10^7$  N/m  $\gamma=2.0 \times 10^5$  Ns/m と置いた。このパラメーターには不定性があり、これが唯一最適であるという保証は無い。しかし、シミュレーションを多数行うことにより、この値を含む広い領域で最終結果はさほど変わらないことが計算上確認された。

### 3.2 進化アルゴリズム

1 式の  $\delta$  を決めれば最適な運動、すなわち、より速い速度で、かつ小さな鉛直方向の床反発力の運動が得られる。このパラメーター  $\delta$  を決めるのに如何なる方法が良いかということが問題となる。ここで、この  $\delta$  の最適値を求める方法として、まずシミュレーテッド・アニーリング法と進化計算法で比べてみたのが図9である。ここでは2足走行のテストとしてティラノサウルスの場合で進化アルゴリズムの検証を行った。

ここでの進化アルゴリズムは最も単純なものを使っている。すなわち、2000 個のランダムな  $\delta$  からスタートして、最上位の  $\delta$  を動力学シミュレーションにより選び、それを親として、また 2000 個のランダムな個体  $\delta$  を作り出す方法を繰り返した。図9からわかることは、最適化手法として非常に優れた近似法であるシミュレーテッド・アニーリングより単純な進化アルゴリズムの方が小さな鉛直加速度を得られることが分かった。

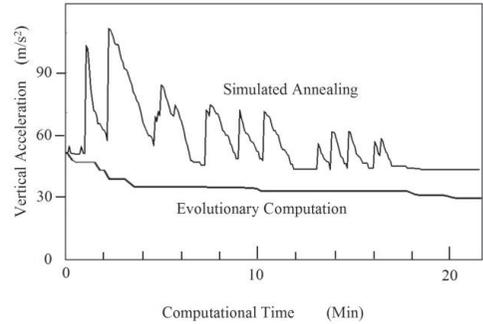


図9 シミュレーテッド・アニーリング法と、進化アルゴリズム法の比較。計算時間が経った時、垂直の加速度がどの位低減できるかを示した。

次に、遺伝的アルゴリズムで良く出てくる進化計算法の比較をおこなった(図10)。ルーレット法、ルーレット法+エリート保存、比例選択法である。

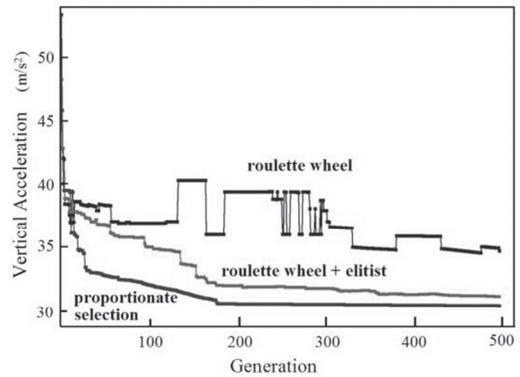


図10 シミュレーテッド・アニーリング法と、進化アルゴリズム法の比較。計算時間が経った時、垂直の加速度がどの位低減できるかを示した。

これらの結果として進化アルゴリズムにより走行運動の準最適解が近似的に求まることが分かった。

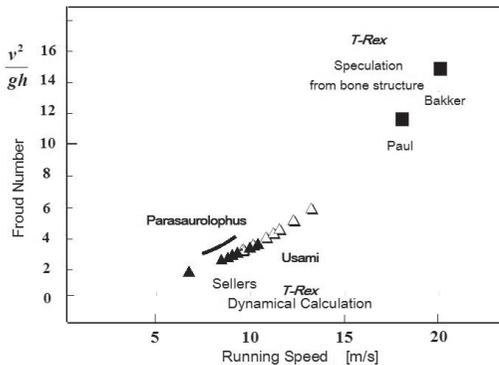


図1 1 ティラノサウルスの走行速度と今回パラサウロロフスの2足走行を並置した図。横軸は走行速度、縦軸はFroude数を表す。

この結果を元に、パラサウロロフスの2足走行に適応した予備的な計算結果を図1 1に示す。計算では走行速度として6m/s~8m/sの走行速度が得られた。一方、ティラノサウルスの走行速度としては筆者の計算により14m/s程度までの可能性が示されている(2)。PaulやBakkerらによる1980年代の評価としては、骨の形状から速度18~20m/sまでの速さで走れるのでは、という推測がなされていた。他方で2002年以来Hutchinsonらが静的計算により、速くは走れないとの学説が提案された。この学説は、その後、Sellersらの動力学の計算により速度10m/s程度まで可能との結果や、筆者の14m/sまで可能との結果と対立した状況にある。

パラサウロロフスに関しては、2足での走行が可能かどうか、これまで検証はなされていなかったが、静的な計算(図6-8)により、体重に質量分布として2足で立つ姿勢が可能との結論が今回得られた。また、非常に予備的な計算ながら、筆者の動力学の計算により、パラサウロロフスは速度6~8m/sで走行可能との結果が得られた。今後は、より数値計算の妥当性を高める作業が必要とされる。

これらの結果を表示する為に、研究室に液晶80インチ3面のディスプレイセットを構築した。現在、コンテンツとして、2K3面の解像度の映像を作り、この大型表示装置に映し、古代の生態系をリアルに感じ取れる装置作りを構築中である。

#### 4 人間の4足走行能力の可能性

宇佐見は人間科学部の衣笠と共同で、人間の4足走行の可能性について研究を進めている。これは、いとう・けんいち氏が4足走行の時間短縮記録に挑戦する過程で、1年に1度の4足走行大会が開かれるようになり、その走行速度上昇の短時間における急速な改善という結果を基に進められている研究である。いとうけんいち氏はこの分野のただ一人のパイオニアであり、過去数年間に渡って、記録の更新を続けギネスレコードにも登録されていた。ところが2014年玉腰活末氏により王座を奪還される事件が起きた。いとうけんいち氏はめげずに練習に励み、ついに2015年、世界王者のタイトルを奪還した。

さて、これらの記録を時系列的に並べ、更に将来の記録の進化を予想した。2足走行の世界記録保持者は、本原稿執筆時ではウサイン・ボルトの100mを9.57秒で走行したのが最速である。100mの2足走行の記録を時系列的に並べてみた。それを見ると1900年代の10秒台から100年かけて9秒台への進化を遂げていることがわかった(4)。ところが、4足走行では、ここ数年で、1.8秒台から1.5秒台へと劇的進化が達成されている。単純に外形的な速度(100mの時間)の年代ごとの推移を計算して、ここ数年の劇的な4足走行のスピードアップを延長すると2030年代から2070年代には2足走行の速度を上回る可能性があることが示唆された。いつの日か、人間が4足で走る競技に、世界最速の人間が集まって競技する時代が来るかも知れない。

#### 参考文献

- (1) Takuya Konishi, Michael W. Caldwell, Tomohiro Nishimura, Kazuhiko Sakurai & Kyo Tanoue, "A new halisaurine mosasaur (Squamata: Halisaurinae) from Japan: the first record in the western Pacific realm and the first documented insights into binocular vision in mosasaurs insights into binocular vision in mosasaurs". J. Sys. Palaeo, Online: 07 Dec 2015. DOI:10.1080/14772019.2015.1113447
- (2) Yoshiyuki Usami, "Biomechanics of Bipedal Dinosaur: How Fast Tyrannosaurus Could Run? ", CREATSPACE (2015).
- (3) Yoshiyuki Usami and Ryuta Kinugasa, "A POSSIBILITY OF FAST RUNNING OF TYRANNOSAURUS". Submitted to Natural Science, in 2016.
- (4) Ryuta Kinugasa and Yoshiyuki Usami, "How Fast Can a Human Run? –Bipedal vs. Quadrupedal Running", Front. Bioeng. Biotechnol., 30 June 2016. <http://dx.doi.org/10.3389/fbioe.2016.00056>.



## 多光子イオン化過程を利用する新反応開発

岩倉 いずみ\* 赤井 昭二\*\* 太田 佳宏\*\*\*

### Development of Novel Reaction using Multiphoton Ionization

Izumi IWAKURA\* Shoji AKAI\*\* Yoshihiro Ota\*\*\*

#### 1. 緒言

化学反応は、化合物が光エネルギーを吸収することで電子励起状態において反応が進行する光反応と、化合物が熱エネルギーを吸収することで電子基底状態において反応が進行する熱反応とに大別できる。ところが、1980年代後半からチタンサファイアレーザーの開発が急速に進み、さらなるレーザーパルス幅の最短化、および、レーザーパルス光の高強度化に伴い<sup>1-5</sup>、レーザー光の高強度性や、単色性に着目した従来の光反応・熱反応とは異なる新反応開発が試みられるようになった<sup>6,7</sup>。本研究では、可視-極限的超短パルスレーザー光の発生と可視-極限的超短パルスレーザー光の特徴を活かした新反応開発を目指した。

#### 2. 可視-極限的超短パルスレーザー光の安定性評価

昨年度、可視-極限的超短パルスレーザー光照射により、光反応とも熱反応とも異なる反応が進行することを見いだした。ところが、再現性に問題が生じた。そこで、発生させた可視-極限的超短パルスレーザー光の安定性をポンプ・プローブ測定により評価することにした。ポンプ・プローブ測定を試料としては、7,7,8,8-Tetracyanoquinodimethane (TCNQ) のメタノール溶液を用いた。TCNQは1960年にDu Pont社から合成が報告されて以来<sup>8</sup>、そのアクセプター性に注目した様々な研究が行われており、有機半導体の一種として有名である。

TCNQをメタノールに溶解させ、飽和溶液を調製した。調製した黄色い溶液を、ガラス製容器に入れ自然光下に静置すると、ガラス容器から溶け出すNa<sup>+</sup>イオンと反応し、徐々に濃い緑色の溶液に変化する(図1a)。約5週間後には、Na<sub>2</sub>[TCNQ]<sub>2</sub>由来の電荷移動帯が650 nm付近に現れた<sup>9-13</sup>。調製直後と5週間後の溶液の紫外・可視吸収スペクトルを図1bに示す。

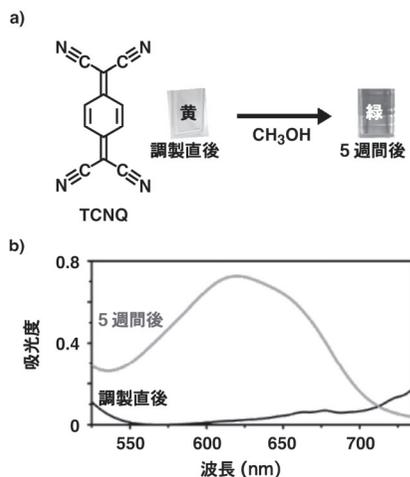


図1. a) 調製試料の色の変化. b) 調製試料の紫外・可視吸収スペクトル。(黒線: 調製直後, 緑線: 5週間後)

測定に用いた可視-極限的超短パルスレーザー光のスペクトル(図2)は、Na<sub>2</sub>[TCNQ]<sub>2</sub>の電荷移動帯(図1b)と良く重なっており、可視-極限的超短パルスレーザー光照射によりこの電荷移動帯を1光子励起することが可能である。そこで、可視-極限的超短パルスレーザー光を用いてポンプ・プローブ測定を試みることにした。ポンプ・プローブ測定の概略図を図3に示す。ポンプ光の光路に

\*准教授 化学教室  
Associate Professor, Dept. of Chemistry

\*\*准教授 物質生命化学科  
Associate Professor, Dept. of Material and Life Chemistry

\*\*\*特別助教 物質生命化学科  
Assistant Professor, Dept. of Material and Life Chemistry

チョッパーを挿入することで、基底状態の試料を透過したプローブ光のスペクトル (Tスペクトル) とポンプ光で励起された試料を透過したプローブ光のスペクトル (T' スペクトル) とを測定する (図3a) . 計測された T' スペクトルとTスペクトルの差を  $\Delta T$  スペクトルとし、Tスペクトル及び  $\Delta T$  スペクトルを用いて差吸収スペクトル ( $\Delta A$  スペクトル;  $\Delta A = -\log(1+\Delta T/T)$ ) を算出する. 図3b に示すように、ポンプ光で試料を励起し、そこにプローブ光を照射することで、プローブ光のエネルギーにより第一励起状態から高励起状態へ叩き上げられることによる誘起吸収過程と、逆にプローブ光のエネルギーにより第一励起状態から基底状態に叩き落とされることによる誘導放出過程、さらに基底状態の試料が第一励起状態に励起される吸収飽和過程が計測される. 誘起吸収の減衰成分に由来する  $\Delta A$  スペクトルは正に、誘導放出の減衰成分に由来する  $\Delta A$  スペクトルは負に現れる.

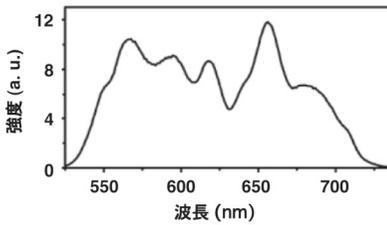


図2. 可視-極限的超短パルスレーザー光のスペクトル.

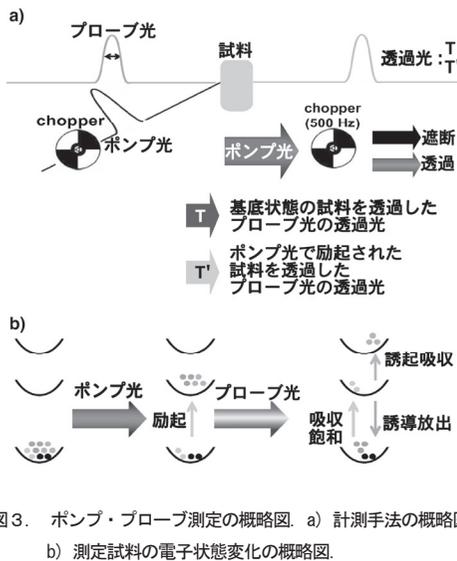


図3. ポンプ・プローブ測定 の概略図. a) 計測手法の概略図. b) 測定試料の電子状態変化の概略図.

調製した  $\text{Na}_2[\text{TCNQ}]_2$  メタノール溶液を測定することで得られた、Tスペクトル及び  $\Delta T$  スペクトルを用いて差吸収スペクトル ( $\Delta A$  スペクトル) を算出した. ところが、横軸にプローブ光遅延時間、縦軸に  $\Delta A$  の信号強度をプロットした結果、図4に示すようにプローブ光の短波長側においても、長波長側においても実時間吸光度変化にノイズが大きく現れ、発生させた可視-極限的超短パルスレーザー光が不安定であることが示された.

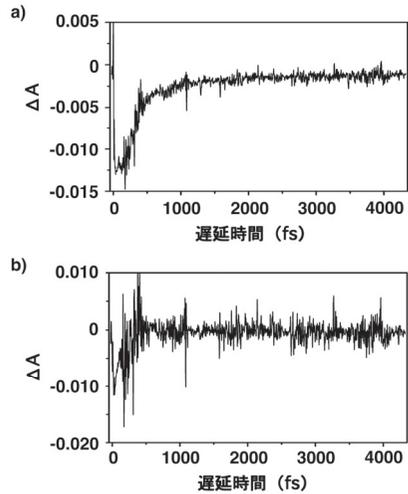


図4. 実時間吸光度変化. a) プローブ光波長 575 nm. b) プローブ光波長 700 nm.

### 3. レーザールームの温度・湿度制御

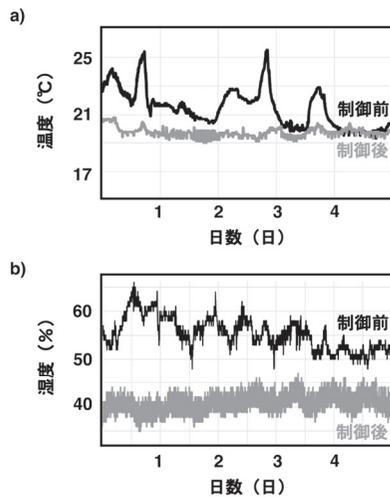


図5. レーザールーム内の温・湿度変化. a) 温度. b) 湿度.

前述したように、発生させた可視-極限的超短パルスレーザー光が不安定であったため、次にレーザールームの温度と湿度をより厳密に制御することを試みた。大型空調設備を導入し、窓の断熱材を補強した結果、図5に示すように、レーザールーム内の温度、および湿度の変化が小さくなった。

#### 4. 可視-極限的超短パルスレーザー光の安定性の再評価

レーザールーム内の温度と湿度が安定したため、再度、 $\text{Na}_2[\text{TCNQ}]_2$  メタノール溶液を試料に用いて可視-極限的超短パルスレーザー光によるポンプ・プローブ測定を試みた。ポンプ・プローブ測定の結果得られたTスペクトルおよび $\Delta T$ スペクトルの2次元スペクトルを図6に示す。2次元スペクトルの横軸はプローブ光波長、縦軸はプローブ光遅延時間、カラーマップは強度を示す。計測されたTスペクトルの時間変化はパルスレーザー光の安定性を示している。そのため、T-2Dスペクトル(図6a)が一定であることから、測定時間(約5-6時間)内においては、パルスレーザー光のスペクトルと強度が安定していることが確認できた。また、T'スペクトルとTスペクトルとの差である $\Delta T$ スペクトルの強度はプローブ光遅延時間と共に減衰していることから(図6b)、 $\text{Na}_2[\text{TCNQ}]_2$ の電子励起状態における動的過程が計測されていると考えられる。

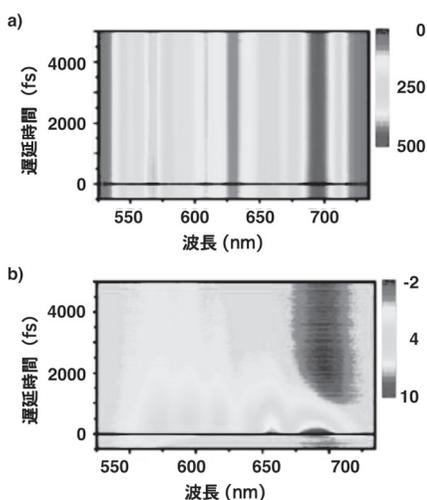


図6. 可視-極限的超短パルスレーザー光を用いたポンプ・プローブ測定結果<sup>1)</sup>. a) T-2Dスペクトル. b)  $\Delta T$ -2Dスペクトル.

次に、計測されたTスペクトル及び $\Delta T$ スペクトルを用いて差吸収スペクトル( $\Delta A$ スペクトル)を算出した。その結果、図7に示す実時間吸光度変化が得られた。図4と比較するとプローブ光の短波長側においても、長波長側においてもノイズが減少した。また、分子振動変化を反映していると思われる細かな振動が現れた。そこで、実時間吸光度変化に現れるこの細かな振動をフーリエ変換することで解析した。

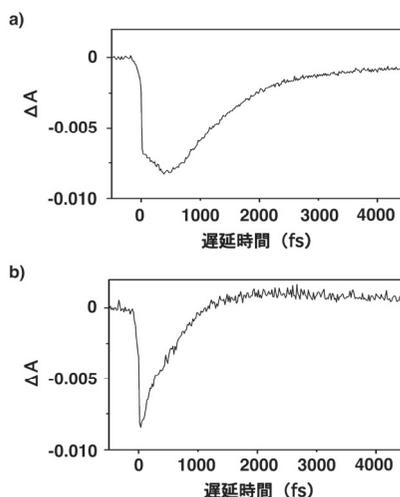


図7. 実時間吸光度変化<sup>1)</sup>. a) プローブ光波長 575 nm. b) プローブ光波長 700 nm.

図8に示すように、TCNQはラマン活性な分子振動として、 $1208\text{ cm}^{-1}$ にキノジメタン骨格のCH変角振動( $\delta_{\text{CH}}$ )、 $1456\text{ cm}^{-1}$ にキノジメタン末端のC=C伸縮振動( $\nu_{\text{C=C}}$ )、 $1604\text{ cm}^{-1}$ にキノジメタン6員環部位のC=C伸縮振動( $\nu_{\text{C=C}}$ )、 $2227\text{ cm}^{-1}$ にCN伸縮振動( $\nu_{\text{CN}}$ )を有している。例えば、 $1604\text{ cm}^{-1}$ に現れる $\nu_{\text{C=C}}$ 伸縮振動は約20 fs周期の振動であり、 $1208\text{ cm}^{-1}$ に現れる $\delta_{\text{CH}}$ 変角振動は約30 fs周期の振動である。そのため、分子振動周期よりも十分に短いパルス幅を有する可視-極限的超短パルスレーザー光を用いると、結合長が一度伸びてから縮むまでの1周期内に、約5点計測することができる。そのため、正弦波を描くことができ、分子振動を振動の実時間で計測することが可能である。そこで、プローブ光の短波長側(575 nm)と長波長側(700 nm)の実時間吸光度変化を、プローブ光遅延時間30 - 580 fsの時間領域においてhanning窓関数を用いてフーリエ変換した。

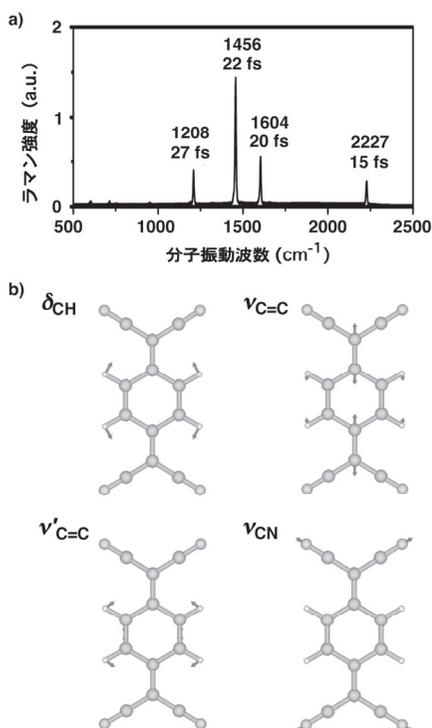


図8. a) TCNQのラマンスペクトル<sup>14</sup>. b) 密度反関数法 (B3LYP/6-31+G\*)を用いた分子振動モードの計算結果

その結果得られたFFTスペクトルを図9に示す。プローブ光波長575 nmのFFTスペクトルでは、1030  $\text{cm}^{-1}$ 、1205  $\text{cm}^{-1}$ 、1350  $\text{cm}^{-1}$ 、1605  $\text{cm}^{-1}$ 、2205  $\text{cm}^{-1}$ にピークが現れた(図9a)。一方、プローブ光波長700 nmのFFTスペクトルでは、1030  $\text{cm}^{-1}$ 、1205  $\text{cm}^{-1}$ 、1400  $\text{cm}^{-1}$ 、1595  $\text{cm}^{-1}$ 、2215  $\text{cm}^{-1}$ にピークが現れた(図9b)。これら5種類の分子振動の中で、1200~2215  $\text{cm}^{-1}$ に現れる4種類の分子振動は溶質(TCNQアニオン)に由来する分子振動に帰属できるのに対し、1030  $\text{cm}^{-1}$ に現れるピークは、メタノールのC—O伸縮振動( $\nu_{\text{C-O}}$ )に帰属できる。また、TCNQの最低空軌道はキノジメタン末端C=Cの反結合性軌道であるため(図10)、TCNQ、TCNQ<sup>-</sup>、TCNQ<sup>2-</sup>とTCNQの最低空軌道( $\phi_{53}$ )に電子が一つずつ増えると、キノジメタン末端C=Cの結合次数が低下する。図9に示すようにプローブ光波長に依存して $\nu_{\text{C=C}}$ 伸縮振動由来のピークが大きくシフトしていることから、プローブ光波長575 nmの実時間吸光度変化にはTCNQ<sup>2-</sup>の分子振動が反映されているのに対し、プローブ光波長700 nmの実時間吸光度変化にはTCNQの分子振動が反映されていることが

示唆された。確認のため、混合密度汎関数法(B3LYP/6-31+G\*)<sup>15</sup>を用いてTCNQとTCNQ<sup>2-</sup>の分子振動を計算した結果(表1)、測定結果と良い一致を示した。

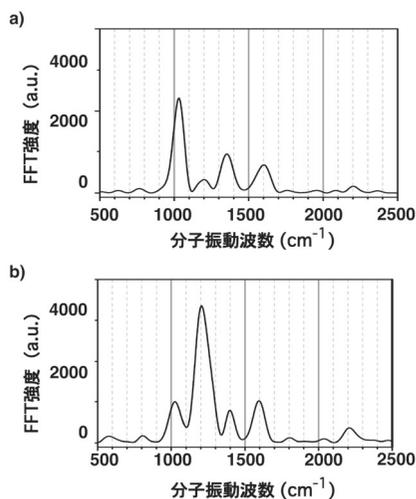


図9. FFTスペクトル<sup>14</sup>. a) プローブ光波長575 nm. b) プローブ光波長700 nm

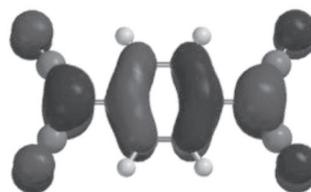


図10. TCNQの最低空軌道( $\phi_{53}$ )<sup>14</sup>.

表1. 計算された分子振動周波数( $\text{cm}^{-1}$ )<sup>14</sup>

	$\delta_{\text{CH}}$	$\nu'_{\text{C=C}}$	$\nu_{\text{C=C}}$	$\nu_{\text{CN}}$
TCNQ	1240	1493	1675	2324
TCNQ <sup>-</sup>	1230	1396	1654	2279
TCNQ <sup>2-</sup>	1223	1318	1654	2239

## 5. 可視-極限的超短パルスレーザー光を利用する ポンプ・プローブ測定

プローブ光の短波長側と長波長側で計測された分子振動が異なったため(図9)、次に電子状態の変化を解析した。各プローブ光波長における実時間吸光度変化を式1に示す3次の指数関数式を用いてフィッティングすることで、時定数を求めた(図11)。求められた時定数の平

均値は、 $\tau_1 = 10$  fs,  $\tau_2 = 350$  fs,  $\tau_3 = 900$  fs と算出された。

$$\Delta A = \Delta A_1 \exp(-t/\tau_1) + \Delta A_2 \exp(-t/\tau_2) + \Delta A_3 \exp(-t/\tau_3) + \Delta A_0 \quad (\text{式1})$$

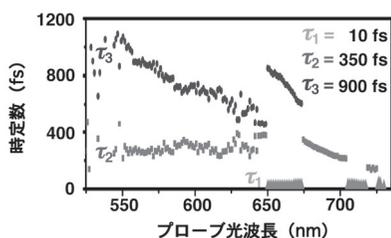


図11. 各プローブ光波長ごとに求められた時定数<sup>14</sup>.

計算された $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$ を式1に代入することで得られる式2を用いて、各寿命成分の成分量である $\Delta A_1$ ,  $\Delta A_2$ ,  $\Delta A_3$ および、定常的に存在する成分 $\Delta A_0$ を各プローブ光波長で求めた(図1 2a). 寿命900 fsの成分を示す $\Delta A_3$ スペクトルは負の領域に現れたことから、誘導放出に帰属できると推定した. 原形の $[\text{TCNQ}]_2^{2-}$ は、760 nmに発光極大(図1 2c 灰色線)を示し、生成物であるTCNQの発光極大は430 nm<sup>13</sup>,  $\text{TCNQ}^{\cdot-}$ の発光極大は608 nm(図1 2b 黒線)に現れる. 図1 2bに示すように、 $\Delta A_1$ スペクトルと $\text{TCNQ}^{\cdot-}$ の定常状態における蛍光スペクトルが重なることから、 $\Delta A_1$ スペクトルは $\text{TCNQ}^{\cdot-}$ の励起一重項状態からの誘導放出であると帰属した.

$$\Delta A = \Delta A_1 \exp(-t/10) + \Delta A_2 \exp(-t/350) + \Delta A_3 \exp(-t/900) + \Delta A_0 \quad (\text{式2})$$

一方、寿命350 fsの成分を示す $\Delta A_2$ スペクトルでは、短波長領域では正の領域に、長波長領域では負の領域に信号が現れた. 図7aに示したようにプローブ光波長が575 nmの実時間吸光度変化は、励起後一度成分が増加してから減衰している. 式1を用いてフィッティングすると誘導放出の減衰成分は $\Delta A$ の符号が負となり、誘導放出の増加成分は $\Delta A$ の符号が正となる. そのため、正の $\Delta A_2$ スペクトルは $\text{TCNQ}^{\cdot-}$ の誘導放出の立ち上がりに帰属できると推測した. 一方、負の $\Delta A_2$ スペクトルは原系である $[\text{TCNQ}]_2^{2-}$ の誘導放出の減衰に帰属できると推定し、 $[\text{TCNQ}]_2^{2-}$ および $\text{TCNQ}^{\cdot-}$ の蛍光スペクトルを足し合わせた

スペクトル(図1 2c ピンク線)と $\Delta A_2$ スペクトル(図1 2c 緑線)とを比較した. その結果、図1 2c ピンクの線と緑線が重なっていることから、原系である $[\text{TCNQ}]_2^{2-}$ の不均化反応に伴い $\text{TCNQ}^{\cdot-}$ が増加する過程が計測できていると考察した.

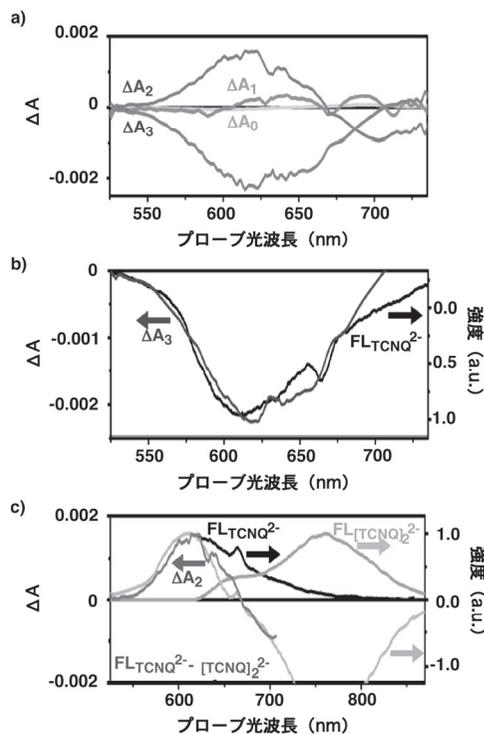


図12. a)  $\Delta A_0$ ,  $\Delta A_1$ ,  $\Delta A_2$ ,  $\Delta A_3$ スペクトル<sup>14</sup>.  
b)  $\Delta A_3$ スペクトルと $\text{TCNQ}^{\cdot-}$ の蛍光スペクトルとの比較.  
c)  $\Delta A_2$ スペクトルと $[\text{TCNQ}]_2^{2-}$ の蛍光スペクトルと $\text{TCNQ}^{\cdot-}$ の蛍光スペクトルとの比較.

また、寿命10 fsの成分スペクトルは、ゼロ不均に現れた. この信号が $\text{Na}_2[\text{TCNQ}]_2$ 由来であるか、ポンプ光とプローブ光の干渉縞であるかを確認するため、次にメタノール溶媒のみのポンプ・プローブ測定結果と比較した. 図1 3aに示すように、可視-極限的超短パルスレーザー光で電子状態を励起することが不可能であるメタノール溶媒を測定すると波長ごとに波打つポンプ光とプローブ光の干渉縞が現れた. これに対し、 $\text{Na}_2[\text{TCNQ}]_2$ のポンプ・プローブ測定結果にはプローブ光の遅延時間に伴い減衰する信号が現れており、光励起直後の電子の動きを反映していると考えられる.

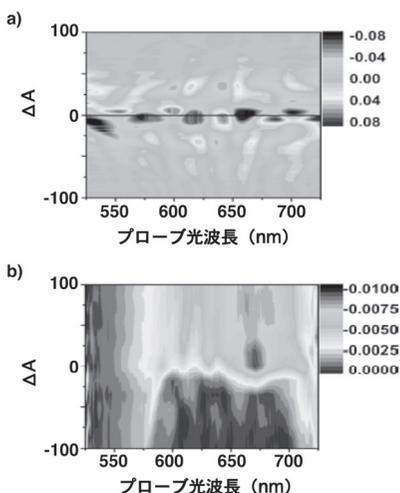


図13. 2D- $\Delta A$ スペクトル<sup>14</sup>. a) メタノール.  
b)  $\text{Na}_2[\text{TCNQ}]_2$ メタノール溶液.

以上の結果から  $\text{TCNQ}^{2-}$  の励起1重項状態の寿命は900 fsであることが示された。また、 $[\text{TCNQ}_2]^{2-}$ の不均化反応は350 fsで進行することが示された<sup>14</sup>。これらの結果から、可視光励起に伴い $[\text{TCNQ}_2]^{2-}$ が $\text{TCNQ}$ と $\text{TCNQ}^{2-}$ に不均化するため、プローブ光波長575 nmの実時間吸光度変化(図7a)には $\text{TCNQ}^{2-}$ の分子振動が反映されているのに対し、プローブ光波長700 nmの実時間吸光度変化(図7b)には $\text{TCNQ}$ の分子振動が反映されていることが確認できた。

以上、温度・湿度条件を再検討することで、可視-極限的超短パルスレーザー光の安定性が向上し、分子振動の実時間計測も可能になった。このように、安定した可視-極限的超短パルスレーザー光を発生できたので、次に、可視-極限的超短パルスレーザー光を利用する新反応開発を試みた。

## 6. 可視-極限的超短パルスレーザー光を利用する反応開発

昨年度合成したベンジル基、カルバメート基、フェニルチオ基を有する糖基質<sup>16</sup>(図14)の飽和メタノール溶液を原料として用いた。可視-極限的超短パルスレーザー光のスペクトル・強度・パルス幅が安定した結果、再現よく針状結晶(図15)が析出するようになった。得られた針状結晶のX線結晶解析結果を図16に示す。

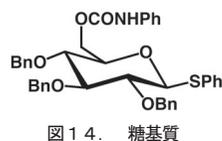


図14. 糖基質

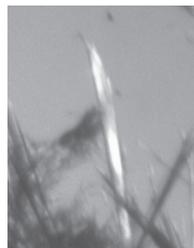


図15. 析出した結晶

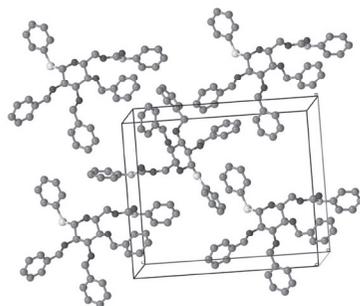


図16. 析出した結晶のX線解析結果

次にpH条件を検討したところ、昨年度報告したカピ状結晶<sup>17</sup>と、上述した針状結晶、どちらの結晶が生成するかは酸の濃度に依存することが示された。また、メタノールを溶媒として用いた場合と重メタノール溶媒として用いた場合とでは、結晶生成の様子が異なることも示された。

現状では、結晶の析出過程に、多光子イオン化過程、コヒーレント分子振動励起過程、レーザーアブレーション過程など、様々な過程の寄与が示唆されており詳細な反応過程は特定できていない。しかし、分子振動周期よりも十分にパルス幅が短い可視-極限的超短パルスレーザー光を利用することで、従来の光反応とも熱反応とも異なる新反応が進行していることは確認できた。今後は、この反応機構を明らかにしていく予定である。

## 参考文献

- (1) P. C. Becker, R. L. Fork, C. H. B. Cruz, J. P. Gordon, C. V. Shank, *Phys. Rev. Lett.*, **60**, 2462 (1988).
- (2) A. Stügl, C. Spielmann, F. Krausz, R. Szipocs, *Opt. Lett.*, **19**, 204 (1994).
- (3) J. Zhou, C. P. Huang, C. Shi, M. M. Murnane, H. C. Kapteyn, *Opt. Lett.*, **19**, 126 (1994).
- (4) A. Baltuska, Z. Wei, S. Pshenichnikov, D. Wiersma, *Opt. Lett.*, **22**, 102 (1997).
- (5) M. Nisoli, De S. Silvestri, O. Svelto, R. Szipocs, K. Ferencz, Ch. Spielmann, S. Sartania, F. Krausz, *Opt. Lett.*, **22**, 522 (1997).
- (6) T. Yatsuhashi, N. Nakashima, J. Azuma, *J. Phys. Chem. A* **117**, 1393 (2013).
- (7) I. Iwakura, S. Kato, R. Hino, A. Fukumoto, K. K.-Orisaku, Y. Koide, *RSC Advances* **3**, 5354 (2013).
- (8) D. S. Acker, R. J. Harder, W. R. Hertler, W. Mahler, L. R. Melby, R. E. Benson, W. E. Mochele, *J. Am. Chem. Soc.*, **82** 6408 (1960).
- (9) R. H. Boyd, W. D. Phillips, *J. Chem. Phys.*, **43**, 2927 (1965).
- (10) J. B. Torrance, B. A. Scott, B. Welber, F. B. Kaufman, P. E. Seiden, *Phys. Rev. B*, **19**, 730 (1979).
- (11) A. Łapinski, R. Świetlik, H. Strzelecka, M. Veber, *A. Phys. Pol. A* **87** 835 (1995).
- (12) E. Faulques, A. Leblanc, P. Molinie, M. Decoster, F. Conan, J. Sala-Pala, *J. Phys. Chem. B*, **101**, 1561 (1997).
- (13) H. T. Jonkman, J. Kommandeur, *Chem. Phys. Lett.* **15** 496 (1972).
- (14) S. Hashimoto, A. Yabushita, T. Kobayashi, I. Iwakura, *Chem. Phys. Lett.* **650**, 47 (2016).
- (15) M. J. Frisch, G. W. Trucks, H. B. Schlegel, G. E. Scuseria, M. A. Robb, J. R. Cheeseman, J. A. Montgomery, Jr. T. Vreven, K. N. Kudin, J. C. Burant, J. M. Millam, S. S. Iyengar, J. Tomasi, V. Barone, B. Mennucci, M. Cossi, G. Scalmani, N. Rega, G. A. Petersson, H. Nakatsuji, M. Hada, M. Ehara, K. Toyota, R. Fukuda, J. Hasegawa, M. Ishida, T. Nakajima, Y. Honda, O. Kitao, H. Nakai, M. Klene, X. Li, J. E. Knox, H. P. Hratchian, J. B. Cross, V. Bakken, C. Adamo, J. Jaramillo, R. Gomperts, R. E. Stratmann, O. Yazyev, A. J. Austin, R. Cammi, C. Pomelli, J. W. Ochterski, P. Y. Ayala, K. Morokuma, G. A. Voth, P. Salvador, J. J. Dannenberg, V. G. Zakrzewski, S. Dapprich, A. D. Daniels, M. C. Strain, O. Farkas, D. K. Malick, A. D. Rabuck, K. Raghavachari, J. B. Foresman, J. V. Ortiz, Q. Cui, A. G. Baboul, S. Clifford, J. Cioslowski, B. B. Stefanov, G. Liu, A. Liashenko, P. Piskorz, I. Komaromi, R. L. Martin, D. J. Fox, T. Keith, M. A. Al-Laham, C. Y. Peng, A. Nanayakkara, M. Challacombe, P. M. W. Gill, B. Johnson, W. Chen, M. W. Wong, C. Gonzalez, J. A. Pople, *Gaussian 03*, Revision, D. 02.; Gaussian, Inc.; Wallingford CT, 2004.
- (16) S. Akai, R. Tanaka, H. Hoshi, K.-I. Sato, *J. Org. Chem.* **78**, 8802 (2013).
- (17) 岩倉 いずみ, 赤井 昭二, *神奈川大学工学研究所報* **38**, 45 (2015).



# 機能維持性能に優れた座屈拘束ブレース付中高層建築物の研究

## — 中間報告 —

小谷野 一尚\* 岩田 衛\*\* 荻本 孝久\*\*  
 緑川 光正\*\*\* 坂田 弘安\*\*\*\*

### Mid-to-high-rise buildings with the Buckling-Restrained Braces

with excellent functional maintenance performance

- Interim report -

Kazuhiisa KOYANO\* Mamoru IWATA\*\* Takahisa ENOMOTO\*\*  
 Mitsumasa MIDORIKAWA\*\*\* Hiroyasu SAKATA\*\*\*\*

#### 1. 序

現在、建築基準法の耐震設計で建設された座屈拘束ブレースを有する中高層建築物は、最終的な破壊状態や座屈拘束ブレース<sup>1)</sup>の地震エネルギー吸収性能を確認することなく造られている。しかしながら、近年、東海・東南海・南海などの海溝型地震や都市直下地震も想定される多種多様な地震に対して、超高層建築物と同様に最終崩壊までの真の限界性能を把握し、人命を守るという安全性だけでなく、地震が起きた後の生活も確保するという、機能維持性能（耐久性・継続使用性・財産保持性）を考慮することが必要となってきた。近年のわが国の大都市圏において、建築物の損傷を最小限に抑え、できる限り継続使用可能な状況に留めることは災害時の主要都市の危機管理、レジリエンス確保の上で必須事項となっている。

機能維持性能を考慮するためには、建築物を健康診断

するかのように逐次モニタリングを行い、地震後の状態を把握しておく必要がある。しかしながら、十分なモニタリングを構築するには手間・コストがかかり、ほぼ普及していない。普及を促すためには、経済的であることが必須であり、簡易なモニタリング技術が必要となる。損傷を座屈拘束ブレースに集約する損傷制御構造とし、座屈拘束ブレースに簡易センサーを取り付けることで、簡易なモニタリングが可能となる。

また、普及するためには設計方法も手間のかからないものにする必要がある。さらには、鋼構造だけでなく中高層住宅に多く使用される鉄筋コンクリート構造にも適用し、座屈拘束ブレース自体もさまざまな要求に応えられるように、より高性能化や低コスト化を進める必要がある。

本報では、機能維持性能に優れた座屈拘束ブレース付中高層建築物を実現する上で重要な、センサー付座屈拘束ブレースの開発、RC 構造への適用、座屈拘束ブレース付中高層建築物の設計法確立、座屈拘束ブレースの要素技術の開発、の4項目について途中ではあるがこれまでの成果を報告する。

\* 助手 建築学科

Research associate, Dept. of Architecture

\*\* 教授 建築学科

Professor, Dept. of Architecture

\*\*\* 客員教授 工学研究科, 名誉教授 北海道大学

Guest Professor, Research Institute for Engineering

Professor Emeritus, Hokkaido University

\*\*\*\* 教授 東京工業大学

Professor, Tokyo Institute of Technology

## 2. センサー付座屈拘束ブレースの開発

### 2.1 簡易センサーの調査

建築物の損傷具合を逐次モニタリングするためには、地震計や変位計を設置し収録装置で管理する必要がある。しかし、このモニタリング方法ではかなりのコストがかかる。座屈拘束ブレースに損傷を集中させる損傷制御構造とすることで、座屈拘束ブレースの損傷具合だけを把握しておけば、建築物の状態も把握することができるようになる。座屈拘束ブレースの状態を把握するのに必要なパラメーターとしては、最大変位と累積変位である。収録装置等を介さずに、これらを計測できる簡易センサーを提案する。その結果、従来の変位計のようなアナログ案とビデオカメラ等を用いて計測するデジタル案を提案した(図1)。

### 2.2 簡易センサーの試作実験・選定

提案したセンサーについて、木材やゴム材等で作成し、振動台を用いて、測定性能について検証をした(図2)。デジタル案についてはある程度の精度で計測ができていたが、振動後に目視で確認しなければならず、また外的な要因(照明や粉塵等)や耐久性を考えると現実的ではない。アナログ案については累積変位についてうまく計測できていなかったが、耐久性等を考えると現実的である。そこで累積変位および最大変位の両方が計測できる簡易型記憶センサー<sup>(2)</sup>を新たに選定した(図3)。

### 2.3 簡易センサーの性能確認実験

選定した簡易型累積変位計と最大変位計を組み合わせた簡易型記憶センサー(図3)について、実際に座屈拘束ブレース試験体に取り付け、高精度のレーザー変位計と比較し、性能確認実験(図4)を行った。実験は高性能タイプであるH試験体と基本タイプであるB試験体の各1体、計2体を行った。

簡易型記憶センサーとレーザー変位計の最大値・最小値の比較では10%前後の誤差が生じている(表1)。また、累積値の比較ではB試験体の累積正値が滑って戻っておりうまく計測できていない、他についても25%前後の誤差が生じている(図5)。アナログ装置であるため、計測用の棒およびメモリや歯車とバネの接触が不十分であったことが考えられ、簡易とはいえ改良の余地がみられる。

表1 最大値・最小値比較

		レーザー (mm)	簡易センサー (mm)	誤差割合 (%)
H試験体	最大値	29.83	32.63	9.4%
	最小値	-29.80	-32.33	8.5%
B試験体	最大値	25.45	28.20	10.8%
	最小値	-25.45	-27.60	8.4%

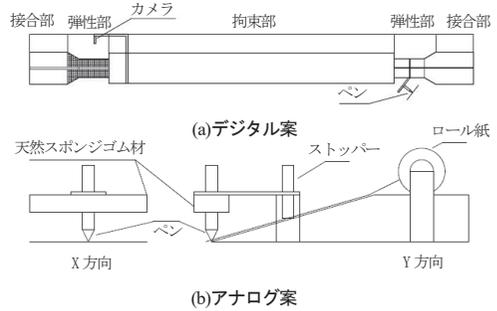


図1 簡易センサーの試作提案

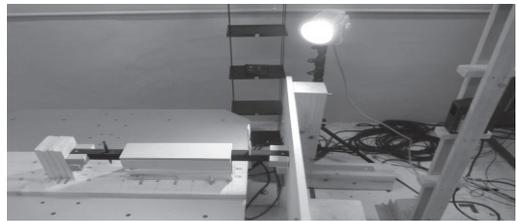


図2 試作実験(デジタル案)

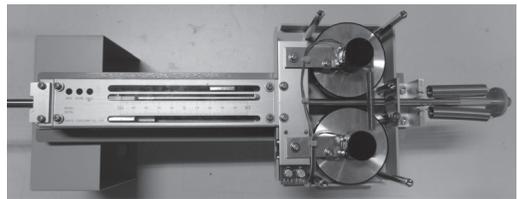


図3 簡易型記憶センサー

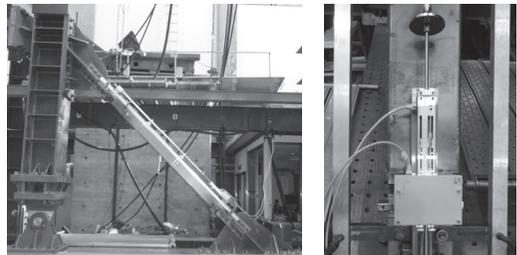


図4 実験時センサー設置状況

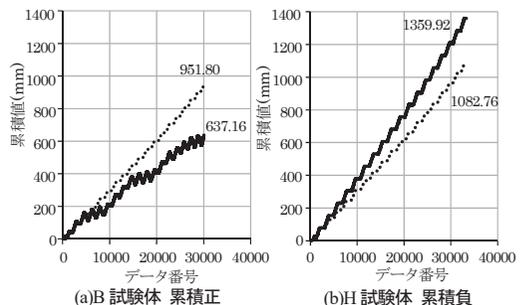


図5 累積値比較

### 2.4 簡易モニタリングデータを含めた品質管理

機能維持性能を確保するためには、座屈拘束ブレース自体の品質を確保することが前提条件となる。簡易センサーによる損傷具合情報だけでなく、設計計画から材料調達、製造過程、施工情報、運用履歴、廃棄にいたるまでのライフサイクル情報をトレーサビリティできることが望ましい。そこで、ICタグやデータベースによる管理を提案し、特に品質に関わる製造時の管理項目を抽出した。他の段階での管理項目や許容数値等を定め、ICタグに登録し、座屈拘束ブレースに取付けることにより、トレーサビリティできるようになる。

## 3. RC 構造への適用

### 3.1 座屈拘束ブレース付鉄骨柱の提案

中高層住宅への普及を考え、基本的には鋼構造に対応する技術である座屈拘束ブレースを RC 構造へと適用する構法を提案する。新築と耐震補強ともに対象とし、損傷時には交換が可能なものと考え、RC 主架構と鉄骨柱は接着しないこととする。また、鉄骨柱は、施工性を考慮し L 字型に 4 分割とし、力の伝達を行う 4 隅のベッドプレートとはメタルタッチ接合で、隙間にくさびを打ち込みプレストレスにより定着させる。

### 3.2 製作・施工実験

提案した座屈拘束ブレース付鉄骨柱について、実際に 1/3 モデルで施工が可能なかを確認した(図 6)。くさびの打ち込みに少々改良の余地があるが、問題なく施工す

ることが可能であった。

### 3.3 座屈拘束ブレース付鉄骨柱による構法の構造性能確認実験

RC 構造への適用を考え、提案、製作・施工実験を行った試験体について構造性能確認実験を行った(図 7)。試験体は RC フレームの強度 18N/mm<sup>2</sup>(低強度タイプ)、48N/mm<sup>2</sup>(高強度タイプ)の 2 体とする。荷重と層間変位関係を図 8 に示す。

高強度タイプは、層間変形角 R=1/50rad まで大きな耐力低下は見られず、安定した復元力特性を有している。R=1/25rad を 1 サイクル行っても耐力低下が見られなかったため引張単調載荷としたが、その後、耐力が 80%以下に低下したため R=1/20rad 程度で載荷を終了した。座屈拘束ブレースは、R=1/100rad 程度で降伏した。

低強度タイプは、引張側 R=1/50rad の 2 回目から耐力低下が見られ、R=1/25rad では耐力が大きく低下した。圧縮側 R=1/25rad で耐力が 80%以下に低下したため引張単調載荷は行わず、R=1/25rad で載荷を終了した。座屈拘束ブレースは、R=1/125rad 程度で降伏した。実験結果から、楔の適用により RC フレームと鉄骨柱を密着させることでアンカーレス構法が成り立つがわかった。また、鉄骨柱が RC フレームと同様の挙動を示すためには、今回実験の鉄骨柱剛性を下げるとより効果的である。

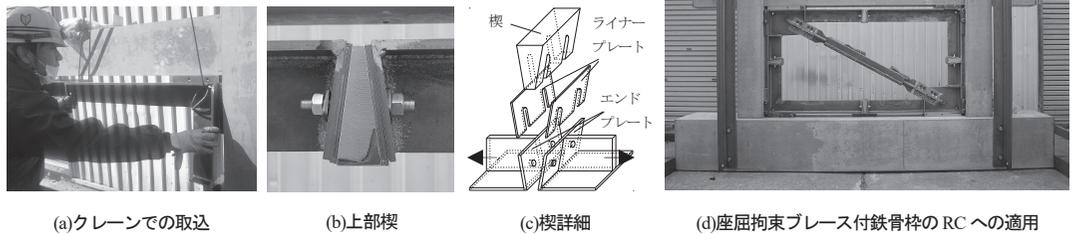


図 6 施工実験

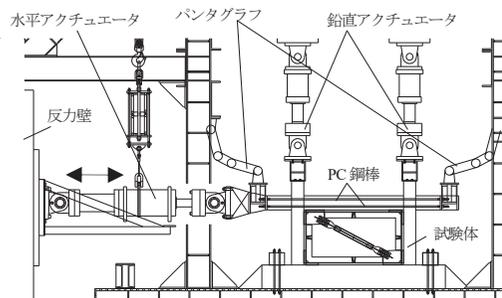


図 7 セットアップ図

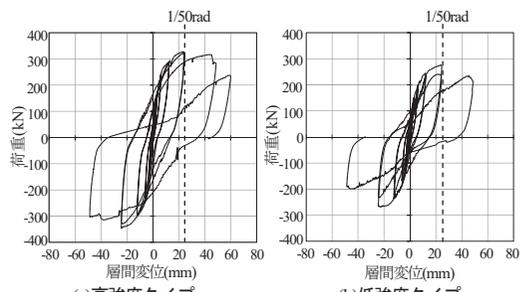


図 8 荷重-層間変位関係

#### 4. 座屈拘束ブレース付中高層建築物の設計法確立

##### 4.1 設計法確認

座屈拘束ブレース付中層建築物である神奈川大学3号館が建築基準法でどのように設計されているのか、構造計算書により確認をした。座屈拘束ブレースは、制振ブレースではなく耐震ブレースとして取り扱われ、「保有水平耐力」を計算するルート3によるものであった。本来、制振ブレースとして損傷制御構造であることを計算書上で示すことが可能であるが、制振ブレースとして扱う場合には、高度な検証法である「時刻歴応答解析」により国土交通省大臣認定を取るか、もしくは馴染みの少ない特別な検証法である「エネルギーの釣合いに基づく耐震計算法」をする必要がある。中層建築物においてはコストや時間を考え、耐震ブレースとすることが多い。

##### 4.2 静的増分・時刻歴応答解析

座屈拘束ブレース付中層建築物である神奈川大学3号館が実際はどれくらいの性能なのかを確認した。構造解析ソフトを用い、構造計算書を参考に立体解析モデルを作成し、静的増分解析および時刻歴応答解析を行った(図9)。

静的増分解析では、保有水平耐力(層間変形角 1/100)時および座屈拘束ブレース共用(層間変形角 1/50)時の XY 方向の主架構および座屈拘束ブレースの部材状況を求め、主架構よりも座屈拘束ブレースが先行降伏することが分かった(表2)。

時刻歴応答解析では、レベル 1(25cm/s)、レベル 2(50cm/s)に準化した日本建築センター模擬波(BCJ-L2)で行い、XY 方向の主架構および座屈拘束ブレースの部材状況を求めた。それにより、主架構よりも座屈拘束ブレースが先行降伏すること、主架構には損傷がないことが分かった(表3)。

##### 4.3 エネルギー法に向けた時刻歴応答解析による分析

立体モデルを作成した座屈拘束ブレース付中層建築物である神奈川大学3号館を使用し、東北地方太平洋沖地震や南海トラフ巨大地震(予測)の神奈川大学周辺データを入力し、エネルギー法で使用される累積塑性変形倍率  $\eta$  や最大塑性率について分析を行った(表4)。また、座屈拘束ブレースの断面剛性および降伏耐力を変化させた場合の  $\eta$  や最大塑性率についても分析を行った。

##### 4.4 座屈拘束ブレース付建築物の累積塑性歪エネルギー率 $\omega$ と疲労性能の性能評価

これまで座屈拘束ブレース単体での性能評価は多く行ってきたが、建築物に組み込まれた場合の性能評価は行われてきていない。座屈拘束ブレース付建築物の解析モデルを使用し、 $\eta$  と同概念である累積塑性歪エネルギー

率  $\omega$  と疲労性能について性能評価を行った。

#### 5. 座屈拘束ブレースの要素技術の開発

##### 5.1 高サイクル疲労実験<sup>③</sup>

座屈拘束ブレースの疲労性能の研究は、大中小地震を想定した低サイクル領域では行われてきているが、頻度の高い風や小地震を想定した高サイクル領域では行われていない。そこで、塑性化部に溶接部がない高性能タイプと溶接部がある基本タイプについて、塑性域内での高サイクル領域の疲労性能について確認をした。高性能タイプ(Hシリーズ)の試験体は軸歪 1.5  $\epsilon_y$  に相当する歪振幅 0.21%(H15E 試験体)、軸歪 1.1  $\epsilon_y$  に相当する歪振幅

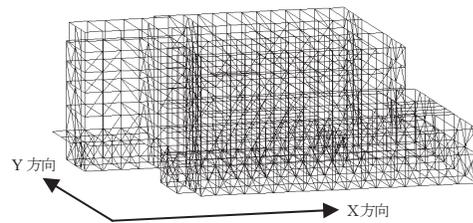


図9 立体解析モデル

表2 静的増分解析結果

	座屈拘束ブレース			梁		柱	
	最大変形	最大塑性率	累積塑性歪エネルギー率	塑性率	累積塑性変形倍率	塑性率	
保有水平耐力時	X	24.5	4.24	4.57	弾性域		
	Y	29.6	4.63	5.58	3.41	2.40	弾性域
座屈拘束ブレース共用時	X	48.6	8.39	9.64	5.93	4.93	1.28
	Y	57.4	8.98	11.4	10.9	9.94	2.00

表3 時刻歴応答解析結果(センター波)

	座屈拘束ブレース			梁		柱
	最大変形	最大塑性率	累積塑性歪エネルギー率	塑性率	累積塑性変形倍率	塑性率
レベル1	X	弾性域				
	Y	弾性域				
レベル2	X	6.21	1.01	0.62	弾性域	
	Y	弾性域				

表4 時刻歴応答解析結果(東北, 南海)

		東北			南海			
		×1	×2	×3	×1	×2	×3	
		BRB	X	最大塑性率	-2.38	-3.81	弾性域	
変形(mm)	-5.95			-9.76	弾性域		3.69	
累積塑性変形倍率	50.2			191	弾性域		0.438	
Y	最大塑性率		-1.47	-2.45	-3.83	弾性域		1.24
	変形(mm)		-3.90	-6.49	-10.2	弾性域		3.30
	累積塑性変形倍率		5.50	78.0	165	弾性域		0.354
梁	X	最大塑性率	弾性域		2.22	弾性域		
		変形(rad)	弾性域		-0.001	弾性域		
		累積塑性変形倍率	弾性域		1.22	弾性域		
Y	最大塑性率	弾性域		弾性域				
	変形(rad)	弾性域		弾性域				
	累積塑性変形倍率	弾性域		弾性域				

0.15%(H11E 試験体)で载荷する。基本タイプ (B シリーズ) では軸歪 1.1  $\epsilon_y$  に相当する歪振幅 0.15%(B11E 試験体)で载荷する。

塑性域内での軸歪  $\epsilon$  と耐用回数の関係は既往の低サイクル領域から高サイクル領域まで直線関係になること、溶接部の有無によって軸歪  $\epsilon$  が小さくなるほど耐用回数の差が大きくなるのが分かった(図 10)。

5.2 モルタル強度比較実験<sup>(4)</sup>

鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースは、モルタルを使用した拘束材によって座屈を防止している。モルタル強度の違いによって、性能に影響を及ぼすのかを確認した。モルタルは、既往の研究で用いられてきた標準モルタルおよび高強度モルタル、低強度モルタルの3種類について実験を行った。高強度モルタルでは強軸方向に変形し、比較的安定した性能を発揮するが、低強度モルタルでは早期に弱軸方向に変形をし、性能も極端に低くなる(表 5, 図 11)。

5.3 強軸方向変形実験<sup>(5)</sup>

強軸方向への変形が進んだ座屈拘束ブレースは、弱軸方向に局部変形するよりもエネルギー吸収性能が高いという結果が得られている。しかし、強軸方向への変形は架構全体に悪影響を及ぼす可能性がある。そこで、強軸方向のクリアランス(丸鋼の有無)や拘束材強度を変化させて性能を確認した。拘束材の強度を上げることでエネルギー吸収性能が高くなること、強軸方向への変形を防止する丸鋼有りよりも、防止しない丸鋼無しの方がエネルギー吸収性能は高くなるが、圧縮時に耐力低下を起こすことが分かった(図 12)。

5.4 高軸歪領域での疲労実験

座屈拘束ブレースの疲労性能について、既往の研究<sup>(6)</sup>において歪振幅 4.0%という高軸歪領域でも十分な疲労性能を有することがわかっている。さらに上回る高軸歪領域での疲労性能を確認した。試験体は高性能タイプ (H シリーズ) を 2 体 (歪振幅 4.5% : H45, 歪振幅 5.5% : H55), 基本タイプ (B シリーズ) を 2 体 (歪振幅 3.0% : B30, 歪振幅 4.0% : B40), の計 4 体とし、一定軸歪繰返し载荷としている。B30 試験体は軸歪 3.0%11 回目, B40 試験体は軸歪 4.0%6 回目, H45 試験体は軸歪 4.5%4 回目に引張破断した。H55 試験体は軸歪 5.5%3 回目圧縮時に局部変形した。繰返し回数の直前を耐用回数とし、軸歪  $\epsilon$  と耐用回数の関係を図 10 に示す。両対数軸上で両シリーズともに線形関係となっており、本座屈拘束ブレースの塑性域での疲労性能を推定できる。

5.4 塑性化部長さが大きい座屈拘束ブレースの実験

通常 50%の芯材塑性化部長さ比 (塑性化部長さ  $L_p$ /芯

材長さ  $L$ ) を 75%まで大きくし、細長比  $\lambda$  ( $L_p$ /断面二次半径  $i$ ) を 800 にした試験体において、既往の研究<sup>(7,8)</sup>よりもリブ貫入長さ比 (リブ貫入長さ  $L_i$ / $L_p$ ) を 6.5%, 拘

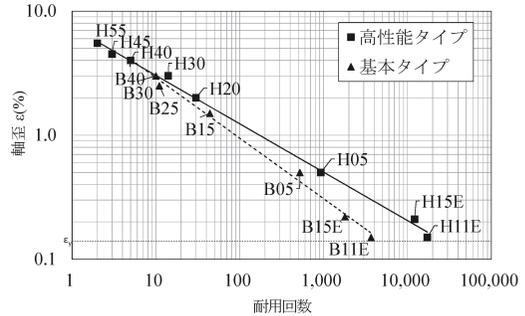


図 10 軸歪  $\epsilon$  - 耐用回数関係

表 5 実験結果および最終状態

試験体	実験経過	最終状態
高強度	3.0%至3回目-圧縮	強軸方向変形
標準	3.0%至4回目-圧縮	弱軸方向局部変形+強軸方向変形
低強度	2.0%至1回目-圧縮	弱軸方向局部変形

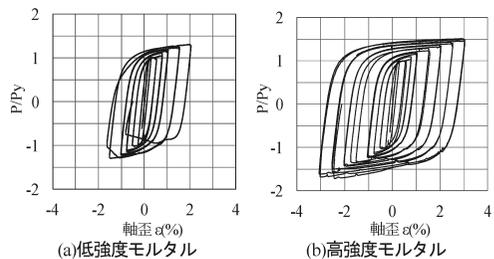


図 11 P/Py-軸歪  $\epsilon$  関係

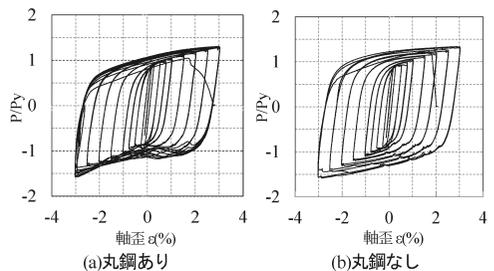


図 12 P/Py-軸歪  $\epsilon$  関係

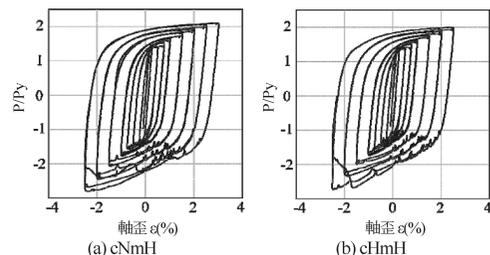


図 13 P/Py-軸歪  $\epsilon$  関係

束指標 PE/Py を 6 に数値を上げ、溝形鋼の鋼種、モルタル強度を変化させた試験体を製作し、性能評価実験を行った。試験体は 4 体とし、試験体 cNmN は溝形鋼の鋼種を SS400、モルタル強度を普通強度。試験体 cHmN は溝形鋼の鋼種を WEL-TEN590RE、モルタル強度を普通強度。試験体 cNmH は溝形鋼の鋼種を SS400、モルタル強度を高強度。試験体 cHmH は溝形鋼の鋼種を WEL-TEN590RE、モルタル強度を高強度とする。

全ての試験体において下端部で局部変形をした。図 13 に復元力特性を示す。cHmN, cNmH, cHmH において、圧縮側載荷での耐力低下が確認された。塑性化部長さ比、細長比  $\lambda$  が大きいことにより、端部リブ付近に局部変形が集中した。よって、リブ貫入長さ比を大きくし、塑性化部長さ比、細長比の値を下げる必要がある。

## 6. 結び

機能維持性能に優れた座屈拘束ブレース付中高層建築物を実現する上で重要な 4 つの項目について、これまでの成果を報告した。さらに研究を進めていく。

## 参考文献

- (1) 飯塚亮太, 小谷野一尚, 緑川光正, 岩田衛, “累積塑性歪エネルギー率の大きな座屈拘束ブレースの研究”, 日本建築学会構造系論文集, 第 701 号, pp.1015-1023, 2014 年 7 月
- (2) 岡田敬一, 白石理人, 片岡俊一, “変位記憶型センサによる構造モニタリングシステムの開発と実建物への適用と検証”, 日本建築学会技術報告集, 第 44 号, pp.61-66, 2014 年 2 月
- (3) 小谷野一尚, 小出秀一, 中込忠男, 緑川光正, 岩田衛, “座屈拘束ブレースの小塑性歪振幅における疲労性能の研究”, 日本建築学会技術報告集, 第 22 巻, 第 50 号, pp.115-119, 2016 年 2 月
- (4) 山崎翔, 緑川光正, 岩田衛, 岡崎太郎, 麻里哲広, “座屈拘束ブレースの力学性能に及ぼすモルタル強度の影響”, 鋼構造年次論文報告集, 第 23 巻, pp.671-675, 2015 年 11 月.
- (5) 菱田俊介, 緑川光正, 岩田衛, 岡崎太郎, 麻里哲広, “芯材の曲げ座屈変形が座屈拘束ブレースの力学性能に及ぼす影響”, 鋼構造年次論文報告集, 第 23 巻, pp.705-712, 2015 年 11 月.
- (6) 小谷野一尚, 宮川和明, 小出秀一, 喜田村亘, 岩田衛, “疲労性能の高い座屈拘束ブレースの研究”, 日本建築学会技術報告集, 第 21 巻, 第 47 号, pp.137-140, 2015 年 2 月.
- (7) 緑川光正, 若山拓也, 麻里哲広, 岩田衛, “鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースの実験的研究 - 摩擦力分布を考慮した圧縮引張耐力比の算定とその評価”, 構造工学論文集, Vol.60B, pp.307-315, 2014 年 3 月.
- (8) 菱田俊介, 大浦匠, 緑川光正, 岩田衛, 岡崎太郎, 麻里哲広, “鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースの実験的研究 - 鋼製ずり止め位置が力学性能に及ぼす影響及び座屈変形の評価”, 構造工学論文集, Vol.61B, pp.141-149, 2015 年 3 月.



## ペプチド固定化シリカ触媒の不斉アルドール反応特性

吉田 暁弘\*

### Catalytic performances of peptide-immobilized silica catalysts on the asymmetric aldol reaction

Akihiro Yoshida\*

#### 1. 緒言

アミノ酸は我々人類を始めとするあらゆる生命体を構成する重要な物質であり、生体を構成する 20 種の内、グリシンを除く 19 種が不斉炭素を有する光学活性な化合物である。光学活性点が単独で存在する場合、その対掌体の化学的性質は同一であるが、光学活性点が複数存在する場合はジアステレオマーと呼ばれる対となり、異なる化学的性質を示す。したがって、無数の光学活性点から構築される生命体は、本質的に光学活性な化合物を識別する能力を有している。実際に、生理活性を示す医薬品、我々の五感に対して作用する香料、調味料等、我々の生活と密接に関連する化合物の多くが光学活性であり、一方の対掌体は望ましい生理活性を示すものの、他方の対掌体は不活性であったり有害であったりする。これらの物質を合成する上では、必要とする一方の対掌体のみを選別し、他方を廃棄する光学分割が従前から広く用いられているが、近年、省エネルギー、省資源化の観点から、目的とする対掌体のみを選択的に合成する手法、すなわち不斉有機合成が極めて重要になりつつある<sup>(1)</sup>。我々自身は生体内で不斉有機合成によって物質生産を行っているが、これは生体内に存在する不斉触媒である酵素によって担われている。酵素は多数のアミノ酸が縮合したペプチドやペプチド上に配位結合した金属イオンから構成されるが、反応活性の発現に必要な部位すなわち活性点は多くの場合わずかに数個のアミノ酸や金属イオンから構成されているに過ぎない。しかし、その他の部位は、触媒活性の発現には直接的に関与しないものの、疎

水性場や基質認識サイトを形成したり、あるいは反応活性点となるアミノ酸や金属イオンの空間的配置や電子状態を反応に適した状態へとチューニングしたりすることで、極めて高い酵素の基質選択性や光学選択性、活性の発現に寄与している。これらの作用により酵素はあらゆる触媒の中でも最も優れたものの一つと言える。

このように酵素は高い機能性を発現させるために極めて複雑な構造を持つものに対し、単に反応の促進という点に関しては、はるかにシンプルなオリゴペプチドや単一のアミノ酸分子でさえも触媒的に機能することが知られている。List らによる単一アミノ酸分子であるプロリン触媒による直接的な不斉アルドール反応の報告を皮切りに<sup>(2)</sup>、有機分子触媒とも呼ばれるこの分野は盛んに研究が行われるようになり、プロリンを含む小ペプチド類も直接的な不斉アルドール反応に活性を示すことが報告されている。中でも、Wennemers らによって報告された Pro-Pro-Asp (プロリン-プロリン-アスパラギン酸)トリペプチドは、不斉アルドール反応においてプロリンに比べて飛躍的に高い活性を示すことを報告している<sup>(3)</sup>。

筆者らは、均一系ペプチド触媒の欠点である触媒回収の困難さの改善や固定化に伴う立体選択性の制御を期待して、高表面積かつ多様な構造を構築できるシリカ担体にペプチド触媒の固定化を行った。さらにそれらを触媒として、直接的なアルドール反応を行ったところ、一般的にペプチドの固定化に使用されるレジン担体にオリゴペプチドを固定化した場合に比べて、触媒活性の大幅な向上や立体選択性の反転が生じることを見出したので本稿で報告する。

\*助教 物質生命化学科

Assistant Professor, Dept. of Material and Life and Chemistry

#### 2. メソポーラスシリカ担体へのペプチドの固定化

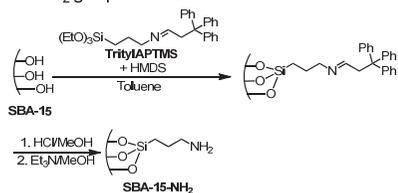
メソポーラスシリカは、触媒や吸着剤として幅広い応用が期待される材料であるが、細孔内にはシラノール基以外の官能基が存在しないため、それ自身で発現可能な機能は限定的である。我々は、メソポーラスシリカの高機能化手法の一つとして、触媒活性なオリゴペプチドを細孔内に固定化する方法を検討した。固定化担体に用いるメソポーラスシリカとしては、ペプチド鎖が余裕を持って内包できることと触媒反応時に基質の拡散を制約しないことを念頭に置き、直径約 7 nm の直線状の細孔を持つ SBA-15 を選定した<sup>(4)</sup>。また、固定化対象のペプチド触媒としては、Pro-Asp ジペプチドと Pro-Pro-Asp トリペプチドとした。直接的アルドール反応に活性を示すプロリンおよびプロリン含有ペプチドに共通する特徴として、分子中にイミノ基とカルボキシル基を有することが挙げられる。これは、イミノ基と基質のカルボニル化合物が反応してエナミン中間体が生成し、もう一方の基質がカルボキシル基との間に水素結合を形成することで活性化され反応が進行するからである。したがって、プロリンのように一對のイミノ基とカルボキシル基しか持たない化合物では、どちらかを担体への化学的固定化に供すると、触媒活性が失われるものと予想される。一方

で、Pro-Asp 及び Pro-Pro-Asp では、分子中に一つのイミノ基と二つのカルボキシル基を有することから、カルボキシル基のうち一つを固定化に使用しても、依然として一對のイミノ基とカルボキシル基が残存するため、触媒活性を保持したまま固定化できるものと期待された。

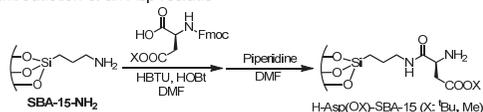
実際の触媒合成の経路としては、予め合成したペプチドをシリカ表面に固定化する方法と、シリカ表面上に一つずつアミノ酸を縮合する方法の二通りが考えられたが、固定化担体上にアミノ酸を逐次的に縮合させペプチドを得るペプチド固相合成法が確立されていることから<sup>(6)</sup>、本研究でもペプチド固相合成法にならって合成を行うこととした。具体的な合成過程を図 1 に示す。最初のステップでは、各アミノ基の周辺にペプチド鎖の伸長に十分な空間を確保するために、アミノ基周りに高い保護基を導入したシランカップリング剤である TritylAPTMS を使用して SBA-15 表面上にアミノ基を導入し<sup>(6)</sup>、さらに未反応のシラノール基をトリメチルシリル化して不活性化させる $[(\text{CH}_3)_3\text{Si}]_2\text{NH}$  (HMDS)も同時に反応させてアミノ基修飾 SBA-15 を得た(以下、SBA-15-NH<sub>2</sub>)。続いて SBA-15 上のアミノ基に Fmoc 保護アミノ酸を縮合させ、その後 Fmoc 基の脱保護と Fmoc 保護アミノ酸の縮合を繰り返すことで、順次ペプチドを伸長させた。この際、各ステップでアミノ酸をアミノ基上に確実に縮合させるために、未反応のアミノ基と反応して特異的な呈色を生じる Kaiser テストを行い、もしもアミノ基の残存が確認されれば再度アミノ酸の縮合を行い、各縮合過程で未反応のアミノ基が残存しない状況とした。本合成の最終過程では、<sup>t</sup>Bu エステル化あるいは Boc 化で保護しておいたアスパラギン酸側鎖のカルボキシル基やプロリンの N 末端を脱保護するためトリフルoro酢酸で処理を行い、Pro-Asp ジペプチド並びに Pro-Pro-Asp トリペプチドを固定化した SBA-15 を得た(以下、Pro-Asp-SBA-15, Pro-Pro-Asp-SBA-15)。なお、アミノ酸は断りがない限りすべて L 体を使用した。

合成したアミノ基修飾 SBA-15 並びにペプチド修飾 SBA-15 については、N<sub>2</sub> 吸脱着測定及び有機元素分析により表面積や細孔特性、ペプチド固定化量を算出した(表

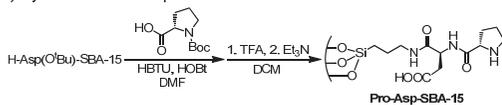
i) Introduction of NH<sub>2</sub> groups on silica surface



ii) Introduction of an Asp residue



iii) Synthesis of Pro-Asp-SBA-15



iv) Synthesis of Pro-Pro-Asp-SBA-15

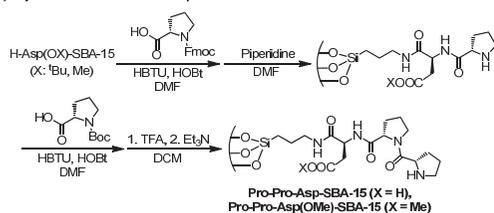


図 1. オリゴペプチド固定化 SBA-15 の合成経路

表 1. ペプチド修飾 SBA-15 の表面積、細孔特性及びペプチド修飾量

試料	BET 表面積 (m <sup>2</sup> /g)	細孔体積 (cm <sup>3</sup> /g)	平均細孔径 (nm)	ペプチド・アミノ基 固定化量 (mmol/g)
SBA-15-NH <sub>2</sub>	580	0.80	5.5	0.22
Pro-Asp-SBA15	403	0.74	7.3	0.12
Pro-Pro-Asp-SBA-15	345	0.69	6.5	0.15

1). ペプチド鎖の導入に伴い表面積や細孔体積は減少するが、ペプチド導入後も依然として高い値を保っており、平均細孔径にもほとんど変化が見られないことがわかる。したがって、ペプチド導入後も SBA-15 の持つメソ細孔特性は保持されていることが明らかとなった。なお、SBA-15 上に固定化されたペプチドの分子構造を確認すべく固体  $^{13}\text{C}$  NMR 測定も行ったが、ペプチド固定化量が低いと十分な強度でシグナルを得ることができず、SBA-15 上に固定化されたペプチドが単一の構造を有しているのか、あるいはペプチドと SBA-15 壁面の間に相互作用が存在するのかなど等の情報を得るには至らなかった。

### 3. ペプチド固定化 SBA-15 触媒の不斉アルドール反応特性

表 2 にペプチド固定化触媒による 4-ニトロベンズアルデヒドとアセトンの直接的アルドール反応の結果を示す。Pro-Asp ジペプチドと Pro-Pro-Asp トリペプチドを SBA-15 上に固定化した触媒は、いずれもペプチドを固定化していないアミノ基修飾 SBA-15 よりも反応初速度が高く、高収率でアルドール体を与えた。アミノ基修飾 SBA-15 は、Jones らにより塩基点であるアミノ基と弱酸点であるシラノール基の協働作用により直接的アルドール反応に有効な触媒となることが報告されているが<sup>9</sup>、Pro-Asp 及び Pro-Pro-Asp オリゴペプチド固定化触媒は単にアミノ基を固定化した場合よりも大幅に高活性であることが明らかとなった。Pro-Asp と Pro-Pro-Asp を固定化した触媒の比較では、液相均一系でより高活性を示すことが知られる Pro-Pro-Asp を固定化した触媒の方が高活性を示した<sup>9</sup>。

次に、固定化担体の効果を比較するために、Pro-Pro-Asp を SBA-15 とアミノメチルポリスチレンレジンに固定化した触媒の活性を比較した。SBA-15 上に固定化した方がレジンに固定化した時よりも 20 倍以上の反応初速度

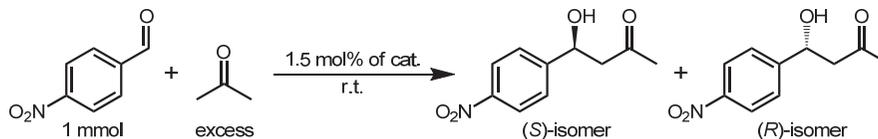
を示し、高活性であることがわかった。これは、レジンの表面積が極めて小さいのに対し、SBA-15 は高表面積とメソ細孔を有することから、SBA-15 に固定化した方が基質の活性点への接近が容易であったことが一因と考えられる。さらに、立体選択性にも著しい変化が見られた。レジンに固定化した場合、65%の *ee* で *S* 体が優先的に生成したのに対し、SBA-15 に固定化した場合、16%という低い *ee* ではあるものの *R* 体が優先的に生成した。液相均一系において H-Pro-Pro-Asp-NH<sub>2</sub> トリペプチドは *S* 体を優先的に生成することが報告されていることから<sup>9</sup>、反応に寄与する活性点が SBA-15 への固定化により変化したことが示唆された。

このように、ペプチドを SBA-15 に固定化した際の触媒特性は、フリーのペプチドやレジンにペプチドを固定化した場合に比べて立体選択性の値が低下するという点では期待外れであったが、優先的に生成する光学異性体が反転するという興味深い結果となった。同時に、高表面積担体である SBA-15 にペプチドを固定化したことによって、ペプチドの固定化担体として一般的なレジン担体を使用したときに比べて大幅に高い活性を実現することができた。なぜこのような立体選択性の反転が起こったのかについては次項で考察する。

### 4. 官能基の選択的保護による活性点の推測

直接的アルドール反応は酸点と塩基点の協働作用により促進されることが知られているため、触媒上の官能基を選択的に不活性化することで、反応に寄与する酸塩基点の推定を行った。Asp 側鎖のカルボキシル基をメチルエステルとして不活性化した Pro-Pro-Asp(OMe) を SBA-15 に固定化したところ、予想に反し活性は大きく向上した。また、立体選択性にはほとんど変化がみられなかった。この結果より、SBA-15 上に固定化した Pro-Pro-Asp では、カルボキシル基は活性や立体選択性の

表 2. ペプチド修飾 SBA-15 触媒による不斉アルドール反応<sup>a</sup>



触媒	反応時間 / h	収率 / %	<i>ee</i> / %	絶対配置 <sup>b</sup>	反応初速度 / $\mu\text{mol}\cdot\text{min}^{-1}$
SBA-15-NH <sub>2</sub>	48	28	-	-	0.093
Pro-Asp-SBA-15	48	44	17	R	0.34
Pro-Pro-Asp-SBA-15	48	92	16	R	1.19
Pro-Pro-Asp-resin	48	27	65	S	0.050

<sup>a</sup>生成物の収率や *ee* は HPLC 分析の結果から算出、<sup>b</sup>優先的に得られる生成物の絶対配置

発現に寄与せず、むしろ活性を低下させることがわかった。Pro-Pro-Asp-SBA-15 において立体選択性が主に Pro によって決定されることは、Pro のみを D 体とした D-Pro-D-Pro-L-Asp-SBA-15 において立体選択性が反転することからも確認された。カルボキシル基の存在による活性低下の原因としては、カルボキシル基とプロリン末端のイミノ基の間で酸塩基平衡が成立しうるため、アルドール反応に活性を示すプロリン末端がプロトン化されていない種の割合が減少するためではないかと推測される。一方、固定化レジン触媒上でカルボキシル基のメチル化を行った触媒 Pro-Pro-Asp(OMe)-resin では、Pro-Pro-Asp-resin に比べて生成物の立体選択性が反転し、Pro-Pro-Asp-SBA-15 と同様の選択性となった。つまり、今回のアルドール反応の条件下では、イミノ基とカルボキシル基による多点的な相互作用が存在すれば S 体が優先的に生成するのに対し、イミノ基単独では R 体を優先的に生成するサイトになることが明らかとなった。SBA-15 固定化担体上で Pro-Pro-Asp のカルボキシル基が立体選択性の発現に寄与しないのは、SBA-15 表面上に存在するシラノール基とカルボキシル基の間で水素結合が形成されるため、カルボキシル基と基質との相互作用がほとんど発現しなくなるためではないかと推測される(図 2)。

続いて、HMDS ((Me<sub>3</sub>Si)<sub>2</sub>NH)処理により表面シラノール基をトリメチルシリル化して不活性化することで、シラノール基の反応に対する寄与を探った。Pro-Pro-Asp(OMe)-SBA-15 を HMDS 処理したところ、反

応初速度は 1/7 程度になり、著しい活性低下が認められた。これは、シラノール基が反応活性の向上に寄与することを示す。Jones らは、アミノ基修飾 SBA-15 において、直接的アルドール反応に対して有効な酸塩基点の検討を行っており、カルボキシル基とアミノ基の酸塩基対よりも、酸強度がカルボキシル基よりも弱くアミノ基のプロトン化を引き起こさないシラノール基とアミノ基の酸塩基対の方が高活性を示すことを明らかにしている<sup>9)</sup>。SBA-15 に固定化したペプチド触媒においても Jones らの

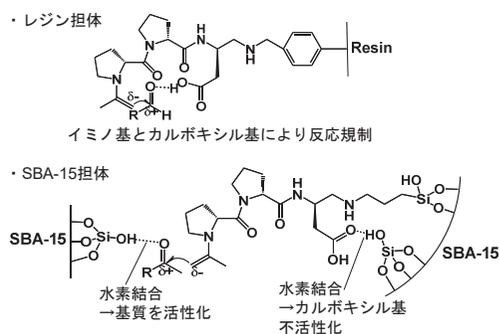


図 2. 想定される SBA-15 の担体効果

報告と同様に、カルボキシル基とプロリン末端ではなく、シラノール基とプロリン末端が酸塩基対となり協働的に作用することで反応活性が向上したものと推測される。

### 5. シリカ種に対する依存性

前項までは、メソポーラスシリカの一種である SBA-15

表 3. カルボキシル基ならびにシラノール基を不活性化化したペプチド修飾 SBA-15 触媒による直接的アルドール反応<sup>a)</sup>

触媒	反応時間 / h	収率 / %	ee / %	絶対配置 <sup>b)</sup>	反応初速度 / μmol·min <sup>-1</sup>
Pro-Pro-Asp-SBA-15	48	92	16	R	1.19
Pro-Pro-Asp(OMe)-SBA-15	6	94	20	R	6.00
Pro-Pro-Asp(OMe)-SBA-15-HMDS	48	72	20	R	0.90
Pro-Pro-Asp(OMe)-resin	48	27	16	R	0.076
D-Pro-D-Pro-L-Asp-SBA-15	48	93	10	S	1.24

<sup>a)</sup> 反応条件は表 2 中に記載。<sup>b)</sup> 優先的に得られる生成物の絶対配置

表 4. 様々なシリカ担体を用いて合成した固定化トリペプチド触媒の表面積、ペプチド修飾量と不斉アルドール反応活性<sup>a)</sup>

触媒	反応時間 / h	収率 / %	ee / %	絶対配置 <sup>b)</sup>	BET 表面積 (m <sup>2</sup> /g)	細孔体積 (cm <sup>3</sup> /g)	ペプチド修飾量 (mmol/g)
Pro-Pro-Asp-MCM-41	8	68	18	R	833	0.73	0.13
Pro-Pro-Asp-SBA-15	8	35	17	R	580	0.90	0.15
Pro-Pro-Asp-KIT-6	8	26	15	R	642	0.44	0.10
Pro-Pro-Asp-SiO <sub>2</sub>	8	17	17	R	276	—	0.08

<sup>a)</sup> 反応条件は表 2 中に記載。<sup>b)</sup> 優先的に得られる生成物の絶対配置

を固定化担体として使用して検討を重ねてきたが、本項では固定化担体として SBA-15 以外のメソポーラスシリカやメソ細孔を持たないシリカを使用することで、固定化担体を使用するシリカ種が直接的アルドール反応における触媒活性や立体選択性にどのような影響を及ぼすのか検討した。具体的には、SBA-15 と同様の直線状細孔を持つが細孔径が 3 nm と SBA-15 に比べて小さい MCM-41 と<sup>9)</sup>、細孔径は SBA-15 とほぼ同様の 7 nm 程度であるが細孔が三次元的網目構造となった KIT-6 の二種類メソポーラス担体と<sup>10)</sup>、メソ細孔をほとんど持たないマイクロポーラスシリカ(SiO<sub>2</sub>)も使用した。

表 4 に各触媒の表面積、ペプチド修飾量、触媒反応の結果を示す。MCM-41 を担体とした場合に最も高活性を示し、8 h で 68 % の生成物が得られたのに対し、メソ孔を持たないシリカを使用した場合は同一の時間で 17% の生成物しか得られなかった。各担体使用時の活性序列は、MCM-41 > SBA-15 > KIT-6 > マイクロポーラス SiO<sub>2</sub> となり、メソポーラス担体の使用が活性向上に有効であることが明らかになった。この活性序列は概ね触媒の表面積の序列と対応しているが、SBA-15 と KIT-6 のところで逆転が見られる。これは、KIT-6 の方が SBA-15 に比べて半分以下の細孔体積しか持たないことと、SBA-15 が直線状の細孔を持つのにに対し、KIT-6 は三次元網目状の細孔であることから、基質の細孔内への拡散性が SBA-15 の方が高かったことに由来するのではないかと推測される。また、これらのシリカ担体を使用した時に見いだされる重要な知見として、いずれのシリカ担体を使用しても優先的に生成するのは R 体であったことが挙げられる。つまり、前項で考察したようなシリカ表面のシラノール基との水素結合によるものと推測されるアスパラギン酸側鎖のカルボキシル基の不活性化に基づく立体選択性の変化は、シリカ担体の種類によらず生じるものであるということが明らかとなった。

## 6. キラルシリカ担体の使用

前項までに記したように、シリカ担体上にペプチドを固定化すると、ペプチドとシラノール間、ならびに基質とシラノール間の相互作用に基づいてペプチド触媒の立体選択性や活性が変化するものと推測された。そこで、本稿ではキラリティを持ったシリカ上にペプチドを固定化することで、ペプチド触媒の立体選択性の制御を試みた。本学の金教授らの開発したキラルシリカは、酒石酸と直鎖状ポリエチレンイミンから形成される塩を鋳型として、この鋳型の存在下でシリカ源である Si(OMe)<sub>4</sub> の加水分解と縮合を行うことで合成される<sup>10)</sup>。このシリカの

特徴は、キラリティが単に外形に転写されているのみならず、シリカ表面に吸着したナフトキノンのようなプローブ分子に対してキラリティを惹起し CD スペクトルにおいて明確なコットン効果を発現させる点である。ナフトキノンのシリカ上との相互作用点はシラノール基であるものと推測されることから、このシリカはシラノール基を通して表面上の物質にキラルな影響を及ぼしうるものと言え、固定化したペプチドや反応基質に対して影響が及べば触媒反応時の立体選択性の差異となって観測されるものと期待した。

そこで実際に、L-酒石酸、D-酒石酸を原料に合成したキラルシリカ (以下 L-tart-CS, D-tart-CS) に対し、図 1 と同様の方法で Pro-Pro-Asp トリペプチドを導入した (以下 PPA-tart-CS)。ペプチド固定化触媒合成の中間体である TritylAPTMS を修飾したキラルシリカの固体 CD スペクトルを図 3 に示す。TritylAPTMS 中のトリチル基は紫外領域に吸収を持つため、このトリチル基の配列に光学的な周期性が惹起されれば CD 活性となる。測定の結果、期待通り L, D-tart-CS には明確な正と負のコットン効果が発現した。つまり L, D-tart-CS がトリチル基、さらにはトリチル基に結合しているアミノ基にもシリカ表面からのキラリティが伝達されたことが明らかとなった。同じく合成中間体である Fmoc-Pro-Asp-tart-CS においても Fmoc 基の吸収領域にコットン効果が観測されたことから、ペプチド上にも同様にキラリティが伝達されるものと推測された。

このような CD 測定の結果から、大いなる期待をもって PPA-tart-CS を触媒とした不斉アルドール反応を実施

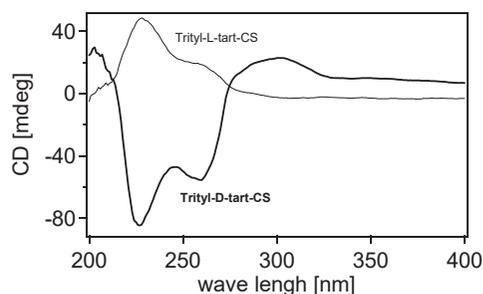


図 3. TritylAPTMS で修飾したキラルシリカの固体 CD スペクトル。

表 5. ペプチド修飾キラルシリカ触媒による直接的アルドール反応<sup>a)</sup>

試料	反応時間 / h	収率 / %	ee / %	絶対配置 <sup>b)</sup>
PPA-L-tart-CS	24	60	12	R
PPA-D-tart-CS	24	49	9	R
PPA-SBA-15	24	69	13	R

<sup>a)</sup> 反応条件は表 2 中に記載。 <sup>b)</sup> 優先的に得られる生成物の絶対配置

した。しかし、表5に示すように、tart-CSを固定化担体に用いた場合の立体選択性はSBA-15を固定化担体とした場合とほとんど違いはなかった。またL体、D体どちらのtart-CSを使用しても立体選択性が変化しないことから、tart-CSのキラリティが本条件下ではほとんど立体選択性に影響を及ぼさない結果となった。この原因を探るべく、反応溶媒であるアセトンの湿潤下でTritylAPTMSを修飾したキラルシリカの固体CDスペクトルを測定したところ、乾燥状態では図3に示すように明確なコットン効果が観測されるのに対し、湿潤下ではほとんどコットン効果が観測されなかった。つまり、溶媒和された条件下では、シリカ由来のキラリティが表面上の修飾分子にうまく伝達されていないということが推測された。今後、溶媒の関与しない反応系、あるいは溶媒和よりも固体表面と強い相互作用が発現する反応系を探索することで、キラルシリカによる不斉触媒能の発現を目指す予定である。

## 7. 結言

ペプチド触媒の機能性向上を期待して、Pro-Aspジペプチド及びPro-Pro-Aspトリペプチドをシリカ系担体に固定化したところ、ペプチド固定化担体として一般的なレジン担体にPro-Pro-Aspトリペプチドを固定化した場合に比べて、高表面積と細孔を持つメソポーラスシリカを担体とした場合に著しい活性向上が観測された。さらに興味深いことに、レジン担体とシリカ系担体では立体選択性が反転することを見出した。ペプチド上のカルボキシル基をメチル化により不活性化したところ、シリカ系担体では立体選択性に変化がなく、レジン担体においてはシリカ系担体と同様の立体選択性となったことから、シリカ担体上ではシラノール基との水素結合によりペプチド上のカルボキシル基が反応に関与しなくなったことが立体選択性の変化をもたらしたものと推測された。さらなる立体選択性の制御を期待して、キラルシリカ上にPro-Pro-Aspトリペプチドを固定化して反応を行ったところ、期待に反して立体選択性はキラリティを持たないシリカ担体を使用した時と同様であった。乾燥条件下では、CD測定によりアミノ基やペプチド近傍に存在する紫外域に吸収を持つ保護基にキラリティが誘起されることを確認したが、反応溶媒の存在下ではCDスペクトルが消失することから、溶媒和によってキラルシリカとペプチド間の相互作用が弱くなり、キラリティの伝達が溶媒非存在下に比べてほとんど起こらなかったことが立体選択性の制御に至らなかった原因と推測された。

上述した成果は、平成27~28年度の工学研究所共同研究Aの採択課題としての実施により得られたものである。本研究の遂行に当たって、活発なご議論とご指導を賜った本学の内藤周弐名誉教授、上田渉教授、引地史郎教授、ならびにキラルシリカの合成に関してもご指導を賜った金仁華教授に御礼を申し上げます。

## 参考文献

- (1) V. Farina, J. T. Reeves, C. H. Senanayake, J. J. Song, "Asymmetric Synthesis of Active Pharmaceutical Ingredients", *Chem. Rev.* **106** (2006), 2734.
- (2) B. List, P. Pojarliev, C. Castello, "Proline-Catalyzed Asymmetric Aldol Reactions between Ketones and  $\alpha$ -Unsubstituted Aldehydes", *Org. Lett.*, **3** (2001), 573.
- (3) P. Krattiger, R. Kovasy, J. D. Revell, S. Ivan, H. Wennemers, "Increased Structural Complexity Leads to Higher Activity: Peptides as Efficient and Versatile Catalysts for Asymmetric Aldol Reactions", *Org. Lett.*, **7** (2005), 1101.
- (4) Y. Han, J. M. Kim, G. D. Stucky, "Preparation of Noble Metal Nanowires Using Hexagonal Mesoporous Silica SBA-15", *Chem. Mater.*, **12** (2000), 2068.
- (5) S. B. H. Kent, "Total chemical synthesis of proteins", *Chem. Soc. Rev.*, **38** (2009), 338.
- (6) J. C. Hicks, C. W. Jones, "Controlling the Density of Amine Sites on Silica Surfaces Using Benzyl Spacers", *Langmuir* **22** (2006), 2676.
- (7) N. A. Brunelli, K. Venkatasubbaiah, C. W. Jones, "Cooperative Catalysis with Acid-Base Bifunctional Mesoporous Silica: Impact of Grafting and Co-condensation Synthesis Methods on Material Structure and Catalytic Properties", *Chem. Mater.*, **24** (2012), 2433.
- (8) C.T. Kresge, M. E. Leonowicz, W. J. Roth, J. C. Vartuli, J. S. Beck, "Ordered mesoporous molecular sieves synthesized by a liquid-crystal template mechanism", *Nature*, **359** (1992), 710.
- (9) F. Kleitz, S. Choi, R. Ryoo, "Cubic Ia3d large mesoporous silica: synthesis and replication to platinum nanowires, carbon nanorods and carbon nanotubes", *Chem. Commun.*, (2003), 2136.
- (10) H. Matsukizono, R.-H. Jin, "High-Temperature-Resistant Chiral Silica Generated on Chiral Crystalline Templates at Neutral pH and Ambient Conditions", *Angew. Chem. Int. Ed.*, **124** (2012), 5964.



## 人工光合成反応を指向した新規 Sn 酸化物光触媒の創製と合金ナノ粒子助触媒担持による光触媒反応の高効率化

田邊 豊和\* 阿部 英樹\*\* 宮内 雅浩\*\*\* 松本 太\*\*\*\*

### Synthesis of novel tin oxide photocatalyst for artificial photosynthesis and enhanced photocatalytic performance of alloy nanoparticles loaded photocatalyst.

Toyokazu TANABE\* Hideki ABE\*\* Masahiro MIYAUCHI\*\*\* Futoshi MATSUMOTO\*\*\*\*

#### 1. 緒言

地球エネルギー問題の根本解決には無尽蔵の再生可能エネルギーである太陽エネルギーの変換システム構築が必須である。太陽電池やバイオマス等の太陽エネルギー利用の研究が盛んに行われている中で「光触媒を用いた水分解反応による水素製造」は太陽エネルギーを利用価値の高い水素エネルギーとして直接変換・貯蔵できる大きな利点がある(図1)。また、米国エネルギー省 DOE の試算では光触媒による水素製造は実用化への課題とされるエネルギーコストの壁(約2円/MJ≒石油に相当)を超える数少ない経済合理性を確保できる太陽エネルギー変換技術の代表として位置づけられている<sup>(1)</sup>。さらに現在の化石燃料を用いた水素製造法ではCO<sub>2</sub>を多量に排出していることから、光触媒による水素製造が実現することで年間約200~300万トンもの膨大なCO<sub>2</sub>削減効果がある。光触媒による水素製造は地球温暖化・エネルギー問題解決に大きく寄与することが可能であり人類が実現すべき最重要な技術のひとつである。

本報では、人工光合成反応に分類される可視光照射下水分解反応用の新規スズ系酸化物光触媒の合成(2章)、及び合金助触媒の選択担持による光触媒反応高効率化(3章)について記す。

\*助教 物質生命化学科

Assistant Professor, Dept. of Material & Life Chemistry

\*\*客員教授 物質生命化学科, 主幹研究員 物質材料研究機構

Visiting professor, Dept. of Material & Life Chemistry

\*\*\*教授 東京工業大学 物質理工学院 材料系

Professor, Dept. of Materials Science and Engineering, Titech

\*\*\*\*教授 物質生命化学科

Professor, Dept. of Material & Life Chemistry

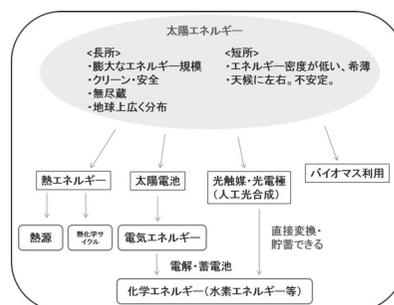


図1 代表的な太陽光エネルギー変換技術

#### 2. 光触媒による水分解

水分解による水素製造の基幹物質となるのが太陽光を吸収し電荷(励起電子-正孔ペア)を生成する可視光応答型光触媒である。光触媒反応活性は[光吸収効率]×[量子収率]によって決定されるが、これまでの光触媒開発では、バンドギャップ(B.G.)の広い半導体酸化物(主にTiO<sub>2</sub>)に異種元素をドーブ・置換し、価電子帯を底上げすることで[光吸収効率]を向上させることに主眼が置かれてきた(図2)。しかし、従来手法では異種元素ドーブによる欠陥サイトも同時に導入されるため電荷の再結合を誘発

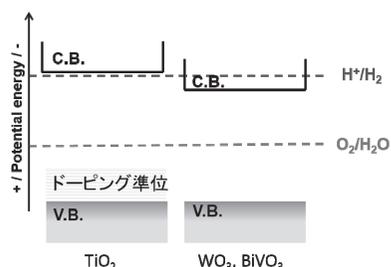


図2 従来の可視光応答型光触媒のバンド端位置

し、[量子収率]の改善は難しい。実際に現在の最高量子収率は5%程度であり<sup>(2)</sup>、光吸収で生成した電荷の95%が水分解に使われることなく消滅している。そのため水分解の高効率化には、ドーピングや置換を用いない新規の可視光応答型光触媒を開発する必要がある。

### 2-1. 可視光応答性 Sn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 光触媒

筆者を含む研究グループは Sn 塩化物を前駆体とした水熱合成法によりドーピングや置換を必要としない可視光応答型光触媒 Sn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> の合成に成功し、可視光照射下での犠牲剤水溶液からの水素発生を世界で初めて報告した<sup>(3)</sup>。合成した Sn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 粉末は不純物相を相当量含んでいるにも関わらず可視光照射下における水素生成速度は単一金属酸化物では極めて高く、純相を得ることで更なる向上が見込まれる材料である。Sn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> は、酸素との結合によりワイドな B.G を形成する Sn<sup>4+</sup> と、狭い B.G を形成する Sn<sup>2+</sup> を酸化物中に共存させることで可視光を吸収可能な B.G (3eV 以下) と、水の還元・酸化による水素発生と酸素発生が十分可能なバンド端位置を有している (図3)。この結果から、従来の異種元素イオンドープによるバンド制御手法ではなく、混合価数共存によるバンド構造制御を利用することで、ドーピングサイトを含まない可視光応答型光触媒創出が可能であり、電荷再結合が低減される結果、従来よりも飛躍的に高効率に水分解反応を達成することが可能である。現在まで水熱合成法によって得られた Sn 酸化物系光触媒サンプル中には可視光応答性を有する Sn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 以外に、反応を阻害する不活性な不純物相が相当量含まれている。試料中の Sn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 相の割合を高めることで水素生成反応活性を著しく促進可能であることは明白である。そこで本研究では、Sn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> の高純度化・高活性化による高効率での水素生成の達成について検討を行った。

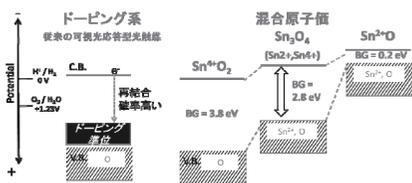


図3 ドープ系光触媒と Sn 酸化物系光触媒のバンド端位置比較

### 2-2. Sn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 光触媒の単相合成

Sn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> の単相合成を目的として、水熱合成反応における加熱反応時間・pH・前駆体溶液条件の最適化を検討し

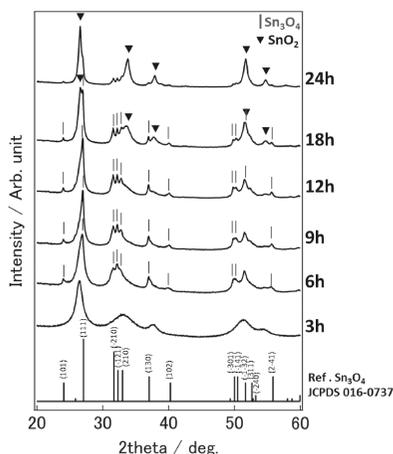


図4 各水熱反応時間によって得られる Sn 酸化物の粉末 X 線回折図形(水熱合成条件:(C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>O<sub>7</sub>)<sup>3-</sup>/Sn<sup>2+</sup>=2.5, pH = 5.5, 180°C)

た。図4は各水熱反応時間によって得られる Sn 酸化物の放射光 X 線粉末回折図形である (水熱合成条件:(C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>O<sub>7</sub>)<sup>3-</sup>/Sn<sup>2+</sup>=2.5, pH=5.5, 180°C)。放射光 X 線(Nb K-edge = 0.65297 Å at Spring-8, Beam line 15XU)を用いることで主相だけでなくマイナー相からの回折ピークも観察することができ相同定がしやすく単相合成の条件探索に有用である。X 線回折図形には炭化水素や塩化物に相同定される回折ピークは観察されず試料合成時の残留有機

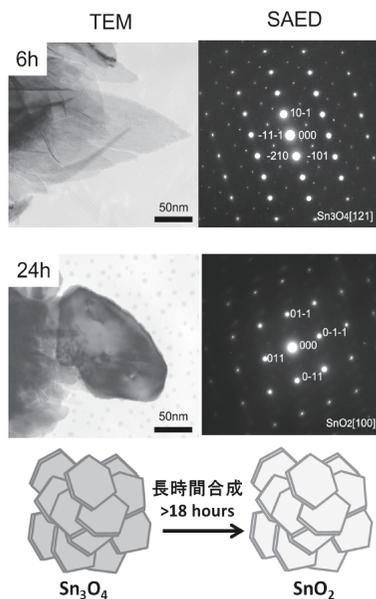


図5 水熱反応時間 6h 及び 24h により得られる Sn 酸化物の TEM 像と制限視野回折図形(SAED)

物・塩化物は殆ど存在していないことを確認した。Sn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>相に同定される回折ピークは反応時間が12hに達するまでは、反応時間が長くなるにつれシャープになる傾向があるが12h以降ではSnO<sub>2</sub>に同定されるピークが現れる。図5に反応時間6h及び24hにおけるTEM像及び制限視野回折図形(SAED)を示す。どちらの試料においてもプレート形状を有しており外形には大きな変化が見られないが、回折図形を解析すると反応時間6hではSn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>相が形成し、24hではSnO<sub>2</sub>相が形成していることが観察された。これらの結果から、長時間における水熱合成反応中にSn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>相からSnO<sub>2</sub>相へ相変態が起きることが明らかになった。すなわち水熱合成反応においてSn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>は準安定相であると結論づけられる。Sn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>単相合成には12h以内での反応が必要であり以後は反応時間を6hに固定した。

Sn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>の水熱合成反応において、前駆体溶液に含まれる(C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>O<sub>7</sub>)<sup>3-</sup>はSn錯体のキレート剤として働く、そしてpH条件はSn錯体の配位数に影響を及ぼす。それゆえ、(C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>O<sub>7</sub>)<sup>3-</sup>/Sn<sup>2+</sup>比率とpHは水熱合成条件において最も重要な生成物の支配的因子と考えられる。Sn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>単相が合成可能な最適条件を得るために、様々な(C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>O<sub>7</sub>)<sup>3-</sup>/Sn<sup>2+</sup>比率とpH条件において得られるSn酸化物について検討を行った。図6に(C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>O<sub>7</sub>)<sup>3-</sup>/Sn<sup>2+</sup>=0.25-7.0, pH=4.2-9.0における反応相図を示す(反応時間6h, 180°C)。各条件で得られる生成物はpXRDにより同定を行い、試料形態はSEMにより観察した結果を図示している。アルカリ領域(pH>8)ではプレート形状のSn<sup>2+</sup>の酸化物であるSnO相が主相として形成する、一方で中性～酸性条件下ではSn<sup>4+</sup>の酸化物であるSnO<sub>2</sub>相が広い範囲で形成する。その中でSn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>相は、5.3<pH<6.8かつ0.75<(C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>O<sub>7</sub>)<sup>3-</sup>/Sn<sup>2+</sup><5.0の限られた領域で単相として形成することが分かった。以上の検討からSn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>の最適合成条件として、(C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>O<sub>7</sub>)<sup>3-</sup>/Sn<sup>2+</sup>=0.25, pH=5.5, 加熱反応時間6hを決定した。

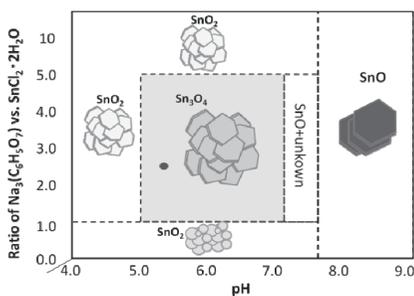


図6 各Sn前駆体キレート比とpH条件で得られるSn酸化物をまとめた反応相図。水熱合成条件：反応時間6h, 180°C

図7に異なった条件下で作製したSn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>を主相として含む試料の犠牲剤水溶液からの可視光照射下(λ>420nm)水素生成量を示した。注目すべきは助触媒なしのSn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>単独において水素発生反応(2H<sup>+</sup>+2e<sup>-</sup>→H<sub>2</sub>)を進行することが可能であることである(図7-a)。同反応条件下ではSnO, SnO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>は可視光照射下での水素発生は起こらず可視光照射下での水素発生能を有していないことを確認している。また水素発生量はSn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>試料においても合成条件に大きく依存していることが分かる。これは試料中に不活性相であるSnO<sub>2</sub>相が存在している影響が考えられる。そこで、水素発生速度をpXRDのSn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>(-201)とSnO<sub>2</sub>(101)のピーク強度比(I<sub>Sn3O4(-201)}/I<sub>SnO2(101)}</sub>)に対してプロットしたのが図7-bである。一定以上のSn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>相を含む試料では水素生成速度はI<sub>Sn3O4(-201)}/I<sub>SnO2(101)}</sub>比に比例して増加することが分かった。このことから、試料中のSn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>相が水素生成反応における触媒活性相であることが明白となった。低いI<sub>Sn3O4(-201)}/I<sub>SnO2(101)}</sub>比の領域では有意な水素発生量は確認されなかった。これは、不活性相であるSnO<sub>2</sub>がSn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>表面に堆積し、可視光を遮りそしてSn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>表面の反応活性サイトをブロックしてしまっていると考えられる。</sub></sub></sub>

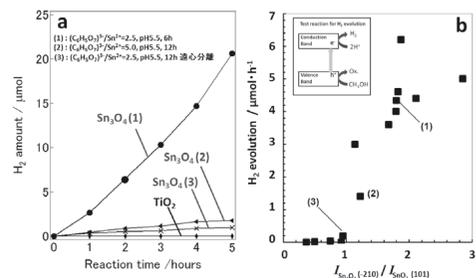


図7 可視光照射下(λ>420nm)における犠牲剤水溶液からの水素発生反応：各水熱合成条件下で作製した試料の水素発生量(a)、水素発生速度とXRD測定におけるSn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>(-210)/SnO<sub>2</sub>(101)ピーク比の関係(b)

図8-aに助触媒としてPtナ粒子を担持した単相Sn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, SnO<sub>2</sub>, SnOの可視光照射下(λ>420nm)での水素生成量を示す。Pt/SnO<sub>2</sub>, Pt/SnO両試料とも有意な水素発生は確認されなかった。一方でSn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>はPt助触媒担持後には大きく水素発生量が増加した。みかけの量子効率率はSn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>単独で0.2%, Pt助触媒担持後には1.5%と算出された。この値は可視光応答性の金属酸(窒)化物光触媒に匹敵するものである<sup>(4)</sup>。先行研究<sup>(3)</sup>と比較すると、これまでの報告例では助触媒なしのSn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>試料では水素生成活性を示さなかったが本研究で合成した単相Sn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>試

料では水素生成速度約  $6 \mu\text{mol/h}$  を達成した。また Pt 助触媒担持試料では、単相  $\text{Sn}_3\text{O}_4$  試料は約  $29 \mu\text{mol/h}$  を示し、以前の報告よりも 6 倍高い水素生成速度であった。図 8-b に単相  $\text{Sn}_3\text{O}_4$  試料の作用スペクトル（水素生成速度の照射光波長依存性）を示した。 $\text{Sn}_3\text{O}_4$  の吸収波長の立ち上がりと水素生成が開始する照射光波長が一致していることから、 $\text{Sn}_3\text{O}_4$  による水素生成は、 $\text{Sn}_3\text{O}_4$  でのバンドギャップ励起によって生成した励起電子によって光触媒反応として起こっていることが確認される。

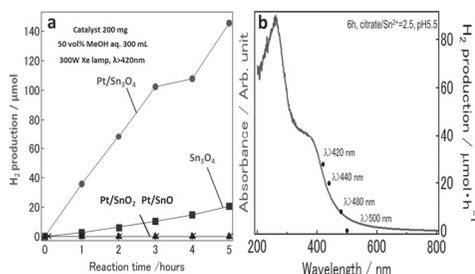


図 8 Pt 助触媒を担持した  $\text{Sn}_3\text{O}_4$  の可視光照射下 ( $\lambda > 420\text{nm}$ ) における犠牲剤水溶液からの水素発生反応(a), 同反応条件下での Pt(0.5wt%)/ $\text{Sn}_3\text{O}_4$  光触媒の作用スペクトル(b)

図 9-a に  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{Sn}_3\text{O}_4$  単相  $\text{Sn}_3\text{O}_4$  の UV-VIS 測定結果を示す。 $\text{SnO}$  は紫外-可視光領域に明確な吸収スペクトルを示さずナローバンドギャップ半導体であることを示してい

る。 $\text{SnO}_2$  は紫外光領域(UV)に鋭い吸収端を示し、 $\text{Sn}_3\text{O}_4$  は可視光領域に吸収端を持つことが分かる。シャープな吸収端を持つことから  $\text{Sn}_3\text{O}_4$  の可視光吸収は不純物準位の吸収でなくバンド間遷移によるものである。可視光応答性を反映し  $\text{Sn}_3\text{O}_4$  単相試料はオレンジ色を呈していた。UV-VIS 吸収スペクトルの吸収端付近の吸収プロット (図 9-b) から、 $\text{Sn}_3\text{O}_4$  単相のバンドギャップは  $2.8\text{eV}$ 、 $\text{SnO}_2$  のバンドギャップは  $3.8\text{eV}$  と算出される。紫外光吸収の  $\text{SnO}_2$  より  $\text{Sn}_3\text{O}_4$  のバンドギャップが狭いことが確認される。図 9-c に  $\text{Sn}_3\text{O}_4$ ,  $\text{SnO}_2$  の価電子帯の硬 X 線光電子分光 (HXPES) スペクトルを示す。価電子帯上端位置は HXPES スペクトルのエッジ部分から直線で外挿して算出した<sup>(5)</sup>。 $\text{Sn}_3\text{O}_4$  の価電子帯上端は  $+2.5\text{V}$  (vs. SHE) であり、 $\text{SnO}_2$  の  $+3.6\text{V}$  よりも浅いことが分かる。図 9-d に  $\text{Sn}_3\text{O}_4$ ,  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{SnO}$ , rutile- $\text{TiO}_2$  のバンドエッジポジションを示す。前者 2 つは UV-VIS スペクトルからバンドギャップと HXPES から価電子帯上端位置を算出し、バンド位置を決定した。後者の 2 つは先行研究の理論計算の結果を示している<sup>(3,6)</sup>。水素の酸化還元電位は  $\text{TiO}_2$  の伝導帯下端の直下に位置することが知られており、光触媒の水素発生能力を判断するために有用である。理論計算では  $\text{SnO}$  の Sn 価数はすべて  $\text{Sn}^{2+}$  であり、 $\text{Sn}5s$  で形成される価電子帯レベルは  $\text{O}2p$  よりも浅く negative であるため非常に狭いバンドギャップと浅い価電子帯上端を有していると解釈されている。一方で、 $\text{SnO}_2$  では、すべての Sn 価数は  $\text{Sn}^{4+}$  であり、価電子帯はほぼ  $\text{O}2p$  により形成され

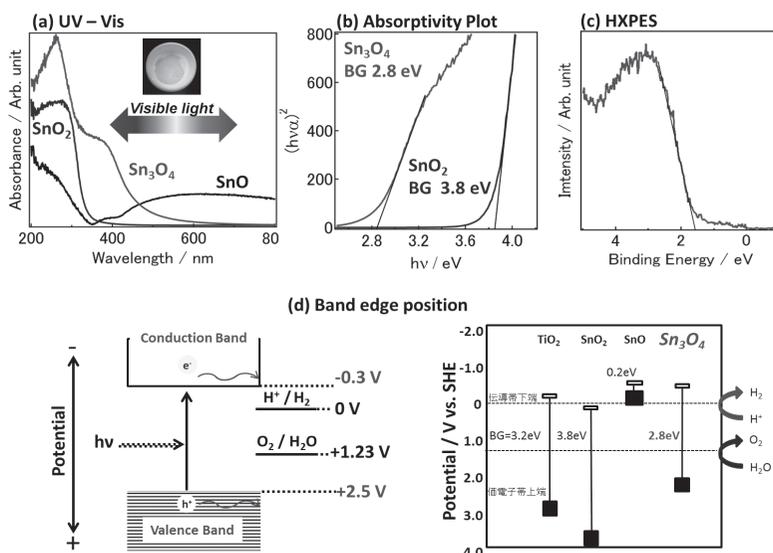


図 9  $\text{Sn}_3\text{O}_4$  のバンド構造評価：UV-Vis 拡散反射スペクトル(a), 吸収係数プロットによるバンドギャップ評価(b), 硬 X 線光電子分光による価電子帯上端の評価(c),  $\text{Sn}_3\text{O}_4$ ,  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{SnO}$ , ルチル  $\text{TiO}_2$  のバンド端位置(d)

深い価電子帯を有している。そのため、バンドギャップは大きく、可視光を吸収せず紫外光応答性を有している。Snの価数とバンド位置に注目すると $\text{Sn}^{2+}$ が価電子帯の底上げとギャップの狭窄に寄与していることが明らかである。図9-dより $\text{Sn}_3\text{O}_4$ のバンド位置は $\text{SnO}$ と $\text{SnO}_2$ の間に位置していることが分かる。 $\text{Sn}_3\text{O}_4$ は $\text{Sn}^{2+}$ と $\text{Sn}^{4+}$ の混合価数酸化物であり $\text{Sn}^{2+}$ を相当量含んでいるがバンドギャップは適度な幅を有している。混合価数Sn酸化物の理論計算から、積層構造を有する混合価数Sn酸化物のバンドギャップは各レイヤーの層間距離に依存することが分かっている<sup>(6)</sup>。レイヤー間の層間距離が広いほどギャップが開く。この結果は、価電子帯上端と伝導帯下端が主に $\text{Sn}^{2+}\text{-O}$ と $\text{Sn}^{2+}\text{-Sn}^{2+}$  antibondingにより形成しているためと解釈される。バンドギャップは $\text{Sn}^{2+}\text{-O}$ と $\text{Sn}^{2+}\text{-Sn}^{2+}$ の相互作用によって決まる。 $\text{Sn}_3\text{O}_4$ は $2.82\text{\AA}$ の層間距離を持ち、可視光吸収可能な適度なバンドギャップを実現していると考えられる。注目すべきは、 $\text{Sn}_3\text{O}_4$ の伝導帯下端がプロトン還元による水素発生電位よりも上に位置しており(-0.3V vs. SHE)、かつ価電子帯の上端(+2.5V)が水の酸化電位(+1.23V)よりも下に位置していることである。このバンド位置は、可視光による水の完全分解を達成可能なバンド位置を有していることを示している。単相 $\text{Sn}_3\text{O}_4$ 光触媒の可視光照射下による高活性な水素発生能は、水素発生に適したバンド端位置と可視光吸収可能なバンドギャップによるものと考えられる。上述のように $\text{Sn}_3\text{O}_4$ は完全水分解可能なバンド位置を有している。しかし $\text{Sn}_3\text{O}_4$ 単独では完全水分解の達成は現在のところ実現していない。その理由としては、 $\text{Sn}^{2+}$ が酸化されやすくホールと反応し $\text{Sn}^{4+}$ になってしまうことが挙げられる。実際にこれまで $\text{Sn}^{2+}$ を含む酸化物では酸化反応である水からの酸素発生を報告した例はない。今後、 $\text{Sn}_3\text{O}_4$ による完全水分解を達成するためには、酸素発生用光触媒との組み合わせによるタンデム型光触媒系への適用が望まれる。水素発生を $\text{Sn}_3\text{O}_4$ が担い、酸素発生を酸化力の強い $\text{WO}_3$ 等が担うことで系全体として完全水分解を達成可能と考えられる。

### 3. 金属微粒子助触媒の光触媒反応サイトへの選択担持

$\text{Sn}_3\text{O}_4$ 粒子表面に金属や酸化物のナノサイズの微粒子を助触媒として担持することで、反応サイトの構築、表面反応の促進、電荷再結合の抑制など光触媒反応を促進する複数の効果を同時に得ることができる(いわゆる助触媒効果)。 $\text{Sn}_3\text{O}_4$ 系光触媒ではPt微粒子担持に関する報告例のみであり<sup>(3)</sup>、助触媒効果の検討はほぼ未知領域である。これまで筆者を含む研究グループはPt-Pb合金

微粒子が酸素還元反応や有機物分解等の電気化学反応において高活性であることを報告してきた<sup>(7, 8)</sup>。そこでPt-Pb合金微粒子を光触媒の助触媒として検討することとした。 $\text{Sn}_3\text{O}_4$ においては光触媒反応が起きる表面反応サイトが特定されていないため、まずPt-Pb助触媒を担持する光触媒としては安定であり酸化反応サイトと還元反応サイトが既知でありさらに空間的に分離している $\text{TiO}_2$ ナノロッドを光触媒として選択した。ナノロッドを使用することでPt-Pb合金の各反応サイトへの選択的担持の効果を明らかにすることが可能になる。

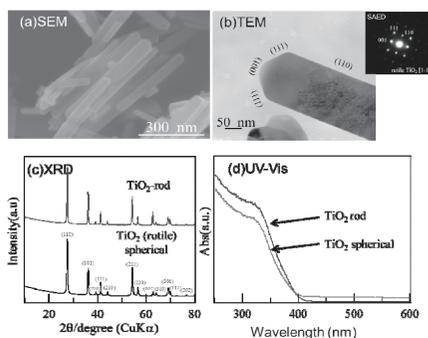


図10  $\text{TiO}_2$  ナノロッドのSEM(a),TEM(b),XRD(c)及びUV-Vis スペクトル(d)

#### 3-1. $\text{TiO}_2$ ナノロッド光触媒の合成

図10に合成した $\text{TiO}_2$ ナノロッド( $\text{TiO}_2\text{-rod}$ )のキャラクターゼーション結果を示す。SEM像(図10-a)から水熱合成によって得られる試料はロッド形状(長さ300-400nm×幅20-50nm)の凝集体であり、BET比表面積は約 $38\text{m}^2/\text{g}$ であった。図10-bにTEM像及制限視野回折像(Selected area electron diffraction: SAED)を示す。TEM像よりロッド形状の末端は切頂のピラミッド型をしていることがわかる。また、SAEDではシャープな回折スポットが得られ、 $\text{TiO}_2$ ルチル相の<1-10>の晶帯軸入射の回折図形であると帰属される。TEM像とSAEDの対応よりロッドの最表面露出した結晶面を同定すると、切頂の先端部分が{001}、先端に接しているピラミッド部が{111}、面積の大きいロッドの側面が{110}であることがわかる(図10-b中に図示)。図10-cに粉末XRDを示す。XRDのすべての回折ピークは $\text{TiO}_2$ ルチル相(JCPDS:21-1276)に帰属され単相が得られていることがわかる。図10-dにUV-Vis拡散反射スペクトルを示す。紫外光領域において吸収端が観察され、市販のルチル $\text{TiO}_2$ 粉末(MT-500)とほぼ同じ吸収波長領域である。このことからナノロッド形状による吸収特性への影響は殆どないと考えられる。

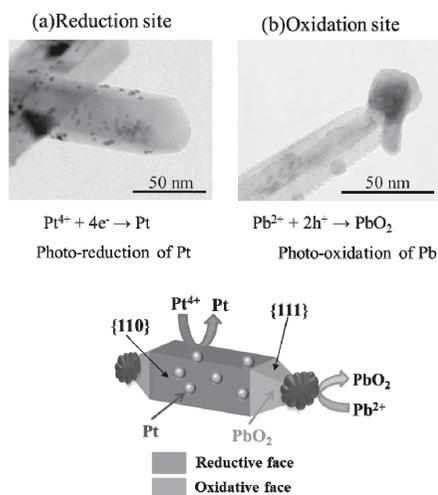


図1 還元反応サイトへのPt光還元によるPt微粒子担持(a),酸化反応サイトへのPb光酸化によるPbO<sub>2</sub>粒子担持

合成したTiO<sub>2</sub>ロッドの還元サイト、酸化サイトを同定するためにPtの光還元(photo-reduction)とPbの光酸化(photo-oxidation)を行なった。Pt<sup>4+</sup>とメタノール存在下においてUV光を照射するとTiO<sub>2</sub>粉末にPt粒子が析出し、試料は灰色を呈した。UV照射によりTiO<sub>2</sub>中に励起電子が生成し表面に拡散することでPt<sup>4+</sup>をPt金属に還元し、Pt金属微粒子をTiO<sub>2</sub>表面に析出したものと解釈できる。一方、正孔は犠牲剤であるメタノールの酸化によって消費される。光触媒における還元反応サイトは、励起電子が優先的に消費される表面反応サイトとして考えられる。Ptの光還元において、Pt<sup>4+</sup>は光触媒表面の還元反応サイト上において励起電子と反応しPt金属状態に還元される( $\text{Pt}^{4+} + 4e^- \rightarrow \text{Pt}^0$ )。それ故、Ptの光還元によるPt析出箇所がTiO<sub>2</sub>-rodの還元反応サイトとして特定できる。図11-aにPtの光還元後のTEM像を示す。TEM像よりPt微粒子はTiO<sub>2</sub>-rodの側面である{110}に選択的に析出していることがわかる。このことから、TiO<sub>2</sub>-rodの側面が還元反応サイトであると特定され、TiO<sub>2</sub>-rod表面の大部分が還元反応サイトとして機能していることがわかる。これまでの報告では、ルチルTiO<sub>2</sub>の(110)表面には2種類の原子列が交互に並んでおり、酸素が5配位したTiサイトとブリッジ型の酸素サイトが交互に並んでいるとされる<sup>(9)</sup>。(110)表面は他の結晶面よりも配位数の低い5配位のTiサイトが最も多く表面露出した結晶面である。5配位のTiサイトは他のTiサイトよりも配位数が低いことから電子密度が低く、TiO<sub>2</sub>バルク中の励起電子を

もっとも捕捉しやすい表面サイトと考えられる。そのため、5配位Tiサイトを多く含んでいる(110)表面は他の結晶表面よりも励起電子を捕捉しやすい結晶表面であり、TiO<sub>2</sub>-rodの還元反応サイトとして機能していると考えられる。一方で、Pt/TiO<sub>2</sub>粉末を用いてPb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>存在下でUV照射を行うと粉末は薄茶色を呈した。これは、PbO<sub>2</sub>がTiO<sub>2</sub>表面に析出したためと考えられる。Pbの光酸化において、Pb<sup>2+</sup>がTiO<sub>2</sub>中で生成した正孔とTiO<sub>2</sub>表面で反応し酸化されPbO<sub>2</sub>が形成する( $\text{Pb}^{2+} + 2h^+ \rightarrow \text{PbO}_2$ )、このとき励起電子は液中の溶存酸素と反応し消費される。それゆえ、PbO<sub>2</sub>の析出箇所がTiO<sub>2</sub>の酸化反応サイトとして特定することができる。図11-bにPbの光析出後のTEM像を示す。析出粒子はEDS分析によりPbO<sub>2</sub>(Pb:O=1:2)であることを確認した。TEM像より100nm程度のPbO<sub>2</sub>粒子が{001}及び{111}で表面が形成されるロッドの先端部分に選択的に析出していることがわかる。この結果から、{001}、{111}表面がTiO<sub>2</sub>-rodの酸化反応サイトとして機能していることがわかる。ルチルTiO<sub>2</sub>の(001)表面は、6配位のTiサイト列とブリッジ酸素サイト列が交互に並んでいる表面構造であり、Tiサイト位置は再表面からバルク内部側へシフトしており、(001)の露表面はブリッジ酸素で大部分が覆われているとされている<sup>(9)</sup>。ブリッジ酸素サイトは他の原子サイトよりも電子密度が高く、TiO<sub>2</sub>中の正孔を最も捕捉し易い原子サイトと考えられる。それゆえ、(001)表面はブリッジ酸素によりバルク中の正孔を捕捉し、表面の酸化反応サイトとして機能していると考えられる。(111)面も同様に、Tiサイトと酸素サイト列が存在しTiサイトがバルク方向にシフトしているため表面は酸素リッチである<sup>(9)</sup>。そのため(111)表面も酸化反応サイトとして機能していると考えられる。

図10のSEM,TEM像よりロッド側面の還元反応サイトとロッド先端部分の酸化反応サイトの面積比は3:1であり還元反応サイトの面積が大部分を占める。側面と先端部分の面積比を制御するためにNH<sub>3</sub>+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>溶液による化学エッチング処理を行った。図12に1h-4h化学エッチング処理後のSEM像を示す。時間経過と共にロッド先端部の角度が徐々に鋭くなる様子が観察された。これは、ピラミッド部の{111}が優先的にエッチングされ、隣接しているロッド側面の{110}もNH<sub>3</sub>+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>処理により削れていっているためと考えられる。エッチング処理により露出した面は{111}に近い{11n}(0<n<1)であると考えられる。この新らに露出した{11n}もPbの光酸化によりPbO<sub>2</sub>が析出していたことから酸化反応サイトとして機能することを確認した。化学エッチング処理によりロッド

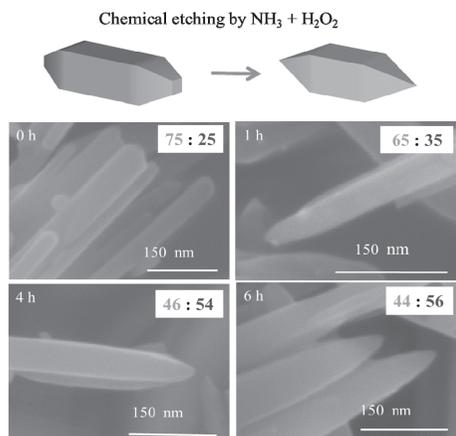


図12 NH<sub>3</sub>+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 化学エッチング後の TiO<sub>2</sub> ナノロッドのSEM像

ド先端部の面積は大きくなり側面の面積は顕著に減少した。SEM像から見積もられる先端:側面の面積比を図12に示している。エッチング時間が4hで面積比がほぼ1:1になりNH<sub>3</sub>+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>処理によりロッドの面積比を制御可能であることが分かった。

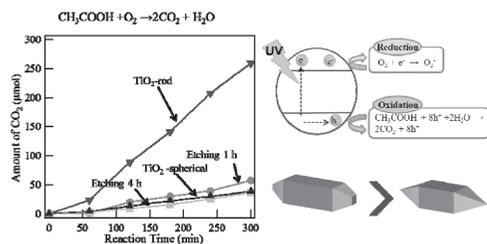


図13 TiO<sub>2</sub> ナノロッド及びエッチング処理後の酢酸光酸化分解活性(Sample:30mg,5vol.%酢酸,Xe ランプ full arc,O<sub>2</sub> 30kPa)

図13にTiO<sub>2</sub>-rod及び化学エッチング処理したTiO<sub>2</sub>-rod,市販ルチル粉末(MT-500)におけるUV照射下の酢酸の光酸化分解反応結果を示す。酢酸は完全酸化によりCO<sub>2</sub>が発生する(CH<sub>3</sub>COOH + 2O<sub>2</sub> → 2CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O)。縦軸にCO<sub>2</sub>発生量,横軸に反応時間として図示している。本実験条件においては,反応により気相成分としてCO<sub>2</sub>のみが検出され他の副生成物は観測されなかったことからTiO<sub>2</sub>-rod光触媒では完全酸化反応が支配的に起きていると考えられる。図13よりTiO<sub>2</sub>-rodが市販のルチル粉末(MT-500)よりも顕著に活性が高い。BET表面積はTiO<sub>2</sub>-rodが38m<sup>2</sup>/g,MT-500が35m<sup>2</sup>/gであり大きな差異はない。それゆえTiO<sub>2</sub>光触媒のファセット構造が光触媒活性に大きく影響を及ぼしていることがわかる。

TiO<sub>2</sub>-rodのような結晶面が明確に表面露出したファセット構造においては,還元反応サイトと酸化反応サイトが空間的に分離しているため,電荷分離の効率が大きく向上していると考えられる。励起電子と正孔はそれぞれ還元反応サイトであるロッド側面{110}と酸化反応サイトであるロッド先端部{001},{111}に捕捉される。そのため,ロッドの表面において励起電子と正孔が空間的に分離される確率が高くなる。空間的に分離されることにより励起電子-正孔対の再結合の割合が減少し電荷分離効率が向上することで高活性を示していると考えられる。

一方で,明確なファセット構造を持たず還元反応サイトと酸化反応サイトが十分に空間的に分離されていない市販TiO<sub>2</sub>球状粒子の場合では,励起電子-正孔対の再結合が起りやすくファセット構造よりも電荷分離効率が低いと考えられる。還元反応サイトと酸化反応サイトの比率を変化させた化学エッチング処理後の試料の光触媒活性を比較すると,エッチング前が最も活性が高く,エッチングにより活性が著しく低下する。エッチング処理によりUV-Visスペクトルなどにおいて変化は観測されないことから,TiO<sub>2</sub>の光吸収特性への影響は無視できるレベルと考えられる。また,エッチングによる表面積の増加はわずかであり(38m<sup>2</sup>/g→41m<sup>2</sup>/g),材料特性の違いによって光触媒活性の差が生じている可能性は低い。これらの結果から,ファセット構造TiO<sub>2</sub>の光触媒活性は露出表面の違いに大きく依存していると考えられる。エッチング処理により還元反応サイトである{110}が減少し,{111}が削れて露出した{11n}がエッチングと共に増加する。活性測定の結果から還元反応サイトである{110}が多いほど酢酸の完全酸化分解反応の光触媒活性が高いことがわかる。このことは,TiO<sub>2</sub>-rodにおいては酸化・還元反応が同一粒子上で起こる粉末系光触媒反応において還元反応プロセス側が光触媒活性において支配的な影響を持っていることを示している。酢酸等の有機物分解反応においては,光触媒粒子上で有機物の酸化反応と酸素還元反応(O<sub>2</sub>+e<sup>-</sup>→O<sub>2</sub><sup>-</sup>)が同時に起きるとされている<sup>(1)</sup>。本実験条件下では,閉鎖系の反応容器を用いているため反応溶液中の溶存酸素量は低レベルであり,酸素還元反応が律速反応である可能性が高い。TiO<sub>2</sub>-rodの露出表面において,酸素還元反応はロッド側面の{110}で優先的に起きると考えられる。エッチング処理前のTiO<sub>2</sub>-rodが高活性である理由は還元反応サイトである{110}の面積が大きいことから励起電子による酸素還元反応が促進される結果,再結合確率が減少し正孔による酢酸分解が効率良く進行したためと考えられる。

### 3-2. 助触媒 PtPb 合金微粒子の TiO<sub>2</sub> ナノロッド還元反応サイト選択担持

Pt-Pb 合金微粒子の TiO<sub>2</sub> への選択担持は2段階合成法を用いた。合成スキームを図14に示す。

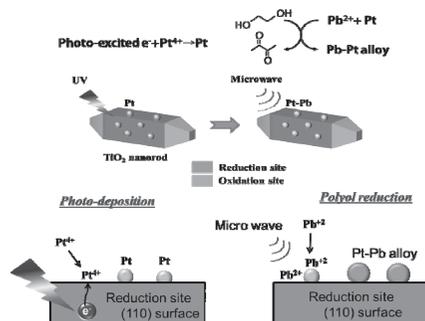


図14 2段階合成法によるTiO<sub>2</sub>(110)還元反応サイトへのPt-Pb合金微粒子の選択担持

第1段階では、Ptの光還元によりPt微粒子を還元サイトであるロッド側面{110}に選択的に担持する。このPtの還元サイトへの選択的担持は前項で用いた手法と同様である。第2段階として、マイクロ波照射を用いたポリオール還元法(溶媒・還元剤:エチレングリコール, Pb前駆体:Pb(CH<sub>2</sub>COO)<sub>2</sub>)により、選択担持したPt微粒子の表面上においてPb<sup>2+</sup>を還元し、Ptと合金化させることによりPt-Pb合金微粒子を還元サイトに選択的に形成させた。

図15に2段階法によりPt-Pb合金をTiO<sub>2</sub>-rod上に選択担持した試料のTEM観察結果を示す。TEM像から調製したPt-Pb合金はTiO<sub>2</sub>-rodの側面{110}に選択的に担持されていることがわかる。酸化反応サイトであるロッド先端部分の{001}, {111}には微粒子は観察されなかった。TEM像から算出した平均粒子径は5.6nmであった。高分解能像(HR-TEM)(図15-b)を解析するとPt-Pb合金微粒子はFCC構造を有していることがわかり、PtとPbがランダムにサイトを占める固溶体合金を形成していることが分かった。STEM-EDSによる元素マッピング像を図15-cに示す。PtとPbのマッピング像からPtとPbは同一粒子中で均一に混合されていることがわかり、Ptのみの微粒子は観察されなかった。EDSの点分析により合金微粒子中の元素比率はおおよそPt/Pb=3:1であった。

2段階合成法による選択担持の比較検討のために、ランダムにPt-Pb合金微粒子をTiO<sub>2</sub>-rod上に担持させた試料も金属イオン同時還元により合成した。マイクロ波照射を用いたポリオール還元法によりPt<sup>4+</sup>とPb<sup>2+</sup>を同時に還元・合金化すること(1段階還元)でTiO<sub>2</sub>-rodの表面にPt-Pb合金微粒子をランダムに担持させた。図16に1段階

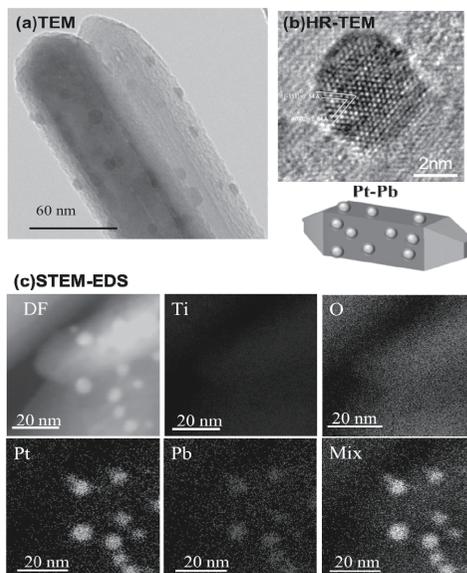


図15 Pt-Pb合金微粒子をTiO<sub>2</sub>-rod還元反応サイトに2段階合成法により選択担持したPt-Pb/TiO<sub>2</sub>-rodのTEM像(a),高分解TEM像(b),STEM-EDS元素マッピング像(c)

階法で合成したPt-Pb/TiO<sub>2</sub>-rodのTEM観察結果を示す。TEM像よりPt-Pb合金微粒子はロッドの側面・先端部に関係なくランダムにTiO<sub>2</sub>-rod上に担持されていることが分かる。高分解能像(HR-TEM)により1段階で合成したPt-Pb合金微粒子もFCC構造を有しており、2段階合成法と同様にPt-Pbの固溶体合金を形成していることが分かる。TEM像から算出される平均粒子径は3.7nmであり、2段階合成法よりも小さいサイズのPt-Pb合金微粒子が形成していた。STEM-EDS分析による元素マッピング像を図16-cに示す。PtとPbのマッピング像からPtとPbは同一粒子中で均一に混合されていることがわかり、Ptのみの微粒子は観察されなかった。EDSの点分析により合金微粒子中の元素比率はおおよそPt/Pb=3:1であった。Pt-Pb合金の粒子サイズや組成にはTiO<sub>2</sub>-rodの露出結晶面ごとの違いは観察されなかった。それゆえ、露出結晶面における合金粒子の核生成・核成長プロセスに大きな差異はないと考えられる。これらの結果から、1段階還元法によりTiO<sub>2</sub>-rod表面にランダムにPt-Pb合金微粒子が担持されたと結論づけられる。

Pt-Pb担持TiO<sub>2</sub>-rodの各試料の光触媒活性測定結果を図17に示す。担持前のTiO<sub>2</sub>-rodと比較して、Pt-Pb担持試料はいずれの試料も顕著な活性向上の効果(助触媒効果)が観察された。また、助触媒としてPtを担持したPt/TiO<sub>2</sub>-rodと比較してもPt-Pb担持の方が助触媒による

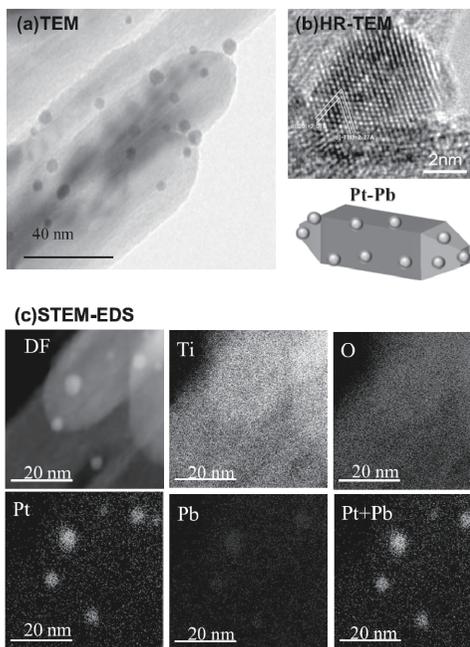


図 16 Pt-Pb 合金微粒子を 1 段階合成法により  $\text{TiO}_2$ -rod にランダム担持した Pt-Pb/ $\text{TiO}_2$ -rod の TEM 像(a), 高分解 TEM 像(b), STEM-EDS 元素マッピング像(c)

活性向上効果が大きいことが分かった。最も高活性であった Pt-Pb 選択担持  $\text{TiO}_2$ -rod (2 段階法) は、担持前と比較して 6 倍の  $\text{CO}_2$  生成量であり、Pt/ $\text{TiO}_2$  よりも 4 倍の生成量であった。Pt-Pb 選択担持  $\text{TiO}_2$ -rod (2 段階法) において、酢酸の完全酸化反応 ( $\text{CH}_3\text{COOH} + 2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ ) を想定し、8 ホール反応 ( $\text{CH}_3\text{COOH} + 2\text{H}_2\text{O} + 8\text{h}^+ \rightarrow 2\text{CO}_2 + 8\text{H}^+$ ) を過程して、見かけの量子効率  $\Phi_{\text{app}}$  を計算すると 22.5% ( $\lambda > 260\text{nm}$ ) であった。このとき、ラジカルによる連鎖反応 (ラジカルチェーン反応) 等は考慮に入れていない。この量子効率の値はこれまで報告されている  $\text{TiO}_2$  系光触媒を凌駕する値である<sup>(11)</sup>。図 13 において上述したように、本実験条件下では酸素還元反応が酢酸分解活性に支配的な影響を持っている。電気化学反応においては Pt-Pb 合金粒子は Pt 粒子と比較して酸素の還元反応に高い触媒活性を示すことが報告されている<sup>(12)</sup>。この Pt-Pb 合金粒子の酸素還元反応に対する高い触媒活性が Pt-Pb 担持  $\text{TiO}_2$ -rod の高効率光触媒反応の促進に寄与していると考えられる。

Pt-Pb 担持  $\text{TiO}_2$ -rod 試料において、2 段階法による選択担持と 1 段階によるランダム担持を比較すると、2 段階による選択担持は、ランダム担持よりも顕著に活性向上に効果的であった。Pt-Pb 粒子径はランダム担持の方が小

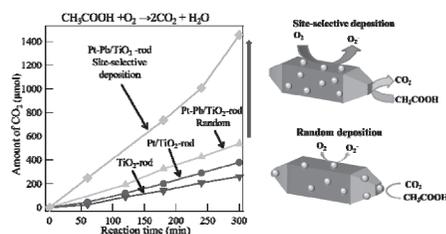


図 17 Pt/ $\text{TiO}_2$ -rod 及び Pt-Pb/ $\text{TiO}_2$ -rod の酢酸光酸化分解活性 (Sample: 30mg, 5vol.% 酢酸, Xe ランプ full arc,  $\text{O}_2$  30kPa)

さいにもかかわらず、 $\text{CO}_2$  の生成量は選択担持の方がランダム担持よりも 3 倍多い (図 17)。2 つの試料において Pt-Pb 粒子の化学組成や元素分布はほぼ同レベルであり (図 15, 16)、担持された Pt-Pb 微粒子の物理特性の違いが触媒活性に影響している可能性は極めて低い。担持法の違いにより Pt-Pb 合金微粒子の担持箇所が大きく異なる。それゆえ助触媒 Pt-Pb 合金微粒子の担持サイトの違いが光触媒活性に大きく影響していると考えられる。推察される Pt-Pb 助触媒- $\text{TiO}_2$  界面における励起電子の移動過程を図 18 に示す。2 段階合成法では  $\text{TiO}_2$ -rod (110) 面の還元反応サイト上に助触媒である Pt-Pb 合金微粒子が選択的に担持される。励起電子は  $\text{TiO}_2$  バルクから (110) 表面に移動し還元反応サイトへトラップされる。Pt-Pb 合金微粒子が還元反応サイト上へ選択的に担持されている場合には、還元反応サイトにトラップされた励起電子は Pt-Pb 合金微粒子/ $\text{TiO}_2$  界面を通して直接的に助触媒である Pt-Pb 合金微粒子に注入される。その結果、助触媒表面で酸素の還元反応が効率良く進行する。この直接的な励起電子の助触媒への注入は最短距離での電子注入過程と考えられ、還元反応サイトへの選択担持には励起電子-正孔対の再結合を抑制する効果があると考えられる。これに対して、1 段階合成法によりランダムに Pt-Pb 合金を  $\text{TiO}_2$ -rod 上に担持した場合は、還元反応サイトと助触媒担持サイトが異なるため、(110) 表面の還元反応サイトにトラップされた励起電子は、[脱トラップ]+[助触媒サイトへ拡散]の余分な電子の移動過程が必要となる。この余分な移動過程は再結合の確率を上げ、また還元反応サイトからの励起電子の脱トラップには助触媒への直接的な電子注入よりも励起電子に大きなエネルギーが必要と考えられる。ランダム担持の場合の還元反応サイトから助触媒 Pt-Pb 合金微粒子への間接的な電子注入過程は、再結合を促進させ複雑な電子拡散過程を経るため光触媒の反応効率を低下させると考えられる。

選択担持によって Pt-Pb 助触媒サイトと TiO<sub>2</sub> の還元反応サイトを一致させることは助触媒-TiO<sub>2</sub> 光触媒間の高効率な電子移動過程を実現することが可能であり、光触媒の反応効率の向上に大きく寄与しているものと考えられる。

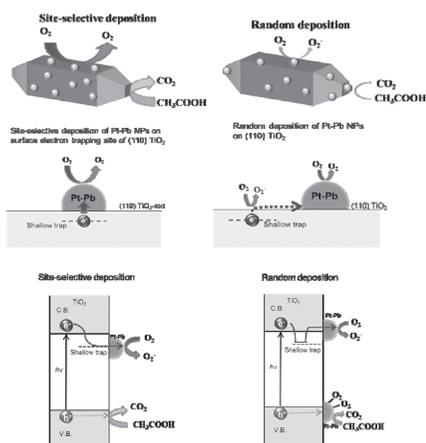


図 18 Pt-Pb 助触媒-TiO<sub>2</sub> 界面における励起電子の移動過程：選択担持 (左)、ランダム担持 (右)

#### 4. 結言

可視光水分解用光触媒として Sn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> の単相合成及び高効率での水素生成反応に取り組んだ。水熱合成条件を最適化することで Sn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 単相作製条件を見出すことに成功し、Sn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 相が可視光水分解に適したバンド構造を有していることを実験的に明らかにした。Sn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 単独で可視光下での水素発生が可能であり、Pt 微粒子助触媒を担持することで従来のドーブ系光触媒を凌ぐ高効率での水素発生が可能であることを示した。また、光触媒反応の高効率を目指し、Pt-Pb 合金助触媒の反応サイト選択的担持法を検討し、TiO<sub>2</sub> ナノロッドの還元反応サイトへの選択担持手法を開発した。還元反応サイト選択担持によってランダム担持に比べ3倍の紫外光下での酢酸光酸化分解反応の光触媒活性の向上を確認した。今後は Sn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 光触媒において水分解に有効な助触媒を反応サイトに選択的に担持することで、高効率での可視光水分解反応に取り組む予定である。

本研究は神奈川大学工学研究所共同研究の支援を受けて行われた。ここに謝意を示す。

#### 参考文献

(1) B.D. James, G.N. Baum, J. Perez, K.N. Baum, "Technoeconomic

Analysis of Photoelectrochemical (PEC) Hydrogen Production", DOE Report (2009).

(2) K. Maeda, T. Takata, M. Hara, N. Saito, Y. Inoue, H. Kobayashi, K. Domen, "Ga<sub>2</sub>N:ZnO Solid Solution as a Photocatalyst for Visible-Light-Driven Overall Water Splitting", *J. Am. Chem. Soc.* **127**-23, (2005), pp8286-8287.

(3) M. Manikandan, T. Tanabe, P. Li, S. Ueda, G. V. Ramesh, R. Kodiyath, J. Wang, T. Hara, A. Dakshnamoorthy, S. Ishihara, K. Ariga, J. Ye, N. Umezawa, H. Abe, "Photocatalytic Water Splitting under Visible Light by Mixed-Valence Sn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>", *ACS Appl. Mater. Interfaces* **6** -6, (2014), pp3790-3793.

(4) A. Kasahara, K. Nukumizu, G. Hitoki, T. Tanaka, J. N. Kondo, M. Hara, H. Kobayashi, and K. Domen, "Photoreactions on LaTiO<sub>2</sub>N under Visible Light Irradiation", *J. Phys. Chem. A* **106**, (2002), pp6750.

(5) T. D. Veal, P. D. C. King, S. A. Hatfield, L. R. Bailey, C. F. McConville, B. Martel, J. C. Moreno, E. Frayssinet, F. Semond, J. Zúñiga-Pérez, "Valence band offset of the ZnO/AlN heterojunction determined by x-ray photoemission spectroscopy", *Appl. Phys. Lett.* **93**, (2008), pp 202108-1-3.

(6) J. Wang, N. Umezawa, H. Hosono, "Mixed Valence Tin Oxides as Novel van der Waals Materials: Theoretical Predictions and Potential Applications" *Adv. Energy Mater.* **6**-1, (2016), pp1501190-1.

(7) T. Gunji, K. Sakai, Y. Suzuki, S. Kaneko, T. Tanabe, F. Matsumoto "Enhanced oxygen reduction reaction on PtPb ordered intermetallic nanoparticle/TiO<sub>2</sub>/carbon black in acidic aqueous solutions" *Catal. Commun.*, **61**, (2015), pp1-5.

(8) T. Gunji, T. Tanabe, A. J. Jeevagan, S. Usui, T. Tsuda, S. Kaneko, G. Saravanan, H. Abe, F. Matsumoto "Facile route for the preparation of ordered intermetallic Pt<sub>3</sub>Pb-PtPb core-shell nanoparticles and its enhanced activity for alkaline methanol and ethanol oxidation" *J. Power Sources*, **273**, (2015), pp990-998.

(9) A. Fujishima, X. Zhang, D.A. Tryk, "TiO<sub>2</sub> photocatalysis and related surface phenomena", *Surf. Sci. Rep.* **63**-12, (2008), pp515-582.

(10) Y. Nosaka, M. Nishikawa, A.Y. Nosaka, "Spectroscopic Investigation of the Mechanism of Photocatalysis", *Molecules* **19**-11, (2014), pp18248-18267.

(11) K. Nishijima, B. Ohtani, X. Yan, T. Kamai, T. Tsubota, N. Murakami, T. Ohno, "Incident light dependence for photocatalytic degradation of acetaldehyde and acetic acid on S-doped and N-doped TiO<sub>2</sub> photocatalysts and their reaction mechanisms", *Chemical Physics*, **339**, (2007), pp64-72.

(12) T. Gunji, G. Saravanan, T. Tanabe, T. Tsuda, M. Miyauchi, G. Kobayashi, H. Abe, F. Matsumoto, "Long-term, stable, and improved oxygen-reduction performance of titania-supported PtPb nanoparticles", *Catal. Sci. Technol.* **5**-4, (2014), pp1436-1445.



# 光架橋型ハイドロゲルを用いた湿性沈着物の簡易分析手法の開発

南齋 勉\* 石田 良仁\*\*

## Development of Simple Analytical Method of Wet Deposition by Using Photocrosslinking Hydrogel

Ben NANZAI\* Yoshihito ISHIDA\*\*

### 1. 緒言

現在まで、雨一滴の成分定性や、液滴径の計測に関する報告はあるが<sup>1)</sup>、採取と計測の難しさから溶存成分の定量に関するものはほとんどない。現状の降水分析は、所定容器に溜めた資料に対して行われているため、結果的に時間・空間的に平均化されたものとなっている。しかし、上空の気塊成分は常に変化していることや、液滴粒径によって成分濃度が異なることから考えると、一滴ごとの成分濃度や液滴径などの情報は、エアロゾルやガス成分からの雲核や霧核形成・液滴成長・液滴内における反応を考える上で非常に重要である。

本研究では、雨や霧の一滴ごとに含まれる成分を定量する新たな手法の開発を目的とする。対象成分と反応して結晶を生成する溶質を含んだゲル薄膜上に液滴をトラップし、溶存成分を結晶化させる。この結晶画像のピクセル数を画像解析ソフトで計測することで定量すれば簡便な分析が可能となる。溶解度積の関係から、結晶生成は、分析対象イオン（外部電解質）と沈殿を形成するようなゲル中溶質（内部電解質）の濃度の積に依存する。すなわち、内部電解質濃度を増大できれば、それだけ低濃度の外部電解質濃度を定量することができる（検出下限を低下させられる）。これまで、我々はゼラチンをゲル薄膜材料として用いて研究を行ってきたが<sup>2)</sup>、分析の検出下限を下げるためにゲル中の電解質濃度を増加させると、ゼラチン自体が溶解せずにゲル化できなくなる問

題があった。このため、今回、ゲルの含水率や電解質溶解度を容易に制御できる光架橋型ハイドロゲルを用いることでより精度の高い定量を目指した。

### 2. 光架橋型ハイドロゲル

ポリアクリルアミドはそのアミド基の物性により水や塩との親和性が高く、分析対象イオン（外部電解質）と沈殿を形成するような溶質（内部電解質）のゲル中の溶解度も増大すると考えられる。側鎖に光架橋性のシナモイル基を有するポリアクリルアミドを成膜し、275 nm 光を照射することで、多量の水を含み膨潤するハイドロゲル(PAG)膜を得ることができる。また、シナモイル基の量や光照射条件により架橋度を自由に制御できることから、ゲル中の膨潤度（水分量）を増やすことが可能となる。これによって液滴が乾燥する前にゲル中へ浸透することで滴下した成分を拡散させることができ、期待する生成物のみが結晶化することが期待される。

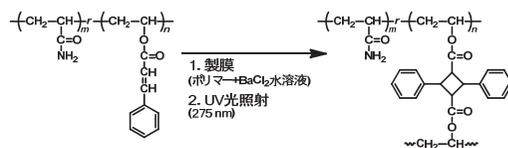


図1. 光架橋型ポリアクリルアミドの生成機構

### 3. ゼラチン膜と PAG 膜の比較

#### (1) 内部電解質を含まない系

図2は、内部電解質が含まれていない PAG 膜（膜厚 0.9, 1.7 μm）とゼラチン膜に外部電解質溶液（1 mM 硫酸ナトリウム水溶液）を 0.5, 1, 2 μL 滴下した時の結晶

\*助教 物質生命化学科

Assistant Professor, Dept. of Material and Life Chemistry

\*\*助教 化学教室

Assistant Professor, Dept. of Chemistry

の様子を示す。膜厚は、表面形状測定装置を用いて測定している。

液滴跡 (円環状の白色部分の形状) はゼラチン膜, PAG 膜ともに滴下量が少ないほど生成しやすいことが分かる。ゼラチン膜では、いずれの滴下量でも液滴中心部に乾燥によって硫酸ナトリウムの結晶が析出している。しかし、PAG 膜では液滴内の結晶の析出は全体的に薄く、液滴の中心部から外側に行くほど結晶が薄くなっている。この結晶は SEM-EDX による成分分析から硫酸ナトリウムであることが分かり、超純水を滴下した際には結晶が見られないことから、ポリアクリルアミド由来の結晶ではないことも確認できた。このことから PAG 薄膜では表面で液滴が乾燥する前に硫酸ナトリウムがゲル内部へ浸透していることが考えられる。また、ポリアクリルアミドが塩に対して高い親和性を持つことも結晶生成が抑制される要因として考えられる。また、PAG の膜厚を厚くすることによって、外部電解質の結晶析出が薄くなることが分かる。これは膜を厚くすることによって外部電解質溶液がゲル内に浸透しやすくなったためと考えられる。

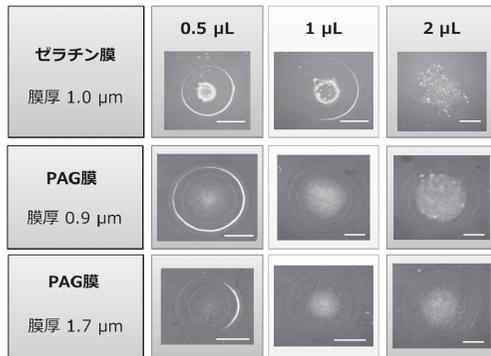


図2 内部電解質を含まない系でのゼラチンと PAG の比較 (スケールバー: 1 mm)

## (2) 内部電解質を含む系

ゲル内に内部電解質を含む場合の結晶生成の違いをゼラチン膜と PAG 膜で比較した。図3に内部電解質 (5 mM 塩化バリウム) が含まれる各膜に外部電解質溶液 (10 mM, 1 mM 硫酸ナトリウム水溶液) を 0.5  $\mu\text{L}$  滴下した時の結晶の様子を示す。

ゼラチン膜の場合、外部電解質の濃度によって結晶の見目は大きく異なるが、液滴跡内の結晶成分は濃度に関係なく硫酸ナトリウムであることが SEM-EDX の結果から示された。また、液滴跡の外側に生成した結晶は内部電解質と外部電解質の反応生成物である硫酸バリウムであった。

これに対して PAG 膜の場合、外部電解質が高濃度では

ゼラチン膜と同様に中心部に白色結晶が析出するが、その範囲は狭く、膜厚を厚くすることによって更に析出は小さくなった。また、低濃度の外部電解質の場合、液滴内に乾燥による外部電解質の析出が見られず、色は薄いが均一に結晶生成している様子が見られる。本法による分析対象である雨滴濃度として 10 mM という高濃度は考えにくい。このことから、PAG 膜を使用することで外部電解質の乾燥による析出は抑制され、定量性は向上すると考えられる。しかしながら、内部電解質と外部電解質の反応生成物である硫酸バリウムの結晶もゼラチン膜に比して薄くなることから、PAG 膜は含水量が高く、塩としての析出がゼラチン膜より少ないと考えられる。

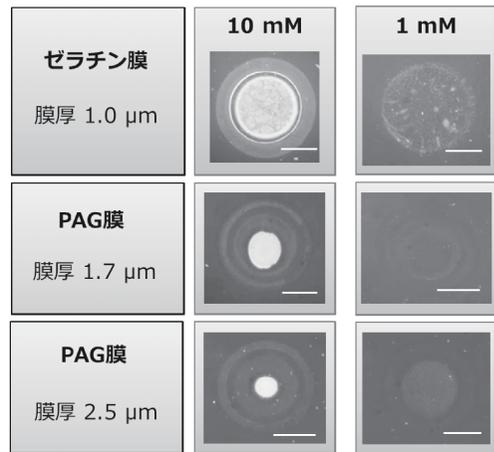


図3 内部電解質を含む系でのゼラチンと PAG の比較 (スケールバー: 1 mm)

## 4. 内部電解質濃度の臨界値

低濃度の外部電解質溶液を用いて内部電解質との反応生成物を析出させるためには、溶解度積の関係から内部電解質濃度を上げる必要がある。図4は異なる内部電解質濃度を添加した PAG 膜に超純水を 0.5  $\mu\text{L}$ 、もしくは 1 mM の外部電解質溶液を 0.5, 2  $\mu\text{L}$  滴下した系における結晶生成の違いを示している。超純水を滴下した系では内部電解質濃度に関係なく、薄く液滴の跡は生成するが内部電解質やゲル化剤の析出は見られなかった。1 mM の外部電解質溶液を滴下した系では、内部電解質濃度が高くなるほど結晶が濃く析出した。低濃度の外部電解質溶液を滴下したにもかかわらず、前項で示した 5 mM の内部電解質を含む系に比して、はっきりとした結晶が生成していることが確認できる。しかし内部電解質濃度が 300 mM 以上では、液滴跡より外側に内部電解質である塩化バリウムの結晶が析出する機会があった。そのため、この条件下では 200 mM を最適な内部電解質濃度と判断

した。この濃度はゼラチン膜の系に比して 40 倍高く、検出感度の向上が期待できる。

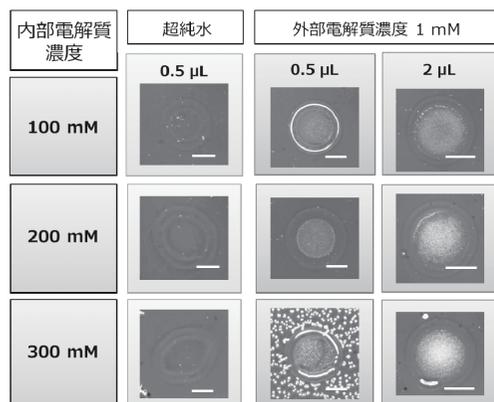


図 4. PAG 膜における結晶生成への内部電解質濃度の影響  
(スケールバー : 1 mm)

## 5. PAG 膜において生成する結晶成分

図 5 は、内部電解質として 5 mM 塩化バリウムを含む膜厚 2.5  $\mu\text{m}$  の PAG 膜に 10 mM の外部電解質溶液を 0.5  $\mu\text{L}$  滴下した系における結晶生成の様子の SEM 画像と膜表面の形状である。また、結晶中心部から液滴跡の外側までの結晶生成範囲を拡大した SEM 画像を示す。

液滴跡の中心部（領域Ⅳ）では濃い白色の結晶生成が確認された。これは薄膜表面で乾燥によって析出する外部電解質の硫酸ナトリウムであると考えられ、表面形状からも中心部に盛り上がり確認できる。これは超純水を滴下した際には見られないことから結晶生成によるものであることが分かる。ゲル表面に多数の孔が確認できるが、これは領域Ⅳの外側でも見られることから外部電解質の析出とは関係がないゲル自体の変形と考えられる。領域Ⅲでは、均一な結晶生成が見られ、その様子は領域Ⅳとは大きく異なる。領域Ⅱは緩やかな傾斜をもつ液滴跡の起伏部である（注：表面形状の図は縦横の比がおおよそ 1000 倍）。ここでは領域Ⅲのような結晶生成が確認できない。液滴跡の外側に位置する領域Ⅰでは、領域Ⅲと似た結晶の生成が確認できる。そのサイズは領域Ⅲよりも少し小さいが分布はほぼ一致している。結晶サイズは外側に向かうにつれて小さくなり領域の端ではほとんど見えなくなる。これらの領域を比較すると、結晶表面が起伏する領域Ⅱがブランクとなっているが、領域ⅢとⅠでは一連の結晶生成が起きていることが分かる。領域Ⅱでは他の領域に比して膜厚が厚く、結晶が生成しにくいと考えられる。また、領域Ⅳでは表面に外部電解質が析出するためこの SEM 画像では確認できないが、

その下には領域ⅠやⅢと同様の結晶が生成していることを別の実験から確認している。

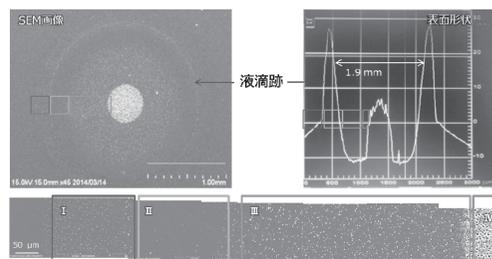


図 5. PAG 膜の SEM 画像（下は拡大図）と膜の表面形状

これらの各領域について、SEM-EDX を用いて成分解析した結果を以下に示す。領域Ⅰの外側や領域Ⅱにおける結晶が析出していない部分の成分は Na と Al がほとんどであり、基板であるガラス部分と一致することから内部電解質や反応生成物の析出は起こっていないことが分かった。結晶析出部分については、領域Ⅰおよび領域Ⅲでは、結晶の析出が見られない部分に比べ Ba と S の割合が高くなる結果が得られ、内部電解質である塩化バリウム  $\text{BaCl}_2$  と外部電解質である硫酸ナトリウム  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  が反応した硫酸バリウム  $\text{BaSO}_4$  の結晶が析出していることが確認された。中心部の領域Ⅳでは、Na と S の割合が大きく占めることから、外部電解質である硫酸ナトリウム  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  がそのまま析出している。また、外部電解質を 1 mM 以下の低濃度にするこの成分は析出しなくなる。以上の結果から PAG 膜における結晶の生成は、外部電解質が低濃度であれば反応生成物である硫酸バリウムのみであり、また、内部電解質もその濃度が臨界値を超えなければ析出しないことから、ゼラチン膜に比べて大きく改善された。

## 6. PAG の架橋剤添加量の検討

架橋剤の添加量を 10 wt% に増やした新たな PAG を合成した。架橋剤の増大によりゲル化が安定したが、超純水や低濃度の外部電解質溶液を滴下した際に液滴跡の周囲に結晶析出が確認され、SEM-EDX で解析した結果、内部電解質である塩化バリウムであった。このため、図 6 に示すように、内部電解質濃度を 100 mM に低下させるといずれの場合も内部電解質の析出はなくなり、4wt% の場合と同様に  $\text{BaSO}_4$  の結晶生成が確認された。また、架橋剤の量が多い方が結晶が析出している。これは、架橋剤であるケイ皮酸ビニルが疎水的な化合物であるため、架橋剤の添加量が多いほど疎水的な PAG となり、飽和溶解度が低下するためだと考えられる。以上より、架橋剤

の添加量 10wt% の PAG 膜においては 100 mM を最適な内部電解質濃度とした。

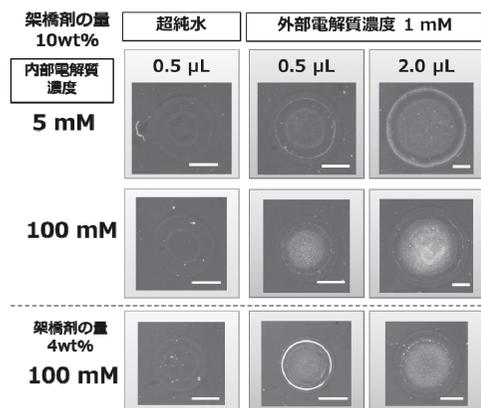


図 6. 架橋剤の添加量の結晶生成への影響

#### 7. UV 照射時間が液滴径に及ぼす影響

架橋剤の架橋度は UV の照射時間によって変化させることができる。図 7 は UV の照射時間を 15 分、30 分、60 分と変化させて作製した PAG 薄膜に超純水や外部電解質溶液 (1 mM 硫酸ナトリウム) を 0.5, 2 μL 滴下した時の結晶の様子を示す。UV 照射時間 30 分、60 分の系では結晶が相対的に濃く析出しているが、UV 照射時間 15 分の系は結晶が薄く、ゲル化した部分とゲル化していない部分ができ、結晶化が不完全でムラが生じたと考えられる。今回、架橋度の確認を FT-IR を用いて行なったが、薄膜の厚みが薄く有意な差は得られなかった。

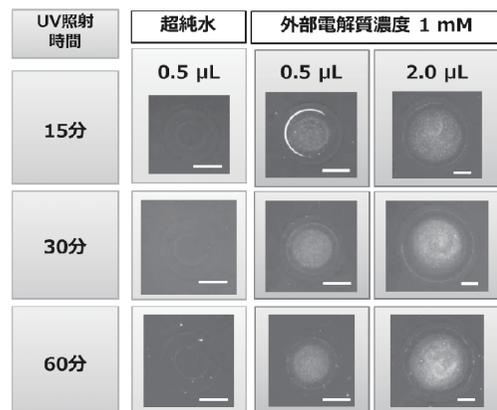


図 7. UV 照射時間の結晶生成に対する影響

図 8 に、定量分析に必要な「液滴体積」と「分析対象イオンの物質質量」の算出に必要な検量線を示す。UV 照射時間を変化させて作製した PAG 膜に各濃度の外部電解質溶液を滴下した。UV 照射時間が 30 分、60 分の系

では、いずれの外部電解質濃度でもばらつきの範囲内であり、液滴濃度や体積が異なっても物質質量が同じであれば同程度のピクセル数であった。しかし、UV の照射時間 15 分では超純水のピクセル数が低く、また各 0.1 mM の外部電解質溶液を滴下した際、ピクセル数が他の系に比べ極端に下がった。

以上の結果から、UV 照射時間の最適条件は、結晶生成、液滴跡直径、ピクセル数の全てにおいて UV 照射時間 30 分と 60 分では傾向が変わらなかつたため、照射時間は 30 分で十分であり、最適条件であると判断した。

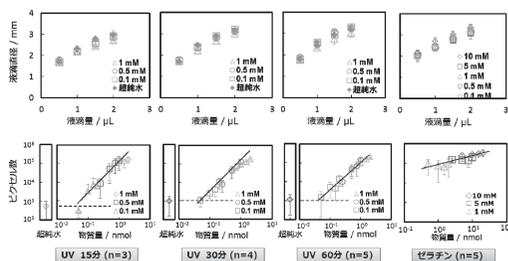


図 8. UV 照射時間による定量のための検量線への影響

#### 7. 結言

ゼラチン膜を PAG 膜に変更することで、内部電解質濃度を 20 倍以上増大させることに成功し、低濃度の外部電解質溶液の滴下による結晶化が可能となり、検出下限の低下、および液滴直径の誤差の低下にも成功した。膜厚、架橋剤の添加量、UV 照射時間などを最適化することにより、物質質量とピクセル数の検量線の直線性が大きく向上した。

本手法は、採取・計測とも簡便であり、持ち運びや保存の自由度が高く、フィールド調査や実験機材の乏しい開発途上国などでの利用可能性を含め、実用化が期待できる。

- (1) M. Kasahara, S. Akashi, C.-J. Ma, and S. Tohno, *Atmos. Res.*, **2003**, 65, 251.
- (2) C.-J. Ma, S. Tohno, M. Kasahara, and S. Hayakawa, *Anal. Sci.*, **2006**, 22, 415.
- (3) K. Bächmann, I. Haag, T. Prokop, A. Röder, and P. Wagner, *J. Chromatogr., A*, **1993**, 643, 181.
- (4) A. Röder and K. Bächmann, *J. Chromatogr., A*, **1995**, 689, 305.
- (5) B. Tenberken, P. Ebert, M. Hartmann, M. Kiber, A. Mainka, T. Prokop, A. Röder, and K. Bächmann, *J. Chromatogr., A*, **1996**, 745, 209.
- (6) B. Tenberken and K. Bächmann, *J. Chromatogr., A*, **1997**, 775, 372.
- (7) N. Tomikawa, B. Nanzai, M. Igawa, *Anal. Sci.*, **2011**, 27, 861.



# ミリ波・テラヘルツ波帯における金属フォトニック 結晶構造デバイスの解析と応用に関する研究

穴田 哲夫<sup>2</sup> 陳 春平<sup>3</sup> 中山 明芳<sup>1</sup>

## Fundamental Study on Metallic Photonic Crystal Devices for Millimeter / Terahertz Frequencies and Its Applications

Tetsuo ANADA<sup>2</sup>

Chun-Ping CHEN<sup>3</sup>

Akiyoshi NAKAYAMA<sup>1</sup>

### 1. プロジェクト研究の概要

本研究は、短ミリ波からテラヘルツ波領域において、金属フォトニック結晶構造を応用した電磁波回路（デバイス）の開発と解析を通して周波数の利用効率を上げ、将来の高精細 TV カメラ、イメージング、環境計測応用の短距離無線通信用の電磁波回路を開発することである。従来のフォトニック結晶構造は、空气中に誘電体円柱あるいは誘電体基板中に空気穴を正方/三角格子状に配置した結晶構造を研究してきたが、金属円柱によるフォトニック結晶において金属の損失よりも非放射損失や超小型軽量化の利点が勝り、実用的な電磁波回路の見通しを得たことから短ミリ波帯での電磁波回路設計と実現の指針と実験による確認を行うことである。以下に各担当者の役割分担を簡潔に述べると、

- (1) 超電導回路の理論とマイクロ波回路理論の応用：担当は中山明芳教授。
- (2) ミリ波・サブミリ波フォトニック結晶を用いた電磁波回路のシミュレーション及び実験：担当は陳春平准教授。
- (3) Maxwell 方程式に基づいた FDTD 法によるフォトニ

ック結晶デバイスの数値解法の開発と電磁波回路への応用：担当は穴田哲夫客員教授（名誉教授）。

上記研究課題にそって研究を行う、また各教員が文科省科研費の取得など大きな成果を上げつつある。各々科研費を獲得している（15K06037、16K06320、16K06319）。

### 2. 研究の方向性について

次世代高度情報通信社会の実現に向けて、ミリ波帯より高周波数を利用する無線技術の研究開発が国内外において加速している。実際に 10Gbit/s を超える超高速無線の実現に向け、E 帯（60GHz～90GHz）を利用する無線通信技術の研究・開発・実装技術が急速に進展しており、近い将来、電子デバイス、回路技術が扱える周波数帯がテラヘルツ帯にまで及ぶと思われる。また IEEE802.15 委員会内に THz Interest Group が設立され、KIOSK モデルや無線 LAN モデルに加えて、Point to Point 接続の FWA、データセンタ内光配線の無線化などが議論されている。また日本においては産学官連携によるテラヘルツテクノロジーフォーラムなどを通して、新分野の研究開発がなされている。これまでは主に X 線に代わる非接触・非侵襲な透視手段として、非破壊検査、分光分析などのイメージセンサー、材料分野、バイオテクノロジー分野など多岐にわたる産業応用が検討されている。さらに 3D プリンタ技術の進展や半導体微細加工技術の進歩により、発振源を含めて、高性能・高信頼性デバイスの開発が着実に進化しており、本格的短ミリ波・テラヘルツ波（THz）の利用に向けて、新しい高機能を備えた超小型電磁波回路の開発が可能となりつつある。これまで短ミリ波からテラヘルツ帯における導波構造として平行平板金属導波構造、平行平板金属間に誘電体を挿入した NRD 導波路、

<sup>1</sup>教授 電気電子情報工学科  
Professor, Dept. of Electrical and Electronic Information Engineering

<sup>2</sup>客員教授（名誉教授） 工学研究所  
Guest Professor, Research Institute for Engineering

<sup>3</sup>准教授 電気電子情報工学科  
Associate Professor, Dept. of Electrical and Electronic Information Engineering

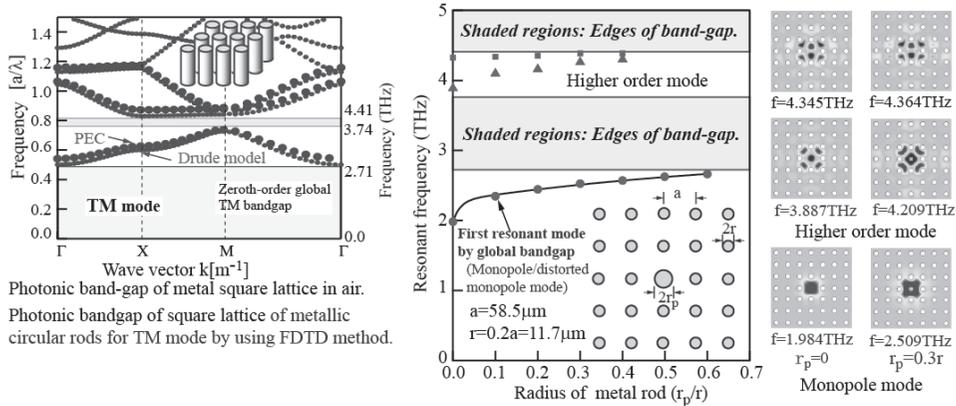


図1 金属正方格子フォトニック結晶のバンド構造と点欠陥共振器の共振モードチャート。

金属ポスト壁による SIW 構造などが提案されている。一方、筆者等は、短ミリ波・テラヘルツ波の波長程度の周期性をもつ誘電体フォトニック結晶中 (PhC) に線欠陥や点欠陥を導入することにより、その欠陥領域に電磁波が強く閉じ込められる局在現象を利用した超小型電磁波回路を提案し、狭帯域バンドパスフィルタや電磁波の伝搬を自在に制御する分岐回路を実現してきた。このようにフォトニック結晶による電磁波回路は単に電磁波の導波にとどまらず、プラットフォームとして用いることにより、様々な機能デバイスを同一基板上に構成することができる。これまで主に誘電体フォトニック結晶デバイスの研究が先行しているが、誘電体 PhC (D-PhC) 構造は、外部への放射を抑えるためにより多くの周期構造を構成する必要がある。一方、金属フォトニック結晶デバイスの研究は、金属のオーミックロスの問題が残るが、小型化、実際にデバイス作製の点で有利である。従って、金属あるいは超電導フォトニック結晶電磁波回路としての設計手法の確立と実装・応用の両面から研究する意義がある。

3. 金属フォトニック結晶のバンド構造と点欠陥共振器  
 金属の周波数依存性を考慮するためにドルーデ・モデルを適用し、金属の誘電関数を次式で近似する。

$$\epsilon_r(\omega) = 1 - j \frac{\sigma(\omega)}{\omega \epsilon_0}, \quad \sigma(\omega) = \frac{\sigma_0}{1 + j\omega\tau}$$

ここで金属円柱は銅(Cu)を仮定し、導電率 $\sigma_0=5.8 \times 10^7$ [S/m], プラズマ周波数 $\omega_p/2\pi=1914$ [THz], 衝突周波数 $\omega_c/2\pi=8.34$ [THz]とする。衝突周波数 $\omega_c/2\pi$ の逆数で定義される緩和時間は、 $\tau=10^{-14}$ 程度である。したがって、短ミリ波帯では、 $\omega\tau \ll 1$ であることから $\sigma(\omega)=\sigma_0$ と近似しても

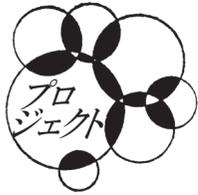
良いことがわかる。ここでは正方格子の周期 $a=58.5\mu\text{m}$ 、金属円柱の半径 $r=11.7\mu\text{m}$ 、 $r/a=0.2$ とする。また完全導体モデルによる計算結果を図中に同時に示す。両計算結果には、大きな差異が見られない。図1におけるTMモードのバンドギャップ図は、 $\Gamma$ 点での規格化周波数 $a/\lambda=0\sim 0.53$ 、 $a/\lambda=0.73\sim 0.86$ に第1、第2バンドギャップが存在する。このようにTMモードは直流から超広域バンドギャップが存在している。

4. 点欠陥共振器の共振周波数と共振モード

金属フォトニック結晶欠陥共振器の共振モードは点欠陥を中心とする単位セルを連結して形成したスーパーセル法に基いて計算する。点欠陥共振器の共振周波数は格子定数と金属円柱半径によって決まるので、モノポール共振周波数が $f \approx 2\text{THz}$ 近傍となるように周期は $a=58.5\mu\text{m}$ 、金属円柱の半径は $r=0.2a=11.7\mu\text{m}$ とする。任意の共振周波数を得るには、点欠陥共振器の中央に半径 $r_p$ の金属円柱を挿入する。 $r_p(=0\sim 0.7r)$ が大きくなると、バンドのエッジ( $a/\lambda=0.53$ ,  $f_c=2.71\text{THz}$ )と重なり、擬似モノポール共振モードは消滅するが、動作中心周波数を広範囲に可変できることがわかる。またCuの導電率 $\sigma_0=5.8 \times 10^7$ [S/m]を仮定したときの無負荷Q値は970程度となる。本共振器の応用として、高性能のバンドパスフィルタへの応用が考えられる。

5. これまでの研究成果

研究成果は国際会議、電子情報通信学会、企業へ情報提供とともに、マイクロ波研究会、マイクロ波シミュレータ研究会、超電導研究会、IEEE IMS, EuMW, APMCのマイクロ波・ミリ波国際会議での発表、企業との連携による実装技術の確立、さらに設計理論などを公開する予定である。本研究は、マイクロ波、ミリ波、短ミリ波、テラヘルツ波、光波と広範囲にわたっており、新しいデバイスや回路を見出していることを付記する。



## 高安心超安全交通研究所活動報告 ドライブレコーダーと自動運転（高度運転支援）

松浦 春樹<sup>1</sup>、堀野 定雄<sup>2</sup>、石川 博敏<sup>2</sup>、龍 重法<sup>2</sup>、石倉理有<sup>2</sup>、北島 創<sup>3</sup>

Report on Activity by KU-WIRF(Kanagawa University, Research Institute for Well-Informed and Risk Free Transportation) – The Role of Driving Event Video Recorder in Relation to Automated Driving (Advanced Driving Assistance) –

Haruki MATSUURA<sup>1</sup>, Sadao HORINO<sup>2</sup>, Hirotoishi ISHIKAWA<sup>2</sup>, Shigenori RYU<sup>2</sup>, Masatomo ISHIKURA<sup>2</sup> and Sou Kitajima<sup>3</sup>

### 1. 「ドラプリ 2015」の成果: 自動運転に後付ドライブレコーダーは必須

神奈川県工学研究所高安心超安全交通研究所 (KU-WIRF) とドライブレコーダー (DR) 協議会が主催したドライブレコーダー・アプリケーション・シンポジウム「ドラプリ 2015」(2015-12-1) <sup>1)</sup> は「ドライブレコーダーと自動運転(高度運転支援)」をテーマに 160 名強が参加、会場は満席、活発な議論を展開、話題沸騰中の自動運転論議に一石を投じる有意義な成果を挙げました。

例年通り、国土交通省、(一社) 日本人間工学会、(財) 福岡県産業・科学技術振興財団 (ふくおかIST)、(公社) 自動車技術会、今回から (独法) 自動車事故対策機構 (NASVA) の後援も頂きました。

2009 年の KU-WIRF 設立記念シンポジウム、実質第 1 回目「ドラプリ 2009」以来、主催した我々は本学広報部の協力で、広く首都圏マスメディア対象に広報してきました。地元神奈川新聞の報道例はありますが全国紙はなく、7 回目の今回、全国規模で広い読書層を有する業界新聞 2 紙が大きく報道しました。

#### 1-1. 自動運転車の性能評価と冤罪防止

日刊自動車新聞 (2015-12-4) <sup>2)</sup> は 1 面トップ「用品トレンド」コラムで署名記事を掲載し、檀上に勢ぞろいした司会者小林敏雄ドライブレコーダー協議会長とパネリスト 5 名の写真と DR 協議会推定 500 万台普及したドライブレコーダーが並ぶ店頭写真を紹介、大見出し「自動運転時代ドラレコの役割を議論、協議会が都内でシンポジウム」、中見出し「事故原因究明へ不可欠に、後付け

製品主流も大きく変わる可能性」、小見出し「記録の重要性指摘」「より判断しやすく」「新たなニーズも」と読みやすく判りやすい記事で、我々の企画主旨を要領よく伝えてくれました。パネリスト 5 名は自動運転の最新動向に明るい GIA (Government 行政、Industry 産業界、Academia 学界) 各界の代表的人材で、国土交通省自動車局・技術政策課・国際業務室長久保田秀暢氏、ITS Japan 理事・自動運転プロジェクトリーダー内村孝彦氏、(株) NTT データアイ特別参与宮寄拓郎氏 (元国土交通省自動車交通局技術安全部長、DR 協議会理事)、(株) 審調社交通事故解析士森澤三郎氏 (DR 協議会前副会長)、明治大学法科大学院教授中山幸二氏 (元神奈川大学法工学部教授) です。パネリスト全員が自動運転車普及に関して、異口同音に強調したのが「記録」の重要性でした。

記者は「自動運転にまつわる事故が発生した場合に、自車側のシステムエラーか相手側のミス (もらい事故) なのか、という点において事故の原因究明が今以上に困難になるだろう。」と課題を想定、基調講演者国交省久保田秀暢氏の「事故の要因を判断するために航空機のフライトレコーダーのように運行状況が分かるようなものを搭載する可能性が出てくる。何をどのように記録するか議論が今後活発になるだろう」を引用、続けて「その記録方法の選択肢の一つとして、宮寄拓郎氏は『ドライブレコーダーは不可欠になる』と予想する。事故原因が不透明な状況が発生した場合、映像記録がなければ冤罪を引き起こす可能性もあるからだ」とドライブレコーダーが持つ運転状況記録の科学性を強調しました。

記者は続けて「自動車への組み込みではなくて引き続き後付けのドラレコが必要とされる可能性もありそうだ。」として、車両衝突を感知する EDR (Event Data Recorder、イベントデータレコーダー) や OBD (On-

1 教授 経営工学科, Professor, Department of Industrial Engineering and Management, 2 客員研究員 工学研究所 Guest Researcher, Research Institute for Engineering, 3 特別研究員 工学研究所 Research Fellow, Research Institute for Engineering

Board Diagnostics、高度車載式故障診断）などを頼りに事故解析に長年従事する元カーメーカーの開発エンジニアだった森澤三郎氏の講演「事故調査から見えてくるドライブレコーダーの必要性」を引用、「システムエラー用とヒューマンエラー用は別系統で」の文脈で「ドライブレコーダーは車両への組み込みみ式ではなくて独立の別系統での記録方式として後付けで残るべき」と紹介しました。

森澤氏は「現在、事故が起きた際に自分の運転ミスである事を EDR や OBD によって示されても、ドライバーは自分の記憶が一番強く、車両情報を信頼できないケースが多い。」との経験に基づき「自動運転によって事故原因の究明がより難しくなった場合、ユーザーは新技術への不信感を抱きかねない。車両とは異なる後付けドライブレコーダーの記録があれば、解析作業補助にでき、何よりもユーザー自身納得しやすい」と近未来に想定される課題と解決策を展望しました。

会場から出た確認質問：「自動運転時代には車両機能としてドライブレコーダーアプリをビルトイン（内蔵）する方向に反対なのですね？いかなる技術相においても独立＝後付けがよろしいと理解してよいのですか？」に対し「はい、その通りです。メーカー純正装着品の品質が高いのは認めますが、求めているのは『メーカー以外が取得した情報』です。」とメッセージ性を持つ自説を展開、印象的で新鮮な提言に皆が納得、後付け車載端末記録装置の意義を会場全体で確認出来たのは大きい成果です。

これを受けて、記者は「自動運転時代には、ドライブレコーダーに新たなニーズが発生する可能性がある。」と整理、続けて「パネリストらが、今後必要性が高まると指摘したのがドラレコデータの共有化だ。ドラレコは自動運転技術が進化する中で運転状況を振り返り、技術発展に大きく貢献する情報になりうる。まずはデータの収集方法やデータ共有化に向けた議論が必要だと言えそう」と締めくくりました。

## 1-2. 自動運転の記録機能

次に、輸送新聞（2016-12-7）<sup>3)</sup>も同じく1面トップで紹介、講演する久保田秀暢氏（国交省）の写真と大見出し「自動運転の記録機能」に続いて中見出し「ドライブレコーダーの有効性・必要性を提言 シンポジウム『ドラプリ 2015』」で内容のハイライトを報じました。

当紙も前紙と同じく「車の自動運転社会が到来すると、航空機のフライトレコーダーに相当する機能が必要となり、その役割をドライブレコーダーが担うことになる。」「自動走行の実現性が高まる中で万一の事故に備えた記録システムとしてのドライブレコーダーの将来展望を探

るシンポジウムが開かれた。」と「ドラプリ 2015」の企画主旨を正しく要領よく報道しました。

ドライブレコーダーは事故原因究明のリアクティブ（Reactive）と事故予防のプロアクティブ（Pro-active）ミッションの2面性を担っている。専門各分野で意見を交わし、議論を深掘してほしい」とのドライブレコーダーの最新技術動向にさりと触れた松浦春樹 KU-WIRF 所長開会挨拶を報道、なかなか核心を突いた記事でした。

記事は、演者がそれぞれ自動運転の最新動向や事故発生時の立証責任の方向性を指摘したと概観、トラックの幹線輸送分野で「隊列走行は早期実現の可能性がある。」と示唆した内村孝彦氏、「自動運転により事故はなくなる」との『安全神話』に警鐘を鳴らし、運転者・所有者、自動車製作者に責任がどの程度になるかを確定させる必要性を指摘した宮寄拓郎氏のドライブレコーダー不可欠論、「電子制御システムに起因する自動車事故分析事例を披露し運転状況の記録の重要性を訴えた。」森澤三郎氏の後付ドライブレコーダー必須論、「手動・自動が混在する状況を見据えた未来の法構造を提唱した」中山幸二教授の法的議論を紹介しました。

以上を整理すると、2つの業界紙は自動運転が普及するに伴い、(1)走行中の自動運転システムの性能が設計通りか否か、評価を目的としてドライブレコーダーの需要は増す。それと共に、(2)混合交通で発生は必然と考えられる自動運転システム車と非自動運転システム車との間で起こる事故の要因解明にドライブレコーダーの科学的に正確な記録能力が活躍すると展望し、要点を簡潔に伝えています。自車性能評価と冤罪事故防止の両面で自動運転とドライブレコーダーの必然的な関係性があるとした記事2つはシンポジウムを企画・運営した筆者らの想いを的確に伝え、高安心超安全交通研究所活動報告の要点を包括したとも言えます。

## 2. 混合交通のリスク：テスラ「自動運転」死亡事故

ところが、2016年5月7日、アメリカのフロリダ州ウイリントン近郊でテスラ・モーターズの「モデルS」が、運転支援システム「オートパイロット」で運転中、中央分離帯のある片側4車線幹線道路を左折して横切ろうとした大型トレーラーに側面衝突し<sup>4)</sup>車はトレーラー荷台下の空間を突き抜け車体上部はすっ飛んで運転者はギロチン状態で死亡するという痛ましい事故を起こしました。「オートパイロット」作動中の運転者死亡事故は今回が初めて、と全世界に発信され、関係者に衝撃が走りました。我々も看過できない事態です。

## 2-1 自動運転死亡事故の原因

原因として、テスラ社は、鶴原吉郎氏によれば「トレーラーの白色の側面が、明るい空を背景としていたために (against brightly lit sky) 人間も『オートパイロット』もトレーラーを認識することができず、ブレーキを作動させなかった<sup>5)</sup>」としました。しかし、注意深くインターネット検索して調べた限りでは、事故車にドライブレコーダーは装着していなかった様で事故原因解明手順もテスラ社の説明根拠も不明です。

同じく鶴原吉郎氏によれば、テスラ社説明の不可解な点は「オートパイロット」はカメラの他にミリ波レーダーも搭載しており、光の眩しさはミリ波レーダーとは関係のないのに機能しなかった説明がない事です。ミリ波レーダーとは、ミリ波と呼ぶ短波長電波を放射して物体に当たって戻ってくるまでの時間を測定し物体の有無や物体との距離を測定するセンサーです。機能しなかった理由を推察するに、ミリ波レーダー端末器がバンパーの様な低い位置に取付けられ、ミリ波がトレーラーの高い荷台側面の下部空間を突き抜けて「障害物なし」と誤判断した可能性が考えられます。

でも、根本的な問題は、ランドル・オトゥール氏の指摘のとおり「テスラが搭載するレーダーシステムを製造したメーカー『モービルアイ』がレーダーは前の車に追突するのを防止する機能しかない、横から出てくる車との衝突を回避することはできない、と話している<sup>6)</sup>」点です。流布されているとおり事故車のドライバーが走行中にハリポッターのDVDを鑑賞していた疑惑<sup>7)</sup>(衝突相手のトレーラー運転者証言：ドライバーは亡くなっているのに事故車からDVD再生音が響いていた)が浮上しており、これで、運転者は「オートパイロット」を過信していた事が推察出来ます。もしそうなら「オートパイロット」の感知能力限界を事前にユーザーに認識させていなかったテスラ社の責任を厳しく問わなければなりません。

そもそも、「オートパイロット」は自動操縦とは名ばかりで、同社は自動運転システムではなくドライバーを支援するシステムと位置づけており、安全確保義務はドライバーにありシステムが安全に動作しているかどうかを監視するのもドライバーの役目だとしています。

「オートパイロット」が左折して高速道路を横切るトレーラー側面を認識できなかった理由を、空の明るさのせいにするテスラの姿勢は、ユーザーに過剰な期待を抱かせる「オートパイロット」と呼ぶネーミング、ミリ波レーダーの正しい性能限界を伝えず運転中にDVD鑑賞可能と過信させた責任と同質で重いです。

実は、Newsweek 誌ランドル・オトゥール氏の「死亡事故のテスラは自動運転車ではなかった」(2016-7-8)<sup>6)</sup>によりますと、事故で死亡したドライバーが乗っていたテスラ車は自動運転車ではなく、アメリカ運輸省高速道路交通安全局(NHTSA)が「レベル4」や「レベル3」と区分している自動運転車、つまり「走行中に、安全上必要なすべての動作を自動で行う」ものでも「特定の状況で、安全上必要なすべての動作を行う」ものでもありません。運転支援機能があっても、ドライバーは注意を怠ってはならないのです。

同じくランドル・オトゥール氏によれば、このテスラに搭載されていた機能は「高度運転支援システム(ADAS, Advanced Driver Assistance System)」であり、走行中のハンドルや速度の調整は自動で行うが、ドライバーは安全確認を継続しなければなりません。これはNHTSA区分では、運転中の主要な動作を少なくとも2つ自動で行う「レベル2」に区分されるシステムであり、前車への衝突を回避する「クルーズ・コントロール」と車線の外に出ないようにする「レーン・センタリング」機能のことなのです。「BMWやメルセデス・ベンツなど他の自動車メーカーもこれら運転支援機能を搭載した車を販売していますが、ドライバーが数秒以上ハンドルから手を離すことを許していませんが、テスラは許している」。このためテスラのドライバーは、自分の車が「特定の状況で安全上必要なすべての動作を自動で行う、レベル3」の自動運転車だと勘違いしてしまったのでしょう。これが事実なら、テスラ社が負う責任は重く、法的には現行の製造物責任法の文脈で処理出来るでしょう。

## 2-2 「オートパイロット」過信に警鐘

テスラ「オートパイロット」の死亡事故は、自動運転で事故は無くなるという「安全神話」に警鐘を鳴らす宮崎氏の予想が不幸にも的中しました。又、我々が懸念していた事態が意外と早く顕在化しました。懸念とは、自動運転車と非自動運転車の混合交通状況下で事故は必ず起こるという不幸な予測です。だから、双方とも事前にドライブレコーダーを装着し万一の事故に備え、事故原因の迅速且つ科学的解明に役立てる事が重要と実践的対策論を呼びかけていたのです。

テスラがこれら技術的な諸限界をドライバーに事前に正しく伝えていたとすれば、責任はドライバー側にあるでしょう。そうでなければメーカー側にあるでしょう。

「安全神話」過信の責任はメーカー、ドライバーのどちらにあるのか早期の検証が待たれます。

尚、総合視点で事故原因を吟味すると、ランドル・オトゥール氏が述べるとおり、フロリダ高速警備隊の当初

事故報告が指摘した「事故原因は優先権があったテスラに道を譲らなかつたトラック運転手の過失にある」<sup>6)</sup> 点は見逃せません。幹線道路上を左折しようとしたトラックは、対向車線の直進走行テスラに道を譲らなければならなかつたのです。それでも、テスラのドライバーがDVD鑑賞などしないで前方に集中して運転していれば、事故を未然防止できた可能性はあります。

いずれにしても、「オートパイロット」がドライブレコーダーを装着していなかつた様なので、鮮明な事故過程データが不明で、自動運転の発展に貢献できる絶好の機会を損失したのは誠に遺憾です。

### 3. 自動運転はハイブリッド自動システムで

この数年間、急速に自動運転車が世界中で話題になって来ました。毎年開催される CES (Consumer Electronics Show 国際家電見本市、ラスベガス、1月) や ITS (Intelligent Transport System 高度情報化交通システム) 世界会議 (デトロイト 2014、ボルドー 2015、メルボルン 2016) での動向をみると 2010 年頃から急速に人気が浮上した様です。

#### 3-1 自動運転の効果

我国でも内閣府主導で、創造的な科学技術革新実現のため 11 課題において府省の枠や旧来分野の枠を超えるマネジメントで PDCA サイクルを回す総合科学技術・イノベーション会議が戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) を推進中で、課題の一つに自動走行システムを採択、2014 年 5 月以来意欲的活動が進展しています<sup>5)</sup>。その計画書によると自動走行システムの効果として、1) 交通事故低減、2) 交通渋滞緩和、3) 環境負荷低減、4) 高齢者等の移動支援、5) 運転快適性の向上を期待している事からも判る通り、国内外で関心が急速に高まっています。

#### 3-2 自動運転の定義

自動運転を論じる時、基準として広く活用されている NHTSA 設定の自動化レベル定義があり、次の 5 段階です (表 1)。各レベルで構想している技術内容を「自律走行車開発に関する政策方針の概要」(NHTSA、2013-6-4) を国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization) ワシントン事務所松山貴代子氏が訳された資料から以下に全文紹介します<sup>9)</sup>。

**レベル 0 (No-Automation)** : 運転手が、自動車の主操縦系統 ( ブレーキ、ステアリング、スロットル、原動力) を常に自ら完全にコントロールし、交通のモニタリング及び自動車の全操縦系統の安全な操

表 1 自動運転レベル及びそれを実現する自動走行システム・運転支援システムの定義 (内閣府 SIP、2016-10-20)<sup>8)</sup>

自動運転レベル	概要	注 (責任関係等)	左記を実現するシステム
レベル 1	加速・操舵・制動のいずれかをシステムが行う状態	ドライバー責任	安全運転支援システム
レベル 2	加速・操舵・制動のうち複数の操作をシステムが行う状態	ドライバー責任 ※監視義務及びいつでも安全運転できる態勢	準自動走行システム 自動走行システム
レベル 3	加速・操舵・制動を全てシステムが行い、システムが要請したときはドライバーが対応する状態	システム責任 (自動走行モード中) <sup>5)</sup> ※特定の交通環境下での自動走行 (自動走行モード) ※監視義務なし (自動走行モード: システム要請前)	
レベル 4	加速・操舵・制動を全てドライバー以外が行い、ドライバーが全く関与しない状態	システム責任 ※全ての行程での自動走行	完全自動走行システム

作について全責任を負う。運転補助装置 (前方車両衝突警報、車線逸脱警報、死角モニター等) が付いた自動車でも、ステアリングやブレーキやスロットルを制御する能力がない場合には「レベル 0」と見なす。

**レベル 1 (Function-specific Automation)** : 特定の操縦機能を 1 つ以上持つ自動車で、複数の機能が自動化されている場合には、それら機能が互いに単独で作動する。運転手が全体を制御し、安全な操作について全責任を負うものの、運転手は主操縦系統 (車間距離適応走行制御 (ACC) や電子安定制御等) の限られたコントロール権限を自動操縦に任ずことを選択できる。自動車の自動化システムは、主操縦系統の一つ (ステアリング又はブレーキ/スロットルのどちらかであって、両方同時ではない) の操作で運転手を補助するのであって、運転手が物理的に運転から開放されるのではない。機能別自動化の例は、クルーズ・コントロール、自動ブレーキ、レーンキープ等。

**レベル 2 (Combined Function Automation)** : 主操縦系統の最低 2 つが自動化されており、これら機能が同時に作動して、これら機能のコントロールから運転手を解放する自動車。運転手は特定の限定された状況下で、自動車の共有権限 (shared authority) を利用して、主要な操縦を自動車に任せることが可能。但し、交通のモニタリングと安全操作の責任は依然として運転手にあり、運転手にはショートノーティスで自動車を安全にコントロールする用意が常に必要とされる。自動化レベル 2 の例は、車線の中央走行 (lane centering) と ACC の併用。レベル 1 とレベル 2 の大きな違いは、レベル 2 では自動運転モードが起動すると、運転手が物理的に運転から解放される (ハンドルから手を、ペダルから足を同時に離す) という事。

**レベル 3 (Limited Self-Driving Automation)** : 運転手は特定の交通条件下で、全てのセーフティクリティカルな機能 (safety-critical functions) のコントロールを完全に自動車に任せることが可能。自動車は自動運転モードで安全運転するよう設計されており、交通条件の変化 (運転手が運転すべき交通状況への変化) のモニタリングも自動車に大きく依存。自動化レベル 3 の例は、自動運転モードを維持できない状況を判断して、運転手による手動モードへと安全に切替えられるだけの適切な猶予を持って運転手に信号を送ることが出来る自律走行車。レベル 2 とレベル 3 の大きな違いは、レベル 3 では、走行中に運転手が交通を常時モニタリングする必要がないこと。

**レベル 4 (Full Self-Driving Automation)** : 全てのセーフティクリティカルな運転機能を実行し、走行中の交通状況をモニタリングするよう設計されている自動車。運転手は目的地や運行指示をインプットするもの、走行中のいかなる時にも運転することがない。レベル 4 の自動車には有人と無人があり、安全運転の責任は自動走行システムにかかる。

### 3-3 人間工学に整合しない定義

このレベル分類は人間工学視点の吟味を全く欠落しており、制御工学者が独善的に構想した様で、自動運転はまだ総合的検証が必要な段階にあると言えます。

どういふことが説明しますと、多くの専門家が既に指摘しているのですが、レベル 3 の内容が人間特性を無視しており論理的限界が際立っていることです。レベル 3 では、システムが対応しきれない緊急事態時にドライバーが対応する想定になっており国連欧州経済委員会 (UN-ECE) 傘下の自動車基準調和世界フォーラム (WP29) は最近、車がギブアップした時のドライバーへの遷移時間を 4 秒と決めた様ですが、現実的に可能か否か実証すべきです。

なぜなら、そもそもレベル 3 の特長は、自動運転車走行中の運転手は交通を常時モニタリングする必要がないことです。なのに、車がギブアップしたら後はよろしく頼むと突然バトンタッチする。ドライバーは交通状況を把握できていない状況下で咄嗟に交代要求されるので、的確な瞬時対応は先ず無理です。最低 20 秒は要すると言う専門家もいます。強制するとヒューマンエラー誘発で想定外の新しい型の事故を惹起するリスクが高いです。こう考えると事故過程の記録はますます重要になります。

**表2 完全自動運転車実施への挑戦 ITS-WC 2016 ジョセフ・カニアンス(元 NHTSA 副長官)**

1. 全車両実施には、30 年以上要する。
2. 広範な受容はほぼ不可能である。
3. 消費者教育は社会的受容の鍵である。
4. 早期実施には分離限定策が必要となる。
5. インフラ投資は法外な額になる。
6. 責任所在の明確化。
7. 支援から自動運転への遷移及び自動運転から手動への遷移は困難である：急な交代は無理。
8. 完全自動運転から得られる成果は限定的。
9. 消費者受容には長期間無故障が条件。
10. セキュリティとプライバシー要求が障害となる。
11. 初期費用と維持費が受容を妨げる可能性がある。
12. 無事故インフラ環境保証は到底無理

**表3 自動化の原則 (NASA,1988)**

#### してはならないこと(should not)

1. 作業者が特有のスキル、生甲斐を感じている仕事を自動化しない
2. 非常に複雑であるとか、理解困難な仕事を自動化しない
3. 作業現場での覚醒水準が低下するような自動化をしない
4. 自動化が不具合のとき、作業者が解決不可能な自動化をしない

#### すべきこと(should)

1. 作業者の作業環境が豊かになる自動化をせよ
2. 作業現場の覚醒度が上昇する自動化をせよ
3. 作業者のスキルを補足し、完全なものにする自動化をせよ
4. 自動化の選択、デザインの出発点から現場作業者を含めて検討せよ

### 4. "新幹線"のハイブリッド自動システム

人間工学的批判に応える解決策は、日本の新幹線で既に実用化しているハイブリッド自動化システムです。新幹線は予測不可能な地震発生に備えて、敢えて完全自動化せず、人間とコンピュータの共生システムを実現させました。全自動化した運転室に運転全部を機械化せず人間の自由の証として人間に任せるノッチを運転士の手に残したのです。この成果が出て、1964 年開業以来走行中乗客人身事故ゼロ記録を今も更新中です。人類史上初の安全性頂点に立つ交通機械システムと言えます。

地震発生の緊急事態時だけ人間に任せるというモードでは、人間の特性として何事も無い平常時には、運転士は自分の出番がないので脳の活性水準が低下します。その状態で突然システムが責任放棄して運転士にバトンタッチしても想定通り機能しない事が判っているのです。そこで、適度な活性水準を維持しながら人間とコンピュータが共生関係を維持する仕組みが組込まれることになったのです。

その秘策は、時速 30km/h 以下から駅の所定位置で停車するまでは運転士がすべて責任を持って運転する管理システムにした事です。1960 年代初頭の旧国鉄の人間工学研究者とコンピュータ技術者とのコラボレーションが結

実した世界に誇れる成果です。この成果のパラダイムを車の自動運転でも採用することを提案します。

自動運転「レベル5」として人間の制御を前提にしたハイブリッド自動化システムを提唱する宮崎モデルもその具体例の一つです。元NHSTA副長官を歴任したJoseph Kanianthra氏は国際会議（2015 東京、2016 メルボルン）で「完全自動運転実施への挑戦」と題して12項目の重要な条件を挙げています（表2）。いずれも傾聴に値する同じ文脈の懸念表明です。

## 5. 人間工学視点のNASA 自動化4原則

ところで、システム自動化に際して基本原則は、日系宇宙飛行士を犠牲にする悲惨なチャレンジャー事故を経験した米航空宇宙局 NASA は既に1988年に公開しています（表3）。それはシンプルでやってはいけない4項目、やるべきこと4項目でかなり判り易いです。この自動化原則に照らし合わせるると今進行中の自動運転技術は運転者のタスク分析や運転者のニーズ研究が不足していると指摘出来ます。自動運転はあくまでも運転者支援に徹し、運転者が真に望んでいる苦手の部分（見えない死角を補う技術など）を優先して開発して姿勢が今一度問われていると言っても過言ではないでしょう。

## 6. ドライブレコーダーの発展と役割

国内のドライブレコーダーの普及は、特に事故の事前リスク解明に役立つことが知られるようになり、大きく進展しつつあります。航空機事故の死者数は世界で年間1000人以下であり、自動車交通事故死者数の130万人（WHO統計）と桁が違います。航空機は8200年間毎日乗り続けても事故に遭うか遭わないかで確率は極めて低いのです。それでも、事故が起きると関係者はフライトレコーダーを必死に探します。

一方、交通事故では、警察官が実況見分調書作成のため事故現場で距離を測定する程度です。事故過程の科学的記録は皆無で全く比較になりません。

1999年、運輸技術審議会（当時運輸省）は、交通事故の原因分析と再発防止のためにフライトレコーダーを参考に、国レベルで映像記録型ドライブレコーダーの開発を決めました。国は8年かけて技術開発、効果判定、普及・活用を検討し、2004年にまずタクシー用を公開、2008年に実用化し、タクシー業界から急速に普及し、順次、路線バス、トラック業界に広がりました。

近年、京都祇園での暴走事故、ロシア隕石落下事件、台湾旅客機墜落などドライブレコーダーの衝撃映像がテレビで紹介され、マイカーへの普及を刺激し、社会的関

心が広がっています。筆者らが意欲的に活動する純粋民間組織「ドライブレコーダー協議会」の推計（2014年）では、日本で既に500万台が普及している様です。

僅か4年間にディズニーランドへ向かう関越道ツアーバスが居眠り運転で路側遮音壁に串刺し状態で衝突、車体が二つに割ける大事故（2012年、死者7名、重軽傷者39名）と何故か高速道路から一般道へ降りて斑尾高原スキー場を目指すスキーツアバスが深夜の長野県軽井沢氷峠越えの最中、エンジンブレーキが作動せずシフトレバー中立のまま加速、カーブ地点でガードレールを超えて斜面転落、立木激突、屋根・車体が「逆くの字型」に曲がる大事故（2016年、死者15名、重軽傷者26名）が連続して起こりました。

最初は健康起因事故、2件目は10ヶ月後の今も事故原因の真相は運転 / 車両 / 管理のエラーか未だに解明されていません。これらの苦い教訓から国は2016年3月に貸し切バス対象にドライブレコーダー装着を義務付けました。遅すぎたとの意見も関係者から聞かれますが、世界で初めて国主導でドライブレコーダー義務付け方針を決めたのは画期的です。

事故激減効果が顕在化するにはデータ洪水を如何に克服するかなどの実践的課題が山積しています。画像データの自動分類などデータ解析技術の進展が望まれます。

少なくとも公共交通を担う事業用車両は不慮の事故に備えて事故原因解明に有効なドライブレコーダー装着は基本的車載装置となるでしょう。

ドライブレコーダーの使用が普及し、解析技術が新しい道路インフラなどを含めた交通環境の解析に役立つようになれば、高度運転支援技術のあるべき姿に具体的な示唆を与えることができるようになると思います。ドライブレコーダー・データの具体的な分析と活用方法については参考文献10)を参照してください。

本稿冒頭でレビューした様に、「自動運転」時代こそ、技術の確かさを検証するためにドライブレコーダーの役割はますます増えていくと予想されます。交通環境の整備と運転の安全を保障する高度運転支援システムが健全に発展する様に祈って本稿を閉じます。

## 参考文献

- 1) KU-WIRF・ドライブレコーダー協議会、ドラブリ2015講演集「ドライブレコーダーと自動運転（高度運転支援）」、2015-12-1
- 2) 「自動運転時代 ドラレコの役割を議論」 『日刊自動車新聞』 2015-12-4

- 3) 「ドライブレコーダーの有効・必要性を提言」 『輸送新聞』 2015-12-7
- 4) Joel Patel (翻訳: 日本映像翻訳アカデミーAutoblog Japan Staff) 「死亡事故を起こしたテスラ「モデルS」が、オートパイロットを作動し、スピード違反していたことが判明」、Report, Autoblog,  
<http://jp.autoblog.com/2016/07/29/ntsb-preliminary-report-tesla-speeding-autopilot-engaged-report/>,2016-7-30
- 5) 鶴原吉郎 「テスラの死亡事故は「太陽のせい」か? 技術の限界を伝える難しさ」 日経ビジネスオンライン  
<http://business.nikkeibp.co.jp/atcl/report/15/264450/071500039/>, 2016-7-19
- 6) ランドル・オトゥール 「死亡事故のテスラは自動運転車ではなかった」、Newsweek 日本版,  
<http://www.newsweekjapan.jp/stories/world/2016/07/post-5449.php>, 2016-7-8
- 7) 島崎 敢、「テスラ車の死亡事故から、人類が学ぶべき「絶対にやってはいけないコト」自動運転が人を殺さないために」、[gendai.ismedia.jp/articles](http://gendai.ismedia.jp/articles) 医療・健康・食、2016-7-17
- 8) 内閣府自動走行推進委員会第1回配布資料  
[http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/iinkai/jidousoukou\\_1/jidousoukou1.html](http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/iinkai/jidousoukou_1/jidousoukou1.html)
- 9) 松山貴代子 (NEDO ワシントン事務所)、「米運輸省が発表した、自律走行車開発に関する政策方針の概要」、  
<http://www.nedodcweb.org/report/DOT%20Policy%20concerning%20Automated%20Vehicles.pdf>、2013-6-4
- 10) 堀野定雄 「映像記録型ドライブレコーダーを活用した人間工学的交通安全対策」、地方公務員安全と健康フォーラム、(一財) 地方公務員安全衛生推進協会、pp12-16、2016-4 <http://www.jalsha.or.jp>



# 座屈拘束ブレースの高サイクル疲労性能の研究

小谷野 一尚\* 岩田 衛\*\* 荏本 孝久\*\*  
 緑川 光正\*\*\* 中込 忠男\*\*\*\* 大熊 武司\*\*\*\*\*

## High Cycle Fatigue Performance of Buckling-Restrained Braces

Kazuhiya KOYANO\* Mamoru IWATA\*\* Takahisa ENOMOTO\*\*  
 Mitsumasa MIDORIKAWA\*\*\* Tadao NAKAGOMI\*\*\*\* Takeshi OHKUMA\*\*\*\*\*

### 1. 序

座屈拘束ブレースの疲労性能の研究は、大中地震を想定した比較的大きな歪振幅の低サイクル疲労実験が行われてきた。しかし、高頻度の風や小地震を想定した小さな歪振幅の高サイクル疲労実験はあまり行われていない。

本研究では、座屈拘束ブレースの芯材の塑性領域での高サイクル疲労実験を行い、既往の研究<sup>1)</sup>で求められた低サイクルでの疲労性能との関係性を確認する。また、エネルギー吸収性能についても確認する。

### 2. 実験計画

#### 2.1 試験体

試験体平面図を図1に、詳細を表1に示す。塑性化部絞りを、スペーサーを設けた高性能タイプ(Hシリーズ)を3体、塑性化部絞りを設けず基本タイプ(Bシリーズ)を1体製作する。

両試験体とも、芯材長さは2351mmとし、塑性化部幅は112mm、厚さ16mm、幅厚比は7.0とする。

Hシリーズは塑性化部長さを1176mm、拘束指標 $R=(P_b/P_c)$ 、 $P_b$ :拘束材のオイラー座屈荷重、 $P_c$ :芯材の降伏荷重)は9.0とする。芯材軸方向に、強軸変形を抑制するための絞りを、スペーサーを設ける。Bシリーズは、塑性化部長さを1251mm、拘束指標 $R$ を3.0とし、芯材軸方向には丸鋼を設ける。なお、塑性化部端部にリブ溶接部が存在している。

#### 2.2 載荷計画

\* 助手 建築学科

Research associate, Dept. of Architecture

\*\* 教授 建築学科

Professor, Dept. of Architecture

\*\*\* 客員教授 工学研究科, 名誉教授 北海道大学

Guest Professor, Research Institute for Engineering

Professor Emeritus, Hokkaido University

\*\*\*\* 名誉教授 信州大学

Professor Emeritus, Shinshu University

\*\*\*\*\* 客員研究員 工学研究科

Guest Researcher, Research Institute for Engineering

載荷は1000kN アクチュエータを使用し、軸方向変位制御による一定歪振幅繰返し載荷とする。載荷装置は柱脚部をピン支持とし、試験体は45度の角度で設置する。

Hシリーズでは、軸歪1.5 $\epsilon_y$ に相当する歪振幅0.21%(H15E試験体)、軸歪1.1 $\epsilon_y$ に相当する歪振幅0.15%(H11E試験体)で載荷する。また、既往の研究<sup>1)</sup>との疲労曲線を補うため、歪振幅0.5%(H05試験体)も行う。

Bシリーズでは、軸歪1.1 $\epsilon_y$ に相当する歪振幅0.15%(B11E試験体)で載荷する。所定の歪振幅において、試験体耐力が最大耐力の80%に低下する、または、引張破断するまで繰返す。この直前までの繰返し回数を耐用回数とする。

### 3. 実験結果

各試験体の実験経過および最終状態を表2に示す。

H15E試験体は12,158回目、H11E試験体は17,265回目、H05試験体は926回目で引張破断した。また、B11E試験体は3,671回目で引張破断した。

H15E、H05試験体は上端側の塑性化部絞部、H11E試験体は下端側の塑性化部絞部で引張破断した。また、B11E試験体は上端側のリブ溶接部で引張破断した。

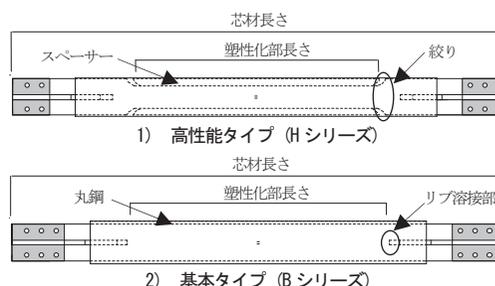


図1 試験体平面図

表1 試験体詳細

試験体	芯材(SN400B)						拘束材(SS400)			
	寸法 mm	断面積 mm <sup>2</sup>	幅厚比	芯材長さ mm	塑性化部長さ mm	$\sigma_y$ N/mm <sup>2</sup>	$P_y$ kN	高さ mm	幅 mm	拘束指標 R
H15E,H11E,H05	PL-112×16	1792	7.0	2351	1176	289	518	146.0	181.2	9.0
B11E	PL-112×16	1792	7.0	2351	1251	289	518	98.0	139.2	3.0

表2 実験経過および最終状態、性能評価

試験体	実験経過	最終状態	$E_s$ kN・m	$\omega$
H15E	0.21%至12,158回目引張	引張 破断	11,965,462	14,048
H11E	0.15%至17,265回目引張		5,473,917	7,034
H05	0.5%至926回目引張		5,531,883	6,442
B11E	0.15%至3,671回目引張		3,597,869	4,137

H15E試験体の降伏耐力比  $P/P_y$  ( $P$ :軸方向荷重)と芯材の軸歪  $\epsilon$  (軸変形量  $\delta$ /塑性化部長さ)の関係を図2に示す。H15試験体同様、各試験体とも安定した紡錘形の復元力特性を示した。降伏耐力比は載荷開始後、徐々に増加した。ある程度載荷を続けるとしばらく一定になり、その後徐々に低下し、破断した。

4. 考察

4.1 疲労性能

歪振幅  $\epsilon$ (%)と耐用回数の関係を図3に、既往の研究<sup>1)</sup>と本研究の結果の近似曲線を合わせて示す。耐用回数はHシリーズの歪振幅0.21%で12,157回、0.15%で17,264回、0.5%で925回、Bシリーズの0.15%で3,670回である。両シリーズとも対数軸上で直線関係にあるが平行にはならず、歪振幅が小さくなるほど耐用回数の差が大きくなり、直線に開きが生じている。

また、HシリーズとBシリーズでは破断位置が異なる。Hシリーズでは、芯材塑性化部を絞ったことにより、断面積が小さくなる端部に応力が集中している。一方、Bシリーズでは、リブ溶接による熱影響部に応力が集中している。以上より、芯材形状によって破断位置が異なることがわかる。絞りを加えた塑性化部端部よりも、溶接熱影響部の疲労性能の方が低いことが予想され、HシリーズとBシリーズとは耐用回数に差が生じている。

4.2 性能評価

表2に、実験結果より求めた各試験体の累積塑性歪エネルギー  $E_s$  と累積塑性歪エネルギー率  $\omega (=E_s/P_y \delta_s)$  ( $\delta_s$ : 弾性限界変形量)を示す。また、本研究と既往の研究<sup>1)</sup>の  $\omega$  と拘束指標  $R$  の関係と既往の研究<sup>2)</sup>で提案された下限値  $\omega$  を表す性能評価式を合わせて図4に示す。

すべての試験体が性能評価式を上回り、高いエネルギー吸収性能を示している。また、低サイクル時に比べて高サイクル時が大きい  $\omega$  になっている。

Hシリーズに比べてB11E試験体の  $\omega$  が小さいのは耐用回数が少ないためであり、H15E試験体よりもH11E試

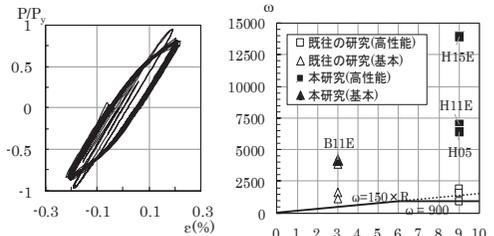


図2 P/P<sub>y</sub>- $\epsilon$ 関係 (H15E)

図4  $\omega$ -R関係

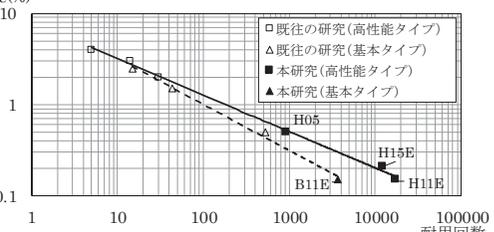


図3  $\epsilon$ -耐用回数関係

験体の  $\omega$  が小さくなっているのは、累積塑性歪エネルギー  $E_s$  すなわち歪振幅が小さいことによるものである。

5. 結

本研究では、2種類の座屈拘束プレースの高サイクル疲労実験を行い、以下の知見を得た。

- 1) 塑性領域での歪振幅  $\epsilon$  と耐用回数の関係は、低サイクルの領域から高サイクルの領域まで対数軸上で直線関係になる。
- 2) 高性能タイプと基本タイプでは、塑性化部の溶接熱影響部の有無によって、歪振幅が小さくなるほど耐用回数の差が大きくなる。
- 3) 塑性領域における小さな歪振幅による高サイクル疲労では、累積塑性歪エネルギー率  $\omega$  は性能評価式を上回り、十分なエネルギー吸収性能を示す。

参考文献

(1) 小谷野一尚, 宮川和明, 小出秀一, 喜田村互, 岩田衛, “疲労性能の高い座屈拘束プレースの研究”, 日本建築学会技術報告集, 第21巻, 第47号, pp.137-140, 2015年2月。  
 (2) 飯塚亮太, 小谷野一尚, 緑川光正, 岩田衛, “累積塑性歪エネルギー率の大きな座屈拘束プレースの研究”, 日本建築学会構造系論文集, 第701号, pp.1015-1023, 2014年7月



## まちづくり研究所の活動・2016年度

曾我部 昌史\* 内田 青蔵\* 山家 京子\* 中井 邦夫\* 吉岡 寛之\*\*  
重村 力\*\*\* 丸山 美紀\*\*\*\* 長谷川 明\*\*\*\* 小幡 知之\*\*\*\*\* 香山 篤美\*\*\*\*\*

### Report on Activities of the Town Planning Institute 2016

Masashi SOGABE\* Seizo UCHIDA\* Kyoko YAMAGA\* Kunio NAKAI\* Hiroyuki YOSHIOKA\*\*  
Tsutomu SHIGEMURA\*\*\* Miki Maruyama\*\*\*\* Akira Hasegawa\*\*\*\* Tomoyuki OBATA\*\*\*\*\* Atsumi KOYAMA\*\*\*\*\*

#### 1. 2016年度からの活動

「まちづくり研究所」は、地域に残された歴史的建築物などの資産を生かして地域の活性化や住みよいまちづくりを実現することを目的として、2006年に故西和夫先生（神奈川大学名誉教授）が中心となって立ち上げられた。設立から今年で10年目を迎える。西先生の退職後は、山家京子、内田青蔵が代表を務めてきたが、2016年度からは曾我部昌史に担当を交代した。同年3月に退職した重村力は、引き続き工学研究所客員教授として関わることとなり、また、それぞれの建築設計事務所を構えながら本研究soの活動で共同をしていた丸山美紀と長谷川明が、あらためて工学研究所特別研究員として本研究soに加わることとなった。新たな体制のもとで、全国での、これまで以上に広い範囲での活動を後ろ支える受け皿としての役割を担うこととなる。

#### 2. 新しい活動地域

体制が更新されたことに伴い、これまでの活動の中心であった長崎県平戸、山形県長井、長野県松代などといった地域のほかに、いくつかの新しい地域が加わった。本稿では、それらの中から曾我部、丸山、長谷川が関わる、徳島県美波町日和佐、愛媛県今治市大三島での活動の一端を紹介する。

#### 3. 徳島県美波町日和佐でのまちづくり活動

徳島県美波町日和佐は、日和佐川河口付近に形成された県南の沿岸集落の一つである。第23番霊場・薬王寺やウミガメの産卵地・大浜海岸などで知られる。古くは、廻船業や漁業で栄え、歴史に培われた特徴的な民家群やそれらがつくる景観が今日に伝えられる。南海トラフ地震などに起因する津波被災も繰り返されており、東日本大震災以降再検討された津波の想定高さが以前より大きくなったため、避難計画などが調整されつつある。近年では、多くの町村と同様、高齢化と定住人口の減少が顕著であり、景観や震災対策と並行して、新たなまちづくり策の検討が急務である。



日和佐浦周辺

日和佐湾北側に広がる日和佐浦地区および薬王寺参道である桜町通り周辺が、活動の中心的エリアである。地域に残された歴史ある建物や景観を維持しながら、交流人口の増加や地域での暮らしの豊かさが得られるようなまちづくりを目指して、種々の活動が行われている。

今年度から特に注力している活動に、谷屋活用プロジェクトがある。谷屋は、明治7年に建てられた元廻船問屋の建物である。木造2階建てで、屋根の一部には本瓦葺きの部分も残る。出桁造りや鋸葺きといった地域固有の建築様式を有していると同時に、サンゴが練り込ま

\* 教授 建築学科

Professor, Dept. of Architecture

\*\* 特別助教 建築学科

Assistant Professor, Dept. of Architecture

\*\*\*客員教授 工学研究所

Guest Professor, Research Institute for Engineering

\*\*\*\* 特別研究員 工学研究所

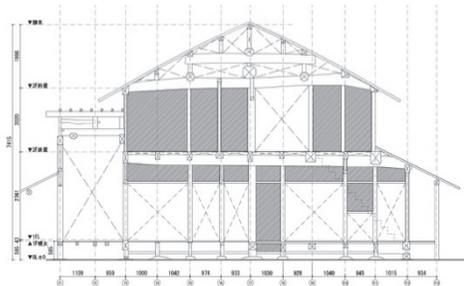
Research Fellow, Research Institute for Engineering

\*\*\*\*\*客員研究員 工学研究所

Guest Researcher, Research Institute for Engineering

れた床の間の壁や龍が描かれた和紙製の折上げ天井など、独特な設えも多くみられる。東側にはビリヤード場として用いられていた別棟もある。

所有者である谷氏との協議の末、谷屋を地域づくりの拠点として活用できることとなった。活用を具体化するにあたっては補修や耐震補強が必要であり、活用方針の検討や体制の構築と並行して改修設計を進めている。既存建物の実測調査などはほぼ完了しており、今年度内に耐震補強方針をまとめることを目指して、金箱温春氏(金箱構造設計事務所)との協議を重ねている。谷屋活用プロジェクト以外にも、桜町通りの景観形成策の検討などを進めている。また、丸山と長谷川が所属する移住促進のための組織(一社)アンドモアが古民家を活用した拠点づくりを行っていて、昨年度来、順調に件数を増やしており、用途のバリエーションも広がっている。



谷屋実測図(一部)

#### 4. 愛媛県大三島でのまちづくり活動

大三島は、瀬戸内海西部に広がる芸予諸島のほぼ中央、愛媛県の北端に位置する島である。農業が主要産業で、近年は柑橘の生産を中心としている。かつては、大山祇神社や航路の多かった宮浦港を有する島西部(宮浦地区)に中心的な街区が形成されていたが、島東部(上浦地区)を縦断する瀬戸内しまなみ海道が開通した1999年ごろから急速に地域の活力を落としていった。往時には人が溢れていたという参道沿いには伝統的な様式を備えた古民家が残されているものの、今日ではほとんどが空き家となり、老朽化の進行が懸念される。

島では、2013年以降、伊東豊雄が主宰する伊東建築塾により「日本一美しい島・大三島をつくろうプロジェクト」が進められている。その活動に参加する共同メンバーとして、瀬戸地区(島東南部)の地域づくり、障がい者支援施設「さざなみ園」の改修、元鈴木菓舗の調査・保存などの活動を行っている。本稿では、それらの中から元鈴木菓舗の計画について紹介する。

元鈴木菓舗は、参道に残る最も古い建物である。木造二階建てで、間口6間、奥行4間の本体部分が参道に面し、南側に簡易なつくりの増築部分がある。今年度に入り所有

者の許可が得られたため、改修の作業に着手した。はじめに行ったのは、木部の腐朽が進行していた下屋部分の瓦下ろしである。改修工事の手順上、本体部分の屋根改修後に元に戻すため、清掃し保管している。その後、内部に残された荷物などを整理しながら、全体の実測調査を行った。



大山祇神社参道(点線部分)付近

建物の活用方針は決まらないものの、耐震性性能上の不安が大きかったため、セルフビルドでの耐震補強を行うこととし、構造エンジニアの金田充弘氏(東京藝術大学)との協議を重ねながら、作業を進めた。2階床と棟位置の壁面補強を中心に構造用合板などで強度を上げることとし、8月中旬までに予定していた最低限の補強を済ませることができた。また、土間上部を吹き抜けとした上で、菓舗時代の家具を整理して配置し直し、建物の様子をうかがえるようにしている。現在は、棧瓦土葺きの屋根の葺き替え、下屋の補修と瓦の葺き直し、南側増築部の撤去など、工業者に作業を依頼するための準備を進めている。

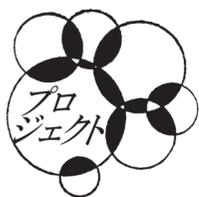


改修後の元鈴木菓舗土間部分

#### 3. 今年度後半以降の活動予定

今年度後半からは、横浜市閩内エリアでの活動をより深めるために、エリア内に残される防火帯建築の一つである住吉町新井ビル内に拠点を設ける予定である。

本稿で触れた2地域以外でも様々な活動が進行している。具体的な内容については、来年度以降の所報などで報告していきたい。



# くびれ加工鋼管を用いた円形 CFT 短柱の 圧縮性能に関する実験的研究

林 思奇\* 齊藤 隆典\*\* 趙 衍剛\*\*\*

## Experimental study on compression performance of circular concrete filled steel tube with necking part

Siqi LIN\* Takasuke SAITO\*\* Yan-Gang ZHAO\*\*\*

### 1. はじめに

コンクリート充填鋼管(CFT)柱において薄肉鋼管の CFT は経済性に優れている。しかし、薄肉の鋼管は局部座屈を起こしやすく、鋼管の拘束効果が耐力に寄与する効果は小さくなる。また、鋼管がコンクリートにより側圧を受け二軸応力状態となると、柱の終局状態における軸圧縮応力は降伏応力よりも低下してしまう<sup>(1)</sup>。CFT に軸方向入力に加わると座屈が生じる可能性がある。座屈が大きくなると降伏後、耐力は急激に低下する。本研究では、円形 CFT 短柱の圧縮実験を行い、鋼管にくびれを施すことで、降伏後の急激な耐力低下を抑制することを目的とする。

### 2. 実験概要

表 1 に本実験の試験体一覧を示す。くびれ加工鋼管の板厚は一般鋼管と比べるため、最も薄い 3.7 mm とした。鋼管強度(SS400)を、コンクリート強度(48 N/mm<sup>2</sup>)をとして実験した。一般鋼管の各試験体を 2 体ずつ、くびれ加工した鋼管は加工箇所が二か所と二か所のものを各 3 体ずつ、合計 16 体を作成した。くびれ加工位置を図 1、

表 1 試験体概要

種類	断面径 [mm]	板厚 [mm]	材長 [mm]	$A_s$ [mm <sup>2</sup> ]	$A_c$ [mm <sup>2</sup> ]
一般鋼管	165.2	7.1	495.6	3527	17908
		6		3001	18434
		5		2516	18918
		3.7		1877	19557
くびれ加工鋼管		3.7		1877	19557

加工の詳細を図 2 に示す。載荷は 5000 kN 圧縮試験機を用い、鋼管とコンクリートを軸圧縮する平押し試験を行った。軸方向及び周方向のひずみを測定するため、鋼管のシーム位置を避けた管周二等分点上にひずみゲージを貼り付けた。くびれ部分の変位を測定するため、管周四等分点上にパイ型変位計を取り付け、変位計を上下加圧板間に 2 本設置し、計測を行った。図 3 にひずみゲージとパイ型変位計の取付け位置を示す。

### 3. 実験結果・考察

表 2 に一般鋼管とくびれ加工鋼管の実験結果を示す。表中の  $N_u$  は最大耐力、 $N_0$  は単純累加強度<sup>(2)</sup>を示している。使用材料の機械的性質としては、コンクリート圧縮強度が 52.3 N/mm<sup>2</sup>、鋼管の降伏強度が 373 N/mm<sup>2</sup>となった。表より、一般鋼管は累加強度を 1.07~1.1 倍上回った。くびれ加工鋼管は加工箇所が二か所の鋼管の方が、最大耐力が大きくなった。一般鋼管と比較すると、くびれ加工

\*大学院生 建築学科  
Graduate (D.C.), Dept. of Architecture  
\*\*助教 建築学科  
Assistant professor, Dept. of Architecture  
\*\*\*教授 建築学科  
Professor, Dept. of Architecture

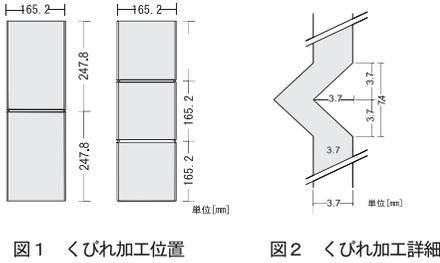


図1 くびれ加工位置

図2 くびれ加工詳細

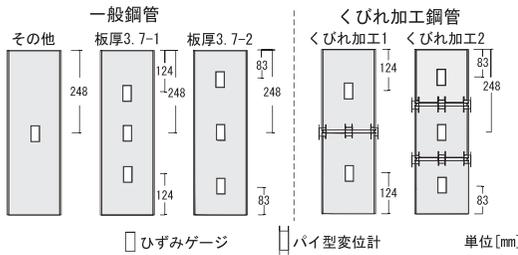


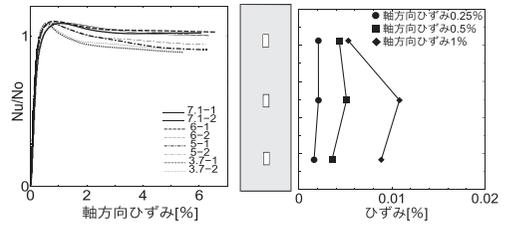
図3 計測機器取り付け位置

表2 一般鋼管とくびれ加工鋼管の実験結果

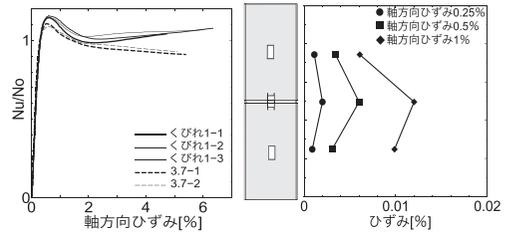
試験体	$N_u$ [kN]	$N_0$ [kN]	$N_u/N_0$
7.1-1	2450	2252	1.09
7.1-2	2458		1.09
6-1	2296	2083	1.10
6-2	2292		1.10
5-1	2094	1928	1.09
5-2	2100		1.09
3.7-1	1874	1723	1.09
3.7-2	1846		1.07
くびれ1-1	1972	1723	1.14
くびれ1-2	2000		1.16
くびれ1-3	1976		1.15
くびれ2-1	2064		1.20
くびれ2-2	2060		1.20
くびれ2-3	2052		1.19

が一か所のものは7%、二か所のものは12%の最大耐力の上昇が認められた。

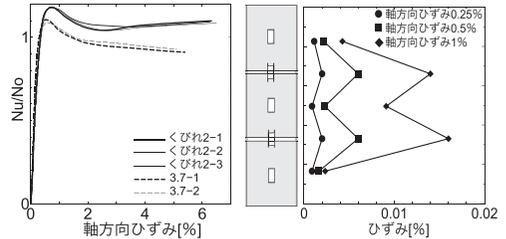
図4に  $N_u/N_0$  と軸方向ひずみの関係と鋼管ひずみの推移を示す。軸方向ひずみは、軸方向変位を試験体全長で除したものである。(a)を比較すると、鋼管の厚さが厚い程降伏後の耐力低下が小さいことが分かり、これは座屈の抑制によるものと考えられる。図中右側は鋼管部分の軸方向ひずみが0.25%(降伏前)、0.5%(降伏点付近)、1%(降伏後)時のひずみゲージとパイ型変位計による各計測ひずみを表しており、縦軸はそれらの取り付け位置と対応している。一般鋼管では降伏後に、中央部のひずみが増加している。また、(b)のくびれ加工一箇所の鋼管ではひずみの推移で(a)との大きな差は見られない。一方、



(a) 一般鋼管



(b) くびれ加工一箇所の鋼管



(c) くびれ加工二箇所の鋼管

図4  $N_u/N_0$  と軸方向ひずみの関係および鋼管ひずみの推移

二箇所の(c)ではくびれ部分のひずみ集中が読み取れる。この結果の原因としては、くびれ加工部分の変形集中により他の部分の変形を抑えたことによると推察される。

#### 4. まとめ

本研究では一般鋼管とくびれ加工を施した鋼管を用いたCFT短柱の圧縮実験を行い、以下の結果が得られた。

- (1) くびれ加工は耐力や変形に影響を与える。また、くびれ部分に変形が集中し、最大耐力は同じ板厚の一般鋼管と比べ大きくなった。
- (2) 鋼管強度は耐力に影響する。鋼管の板厚が厚いほど降伏後の耐力低下は小さくなる傾向がある。

#### 参考文献

- (1) 平井健一, 姜迎春, 盧朝輝, 趙衍剛: コンクリート充填鋼管短柱の純軸圧縮時最大耐力評価式, 日本建築学会大会学術講演梗概集(2009-07), pp. 1205-1206.
- (2) コンクリート充填鋼管構造設計施工指針, 日本建築学会(2008)



## “新たな低炭素エネルギー社会に対応した 新型電池の開発”

松本 太<sup>1</sup>・池原飛之<sup>2</sup>・田邊豊和<sup>3</sup>・片岡利介<sup>4</sup>・大坂武男<sup>5</sup>・長澤 浩<sup>6</sup>  
・阿部英樹<sup>7</sup>・持田由幸<sup>8</sup>・入井友海太<sup>9</sup>

### “Development of Novel Battery towards New Low Carbon Energy Society”

Futoshi MATSUMOTO ・ Takayuki IKAHARA ・ Toyokazu TANABE ・

Toshiyuki KATAOKA ・ Takeo OHSAKA ・ Hiroshi NAGASAWA

・ Hideki ABE ・ Yoshiyuki MOCHIDA ・ Yuuta IRII

#### 1. 緒言\*

近年の温暖化問題から二酸化炭素を可能な限り排出し

- 
- 1: 教授 神奈川大学工学部物質生命化学科  
Professor, Dept. of Material and Life Chemistry, Kanagawa University
- 2: 教授 神奈川大学工学部物質生命化学科  
Professor, Dept. of Material and Life Chemistry, Kanagawa University
- 3: 特別助教 神奈川大学工学部物質生命化学科  
Assistant Professor, Dept. of Material and Life Chemistry, Kanagawa University
- 4: 特別助教 神奈川大学工学部物質生命化学科  
Assistant Professor, Dept. of Material and Life Chemistry, Kanagawa University
- 5: 客員教授 神奈川大学工学研究所  
Visiting Professor Research Institute for Engineering, Kanagawa University
- 6: 客員教授 神奈川大学工学研究所  
Visiting Professor Research Institute for Engineering, Kanagawa University
- 7: 客員教授 神奈川大学工学研究所  
Visiting Professor Research Institute for Engineering, Kanagawa University
- 8: 客員研究員 神奈川大学工学研究所  
Visiting Researcher Research Institute for Engineering, Kanagawa University
- 9: 客員研究員 神奈川大学工学研究所  
Visiting Researcher Research Institute for Engineering, Kanagawa University

ない低炭素社会への移行が我々の社会の重要な課題となっている。エネルギーを効率的に使う方法の一つとしてリチウムイオン電池、燃料電池などが注目されてきており、数年ぐらい前から幾つかの自動車会社が市販のリチウムイオン電池車、燃料電池車を販売し始めている。しかし、これらの電気自動車が私たちの生活に広くいきわたるためには、性能の向上・製品の低価格化など、さらに開発すべき点は多く残されている。本プロジェクトは、学内外の電池関連の研究者が集結し、これらの問題に対して、電気化学、材料化学などの観点から研究開発に取り組み、問題を解決する糸口を提案し、それらを地元の企業と協力して製品開発まで結びつけようと考え、本プロジェクトを行っている。その活動の中には、神奈川大学新型電池オープンラボのように企業と共同研究による研究開発を目的に実施されている事業も含まれる。<sup>1)</sup>

#### 2. 研究内容の紹介

今年度新たに企業と共同研究を開始した研究内容を3件、簡単に紹介する。

##### 2.1. Liイオンキャパシタ用電極作製のための穴空き集電銅箔を用いたLiドーブ反応の高速化

リチウムイオンキャパシタ (LIC) には高出力化のためグラファイトなどの負極へのLiイオンのプレドーブが必要であるが、このプレドーブにおいては多孔質集電体を用いた垂直プレドーブ法が用いられている。これまでの報告によると多孔質

集電体上の細孔の径が数 $\mu\text{m}$ のものにおいて最もドープ時間が短く、細孔径が $1\mu\text{m}$ 以下になるとドープ時間が長くなることを見出されている。<sup>2)</sup> また、穴空き集電体を作る技術は、パンチング、電解エッチング等が報告されているが、上述の報告にあるような細孔径数 $\mu\text{m}$ を有する集電体を作ることはこれらの既存の技術では難しい。そこで本研究では、レーザーを用いて細孔を規則的に空けた穴空き Cu 集電体を作製し(Fig. 1)、十数 $\mu\text{m}$ から数 $\mu\text{m}$ の細孔径を有する条件でLiイオンのプレドープ反応速度を比較し、これらの穴空き集電体の有効性について検討を行っている。

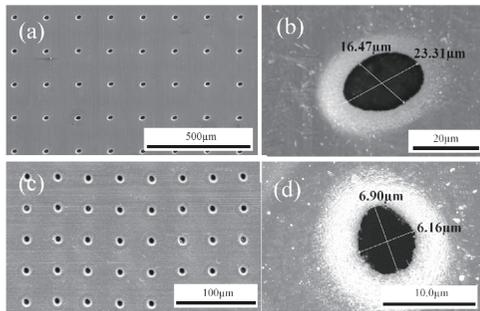


Fig. 1 穴空き集電体の表面SEM像。(a) 開口率1%, 平均孔径 $20\mu\text{m}$ , (b) 開口率1%, 平均孔径 $5\mu\text{m}$ 。

## 2.2. 水系バインダー適用のための高電圧正極材料粒子表面コーティングと充放電特性の向上

リチウム電池用正極材料のバインダーにおいて、有害な有機物質を含まない水系バインダーが注目されている。しかし、水系バインダーを用いた場合、溶媒として使用している水に正極材料の成分が溶出してしまふなどの問題がある。<sup>3)</sup> 一方、正極材料の表面にカーボン酸化物のコーティング処理を施すことに

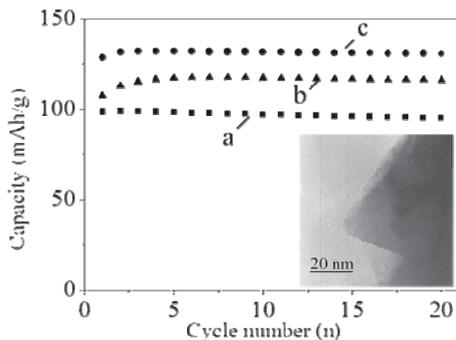


Fig. 2 水系バインダーを用いて作製した未処理 (a)、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  (b) およびカーボン (c) コーティング処理を施した正極材料  $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$  の充放電試験結果。挿入図: $\text{Al}_2\text{O}_3$  コーティング正極材料のTEM像

より、正極材料と溶媒の接触を防ぎ、耐水性、導電性能の向上などの新機能を付与することが可能であると期待されている。本研究では、正極材料としてスピネル構造を有するニッケルマンガン酸リチウム( $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ )を適用し、カーボン及び金属酸化物のコーティング手法を検討することにより充放電特性の向上を目指し、さらに耐水性の高いコーティング処理を施した正極材料による水系バインダーへの適応を検討している (Fig. 2)。

## 2.3. Pt系ナノ粒子/ $\text{TiO}_2$ /カップスタックカーボンナノチューブの電極触媒特性と耐久性の向上

固体高分子形燃料電池のカソード側で生じる酸素還元反応(ORR)の触媒として、カーボンブラック(CB)上に担持した白金(Pt)触媒(Pt/CB)が多用されている。しかし、Ptを用いた場合においても、ORRで高い過電圧が生じてしまう。また電極触媒の担持体として使用されているCBがORR中における高電位域で酸化反応が生じてしまうことによる触媒の劣化が問題となっている。これらの問題点を解決するために、カーボンナノチューブ(CNT)材料の高い安定性に着目した。とくに、カップを重ねたような形状を有するカップスタック型CNT(CSCNT)はグラフェンエッジ部位を多く有していることから、 $\text{TiO}_2$ などの酸化物の担持やコーティングをより容易にできることが期待できる。本研究では、 $\text{TiO}_2$ をコーティングしたCSCNT( $\text{TiO}_2/\text{CSCNT}$ )を担持体として使用し、選択的にPtを析出させ、さらにPbを添加し、金属間化合物化することでPt単体よりも高いORR活性が期待でき、同時に担持体の高い電気化学的安定性を有していることから、ORR活性及び耐久性についての評価を行っている (Fig. 3)。<sup>4)</sup>

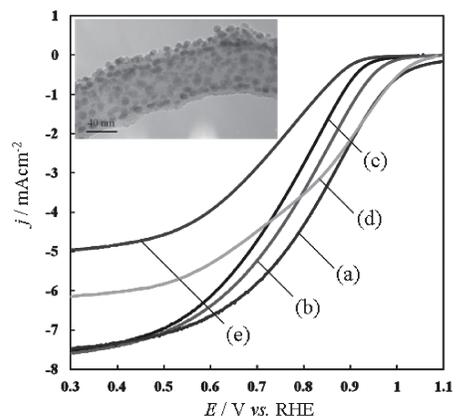


Fig. 3 PtPb/ $\text{TiO}_2$ /CSCNT (a), Pt/ $\text{TiO}_2$ /CSCNT (b), Pt/CB (c), PtPb/CB (d), PtPb/ $\text{TiO}_2$  (e)を用いた $0.1\text{M HClO}_4$ 溶液中のCV測定におけるORRのボルタモグラム。 $\text{O}_2$ 飽和, 電極回転速度:  $1600\text{rpm}$ , 掃引速度:  $10\text{mVs}^{-1}$ , 挿入図:PtPb/ $\text{TiO}_2$ /CSCNTのTEM像

### 3. 終わりに

本プロジェクトでは、今年度2名の客員教授をメンバーに加え、新型電池に関わる要素研究を主に企業との共同研究で行った。本報告では、二次電池の研究成果を述べたが、その他に燃料電池電極触媒や光触媒による水素エネルギーの生成についての研究も行っている。これらの成果に関しては既に報告している研究成果を以下に発表論文として列記したので、それらをご参照いただきたい。

#### 参考文献

- (1) 神奈川大学工学研究所報第38号, p.64-66 (2015).
- (2) T. Utsunomiya, *et al.*, *JP Patent*, P2011-210995.
- (3) K. Notake, *et al.*, *J. Appl. Electrochem.*, **46(3)**, 267-278 (2016).
- (4) F. Ando, *et al.*, *Chem Lett.*, **44(12)**, 1741-1743 (2015).

#### 発表論文

- (1) Takao Gunji, Arockiam John Jeevagan, Masanari Hashimoto, Toshiaki Nozawa, Toyokazu Tanabe, Shingo Kaneko, Masahiro Miyauchi and Futoshi Matsumoto, Photocatalytic Decomposition of Various Organic Compounds Over WO<sub>3</sub>-Supported Ordered Intermetallic PtPb co-Catalysts, *Applied Catalysis B: Environmental*, **181**, 475-480 (2016).
- (2) 方 雪琴, 上原一真, 金子信悟, 佐藤静夏, 田邊豊和, 郡司貴雄, 松本 太, 塩化アルミニウム/1-エチル-3-メチルイミダゾリウムクロリド/トルエン浴からの光沢性を有するアルミニウム電気めっき膜の作製における添加剤の影響, *Electrochemistry*, **84 (1)** 17-24 (2015).
- (3) Fuma Ando, Takao Gunji, Hikaru Fujima, Tsuyoshi Takeda, Toyokazu Tanabe, Shingo Kaneko, Futoshi Matsumoto, Preparation of PtPb/TiO<sub>2</sub>/Cup-Stacked Carbon Nanotube Composite for Enhancement of Electrocatalytic Reaction of Oxygen Reduction Reaction, *Chem Lett.*, **44(12)**, 1741-1743(2015).
- (4) Genki Kobayashi, Yuta Irii, Futoshi Matsumoto, Atsushi Ito, Yasuhiko Ohsawa, Shinji Yamamoto, Yitao Cui, Jin-Young Son, Yuichi Sato, Improving Cycling Performance of Li[Li<sub>0.2</sub>Ni<sub>0.18</sub>Co<sub>0.03</sub>Mn<sub>0.58</sub>]O<sub>2</sub> through Combination of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based Surface Modification and Stepwise Pre-cycling, *J. Power Sources*, **303**, 250-256(2016).
- (5) K. Notake, T. Gunji, S. Kosemura, Y. Mochizuki, T. Tanabe, S. Kaneko, S. Ugawa, H. Lee, F. Matsumoto, The Application of a Water-Based Hybrid Polymer Binder to a High-Voltage and High-Capacity Li-rich Solid-Solution Cathode and Its Performance in Li-Ion Batteries, *J. Appl. Electrochem.*, **46(3)**, 267-278 (2016).
- (6) A.J. Jeevagan, T. Gunji, T. Tanabe, S. Kaneko, F. Matsumoto, Enhancement of the Electrocatalytic Oxygen Reduction Reaction on Pd<sub>3</sub>Pb Ordered Intermetallic Catalyst in Alkaline Aqueous Solutions, *J. Appl. Electrochem.*, **46**, 745-753 (2016).
- (7) T. Tanabe, W. Miyazawa, T. Gunji, M. Hashimoto, S. Kaneko, T. Nozawa, M. Miyauchi, F. Matsumoto, Site-selective deposition of binary Pt-Pb alloy nanoparticles on TiO<sub>2</sub> nanorod for acetic acid oxidative decomposition, *J. Catal.*, **340**, 276-286 (2016).
- (8) T. Gunji, K. Sasaki, A. J. Jeevagan, T. Tanabe, S. Kaneko, F. Matsumoto, Enhanced Oxygen Reduction Reactions and

- Stable Long-term Activity on TiO<sub>2</sub>-supported Dealloyed PtCu Nanoparticles in Acidic Aqueous Solutions, *ECS Transactions*, Electrochemical Society, Inc., **66(39)**, 1-8 (2015).
- (9) Takuya Kuzuoka, Tomohiro Kouno, Tomohiro Koyama, Yuji Morita, Keitaro Yamazaki, Takao Gunji, Toyokazu Tanabe, Shingo Kaneko, Ben Nanzai, Futoshi Matsumoto, Development of Moving Micro-Machines That Use Hydrogen Peroxide and Glucose as Fuels, *ECS Transactions*, Electrochemical Society, Inc., **69(39)**, 17-26 (2015).
- (10) Takao Gunji, Masanari Hashimoto, Toyokazu Tanabe, Shingo Kaneko, Futoshi Matsumoto, Preparation of Ordered Intermetallic PtBi co-Catalyst Nanoparticles/WO<sub>3</sub> and its Photocatalytic Activity towards Decomposition of Acetic Acid, *ECS Transactions*, Electrochemical Society, Inc., **69(39)**, 11-16 (2015).
- (11) Kazuma Uehara, Takao Gunji, Toyokazu Tanabe, Shingo Kaneko, Futoshi Matsumoto, The effect of Brightener on the Fabrication of Electroplated Bright Aluminum Films Using an AlCl<sub>3</sub>-EMIC-Toluene Bath, *ECS Transactions*, Electrochemical Society, Inc., **69(29)**, 7-13 (2015).
- (12) Fuma Ando, Takao Gunji, Toyokazu Tanabe, Shingo Kaneko, Tsuyoshi Takeda, Takeo Ohsaka, Futoshi Matsumoto, Enhancement of the Oxygen Reduction Reaction (ORR) on a PtPb Nanoparticle/TiO<sub>2</sub>/Cup-Stacked Carbon Nanotube Composite in Acidic Aqueous Solutions based on the Electronic Interaction between PtPb and TiO<sub>2</sub>, *ECS Transactions* **72 (33)**, 53-62 (2016).
- (13) Takuya Kuzuoka, Tomohiro Kouno, Tomohiro Koyama, Yuji Morita, Keitaro Yamazaki, Takao Gunji, Toyokazu Tanabe, Shingo Kaneko, Ben Nanzai, Futoshi Matsumoto, Development of Moving Micro-Machines That Use Hydrogen Peroxide and Glucose as Fuels, *ECS Transactions* **69 (39)**, 17-26 (2016).



# 時間-周波数分析を用いたトンネル発破音の分析

山崎 徹\* 中村 弘毅\*\* 伊東 圭昌\*\*\* 田中 俊光\*\*\*

## Analysis of Tunnel Blasting Sound by using Time-Frequency Analysis

Toru YAMAZAKI\* Hiroki NAKAMURA\*\* Yoshiaki ITOH\*\*\* Toshimitsu TANAKA\*\*\*

### 1. プロジェクト研究の概要

各種の振動現象の把握のためには、測定を行い、測定データを周波数分析することが多い。周波数分析技術として、FFT (高速フーリエ変換) が主として用いられる。しかし FFT は時間平均結果となるため、特に衝撃的な現象などの分析には注意が必要である。瞬時的な現象の分析には、ウェレット解析やフィルタ処理技術が有効であり、著者らはデジタルフィルタを用いた三次元周波数分析 (時間-周波数分析) 手法<sup>(1)</sup>を開発し、それに基づく振動モデル化法の開発<sup>(2)</sup>、疾病診断のための心電波形分析<sup>(3)</sup>、ヴァイオリンの分析<sup>(4)</sup>などへの応用について検討を行っている。

そこで本報告では、別途の研究<sup>(5)</sup>で明らかにしたトンネル発破音の伝搬特性 (距離減衰) の把握および予測に活用した事例を紹介する。

### 2. トンネル発破音の時間-周波数分析

これまでにトンネル発破音解析に統計的エネルギー解析法 (SEA) を適用し、その実用性を確認してきた<sup>(6)</sup>。一方、SEA の入力データに発破音の周波数毎の音圧レベルの予測が必要となり、オーバーオール値を予測する船津らの式<sup>(7)</sup>は使用できない。そのため、発破空間内の測定音圧を FFT 処理したレベルを対象に、距離減衰の周波数特性を統計分析し、周波数バンド毎の発破音圧レベル予測式が提案されている<sup>(8)</sup>。しかし、FFT は過渡振動の解析には必ずしも適さず、各種の時間-周波数分析の使用が適している。そのため、発破音の時間-周波数分析を実施し、効率的かつ低騒音を実現する発破方式の開発

を最終目標に研究を行っている。ここでは、発破音の分析結果から距離減衰の周波数特性を評価し、発破音圧レベル式を導出し、文献(8)の統計分析に基づく式と比較考察したことを示す。

#### 2.1 発破音の時間-周波数分析

図1に、発破音 (15 段発, 0.25 秒間隔) の音圧データを時間-周波数分析 (以下、DF と称す) を行った結果例を示す。上図の時刻歴波形より発破は1秒で開始されている。下図の分析結果では、周波数成分が時々刻々と変化する状況を観察できる。なお、10Hz 以下に発破の1秒以前にフィルタ誤差の影響がみられる。また、10Hz 以下で音圧が大きく、発破間隔に起因する4Hz 成分が支配的であり、その周波数での時間による音圧の低減 (減衰) が小さいこと、50Hz 以上の成分がほとんどないことなど興味深い。

#### 2.2 FFT と時間-周波数分析の結果の比較

図2には、FFT と DF の比較の一例を示す。FFT はライン数に応じた時間平均結果と、オーバーラップやゼロ足しなどの処理によって得られる結果は異なってくる。一方、DF はフィルタ誤差があるものの一意の結果となる。

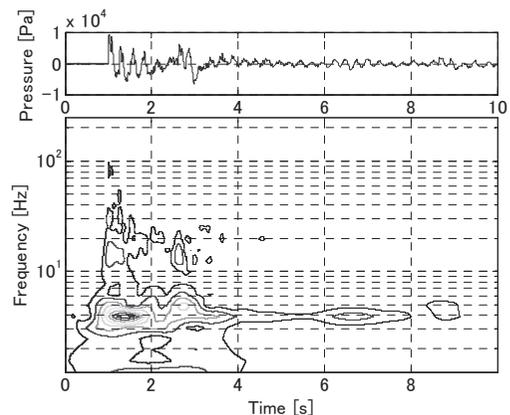


図1 測定音圧データと DF 結果例

\*教授 機械工学科

Professor, Dept. of Mechanical Engineering

\*\*助教 機械工学科

Assistant Professor, Dept. of Mechanical Engineering

\*\*\*客員教授 工学研究所

Guest Professor, Research Institute for Engineering

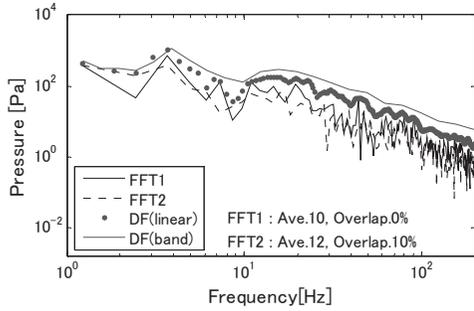


図2 FFT結果と時間-周波数分析結果の比較例

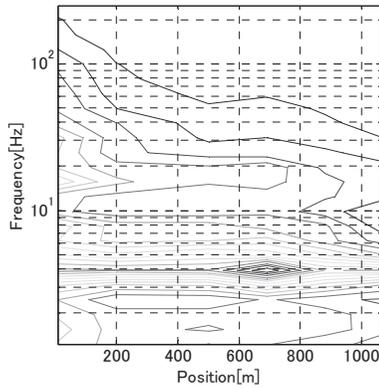


図3 トンネル内の位置による発破音周波数特性

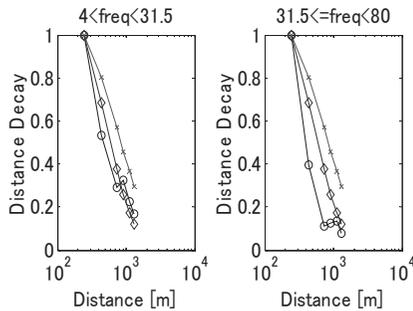


図4 距離減衰の実測値

黒線：実測結果，赤線：従来予測，青線：本報予測

またFFTは周波数の抽出精度はよいものの値は過小に評価される．一方，DFは値を正しく評価できるが，周波数に幅を有した結果となる．したがって，図2の通り，FFTは値を過小評価している．DFのバンド周波数処理結果はバンド内での和のため，リニア結果より大きな値となる．

### 2.3 発破音の距離減衰検討

次に，トンネル内（全長約1100m）の6点で測定した音圧データを図1のようにDF処理し，各周波数での平

均値（積分値と等価）を算出し，横軸を発破からの距離，縦軸を周波数とした結果を図3に示す．これより各周波数の音圧の距離減衰を把握することができる．4Hz成分が代表するように，概ね25Hz以下の音圧は距離減衰がないこと，25Hz以上では減衰が顕著であることが可視化され，把握できる．

### 3. 距離減衰の周波数特性の評価

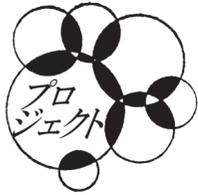
図3から周波数毎に，音圧を発破位置からの距離に関する指数関数で近似し，周波数毎の距離減衰式を導出した．文献(8)の統計分析に基づく式と比較した結果の一例を図4に示す．本研究で導出した結果（青線）は，統計分析に基づく結果（赤線）より実測結果（黒線）に近く，DFを用いた分析による有効性が確認できる．

### 4. おわりに

本報告では，時間-周波数分析技術を用いて，トンネル発破音の分析および距離減衰の評価について紹介した．更なる高精度化などと共に，本分析技術の活用範囲を拡大していく．

#### 参考文献

- (1) 伊東圭昌, 山口尚人, 山崎徹, “デジタルフィルタによる時間-周波数分析を用いた振動解析に関する基礎的検討”, 日本機械学会論文集C編, 79巻801号, pp.1633-1646, 2013-5
- (2) Y.Itoh, T.Imazu, H.Nakamura, T.Yamazaki, “TIME-FREQUENCY ANALYSIS WITH DIGITAL FILTER FOR NONLINEAR SYSTEM CHARACTERIZATION IN MECHANICAL VIBRATIONS”, Proc. of The 22th International Congress on Sound and Vibration, 1009, 2015-7
- (3) 伊東圭昌, 山崎徹, 永井基, 藤井智恵子, デジタルフィルタを用いた時間-周波数分析による心電波形の可視化, 可視化情報, Vol.35, No.2, 可視化情報全国講演会（京都2015）講演論文集, pp.223-224, 2015-10
- (4) 伊東圭昌, 今津卓, 中村弘毅, 山崎徹, “ヴァイオリンの駒構造から学ぶ機械の静穏化技術の開発”, 日本機械学会 [No.15-7] Dynamics and Design Conference 2015 USB 論文集, 529.pdf, 2015-8
- (5) 山崎徹, 日吉安和, 永井祐輝, 石田滋樹, デジタルフィルタ処理によるトンネル発破音の距離減衰の考察, 土木学会中国支部第67回研究発表概要集, I-4, 1004.pdf, pp.7-8, 2015-5
- (6) 石田滋樹, 山崎徹, 統計的エネルギー解析法によるトンネル防音扉の効果予測に関する考察, 土木学会第70回年次学術講演会講演概要集, 6-458.pdf, 2015-9
- (7) 船津弘一郎, 内山恒光: トンネル発破特性と予測, 日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集, 1-2-1, pp.57-60, 1987.
- (8) 石田滋樹, 柿木寛也, 進士正人: トンネル坑内における発破音の音圧スペクトルレベル予測式の提案, 土木学会論文集, F1, トンネル工学 Vol.67, No.3, pp.81-86, 2011



## 多分岐ポリマー系ナノハイブリッド材料の開発と応用

横澤 勉\* 池原 飛之\*  
山田 保治\*\* 花畑 誠\*\* 工藤 宏人\*\*\*

### Development and Application of Nano Hybrid Materials from Hyperbranched Polymers

Tsutomu YOKOZAWA\* Takayuki IKEHARA\*  
Yasuharu YAMADA\*\* Makoto HANABATA\*\* Hiroto KUDO\*\*\*

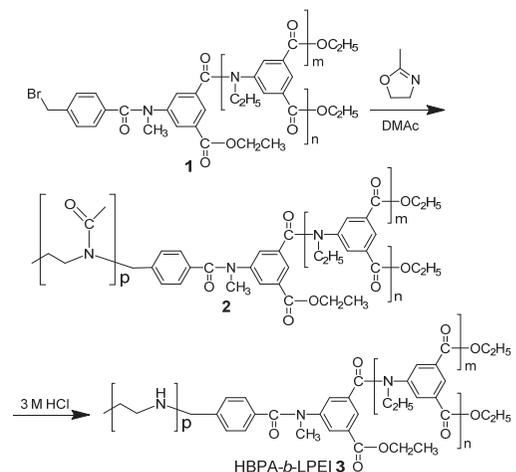
#### 1. プロジェクト研究の概要

有機成分と無機成分をナノレベルで複合化した有機-無機ナノハイブリッド材料の研究は様々な分野で注目されている。これまでにポリ(3-(トリエトキシシリル)プロピルメタクリレート)とポリ(2-ビニルピリジン) (P2VP) とのブロック共重合体のゾル-ゲル反応を塩酸存在下で行うと、ブロック共重合体の組成比によって形状の異なるシリカが得られている<sup>1)</sup>。一方、金らは直鎖状ポリエチレンイミン (LPEI) の結晶表面がテトラアルコキシシランからのシリカ化の触媒となることに注目し、同一分子量の LPEI から結晶条件を変えることによって得られる様々な構造の LPEI 結晶を転写して形状の異なるシリカを得ている<sup>2,3)</sup>。また、開始剤存在下で 5-(*N*-アルキルアミノ)イソフタル酸ジエステル AB<sub>2</sub> モノマーの連鎖縮重合を行うと、分子量と分子量分布および末端構造の制御されたハイパーブランチポリアミド (HBPA) が得られることも報告している<sup>4)</sup>。そのため、HBPA と LPEI とのブロック共重合体 (HBPA-*b*-LPEI) が合成できれば、疎水性の高い HBPA 部分が存在するため、水中と有機溶媒中でそれぞれ親水性の LPEI のホモポリマーの場合とは異なる自己組織体が形成され、形状の異なるシリカが得られると考えた。この複合シリカは

HBPA が多数の空孔を持つことから分子の吸着や透過の制御が可能で高性能分離材料として応用が期待される。今回、HBPA-*b*-LPEI の合成と自己組織化体のシリカへの形状転写を検討したので報告する。

#### 2. 結果と考察

まず臭化ベンジル部位を有する HBPA **1** (15 量体) を開始剤として用いた 2-メチル-2-オキサゾリンの開環重合を仕込み比 ([2-メチル-2-オキサゾリン]<sub>0</sub>/[**1**]<sub>0</sub>) 200 で行い、ブロック共重合体 **2** を得た (Scheme 1)。続いて、**2** に 3 M 塩酸を作用させて、HBPA-*b*-LPEI **3** を得た。



Scheme 1

\*教授 物質生命化学科

Professor, Dept. of Material and Life Chemistry

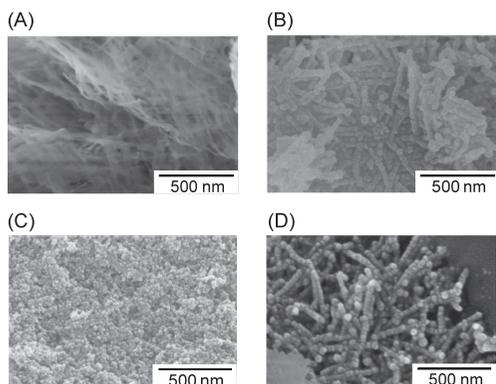
\*\*客員教授 工学研究所

Guest Professor, Research Institute for Engineering

\*\*\*准教授 関西大学工学部

Assistant Professor, Faculty of Engineering, Kansai University

次に、**3** または LPEI をそれぞれ水中で自己組織化した後にテトラメトキシシランを作用させてシリカ化した (Figure 1)。その結果、**3** と LPEI いずれもファイバー状の自己組織体が見られ (Figure 1A, B)、それらをシリカ化すると、**3** の場合は球状が転写されずに小さな球が多数集まったシリカが観察されたのに対し (Figure 1C)、LPEI の場合は球状が転写されて真っ直ぐなファイバー状のシリカが多く観測された (Figure 1D)。

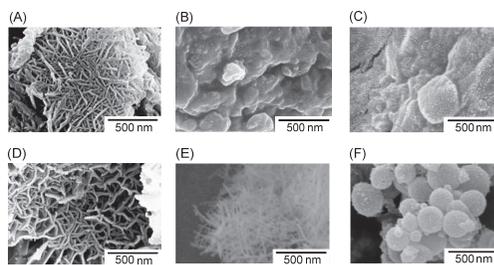


**Figure 1.** SEM images of (A) **3**, (B) LPEI<sub>200</sub>, (C) **3**@silica, and (D) LPEI<sub>200</sub>@silica in H<sub>2</sub>O.

次に、**3** または LPEI をそれぞれ DMF 中で自己組織化した後にテトラメトキシシランを作用させてシリカ化した (Figure 2)。その結果、**3** の場合はファイバー状の自己組織体が見られ (Figure 2A)、シリカ化すると形状が転写されて曲がったファイバー状のシリカが多く観測された (Figure 2D)。一方、LPEI の場合はシート状の自己組織体が見られ (Figure 2B)、シリカ化すると形状が転写されずにまっすぐなファイバー状のシリカが多く観測された (Figure 2E)。また、ホモポリマー同士 (LPEI とフォーカルポイントにヒドロキシル基を有する HBPA) を DMF 中で混ぜて自己組織化すると、シート状の自己組織体が見られ (Figure 2C)、シリカ化すると形状が転写されずに大きな球状のシリカが多く観測された (Figure 2F)。以上、**3** の自己組織体をシリカ化すると LPEI や、LPEI と HBPA の混合物の場合とはシリカの形状が異なること、および溶媒を変えることによってシリカの形状を変えられることを明らかにした。

### 3. 結論

LPEI と HBPA のブロック共重合体の自己組織体の構造を転写したシリカを合成することに成功した。今後は、ブロック共重合体の2つのセグメントの分子量を変えた場合の自己組織体、およびシリカの構造について検討するとともに、高性能分離材料としての応用をめざす。



**Figure 2.** SEM images of (A) **3**, (B) LPEI<sub>200</sub>, (C) mixture of LPEI<sub>200</sub> and HO-HBPA, (D) **3**@silica, (E) LPEI<sub>200</sub>@silica, and (F) mixture of LPEI<sub>200</sub> and HO-HBPA@silica in DMF.

### 参考文献

- 1) K. Zhang, L. Gao, Y. Chen, *Macromolecules* **2008**, *41*, 1800-1807.
- 2) R.-H. Jin, J.-J. Yuan, *Chem. Commun.* **2005**, 1399-1401.
- 3) R.-H. Jin, J.-J. Yuan, *Macromol. Chem. Phys.* **2005**, 2160-2170.
- 4) Y. Ohta, S. Fujii, A. Yokoyama, T. Furuyama, M. Uchiyama, T. Yokozawa, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2009**, *48*, 5942-5945.



## 高速高精度 DNA 増幅装置の開発

山口 栄雄\* 鈴木 温\*\* 井上 和仁\*\*\* 安積 良隆\*\*\*\*

### Development of rapid and high precision DNA amplification system

Shigeo Yamaguchi\*, Tadzunu Suzuki\*\*, Kazuhito Inoue\*\*\*,  
and Yoshitaka Azumi\*\*\*\*

#### 1. プロジェクト研究の概要

一般的な、ポリマーゼ連鎖反応 (PCR) 法では、複数の温度間で熱サイクルを実施する。しかしながら、現実の熱サイクルは、形状が崩れており、1) 温度上昇下降速度が小さく、2) 温度変化部分で丸みを帯び、3) オーバー・アンダーシュート、及び4) 保持温度精度が低いという問題を含んでいる。この根本原因は、PCR 装置に内蔵されているペルチェ素子が、セラミックス製絶縁板を挟んで間接的に DNA 試薬を導入したウェルブロックを冷却加熱していることにあることを我々は見出し、ウェルブロックを直接電流駆動させる技術を開発した。具体的には、熱サイクルを正確かつ高速を実現できる、i) 熱応答性の極めて高いペルチェ素子の開発、ii) 高速高精度動作に対応した駆動電源の開発、及び iii) ウェルブロックを直接熱駆動できる新構造を提案し、研究を行ってきた。金属との界面で直接ペルチェ効果による冷却加熱を行う構造を採用するため、ウェルブロック部で電流が直接熱に変換され高速の熱応答を得ることができる。

#### 2. 実験結果

図 1 に電気泳動の結果を示す。シロイヌナズナのゲノム DNA を用いた PCR で、市販装置 (図 1 下) と我々が開発したシステム (図 1 上) との比較である。アニーリング温度を 48°C から 62°C まで振った。明らかに、我々が開発した装置の方が、特異的増幅に優れていることがわかる。図 2 に、両者装置の光度の強さを比較した。これにより、高速高精度な DNA 増幅の実現に成功した。

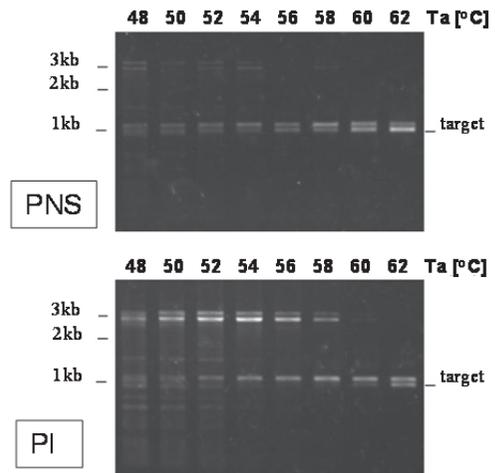


図 1 電気泳動写真 (上: 新型、下: 市販品)

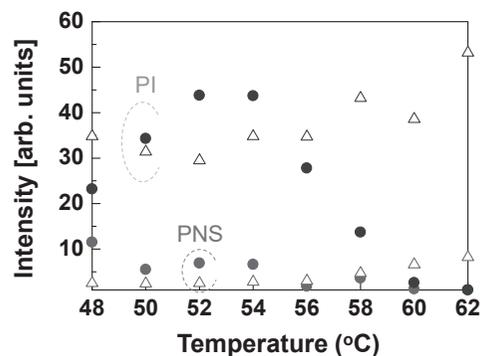


図 2 光強度のアニーリング温度依存性

\*教授 電気電子情報工学科

Professor, Dept. of Electrical and Electronic Information Engineering

\*\*客員研究員 工学研究所

Guest Researcher, Research Institute for Engineering

\*\*\*教授 理学部生物科学科

Professor, Dept. of Biological Sciences

\*\*\*\*准教授 理学部生物科学科

Associate Professor, Dept. of Biological Sciences



## 刺激応答性材料の開発

亀山 敦\* 石田 良仁\*\* 川口 春馬\*\*\* 上田 充\*\*\*

### Development of Stimuli-responsive Materials

Atsushi KAMEYAMA\* Yoshihito ISHIDA\*\* Haruma KAWAGUCHI\*\*\* Mitsuru UEDA\*\*\*

#### 1. プロジェクト研究の概要

熱、電場、光などの外部刺激に応答する刺激応答性材料は、複雑なマイクロ構造で形成されるデバイスの素材として、また動的な材料(ケモメカニカル材料)として注目されている。本プロジェクト研究では、分子の熱および光転位反応を基盤とする屈折率増加材料、および光で体積が変化するハイドロゲル微粒子の基礎研究を行った。

#### 2. 熱および光応答性屈折率変化材料の開発

熱や光刺激によって屈折率が変化する透明ポリマー材料は光回路への応用が検討されている。我々は、側鎖に芳香族複素環を有するポリマーフィルム中の熱転位反応により、フィルムの屈折率が0.01程度大きくなることを報告した<sup>(1)</sup>。しかし、芳香族複素環の構造と反応性、および屈折率変化の相関関係は明らかになっていない。そこで本研究では、上記ポリマーの参照化合物として、安息香酸誘導体を合成し、前述の課題について詳細に検討した。

安息香酸エステル誘導体 **1-6a** 結晶の熱転位反応の進行はFT-IR スペクトルより確認された。ポリメチルメタクリレート(PMMA)に **1-3a** を 30 wt%分散したフィルムを 80 °Cで加熱したところ、フィルム中の **1-3a** の転化率は加熱時間に対して直線的に増加した。また、熱転位反応の速度は安息香酸エステルの *p*-位の置換基の電子吸引性の序列(CN>H>OCH<sub>3</sub>)と一致した。これは *p*-位の電子吸引性置換基がカルボニル炭素(C=O)の  $\delta^-$ 性を高め、熱転位の反応性が向上したためだと考えられる<sup>(2)</sup>。

次に、**1-3a** を 50 wt% (**1-2a**)、または 30 wt% (**3a**)含む

表 1. 安息香酸エステル誘導体の構造と熱転位反応

Ester	X	Y	Z	$T_m^{(a)}$ (°C)
1a	H	S	O	115
2a	OCH <sub>3</sub>	S	O	- <sup>b)</sup>
3a	CN	S	O	136
4a	H	O	S	123
5a	OCH <sub>3</sub>	O	S	161
6a	CN	O	S	- <sup>b)</sup>

a) Measured by DSC under N<sub>2</sub> flow with heating rate of 10 °C.

b) Clear exothermic peak was not observed.

PMMA フィルムを 80 °Cで 1 h 加熱した。 **1-2a** フィルム (50 wt%)では加熱後に屈折率が 0.011~0.012 増加した。

次に、光転位反応を利用した屈折率変化材料を指向し、芳香族複素環を有するベンジル誘導体の光化学反応および屈折率変化について検討を行った。

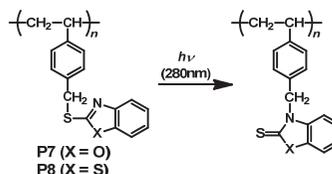


図 1. **P7** および **P8** の光化学反応。

側鎖に芳香族複素環を有する側鎖ベンジルポリマー **P7** および **P8** フィルムへの 280 nm 光の照射に伴う光化学反応を UV-vis スペクトル変化により調べたところ、単一の光化学反応が進行していることが確認された。また、FT-IR スペクトルにおいて、照射後に 1390 cm<sup>-1</sup>付近に C=S 伸縮結合に基づくピークが生成したことから、照射によりポリマー側鎖の芳香族複素環が *S*-ベンジル体から *N*-ベンジル体へと転位したことが分かった。この光化学反応は、光により PhCH<sub>2</sub>-S 結合が均一開裂してラジカル種が生成し、PhCH<sub>2</sub>-N 結合に転位すると考えられる。ポリマー **P7** と **P8** フィルムに 30 分間照射したところ、フィルムの屈折率がそれぞれ 0.0073, 0.0071 増加した。

\*教授 化学教室

Professor, Dept. of Chemistry

\*\*特別助教 化学教室

Assistant Professor, Dept. of Chemistry

\*\*\*客員教授 工学研究所

Guest Professor, Research Institute for Engineering

### 3. 光応答性ハイドロゲル微粒子の開発

スピロピランは水中において UV 照射により親水性の開環体、可視光照射により疎水性の開環体となる光応答性分子である。本研究ではこの光応答性を組込んだ新規光ケモメカニカル材料の開発を目的とし、スピロピランアクリレートモノマー(SPA)と親水性のポリ(*N*-イソプロピルアクリルアミド) (PNIPAM)からなるハイドロゲル微粒子を合成し、照射に伴う膨潤・収縮挙動を検討した。

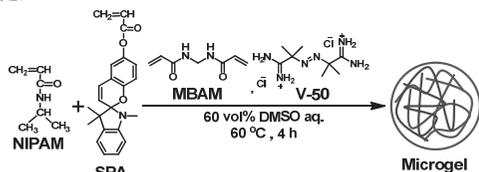


図3. 光応答性ハイドロゲル微粒子の合成.

ハイドロゲル微粒子は H<sub>2</sub>O/DMSO 溶媒中で所定量の SPA と NIPAM、架橋剤である *N,N'*-メチレンビスアクリルアミド(MBAM)、重合開始剤(V-50)を用いた沈殿重合により合成した(図3)。

SPA 導入量 0~10 mol%のゲル微粒子を水中で可視光(>400 nm)照射したところ、疎水性の開環体の生成によりゲル微粒子の体積は最大 16%収縮した(SPA: 1 mol%)。一方、UV 光 (254 nm)を照射したところ、予想に反してゲル微粒子は膨潤せずに収縮した。これは UV 照射により生成した開環体同士の分子間  $\pi$ - $\pi$  相互作用により物理架橋点が形成されたためであると考えられる。

### 4. 光フリース転位を用いた連鎖的な高分子分解反応

光誘起連鎖分解反応は照射による複雑なマイクロ構造形成に用いられる。この反応は感光性分子の光分解による活性種(H<sup>+</sup>, OH<sup>-</sup>, ラジカル種など)生成と、生成した活性種が触媒的に多数の分解反応を起こす化学増幅機構から構成される。しかしながら、一般的には材料に開始

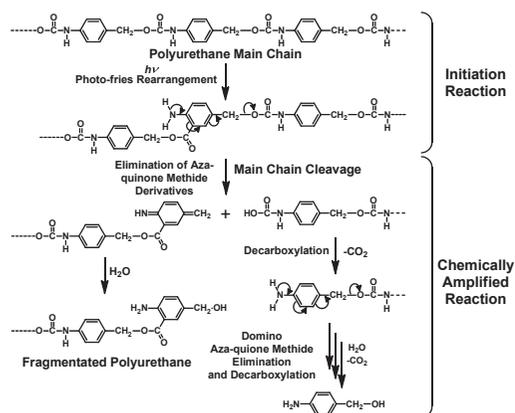


図4. 光分解性ポリウレタンの連鎖的な分解機構.

反応を起こす感光性分子を添加する必要があり、ポリマー材料自身が連鎖的な分解機構を有する高分子は殆ど報告されていない。そこで、本研究では、光誘起連鎖分解が可能な新規ポリウレタンを設計し、照射により高分子がモノマー単位まで分解する化学増幅型光分解について検討を行った。このポリウレタンの分解は、光フリース転位により主鎖中で芳香族アミンを生じる開始反応と、アザキノンメチドと CO<sub>2</sub> の連鎖的な脱離により構成される(図4)。

末端に光反応性の無い4-フェニルブチル基を有するポリウレタン **P9** ( $M_n = 4480$ ,  $M_w/M_n = 1.80$ )の THF 溶液に対して、250-380 nm 光を照射したところ、UV-vis スペクトルからウレタン結合の光フリース転位の進行が確認された。また、10 秒間の照射後に暗所下にて静置した場合においても、285-420 nm の吸光度の増加が見られ、照射後における連鎖的なポリウレタンの分解反応の進行が示唆された。

光分解性ポリウレタンを含むブロック共重合体 **P10-b-PMMA** ( $M_n = 12300$ ,  $M_w/M_n = 1.82$ )の THF 溶液について380 nm 光を24 照射したところ、 $M_n = 7300$  まで分子量が減少した。これはブロック共重合体中の PMMA の分子量( $M_n = 8210$ )と良い一致を示した。また **P10-b-PMMA** フィルムに対して同条件で照射を行ったところ、ポリウレタンのみの分解が確認された。以上、本研究では新規なポリウレタンの化学増幅型光分解反応を開発した。今後このブロック共重合体はマイクロ構造パターン形成への応用が期待される。

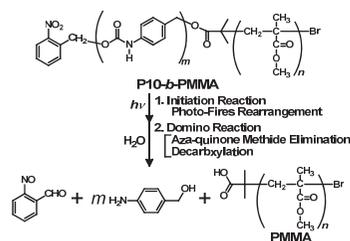


図5. P9-b-PMMA の連鎖的な光分解反応.

### 参考文献

- (1) M. Miyasaka, A. Higurashi, A. Kameyama, *Chem. Lett.* **2011**, 40, 1363-1365.
- (2) J. H. Lee, S. H. Park and H. Lee, *Bull. Korean Chem. Soc.* **2007**, 28, 1211-1214.
- (3) R. Klajn, *Chem. Soc. Rev.* **2014**, 43, 148-184.

### 発表論文

- (1) Y. Ishida, Y. Takeda, A. Kameyama, *React. Funct. Polymer* **2016**, 107, 20-27.
- (2) Y. Ishida, Y. Kawabe, A. Kameyama, *J. Photopolym. Sci. Technol.* **2015**, 28, 201-205.

### 受賞

- (1) 安田明日美, 第22回ポリマー材料フォーラム(2013年11月, 東京), 優秀ポスター賞.



## グリーンイノベーションの基盤となる

### ナノ構造制御触媒の開発研究

引地 史郎\* 内藤 周弼\*\* 上田 渉\* 吉田 暁弘\*\*\* 中澤 順\*\*\*\*  
 Shigeo T. Oyama\*\*\*\* 宮尾 敏広\*\*\*\*\* 赤間 弘\*\*\*\*\* 星野 真樹\*\*\*\*\*

## Development of Nano-structure Controlled Catalysts for Green Innovation

Shiro HIKICHI\* Shuichi NAITO\*\* Wataru UEDA\* Akihiro YOSHIDA\*\*\* Jun NAKAZAWA\*\*\*  
 Shigeo T. Oyama\*\*\*\* Toshihiro MIYAO\*\*\*\*\* Hiroshi AKAMA\*\*\*\*\* Masaki HOSHINO\*\*\*\*\*

### 1. プロジェクト研究の概要

2014年4月より三か年の計画で開始した本プロジェクト研究<sup>(1)</sup>では、バイオマス資源の有用化学物質への変換に有効な触媒<sup>(2,6)</sup>や、酵素の活性点構造に想を得た環境調和型酸化プロセスに適用するための触媒<sup>(7,10)</sup>の開発を進めている。具体的には、触媒活性点およびその周辺の構造をサブナノ～ナノスケールで精緻に設計・制御することで、金属元素が持つ触媒性能を極限まで引き出すことや、天然の高性能触媒である酵素と同様に、様々な機能を併せ持つ触媒デバイスの構築を可能とし、これによりエネルギー変換・再生可能エネルギー創出効率の向上やグリーン化学合成の達成に資する“革新的触媒技術”の確立を目指している。

“革新的触媒技術”に関する研究開発の推進が科学技術基本計画の中でも謳われていることから伺えるように、化学反応による物質変換(物質生産や環境汚染物質の無害化等)やエネルギー変換の効率向上に資する触媒の

高性能化は、将来にわたる持続的成長社会の発展を図る上で必須な、安定的なエネルギー供給体制の構築と低炭素社会の実現を目指したグリーンイノベーションを押し進める上で重要な研究課題である。エネルギー問題の解決には太陽光に代表される再生可能エネルギーや水素・バイオマス等の代替エネルギーを軸とする新たなエネルギー変換システムの開発が急務である。一方で既存のシステムにおける主要なエネルギー源である化石燃料資源のより一層の効率的活用を図る必要があるが、化石燃料資源は我々の生活を支える様々な有用化学物質の原材料でもある。従って化石燃料資源を有効活用する上で、炭化水素類の化学変換効率の向上を図りつつ、エネルギーの過剰消費や環境負荷物質排出を抑制した環境調和型物質変換プロセスを構築することは喫緊の課題である。

以下本稿では 2015 年度のものを中心にしてこれまでの研究成果の概要を紹介する。

### 2. バイオマス資源の有効活用のための新規触媒の開発

クリーンエネルギーソースである水素を、化石燃料資源ではなくバイオマスから製造することを目的とした触媒研究が近年活発に展開されている<sup>(2)</sup>。本研究では、TiO<sub>2</sub>(=チタニア)を担体とする担持 Ru 触媒により、バイオオイルの主成分である酢酸と水の反応による水素と二酸化炭素への変換、すなわち酢酸の液相完全改質反応が進行することを発見している<sup>(3)</sup>。このチタニア担持触媒では、粒子径がごく微小で、正電荷を帯びた Ru<sup>δ+</sup>種が活性点となっていることが明らかになった、そこで改質反応に有効な Ru 活性点の効率的な創出を目的として、

\*教授 物質生命化学科

Professor, Dept. of Material and Life Chemistry

\*\*客員教授 工学研究所

Guest Professor, Research Institute for Engineering

\*\*\*\*特別助教 物質生命化学科

Assistant Professor, Dept. of Material and Life Chemistry

\*\*\*\*\*教授 東京大学大学院工学系研究科化学システム工学専攻

Professor, Dept. of Chemical System Engineering, School of

Engineering, The University of Tokyo

\*\*\*\*\*教授 山梨大学燃料電池研究センター

Professor, Fuel Cell Nanomaterials Center, University of

Yamanashi

\*\*\*\*\*主任研究員 日産自動車総合研究所

Senior Researcher, Nissan Research Center, Nissan Motor

Corporation

規定された3次元構造からなるイオン性担体であるY型ゼオライトを担体とするRu触媒を調製し、触媒活性点構造と反応特性の相関について検証した。Ru(III)錯体 $[\text{Ru}(\text{NH}_3)_6]\text{Cl}_3$ より生じる陽イオン種と $\text{Na}^+$ とのイオン交換反応によりゼオライトにRu種を担持した。こうして調製した触媒のうち、Ru担持量が多いものでは、反応前に触媒を水素還元処理することで、基質である酢酸の転化率は上昇する一方でメタンの副生量も多かった。これに対し、還元処理を施すことなく反応に供した場合には、基質添加率は低下するもののメタンの副生量も低下し、水素生成反応に対する選択性が改善された。またRu担持量が少ない触媒は、反応前の水素還元処理の有無によらず水素生成反応に対し高い選択性を示した。これらの触媒についてX線光電子分光法によるRu種の電子状態を解析した結果、水素生成反応に活性な種は、正電荷を帯びたRu種であることが裏付けられ、ゼオライト担体とその $\text{SiO}_2$ 骨格にアルミニウムが導入されたことで、電荷補償のために $\text{Ru}^{\delta+}$ 種を安定に保持していることが明らかとなった<sup>(4,6)</sup>。

### 3. 環境調和型酸化反応触媒の開発

本研究では、化石燃料資源中の炭化水素類を高効率で含酸素化学物質に変換することを目指している。そのため、最も安定な飽和炭化水素であるメタンを空気中の酸素により酸化してメタノールへと変換するメタン水酸化酵素に代表される、金属含有酸化酵素の触媒活性点とそれを取り巻く環境から、活性発現に必要なエッセンスを抽出し、それらを触媒設計に反映させていくことで、酵素と同様な活性を有しながらそれよりも安定性に勝る人工的な触媒素子、すなわち“人工酵素”の構築を検討している。

2014年度の研究で、Fe錯体種の配位環境を整備することで、酸素分子活性化能が発現することを明らかにした<sup>(7)</sup>。そこで2015年度は、中心金属を取り巻く配位子場が金属の酸素分子活性化能に及ぼす影響を明確にするべく、Feと同様に酸素分子付加体形成能を持ちながら、その安定性がFe錯体種よりも優れているCoを中心金属に用いて、支持配位子上に立体構造や電子的特性が異なる置換基を導入した錯体を合成し、酸素付加体の生成速度および安定性を比較した。酸素結合部位近傍の空間を確保し、かつ中心金属上の電子密度を増加させることで、生成速度、安定性ともに増大することが明らかになった<sup>(8)</sup>。

またこれまでの固定化錯体触媒の研究で確立してきた無機酸化物担体の化学修飾法<sup>(9)</sup>を活用して、複数の触媒活性点を同一担体上に構築した触媒デバイスの構築を開

始した。具体的には、酸素分子の還元的活性化を担うAu原子からなる微粒子(=Auナノ粒子)と、そこで発生した過酸化物を活性化して炭化水素への酸素添加を触媒するTi(IV)種を複合化した触媒を設計した。この触媒の担体であるメソ多孔性シリカゲルは、そのSi原子の一部がTi(IV)に置換され、さらにその細孔内壁が有機チオール(=SH)基で修飾されている。有機チオール基は、Auナノ粒子の前駆体であるAuイオン種を保持するだけでなく、かつその固定密度に応じて化学還元処理により生じるAuナノ粒子のサイズや電子状態を制御するという機能を担っている。開発した触媒のうち、チオール修飾量が0.5 mmol/g程度と少ないものは、Auナノ粒子の直径が2~5 nmであり、アルコールの酸素酸化に活性を示したが、これよりもチオール修飾量を増加させるとAuナノ粒子のサイズは減少するものの、触媒活性も低下してしまうことが判明した。またアルコールの酸化に伴って過酸化水素が生成していることが確認され、この過酸化水素がTi(IV)サイトで活性化されることで期待通りアルケンへの酸素添加反応が進行することが確認された<sup>(10)</sup>。

### 4. 結言

以上の通り、サブナノ~ナノスケールでの構造制御に基づく触媒開発が進行中である。今後も活性点の構造と触媒特性の相関解明と、触媒活性の向上を目指した研究を推進していく。

### 参考文献

- (1) 引地 史郎, 内藤 周次, 上田 渉, 吉田 暁弘, 中澤 順, S. T. Oyama, 宮尾 敏弘, 赤間 弘, 星野 真樹, 神奈川大学工学研究所報 **38** (2015) 76.
- (2) T. Nozawa, A. Yoshida, S. Hikichi, S. Naito, *Int. J. Hyd. Energy*, **40** (2015) 4129.
- (3) T. Nozawa, Y. Mizukoshi, A. Yoshida, S. Naito, *Appl. Catal. B: Environ.*, **146** (2014) 221.
- (4) 野澤 寿章, 吉田 暁弘, 中澤 順, 引地 史郎, 内藤 周次, 第116回触媒討論会, 3H16 (2015年9月).
- (5) S. Naito, T. Nozawa, S. Hikichi, アメリカ電気化学会第229回年会, Z03-2135 (招待講演) (2016年5月).
- (6) T. Nozawa, Y. Mizukoshi, A. Yoshida, S. Hikichi, S. Naito, *Int. J. Hyd. Energy*, (2016) doi:10.1016/j.ijhydene.2016.10.028.
- (7) F. Oddon, Y. Chiba, J. Nakazawa, T. Ohta, T. Ogura, S. Hikichi, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **54** (2015) 7336.
- (8) 西浦 利紀, 千葉 洋輔, 中澤 順, 引地 史郎, 日本化学会第96年春季年会, 1E2-01 (2016年3月).
- (9) T. Tsuruta, T. Yamazaki, K. Watanabe, Y. Chiba, A. Yoshida, S. Naito, J. Nakazawa, S. Hikichi, *Chem. Lett.*, **44** (2015) 144.
- (10) 野澤 寿章, 羽毛田 知輝, 中澤 順, 引地 史郎, 第118回触媒討論会, 3D22 (2016年9月).



## 車両等に装備するためのポリカーボネート窓の 表面改質に関する研究

新中 新二\* 井上 成美\*\* 大越 昌幸\*\* 野尻 秀智\*\*  
植田 博臣\*\*\* 岩井 和史\*\*\* 中村 先男\*\*\*

### Study on Surface Reforming of Polycarbonate Windows for Vehicles

Shinji SHINNAKA\* Narumi INOUE\*\* Masayuki OKOSHI\*\* Hidetoshi NOJIRI\*\*  
Hiroomi UEDA\*\*\* Kazufumi IWAI\*\*\* Sakio NAKAMURA\*\*\*

#### 1. プロジェクト研究の概要

本プロジェクトでは、車両のガラス窓を軽量化すると同時に耐衝撃性を上げることが可能なポリカーボネートへの置き換えを可能とする技術を構築するため、その表面をガラス化することにより、ガラス並みの表面硬度を有する車両用軽量窓を開発する事を目的としている。

前回、ポリカーボネート表面に、プライマーを介し液体シリコンを塗布して Xe エキシマランプを照射することにより得られた試料は、テーパー摩耗試験においてガラスに匹敵する耐摩耗性を示すことを明らかにし報告した<sup>1)</sup>。今回は、改質表面の XPS (X線電子分光法) を用いた組成分析とナノインデンテーション法を用いた表面硬度の計測結果をもとにデータ解析を行って、耐摩耗性が向上した要因について検討した結果を報告する。

#### 2. 実験方法

図 1 に示す様に、ポリカーボネート基板の上に、厚さ 1~2 $\mu\text{m}$  のアクリルプライマーをコーティングした後、シリコンハードコートの膜厚を 5~8  $\mu\text{m}$  の範囲にコーティングした。その後、窒素雰囲気中で波長 172 nm の

Xe エキシマランプを 1425mJ/cm<sup>2</sup> 照射し、シリコンハードコート層の表面改質を行った。

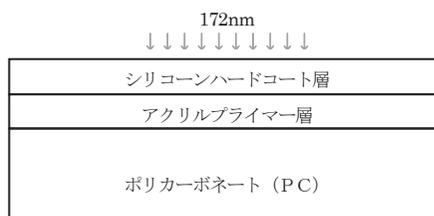


図 1 層構造

表面改質層の Si 結合状態について、XPS (X線電子分光法) を用いて約 1 $\mu\text{m}$  の深さまで計測し、化学組成の変化状態を確認した。XPS 分析装置は、図 2 に示す本校工学研究所の日本電子株式会社製 JPS-9010MC を用いた。計測方法は、Ar<sup>+</sup>ガン (1.0 kV, 23-24 mA) を用いて 10 秒間エッチングした後、X線源 (Mg, 10 kV, 10 mA) を用いて計測することを 20 回繰り返した。

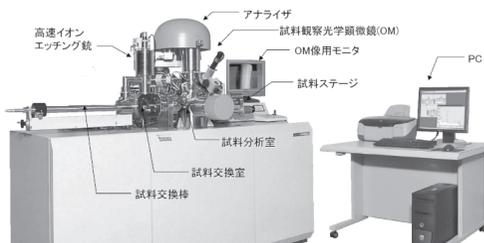


図 2 XPS 分析装置<sup>4)</sup>

\*教授 電気電子情報工学科  
Professor, Dept. of Electrical and Electronic Information Engineering

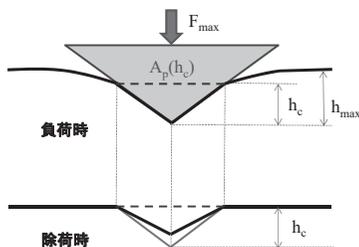
\*\*客員教授 工学研究所

Guest Professor, Research Institute for Engineering

\*\*\*客員研究員 工学研究所

Guest Researcher, Research Institute for Engineering

次に、株式会社エリオニクス社製 ENT-1100a のナノインデンター（超微小押し込み硬さ試験機）を用いたナノインデンテーション法により、表面改質層から深さ方向への硬度変化を計測した。ナノインデンターは、試料への負荷荷重を徐々に増加させ、最大負荷荷重  $F_{max}$  に到達後、徐々に減少させていったときの荷重と押し込み深さを測定し、最大押し込み深さ  $h_{max}$  に対する押し込み硬さ  $H_{IT}$  を求めた。ここで、 $H_{IT} = F_{max} / A_p(h_c)$  であり、 $A_p(h_c)$  は投影接触面積（図3参照）を表す<sup>3)</sup>。



### 3. 表面改質層の化学組成と硬さ

図4は、改質前の試料と172nmの光を照射した試料に対し、XPSを用いてアルゴンイオン ( $Ar^+$ ) エッチングし、表面から深さ方向に  $Si2p$  の結合エネルギー波形を計測した。このデータを元に、 $Si^{4+}(SiO_2)$ 、 $Si^{3+}(Si_2O_3)$ 、 $Si-C(Si-R)$  の3つの成分を仮定して波形分離処理し、光改質していない試料を基準として各成分組成比の変化を求めた。最表面から300nm付近までは、改質前の試料よりも  $Si^{4+}$  が多く、 $Si^{3+}$  が少ない。よってこの領域の組成は  $SiO_2$  が支配的であるとえられる<sup>2)</sup>。

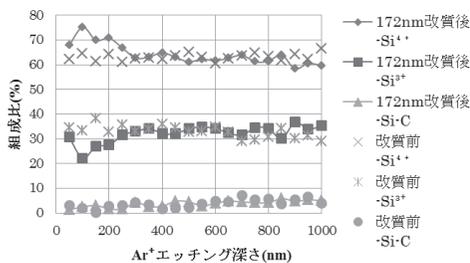


図4 Si2p 成分組成比

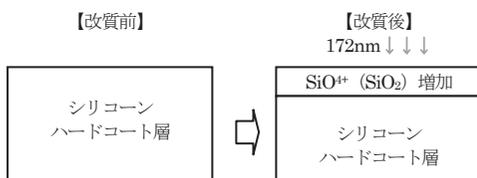


図5 シリコンハードコートと改質層の構造

つまり、図5に示す様なシリコンハードコート層の最表面に  $SiO_2(SiO_2)$  の割合が増加した光改質層が形成されたことを示している。

図6にナノインデンターで計測した結果を示す。最表面近辺の最大押し込み深さ100nm付近では、改質後の試料は、改質前の試料より約1.5倍の押し込み硬さ  $H_{IT}$  になっていることがわかる。これは、XPSの計測結果が示す様に、 $SiO_2$  の割合が増加して表面が硬化したことが原因と考えられ、前回テーパー摩耗試験に於いて高い耐摩耗性が発現できたことを支持している。

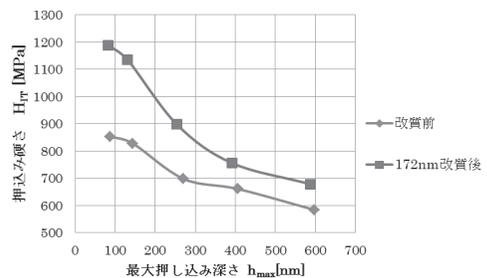


図6 ナノインデンター計測結果

### 4. まとめ

XPS測定により、Xeエキシマランプを照射した試料表面には  $SiO_2$  層が形成されていることを見出した。また、ナノインデンター測定により、改質前の試料に比べて  $H_{IT}$  (押し込み硬さ) の値は約1.5倍になっていることが判明し、前報のテーパー摩耗性の向上の要因を明らかにすることができた。今後、照射波長依存性等について更なる検討を行う。今年度の成果として、成形加工学会で発表（参考文献(2)、(3)）することができた。

### 謝辞

XPS測定データ取得および解析において、工学研究所の萩原健司博士のご指導とご協力を頂きました。ここに深く感謝いたします。また、本研究はJSPS科研費16K06754の助成を受けたものです。

### 参考文献

- (1) 新中新二 他, 神奈川大学工学研究所所報, No.38 (2015), P.79
- (2) 中村先男 他, 成形加工シンポジウム'15, (2015), P.49.
- (3) 中村先男 他, 成形加工'16, (2016), P.241.
- (4) JEOL, New Technical Information for JEOL



## 超精密加工による高品位表面の創成に関する研究

中尾 陽一\* 林 晃生\*\* Sangkee Min\*\*\*

### Study on Generation of Advanced Surfaces by means of Ultra-Precision Machining Processes

Yohichi NAKAO\* Akio HAYASHI\*\* Sangkee MIN\*\*\*

#### 1. 研究背景

本プロジェクト研究は、様々な先端工学及び科学分野における需要が増している、精密マイクロ部品等の超精密切削ならびに研削加工に関するものである。各種光学部品の加工には、単結晶ダイヤモンドを用いた切削あるいは研削工具に加え、超精密工作機械とその性能が発揮できる利用技術が必須となっている。最近では、特に微細かつ精密な三次元形状の創成が期待されつつあり、例えば、医療分野、さらには航空宇宙等への応用が期待されている。

現在、微細かつ精密な三次元形状のさらなる加工技術の向上には、以下に示す研究が必要不可欠になっている。

- (1) 超精密工作機械の高精度化のための高度機械要素技術の研究開発
- (2) 超精密加工技術の開発

本プロジェクト研究では、これらの研究を推進し、高品位な微細かつ精密な三次元形状創成を目的とするものである。現在、本プロジェクトを中心に開発された超精密工作機械用の主要構成要素である、直動ステージとスピンドルの高性能化に関する研究、金属ガラスに代表される、在来機械材料からの代替が期待されている新材料に対する超精密切削加工に関する研究を進めている。

#### 2. プロジェクト研究の実施状況

##### 2.1 超精密工作機械の高精度化のための高度機械要素技術の研究開発

超精密工作機械に対する要求加工精度は、サブミクロンからナノオーダーレベルに達している。工作機械による加工精度は、母性原理に支配されるため、超精密加工に使用する工作機械に対しては、要求加工精度に相当する高精度な運動創成が必要になる。

本プロジェクトにおいては、上記高度要求を満たす高度機械要素として、以下に示す直動ステージとスピンドルの開発を進めている。

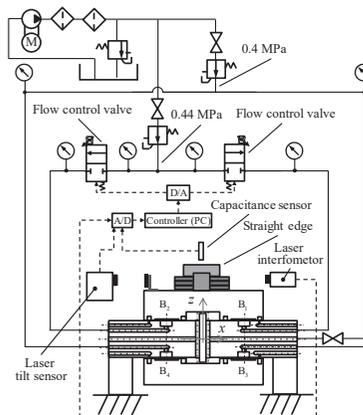


図1 ウォータドライブステージの姿勢制御システム

これまでの研究で開発してきた図1に示すウォータドライブステージに対して、ピッチング等の姿勢並びに送り方向に垂直方向の変位（以下、垂直変位と略記）の同

\*教授 機械工学科

Professor, Dept. of Mechanical Engineering

\*\*特別助教 機械工学科

Assistant Professor, Dept. of Mechanical Engineering

\*\*\*客員教授 工学研究所

Guest Professor, Research Institute for Engineering

時制御系を開発した。図2にテーブルのピッチング制御の実験結果<sup>(1)</sup>を示す。従来の装置では、送り方向の変位や速度を制御するだけであったが、本研究においては、姿勢と垂直変位の制御に成功している。

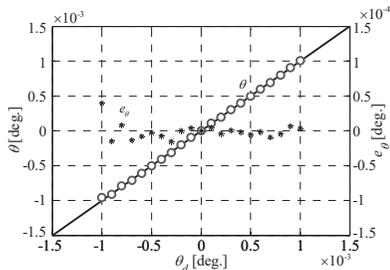


図2 ウォータドライブステージの姿勢制御性能

次にスピンドルの変位制御に関する研究成果の一例を示す。図3は本研究で開発した水静圧スピンドルである。本スピンドルは水静圧スラスト軸受が組み込まれており、外部に設けた流量制御弁による流量制御によって、軸受変位のフィードバック制御を可能にした。図4に位置決め性能を示す通り、10 nm 程度の制御分解能を実現している<sup>(2)</sup>。また、軸受変位の目標値を零に設定しておけば、外部負荷の変動に関わらず、軸受変位を一定にすることが可能であり、その結果、軸受剛性の無限大化にも成功している。

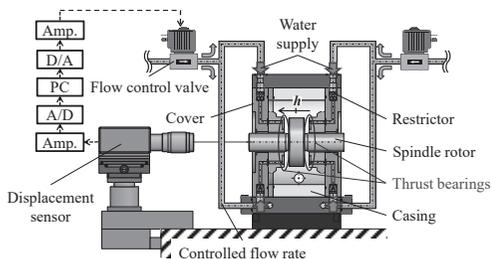


図3 静圧軸受の微小変位制御システム

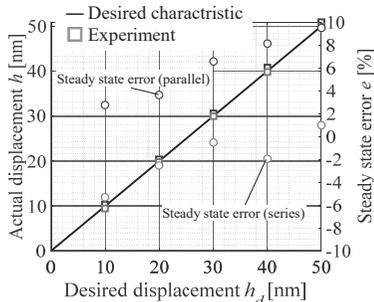


図4 静圧軸受の微小変位制御性能

## 2.2 金属ガラスに対する単結晶ダイヤモンド切削

本プロジェクト研究においては、高度機械要素技術の研究開発に加えて、新材料に対する超精密加工に関する研究を進めている。

金属ガラスはアモルファス合金であり、その無秩序な原子配列から、異方性や材料欠陥を持たない特徴がある。このため、優れた機械的、化学的、磁気的な特性を有する。本研究では、Zr 基金属ガラスへのダイヤモンド切削を試みた。

図5に湿式切削によって生じた切りくずのSEM画像を示す<sup>(3)</sup>。金属ガラスの自由曲面方向の切りくず性状は、均一な鋸歯状の構造が見られた。これに対して、すくい面に接する側の切りくず性状は平滑面となることがわかった。加工面の表面粗さは24 nmRaとなっている。今後、さらなる高品位表面の創成に向けて、加工機構の詳細な検討に加え、最適な加工条件の検討を進める予定である。



図5 金属ガラスの切りくず

## 3. 今後の展望

本研究プロジェクトでは、超精密加工による高品位表面の創成を目指して、超精密工作機械用の高度機械要素技術の開発と従来材料からの代替が期待される新材料に対する超精密加工の研究を行っている。今後も継続した研究を進める予定である。

なお、金属ガラスの超精密切削実験に関しては、大学の寺島岳史准教授から、材料提供とご助言をいただいた。ここに記して感謝申し上げます。

### 参考文献

- (1) S. Shibata, A. Hayashi and Y. Nakao, 'Trial study on pitching and vertical displacement control of water driven stage, Proceedings of ICPE2016 (to be presented).
- (2) Y. Yamada, A. Hayashi and Y. Nakao, 'Design of positioning control system of opposed pad water hydrostatic thrust bearings, Proceed ings of 31th ASPE Annual Meeting (to be presented).
- (3) 坂田, 林, 中尾, 'Zr 基金属ガラスのダイヤモンド旋削加工における切りくず生成挙動の可視化, 日本機械学会 2016 年度年次大会講演論文集.



# 高周波回路の解析・設計理論の整備と対応ソフト開発

## —電磁界問題から回路問題へ—

平岡 隆晴<sup>1</sup>

許 瑞邦<sup>2</sup>

### Construction of high frequency circuit analysis/synthesis theory and development of the corresponding software

Takaharu HIRAOKA<sup>1</sup>

Jui-Pang HSU<sup>2</sup>

#### 1. 電磁波を用いた高周波回路の重要性

現在 電磁波・光波は、高速性・広帯域性・低損失性を生かして高速情報伝送・処理、高機能を持った高集積・微細化高周波回路及び光回路の実現に貢献している。具体的には携帯電話、放送衛星、電算機、レーダ、センサー、CATV、光ファイバ通信、電波時計等のエレクトロニクス機器、アンテナシステム等各方面での回路として、頻繁且つ広範囲に活用されている。従って、この種の回路の電磁界の動作を解明し、電磁界の動作に基づいた合理的な高周波回路を設計する必要がある。

#### 2. 高周波回路の解析・設計の難しさ

高周波回路は電磁波回路とも呼ばれ、回路の3次元構造に対して、所与の境界条件下で動作電磁界を解析することにより、高周波回路の入出力応答を計算することができる。従来、所与の境界条件下での3次元電磁界解析は困難な問題であったが、現在では強力・安価な計算機と有力な数値手法（有限要素法、有限差分時間領域法）に基づくソフトにより解析が可能となり、高周波回路の入出力応答も計算できる。しかし、現行の高周波回路の設計は、集中定数回路理論（零次元）あるいは伝送線路理論（1次元）に基づいているが、実際の回路構造は3次元立体構造となっているので、この差を埋めるために最終的には試行錯誤法に基づいて設計・開発にならざるを得ず、膨大な時間・労力が必要になる。従って、現在高周波回路の3次元構造に適した合理的な高周波回路設計法の開発が期待されている。

#### 3. 厳密な等価回路の導入

合理的な高周波回路の解析・設計を機能的に実行するために、電磁波回路の等価回路を導出することが有効と考える。電磁波回路は導波路部分、機能実現部分及び結合部に分割できる。この3個の部分に対して、本研究では厳密な電磁界解析を実行し等価回路を導出する。

**(1) 導波路の電磁界解析**は導波路断面に課された境界条件下での固有値問題に還元され、この固有値問題を解くことにより無限個の固有伝送姿態と固有値が得られる。この結果、固有伝送姿態に対応して無限個の姿態対応伝送線路が等価回路として得られ、各伝送線路の回路定数（特性アドミタンス・伝搬定数）は固有値より得られる。

**(2) 機能実現回路の電磁界解析**は、回路構造に課された境界条件下での固有値問題に還元され、この固有値問題を解くことにより無限個の固有姿態と固有値が得られる。この結果、固有伝送姿態に対応して無限個の姿態対応共振器が等価回路として得られ、各共振器の回路定数（共振周波数・イミタンス）は固有値より得られる。

**(3) 導波路と機能実現回路との結合**の等価回路は多開口理想変圧器で表現され、回路定数である変圧比は導波路の固有伝送姿態と機能実現回路の固有姿態との重ね合わせ積分で与えられる。

#### 4. 研究の進め方

本研究では「高周波回路の解析・設計理論の整備と対応ソフトの開発」の研究を3段階に分けて実行する。

- (1) 導波路の等価回路導出理論の整備とソフト開発
- (2) 機能実現回路の等価回路導出理論整備とソフト開発
- (3) 等価回路に基づく高周波回路の設計

#### 5. 当面の課題—導波路の等価回路の導出

マイクロ波・光波で頻繁に使用される導波路を図1に示す。ここでは、光波伝送で使用する方形断面誘電体導

<sup>1</sup> 准教授 電気電子情報工学科

Associate Professor, Dept. of Electrical and Electronic Information Engineering

<sup>2</sup> 客員研究員 工学研究所

Invited Researcher, Research Institute for Engineering

波路及びマイクロ波伝送で使用されるマイクロストリップ線路を取り上げ、平面回路理論に基づいて以下のステップで研究を進めている。

**1) 導波路の固有姿態を決定する理論の構築**

導波路の伝搬定数を仮定すると Maxwell の電磁界方程式に変数分離法が適用でき、導波路断面に関する2次元電磁界方程式系が得られる。一般に導波路断面は電磁界を閉じ込め外部に放射されない構造（金属壁乃至屈折率差に基づく電反射壁）を持っているので この境界条件を2次元電磁界方程式系に課すると固有値問題が形成される。この問題を解くと固有伝送姿態と固有伝搬定数が計算できる。ここで扱う導波路は電磁界が高さ方向に閉じ込められているので Maxwell の電磁界方程式より導出された平面回路方程式を使用するのが適切である。この式にしたがうとに基づいて方形誘電体線路及びマイクロストリップ線路の等価回路は図2で与えられ、その固有値方程式は次の行列方程式であたえられる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}^{HH} & \mathbf{Y}^{HE} \\ \mathbf{Y}^{EH} & \mathbf{Y}^{EE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}^H \\ \mathbf{V}^E \end{bmatrix} = 0$$

**2) 対応ソフトの開発** 固有値方程式の固有値と固有ベクトルを求めるソフトを作成すると等価回路に基づいて断面座標の関数として全電磁界が求まる。更に求めた電磁界は任意定数倍の自由度があるので 伝送電力が単位電力になるよう電磁界の正規化を施す。

**3) 具体的な適用** ここでは方形断面誘電体導波路で中心電気壁で横幅を変えたときの基本姿態から 13 次までの固有伝搬姿態の実効屈折率の計算結果を図3に示す（水平垂直偏波高さ姿態 30 個考慮）。幅 2μm の導波路で基本姿態（中心電気壁）の電磁界成分は断面の関数となっているのでその状況を等高線表示で図4に示す。

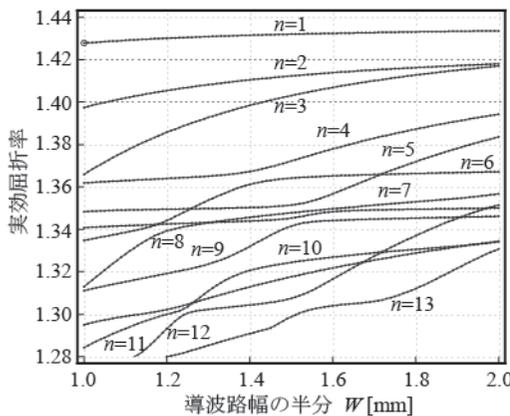


図3 方形断面光導波路の低次の実効屈折率 (中心電気壁 1次—13次)

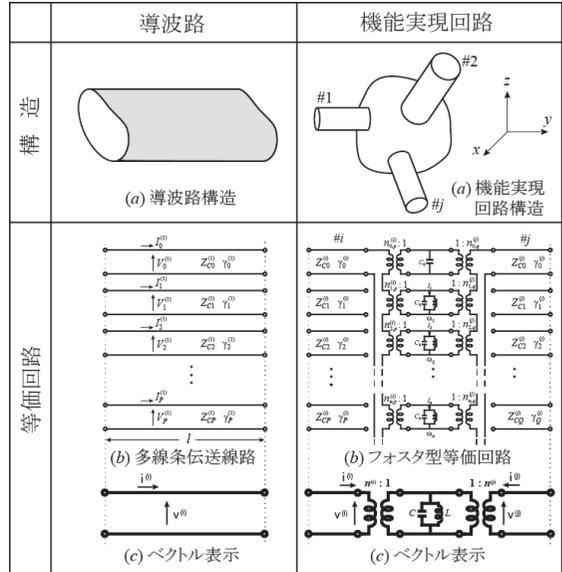


図1 導波路と機能実現回路の等価回路

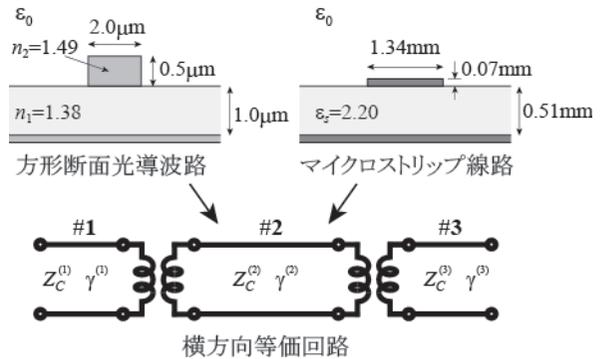


図2 解析対象導波路構造と横方向等価回路

謝辞 穴田名誉教授及び陳春平准教授にお世話になりました。

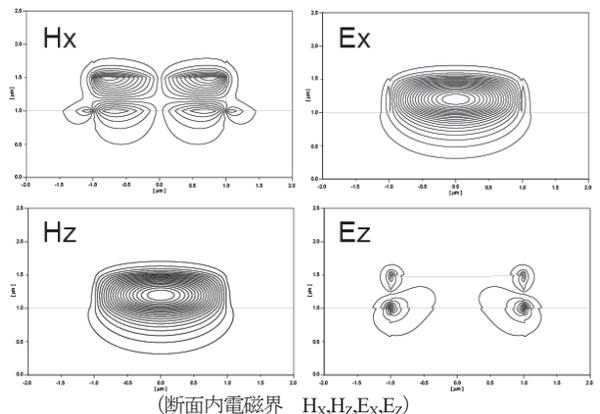


図4 方形断面光導波路基本姿態の電磁界分布 (基本姿態の実効屈折率=1.427713)



# 環境科学テクノサークル 2016 年活動報告

井川 学\*

## Reports of the Activities of Environmental Science Technocircle in 2016

Manabu IGAWA\*

### 1. サークルの歩み

環境科学テクノサークルは、工学研究所の新しい取り組みとして2011年の5月に始まったテクノサークルの中でも最初に設立されたサークルの一つです。設立当初の学生はすでに卒業し、また、当初から運営に協力して頂いた南齋 勉特別助教は静岡理工科大学講師として転出されました。新入生勧誘が思うように進まない年もあり構成員数は多くはありませんが、文系理系の垣根を越えて興味を持った学生が集って活動を続けています。

### 2. 2015～2016年のサークルの活動

サークル活動としては、一つは毎週水曜の昼休みに演習室に集まって、食事しながらプレゼンを聞くという活動です。用意が間に合わず、雑談で終わることもありますが、中には興味深いプレゼンもあります。それぞれが関心のあるテーマを選んでプレゼンするもので、私自身聞いていて知識が広がりとても楽しいプレゼンになることもあります。最近の発表では、ネットで視覚や聴覚だけでなく臭覚に訴えて伝えるにはどうするか、という発表や、ブラウン運動、花粉症等、多岐に渡った発表がありました。私もプレゼンの後のディスカッションに加わるのももちろんですが、調査や学会発表の後にはその内容を紹介し、それぞれの学部、学科のメンバーに研究活動の重要性や面白さを伝えるように務めています。

サークル活動のもう一つの主要な活動は、テクノフェスタや神大フェスタの発表です。2015年は神奈川県の水源地の一つとなっている酒匂川の水質調査を行い、その結果を報告しました。この調査は酒匂川の源流近くから相模湾の河口近くまで10点で採取、分析するというものです。私の研究室では酒匂川の源流に位置する丹沢山塊の

調査研究を1988年から行っているため、その研究と接続されることを期待しています。2015年度はこの他にタバコの副流煙の調査も行ないました。大気中のアルデヒド類の分析は当研究室で以前から行っていますので、この分析手法を適用したものです。2016年は身の回りの現象を科学的に解明することを目標に、研究発表の予定です。



図1 2015年テクノフェスタ発表ポスター

### 3. サークル活動の今後

サークル活動は、研究テーマの設定やサークル員の確保等、難しい点も多くあります。しかし、学生が知的に刺激し合い、その中で友情が生まれる場として有効であろうと思います。これからも学生諸君がイキイキと活動するようなサークルであることを願っています。

\*教授 物質生命化学科

Professor, Dept. of Materials and Life Chemistry



# ドラレコ・テクノサークル活動報告 ウェアラブルカメラが記録した日常交通における 自転車行動と道路環境

松浦 春樹<sup>1</sup>、堀野 定雄<sup>2</sup>、松田 洋<sup>1</sup>、後藤 航太<sup>3</sup>、酒井 聖紘<sup>1</sup>、高橋 綱喜<sup>4</sup>、  
金澤 優太<sup>5</sup>、浮穴 浩二<sup>6</sup>

## Bicycle Behavior Recorded by Wearable Camera in Relation to Road Infrastructure

Haruki MATSUURA<sup>1</sup>、Sadao HORINO<sup>2</sup>、Hiroshi MATSUDA<sup>1</sup>、Kouta GOTOH<sup>3</sup>、Seikoh SAKAI<sup>1</sup>、  
Koki TAKAHASHI<sup>4</sup>、Yuta KANAZAWA<sup>5</sup> and Koji UKENA<sup>6</sup>

### 1. はじめに

自転車事故が増加中で社会の関心は高い。私たちは自転車など交通弱者と自動車の共生をテーマに研究を進めている。ウェアラブルカメラを活用して自転車目線で日常交通における危険を多数録画した。それらは、交差点環境、車道に飛び出す雑草(植栽)、路上駐車、排水溝蓋、マンホール、道路の荒れなど多種多様である。

今回の最重要項目、交差点環境と植栽に起因する危険に焦点を絞りロードバイク目線でシティ車とロードバイクのリスク差を比較検討した。

### 2. 方法

調査方法は2015年9月から約2ヶ月、3名の学生通学路(環状2号線、国道1号線、鎌倉街道)を対象にウェアラブルカメラを活用して走行路を記録した。調査方法を表1、調査区間を表2、ウェアラブルカメラの長所・短所を表3にまとめた。

#### 2-1. 交差点環境固有のリスク

採取したデータを交差点での動画に絞り、その中から、(1) Y字型交差点、(2) 左折専用レーン付交差点、(3) 交差点内歩道での待機時、の動画断片を行い、その中で危険な箇所について考察した。

#### 2-2. 自転車の通行を阻害する植栽リスク

道路端から伸びる植栽の自転車走行に及ぼすリスクを3段階

神奈川大学工学研究所テクノサークル

Techno-circle, The Research Institute for Engineering

1 工学部、2 工学研究所、3 法学部、4 経済学部、5 神大生協、6 UK コンサルタント、

1.Faculty of Engineering, 2. The Research Institute for Engineering, 3.Faculty of Law, 4.Faculty of Economics,

5. Kanagawa University Cooperation, 6. UK Consultant

表1 調査方法

調査期間	2015/9/21～約二か月
調査人員	3名(高橋、松田、後藤)
使用機器	ウェアラブルカメラ (Panasonic製)
機器使用台数	3台(各員1台)
調査区間	①環状2号線 ①～③は表2、 5、6とリンク ②国道1号線(神奈川県東部) ③鎌倉街道
取得データ量	171.5GB(三名分) →1GB当たり15分の動画

表2 調査区間

	調査区間距離[km]	所要時間[分]
高橋①環2	12.5	29
松田②国1	4.8	19
後藤③鎌倉	25.6	75

表3 ウェアラブルカメラの長所・短所

長所	<ul style="list-style-type: none"> <li>人の目線の動きが分かる。</li> <li>高品位画質</li> <li>リチウムイオン電池内蔵式で、充電が楽</li> </ul>
短所	<ul style="list-style-type: none"> <li>速度、時刻などが一切記録されない。</li> <li>高品位画質ゆえ、メモリ消費が激しい。</li> <li>高性能ゆえ、電池消費量が多い。</li> </ul>

表4 植栽リスク

等級	判断基準(白線を基準に)リスク:A>B>C
A	白線を超えて飛び出し
B	白線直上まで飛び出し
C	白線より歩道側に飛び出し

A, B, Cに分類した。その基準を表4、それぞれリスク分類画

像を図1に示した。リスク分類毎にデータを分析し、リスク出現頻度（時間間隔：何秒毎に、距離間隔：何m毎にリスクが出現するか）を定量的に調べた。

### 3. 結果

交差点構造や運用に起因する固有リスク、道路端から伸びる植栽リスクに着目し分析、考察した。

#### 3-1. 交差点環境固有のリスク

##### (1) Y字路交差点

Y字路交差点危険は右方向直進の際に発生する。Y字路右方向直進とはY字路にて右側の車線を通り、右方向に直進する通行である。車線左端を素直に走行しているとY字路分岐では不本意にも左車線に誘導される。車線を横切り車道中央部に出なければ、右方向直進は不可能である（図2-①）。

##### (2) 左折専用レーン付交差点

自転車が左折専用レーン付き道路で交差点の車道左端を直進する場合、後ろから追越す左折自動車が無理な左折をしたり、横断歩道通行中歩行者を待つ左折自動車により進路妨害される危険に遭遇、記録した（図2-②）。

##### (3) 交差点内歩道での待機時

自転車は現行法1では2段階右折が義務付けられているため、歩道での待機が発生する。交差点内歩道は歩行者・自転車にとっての交差点でもあり、様々な方向からの通行があるため、その中で待機は非常に危険である（図2-③）。

#### 3-2. 植栽のリスク

植栽リスクの出現頻度分析結果を表5、6に示す。これらの表からリスク度が減少するに従って、距離、時間

表5 リスク出現頻度(平均出現距離)

m/個	全体	A	B	C
①環2	158	2500	298	391
②国1	229	4800	800	343
③鎌倉	366	3200	853	492

表6 リスク出現頻度(平均出現時間)

秒/個	全体	A	B	C
①環2	28	450	54	70
②国1	41	864	144	62
③鎌倉	66	576	154	89

の各々で出現間隔が狭まっていることが分かる。これより、現在の道路環境には、自動車目線では確認しづらい、自転車にとってのリスクが多数存在することが明らかになった。

### 4. 考察、改善提案

#### 4-1. 交差点環境に付随するリスク

##### (1) Y字路交差点について

Y字路交差点右方向直進はロードバイクの場合、車の流れに乗るように速度を上げればリスクを承知の上可能であるが、シティ車では荷物の積載や構造上の問題から速度が上がらないため、不可能である。そこで、イギリスの交差点モデル2（図3）を参考に専用バスデザインを提案する（図4）。

##### (2) 左折専用レーン付交差点



リスク A

リスク B

リスク C

図1 植栽リスクの分類



①Y字路分岐



②左折専用レーン



③交差点内歩道待機

図2 交差点環境の固有のリスク

左折専用レーンでは、自転車利用を無視した道路環境が原因で、ドライバーのエゴ（速度の違いをシティ車を甘く見る）や判断ミス（速度が速いロードバイクの認知遅れ）が誘導され、自動車が自転車を巻き込む事故が発生する可能性がある。この種のリスク解消交差点デザインを提案する（図5）。

### （3）交差点内歩道での待機時リスク

交差点内歩道での待機は、2段階右折を無くすことが一番の解決策と考えた。信号に同期して昇降するボラード活用デザインを提案する（図6）。

## 4-2. 植栽リスク

シティ車の場合、子供を乗せた状態で植栽に衝突すると、子供の顔面に植栽が当たり負傷リスクが、ロードバイクの場合、速度が速く植栽への衝突によって負傷リスクがある。植栽リスクの軽減には剪定が一番であり、市民と道路管理者と連携して改善策を検討するのが得策と考える。

## 4-3 研究成果の社会的アピール

これらのフィールド調査成果を人類労働学会東日本地方会（2015-12、横浜）で学生3人が連名発表した。本稿はその予稿論文を若干加筆したものである。多くの参加学会員から自転車リスクに関して共感意見が寄せられ、自転車走行リスク実態を広く共有することが出来た。

更に、学生発表を介して交通管理者（県警）と率直な意見交換する機会に恵まれた。

「体力を使った調査は素晴らしい」「若い方々の交通安全への関心向上はありがたい」「全体に自転車側の基準は若者中心と感じる」「道路の課題解決はハード面だけでは難しい。『官民一体』との提案だが、雑草取り、ゴミ拾いなどは既に色んな所でやっている。これらも好事例に入る」「神大サイクリングクラブも道の草取りなどボランティア活動をやってほしい」「ウェアラブルカメラ動画を見て、Y字路（立町）で車と同速の車線変更は率直に危険と感じる。『スマートさ』と『安全』のどちらが正しいか再考して欲しい。回り道をしてでも『安全』を優先して欲しい。現時点では取って回り道をして欲しい」「動画を見ての感想。若いから出来るが一般化は無理ではないか」「自転車利用者の考え方も変えて欲しい」「『自転車無視』と言う表現が気になる」「自転車が『交通弱者』との考え方を改めて欲しい」「警察官は法の専門家だが、自転車の車道左端走行を決めた道路交通法はあくまでも原則であり、例外を認めていることを知ってほ



図3 イギリスの交差点モデル

（図4、5の説明）

①の自転車専用信号が青の時、②の自動車信号を赤にする。⇒自転車の道路横断の時間ができ、右方向直進、直進が可能となる。交通量に応じ、①は押しボタン式にする。

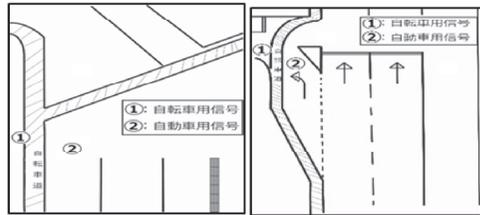


図4 Y字路の新提案デザイン

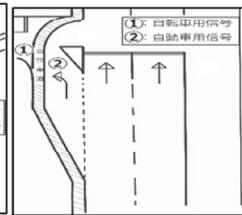


図5 左折専用レーンの新提案デザイン

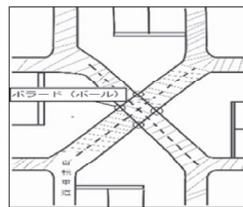


図6 交差点一段階右折の新提案デザイン

（図6の説明）

自動車右折専用信号点灯と同時に自転車右折を行う。自転車通行スペースを確保するため、交差点中央には信号と連動したボラード（ポール）を設置する。

※ 図4、5、6内の斜線部は自転車道

しい。安全優先で柔軟に歩道走行も配慮して欲しい」「雑草、工事、駐車などの場面では車側へ車線変更するのではなく、歩道を走って良い」「ボラード設置提案は良いアイデアだが、子供や老人の自転車利用者にとり交差点の斜め横断は大変で、非現実的だ」「交差点真ん中を『横切る』のは子供や老人には無理で『殺人ボラード』になるかも。発想は良いが日本での実現は無理か」「『自転車専用信号』も発想は良いが法改正が必要で実現は無理かも」など、多くの有益な専門的意見に接することが出来た。学生発表は熱意がこもっており迫力が強く、充分社会的アピールを果たしたと言える。

## 5. 結論

今回の調査結果から現在の日本の道路環境では自転車が安全に通行できることが難しいことが判った。道路は全交通者が平等に使用する権利があるため、自動車目線だけでなく、自転車などの交通弱者目線で道路環境・構造を再検討することが緊急に必要である。

## 6. 参考文献

1. 道路交通法第34条第3項
2. ロンドンにおける自転車道整備の取り組み(自転車レーンから構造分離自転車道への転換)  
(<http://blog.livedoor.jp/ashitanlatfom/archives/11096908.h>)



## テクノサークル「けんちくをつくる会」

### 2015 年度活動報告

三笠 友洋\* 伊藤 将吾\*\*

#### Reports of Annual works of the Techno Circle “Tsuku-Ken”

Tomohiro MIKASA\* Shogo ITO\*\*

#### 1. 活動の背景

学部における建築デザイン教育は、演習科目の中で仮定の建築を設計することが中心となる。実施工を伴い、実物に触れ、建築物をリアルに作り出す機会は少ない。実際の設計活動においては、多くの時間とエネルギーを建物の材料と向き合うプロセスにかける。それが設計の醍醐味でもあるが、大学の授業の枠組みの中でその面白さを伝える事はなかなか難しい。こうした意識から立ち上げたのが、建築サークル「けんちくをつくる会」である。2011年に設立したけんちくをつくる会(以降つくけん)は、毎年建築学科の3年生を主体とし、さらに1, 2年生が加わり総勢30名程度が参加している。例年春先に引き継ぎが行なわれ、2015年度で5期目を迎えた。

#### 2. これまでの活動テーマ

つくけんの活動は、毎年その年の3年生が主体となり、春先に活動内容を検討する。どこに何を造るかも学生自身が検討し、その実現のための交渉も基本的に学生が行なう。限られた予算で「建築」と呼べるものを実際につくることが目的であるから、おのずと小規模で仮想的なものになる。当初は神大フェスタにおいて、キャンパスの公開空地の一角にフォリーをつくることから始まった。近年は六角橋商店街の商店会と連携し、商店街イベントにあわせてイベント会場を設営している。どのような空間を創造するかは学生の自由であるが、計画の始めの段階でひとつ材料を決めることが例年の決まりとなっている。限られた予算と時間と技術でできることは多くない。手こ入りやすい材料を使い、その材料としての特徴をよく考え、自分たちにつくれる方法を考えることを主題とする事で、建築をつくることの楽しさを感じてもらいたいと考えている。これまで竹、布、ダンボールなどがテーマ材料となり、昨年は紙管を利用した空間構成が考えられた。

(写真1,2,3,表1)



写真1 2012年度活動「外のリビング」



写真2 2013年度活動「ダンボールを開いたら」



写真3 2014年度活動「紙管の時間」

表1 各年度の建築物の敷地、用途、材料

年度	敷地	用途	材料
1期 2011	旧3号館前 公開空地	神大フェスタ 休憩所	竹
2期 2012	東屋前空地	神大フェスタ 休憩所	布
3期 2013	六角橋商店街	どっさり闇市 ライブ会場	ダンボール
4期 2014	六角橋商店街	どっさり闇市 ライブ会場	紙管+ 3Dプリンター
5期 2015	六角橋商店街	どっさり闇市 ライブ会場	角材

### 3. 2015年度の活動「角材」

5年目となった2015年度の学生メンバーも、前年度の活動を引き継ぎ、六角橋商店街の一角に休憩所及びライブ会場を設置する事を課題とした。六角橋商店街は、戦後の闇市をルーツ※<sup>1</sup>とした商店街で、木造アーケードの小道にお店が並ぶ仲見世通りは独特の雰囲気をもっている。この商店街では4月から10月の第3土曜日にドッキリヤミ市場が開催されている。このイベントではフリーマーケットイベントやライブが行われている。そのヤミ市場の一角で行われるライブのステージや観客席、休憩スペースなどの設計及び施工を行った。そこで彼らがテーマとした材料は「角材」であった。マテリアルとして、生活に身近な木材を活用することで建築学生として木材加工を学びつつ、線材ならではの空間デザインを目指した。また、角材を使用することで休憩所からライブ会場へと柔軟に用途変換することが可能なデザイン、イベント空間の演出を考えた。用途変換する仕組みとして、線材の1つ単位が連続してできるさまざまな組み合わせを思考し、暗闇の中で連続した小さな単位が美しく照らされることを期待した。また、1つ単位のことを集合させることでファサードとして歩行空間を演出させた。ライブのときは、ファサードを椅子に分離することで歩行空間と休憩所を一体化させ、見通しの良いライブステージの空間を作り上げた。彼らは、角材を使用し1つ単位のことを用途によって分離や集合させることによりイベントを成功させた。(図1,写真4.5)



図1 コンセプト



写真4 ライブ会場



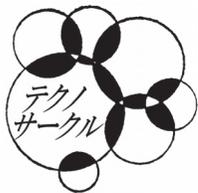
写真5 イスを自由に積み上げることでファサードとなる

### 4. つくけんの活動の成果

テクノサークルつくけんを設立して5年目となった。このサークルを設立した目的はなにより建築の楽しさを感じてもらう事だった。毎年3年生が主体となって活動し代々受け継がれてきた。1年生のときに興味本位で参加していた学生が、やがてリーダーになり先導している姿を見ると、試みとしては成功しているのではないかと思います。活動についても学生達が試行錯誤しながらも当日までには建築空間を作り上げると共に、訪れた多くの人に喜んでもらっているところを見ると少しは建築の楽しさを感じてもらっているのではないかと思います。またテクノフェスタではポスター賞の受賞や、つくけんの主体参加メンバーが卒業設計においては優秀賞を受賞している本活動の経験がその後活躍に少なからず活かしているのであれば幸いです。

### 参考文献

※1 RAKU review of architectural design course, vol.9, 六角橋商店街の歴史, 津田良樹, 2013



## テクノサークル KURAFT15-16 シーズン活動報告

中村 弘毅\*

### Activity Reports of the Techno Circle KURAFT Hiroki NAKAMURA\*

#### 1. はじめに

最近の工学系大学では、実習や設計・製図などのカリキュラムが減少しており、そういった状況を鑑みて、学生フォーミュラ大会は、学生自らがチームを組み1年間で1人乗り小型レーシングカーを開発・製作することによって、学生がものづくりの本質やそのプロセスを学び、ものづくりの厳しさ・おもしろさ・喜びを実感することを目的に掲げている。2003年から米国「Formula SAE®」のルールに準拠し、全日本学生フォーミュラ大会が開催されており<sup>0)</sup>、走行性能だけでなく、車両のマーケティング、企画・設計・製作、コスト等のものづくりにおける総合力を競う。また、2013年からEV（電気自動車）クラスが設立され、駆動ユニット以外に内燃機関エンジン車両と同じルールでEV車両の性能を競っている。

本学テクノサークル KURAFT は2013年10月に設立され、毎年9月に開催される全日本学生フォーミュラ大会への出場を主な目標として活動している。

また、地域貢献活動の一環として神奈川県下の中小企業と連携して展示会にて車両展示を行っている。これは神奈川県大学 KURAFT の広報活動であるとともに、支援企業の技術を社会に広めることを目的としている。

#### 2. KURAFT の2015-16 シーズン活動

##### 2.1 車両設計・製作

車両設計は、加速、旋回競技での目標タイムを設定し、ホイールベースなどの仕様から順次設計を行った。以下主要な仕様を表1にまとめる。

表2 KF-03EV 車両仕様

全長×全幅×全高	2730mm×1440mm×1220mm
ホイールベース	1650mm
トレッド	1250mm
乾燥車重	337kg
フレーム構造	鋼管パイプスペースフレーム
材料・結合方法	STKM13A・TIG溶接
モータ・最高出力	Motonagy 製ブラシレスモータ 38kW
バッテリーシステム	120V 20Ah AESC 製リチウムイオン電池 16モジュール (2S2P, 計64セル)
ステアリング	ラックアンドピニオン
サスペンション	前後ダブルウィッシュボーン
ブレーキ	4輪・油圧式アウトボードディスク

\*特別助教 機械工学科  
Assistant professor, Dept. of Mechanical Engineering

電気自動車設計における大きな課題としてバッテリーの配置が挙げられる。バッテリーは全質量の1/3を占めるためその配置は車両性能に大きく影響を及ぼす。今年度の車両はコンテナをコンパクトにしたことで、重量物を重心に近づけてヨー慣性モーメントを低減し、運動性能を向上させた(図1)。

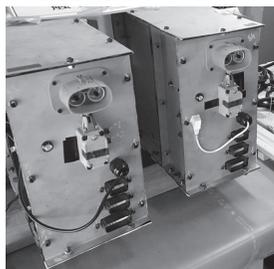


図1 完成したバッテリーコンテナ

駆動系を含む電気系統の配線については、電気電子情報工学科の4年生が主体となって設計製作を行った(図3参照)。電気自動車は高電圧・高電流を取り扱うため設計や作業中に留意すべき点が多く、FormulaSAE®のルールに書かれた安全基準や、電気車検担当の審査員の指導に従って製作を進めた。また、基板製作の企業からの支援を受けることで、配線を簡略化することができた。

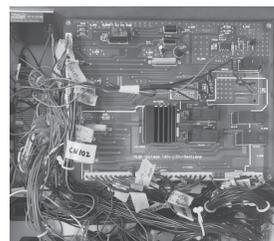


図2 安全監視用電気回路

##### 2.2 ドキュメントの作成

大会出場要件を満たすため、デザインレポート、コストレポートを初め、電気システム診断 (ESF)、故障モード診断 (FMEA) など様々なレポート作成に着手した。特に、ESF、FMEA は危険箇所が見つかるごとに設計変更と当該書類の再提出を繰り返し、システムの安全性および信頼性の向上に努めた。

##### 2.3 展示会出席

2015年10月～2016年9月にかけて、連帯車・つなごう川崎をはじめ、学内外での展示を行い、広報活動を行った。

### 3. 第14回全日本学生フォーミュラ大会

#### 3.1 大会概要

今年度大会は2016年9月6日～10日の5日間で開催された。エントリーは計106校（うち海外31校）、ICVが93校、EVが13校であった。

#### 3.2 車両設計要件

主な設計要件・安全要件は以下のように定められている。

- ・フォーミュラスタイルの車両。
- ・ホイールベースは1525mm以上。
- ・横転・衝突時などにドライバーを保護するために、コックピット回りなどの構造・材料などが詳細に規定。
- ・ドライバーの保護用具・シートベルトなどについて規定。
- ・ブレーキは4輪全てに作動。

その他 Formula SAE のルール<sup>1)</sup>及び日本大会ローカル規則に準拠して製作されていることが必須要件である。

#### 3.3 競技概要

大会は車検と以下の静的審査3種目、動的審査4種目の総合得点で競われる（表2参照）。

表2 競技種目概要

種目	概要	配点	
車検	車両の安全・設計要件の適合性の確認	-	
静的審査	コスト	車両製作コストの妥当性を事前提出書類と当日の口頭諮問により審査	100
	プレゼンテーション	製造・販売を含むビジネスプランを提示するという仮想のシチュエーションで発表	75
	デザイン（設計）	設計の適切さ・革新性。加工性・整備性など事前書類と口頭諮問により審査	150
動的審査	アクセラレーション	0-75mの直線での加速性能を競う	75
	スキッドパッド	左右の定常円旋回で旋回性能を競う	50
	オートクロス	直線・ターン・スラローム・シケインなどを含む約800mのコースを1周走行し、タイムを競う	150
	エンデュランス	オートクロスと同様の周回コースを22周走行。タイムと耐久性能を競う	300
	燃費/電費	エンデュランス走行時の燃料/電力消費量を競う	100

#### 3.4 大会結果

残念ながら KURAFT はシェイクダウン証明を期日までに提出することができず公式車検を受けることができなかった。そのため今大会で静的審査のみの参加となった。

車両製作のための費用を見積るコスト審査は、部品点数の不足などにより書類未提出と同等の減点を受けた。また、設計の妥当性を競うデザイン審査はアイデアは認められたものの、十分な走行テストによる検証が行えていないという評価で全チーム中82位であった。一方、販売戦略を競うプレゼンテーション審査では健闘し全チーム中49位という成績を収めることができ、昨年から

大きく飛躍した。総合順位は87位、EVクラス6位という結果になった。

#### 4. まとめおよび今後の展望

KURAFT にとって2度目の全日本学生フォーミュラ大会挑戦はシェイクダウン証明の不合格という悔しい結果に終わった。しかし、車両製作や書類作成を通して実際の会社で行われる設計製作のプロセスを経験し、静的審査での得点増加もあり、EVクラス6位という成績を収めることができた。



図4 完成車両とチーム集合写真

現在の車両をベースに部品の改良、信頼性の向上を行い来年度大会に向けて引き続き活動を行う。工程管理など今後改善すべき課題があるものの、1台の電気自動車を走行可能な状態にまで自作したことで、設計から製作に至る過程で注意すべき点などに気づくことができ、今後の研究に役立てられることが期待できる。

#### 謝辞

本活動を支援して下さった以下の企業の方々へ感謝の意を表する。

川崎市産業振興財団、日本モレックス、松山工業、日の出製作所、松井工業、西川精機製作所、堤工業、オートモーティブエナジーサプライ、SEVCON JAPAN、オズコーポレーション、Djac、富士重工業、NTN、JMC、フジテック、ヒラミヤ、サイマコーポレーション、ヒロテック、ソリッドワークス・ジャパン、ミスミ、日信工業、リニアテクノロジー、SHIFT UP、キタコ、エスケーエス、TGM、FCC、KURAFT OB会、他30社（順不同）

#### 参考文献

- (1) 全日本学生フォーミュラ大会ホームページ <http://www.jsae.or.jp/formula/jp/> (2015年10月16日アクセス)
- (2) 2015-16 Formula SAE® Rules [students.sae.org/cds/formulaseries/rules/2015-16\\_fsae\\_rules.pdf](http://students.sae.org/cds/formulaseries/rules/2015-16_fsae_rules.pdf)



# 「神奈川大学宇宙ロケット部」活動報告

高野 敦\*

## Annual Report of “Kanagawa University Space Rocket Club”

Atsushi TAKANO\*

### 1. 緒言

「神奈川大学宇宙ロケット部」はまだ2014年9月に設立されたばかりの新しいテクノサークルである。このサークルは、「ハイブリッドロケット」と呼ばれるロケットエンジンを扱い、超小型衛星を打ち上げるための超小型ロケットの設計・開発を目的としている。現在、超小型衛星の打上げが各地の大学で行われているが、これらは大型の衛星に相乗りという形で打上げるためその打上げ機会は限られている。そこで超小型ロケットを開発することで、これら超小型衛星の安価な打上げを実現させることを最終目標としている。従来衛星打ち上げのために実用化されているロケットは、火薬を使用する固体ロケットか、液体燃料・液体酸化剤を使用する液体ロケットの2種類に大別されてきた。これらは、可燃性の高い火薬や燃料を使用するため、万一破損した場合爆発の危険性が高い。一方、ハイブリッドロケットは燃料にグレインと呼ばれるプラスチック樹脂を、酸化剤に液体を使用するため、ロケットが破損しても自然に消火する性質を持っている。つまり爆発の危険が無い<sup>1)</sup>。そのため、火薬や燃料の運用・管理コストを抑えることができ、従来のロケットに比べ大幅に打上げコストを抑えることができる。これを受けて、当サークルでは機械工学科 航空宇宙構造研究室と共同でハイブリッドロケットの開発、打上げに取り組んできた。本報告ではこの1年間での活動実績を報告する。

### 2. 新規エンジンの開発 (2015年12月～2016年7月)

2014年11月に伊豆大島で、2015年8月には秋田県能代市で実施された共同打上げ実験に参加した。伊豆大島では高度2000m、能代では安定ながらロケット部機体は高度2402mを、研究室機体は高度3287mを記録した。しかしこれらの機体のエ

ンジンには米国からの既製品を購入し用いていたため、これ以上の軽量化・高性能化には限界があった。そこで従来から使用しているCTI社製HyperTEKL型エンジンをベースに、新規エンジン開発に着手した。開発の経緯を表1にまとめた。

No.	型式	年	日付	モーターケース			燃焼後重量		トータルインパルス [Ns]	比推力 [s]	結果	
				材料	肉厚 [mm]	内径 [mm]	長さ [mm]	グレイン [g]				モーター [g]
1	研究室 開発	No.1	12/13	ステンレス SU304	3.0	45	293	-	-	-	操作ミスによる誤点火	
			12/20	ステンレス SU304	3.0	45	293	-	-	-	燃焼開始直後ノズルが分離	
2	研究室 開発		1/17	ステンレス SU304	3.0	45	293	ほぼ無し (目視確認)	877	3548	154	成功
4	ロケット 部 開発		3/17	アルミ A5052	3.0	45	410	-	-	2263	-	燃焼開始5秒付近でモーターケースに穴が空いた
5	ロケット 部 開発		5/4	アルミ A5052	3.0	45	410	ほぼ無し (目視確認)	582	3305	141	燃焼開始5秒付近でモーターケースに穴が空いた
6	ロケット 部 開発		5/5	アルミ A5052	4.5	45	410	ほぼ無し (目視確認)	871	3603	156	成功
7	研究室 開発	No.2	6/19	アルミ A5052	3.0	65	395	252	1118	3532	147	ロードセル固定金具の不備により、推力を正確に測定できなかった(回目2回目も同様)
8	研究室 開発		6/19 2回目	アルミ A5052	1.5	65	395	307	910	2897	124	満充填ではないため、満充填の際、穴が開く可能性があると考えられる
9	研究室 開発		6/26	アルミ A5052	1.5	65	395	239	843	4804	190	新規開発の1.5mmのモーターケースで初めて燃焼開始に成功した。雨雲の影響およびSTEMの挿し込みが甘く、空填できなかった
10	研究室 開発		7/9	アルミ A5052	1.5	65	395	-	-	-	-	燃焼開始5秒付近でモーターケースから炎が上がった
11	研究室 開発		7/10	アルミ A5052	1.5	65	395	測定不可	789	4224	171	燃焼開始5秒付近でエンジンケースに穴が開いた
12	L型		7/24	Hyper TEK	17.3	28	420	890	890	1113	62	成功
13	L型		7/24 2回目	Hyper TEK	17.3	28	420	658	868	4741	199	成功

ロケットエンジンの性能は主にトータルインパルス、比推力、燃焼後重量で評価できる。トータルインパルスとは比推力の時間積分値である。比推力はトータルインパルスを燃料重量で除したものであり、この値が高ければ少ない燃料で大きなトータルインパルスが出せていることを意味する。燃焼後重量は比推力やトータルインパルスに寄与しない重量であり、言うまでもなく軽ければ軽いほど良い。そのため、酸化剤を完全に消費した時点で燃料も完全に燃焼・消費していることが望ましく、カマモーターケースなどの構造重量は徹底した軽量化が求められる。表1には比較のためHyperTEK L型の燃焼試験結果も掲載している。

当初のエンジンは研究室が中心となり開発し、宇宙ロケット部はその支援を行った。操作ミスによる誤点火(No.1)、ノズル部の応力集中による破損・分離(No.2)などのトラブルを乗り越

\*准教授 機械工学科  
Associate Professor, Dept. of Mechanical Engineering

えて、3回目で燃焼に成功した(No.3)。ただし燃焼後重量、トータルインパルス、比推力共にHyperTEK L型を超えることはできなかった。これは、モータケース材料が従来の大型ロケットを参考として実績及び比較的耐燃性があるが、比重が高いステンレス鋼SUS304を用いたことが原因である。この結果、燃焼後重量が重くなってしまった。また、燃料の燃え残りはゼロにできたが、燃焼に寄与しない余剰な酸化剤が生じてしまった。

この時点でエンジン開発は宇宙ロケット部が引き継ぎ、さらなる改良を行った。構造重量の軽量化のためにモータケースを耐燃性が劣るが軽量のアルミニウムに変更し、さらに全長を伸ばして燃料を増量した。しかし3Dプリンタで作成したABS樹脂製燃料の継ぎ目から燃焼ガスが漏れ、モータケースに穴が開いてしまった(No.4)。そこで燃料に継ぎ目をはめあわせし、接着加圧を強化する対策を施し、さらにモータケースの肉厚を従来の3mmに加え4.5mmのものも準備して臨んだ。従来の3mmのモータケースはより長時間の燃焼に耐えたが5秒で穴が開いてしまった(No.5)。肉厚4.5mmのモータケースは最後まで燃焼に成功した(No.6)。ただし燃料がまだ少なく、酸化剤供給時間9秒の内、5秒間しか燃焼していませんでした。そのためトータルインパルスが少なかつたこと、燃焼後重量も871gとHyperTEK L型に比べ200g強も重いことから再度改良が必要となった。この段階で宇宙ロケット部は後述する秋田県能代市での打ち上げに供する機体開発に専念するため、エンジン開発は研究室学生に引き継がれた。肉厚の薄いモータケースで穴が開く原因として、燃料が先に燃え尽き高温の酸化剤にさらされ、モータケース自体が燃焼するためと考え、モータケース内径を拡大してさらに燃料を増量し、酸化剤が尽きた後に若干燃料が残ることを許容することとした。肉厚3mmの燃焼試験では成功し(No.7)、1.5mmでも成功したが(No.8)それぞれロードセルの取り付け不具合により正確な推力が測定できなかった。1.5mmの燃焼試験(No.8)では酸化剤の充填不足により最後まで燃焼が継続できなかった。ロードセル取り付け部を改善し再度燃焼試験を行ったところ、燃焼に成功し、トータルインパルスも4604NsとHyperTEK L型の4741Nsに対しその差がばらつきとみなせる範囲内まで到達することができた(No.9)。ただし今度燃料の燃え残り量が239gと多くなり、その結果モータ全体の燃焼後重量が843gとHyperTEK L型の658gに対し200g弱重くなった。これは燃料の重量を調整すれば対応できるものと考えている。このエンジンを2016年8月の秋田県能代市での打ち上げに供すべく、再現性確認を兼ねて燃焼試験を行った。実際の打ち上げは海に向け、機体を回収するため浮力材としてスタイロフォームと呼ばれる発泡樹脂をエンジン及びタンクの周りに配置する必要があったが、これを断熱材として働き熱的環境が悪化することが予想されたのでこの燃焼試験の際には実機を模擬してスタイロフォームを巻いた。その結果やはりエンジン部分が高温と

なり、燃焼途中で穴があいてしまった(No.11)。この段階で、スケジュール的に能代での打ち上げは新規エンジンは間に合わないと判断、新規エンジンの適用は断念し、HyperTEK L型を使用することとした。

### 3. 能代宇宙イベント (2016年8月)

昨年の能代宇宙イベントでは研究室、ロケット部共に打ち上げには成功したがパラシュートの分離は確認できず、機体は海面に激突したと思われる状態で発見され、データの回収はできなかった。そこで今年は新規エンジンの搭載は断念するも、機体及びデータの回収を最大の目標とした。宇宙ロケット部の機体は昨年度研究室の機体設計を踏襲し、昨年機体が分離しなかったことについての推定原因である分離機構駆動回路の脱落防止のデベロップをし、さらに野外組み立てを最小限にするための充電端子の新設や、新規データロガーの開発・搭載を行った。研究室機体はロケット部機体で行われた改善に加え、1段目に新規分離機構を搭載し、さらに計測器を1か所に集めGFRP円筒に搭載した計測モジュールを新設し、万一海面に激突しても計測モジュール単体で浮くようにした。さらに計測モジュールが破損しても個々の計測機器を水密ケースに入れ浮上するようにし、加えて水密ケースが破損しても浮上するように水密ケース内に密閉袋で計測器と浮力材を配置することで3重の対策を行った。

ロケット部機体及び研究室機体共に全長は2.5m、直径は120mmである。計測器モジュールと1段目分離機構を除き、極力共通化を行い、設計時間の短縮と互換性確保によるハンドリングミスによる破損対策を行った。また、海上の直径4.5kmと広い範囲を漁船で捜索するため無線信号を発信するビーコンを搭載したが、昨年のものとは異なり、より遠距離まで到達する山岳救助用に開発されたものを搭載した。この信号を受信するためにも工夫が必要であって、受信側が地表から高い位置にないと受信できないことが事前の試験で判明したため、漁船上でも高い位置が確保できるよう、いわゆる“自撮り棒”を連結・固定して使用することで対応した。

落下範囲を絞るためにパラシュートを2段階に分けて放出すること、軽量化のために胴体にはCFRPを用い最も薄いところで0.28mmと薄肉化を進めたこと、機体の水没を避けるためのフロート、海面を着色するためのシーマーカーを搭載したことは昨年と同様である。

打ち上げ(海打ち)は3日間および予備日1日が確保され、その間、7大学・団体による計8機の打ち上げが予定され、研究室は1日目に、ロケット部は2日目に打

ち上げが予定されていた。ただし初日は台風通過に伴う悪天候のため打ち上げができず、運営側との協議の結果、急遽2日目に研究室とロケット部の打ち上げられることが決定された。



図2 打ち上げの様子



図3 機体回収後の様子

研究室機体は打ち上げ手順のミスのため点火せず、予備日に再度打ち上げを試みたが天候悪化のため漁船が出港できず中止となった。ロケット部機体は打ち上げに成

功し、さらに機体の完全回収に成功した。打ち上げの様子を図2に、回収直後の様子を図3に示す。

主要なデータの回収にも成功し、解析した結果高度は2174m(速報値)を示した。この値は昨年度記録よりも低くなっているが、原因は海からの向かい風が強く、機体の安定性から風上に向かって飛行するためランチャ離脱後射角が小さくなり水平発射に近くなったためである。

今回の能代宇宙イベントの海打ちでは機体の完全回収に成功したのは8機中、宇宙ロケット部及び他1大学のみであった。高度も他機体の報告書が未公表のため不明だが、当日の打ち上げの状況などから宇宙ロケット部の記録が最高であると思われる。今後データの詳細な解析を行い高度の確定値とともに [facebook](https://www.facebook.com/kanagawa.rocket)<sup>(2)</sup>にて報告予定である。

この結果から、今後新規エンジンを開発した際の実証用機体の開発に成功したといえる。

#### 4. 結言

昨年の能代宇宙イベントでも見られたことであるが、今年度の燃焼試験及び打ち上げにおけるトラブルのほとんどは人為的ミスによるものであった。ただし、その多くは4月から初めてハイブリッドロケットの燃焼試験及び打ち上げを行う研究室学生によるものであった。宇宙ロケット部学生の多くは昨年度から引き続き活動している者が多く、人為的ミスは比較的少ない。また、4月から5月にかけては宇宙ロケット部学生が研究室学生にノウハウ面の指導をする場面が見られた。その点、テクノサークルの趣旨が発揮され、よい結果が出つつあると考える。

一方で、現在は機械工学科の学生をリーダーとして総合工学コースや電気電子情報工学科の学生など、工学部の中でも多彩な学科の学生で構成されているが、絶対数が依然として少ない。したがって作業が佳境となると講義が少なく比較的時間に自由度のある研究室学生に頼る場面が見られ、テクノサークルとしての独自性という点で課題が残る。また、文系学生も確保できていないため、他大学の団体と比べアウトリーチ活動やマネジメント活動などの点で弱い部分が見られ課題となっている。

#### 参考文献

- (1) 嶋田徹 他, “平成27年度ハイブリッドロケット研究WG成果報告書”, JAXA (2015-2), p.1.
- (2) 神奈川大学宇宙ロケット部 : <https://www.facebook.com/kanagawa.rocket>



# 神奈川県大学ロボットプロジェクト活動報告

江上 正\* 榊 恵介\*\* 秋谷 尚俊\*\*\*

## Activity Reports of Kanagawa University Robot Project

Tadashi EGAMI\* Keisuke SAKAKI\*\* Takatoshi AKIYA\*\*\*

### 1. はじめに

神奈川県大学ロボットプロジェクトでは、工学の基礎を活用し、様々なロボットシステムの設計・加工・組立・制御を行っている。このプロジェクトの目的は、ロボット製作を通して「ものづくり」の楽しさ、大変さ、工学の基礎知識、柔軟な発想、チームワークなどを学ぶことである。部員の所属は機械工学科だけではなく広く工学部全体にわたっており、大学の講義や実験などで学んだ知識を駆使し、他学科の学生と協力しあってロボットを製作し、国内・国際ロボットコンテストに出場し、上位の成績を収めることを目指している。2008年度から活動を初め、最初の7年間は神奈川大学の特別予算の支援を受けていたが、2015年度からは機械工学科とテクノサークルの支援を受けて活動している。

現在、ロボットプロジェクトでは複数のチームが活動をしている。ロボット相撲、二足歩行ロボット、ロボット剣道、室内飛行ロボットの4チームである。これらのチームはそれぞれ設計やプログラムなどの担当に分かれて、大会に向けて日々作業を行っている。

本報告ではこの2015年度の活動実績を報告する。

### 2. ロボット相撲の活動報告

全日本ロボット相撲大会は、富士ソフト株式会社が主催、運営している大会である。第1回大会は1990年に開かれ、2015年度で26年目を迎える。ルールは、直径

1,540mmの円状の鋼板上において、縦200mm×横200mm×高さ無制限、重量3kg以内の力士ロボット同士を戦わせる。実際の相撲と同様に土俵外へ出てしまったら1本となり2本先取で勝利となる。部門としては、手で操作するラジコン型、センサを搭載し、あらかじめ記述したプログラム通りに動作する自立型の2種類がある。

ロボット相撲チームは、全日本ロボット相撲大会へ出場し、全国大会へと進出することを目標としている。主に大会の始まる前の冬から春にかけて機体の構想を練り、設計を行う。図1に示すようにSolidWorksにてギアボックス等を設計し、衝突が発生しないか、穴の位置にズレが生じていないか等を検証する。春から夏にかけては部室や工作センターの工作機械を利用して、各部品を加工する。このとき、主に実習を経験している機械工学科の学生が担当するが、他学科の学生でも加工が出来るように学生が指導することもある(図2)。

ラジコン型の機体では、送信機のスティックの傾き具合に応じて、左右のモータを回転させることによって移動する。一方、自立型の機体では手動による操作が禁止されているため、土俵のフチの白線を検出したり、物体検出センサを用いて敵の方向を認識したりして動作を決定する。

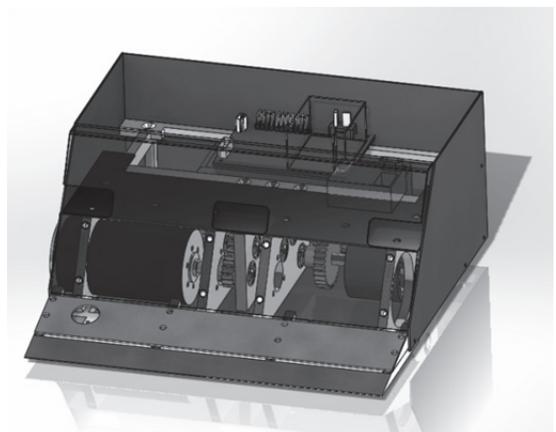


図1 SolidWorks 上でのアセンブリ設計した機体

\*教授 機械工学科

Dept. of Mechanical Engineering, Professor

\*\*ロボットプロジェクト前部長

Robot Project, Former President

\*\*\*ロボットプロジェクト部長

Robot Project, President



図2 工作センターでの機体の加工

制御部分のマイコンは C++をメイン言語として使用する 12 個の GPIO と 2 つのモータードライバを有している市販の製品を使用している。開発環境が C++のため C 言語が使用可能であり、講義で習得したアルゴリズムなどの知識を応用するのが比較的簡単となる。

第 27 回全日本ロボット相撲大会における結果は表 1 のようになった。図 3 に大会の様子を示す。大会にもよるが概ね 4 回戦を勝ちぬければ全国大会への切符を手にすることが出来る。しかし、1 回戦、2 回戦目での敗退が今回は多かった。主な原因としては、機体の操作練習不足と練習に用いる土俵の状態が悪いことが考えられる。練習時と大会時において、土俵の吸着力などが異



図3 第 27 回全日本ロボット相撲大会

なってしまったため機体の操作感が大きく異なっていました。

今後は機体の性能の向上のためにも、より高い加工技術の習得と機体重量の軽減や強度計算などの設計知識を学んでいきたい。またロボット相撲では機体同士が押しあうことで駆動回路に大電流が生じてしまい、市販の基板では耐性が追いつかないことがあるため、自作のモータードライバの設計や、より多くのセンサを搭載できるようなマイコンによる制御などを模索していきたい。さらに練習環境と実際の大会環境を同等のものにするためにも、土俵のたわみなどにより生ずる摩擦を軽減する工夫も必要である。

大会名	機体名	結果
北海道大会 (ラジコンの部)	HAMR	1 回戦敗退
	レッドスター	2 回戦敗退
	SPEC	2 回戦敗退
東海大会 (ラジコンの部)	チョコバナナ	3 回戦敗退
	桐島	1 回戦敗退
	ブラーバ	2 回戦敗退
関東大会 (ラジコンの部)	HAMR	不参加
	レッドスター	3 回戦敗退
	SPEC	2 回戦敗退
	チョコバナナ	2 回戦敗退
	CFCDX	1 回戦敗退
	桐島	1 回戦敗退

表1 大会結果

### 3. ロボット剣道活動報告

ロボット剣道とはアーム型ロボットによる剣道大会である。この大会の趣旨は知能を持つ関節型ロボットの普及を目指すことである。大会はまだ始まったばかりであるため、これからの発展が見込まれる。

大会では実際の剣道と同様に面、胴、小手、突きを技名を発しながら繰り出す。攻撃頻度や逃げの姿勢による反則なども定められており制限時間は 3 分、3 本勝負の 2 本先取で勝敗が決まる。剣道の有段者が技の判定を行う。目視可能で人による操縦で戦う入門部門、カメラ映像のみを見ながら操縦及び半自律で戦う遠隔操縦部門、PC などにより自立で戦う自律部門がある。

すべての部門混合での試合を行う。現在は入門部門の機体が首位を独占しているが、自律部門の機体の技術が進化してきているため、これからどうなるかは予想がつか

かない。機体は画像処理ができるように機体の面、胴、小手それぞれが赤、青、黄と色分けされている。また、形状や軸数も厳しく定められており、機体を大きく変えることができないため、適切な判断と対処が大切である。

神奈川大学チームの機体は4軸でダイナミックセルRCサーボを用いてパワフルで素早い動きができるようにしてある。頭部と腕には3Dプリンターで作った部品を用いており、自律部門への出場を目標に開発を行っている。現在、MATLABという数値処理ソフトを使って画像処理をしており、色を認識してその座標に打ち込むようにしている。

2015年12月12日に神奈川県立青少年センターでの第3回ROBO-剣大会に出場したが、残念なことに初戦敗退で終わってしまった。相手の機体が部位を後ろに配置させており、画像での座標指定がうまくできなかったためと思われる。しかし、MATLABによる機体制御が評価されて制御技術賞をいただくことができた。(図4)

PC上での相手を検出するための画像処理がまだ遅いため、今後は画像処理プログラムのアルゴリズムの最適化を行い、より早い動作をするように改良したい。また、今回の大会の反省から奥行を判断するため、距離計測が可能な赤外線レーザーまたはステレオカメラを搭載することを考えている。



図4 第3回ROBO-剣大会

#### 4. 2足歩行ロボット活動報告

2足歩行ロボットチームは、引き継ぎがうまくいかず、今年度は新入生しかいない状態であった。そのため、最初は近藤科学が出している市販品のKHR-3HVを利用して2足歩行ロボットについて一から学ぶことにした。その結果、サーボの制御方法や位置調整などを通じて自分でモーションの作成ができるようになってきた。また外部に取り付ける装飾や部品なども作成した。直前で大会ルールの改正があり、あらかじめ用意していた横攻撃

のモーションが使えなくなってしまうなどの問題があったため、急ぎよ別のモーションを用意するなどの対策を行う必要があった。

2016年2月13日につくばカピオサイバーダイナリナーで行われた第12回ROBO-ONE Lightに出場した。ROBO-ONEは、2足歩行ロボットによる格闘競技大会である。ROBO-ONEとROBO-ONE Lightの2つのクラスが用意されている。相手を倒すと1ダウンとなり、先に3ダウン取った方の勝利となる。また、倒された方は10秒以内に起き上がらなければ負けになってしまう。今回は初心者でも出場しやすいROBO-ONE Lightの方に出場した。結果は3回戦まで進み、両者1ダウンの判定負けでエントリー71中ベスト16に入ることができた。(図5)

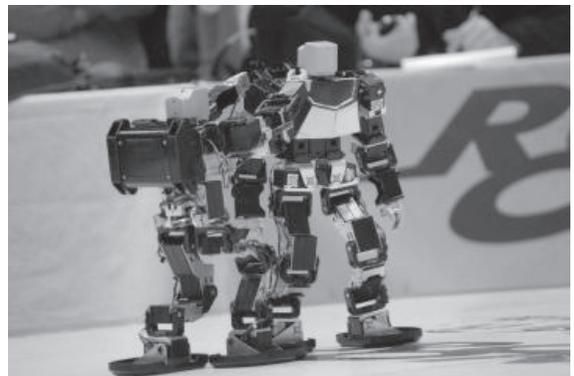


図5 ROBO-ONE Light

#### 5. おわりに

室内飛行ロボットチームは、今年度から活動を開始したため、まだ機体の製作中であり大会などへの出場はできていない。今年度は3つのグループで大会出場を行い、ロボ剣の制御技術賞とROBO-ONE Lightのベスト16が主な成果であった。

ロボットプロジェクトは2015年度で創立8周年になるが、機械工学科だけでなく、電気電子情報工学科や経営工学科、物質生命化学科、総合工学プログラムなど幅広く工学部からロボットに興味のある学生が集まっており、希望のグループに分かれて活動を行っている。大会の出場が大きな目標であるが、それ以外にもオープンキャンパスや神大フェスタ、神大テクノフェスタ、ホームカミングデーでの実演展示などで多くの来場者を集めている。また2015年度から夏休みに近隣の小学生にモノ作りの楽しさを教える模型教室を開いており、小学生への人材育成にも貢献している。大会における成果も出始めてきており、今後ますます活動が活発になることを期待したい。

## 2015年度（平成27年度）工学研究所年次報告

### 1. 人事

#### 1) 運営委員

所 長	新中 新二 教授
機械工学科	高野 敦 准教授
電気電子情報工学科	穴田 哲夫 教授
物質生命化学科	井川 学 教授
情報システム創成学科	吉田 稔 教授
経営工学科	中島 健一 教授
建築学科	趙 衍剛 教授
化学教室	岩倉いづみ 准教授
情報システム情報学科	杉本 剛 教授（所長指名）

#### 2) 研究所客員教授

花畑 誠 (2015.4～2016.3)	上田 充 (2015.4～2016.3)
堀野 定雄 (2015.4～2016.3)	川口 春馬 (2015.4～2016.3)
伊東 圭昌 (2015.4～2016.3)	内藤 周弐 (2015.4～2016.3)
大越 昌幸 (2015.10～2016.9)	Min,Sangkee (2015.10～2016.9)
井上 成美 (2015.10～2016.9)	孫 世国 (2015.10～2016.9)
野尻 秀智 (2015.10～2016.9)	長澤 浩 (2015.4～2016.3)
阿部 英樹 (2015.10～2016.9)	緑川 光正 (2015.4～2016.3)
田中 俊光 (2015.4～2016.3)	金元 敏明 (2015.10～2016.9)
山田 保治 (2015.4～2016.3)	籾下 篤史 (2015.10～2016.9)

#### 3) 研究所客員研究員

大和 裕幸 (2015.4～2017.3)	徐 剛 (2015.10～2017.9)
久保 登 (2015.4～2017.3)	金 徳印 (2014.10～2016.9)
龍 重法 (2015.4～2017.3)	曾 志平 (2015.10～2017.9)
石倉 理有 (2015.4～2017.3)	持田 由幸 (2014.4～2016.3)
石川 博敏 (2015.4～2017.3)	鈴木 温 (2015.4～2017.3)
蘆 朝輝 (2015.10～2017.9)	植田 博臣 (2014.10～2016.9)
周 建東 (2015.10～2017.9)	中村 先男 (2015.9～2016.10)
大熊 武司 (2015.4～2017.3)	深井 一夫 (2015.4～2017.3)
岩井 和史 (2014.10～2016.9)	伊藤 慈啓 (2014.10～2016.3)
許 瑞邦 (2015.10～2017.9)	岡村幸太郎 (2015.10～2017.9)
織作 恵子 (2015.10～2017.9)	

#### 4) 研究所特別研究員

北島 創 (2015.4～2017.3)	入井友海太 (2014.10～2016.9)
秋山 友昭 (2014.10～2016.9)	

#### 5) 研究所職員

教務技術職員 萩原 健司	教務技術職員 金子 信悟
--------------	--------------

## 2. 予 算

平成 27 年度の予算・決算額を表-1 に示す。

業 務 項 目	予 算 額		決 算 額	*工学研究所共同研究内訳	
				共同研究代表者	予算額 (千円)
研究所運営費	3,744		3,637	岩田 教授	3,500
大型共同設備管理運営	4,000		4,085	吉田 助教	1,900
工学研究所共同研究*	14,000		13,999	田邊 助教	1,600
(特) テクノフェスタ	2,300		2,307	南齋 助教	1,600
(特) テクノサークル	5,300		5,295	岩倉 准教授	4,200
合 計	29,344		29,323	宇佐見 准教授	1,200
				計	14,000

## 3. 共同研究／プロジェクト研究

平成 27 年度の工学研究所共同研究／プロジェクト研究を表-2 に示す

表-2

## 共同研究

機能維持性能に優れた座屈拘束ブレース付中高層建築物の研究	岩田 衛／建築学
ナノ空間制御シリカへのペプチド固定化による高性能不斉触媒の開発	吉田 暁弘／物質生命化学
金属間化合物を活性点とした CO <sub>2</sub> 還元用助触媒の開発	田邊 豊和／物質生命化学
光架橋型ハイドロゲルを用いた湿性沈着物の簡易分析手法の開発	南齋 勉／物質生命化学
多光子イオン化過程を利用する新反応開発	岩倉 いずみ／化学
恐竜の歩行・走行の力学シミュレーション	宇佐見 義之／物理学

## プロジェクト研究

A	高周波回路の解析・設計理論の整備と対応ソフト開発	平岡 隆晴／電気電子情報工学
C	高安心・超安全交通研究所（KU-WIPF）	松浦 春樹／経営工学
A	構造物の耐震安全性及び耐久性の評価方法に関する研究	趙 衍剛／建築学
A	新たな低炭素エネルギー社会に対応した新型電池の開発	松本 太／物質生命化学
A	三次元周波数分析を用いた振動モデル化技術の構築	山崎 徹／機械工学
A	多分岐ポリマー系ナノハイブリッド材料の開発と応用	横澤 勉／物質生命化学
A	高速高精度 DNA 増幅装置の開発	山口 栄雄／電気電子情報工学
A	刺激応答性材料の開発	亀山 敦／化学
A	グリーンイノベーションの基盤となるナノ構造制御触媒の開発研究	引地 史郎／物質生命化学
A	車両等に装備するためのポリカーボネート窓の表面改質に関する研究	新中 新二／電気電子情報工学
A	超精密加工による高品位表面の創成に関する研究	中尾 陽一／機械工学
A	座屈拘束ブレースの風と地震における多段サイクル疲労性能の研究	岩田 衛／建築学
A	建物の熱・換気性能の現場測定法の研究	奥山 博康／建築学
A	難焼結性セラミックス SnO <sub>2</sub> の高密度化と応用に向けた物性評価	齋藤 美和／物質生命化学
A	潮流発電ユニット開発の最先端技術：相反回転化	中西 裕二／機械工学
A	パルスレーザー光を利用した反応開発および機構解析	岩倉 いずみ／化学

## 4. 講演会

## 「暮らしの中のサイエンス」連続講演会

テーマ：『暮らしを変える宇宙開発』

場 所：神奈川大学みなとみらいエクステンションセンター

●第1回 2015年10月3日(土) 13:30～15:00

○ロケットを安全化する——ハイブリッドロケットが変える暮らし

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 宇宙飛翔工学研究系教授 嶋田 徹

●第2回 2015年10月3日(土) 15:20～16:50

○超小型衛星が開く新しい宇宙利用と産業

次世代宇宙システム技術研究組合理事長 有限会社オービタルエンジニアリング取締役社長 山口 耕司

●第3回 2015年10月24日(土) 13:30～15:00

○超小型衛星を使って宇宙開発に乗り出そう

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 東京工業大学理工学研究科教授/連携教授 松永 三郎

●第4回 2015年10月24日(土) 15:20～16:50

○宇宙から暮らしを変える——気象衛星ひまわり開発物語

三菱電機株式会社 ひまわりプロジェクト部長 西山 宏

## 5. 神大テクノフェスタ2015 —くらしと環境の未来—

日時：2015年10月23日(金) 12:00—16:30

場所：神奈川大学横浜キャンパス3号館305室・2号館演習室

実施内容

## 1) 講演会 (3号館305室)

工学系講演1件

宇宙エレベーターが切り開く未来 (一般社団法人 宇宙エレベーター協会 会長 大野 修一)

## 2) 研究ポスター発表 (2号館演習室)

大学院生によるポスター発表・作品展示 39件

学部生によるポスター発表 19件

テクノサークルによるポスター発表・作品展示 5件 総計 63件

## 3) 実演展示 2件 (宇宙エレベーター・フォーミュラマシン)

## 4) 企業展示 20社、1同窓会 (2号館演習室)

## 5) 研究相談窓口 (2号館演習室)

## 6) 技術・情報交換会 (10号館3階学生ラウンジ 17:00—18:00)



# 神奈川大学工学研究所所報執筆規程

1978年(昭和53年)2月5日  
改訂2015年(平成27年)5月20日

## 1. 投稿資格

投稿筆頭者は原則として神奈川大学工学部属教職員とする。ただし原稿を編集委員会が依頼する場合はこの限りではない。また連名者については制限しない。

## 2. 記事の種類

### 巻 頭 言

**論 説** 学問・技術・本研究所の事業・動向などに関する論説, 意見。

**総 合 論 文** 専門の学協会などに発表された研究論文を骨子として, 著者の一連の研究をまとめ, これにその分野における地位を明らかにするような解説を若干つけたもの。

**共同研究報告** 発足時点では〔共同研究の紹介〕, 中間時点では〔共同研究の現況〕, 研究終了または一段落の時点では〔共同研究の成果要約〕として, その現況が報告される。

**プロジェクト研究報告** 発足時点では研究の紹介, 中間時点では研究の現況, 研究終了または一段落の時点では研究の成果要約として, その現況が報告される。

**テクノサークル報告** テクノサークルの紹介およびその現況が報告される。

**総 説** 総合論文と略同一性格の記事であるが, 解説的色彩の強いもの。

**トピックス** その時々の特ピックスについての展望あるいは解説。

**随 想** 研究・開発などの思い出, 意見, 感想, 経験談など。

**国際交流研究** 学外(国内, 国外)における研究・講義・出張に関する経験談など。

**特 集** その号の特集として特別記事を設けることがある。

## 3. 用語

用語は和文とする。ただし総合論文に限り欧文でもよい。

また〔英文目次〕作成のため, 原稿には〔英文題目〕のほか〔著者氏名〕および〔職名, 所属〕の英語名をつける。

## 4. 提出期日

その年度により定める。

## 5. 頁数

以下の頁数はすべて〔刷り上り〕のものを示す。

**総合論文** 原則として20頁以内。和文の場合は〔欧文内容概要(1頁以内)〕, 欧文のときは〔和文内容概要(1頁以内)〕をつけることができる。

**共同研究報告** 原則として10頁以内。

**論説・随想** 原則として4頁以内。

**プロジェクト研究報告・テクノサークル報告** 原則として2頁以内。

**総説・トピックス・その他の記事** 原則として8頁以内。

## 6. 原稿の書き方

原稿の書き方は, この〔規程〕ならびに〔神奈川大学 工学研究所 所報 執筆要領〕による。

## 7. 原稿の責任と権利

掲載された論文などの内容についての責任は著者が負うものとする。またその著作権・編集出版権は〔神奈川大学 工学研究所〕に属する。

## 8. 採否

原稿の採否および分類は〔神奈川大学 工学研究所 編集委員会〕において行う。

## 9. 原稿の提出先

原稿の提出先は〔神奈川大学 工学研究所 事務室〕とする。そこで受領した日を原稿受付日とする。

## 10. その他

(1) 原稿の枚数が規定限度を超過する場合は委員会の承認を要するが, 状況により超過分の実費を徴することができる。

(2) 図が印刷に不適当な場合は, 専門家に依頼して書直すことがある。この場合の経費は著者負担とする。

# 工学研究所所報執筆要領

工学 太郎\*      研究所 花子\*\*

## Making Reports of Research Institute for Engineering

Taro KOUGAKU\*      Hanako KENKYUJO\*\*

### 1. 緒言

この工学研究所執筆要領は、このファイル自体が所報原稿のテンプレートになっているので、著者が別にタイプしてある原稿をこの様式内にペーストすれば、以下に記載する体裁の原稿が作成される。

テンプレートファイルは工学研究所事務室から著者あてにメールにより送付する。

原稿は、テンプレート (A4 版) に従って執筆し、提出の際は、印刷した原稿 (ハードコピー) とそのデジタルデータ (ファイル) を提出する。ファイルは MS Word (Windows または Mac) または TeX とする。

原稿記載の順序は、標題、本文、文献、付録、である。

### 2. 本文及び原稿の体裁全般

A4 版用紙を用い、本文レイアウト (1 ページあたりの文字数) は、25 字×45 行×2 段=2250 字とする。ただしタイトルのみは 1 段組である。

MS Word の “ページの設定” の “文字数と行数” のタブ中の設定はフォントサイズ 8、段数 2 で文字数 26、行数 45 とし、“余白” のタブ中の設定は上 45 下 40 左 34 右 34 としてある。

和文文字は MS 明朝、英文文字は Times New Roman とする。ただし、記号などに Symbol を用いることが出来る。

本文、図、表及び式は原則として左右の段にまたがらないように書く。

小数点は [.] を用い、カンマ [,] を用いない。

句読点は [,] [.] とし、[,] [。] を用いない。

脚注はなるべく避ける。

### 3. 記号及び単位の書き方

諸記号の字体は次のとおりとする。

(種別)	(字体)	(例)
数学的演算記号	立体	sin, sinh
単位記号	立体	cm, kg, MΩ
ベクトル量	斜体ゴシック	速度 $V$ , 力 $F$
量記号	斜体	周波数 $f$ , 長さ $l$
化学記号	立体	H <sub>2</sub> O, BaTiO <sub>2</sub>

文字の大きさは表 1 に示すとおりとする。

### 4. 図、写真及び表の作成

図、写真及び表が単段 (片側) に収まらない場合は 2 段 (両側) にまたがって書くことができる。

図、写真及び表の横に空白ができて、その空白部には本文を記入しない。

図、写真、表と本文及び図表相互の間は 1 行余白をとる。

図、写真、表の見出しは本文と同一言語とする。図及び写真の見出しはその下に、表の見出しは上に書く。

図、表中の記号類は、小さすぎて判別不能にならないようにする。また、複雑な記号類は、大きめに描くようにする。

写真は本文に貼るだけでなく、写真のファイルを添付する。

### 5. 数式

数式エディタを用いて記載する。

式は単列に書くように整形する。

字体は Times New Roman を使う。ただし、Symbol は使用できる。

数式は原則として文章の行の中に入れて、やむを得ず挿入する場合には、1 行高さを守る。

\*教授 機械工学科

Professor, Dept. of Mechanical Engineering

\*\*助手 建築学科

Research associate, Dept. of Architecture

## 例1 [分数式の例]

…これは  $(a+b)/(c+d)$  の形を取る。

## 例2 [指数式の例]

…電流は  $i = I \exp(-t/x)$  の形となる。

文中でなく、式を別行にする場合には、次のように書いても良い。その結果、[上例の式]は次の形を取る。

## 例1 [分数式の例]

…その結果、これは次式の形を取る。

$$\frac{a+b}{c+d} \quad (1)$$

## 例2 [指数式の例]

…その結果、電流は次式の形となる。

$$i = Ie^{-t/x} \quad (2)$$

## 6. 文献記載方法

文中の文献引用は、引用箇所文献ナンバを上付きカッコでつける。

参考文献 (References) はナンバーに ( ) を付して本文末に列記する。

引用文献は原則として以下の A, B のように記載する。

## (A) 雑誌の場合

(No.) 著者名, “標題”, 雑誌名, 巻一号 (発行年-月), p.ページ.  
例

(x) 赤坂憲夫, 青山幸夫, 宮下俊夫, “広帯域増幅器の特性”, 電子通信学会誌, **52**—192 (1977-8), p.1125.

(x) E. W. Euller and R. F. Stoessel, “……”, Mech. Engng., **90**-3 (1968-3), p.42.

## (B) 単行本の場合

(No.) 著者名, “書名”, 発行所名, (発行年), p.ページ.

例

(x) 田部浩三, 竹下 誠, “塩酸触媒”, 産業図書, (1976), p.1225.

## 7. 原稿作成上のヒント

このテンプレートは Windows MS Word 97 で作成してある。著者が別に書いた原稿をコピーペーストすれば、自動的に割付が決定する。

Word からコピーペーストする際、書式情報無しテキストのみをペーストするには、コピーした後にメニューの“編集”から“形式を選択して貼り付け…”を選択し、“テキスト”を選ぶ。

第1ページ標題部分は1段組である。この部分では、項目ごとにコピーペーストが必要である。

本文は著者原稿から図、表、脚注を除いてコピーし、テンプレートにペーストする。その後で、図等のスペー

スを作ってテキストボックスを挿入し、その中に図などをペースト、あるいはファイルからの挿入をする。

第1ページの脚注(著者所属など)には、直接入力しても、コピーした内容をペーストしても良い。ただし、MS Word の制限により、脚注の機能を先頭の“1. 緒言”の後ろに見えないように白文字で“\*”をつけてある。ここを削除すると脚注も消えてしまうので注意が必要である。(標題下の著者名に脚注の機能をつけるべきだが、その場合は脚注が両段にまたがってしまうため、この形式を採用した)

このテンプレートについて不明な点がある場合は、工学研究所 事務局に問い合わせる。

## 8. 結言

校正は著者に依頼するので、校正刷りが到着後、速やかに校正を済ませて、工学研究所 事務室まで返送する。校正は、内容が著者提出のハードコピーと一致することを確かめるものであって、変更を加えることはできない。

著者の責任による修正が生じた場合には、その修正に必要な実費を徴収する。

表1 文字及びサイズ

題目	MS 明朝	14 ポ
著者名	MS 明朝	10 ポ
欧文題目	Times New Roman	12 ポ
欧文著者名	Times New Roman	9 ポ
本文	MS 明朝	8 ポ
本文の各節・小項目	MS ゴシック	8 ポ
図・表の見出し	MS ゴシック	7 ポ
参考文献・脚注	MS 明朝	7 ポ

## 参考文献

(1) 工学太郎, 研究所花子, “執筆要領”, 工学研究所所報, 27号 (2004—11), p.126.

(雑誌の場合)

(2) 工学太郎, 研究所花子, “工学研究所所報 27号” 工学研究所,

(2004), p.126.

(単行本の場合)

## 付録

[参 考] 研究所所報の配布

刷上がった所報は以下の各者に1部宛贈呈する.

- (1) 本学理事および工学部所属教職員.
- (2) 理, 工学部を有する国内の大学またはそれに準ずる学校.
- (3) 官公庁の研究機関.
- (4) 主要の学協会.
- (5) 民間の主要研究機関.
- (6) その他委員会が認めたもの.

[資 料] 英文用語一覧

Research Institute for Engineering	工学研究所
Science Reports of Research Institute for Engineering	工学研究所所報
Faculty of Engineering	工学部
Department (Dept.) of	学 科
Mechanical Engineering	機械工学
Electrical and Electronic Information Engineering	電気電子情報工学

Material and Life Chemistry	物質生命化学
Information Systems Creation	情報システム創成
Industrial Engineering and Management	経営工学
Architecture	建築学
Mathematics	数 学
Physics	物理学
Chemistry	化 学
Biology	生物学
Professor	教 授
Professor Emeritus	名誉教授
Associate Professor	准教授
Assistant Professor	助 教
Research Associate	助 手
Technical Assistant	技術員
Graduate (M.C.)	大学院 (博士前期課程)
Graduate (D.C.)	大学院 (博士後期課程)
Research Student	研究生
Dean	学部長
Chairman of Dept. of ...	学科主任
Abstract	概 要

注: 工学部, 准教授, 助手, 技術員, 研究生などについては種々の呼称があるが, 上記のように統一する.



## 編集後記

編集委員ならびに工学研究所事務職員各位のご協力のもと、工学研究所所報第 39 号が刊行となりました。工学研究所所報としては、最後の刊になります。

これまで工学研究所所報では、年間活動および所員の研究分野を公表して工学研究所の高い研究レベルを紹介し、新任の教員や退職される教員の方々には、これまでの研究や思いを語る場としてご執筆頂いてきました。さらに、工学研究所共同研究、プロジェクト研究、テクノサークルの成果報告に加えて、産官学協同研究や工学研究所の年次報告書として重要な機能を果たして参りました。

この工学研究所所報は本刊をもって終刊となりますが、来年度からはこれまでの工学研究所所報の内容に加えて、所員の「受賞研究の紹介」、工学部特別予算として組まれている「重要機器整備関連研究」の報告書および「工学部通信」等を加えた、「神奈川大学工学研究」として衣替えし、新たに刊行される予定です。新しい「神奈川大学工学研究」ではこれまでも増して、皆様の活動や研究を対外的にも広くアピールしていける報告書として、充実させていきたいと思っております。

これまで長年にわたり、発刊にご協力頂きました方々に改めて敬意を表するとともに、今後とも一層のご協力をよろしくお願い申し上げます。

(化学教室 岩倉いずみ)

工学研究所 所報 (No. 39)

工学研究所 所長 井川 学

工学研究所 所報 編集委員会

委員長 岩倉いずみ (化学教室)  
委員 高野 敦 (機械工学科)  
松木 伸行 (電気電子情報工学科)  
本橋 輝樹 (物質生命化学科)  
吉田 稔 (情報システム創成学科)  
石井 信明 (経営工学科)  
趙 衍剛 (建築学科)

SCIENCE REPORTS (No. 39)  
of  
Research Institute for Engineering (KANAGAWA University)

Director of the Institute Manabu IGAWA

Chief Editor	Izumi IWAKURA	(Dept. of Chemistry)
Editor	Atsushi TAKANO	(Dept. of Mechanical Engineering)
	Nobuyuki MATSUKI	(Dept. of Electrical, Electronics and Information Engineering)
	Teruki MOTOHASHI	(Dept. of Material and Life Chemistry)
	Minoru W. YOSHIDA	(Dept. of Information Systems Creation)
	Nobuaki ISHII	(Dept. of Industrial Engineering and Management)
	Yan-Gang ZHAO	(Dept. of Architecture)

---

神奈川大学工学研究所所報第39号

2016年12月19日 印刷

2016年12月22日 発行

編集兼発行者 神奈川大学工学研究所  
〒221-8686 横浜市神奈川区六角橋 3-27-1

印刷所 共立速記印刷株式会社  
東京都千代田区飯田橋 3-11-24

---

RESEARCH INSTITUTE FOR ENGINEERING  
KANAGAWA UNIVERSITY  
3-27 Rokkakubashi, Kanagawa-ku, Yokohama, 221-8686, Japan