神奈川大学

工学研究所所報

SCIENCE REPORTS OF RESEARCH INSTITUTE FOR ENGINEERING KANAGAWA UNIVERSITY

NO. 3 創刊30周年記念号 NOV.2007

工学研究所所報第30号目次

巻	頭 言		
	工学研究所設立30周年に寄せて	佐藤祐一…	1
	今年度の活動計画―社会に開かれた工学研究所をめざして―	許 瑞邦…	2
総	説		
	次世代ブロードバンドアクセスネットワークのキー技術	今井崇雅…	3
	私と給排水衛生設備	鎌田元康…	11
	核子崩壊の探索一物質の安定性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	渡邊靖志…	19
	経営革新とインダストリアル・エンジニアリング	丹下 敏…	25
	待ち行列理論の生産・流通システムへの適用における一考察	北岡正敏…	31
共	同 研 究		
	流体フィルタの性能測定及び評価に関する研究 浦田暎三,	田嶋和夫…	39
	2足歩行恐竜型ロボットの製作とその歩行理論 宇佐見義之,	江上 正…	52
	新規貴金属微粒子を用いた導電性インク、導電性ペーストの製作		
	高山俊夫,渡部正利,	古川成明…	61
	放射線医療・被曝そして宇宙ガンマ線観測にも有効な		
	ダイヤモンド・コンプトン・リコイルテレスコープ(DCRT)の開発		
		北村 尚,	
	高島健,矢島佳央理,	横田 護…	70
	濃厚粉流体用 FEM ソルバーの開発 轟木義一,	酒井俊元…	77
随	想		
	建築学科草創記	髙木幹朗…	81
	神奈川大学に来てよかった		
	―三相乳化の発想から基礎研究・実用化への路程	田嶋和夫…	85
外部	部イベント		
	第22回国際電気自動車シンポジウム&展示会への出展報告	新中新二…	90
	展示会に出展して・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	山口栄雄…	91
施	設 紹 介		
	質量分析装置 AXIMA-CFR plus 及び JMS-T100CS 横澤 勉,	小野 晶…	92
国队	祭交流研究		
	日中二国間共同研究―東アジア巨大都市における新エネ・省エネ技術導入の		
	実現可能性に関する調査研究―	庄司正弘…	95
	次 報 告		97
ΙĖ	学研究所小史		
総	目 次		
編	集 後 記		110
抽	会川大学工学研究所所報執筆規程		111

CONTENTS

Preface
Celebrating the 30 th Anniversary of Research Institute for Engineering Yuichi SATO 1
Report on Annual Activities
- Toward Contribution for Society and Industry Zuihou KYO Z
Review
Key Technologies of Next Generation Broadband Access Network · · · · · Takamasa IMAI · · · 3 My Studies on Plumbing System · · · · · · Motoyasu KAMATA · · · 11 Search for Nucleon Decay – Stability of Matter · · · · · Yasushi WATANABE · · · 19 The Role of Industrial Engineering in Business Innovation · · · · · · · Satoshi TANGE · · · 25 Application of Queueing Theory for Production and Distribution Systems · · · · · · · · Masatoshi KITAOKA · · · 31
Joint Research
Measurement and Estimate of Fluid Power Filters ······ Eizo URATA Kazuo TAJIMA···39 Bipedal Dinosaur Robot and Its Locomotion ········· Yoshiyuki USAMI Tadashi EGAMI···52 Preparation for Conductive Ink and Paste Using Novel Metal Nano-Particles ······ Toshio TAKAYAMA Masatoshi WATABE Nariaki FURUKAWA···61 Development of Diamond Compton Recoil Telescope ······ Toshisuke KASHIWAGI Kinya HIBINO Shoji OKUNO Yukio UCHIHORI Hisashi KITAMURA Takeshi TAKASHIMA Kaori YAJIMA Mamoru YOKOTA···70 Development of FEM Simulator for Heavy Particle Fluid ······ Norikazu TODOROKI Toshimoto SAKAI···77 Essay
Recalling the Foundation of the Department of ArchitectureMikio TAKAGI81
"Thank Heaven, Kanagawa University where I have been auspiciously"
- The starting point of newly-invented technology on three-phase emulsification and its development to the industrial applications
External Event
A Report about Participation of EVS 22······ Shinji SHINNAKA···90 A Brief Report on Techno-Transfer Kawasaki Exhibition ···· Shigeo YAMAGUCHI···91
Introduction of Facility
Mass Spectrometer AXIMA-CFR plus and JMS-T100CS
Tsutomu YOKOZAWA Akira ONO…92
International Exchange
Japan-China (NSFC/JSPS) Cooperative Study Project
- Feasibility Study on the Application of Innovation Energy Conservation
Technology in the Large Cities in Eastern Asia – Masahiro SHOJI95
Annual Reports of the Institute 97
Ten Years' Brief History of the Institute
Contents of Scientific Reports of the Institute
Manuscript Submission Instruction 111
wianuscript Suomission Instruction 111

巻頭言

工学研究所設立30周年に寄せて

佐藤 祐一*

Celebrating the 30th Anniversary of Research Institute for Engineering

Yuichi SATO*



工学研究所が設立されてから今年で 30年になると伺いました。このおめ でたい区切りの良い年に許所長より所 報の巻頭言執筆依頼を承り、光栄に存 じます。この機会に、本学に着任以来

保管している 20 冊のバックナンバーを取り出し、読み返してみました。歴代の所長と運営委員の先生方のご努力により、着々と成果が上がりつつあることを改めて知り、敬意を表する次第です。

今年度も工学研究所にとって、そして研究所構成員であるわれわれにとってもエポックメーキングの年になったかと思います。まず、全学的に二つの学則が制定・施行されました。人は規則に指示されて行動するものではありませんが、これら規則制定の意義は大きいと考えます。私も微力ながら、総合学術研究推進委員会の一員として、規定案を纏め上げる過程で参加させていただきました。

まず、神奈川大学研究所客員教授規定の制定で、これは 岩田前所長のご提案 ¹がきっかけになっており、工学研究 所が研究推進をリードしていることを全学的にも印象づけ たかと存じます。本規定の制定は、他大学や企業の優れた 研究者に対して、今後本学における研究展開に参加してい ただくための有力な動機付けになろうかと存じます。

次に、神奈川大学プロジェクト研究所規定の制定です。 本規定は外部資金を積極的に導入し、かつ、外部の優れ た研究者、学識経験者、又は実務者を積極的に受け入れ て特定の課題を研究することにより、本学の学術研究の 一層の発展を図り、本学が社会的に貢献することを目的 としています。すでに工学研究所内では、井川教授、西 教授による二つの課題研究所が設立されており、岩田教 授、許教授がそれぞれ、プロジェクト研究を展開されて います。これらが、上記の全学的なプロジェクト研究所 となることを期待しています。

また、今年度初めてのこころみとして"テクノフェス タ in 神大"と題し、工学研究所公開がさる 10 月 20 日、 盛大に行われました。招待講演1件、4件の講演の他、 大学院生諸君を中心に 46 件のポスター発表がなされ、 参加者は120名(外部より約50名)にも達したと伺ってお ります。そして、次年度以降もこれを継続、さらに発展 させるべく、10月の教授会において、工学研究所、工 学部、大学院工学研究科の共催で総力を挙げて"神大テ クノフェスタ 2008"を実施することが承認されました。 教員各位がなされた研究成果はそれぞれの学会や専門誌 で発表され、また、大学院各研究科で進行中のプロジェ クト成果はそれぞれの単位毎に公表されていますが、本 学全体としての研究実績とその水準の高さを地域社会全 体にアピールされているとは言いがたい状況にあるよう に感じ、大変残念です。本行事は情報発信の一つとして、 大変ふさわしいものと存じます。

本研究所には大学当局の御配慮により、透過型電子顕微鏡、X線光電子分光装置、ICP 発光分光分析装置、CCD 単結晶 X線構造解析装置、レーザーイオン化飛行時間型質量分析計、電子描画装置等他大学に勝るとも劣らない高価な装置が設置されています。これらは萩原健司教務技術職員、八高優勝氏のご努力により、最高の運転状態に維持管理されており、稼働率が非常に高いのはうれしいことです。工学部が生き残り、さらに発展していくためには絶えず情報を発信していく必要があります。お互い、さらに教育・研究に邁進しようではありませんか。

1) 岩田 衛、工学研究所 所報、No. 28, p.1 (2005)



^{*}工学部長、Dean of the Faculty of Engineering

今年度の活動計画

- 社会に開かれた工学研究所をめざして一

許瑞邦*

Report on Annual Activities

-Toward Contribution for Society and Industry -

Zuihou KYO*

今年度も『内部の所員だけでなく、外部の社会に対しても役に立つ開かれた工学研究所』を目指します。特に外部に対しても開かれた工学研究所を実現するため 今年度は 以下の行事等を企画・実施を予定しています。

- 1. 工学研究所の公開(10月20日)の企画・実施 昨年度は 工学研究所公開を神大フェスタに合わせて 急遽試験的に実施しましたが 今年度は 工学研究所の 研究成果とポテンシャルを外部に示す工学研究所の公開 の準備を4月より始めました。現在 招待講演+大型研 究設備の公開・実演+プロジェクト研究・共同研究の成 果発表+ポスタ発表・実演といった具体的なプログラム を作成し この実現に向けて鋭意努力しています。
- 2. 工学研究所プロジェクト研究 (A,B,C)の募集 昨年度より 外部との交流を積極的に推進する事を目指したプロジェクト研究 (A,B,C)の制度が発足し 現在 プロジェクト研究 A1件、プロジェクト研究 B1件、プロジェクト研究 C2件が工学研究所内で承認され 研究が進行しています。また このプロジェクト研究に関連して 現在 2名の客員研究員と1名の特別研究員の採用が認められております。今後も 所員からプロジェクト研究を積極的にご提案頂き 研究所をより所員に役立つ研究所にする積もりです。因みにABCの内容は A=研究員を採用(研究組織の充実)し実行する研究 B=外部の研究資金の獲得して実行する研究

3. 研究支援専門部会の発足

従来 共同研究およびプロジェクト研究申請の審査を 担当していた委員会でありますが 今後 審査のみでな く所員の研究及び外部との交流をもっと積極的に支援す る部会として 今年度より 研究支援専門部会 (委員長 田嶋教授) を発足させ活動して頂ております。

4. 連続講演会の企画と開催

今年度より工学研究科研究委員会(委員長 青木教授) の提案を受けて工学の外部社会への還元の一環として毎年以下の2種類の連続講演会を工学研究科・研究所共同で企画・開催することに致しました。2種類の連続講演会の開催趣旨は以下の通りです。

- 1)「暮らしの中のサイエンス」:多くの人が関心を持ち一般の人の実生活に役に立つ講演会。
- 2)「科学と工学の最前線」: 科学と工学に関して専門的だが分かりやすく 専門家でも視野の広がる講演会。 工学研究科・工学研究所合同の講演会 WG (責任者 井川教授)を構成し具体的な企画を行い 広報部の協力を得て実施することに致しました。講演会 WG では 今年度は以下の題目で連続講演会を開催する予定です。
- 1) すまいと地震(暮らしの中のサイエンス) 企画責任者: 荏本教授、講師4名、4日間
- 環境問題の最前線(科学と工学の最前線)
 企画責任者:井川教授、講師6名、2日間
 - 5. 各種イベントの積極的参加の企画

毎年イノベーションジャパンを始め10前後の権威あるイベントが開催されております。このイベントは工学に関する本学の研究成果とポテンシャルを外部に積極的に展示・発表する格好な場となり得るので 各イベントに相応しい統一的題目の企画とその実行を研究委員会および産官学連携推進室と協力して推進しています。出展発表者には大変な負担ですが 本学の工学の実力を外部に知って頂く良い機会ですので 所員各位には積極的なご協力をお願いする次第です。

6. 工学研究所所報30周年記念号の発刊 本工学研究所は1976年6月に発足し 所報を翌年より毎年発刊し今年で30年目となる記念すべき年ですので 工学部長に記念の原稿執筆を依頼しました。

^{*}所長 Director Research Institute for Engineering



次世代ブロードバンドアクセスネットワークのキー技術

今井 崇雅*

Key Technologies of Next Generation Broadband Access Network

Takamasa IMAI*

1. はじめに

1. 1 情報ネットワークの進展

1990 年代半ば以降、インターネットの商用化、普及によりわが国の流通トラフィック規模は年率 1.5 倍から 2 倍で指数関数的に増大し続けている[1]、[2]. このユーザまでのトラフィックを担う情報ネットワークは、図1に示すようにユーザと通信会社ビル間の通信を行うアクセスネットワーク及び通信会社ビル間の通信を行うコアネットワークから構成される. 指数関数的な需要増を満たすため、コアネットワークでは、この 10 年間で伝送媒体である光ファイバあたりの伝送容量を数 Gbit/sから1Tbit/s程度へ約1000倍増を可能とする数々の技術の研究、それを適用した新規通信システムの開発・導入が行われてきた[3]、[4]、[5].

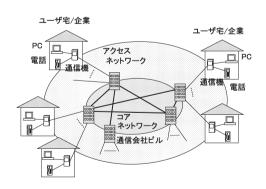


図1 情報ネットワークの構成

コアネットワークでは、多くのユーザの情報を1システムで一括して伝送することにより、ユーザ当たりの設

*教授 情報システム創成学科

Professor, Dept. of Information Systems Creation

備費及び工事費の低減を図れる. このため開発した新規 システムの追加・更改を経済的に行うことは比較的容易 である. 一方アクセスネットワークは、1ユーザのため の設備の割合が多いため、システムの新設はユーザあた りの通信コスト増に直結しやすい. 特に線路設備は物 品費に加えて工事費用もかかることから新設・増設上特 に留意が必要である. このため、アクセスネットワーク では既敷設のメタル線路で実現可能な ISDN, ADSL などに よるサービス大容量化を優先して実現してきた. しか し、一般ユーザも十年程前の数十~100kbit/s のモデム やISDN中心から、イーサネットなどをインタフェースと する10~100Mbit/sとやはり以前の約1000倍容量のサー ビスへの需要が急増する状況となっている。このため一 般ユーザ向けのアクセスネットワークでも,数桁違いの 需要増に対応可能な新規線路敷設も念頭に置いたブロー ドバンドシステムが嘱望されてきた.

アクセス系線路は

- ・ 今後の長期間の需要増に応えられること
- 敷設工事が容易であること

が望ましい.この観点から,

- ・ 数十THz以上の通過帯域をもち,数十Tbit/s以上の 潜在的な伝送可能性を有する
- 軽量かつ細径で敷設に場所をとらない

光ファイバ線路を活用した光アクセスネットワークに関する研究・開発が進められてきている [6].

1. 2 アクセスネットワークの課題

光アクセスネットワークの研究は後述する経済的なPON方式を中心に進められ、1997年に世界ではじめて10Mbit/sを共有するPON方式であるSTM-PONによるアクセスサービスが使用開始された. その後、B-PON、GE-PONと呼ばれるより大容量で経済的なシステムが開発・導入されてきた[6].

図2に今までに開発されてきた各システムの使用開始時期と光ファイバあたりの伝送容量を示す. 破線は年率1.5倍での通信トラフィック増大時の傾きを示している. 指数関数的な需要増大傾向に対応して通信容量の大きなシステムが使用開始されてきたことがわかる. 今後数年間は2004年に使用開始された概ね1Gbit/s/光ファイバ容量のGE-PONシステムにて、一般ユーザ向けのブロードバンドサービスを提供可能と考えられている.

通信容量 [Gbit/s/光ファイバ]

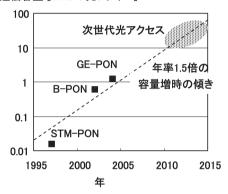


図2 光アクセスシステムの使用開始時期と容量

一方.

- ハイビジョン TV の普及,
- 地方中小都市で撮像した医療画像を遠隔でリアルタイムに診断する遠隔医療をはじめとした超高精細画像通信需要の増大、
- 複数のコンピュータが連携して大規模な計算を 行うグリッドコンピューティング、タグによる物 品管理など人間より桁違いに多い「もの」と「もの」との通信需要の増大、

などにより、今後も指数関数的な需要増が続くと政府及び有識者は予測している[7]. このような情勢を踏まえて、よりブロードバンドで経済的な次世代ブロードバンドアクセスネットワーク技術構築を目指し、図 2 の網掛け領域を念頭においた研究・開発が進められている. システム経済化のポイントの一つである標準化についても、アクセスネットワークの標準化に関する議論を行っている FSAN(Full Service Access Netowork)や IEEE で議論され始めている[8]、[9].

本稿では、このような次世代光アクセスネットワークを支えるキー技術の現状及び将来動向につき記す. 第2節で現在の光アクセスネットワークの概要、第3節、第4節にて次期ブロードバンドアクセスとして有望な2つ

の技術分野の動向を記し、第5節にてまとめる.

2. 光アクセスネットワーク技術

図3は現在使用されている光アクセスシステムの基本構成例である. 通信会社内の1つの光送受信装置(OLT: Optical Line Terminal)と複数のユーザ宅の通信装置(ONU: Optical Network Unit)が光ファイバにより、木の幹と葉のような関係でつながっている. このような接続は Point-to-MultiPoint (P2MP)接続と呼ばれ、携帯電話やPHS などの無線アクセスシステムにも採用されている. 本構成により高価な通信会社側装置および伝送媒体の大半を複数のユーザで共有することでシステムコストの低減を図ることができる. 図3に示す構成は光ネットワークでは特にPON(Passive Optical Network)とも呼ばれている.

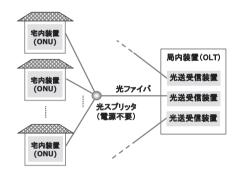


図3 光アクセスネットワークの構成例

一方, P2MP 接続では 1 つの送受信装置と多数の宅内装置間で効率的に通信を行うための方式が必要である. 以下に 3 つの主な方式を記す.

第 1 は図 4 に示す時分割多重-多元接続(TDM-TDMA: Time division multiplexing—time division multiple access)方式である。 A'さんからAさん,B'さんからBさん,C'さんからCさんと、複数の情報の通信をまとめて行う場合、TDM では図 4 に示すように時間帯を区切って,A さん,B さん,C さんへの通信を行う。 このためにOLT では A'さん,B'さん,C'さんからの信号を順次送り出す多重化装置が,また各ユーザ宅のONUでは受信した信号のうち自分宛の信号のみを取り出す多重分離装置が必要である。 TDMA は,複数のONUからひとつのOLTへの方向,以下これを上り方向,逆を下り方向という,の通

信において、各 ONU からの信号が光カップラで合波され 同一光ファイバ内を通過する時刻がかさならないように 設定し、それぞれの ONU からの信号を順次 OLT で受信する 方式である。

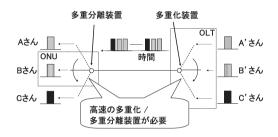


図4 時分割多重方式の基本模成

二つ目は波長分割多重-多元接続 (WDM-WDMA: Wavelength division multiplexing-Wavelength division multiple access) 方式である. WDM-WDMA 方式は例えば図5に示すOLTからONUへの送信において、ONUごとに異なる送信波長を用い、受信側で自ONU宛の信号のみを通過させる分波装置を用いることで、各信号間の干渉なく通信を行う方式である.

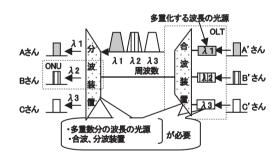


図5 波長分割多重/多元接続方式の基本構成

もうひとつは図 6 に示す構成の符号分割多重-多元接続 (CDM-CDMA: Code division multiplexing-Code division multiple access) 方式である。 これは互いに直交する固有の符号を各のNU に割り当て,送信信号を各固有の符号で広帯域のスペクトルに拡散したのち送信し、受信側で逆拡散といわれる操作によりもとの信号に変換し、受信する方式である。

以下ではこれら3つの方式を TDMA 方式, WDMA 方

式、CDMA 方式と記す. 光アクセス系に適用した場合の 3方式の得失を表1に示す.

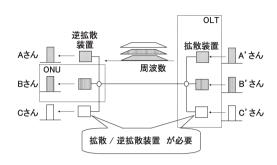


図6 符号分割多重 / 多元接続方式の基本構成

表1 光アクセスにおける各種多重化/多元接続方式の得失

	TDMA	WDMA	CDMA
主要部品の実現容易性	0	0	Δ
OLTの小型化、経済化	0	Δ	Δ
周波数利用効率	Δ	0	0
チャンネル追加の容易性	Δ	0	0

TDMA 方式は、OLT 内にひとつの光源と受光素子があれば PON 接続された全ての ONU と通信可能なため装置の小型化・経済化が容易で今の光アクセスネットワークに使用されている。一方、電気回路や光源、受光素子の応答速度により多重数が制限されるため 10~数十 Gbit/s 程度以上の経済的な高速化は容易ではない。このため光ファイバのもつ広帯域性を十分生かせる方式とはいえない。

WDMA 方式では、送受信機内の光源として発振波長が重ならない多数の光源を用いることで、光ファイバの広帯域性を有効に活用した非常にブロードバンドなシステム構築が可能である。一方で、波長多重数分の光源が OLT に必要なためコストが高止まりしやすいなどの課題がある。

CDMA 方式では周波数利用効率を最も高くでき、また通信に使用するチャンネル容量も容易に可変との特長から携帯電話システムに使用されている。しかし、CDMA 方式の提案は 60 年以上前になされたが長らく軍事など高価でも使用価値のある分野への適用に限られていた。 一般ユーザ用としては、携帯電話の第 2 世代以降と最近であることからも垣間見られるように、拡散、逆拡散装置などの装置、構成部品への要求条件が非常に厳しく、一般ユーザ向けに求められる小型化、経済化の実現には相当の

技術開発が必要である. 光通信においても CDMA 方式は精 力的に研究はなされているが, 光領域での拡散, 逆拡散用 デバイスやそれらの素子を有効活用する方式の提案など 実用化に向けて検討すべき課題は多い.

以上から、次世代システムへの適用を考えると OLT あたりの総通信容量が数 Gbit/s/光ファイバ程度なら TDMA 方式、数 Gbit/s/光ファイバ~10Gbit/s/光ファイバなら 状況に応じてTDMA 方式あるいはWDMA 方式、それ以上なら現状では WDMA 方式が有望といえる.

また、PONに接続されたONUをいくつかのサブグループ に分け、サブグループ内のONUの信号をTDMA方式で多重 したのち、さらに複数のサブグループの信号をWDMA方式 で多重する、TDMA-WDMAハイブリッド方式も有望な方式 として挙げられる。

以上に記した次世代光アクセス技術で想定されうる今後の展開を図7に記す[10].

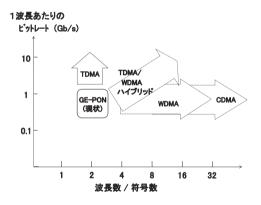


図7 次世代アクセス方式の動向

3. 時分割多重技術の課題と動向

現在、光アクセス系では~1Gbit/s/光ファイバの TDMA 方式が用いられている。 イーサネットと同じインタフェースとすることでイーサネット汎用部品の活用による装置コストの低減が図られている。 Ethernet の頭文字をとって E-PON, あるいは特にギガビットの容量を持つことを意識して GE-PON と呼ばれる。

現在はさらに時分割多重度を上げた 10Gbit/s/光ファイバの光アクセスシステムが研究されている. すでに 1996 年に実用化された 10Gbit/s/光ファイバのコアネットワーク用の各種技術を活用することで経済化が期待で

きる. 一方、新たに研究すべき主要技術としてはバースト受信技術が挙げられる. 図8に示すとおり、OLTへは各のNUから個別に光信号が送信される. また各のNUとOLT 間の光ファイバ長、従って伝送損失が異なるため送信のNUごとに受信光電力も大きく異なる. このため受信装置では、ONUごとにパルス有無を判別する最適光電力しきい値が大きく異なり、判別するタイミングも一致しない受信パルス列を次々即座に受信できるバースト受信技術が求められる.

10Gbit/s/光ファイバでは、電気部品及び光変調器、受 光素子の応答性能限界のため上記の要求条件を満たすバ ースト受信が困難であった. しかし今春受信信号の高 速応答を可能とする受信系構成法の提案がなされ実験的 にもその有効性が示されたことで今後実用化にむけた展 開が期待されるようになった[11]. 表 2 に従来の 10Gbit/s 光アクセス受信機の最高性能レベルの特性例 [12]及び商用化されている GE-PON の標準化規格と対比 した特性を示す. プリアンブルタイムは,バーストパル ス受信開始から受信信号の判別が可能になるまでの所要 時間である. この間ダミー信号を送信することで受信 パルス有無の最適識別レベルやクロックタイムと呼ばれ る識別時期の最適化を行う. また,ガードタイムはひと つの ONU からのバースト信号受信終了ののち、次の ONU からの信号を受信開始準備完了までの時間で,OLT 内の 光受信機の応答速度に左右される. この2つの時間は ともに通信不能なため十分小さいことが望ましい。

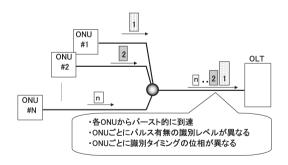


図8 バースト光受信に関する課題

表2のとおり、従来の10Gbit/sでの報告に比べ、参考文献[11]では桁違いに早い応答速度を実現し、商用化されている1Gbit/sシステムの標準化規格も十分満足する結果が得られていることから10Gbit/s時分割多重でも同様の高効率な多重化が期待できる。

表2	バース	ト光受信機の応答速度
----	-----	------------

項目	単位	Ref. [1]	Ref. [2]	IEEE 802.3.ah
ピットレート	Gbit/s	10.3125	10.3125	1.25
プリアンブル タイム	ns	75	980	800
	bit	768	10106	1000
ガードタイム	ns	99.3	100000	1024
	bit	1024	103125	1280

4. 波長分割多重技術の現状と動向

コアネットワークでは、当初 TDM の多重度を上げることで大容量化が行われてきた[3]. しかし、106bit/s を超える高速化には回路部品の応答速度や通信路での波形 歪増大などの課題があり、以後は概ね WDM 方式による大容量化が進めてられている[4], [5].

アクセス系においても、106bit/s/光ファイバ以上は同様の理由から WDMA 方式を用いたシステムが有望視されている. すでにコアネットワークで確立した波長多重技術を用いれば、大容量化自体は可能である.しかし、アクセス系で最も重視される経済性を勘案すると以下に示す主要課題の解決が望まれる. 現在一般に敷設されている 32 分岐の PON への WDMA 方式の適用を考えると、OLTと 32 個の ONU 間の 32 組の送受信波長の組み合わせが必要となる. この場合、例えば 32 種類の ONU の製造やユーザへのサービス開始時の波長割り当て、当該波長のONU の配布を前提とすると、装置費用も稼動もかかり経済的ではない。

上記構成に替えて1種類の ONU を PON に接続したときに送受信波長が上記 32 通りの組み合わせのひとつに,安価かつ適切に設定できる装置及びシステムが実現できれば上記の課題を解決できる. このような ONU の実現方式をカラーレスと読んでおり,各種提案・研究がなされている[13].

大きくは、図9記載の2つの方式に大別される. 波長供給方式は、OLT から供給された光をユーザ宅からの通信に用いる方式である. もうひとつは、各ユーザ宅にある ONU に光源を内臓させ OLT から上り発振波長を遠隔制御する方式である.

前者は光源を内臓しないユーザ宅装置内を安価にしやすい. また温度によって変化しやすい光源波長は、温度管理が容易な通信会社側装置に光源を内臓することで光源波長の安定化を容易にできる.

しかし、通信会社から供給した光は、ユーザから戻ってくる信号光と干渉するため、上り下りを同一光ファイバで伝送する現在のPON構成を用いる場合、数Gbit/s以下の通信しかできないという欠点がある。

0NU 光源内臓方式では、光源波長を制御する方式や、図10 に示す広い発信波長で発光する光源出力を光フィルタ透過波長を制御して切り出す方式 (スペクトルスライス方式)が提案されている. 広い発信波長をもつ光源の場合、受信時の雑音が大きく高速受信が困難なため、数Gbit/s 程度以下の容量に制限される.

以上から WDMA 方式を用いた高速伝送に向けては波長可変光源を用いた方式を中心に研究が進められている.

	波長供	給方式	ONU光源内臓方式		
実現方式	注入同期 コピーレント光 波長可変LD		スペクトル スライス		
ONU構成	OR OR FP-LD	OR OR TLD WDM Mod+amp WDM /		↔ OR BLS	
変調方式	直接変調 (インコヒーレント光 を供給)	外部変調 (コヒーレント光 を供給)	外部/直接変調	直接変調	
伝送速度(上 り)	~ 1.25Gbps	~ 10	Gbps	~ 1.25Gbps	
ONUでの 波長制御有無		#	ī		
所要ファイパ教	2 (1の場合は 短伝送距離)		1		

TLD:波長可変レーザ BLS: 広帯域北瀬 FP-LD:ファブリペローレーザダイオード OR:光受信器 Mod+amp:光増幅器+外部変調器 『:波長可変フィルタ : (供給光を使用した上り光信号

図9 各種カラーレス方式

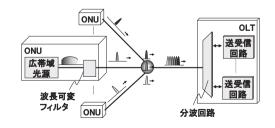


図10 スペクトルスライス方式の構成例

波長可変光源を用いた方式での主な課題は、

- (1) ユーザが ONU を設置した段階で、その ONU の発振 波長、受信側での受光波長を低コストでプラグア ンドプレイに設定できる技術、
- (2) 1つのPON内のOLT, ONUにある多数の送信光源の 低価格化を可能とする技術

が挙げられる,

(1) については、イーサネットにおける CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection) と同様のプロトコルにて追加の光源を用いることなく安 価にかつ確実に設定できる方式の提案,実験的検証が最近なされた[14],

(2) については、1 つの波長検出用光フィルタで OLT 内の全ての光源及び全ての ONU 内の光源の波長ずれを高精度に検出の上、各光源を安定化させる方式が提案、検証されている[15]、[16]. またさらに 1GHz 程度の光源波長安定度を許容できる場合には、波長検出することなく光源波長をより簡便に安定化させる方式も提案のうえ、実験的な確認を行ったとの報告もある[17].

4.1 ONU 波長設定のプラグアンドプレイ技術

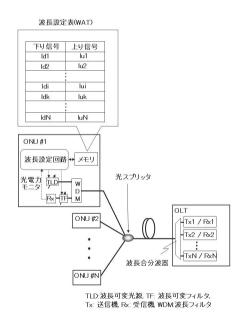


図 11 遠隔波長設定手順

0NU 波長設定のプラグアンドプレイを可能とする波長 設定手順案を以下に示す[14].

- ONUからOLTへの上り信号及びOLTからONUへの下り信号の波長対をあらかじめ決定しておく。例えば、最大N個のONUを接続できるPONの場合、(上り信号の波長、下り信号の波長)として、(λu1,λd1)、(λu2,λd2)、・・・、(λuN,λdN)の対を決定しておく。
- 2. ONUがPONに接続された時点で、ONU内の波長フィルタにより、OLTから送信されている信号波長を測定する.
- OLT から送信されていない信号波長のひとつに対応した上り信号波長を ONU 内のメモリで読み取り、その波長で送信する.
- 4. OLT は、ひとつの ONU からのみ 3. で送信された波長を受信した場合、対応した下り信号波長で ONU に送受信波長対確立の旨の信号を送信する、同一波長で2個以上の ONU から信号を受信した場合は返信しな
- 5. ONU は一定時間内に OLT からの返信がない場合は、 ランダムな時間ののち、2以降の動作を繰り返す.

これにより,波長設定用の光源など新たな光部品を追加することなく,確実に波長設定を行える.

N=8の PON において当初 5 台の ONU が通信中の状態ののち複数の ONU を同時に PON に接続させる実験により、上記手順の妥当性の検証結果も報告されている[14].

4.2 PON で用いる複数光源波長制御信号の一括検出

PON に接続された全ての ONU 内の光源波長の誤差を一 括検出の上,一定間隔に制御する経済的な系構成提案を 図 12 に示す[15]. ONU#1~#N の送信光信号は, OLT 内の光 合分波器で ONU ごとの各波長に分離されたのち,送受信 機#1~#N でそれぞれ受信される. このため,光合分波 器には第 i ポートは ONU #i の光源波長のみ透過する 1 ポート入力, N ポート出力の光合分波器を用いる. ここ で各 ONU の光源波長を正弦波で微小変調させ最大値制御 を行う. 誤差検出用光信号は OLT 内の各送受信器で電 気信号に変換の後,誤差信号に変換され,同じ送受信機の 送信光信号に波長制御信号を重畳させることで各 ONU の 送信波長を制御する. 本方式は、PON の光合分波器を波 長誤差検出用にも兼用させているため検出用の分波器が 不要で経済的である. また光源波長を微小変動させる 以外に光合分波器のN個の最大透過波長を一括変動させ る方法でも同様の一括検出が可能である。 この方式で は ONU 内に発信機が不要なためより経済的となる. ま

た上記 ONU の波長制御系と同様の方法で OLT 内の送信光源の発振波長も一括検出可能である [16].

本技術及び 4.1 に示した技術を用いた簡便な構成の ONU, OLT で敷設済み損路と同等の損失の光ファイバで 1.25Gbit/s を8波長多重可能との検証結果も報告されて おり, 実用システムへの適用が期待される[17].

4.3 光フィルタを用いない波長設定,制御法

前節の波長安定化法では、光通信用光源である半導体 レーザは、温度及び駆動電流量によって発振波長が大き く変化するため、検出波長情報に基づく波長制御が必要 との考えに基づいている.

これに対し、光源の駆動電流、温度と発振波長の関係を精密に把握することで、波長検出することなく駆動電流・温度の制御のみの簡易な波長制御方式も検討されている。半導体レーザの経時劣化を考慮しても、温度と駆動電流を高精度で設定することで±1GHz 程度の安定度を得られるとの可能性も示され[18]、高い周波数密度で波長多重されている506~100GHz 間隔の波長多重システムへの適用も念頭においた研究が進められている.

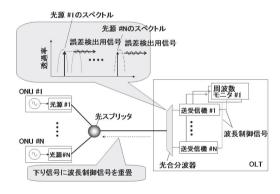


図 12 複数光源波長の一括制御系

5. まとめ

より快適な社会の実現に向けたブロードバンドネット ワーク技術のうち、アクセス系の現状と近未来といえる 次世代に向けた研究動向に焦点をあてて記した。

この分野では更なる将来へ向け光アクセス用の CDMA や光へテロダイン検波方式などの最先端分野を含め活発に研究がなされており、今後の進展が注目される.

参考文献

 長健二朗 インターネットと計測技術, iij. news pp. 8 - 9, vol. 80, Jan. /Feb., 2007.

- [2] IX Backplane Maximum/Minimum Traffic Volume, http://www.jpix.ad.jp/jp/techncal/traffic.html.
- [3] M. Murakami, T. Takahashi, M. Aoyama, T. Imai, M. Amemiya, M. Sumida and M. Aiki, "System Performance Evaluation of the FSA Submarine Optical Amplifier System," IEEE J. Lightwave Technol., Vol., 14, No. 12, pp. 2657 2671, Dec., 1996.
- [4] M. Murakami, T. Matsuda, H. Maeda, Y. Tada, and T. Imai, "WDM Upgrading of an Installed Submarine Optical Amplifier System," IEEE Lightwave Technol., Vol. 19, No. 11, pp. 1665 - 1674, Nov., 2001.
- [5] 織田一弘、戸出武男、片岡智由、佐野明秀、須藤篤史、小池良典、 久保勉、松岡伸治、"ラマン増幅を用いた商用大容量 L バンド DWDM システム、"電子情報通信学会 2005 年秋通信ソサイエティ 大会、B-10-44、2005.
- [6] H. Shinohara, "Broadband Access in Japan: Rapidly Growing FTTH Market," IEEE Communication Magazine, pp. 72-78, September, 2005.
- [7] 総務省報道発表資料 別添 我が国のインターネットにおける トラフィック 総量 把握 http://www.soumu.go.jp/s-news/2007/pdf/070822_2_bt1.pdf 2007年8月22日
- [8] 坪川信 FTTHに関する標準化動向,次世代ブロードバンド技 術の利用環境整備に関する研究会資料, 2007 年 4 月 27 日
- [9] FSAN ホームページ http://www.fsanweb.org/nga.asp
- [10] T. Imai, "FTTH Systems: Deployment and Next Challenges", Tenth International Symposium on Contemporary Photonic Technology, Tokyo, Japan, Tech. Dig. B-2, pp17-20, Jan. 10-12, 2007.
- [11] S. Nishihara, S. Kimura, T. Yoshida, M. Nakamura, J. Terada, K. Nishimura, K. Kishine, K. Kato, Y. Ohotomo, and T. Imai, "A 10.3125-Gbit/s SiGe BiCMOS Burst-Mode 3R Receiver for 10G-EPON Systems," Optical Fiber Communication Conference (OFC2007), Mar. 25-29, 2007, Anaheim, California, U.S.A., Tech. Dig. PDP8.
- [12] N. Suzuki, J. Nakagawa, "A 10G-PON Physical Medium Layor link with new 10.3-Gbit/s LAN-PHY based Optical Interfaces for Future PON Networks," European Conference on Optical Communication (ECOC2006), Sept., 24-28, 2006, Cannes, France, Tech. Dig. Mo. 4.5.4.
- [13] Y. Kani, K. Iwatsuki and T. Imai, "Optical multiplexing technologies for access—area applications," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., Vol. 12, No. 4, pp. 661—668, Jul./Aug., 2006.
- [14] H. Suzuki, M. Fujiwara, T. Suzuki, N. Yoshimoto, K.

Iwatsuki, and T. Imai, "Colorless and plug-and-play technologies for WDM access over existing power-splitter-based infrastructure," Optical Society of America, Journal of Optical Networking, Vol. 6, No. 7, 830-839, 2007.

- [15] M. Fujiwara, H. Suzuki, N. Yoshimoto and T. Imai, "Centralized Wavelength Monitoring/ Stabilization Technique by Dithering Temperature of LD in Power-Splitter-Based WDM-PON", Optical Fiber Communication Conference (OFC2007), Mar. 25-29, 2007, Anaheim, California, U.S.A., Tech. Dig. JWA84.
- [16] T. Suzuki, H. Suzuki, M. Fujiwara, N. Yoshimoto, K. Iwatsuki, and T. Imai, "Simple Multi-wavelength Stabilization Technique Using a Peridic Optical Filter for WDM Access Networks", The 12th Optoelectronics and Communications Conference (OECC2007), July 9-13, 2007, Yokohama, Japan, Tech. Dig. 11A2-3.
- [17] H. Suzuki, M. Fujiwara, T. Suzuki N. Yoshimoto, H. Ki, mura and M. Tsubokawa, "Wavelength-Tunable DWDM-SFP Transceiver with a Single Monitoring Interface and Its Application to Coexistence Type Colorless WDM-PON," European Conference on Optical Communication(ECOC2007), Sept., 16-20, 2007, Berlin Germany, Tech. Dig. PD 3.4.

 [18] S. Kawai, N. Yoshimoto, K. Iwatsuki and T. Imai, "Simple
- and cost effective wavelength setting and monitoring method using software-based wavelength estimation for WDM pluggable optical transceiver", Optics East, Sept. 9-12, 2007, Boston, U.S.A, Paper 6775-13.



私と給排水衛生設備

鎌田 元康*

My Studies on Plumbing System

Motoyasu KAMATA*

1. はじめに

私は、2007年3月に東京大学を定年退職し、4月から本学でお世話になっている. 1968年に東京大学工学部建築学科を卒業後、1年間建設省(現・国土交通省)で勤めた後、大学院に入りなおし、「建物近傍における汚染物拡散に関する実験的研究」と題する学位論文で工学博士の学位を取得した後、1974年に助手に採用され、講師・助教授・教授として勤めてきた.

学位論文の題目が示すように、研究当初は空気環境、 それに関連する建築設備を専門としていたが、講師として採用され、最初に勤務した東京大学工学部総合試験所の研究室に、空気調和・衛生工学会からの委託研究で設置された給排水設備の実験装置があり、その世話をしなければならないことから、建築水環境、それらに関連する給排水衛生設備の研究を始めるようになった。本報では、「私と給排水衛生設備」と題し、私が行ってきた研究内容を中心に、給排水設備に関し、総論的に述べてみたい。

2. 大便器からの汚物搬送^{A-1~A-4, B-1~B-2)}

皆さんは、大便器を使用し、洗浄水を流した後の汚物が、排水管の中をどのように流れていくかには興味がないと思われる。私が、先に述べたように東京大学総合試験所に研究室をもって最初に受けた委託研究は、S社からのもので、同じ洗浄水量でも遠くまで便器から排出されたトイレットペーパー・大便などの汚物が搬送できる管を開発してほしいというものであった。委託者側にはある程度のアイデアがあり、下水道などで用いられている卵形管を基本に考えようということになった。

委託者側が樹脂管の製造メーカであったことから,望 みの形状の管を提供してくれたが,問題となったのが, 試験に用いる大便の代用物と、流すトイレットペーパーの量である。医者が書いた大便に関する本を読み漁り、大便の太さ、長さなどを決定し、さらには、大便の水に対する比重が、ひどい便秘の後でも1.05程度であることをつきとめ、大便の代用物の試作に取り組んだ。研究室にいた技官の方が、熱心に検討し、乾いている時は固くて工作しやすく、含水するとやわらかくなるPVA(ポリビニールアルコール)スポンジに鉛の小球を入れて比重を調整することを提案してくれた。また、トイレットペーパーの量に関しては、衛生陶器のメーカであるT社のデータなどを参考に決定し、実験を開始し、決定した図1に示す形状の管を、さらに敷地の広い住宅の長い排水管に施工し、半年ほどの実使用での実測を行い、市販品の完成にこざつけた。

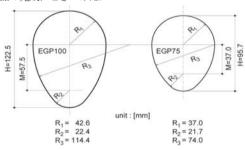


図1 卵形管

この管は、同じ勾配での汚物搬送距離が、従来の円形管に比べ2倍以上になることを学会などで発表した際に、以前より給排水設備に携わってきた方々から、空気調和・衛生工学会の規格である「HASS 206 給排水衛生設備規準」(現在は、「SHASE—S206 給排水衛生設備規準・同解説」)では、流速0.6m/s以下となる勾配は認めていないことから、利用価値が低いことを指摘された。そこで、0.6m/sの根拠を質問すると、明確に答えてくださる方がおらず、文献調査を開始した。その結果判明したのが、0.6m/sが要求されるようになったのは、

*教授 建築学科

Professor, Dept. of Architecture

		AT 41 145 AV 5 B FA - 151
表 1	H本での	活物搬送試験の例

試験法	代 用 汚 物 の 内 容	配 管 条 件*5
	スポンジ2個+ペーパー4個	管径:75mm、勾配:1/100
	スポンジ:PVA*3 (直径 25mm×長さ 80mm、比重:含水時で 1.05)	曲り:大曲り1個
	ペーパー:JIS規定のもの(幅 114mm×長さ 760mm、径 50mm に丸めたもの)	管長:10m (1m+9m)
BL*1	[洗落とし便器-超節水型*4]	
	ペーパー: JIS規定のもの1mを8折りし、これを6枚重ねてロール状にした	
	ものを,内径 40mm~50mm の筒に入れ,溜水部に入れ,完全浸水した後押し出した	
	もの	
	スポンジ4個+ペーパー7個	管径:75mm、勾配:1/50
福岡市	スポンジ:PVA*3 (直径 22mm×長さ 80mm、比重:含水時で 1.05)	曲り:排水ますによる曲り2個
	ペーパー: J I S規定のもの(幅 114mm×長さ 760mm、径 50mm に丸めたもの)	管長:43m (3m+16m+24m)
	味噌 5 個(200 g) +ペーパー 7 個	管径:75mm、勾配:1/50および1/100
メーカ*2	味噌:赤味噌,直径30mmの円筒状(数日間天火干し),比重は1.25	曲り:なし
	ペーパー: J I S規定のもの(幅 114mm×長さ 760mm, 径 50mm に丸めたもの)	管長:43m (3m+16m+24m)
*1:(財)べ	ターリビング, *2:T社の例, *3:ポリビニールアルコール, *4:6L/回,	*5:すべて便器下落差は0.5m

アメリカでディスポーザーが普及し、シーフードレストランで牡蠣の貝殻を砕いたものを排水管に流し込んでしまうことが多くなってからであること、土木で砂礫などが流れる力を求める掃流力の式を用いると、この数値が求められることを発表したところ^{A-4)}、誤解がとけて採用してくれる自治体が出てきた。また、採用していただくために、整理用ナプキン・紙おむつ・布製おむつなど、本来大便器に流してはいけないものの実験をさせられたことも、苦い思い出として残っている。

日本では、このように汚物の排水管内での搬送距離に 関する試験が行われているが、その例を表1に示す(表 中のBLの基準は、私どもの研究に基づくものである).

なお、アメリカでは、Energy Policy Act で厳しい節水の基準が定められ、住宅に関しては1994年1月1日から、その他の建物に対しては1997年1月1日から施行されている。この基準では、大便器の洗浄水量は1.6gpf(1.6gallon/回、約6L/回)以下となっているが、十分な検討が行われないまま決められたため、1回の洗浄では汚物が便器から排出できない、詰まり事故が頻発するなどの問題を生じたが、一方では、日本のメーカT社の製品が、問題を生じにくい便器として高く評価された。

なお、比重1.05の大便、水を含むとゆっくり沈む比重 1.0程度のトイレットペーパーなどの搬送距離には、当然 ながら水深が極めて重要となる. 大便器から排出された 洗浄水の水深は、流下するに従い小さくなる。直管での水深変化を数値計算で求めることは比較的容易であるが A-1)、曲がりや合流がある場合の計算は難しい。後者の場合について検討したのが文献 B-1)および B-2)である。

3. 雨水利用^{C-1)}

おなじみのアメダス (AMeDAS. 降水量の観測個 所数は全国で約1.300) による降水量のデータを基に、雨 水利用設備における集水面積・雨水貯留槽と雨水による 節水率の関係を計算することは比較的容易である. 問題 なのは、降水量には雪・あられなどの固形降水も含まれて いることと、水平面で測定している点である. 後者の問 題に関して, 雨水利用設備に興味を持った修士課程の学 生に、勾配屋根を用いた実測を行わせ、その結果を基に、 気象データの降水量と風向・風速のデータからまとめて もらったのが、図2に示す相当屋根面積係数=(勾配屋 根で集水できる降水量)/(勾配屋根の水平投影面積に 等しい面積での降水量)である.地域によって異なる結 果が出ると予想はしていたものの, 予想以上の差が生じ, 驚いたことを思い出す. なお、平らな屋根・屋根傾斜角 =0でも相当屋根面積係数が100%より小さくなるのは、 蒸発などによりほとんど集水できない、少ない降水量の 雨がしばしば降ることによる.

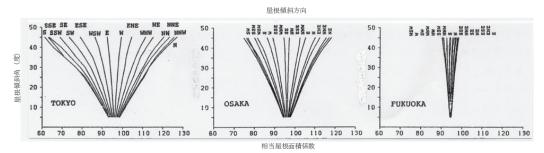


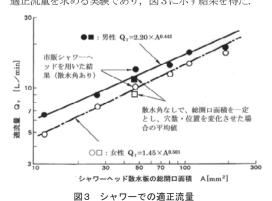
図2 相当屋根面積係数

行 為	適 温 °C	適流量 L/min		注	意	事	項		
食器洗浄	39. 0	7. 5	普通吐水	水栓の種類により、適流量は多少異なると思われる					
及前儿子	39.0	5. 0	シャワー吐水	/1八王 / / 1里共見 (こよ	. ソ, . 週(川里)	よダク共体 (3) (- 101474 00		
洗 顏	37. 5	8. 5	洗髪用の大型洗剤	。 記 思 た 信 田 1 た 坦	今の値でなり	小刑 . 由刑	の進品男での	海添畳け	わトn
手洗い洗濯 39.0 10.5			も多少小さい値に		ログ順でめり	, 71至: 丁至	(V) (V) (L) (L) (L) (L) (L) (L) (L) (L) (L) (L	週(川里/よ, 〜	.402.9
洗髪	40.5	8.0	1 099/1/CV 直(c	-14 2 C 154 74 0.0					
入 浴	40.5	_	浴槽への落とし込	込み時間に関しては	は, 短いほど	評価がよいた	め、適流量は拡	是示せず	
手持ち シャワー	40. 5	8. 5	入浴を伴う、Mタイプ*1・女性のみの実験から提案. 条件が異なる場合は、以下のように扱のが妥当と思われる 適温:シャワーヘッド散水板、男女によらず同じとし、入浴を伴わない場合は 42℃. 適流量 男性の場合はこの値より大きい、シャワーヘッド散水板が異なる場合は、図3などを参考に 育決定(*1:総開口面積約43mm²)					流量:	
壁掛け シャワー	42. 0	*2	*2:散水板の穴の)総開口面積から	図3に示す式	で計算. 散水	:角が大きい場	合は1割程度	多くす
備考			動を嫌うシャワーの ーヘッド散水板を使					in. ただし,	適流量

表2 適正湯温・湯流量の提案値

4. 適正湯温・湯流量D-1~D-2)

総合試験所での講師を終えて、建築学科で助教授にな って半年も経たずに上司の教授に急逝された. 教授が住 宅設備・住宅内の環境を専門にしていたことから、その 方面での多くの委員会に参加せざるを得なくなった. そ の一つが、(財)ベターリビングでの給湯機関連の委員会 であり、認定基準の作成などに携わることとなった。そ のため、空気調和・衛生工学会などでも給湯設備の専門 家ということになり種々のデータ提供を求められたが, 急速に普及していた家庭用給湯設備に関する設計用デー タが皆無であることに唖然とし、エネルギー会社の支援 のもと、学会に設置してもらったのが「給湯設備の使用 感に関する研究」委員会である. そこでは、単なる使用 勝手のみならず,使用上感じる幅広い総合的な感覚を"使 用感"と定義し、使用感の上で優れた給湯設備とはいか にあるべきかの検討を幅広く行った. まず最初に行った のが、各使用用途での適正な湯温・湯流量に関する被験 者実験であり、その結果を基に表2をまとめた、特に力 を入れたのが、急速に定着しつつあったシャワー浴での 適正流量を求める実験であり、図3に示す結果を得た.



シャワーヘッド散水板の穴の総開口面積をA,流量をQ,流速をV,水の密度を ρ とすると、シャワーヘッド散水板の穴の出口での力の合計Fは、次のようになる。

$$F = (1/2) \rho V^{2} \times A = (1/2) \rho (Q/A)^{2} \times A$$
$$= (1/2) \rho (Q^{2}/A)$$

したがって、力が一定として適正流量 Q_T が決まるとすると、適正流量 Q_T は $A^{1/2}$ に比例することになる。図3に示すように、適正流量と穴の総開口面積の関係がほぼこの仮定に合致することから、「適正流量は人体が受ける力で決まると思われる」とした論文 $^{D-1}$)で空気調和・衛生工学会の論文賞を受賞した。その後、この仮定が正しいのか常に気にしていたが、学会賞受賞後約10年経って、修士課程の学生が詳細な実験を行い、ほぼ間違いないことを確認してくれた $^{D-2}$)。

5. 湯使用に関するアンケート^{E-1~E-2)}

上記「4.適正湯温・湯流量」で述べた委員会では、今後の住宅用給湯設備の望ましい姿を探る目的で、仕様の異なる給湯設備をもつ住宅居住者に対する、現状設備への満足度を聞くアンケートと、主として浴室の暖房・換気設備の現状での問題点を探るため、室温および浴槽湯温を測定する2本の温度計を同封してのアンケート調査を行った。その結果として、瞬間式給湯機では、当面4号まで絞れる機能が必要であること(1号は、1L/minの水温を25℃上昇させる能力)、追焚き装置には根強い要求があること、洗面・食器洗いとも流し洗いが多いこと、浴槽から湯を溢れさせた経験をもつ者が多こと、ガス給湯器に組み込まれている各種安全装置(立ち消え安全装置や不完全燃焼防止装置)を知らないで過度な心配をしている者が多いこと、北海道(札幌)では週当りの入浴回数が少ないこと、入浴・シャワーの目的は"清潔

のため"が圧倒的に多いこと、風呂の残り湯を半数以上 の者が利用し、用途としては洗濯が多いこと、脱衣室・ 浴室の温熱環境には問題が多いこと、適切な浴室・脱衣 室の暖房温度は20℃程度であること、換気設備にも問題 が多く、結露・カビに悩んでいる人が多いことなど、そ の後の機器開発などに有効な知見を提供した。

6. 給湯使用モードによる熱効率試験法F-1~F-6)

家庭でのエネルギー消費量において、給湯用が暖房用 を抜いたのは1975年のことであり、それ以降一貫して暖 房用を上回り、全エネルギー消費量(2次エネルギー) の約1/3を占めている. そのようなこともあって, 上記 「給湯設備の使用感に関する研究」委員会以降も、多く の委員会が設置された. 私が委員長を努めさせられた委 員会だけでも、「給湯設備設計用基礎データの検討・整備 に関する研究委員会(1994~1996年度,空気調和・衛生 工学会)」「住宅用給湯設備の設計・評価手法に関する総 合研究委員会 (2000~2002 年度,(財)ベターリビング)」 「住宅用給湯設備の多様化に向けた設計・評価手法に関 する研究委員会(2003~2004年度,(財)ベターリビング)」 「運転モードによるガス石油給湯機のエネルギー消費効 率測定方法の標準化調査研究委員会(2003~2005年度, (財)日本ガス石油機器工業会)」「新時代の省エネ型給湯 設備の計画・評価手法に関する研究委員会(2006年度~, (財)ベターリビング)」がある.

多くの研究をさせていただき、また、種々の提案・主張をさせていただいたが、常に主張し続けたのが、実使用状態に近い状態でのエネルギー効率測定法の確立の重要性である。多くの方々の協力により、現在、石油・ガス給湯機の使用モードによる試験法のJIS化のための検討作業が進められている。

なお、1993年の省エネ法の改正により、住宅を除く建築の給湯設備も建築設備として規制対象の一つに含まれることになったが、その省エネルギー基準、給湯消費エネルギー係数(CEC/HW)の基準値策定にも携わることになり、その後の改正作業のお手伝いもした。

7. 給湯設備のシステム効率の数値計算^{G-1~G-7)}

皆様の家庭の給湯設備は、湯を沸かす熱源機器+配管 +混合栓から成るシステムであると思われる。住戸への 給水温度から混合栓で得られる湯の温度まで上昇させる に必要なエネルギー量を、熱源機器(給湯機)への投入 エネルギー量で割ったものが給湯システムとしての効率 ということになる。これを数値計算で解くための研究を 行った、表3にガス瞬間式給湯機を用いた場合の、ある 給湯使用モードでの計算結果の一例を示すが,ほぼ2% 以内の誤差で計算できるまでになっており,現在は,い かに少ない実験結果から,熱源機器の計算モデル構築が 可能かの検討を行っている.なお,表3に示す実働効率 とは,混合栓から得られる熱量ではなく,給湯機出口で 得られる熱量を基にした効率であり,先分岐方式とは, 従来からのメイン管から分岐した管で各給湯栓へ供給す る方式であり,サヤ管・ヘッダー方式とは,最近集合住 宅を中心に多用されている,給湯機近くに設けられたヘ ッダー(分岐用の管)から,各給湯栓へ個別に配管する 方式である(サヤ管とあるのは,前もってヘッダーから 各給湯栓まで敷設しておく太めの管で,仕上げ工事がす べて終わってから給湯管を通管することにより,釘によ る打ち抜き事故などを防ぐためのものである).

上記のように各住戸に給湯用熱源機器がある場合を住戸セントラル給湯方式、集合住宅で熱源機器が中央にあり、そこから各戸に湯を供給する方式を住棟セントラル給湯方式というが、後者の場合に必要となる貯湯槽容量に関する研究H-1)や、計算の基礎となる配水管・給水管内水温の予測手法に関する研究I-1)なども行った。

Ø #u-	- L°	システム	実働効率	ガス消費
◇期-	モード	効率[%]	[%]	量[kJ]
先分岐	計算	64.9	78.1	96040
方式	実験	63.7	76.9	97114
7111	誤差[%]	1.9	1.6	1.1
サヤ管・	計算	68.4	77.0	92153
ヘッダー	実験	67.7	77.0	91581
方式	誤差[%]	1.2	0	0.6

表3 給湯設備システム効率の計算結果例

8. 浴槽からの放熱量 J-1~J-2)

大規模な入浴施設では、浴槽からの放熱量をおぎなうため、多大なエネルギーを消費している.放熱としては、湯気として湯表面から出て行くもの、浴槽壁面から出て行くもの、人体に付着した湯により持ち去られるものなど、数多くの要因が考えられる. その放熱量の計算式が確立していないことから、実験結果・文献調査などから解説したものが文献 J-1)である. ありがたいことに、この論説により、空気調和・衛生工学会論文賞(論説・報文部門)をいただくことができた.

文献 J-2)は、家庭用の浴槽からの放熱量も馬鹿にならないことを私が話題にしたところ、T社の方々が徹底して放熱量を減らす工夫をしてくれた浴槽を開発してくれたが、その放熱量測定結果を示したものである.

9. 脱衣室・浴室などの温熱環境^{K-1~K-5)}

脱衣室・浴室などでの問題ない暖房水準や換気方法を

探る目的で被験者実験を行った.その結果として、暖房温度としては17℃程度あれば問題ないこと、逆に、脱衣室の温度が高すぎると入浴後に不快になること、扉の中央サイドに換気口があると、上部・下部にあるより不快になる者が多いことなどを示した.「5.湯使用に関するアンケート」で述べたよりも低い暖房温度で問題ないという結果が得られたが、被験者の多くが青年男女であったことなどが影響していると思われ、暖房水準などの決定の難しさを痛感した。

10. 節水・節湯└-1~└-3)

浄水場で水を $1 \,\mathrm{m}^3$ 浄化するのに約 $0.4 \,\mathrm{kWh}$,下水処理場で同じく排水を $1 \,\mathrm{m}^3$ 処理するのに約 $0.5 \,\mathrm{kWh}$ の電力を消費している。つまり、水を $1 \,\mathrm{m}^3$ 節約すると、電力も約 $1 \,\mathrm{kWh}$ 節約することになると、節水・節湯の重要性を指摘してきた。そこで、まず、シャワーおよび台所での食器洗浄での節水方法を検討した。

シャワー浴でサーモスタット付混合栓を使用すると, 温度調節1回当たり約1Lの節水になること,シャワー ヘッドに一時止水用のボタンがあるものを使用すると, 25%以上の節湯効果があること,台所での食器洗浄では, シングルレバー水栓での止水に対し,止水方式を足踏み 式とすると約8%の節水効果があることなどを示した. シャワーでの節水効果に関しては,先に述べたCEC/ HWの計算でも算入できるようにした.

11. 排水管内圧力の予測手法M-1~M-5)

皆さんの家の洗面器の下を見ると、図4に示すような 排水トラップが付いていると思う。この中にある水(封 水)が、悪臭や衛生害虫が室内に侵入するのを防いでい る。この水が少なくなり、空気が流通できるような状態 になることを破封といい、そのような状況を生じさせな いことが排水設備設計の基本となる。破封の原因として は、自己サイホン作用(トラップが付いている器具自ら

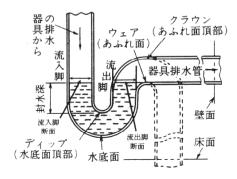


図4 排水トラップ各部の名称

の排水によるサイホン作用),誘導サイホン作用(他の器具からの排水が,排水管内を流れることによる圧力変動によるもの),毛細管現象(トラップのウェア部分に毛髪などが付着して生じる毛細管作用),蒸発がある。この中で,排水管の許容流量と密接な関係にあるのが誘導サイホンによる破封である。これを解明するには,排水管内に生じる圧力変動を予測することが必要となるが,排水管内の流れは満流でなく,気液二相の複雑な流れであること,重力のみで流れているため模型実験も困難であることから,予測手法が確立していなかった。

図5に示す108mの実験タワーが、私も含めた排水 設備を研究する者の強い要請の結果、住宅都市整備公団 (現都市再生機構)の八王子にある試験場に完成し、そ の後急速に研究が進展した。まず、平均圧力の予測法に 取り組み、種々試行錯誤の上完成させた。



図5 108mの実験タワー

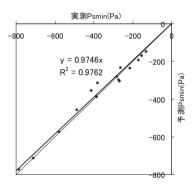


図6 システム最小値の予測結果例

しかしながら、空気調和・衛生工学会の規格である「S HASE-S218 集合住宅の排水立て管システムの排 水能力試験法」においては、排水能力を判定する基準と して、3Hzローパスフィルターをかけて各階で測定した 圧力の最大・最小値のうち、最も大きな値、小さな値を 示すもの(これを、システム最大値、最小値という)が ±400Pa以内であることとしている。そこで、このシス テム最大・最小値を予測する手法の開発に取り組み、完 成した予測式で予測した結果の例が図6であり、ほぼ満 足のいく精度が得られたと考えている。

12. 排水トラップの性能評価^{N-1~N-4)}

排水管内の圧力がある程度予測できるようになったが,圧力変動が小さくても破封を生じるようなトラップが用いられると問題を生じる。そのために,排水トラップの性能評価が必要となる。排水管内の圧力変動測定値を再現できる実験装置を試作し,種々検討の結果,試験に用いる圧力波を提案することができた $^{N-4}$)。また,排水トラップ内封水流動の数値解析にも取り組んだ $^{O-1}$ ~ $^{O-2}$)。数値解析結果の例を可視化実験の写真とともに図7に示すが,両者はよく一致している。

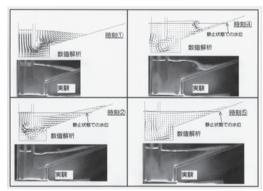


図7 封水トラップ内封水流動数値計算例

このような地道な研究ではあるが、香港の集合住宅で SARSが集団発生したのは、劣悪なトラップの使用に よることが判明したため、海外からの問い合わせも多く なっている。なお、排水トラップの試験装置は、私が東 京大学から神奈川大学へ移設した唯一の実験装置である。

13. おわりに

他にも,躯体と内装・設備を分離し長く使い続けられる住宅・SI住宅に関する研究 $^{P-1}$ $^{P-2}$),凍結防止に関する研究 $^{Q-1}$ $^{Q-4}$ $^{Q-4}$

参考文献

A 【汚物搬送性能】

A-1)Motoyasu Kamata, Yo Matsuo, Nobuyuki tsukagoshi: Studies on Flow and Transport of Feces in Horizontal Waste Pipes, Proceeding of C-IB W 62 Symp. (1979), pp.1-16 A-2) 塚越信行,鎌田元康, "排水システムにおける汚物搬送性能 に関する研究 その1管路条件・汚物特性と搬送力の関係に関す る基礎研究",日本建築学会大会学術講演梗概集(1980), pp. 357-358

A-3)鎌田元康、塚越信行、"排水システムにおける汚物搬送性能に関する研究 その2 管路条件と汚物の搬送距離の関係に関する実験",日本建築学会大会学術講演梗概集(1980),pp. 359-360 A-4)鎌田元康、"横走排水管の最小必要流速について",季刊 給排水設備研究 第3巻第2号(1980),pp. 48-62

B【排水横走管内流れの数値解析】

B-1) 山本祐司, 倉渕 隆, 塚越信行, 鎌田元康, 松尾 陽, "排 水管流れの数値解析手法に関する研究, 同題 (第2報)", 空気調 和・衛生工学会学術講演会論文集(1988), pp. 197-200, (1989), pp. 1029-1032

B-2)Yamamoto Y., Kurabuchi T., Kamata M., Tsukagoshi N, Matsuo Y., Numerical prediction method of the flow in the horizontal drainage systems, Proceedings of CIB W 62 Symp. (1989), pp. 189-213

C【雨水利用】

C-1) 古閑幸雄,鎌田元康,千田善孝, "住宅における雨水有効利 用に関する研究",日本建築学会建築環境工学論文集(1983), pp. 207-213

D【適正湯温・湯流量】

D-1)坂上恭助,新夕 格,杉山淳子,洪 玉珠,市川憲良,鎌田元康,石渡 博,炭田和宏,大中忠勝,坊垣和明,田中正敏,"住宅用給湯設備の使用感に関する実験的研究 第1報 食器洗浄・手洗い洗濯・洗額","第2報 シャワ・入浴","第3報シャワーヘッド散水板・洗髪に関する検討および湯使用時の生理反応",空気調和・衛生工学会論文集 No. 43 (1990. 6), pp. 97-111, No. 45 (1991-2), pp. 43-59, No. 48 (1992-2), pp. 59-72

D-2)近藤武士, 花尾美智子, 高須直子, 大塚雅之, 鎌田元康, "シャワーヘッド散水板の設計法に関する研究-- 穴径・散水角が適流量、快適感に及ぼす影響-", 日本建築学会計画系論文集 第563号(2003-1), pp.61-67

E【湯使用に関するアンケート】

E-1) 平手小太郎,鎌田元康,洪 玉珠,市川憲良,飯尾昭彦,中山明宗,"住宅用給湯設備の使用感に関するアンケート調査 第1報 湯の使用全般について", "第2報 浴室まわりの調査および湯使用時の要求条件",空気調和・衛生工学会論文集 No. 44 (1990-10), pp. 23-35, No. 52 (1993-6), pp. 71-71、

E-2)鎌田元康, "お湯と生活", 第4回 水資源に関するシンポジウム(1992-8), pp. 1-10

F【給湯使用モードによる熱効率試験法】

F-1)前 真之, 布野裕子, 石渡 博, 市川憲良, 鎌田元康, "湯・ 水消費の季節変動要因についての分析 都市型集合住宅におけ る給湯・給水の消費構造分析と評価方法に関する研究(その1)", 日本建築学会環境系論文集 No. 566(2003-4), pp. 73-80

F-2)前 真之, 飯尾昭彦, 石渡 博, 市川憲良, 大塚雅之, 坂上 恭介, 鎌田元康, "湯量・湯熱量に基づく給湯負荷評価 集合住 宅における給湯・給水消費に関する実態調査", 空気調和・衛生 工学会論文集 No. 90 (2003-7), pp. 39-48

F-3)前 真之, 鍋島美奈子, 鎌田元康, "生活時間のパターン分類 - 都心部集合住宅居住者のライフスタイルとエネルギー消費 に関する研究 その1-", 日本建築学会環境系論文集 No. 573 (2003-11), pp. 103-109

F-4)王 祥武,前 真之,岩本静男,鎌田元康,"住宅用給湯システムの熱効率および熱損失の検討 住宅用給湯システムの効率評価法に関する研究 第1報",日本建築学会環境系論文集 No.580(2004-6),pp.61-68

F-5)前 真之,鎌田元康,福澤 清,佐藤 誠,岩本静男,近藤武士,佐野隆之,江戸千恵子,"給湯使用モードによる家庭用ガス・石油給湯機の熱効率測定法の標準化調査研究(第1報)研究の概要とガス瞬間式給湯機の効率基礎実験","(第2報)貯湯式急速加熱型石油小型給湯機の効率","(第3報)給湯使用モード作成の基本概念とパラメータ抽出のための実測概要","(第4報)給湯使用モードの作成","(第5報)実験条件の検討ならびに標準条件における効率実験例",空気調和・衛生工学会平成18年度大会学術講演論文集I(2006-9),pp.71-74,pp.75-78,pp.79-82,pp.83-86,pp.87-90

F-6) 佐藤 誠, 前 真之, 福澤 清, 鎌田元康, 岩本靜男, "給 湯使用モードによる家庭用ガス・石油給湯機の熱効率測定法の標 準化調査研究(第6報)測定条件の検討と再現性の確認",空気 調和・衛生工学会平成19年度大会学術講演論文集Ⅲ(2007-9), pp. 1653-1656

G【住戸セントラル給湯システム効率の数値計算法】

G-1)岩本静男,鎌田元康,斎藤忠義,崔 昶豪,倉渕 隆,石渡博, "給湯設計用データの検討・整備に関する基礎的研究(第10報)住戸セントラル給湯システムの実験結果と数値予測結果",空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集II(1997),pp.809-812 G-2)崔 昶豪,鎌田元康,斎藤忠義,岩本静男,倉渕 隆,石渡博,"数値予測法による住宅用給湯システム効率の検討(その1)給湯配管の熱損失の影響について",空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 I(1999),pp.429-432

G-3)原 達範,鎌田元康,崔 昶豪,村越千春,"ガス瞬間式給 湯機の実働効率予測シミュレーション研究",空気調和・衛生工 学会学術講演会講演論文集 I (1999), pp. 433-436

G-4)王 祥武,鎌田元康,前 真之,樋口誠六,岩本静男,齋藤 忠義,富永直人,森山哲司,高木博司,"住宅用給湯設備の設計・ 評価手法に関する研究(その2)ガス瞬間式給湯機の計算モデル 構築及び給湯システム効率の数値予測",空気調和・衛生工学会 学術講演会講演論文集Ⅲ(2001), pp. 1829-1832

G-5)浅野健太,近藤武士,岩本静男,王 祥武,前 真之,鎌田元康,斎藤忠義,森田 哲,森田哲司,鬼塚 宏,"住宅用給湯設備の設計・評価手法に関する研究(その10)住戸セントラル給湯システムの貯湯槽の熱効率に関する研究","(その11)住宅用給湯配管と混合水栓の熱損失に関する研究",空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集Ⅲ(2003),pp.1597-1600,pp.1601-1604

G-6)王 祥武,米田千瑳夫,前 真之,岩本静男,斎藤忠義,鎌田元康,"住宅用給湯設備の設計・評価手法に関する研究(その12)給湯システムの効率予測に関する研究",空気調和・衛生工学会平成16年度大会学術講演論文集 I (2004), pp. 65-68 G-7)井原匡哉,岩本静男,近藤武士,倉渕 隆,前 真之,鎌田元康,"住宅用自然冷媒ヒートポンプ給湯機の貯湯槽内温度分

布",空気調和·衛生工学会平成 18 年度大会学術講演論文集 I

H【集合住宅における給湯システム容量】

(2006-9), pp. 67-70

H-1) 石渡 博, 鎌田元康, "集合住宅における給湯システム容量 に関する研究", 日本建築学会計画系論文集 第508 号(1998-6), pp. 15-20

I【配水管・給水管内水温の予測手法】

I-1) 坂上恭助,岩本静男,二宮秀與,鎌田元康,倉渕 隆,生田紀 夫,近藤武士,"配水管・給水管内水温の予測法に関する研究 第 1報-地域別浄水場水温の調査結果と配水管水温の推定方法",

"第2報-浄水場水温の分析と簡易予測法", "第3報-浄水場水温の計算モデル", 空気調和・衛生工学会論文集 No. 82(2001-7), pp. 121-128, No. 112(2006-7), pp. 33-39, No. 120(2007-3), pp. 1-7

J【浴槽からの放熱】

J-1)赤井仁志,鎌田元康,小川正晃,"大型浴槽からの損失熱量",空気調和・衛生工学 Vol. 73 No. 1 (1999-1), pp. 53-64 J-2)井田浩文,鎌田元康,"ユニットバスの浴槽水保温性能に関する性能評価",空気調和・衛生工学会平成17年度大会学術講演

論文集Ⅱ(2005), pp. 1493-1496 **K**【脱衣室・浴室などの温熱環境】

K-1) 桑沢保夫, 千田善孝, 鎌田元康, 鶴本厚裕, "脱衣室・トイレの暖房水準に関する研究", 日本建築学会学術講演梗概集D環境工学(1988-10), pp. 707-708

K-2) 桑沢保夫, 鎌田元康, 千田善孝, "脱衣室、トイレの暖冷房水準に関する研究", 日本建築学会学術講演梗概集D 環境工学 (1989-10), pp. 907-908

K-3)鎌田元康, 桑沢保夫, 千田善孝, "快適性からみた、浴室の換気方法に関する研究", 日本建築学会学術講演梗概集D 環境工学(1989-10), pp. 909-910

K-4)鎌田元康,平手小太郎,田中正敏,浅野良晴,飯尾昭彦,紀 谷文樹,坊垣和明,伊藤 肇,"脱衣室・浴室環境と湯の使用に 関するアンケート調査-給湯設備の使用感に関する研究 その 10-",空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(1989-10), pp. 965-968

K-5)高橋祐樹,前 真之,鎌田元康, "冬期入浴時の浴室暖房利用が湯消費量と消費エネルギーに与える影響についての研究", 日本建築学会大会学術講演梗概集D-1 環境工学 I (2007-8), pp. 577-578

L【節水·節湯】

L-1)T. Kondo, S. Iwamoto, N. Ichikawa, M. Kamata "Study on water conservation by water saving fixture", CIB W062 Symposium 2006, pp. A2-1-A2-12

L-2) 近藤武士, 岩本静男, 市川憲良, 鎌田元康, "サーモスタット混合水栓、手元止水機能付シャワーヘッドによる節水効果 節水・節湯器具の評価に関する研究", 日本建築学会環境系論文集第607号(2006-9), pp. 87-92

L-3) 近藤武士, 岩本静男, 鎌田元康, "節水型台所水栓を用いた 食器洗浄による節水効果 節水・節湯器具の評価に関する研究 その2", 日本建築学会環境系論文集 第 613 号(2007-3), pp. 65-70

M【排水管内圧力の予測手法】

M-1)鄭 政利,鎌田元康,倉渕 隆,坂上恭助,田中 徹, "一 箇所排水時の排水立て管内平均圧力分布の予測法 超高層住宅 における排水立て管内圧力分布に関する研究 その1",日本建 築学会計画系論文報告集 第481号(1996-3),pp. 83-91

M-2)C.L. CHENG, M. KAMATA, T. KURABUCHI, K. SAKAUE "Study on Pressure Distribution of Drainage Stack in High-Rise Apartment Houses - Prediction method in case of single-point discharge-", JOURNAL OF THE GRADUATE SCHOOL AND FACULTY OF ENGINEERING, THE UNIVERSITY OF TOKYO(1996), pp. 467-489

M-3)符 立偉,鎌田元康, 倉渕 隆, 坂上恭介, 大塚雅之, 鄭 政 利, "特殊継手排水システムを含む排水立て管内平均圧力分布の 予測手法 超高層住宅における排水立て管内圧力分布に関する 研究 その2", 日本建築学会計画系論文集 第 557 号(2002-7), pp. 81-87

M-4)符 立偉,鎌田元康, 倉渕 隆, "集合住宅における排水立 て管の排水能力予測手法に関する研究", 日本建築学会環境系論 文集 No. 570 (2003-8), pp. 53-60

M-5)八木博史,鎌田元康,清水宏典,小林宜泰,田中良法,仲石正雄,"特殊継手排水システム排水能力予測手法の適用範囲拡大に関する研究 第1報-配管形態の変化による通気流量と管内圧力の挙動",空気調和・衛生工学会論文集 No.96(2005-1), pp.95-105

N【排水トラップの性能評価】

N-1)塚越信行,鎌田元康,坂上恭助,倉渕 隆,孫 星明,"トラップの性能評価法に関する研究 その1 トラップ性能試験装置の開発(1)","その2 トラップ性能試験装置の開発(2)",

日本建築学会学術講演梗概集D-I 環境工学I (1997), pp. 473-474, pp. 475-476

N-2)張 月,鎌田元康,坂上恭助,外山敬之,"トラップの性能 試験法に関する研究(その4)排水実験タワーおよびトラップ性 能試験装置を用いた実験",空気調和・衛生工学会平成17年度大 会学術講演論文集II(2005),pp.733-736

N-3) 張 月,鎌田元康,坂上恭助,"トラップの性能試験法に関する研究(その5)負圧側試験用圧力波の作成に関する基礎的な検討",空気調和・衛生工学会平成18年度大会学術講演論文集II(2006-9),pp.773-776

N-4)張月,鎌田元康,坂上恭助,栗山 華,光永威彦,柳澤 義己,"トラップの性能試験法に関する研究(その7)負圧側試験用圧力波の作成に関する基礎的な検討(2)","(その8)単・ 3正弦波による評価法の検討",空気調和・衛生工学会平成19年度大会学術講演論文集Ⅱ(2007-9),pp.759-762,pp.763-766

O【排水トラップ内封水流動の数値解析】

0-1) 友成弘志, 王 耀輝, 鎌田元康, 坂上恭助, "トラップ内の封 水流動の数値解析 第1報ーモデルトラップの封水の固有振動数 算定法の検討", 空気調和・衛生工学会論文集 No. 82 (2001-7), pp. 49-57

0-2) 友成弘志, 王 耀輝, 鎌田元康, 坂上恭助, "トラップ内の 封水流動の数値解析 第2報ートラップの形状因子と封水の固 有振動数の関係",空気調和・衛生工学会論文集 No. 84 (2002-1), pp. 87-96

P【S I 住宅対応排水システム】

P-1)陳 玉芳,鎌田元康,渋谷 巧, "KSI住宅における雑排 水横枝管の緩勾配に関する研究",日本建築学会技術報告集 第 17号(2003-6),pp. 261-264

P-2)陳 玉芳, 鎌田元康, 坂上恭助, 渋谷 巧, "排水横枝管の曲がりが排水立て管負荷に及ぼす影響 第1報-公団SI住宅の便器系統に関する検討", 空気調和・衛生工学論文集 No. 102 (2005-9), pp. 9-15

Q【凍結防止】

Q-1) 塚越信行,鎌田元康,"ガス屋外給湯器ユニットの凍結に関する研究",日本建築学会大会学術講演梗概集(1983),pp. 241-242 Q-2) 鎌田元康,坂本雄三,塚越信行,倉渕 隆, "細銅管内水の凍結と気温0℃以下での風速についてーガス屋外給湯器ユニットの凍結に関する研究(2)ー",日本建築学会大会学術講演梗概集(1984),pp. 541-542

Q-3) 塚越信行,鎌田元康,"給水装置の凍結防止に関する基礎研究 完 凍結環境の給水装置温測定",日本建築学会学術講演梗概集

D 環境工学(1989), pp. 553-554

Q-4) 坂田光成,鎌田元康,塚越信行, "給水設備の凍結防止に関する研究(寒冷環境下の水道メータの被害予測法)",空気調和・衛生工学会学術講演会論文集(1990),pp.417-420



核子崩壊の探索―物質の安定性

渡邊 靖志*

Search for Nucleon Decay - Stability of Matter

Yasushi WATANABE*

1. はじめに

核子とは原子核を構成する陽子と中性子の総称である. 核子崩壊とは? その探索にどんな意味があるのか, どのように探索するのか, その現状がどうなっているのか, 等についてできるだけ平易な解説を試みたい.

2. 物質の安定性

形あるものは滅す. ものには全て寿命がある. ものは 原子からできている. ということは,原子そのものにも 寿命があるのだろうか? 原子は原子核とそのまわりの 電子とからなる.原子の安定性は,結局,原子核や電子 の安定性に帰着される.

19世紀末、壊変する原子核が発見された。 α 崩壊、 β 崩壊、 γ 崩壊である。放射性原子核は、より安定な原子核に壊変することがわかった。量子力学では個々の原子核がいつ壊れるのかを予言することはできない。同じ原子核がたくさんあるとき、統計的なふるまいは予言できる。 時刻 t に N 個の放射性原子核があるとしよう。 dt 時間に崩壊する原子核の数 dN は N に比例する。 すなわち $dNdt = -N/\tau$ と書ける。 負符号は、壊変により数が減少することを表す。比例定数 τ は平均寿命と呼ばれ、その原子核固有の性質の 1 つとなっている。この式を積分して次式を得る。

$$N(t) = N(0) e^{-t/\tau}$$
 (1)

すなわち不安定な原子核は指数関数的に崩壊し、時間 τ 毎にその数が 1/eになることを示す.

それでは、安定な原子核の寿命はどのくらいなのだろ うか、原子核は陽子と中性子からできている、原子核の

*教授 物理学教室 Professor, Institute of Physics 安定性は、それを構成する陽子や中性子の安定性に帰着 される。

2.1 素粒子の安定性

陽子,中性子,電子などは「素粒子」と呼ばれる(0). 素粒子はその量子数(質量,電荷など)により区別される.素粒子の寿命も式(1)で定義される.すなわち素粒子もそれぞれ固有の寿命をもっている.

まず素粒子の安定性について考えてみよう。表1は核子とそれより軽い素粒子を質量の小さい(軽い)順に並べたものである(2). なぜ軽い順なのだろうか. アインシュタインの E=mc²という関係式を思い起こそう. Eはエネルギー, m は質量, c は光速である(3). すなわち, 質量が大きい粒子は高いエネルギー状態にある. エネルギーの高い状態は, 水が低きに流れるように, より低い状態に落ち着こうとする. すなわち, より軽い2個以上の粒子に壊れようとする. 光子は安定である. なぜなら質量が0で, エネルギー的にこれ以上壊れようがない. 次に軽いニュートリノについては, 質量をもつことがわかったばかりで詳細は謎のままであるので,ここではこれ以上立ち入らない.

電子は安定である. 物理学は実証科学の典型であるから、実験家は何でも実験的に検証しようとする. その結果、電子の寿命は 4.6×10²⁶ 年以上となっている⁽⁴⁾. なぜこんなに長生きをするのであろうか. 実は素粒子の寿命を決めているのは、保存則である. 電子は負の最小の電荷(素電荷)をもつ粒子であり、電荷をもつ粒子の中で一番軽い. 電子より軽い粒子として知られるのは、電荷を持たない光子とニュートリノしかない. これらの粒子に壊れるためには、電荷保存則を破らなければならない. 電荷保存則は、ゲージ不変性という深遠な対称性の帰結として成立する. たとえば、ゲージ不変性により、

名称	記号	スピン	電荷	質量	寿命	反粒子	主な崩壊
		(\hbar)	(e)	(MeV/c^2)	(s)		モード
光子	γ	1	0	0	安定	司	_
電子ニュートリノ	ν_e	1/2	0	< 0.2?	?	$\bar{\nu}_e$?
ミューニュートリノ	ν_{μ}	1/2	0	< 0.2?	?	$\bar{\nu}_{\mu}$?
タウニュートリノ	ν_{τ}	1/2	0	< 0.2?	?	$\bar{\nu}_{ au}$?
電子	e^{-}	1/2	-1	0.511	安定	e^+	_
ミューオン	μ^{-}	1/2	-1	105.7	2.2×10^{-6}	μ^{+}	$e^-\bar{\nu}_e\nu_\mu$
中性 π 中間子	π^0	0	0	135.0	8.4×10^{-17}	同	$\gamma\gamma$
荷電 π 中間子	π^+	0	1	139.6	2.6×10^{-8}	π^{-}	$\mu^+ \nu_{\mu}$
荷電 K 中間子	K^+	0	+1	493.7	1.2×10^{-8}	K^{-}	$\mu^{+}\nu$, $\pi^{+}\pi^{0}$
中性 K 中間子	K^0	0	0	497.7	注 1	\bar{K}^0	$\pi\pi, \pi\pi\pi$
η 中間子	η^0	0	0	547.3	5.6×10^{-19}	司	$\gamma\gamma$, $\pi\pi\pi$
- 荷電 ρ 中間子	ρ^+	1	+1	775.8	4.4×10^{-24}	ρ^{-}	$\pi^{+}\pi^{0}$
中性 ρ 中間子	ρ^0	1	0	775.8	4.4×10^{-24}	同	$\pi^+\pi^-$
ω 中間子	ω	1	0	781.9	7.8×10^{-23}	同	$\pi^{+}\pi^{-}\pi^{0}$
荷電 K* 中間子	K^{*+}	0	+1	891.7	1.3×10^{-23}	K^{*-}	$K\pi$
中性 K^* 中間子	K^{*0}	0	0	896.1	1.3×10^{-23}	\bar{K}^{*0}	$K\pi$
陽子	p	1/2	+1	938.3	安定	\bar{p}	_
中性子	n	1/2	0	939.6	885.7	\bar{n}	$pe^-\bar{\nu}_e$

表 1: 素粒子の種類(軽い順)

注 1 : K^0 中間子は \overline{K}^0 中間子と混合し、短寿命 $(0.089\times 10^{-8}\,\mathrm{s})$ の粒子と長寿命 $(5.2\times 10^{-8}\,\mathrm{s})$ の粒子として崩壊する。

光子の質量が0であることが保証される.

全ての粒子にはその反粒子が存在する. 光子のように自分自身が反粒子である粒子もある. 電子の反粒子である陽電子は, 正の素電荷をもっている. 陽電子の寿命はどのくらいであろうか. 物質と出会ってすぐ消えてしまいそうな気がする. しかし粒子の寿命は真空中に置かれたときの寿命として定義される. CPT 定理というものがある. Cは粒子⇔反粒子の反転, Pは空間反転, Tは時間反転の操作である. 「これら3つの操作を行ったとき,物理法則は不変である」ことを保証するのが CPT 定理である. CPT定理によれば, 反粒子と粒子とは, 符号のつく量子数は逆符号でその絶対値は等しい. したがって陽電子の寿命は電子の寿命と等しいのである.

陽子は、電子の約 1800 倍もの質量をもつ。現在実験的に求められた寿命の下限値は後述のように約10³³年である⁶⁰。宇宙の年齢 137 億年に比べて 23 桁も長い。なぜだろうか。これを「説明する」ために、**重粒子数保存則**(バリオン数保存則)が導入された。すなわち、陽子や中性子は、重粒子数をもつ粒子であるとする。素粒子の反応では、その前後で重粒子数が保存される。たとえば、中性子は(なぜか)陽子より重いので、陽電子とニュートリノとに崩壊することができる(ベータ崩壊)。これを式で書き、重粒子数と電荷保存則(および軽粒子保存則)を見ると、

$$n \to p + e^{-} + \overline{\nu_e}$$
 (2)
電荷 $0 = +1 + (-1) + 0$
重粒子数 $+1 = +1 + 0 + 0$
軽粒子数 $0 = 0 + 1 + (-1)$

同様に軽粒子数保存則(レプトン数保存則)も存在し、それを満たすべく電子と反電子ニュートリノが対で生成される。中性子は陽子より重いので壊れることができる。より厳密には、中性子、陽子、電子、ニュートリノの質量を m_n , m_p , m_e , m_v とすると、 $m_n > m_p + m_e + m_v$ が成り立っているので崩壊できる。

もし $m_n < m_p + m_e + m_p$ であったとすると、中性子は崩壊できない、すると、この宇宙に、生物学的に危険な中性子が安定粒子として飛び交い、生命などとても生まれない世界になっていたであろう。

陽子は、重粒子数をもつ粒子の中で一番軽い、それで、 重粒子数保存則を破らない限り崩壊できない. しかし、 重粒子数保存則は、電荷保存則ほど確固たる理論的根拠 は無い、そもそもなぜ重粒子数は保存するのであろうか.

2.2 原子の安定性

物質の安定性について考えてみると, 自然界の微妙な バランスや偶然に改めて驚かされる. 一番単純な原子で ある水素原子について考えてみよう. 水素原子は陽子と

電子から成っている. なぜ陽子と電子はくっついてしま わないのだろうか. それは不確定性原理による. 電子が 陽子にくっついてしまうと、電子の位置が精度よく決ま ってしまったことを意味する. すると不確定性原理によ って電子の運動量(したがってエネルギー)は無限大に なってしまう. だから電子は陽子のまわりに雲のように 広がっている. しかしながら、電子が陽子の近くにいる 確率は0ではない、式(2)で、 ν を「移項」した $e^- + p \rightarrow$ $n + \nu$ は起こらないのであろうか。実はより重い原子 核ではこれが起こっていて、電子捕獲反応と呼ばれる. しかし幸いなことに、水素原子での電子捕獲反応は起こ らない. なぜなら、エネルギーが足りないからである. すなわち $m_p + m_e < m_p + m_e$ である。もし電子が少し 重くて電子捕獲反応が起こってしまうと大変である. 宇 宙から水素原子が消えて中性子(とニュートリノ)が残 る. やはり大変な世界である.

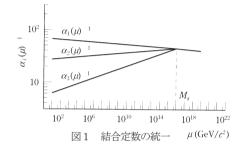
それでは重粒子数保存則はどの程度確実なのだろうか. それをどのように実験的に検証すればよいのだろうか.

3. 大統一理論と核子崩壊

自然界には4つの力が存在する. 万有引力である重力,電気や磁気の電磁力,原子力として知られる「強い力」,ベータ崩壊などを引き起こす「弱い力」の4つである.ここで、「強い力」や「弱い力」は重力などと同じく力の固有名詞である. 強い力と弱い力の及ぶ範囲は極く短い(<10-15 m).このため重力と電磁力が日常生活を支配している. 電磁力は重力に比べて数十桁も強い.しかしながら宇宙を支配するのは重力である.なぜだろうか.実は、プラスの電荷とマイナスの電荷は引き合い、水素原子のように電気的に中性になってしまうからである.

1970年代に入って、重力を除く3つの力を記述するミクロの世界の理論、標準理論が確立された.3つの力はゲージ不変性という美しい対称性によって統一的に記述される。しかしながら、3つの力はそれぞれ独立であり、電気力と磁力が電磁力として統一されたのとは異なる。それを端的に表すのが結合定数である。電磁力の結合定数は電荷である。同様に、強い力のそれは「色電荷」、弱い力のそれは「弱電荷」と呼ばれる。それぞれ別の大きさなので、3つの力は独立である。ところが結合定数は、名前に反して定数ではなく、エネルギーとともに変化する。強い力と弱い力の結合定数はエネルギーとともに弱くなり(漸近的自由)、電磁力の結合定数は逆に強くなる。3つの力の結合定数のエネルギー変化は理論的に予言でき、結合定数の逆数はエネルギーの対数に比例する。この3つの直線が超高エネルギーの一点で交わるよ

うに見える(図1). すなわち、3つの力が一つの力に統一される可能性が示された. これが大統一理論(GUT: Grand Unification Theory)である. そのエネルギー領域は、現在加速器で到達できる領域より十数桁上の超高エネルギー領域である. そのような超高エネルギー領域での数少ない検証可能な予言が重粒子数の破れ、すなわち、核子崩壊であった.



4. 核子崩壊の探索

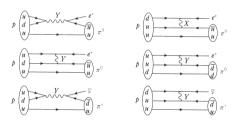
最初の大統一理論が提案されたのは、やっと標準理論 が確立されようとしていた 1974 年のことであった(5). 標 準理論の正しさや美しさが認識され、大統一理論への夢 がふくらんで来た 1978 年、私は小柴昌俊研究室の助手 を務めていた、その年の秋、高エネルギー物理学研究所 (現高エネルギー加速器研究機構) の菅原寛孝所長(当 時) に次のように頼まれた. 「1979年2月に大統一理論 に関する理論の研究会を開きたい. そこで一つだけ実験 の話として、核子崩壊探索についてこれまでの結果のレ ビューをしてもらえないか」. 早速調べてみると, それま での世界記録は宇宙線ニュートリノを測る実験の副産物 で、核子の寿命の下限値は 2×1030 年だった. 大学に戻 って小柴先生にレビュートークを頼まれた話をすると 「実はこんなアイデアがある」と先生の頭に仕舞ってあ ったアイデアの一つを話してくれた。それが大量の水を 地下にため、光検出器(光電子増倍管)で囲む水チェレ ンコフ検出器のアイデアであった. 2 月の研究会では, レビューに加えて、このアイデアをもとに検討した新た な核子崩壊実験を提案した6. それが後の神岡実験へと 発展した.

4.1 核子崩壊モード

核子崩壊を探索するためには、まずどのような崩壊モードが可能かを考えなければならない。陽子は水素原子の原子核として存在する。酸素原子核中の陽子や中性子も通常の意味で安定である。それは原子核として束縛される際に余分なエネルギー(核融合エネルギー)を放出

し,自由な粒子より質量が小さくなっているからである. そこで陽子と中性子両方の崩壊モードを考える. 核子が 崩壊して生成される粒子は、表1に掲げた粒子に限られ る.

最初に提案された大統一理論は SU(5)-GUT と呼ばれる (6) 、SU(5)という群に,基本粒子が配置される。陽子や中性子を構成するクォークが電子やニュートリノと同じ群に属すことから,その間を媒介する粒子が存在する。それらは X 粒子と Y 粒子と呼ばれ,質量は $10^{15}\sim10^{16}$ GeV/c ととてつもなく重い.核子の寿命は媒介粒子の質量の4乗に反比例するため,核子は長生きをする。X、Y 粒子を介して起こる核子崩壊の過程を図 2 に示す.SU(5)-GUT が予言する崩壊モードは $p \rightarrow e^r + \pi^0$, $v + \pi^+$ および $n \rightarrow e^r + \pi^-$, $v + \pi^0$ である.



陽子崩壊のファインマン図

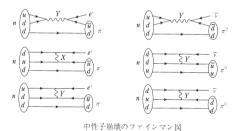


図2 核子崩壊のファインマン図(1)

4.2 水チェレンコフ検出器

新たな実験を提案するからには、従来の記録を二桁くらい凌駕したい、目標の寿命の下限値を 10^{32} 年としよう。核子の寿命がこの下限値のとき、 10^{33} 個の核子を用意し、その全てを四六時中1年間休まず観測したとしよう。すると、平均10個の崩壊が観測にかかるはずである。 10^{33} 個の核子とはどのくらいの物質量だろうか。核子1個の質量が分かると計算できる。実はその値はおよそ $1/(6\times10^{23})$ gである。分母はアボガドロ数である。これは陽子と中性子の質量がほぼ等しいことと1gの定義から容易に導ける。すると 10^{33} 個の核子の物質量は $10^{33}/(6\times10^{23})$ g ≈ 1700 t であり、物質が水であると1700m³となる。

しかも水は観測物質として大変都合がよい. たとえば崩 壊モード $p \to \pi^0 + e^+$ を例として考えよう. 陽子はほと んど静止しているので, π⁰中間子と陽電子は, 反対方向 に同じ大きさの運動量を持って飛び出す。π⁰中間子はす ぐに2つのガンマ線(光子)に崩壊する。陽電子は水中 の光速 ($\sim 2c/3$) より速いので、チェレンコフ光を放出 する. チェレンコフ光は、ちょうど衝撃波のように粒子 の進行方向と約42°の方向に円錐状に広がる. やがて粒 子はエネルギーを失い止まるので、光の輪(チェレンコ フリング)が広がる. さらに、(陽) 電子やガンマ線は、 水中の原子核と相互作用をくり返し、多数の電子・陽電 子対を生成する. 生成された (陽) 電子それぞれがチェ レンコフ光を放出するので、核子崩壊で生成された陽電 子やガンマ線の方向には、輪郭のぼやけた光の輪ができ る、それに対し、ミューオンや荷電π中間子は輪郭のは っきりした光の輪を生成する. このように水チェレンコ フ検出器では粒子の識別も可能である. 陽子のこの崩壊 モードでは、図3に示すように3つの光の輪が生成さ れる.

光の輪を周囲に配置した光検出器で観測すれば、粒子の生成時刻、方向、およそのエネルギー、生成位置、および粒子の種類がわかる。核子崩壊の信号であれば、ある一点から同時に逆方向に向かう2つ以上の光の輪が生成される。水は透明であり、チェレンコフ光を観測するには最適である。水は安価で豊富にあり、しかも全ての核子を観測対象として活用できる。ただし、検出器は地下深くに置かれなければならない。地上では大量の宇宙線が降り注ぎ、それらが絶え間なくチェレンコフ光を出して、稀にしか起こらない信号が埋もれてしまうからである。

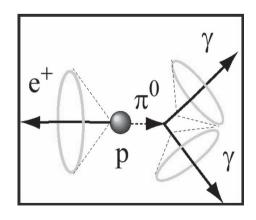


図3 陽子の,陽電子とπ0中間子への崩壊と3つの光の輪の

研究会で提案された検出器は、3000 トンの水槽の壁に 8000 個の光検出器を取り付けたものだった。その後私はドイツでの実験に派遣され、帰国後は(現)高エネルギー加速器研究機構に職を得て、この問題から遠ざかっていた。



図 4 口径 50cm 光電子増倍管(7)

5 その後の発展

その間に小柴先生は、(現) 浜松ホトニクス社と直径 50 cm の巨大光検出器の開発を成功させ (図 4) 切, 1983 年に神岡実験が始まった. 光検出器の数はその巨大さ故に、3000 個で十分な性能が出せた (図 5). アメリカでも5000 トンの水チェレンコフ検出器の実験(IBM 実験)がそれより半年早く実験を開始していた.



図 5 神岡実験装置(7)

残念ながら核子崩壊と断定できる現象は測定にかからないままだった。そこで神岡実験では核子の寿命の下限値を塗り替えるとともに、次の目標、太陽からのニュートリノの観測を目指して装置を改良していた。太陽ニュートリノのエネルギーは核子崩壊生成粒子の約二桁低いので、その観測には水中のバックグランド(ラドンなどからの崩壊生成粒子)を数桁減らさなければならない。

水の純化作業によりバックグランドの低減が成ったこ

ろ、超新星爆発が起こった、超新星爆発では放出されるエネルギーの 99%を膨大な数のニュートリノが持ち去る. 17 万光年離れた SN1987A から放出されたニュートリノのうち約 11 個を観測することに成功して神岡実験は一躍有名になった⁽⁸⁾ . アメリカの IBM 実験でも「同時刻」に 8 個ほど観測して超新星からのニュートリノであることが確認された. この業績により、小柴昌俊先生は 2002 年のノーベル物理学賞を受賞された.

この快挙により、神岡実験をアップグレードした50000トンの水チェレンコフ検出器、スーパー神岡実験(SK)の建設が認められた. 口径50 cm の光検出器を約11200個壁に取り付けた検出器である(図6). 大型の水チェレンコフ検出器はニュートリノの測定にも威力を発揮する. SK は1996年4月に観測を開始し、1998年夏にニュートリノ振動の確かな証拠を発見して世界の賞賛を浴びた(9). 実際、核子探索においての最終的なバックグランドは、宇宙線ニュートリノである. SK の主要の目的の一つ、核子崩壊探索についても表2に示すように、いろいろな崩壊モードについて他の追随を許さない厳しい下限値を得ている(表に掲げてない他のいろいろな崩壊モードについても下限値を得ている).

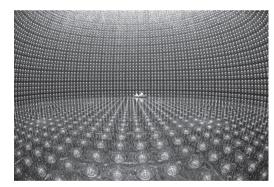


図6 注水途中のスーパー神岡実験装置(7)

理論の発展としては、単純な SU(5)-GUT では、力は 大統一されないことがわかった。 1 点で交わるはずの 3 つの結合定数が 1 点で交わらないことが,その後の精密 実験で明らかになった。そこで,自然界にはさらに別の対 称性,「超対称性」(SUSY: Super Symmetry)が働いて いるという見方が有力になった。 SUSY - SU(5) - GUTでは,結合定数が見事 1 点で交る。

超対称化されたモデルでの主な崩壊モードは、 $p \to K^*+v$ 、 $n \to K^*+e$ 等、K中間子を含む崩壊である $^{(10)}$. ここで放出される K^* 中間子はチェレンコフ光を出さない、その速さが水中の光速より遅いからである。しかし

表 2	核子崩壊モードと寿命の下限値	(90%信頼度)
	(単位 1030年)	

陽子		中性子		
崩壊モード	下限値	崩壊モード	下限値	
$e^{+}\pi^{0}$	1600	$e^+\pi^-$	158	
$\mu^{+}\pi^{0}$	473	$\mu^+\pi^-$	100	
$\nu\pi^+$	25	$\nu\pi^0$	112	
$e^+\eta$	313	$\nu\eta$	158	
$\mu^+\eta$	126			
$e^+ \rho^0$	75	$e^+\rho^-$	217	
$\mu^+ \rho^0$	110	$\mu^+ \rho^-$	228	
$\nu \rho^+$	162	$\nu \rho^0$	19	
$e^+\omega$	107	$\nu\omega$	108	
$\mu^+\omega$	117			
$e^{+}K^{0}$	150	e^+K^-	17	
$\mu^+ K^0$	120	μ^+K^-	26	
νK^+	670	νK^0	86	
νK^{*+}	51	νK^{*0}	78	
$e^{+}K^{*0}$	84			
$e^{+}\pi^{+}\pi^{-}$	82	$e^{+}\pi^{-}\pi^{0}$	52	
$e^{+}\pi^{0}\pi^{0}$	147			
$\mu^{+}\pi^{+}\pi^{-}$	133	$\mu^{+}\pi^{-}\pi^{0}$	74	
$\mu^{+}\pi^{0}\pi^{0}$	101			
		$e^{+}K^{0}\pi^{-}$	18	
$e^+\gamma$	670	$\nu\gamma$	28	
$\mu^+\gamma$	478			
$e^+\gamma\gamma$	100	$\nu\gamma\gamma$	219	
$e^{+}e^{+}e^{-}$	793	$\nu e^+ e^-$	257	
$e^{+}\mu^{+}\mu^{-}$	359	$\nu \mu^+ \mu^-$	79	
$\mu^{+}\mu^{+}e^{-}$	6	$\nu e \mu$ 83		
$e^+ \nu \nu$	100			
$\mu^{+}e^{+}e^{-}$	529			
$\mu^{+}\mu^{+}\mu^{-}$	675			
$\mu^+ \nu \nu$	21			

K中間子はすぐに止まって崩壊する。その時生成される μ +粒子は一定のエネルギーで放出され、チェレンコフ光も放出する。それだけではバックグランドに埋もれてしまう。しかし水中の酸素原子核の中の核子が崩壊すると一定のエネルギーの γ 線も一緒に放出されるはずである。 γ 線と μ +の信号を「同時に」観測すれば、バックグランドを大幅に除去できる。そのような崩壊も探索したが観測されず、SUSY - SU(5)-GUT のモデルに厳しい制限をつけることができた(11)。

5 終わりに

核子崩壊が観測されたとしよう。もちろん現代物理学にとっては大変な発見である。加速器では到底手が届かない超高エネルギー領域での現象が捉えられたことになり、崩壊モード等の詳細な研究は標準理論を超える理論の大きな手がかりを与えることになる。しかし、もっと一般的にはどんな意味があるのであろうか。もし仮に、

核子の寿命が 10%年と測定されたとしよう. すると,宇宙の終焉の一つのシナリオが決まるのである. 10%年後には核子の数が 1/e になってしまっている. するともはや星などを生成することは不可能であろう. まさに宇宙の崩壊である. もっとも,現在,宇宙の膨張が加速していることが明らかになっている. 加速の程度によっては10%年よりずっと前に,原子核さえもばらばらになってしまうという予言もある (Big Rip). まあ気が遠くなるほど先のことであるので,それについて人類が心配する必要もないのではあるが.

参考文献および注

- (1) 素粒子についての入門書はたくさんあるが、拙著もぜひ参考にしていただきたい. 渡邊靖志, "素粒子物理入門", 培風館, 2002年. 素粒子の性質等について次の文献も参考になる. 三田一郎, "CP の破れ一新しい物理を探る", 工学研究所報 29 号(2006-11), P35.
- (2) 人類が男と女に分けられるように、粒子もスピン (自己角運動量)が(ħ=プランク定数/2πの単位で)整数か半整数かにより、それぞれボソンとフェルミオンとに分けられる.フェルミオンはパウリの排他律にしたがう.すなわち、同じ量子状態には一個のフェルミオンしか占めることはできない.電子や核子がフェルミオンであることは大変幸運であった。もしボソンだったら物質は接触すると爆発的に融合して大きな塊になってしまうと予言されている.
- (3) 正しくは $E = \sqrt{p^2c^2 + m^2c^4}$ と書くべきである. pは 運動量で、本文の式は p = 0 のとき($m \neq 0$ の粒子 が静止しているとき)の式と理解すればよい.
- (4) W.-Y. Yao et al., (Particle Data Group), J. Phys. G 33, 1 (2006).
- H. Georgi and S. Glashow, Phys. Rev. Lett. 32, 438 (1974).
- (6) Y. Watanabe, "Trying to Measure the Proton's Lifetime", Proc. of the Workshop on "Unified Theories and Baryon Number in the Universe", Ed. O. Sawada and A. Sugamoto, KEK79-18, 1979.
- (7) 写真等は東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研 究施設提供.
- (8) K. Hirata et al., Phys. Rev. Lett. 58, 1490 (1987).
- (9) Y. Fukuda et al., Phys. Rev. Lett. 81 1562 (1998).
- (10) N. Sakai, Nucl. Phys. B 238, 317 (1984).
- (11) Y. Hayato et al., Phys. Rev. Lett. 83 1529 (1999).



経営革新とインダストリアル・エンジニアリング

丹下 敏*

The Role of Industrial Engineering in Business Innovation

Satoshi TANGE*

1. 緒言

我国の製造企業は、グローバルな厳しい経営環境のもとで、競争優位性確保を目指した業務の見直しと革新に 邁進している。これは製造企業の経営戦略が新製品開発 から業務システム開発へと軸足を移行させてきたことを 示唆している。すなわち、製造企業の経営陣は業務プロ セスの革新で競争環境下での差別化を計ろうとしている。 既存組織の枠組みにとらわれることなく、部門間の壁を 取り払ったサプライチェインシステム(SCM)とかロジス ティクスシステムなどの業務プロセスの出現は典型的な 業務革新事例といえる。今後とも先端的企業の多くは高 度化した情報・通信技術、制御・メカトロニクス技術を駆 使した大規模な業務革新プロジェクトを手がけていくで あろう。

本報では、今日までの IE の発展過程を考察しつつ、 業務革新プロジェクトの展開過程において I Eが果たす べき役割についての見解をまとめている。

2. I E の発展過程

1) 成立事情にみる特質

IEの起源は、F.Wテーラー(1856~1915)の「時間研究」とF.Bギルブレス(1868~1924)の「動作研究」の成果をもとに体系づけられた"Motion and Time Study"(日本では「作業研究」に遡るとされている。「作業研究」は作業者(人間)がおこなう作業の方法と時間を科学的に関係づけた動作・作業レベルのシステム設計(改善)の原理・原則と手法の技術体系である。この技術はテーラーの「科学的管理法」(Principle of Scientific Management)(1911)の理念に根ざしており、この理念は今日のIEにも脈々と引き継がれている。

I Eは、自然科学をその基盤とした他のエンジニアリ

ングと比べて、その成立事情において全く異質の性格を 備えている。この I Eに固有の遺伝子は、その後も増殖 を続けながら発展して今日に至っている。

I Eの成立事情と特質について、山田 [1] は以下のように述べている。

「基礎科学の応用としての性格よりも、むしろ生産過程 の改善、効率化というような実際的な要求からうまれた 技術であり、当初は現場の管理者、熟練した作業者が長 い間の経験の蓄積や勘によって処理していたような種類 の問題を整理、検討し、さらにこれを発展させてゆくこ とによって生み出されてきた工学といえる」

また石谷 [2] は技術・技能手段を展開的に利用する目的をもって運用する技術ないしは工学として I E、経営工学を規定し、他の技術、工学との違いを明確にしている。

I E学である経営工学は、上述した成立事情と特質が色濃く 反映されて今日まで発展しており、この点が自然科学を基盤と した他の工学との本質的な異質性といえる。

2) I E活動領域の拡大

初期の I E は人間が行う現場作業を対象とした。そこではテーラー、ギルブレスにより確立された「動作・時間研究」を適用し、作業能率向上を目指した作業測定、動作・作業改善と標準化が実施された。この時期(1930年代)にアメリカに渡って I E を習得した人々が能率技師としてはじめて我国に I E を導入した。この頃に神奈川大学経営工学科の前身である工業経営学科が、早稲田大学の現経営システム工学科とほぼ時期を同じくして、日本で最初に工学部に開設されている「3]。

その後、IEはアメリカにおいて工場の生産性向上を基本的な使命として発展し、1950年半ば頃までは主としてコストと品質の管理、生産管理、設備配置と運搬など製造プロセスを対象とした改善と設計に関与してきた。さらに新しく統計的・数学的手法、OR、コンピュータ技術などの活用により、製造企業の問題解決過程における定量的な物的処理と情報処理がおこなえるようになった。

*准教授 情報システム創成学科

Associate Professor, Dept. of Information Systems Creation

IEは、その対象領域の拡大と平行して、いくつかの 関連分野への分化がすすんだ。この当時のアメリカにお ける関連分野をみると、Inventory Control, Quality Control, Management Sciences, Production Engineering, Ergonomics, Material Management, Method Time Measurement, Operation Research, Manufacturing Engineering などが挙げられる [4]。 日本においてもほぼ同様の分化がなされた。

日本 IE 協会(JIIE)が 1960 年に設立されて以来、毎年 開催してきた製造企業の I E活動成果発表の内容を整理 して表1にまとめた。この表から戦後 50 年にわたる我 国製造業の生産性向上を実現してきた I E活動の実態と 変遷をうかがい知ることができる。この継続的・発展的 な I E活動実践こそが日本の製造業に今日の国際的競争 力を保持せしめた最大の要因といっても過言ではない。 この発展過程から I E活動領域が拡大している様子が うかがえる。この拡大状況を対象システムのレベルで区

分・整理すると、おおむね図1のようになる。

3) I E活動の現状

敢えて極論すれば、製品を開発・設計する技術と設計 図面どおりに加工・処理する技術(固有技術)さえあれば、 製品を造ることは可能である。ただしコスト、品質、納 期/時間などの顧客要求を充足できるかどうかについて は保証の限りではない。 I E技術は固有技術と生産能力 要素(作業者と設備)を経営的に活用するという運用技 術的側面を有している。これが故に I E技術の活用に際 しては、経営主体者の価値判断の入り込む余地が存在す る。固有技術の厳密さ(rigid)と運用のルーズ性(loose) の関係把握は I E技術の役割と活用を論じる上で重要な ポイントである。

かかる認識のもとで製造企業における生産活動のあり 様を概観すると、そこには以下のような運用技術上のレベルに差異がみとめられる。

- #0 その場しのぎの運用
- #1 経験と勘に頼った運用
- #2 設定されたルールに基づく運用
- #3 ルールに基づいた方法による運用
- #4 システムでの運用

この運用技術の差異は**図1**に示すすべてのシステムレベルに当てはまる。IE技術を活用するかしないかの決定権は経営者にあり、結局は経営者の企業経営への取り組み姿勢と見識のあり方に帰される。つまりIE技術は企業経営のあり方と直接的に関係づけられてくる。

表1:製造企業における I E活動の変遷 [5]

<1960~>

- · The reports on IE workshop in America
- · Case studies on IE introduction
- · Work measurement
- · Present work analysis
- · Application of standard time
- · Work improvement
- · Plant layout and materials handling
- · Work process control
- · Quality control
- · Scheduling

<1970~>

- · Inventory control
- · Production planning system
- · Physical Distribution system
- · Industrial robots
- · Application of OR
- · EDP of office work
- · Job satisfaction
- · Low cost automation

<1980~>

- · Assembly line and production process design
- · Productivity and efficiency improvement of each work places
- · Production management
- · EDP of various control affairs
- · Rationalization of yard transportation and storage
- · TQC、TPM
- · CAD/CAM

<1990~>

- · Variety production management
- · Individual production management
- · Flexible production,
- · Logistics system
- · Total cost reduction
- · Improvement design of production system
- · OA、 FA、 CIM

<2000~>

- \cdot SCM
- · Global logistics
- · Products development process
- · Integration of development, production and marketing
- · Global production strategy
- · Disposition problem of oversea production bases
- · Global information net work

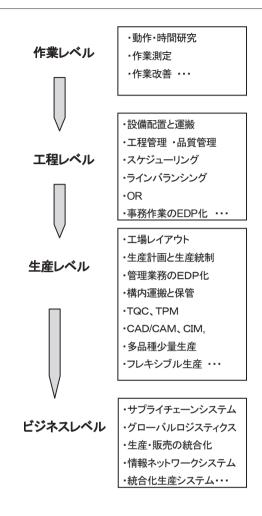


図1: I E活動領域の拡大(システムレベルからみた)

製造企業における I E技術の活用目的は**図1**に示す各レベルのシステムを効果的かつ効率的に構築・運用し、経営目標の達成に役立てることにある。この意味から工場の生産現場では現在でもテーラー、ギルブレスのストップウォッチや動作分析が必要であり、この作業レベルのシステム基盤の上に各種の管理システム、生産システム、業務システムが構築され運用される。"ストップウォッチの IE" は決して古いのではなく、時間測定手法は生産活動の基盤技術として重要な使命を果たしている。

4) 今後の I E活動

最近のいわゆる"リエンジニアリング"と称されているような業務革新をねらった大規模なビジネスレベルのシステム構築において、IE技術者には出番があるのだろうか? 高度化した先端的な固有技術とコンピュータ技術の適用を前提とした業務革新プロジェクトにおける

I E技術者の役割は? この問い掛けこそがまさに本報の執筆動機である。

3. 業務革新とIE

1) 業務革新とシステム設計

業務革新とかリエンジニアリングなる用語は、他企業との差別化を計って競争優位性を確保するための戦略表現の1つであり、ただ単に"革新します"、"再構築します"といっているに過ぎない。戦略を戦術として具現化するには、戦略に具体的な方向性を付与せねばならない。つまり何をなすべきかを明確に打ち出さねばならない。戦略を具現化していく過程については Krick [6] による問題解決過程および丹下・鈴木 [7] によるシステム設計過程が明らかにしている。問題解決ないしはシステム設計過程ではまず解決すべき問題、すなわち"What"が明確化されねばならない。その上でその問題解決の方法・手段としての"How"が探究される。

図2に問題解決過程ないしはシステム設計過程での What と How の関係を示す。

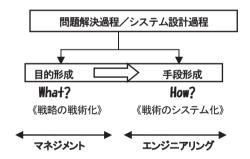


図2:問題解決過程("What"と" How"の関係)

本論のねらいは業務革新なる戦略とその実現手段である業務システムのエンジニアリング活動との関わりから IEについて論じることにある。以下、製造企業における業務革新を前提として論をすすめる。

2) 業務革新の実態

現在、製造企業でどのような業務革新が実現されているかを明らかにために、前出の JIIE が開催した直近 3 年間の成果発表の中から、該当するテーマを表2に示す。

設計対象となるシステムは、材料→製品への物的変換システム、生産計画、生産指示その他の管理情報処理システム、物的処理と情報処理を統合化した生産システム、生産部門を中核として上流・下流のプロセスを包含するSCM、ロジスティクスシステムなどに区分される。

表2:業務革新に関するテーマ

- 情報を活かした生産システム改革 ~デジタルマニュファクチャリングの実践~
- 2) インターネット技術活用による営業業務革新」 ~Java/WML活用の販売管理システム構築
- 3) 自動車・鉄鋼間のSCMの実現
- 4) 国内生産の基盤強化と差別化 ~グローバル戦略の一環として~
- 5) IMSによるサプライチェーンの実践
- 6) 企業間ネットワークと生産体質強化によるリード タイム短縮
- 7) 新製品開発と量産立ち上げのスピード化
- 8) 需要変動に柔軟に対応する生産システム構築
- 9) グローバルERPプロジェクトと業務改革への取組み
- 10) 環境経営の実践~環境保全と経済価値追求の融合

業務革新の要請を満たし得るシステム構築においては、物的処理のための高度な制御技術・自動化技術、情報処理のための高度なコンピュータ技術がもっぱら主役を演じており、少なくともIE技術に頼ったシステム構築ではないことは明らかである。

結論として全社的規模の業務革新には必要とされる各分野の固有技術者を専門スタッフとしたプロジェクト体制での展開が不可欠となる。

3) 業務革新プロジェクトにおける I Eの役割

全社レベルないしは工場レベルでの大規模業務革新の 推進に際しては、経営トップ層での慎重な検討と意思決 定がなされた後に、プロジェクト体制が編成される。こ のプロジェクト展開過程でのIEの役割について以下に 述べる。

(1) 業務革新プロジェクトのライフサイクル

プロジェクトのスタートから終了までの全過程のことをプロジェクト・ライフサイクルという。エンジニアリングの世界では業務革新問題は新規業務システム設計問題としてとらえられることから、業務革新プロジェクトの過程は図3に示すシステム設計プロジェクトのライフサイクルとみなせる[8]。

このプロジェクトは経営トップが打ち出した業務革新 戦略に導かれてスタートし、システム企画→システム設 計→システム設置と展開され、最終的には新しい業務シ

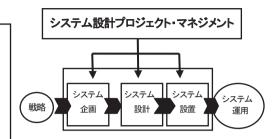


図3:システム設計プロジェクトのライフサイクル

ステムの運用段階を迎えて終了する。 以下に各段階に ついて説明する。

- ① フェイズ I:システム企画
 - ・経営戦略からのシステムへの要求→システムが果 たすべき機能の決定、つまり"What"の決定
 - ・機能に基づくシステム構想→システム企画書の作成 (システム効果も含む)
 - ・このフェイズの出力:プロジェクトの範囲・条件・ 制約、システム企画書、目 標、予算、期間、人的資源 など
- ② フェイズⅡ:システム設計
 - ・全体システムを構成する部分システムごとにプロ ジェクトメンバーの決定(固有技術者、コンピュ ータ技術者、その他業務に固有の専門家)
 - ・フェイズ I で決まった設計条件と制約の枠内での 部分システムごとの設計と評価
 - ・このフェイズでの出力:各サブシステム設計図面 サブシステムを統合した 全体システム設計図面
- ③ フェイズⅢ:システム設置
 - ・システムの設置、試運転 、立上げ
- (2) 各フェイズでの I Eの役割

G, Salvendy 編 [4] に準拠する I Eの専門知識を有する I E技術者が業務革新プロジェクトの各フェイズにて担うことになる役割について以下に要約する。

なお、ここでは当該工場で生産している製品および製造 設備・工程に関して十分に熟知しかつ生産管理全般と資 材・製品の物流業務にも精通している中堅のIE技術者 を前提として論じる。

- ① プロジェクトのライフサイクル全体
 - ・プロジェクト・マネジメント
 - ・経験不足の場合はPMスタッフ

- ② システム企画フェイズ
 - ・業務システム構想化
 - ・構想したシステムの効果性評価
 - ・実現可能性研究(Feasibility Study)
- ③ システム設計フェイズ
 - ・コスト、時間、品質、資源の管理 (P-D-C-Aマネジメントサイクルを回して) (設計作業は固有技術者がおこなう)
- ④ システム設置フェイズ
 - ・コスト、時間、品質、資源の管理(P D C-Aマネジメントサイクルを回して)(設置作業は現場作業者、外部業者がおこなう)
- 3) プロジェクトへの I Eの参画

各フェイズでIEが貢献可能な仕事内容をまとめると、 IE技術者はシステム設計プロジェクトにおいて、

① プロジェクトマネジメント、② システム企画、③ システム統括管理の役割を担うことになる。

以上をまとめてIE技術者の設計プロジェクトへの参画モデルを図4に示す。

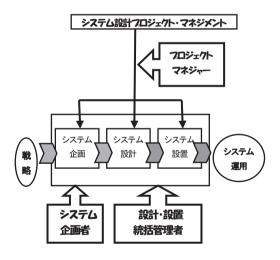


図4: I E技術者の設計プロジェクトへの参画モデル

この参画モデルに基づいて、それぞれの役割について 考察する。

① プロジェクト・マネジメント

従来から I Eは受注生産の管理技術として、プロジェクトタイプの業務を対象とした日程計画(スケジューリング)、進捗管理、コスト管理に関わる問題は扱ってきた。ここでのプロジェクト・マネジメントの役割は、プロジェクト全体と各フェイズを対象として、4つのパラメータであるコスト、時間、品質、資源を評価尺度とした管理

である。業務の革新性とシステム領域の広範性が高いプロジェクトの場合は、プロジェクトマネジメントのあり方によって、その企業の社運が左右されかねない。プロジェクトの成功・不成功はプロジェクトマネジャーの能力にかかってくる。

② システム企画

プロジェクトの最初のフェイズであるシステム企画は 経営トップの業務革新戦略にもとづいた戦術化構想を確 定する段階であり、ここでは主として経営効果に関わる 検討がなされる。経営効果は業務革新によって達成され る競合企業との差別化の程度で計られる。この効果を最 大化するにはどのような業務システムを構築すればよい か? の問いかけに対する答えが重要な意味をもつ。つ まりプロジェクトの成果は"どのようなシステムを構築 するか?"(What)によって決まってくる。 このフェ イズでの I Eの役割は大きくとらえて、以下の 2 点に集 約される。

- (i)経営効果、採算性の分析・検討
- (ii) システム構想 (システム範囲、設計条件、シス テム機能など)

③ システム設計・設置の統括管理

企画されたシステムを"いかにして革新的な業務システムに具現化するか?"(How)がシステム設計フェイズのねらいである。構築しようとする業務システムの範囲が広く規模が大きくなると、当然のこととしてシステム全体はいくつかのサブシステム、例えば製造、販売、倉庫・配送、情報ネットワークなどのコンポネントに分割される。

このフェイズは技術的な課題解決が中核となり、かつ 革新性を狙うことから、高度な設計能力を有する人的資源として複数の異なった領域での技術者や専門家がそれぞれのサブシステム設計の主役を演じる。したがって複数のサブシステムを業務システム全体として統合する役割が不可欠となる。システム統括管理とはまさに複数のサブシステムをトータルシステムにまとめていくエンジニアでありマネージャーである。このような役割を担える人材としてはIE技術者が最もふさわしい。

以上はシステム設計フェイズにおける統括管理について述べているが、システム設置フェイズにおいても、システム設計フェイズと同様に、統括管理の機能は必要とされる。とりわけハード色が強い大規模システムでは設置工事が長期化し、固有技術的にも高度化、複雑化してくることから、システム設置統括管理の役割は重大となる。紙面の都合上ここでは設置フェイズについての詳細は省略する。

4. 結び

I Eが成立してから今日に至るまでの発展段階を主たる対象システムのレベル区分で概観し、I Eの役割がその領域拡大に伴って変化してきた状況を明らかにした。この変化を促してきた直接の要因は、いうまでもなく産業界からの要請にある。現在の先端的製造企業では、企業ないしは工場レベルでの革新的業務システムは厳しい競争環境のもとでの競合企業との差別化手段とみなされている。

革新的業務システムのシステムレベルの高さを考えると、このシステムのエンジニアリングは、従来のIEが対象としてきたシステムレベルでのエンジニアリングと同じ次元で論じることはできない。そこで本論では、最近の産業界が熱心に取り組んでいる業務革新問題を切り口として、システム設計プロジェクトにおけるIEの役割に関する1つの見解を導出した。

本研究の結論を以下に記す。

「IEの活動領域の拡大にともなうIEの役割は業務革新プロジェクトへの参画にあるとの考えのもとで、新たなIEの役割は、①プロジェクトマネジメント、②システム企画、③システム統括管理の3分野である」

上記結論は、別の見方をすると、リエンジニアリング (Re-engineering) における I Eの役割とみても差し支 えない。

製造企業、サービス企業さらに行政機関までもが、激しい差別化競争ないしは合理化・効率化環境のもとで、顧客に提供する製品・サービスに固有する技術(固有技術)、情報処理・伝達技術(IT/ネットワーク技術)を有効活用した業務革新プロジェクトを手がけている。かかる状況下での戦略の戦術化手段としての業務システムの具現化に際し、IE技術者はプロジェクトの要諦的な役割を果たすことになる。

I Eの活動領域の広がりに伴う業務革新問題への取組みに際しての本質的な課題は、"マネジメントとエンジニアリング"の両分野の統合化を目指した体系づくりにあると考える。すなわち、"固有技術を活用した業務システム開発プロジェクトをどのようにマネジメントするか?"が I Eの役割として広く社会から要請されている。これはまさに狭義の「MOT」とも言えそうである。

【参考文献】

- [1] 山田圭一、"現代技術論"、朝倉書店、((973)、p.27
- [2] 石谷清幹、"工学概論"、コロナ社、(1977)、 pp.166-168
- [3] 神奈川大学工業経営学科編、学科設立 50 周年記念 "曙光"、(1989)、pp.63-65
- [4] G. サルバンディ編、日本能率協会訳、"I Eハンド ブック"、日本能率協会、(1986)、pp.8 - 15
- [5] S. Tange, M.Kitaoka, "The role of IE in competitive business environment", Proceeding of International Conf. of CIE, Alexandria, (2007-10)
- [6] E.V. Krick, "Introduction to Engineering and Engineering Design, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., (1969), pp.107-155
- [7] S.Tange, T.Suzuki, "Comparative study of system design methods", JIMA, Vol.31 No.4, pp.441-447
- [8] S.Tange, M.Kitaoka, "Business process innovation in competitive environment", Proceeding of 2nd Euro Conf. on MOT, Birmingham, (2006-8), pp.680-687



待ち行列理論の生産・流通システムへの 適用における一考察

北岡正敏*

Application of Queueing Theory for Production and Distribution Systems

Masatoshi Kitaoka

1 はじめに

SCM (サプライチェーンマネジメント) は海外や国内の 企業から部品、半製品の調達をする。そして、国内や海外 の工場でこれらの部品や半製品を用いて製品の加工、組み 立てをし、完成品は物流センターから消費者に出荷するま での流れをシステムの対象にしている。このようなシステ ムには部分的に待ち行列現象が多く見られる。そして、シ ミュレーションや待ち行列理論で解析している[1]。現在、 待ち行列理論はコンピュータ処理や通信ネットワークに広 く利用されている[2]。しかし、待ち行列理論は古くから IE の分野で利用されてきた [1][3]。これまで、生産・物流現場 で発生している問題はシミュレーションで解析することが ある。しかし、日本では欧米に比べてシミュレーションに よる解析はコストや時間面で使用例が少ない。最近、IE 技術者の不足で生産流通現場で科学的な管理手法の適用例 が減少している。現場で事象解析を行うには待ち行列理論 が有効である。しかし、現場で発生する滞留現象を厳密な 数学的な手法で解析することは困難である。このため、滞 留現象解消するため近似解を用いて解決している例が多い。 このような中で待ち行列理論を生産流通の場で適用すると きの問題点について整理してみた [5][6]。

2 単一の待ち行列モデル

2.1 M/M/1, M/M/c 待ち行列モデル

1) $M/M/1/\infty$ 型:生産現場における工程における滞留問題や機械の修理や保守問題それに配送センターでの包装・保管・ピッキング作業での滞留や在庫管理の問題の解決適用されている。また、生産システムのマクロ的な解析にも利用できる。たとえば SCM では工場全体をサービス施設とみなし、その平均能力を μ として到着率 λ で部品の投入をして生産は完了するものとしてモデル化をしている [4][5][6]。2) $M/M/c/\infty$:生産流通問題ではサービス施設の数による滞留時間と数が問題になるシステムに適用できる。1)機械

*教授, 情報システム創成学科 Professor, Dept. of Information Systems Creation の修理問題で故障に対する修理員の最適な数の決定。 1 台の機械の修理に要する時間が指数分布とし、故障製品の到着がポアソン分布として指定時間 f 以上待つ確率から最適な修理員の数を決定する問題。 2) 流通センターにおける自動倉庫全体をサービス施設とみなし受注 λ の到着に対する、スタッカークレーンによる取り出しをサービス μ とみなすして処理できる。このときスタッカークレーンの台数がサービス施設の数になる。 3) 配送センターにおける荷受場所や出荷場所での最適なバース数の決定問題。加工工場での最適な機械台数決定問題 [5][6][7][8]。

2.2 M/M/c/N, M/M/c/有限母集団の待ち行列モデル

1)M/M/1/N 有限待ち行列モデル

有限待ち行列モデルはサービスを受ける 1 人の客を含めてN 人の客しか収容できない。サービスを受ける人が 1 名のため、待合室にはN-1 人までが入れる。待合室がいつばいになるとあふれ出る。このようなシステムは有限待ち行列M/M/1/Nになる |7||8|。

2) M/M/c/N 有限待ち行列モデル

有限待ち行列の窓口の数がcでシステム内で待つことができる客の最大数がNとする。客数kが容量Nを超えた時 λ はゼロになる。このような問題はたとえば自社が持っトラックや加工機械の故障により故障台数がN以下のときは自社で修理をする。機械の修理の班数はc組とする。そして、故障の台数がN以上になるとN-1を超える分は外部の修理工場に依頼する。このとき修理の完了する平均時間の問題などがある。計算で P_k はM/M/cの無限母集団問題と同じになる。 P_k はM/M/cで導いた式を用い、kの範囲によりつぎのようになる [3][5][9]。

$$P_k = \begin{cases} \lambda^k / k! \mu^k \cdot P_0 & (1 \le k < c) \\ \lambda^k / (c! c^{k-c} \mu^k) \cdot P_0 & (c \le k \le N) \end{cases}$$

 P_0 の値は M/M/c の値を用いる。ここで、 $a=\lambda/\mu$ でho=a/c とする。

$$P_0 = \left[\sum_{k=0}^{c-1} \frac{a^k}{k!} + \frac{a^c}{c!} \sum_{k=c}^{N} \left(\frac{a}{c} \right)^{k-c} \right]^{-1}$$

評価関数は次式になる。

$$\begin{array}{rcl} L_q & = & \frac{P_0 a^c \rho}{c! (1 - \rho)^2} [1 - \rho^{N - c + 1} - (1 - \rho)(N - c + 1)\rho^{N - c}] \\ W_q & = & W - \frac{1}{\mu} = \frac{L_q}{\lambda (1 - P_N)} \end{array}$$

3)M/M/c,有限母集団

有限母集団として工場の機械台数、自社のトラック台数、工場での測定器台数など自社で保有するこれらの機械を有限母集団とみなす。これらの機械やトラックの故障発生問題に適用できる。また、在庫管理問題にも利用できる。平均 λ の割合で生産し、1つの製品の完成から次の完成まで指数分布とする。需要はポアソン分布にしたがう。在庫がKになると生産を中止しK-1以下になると生産を開始する。このとき、平均在庫量、品切れ確率、生産中止確率は待ち行列の問題になる。このように在庫問題は生産率 λ で到着し、需要がサービス率 μ の指数分布になる。同様に機械の予備部品の問題も在庫管理と同様に処理できる。

2.3 M/E_k/1 待ち行列モデル

経済学者のアダムスミスは 1776 年にピンの生産による作業分割の効果を述べている。作業工程を 1 工程から 1 8 工程に分割すると生産性が百倍以上になったことを報告している。同じように現在はセル生産における作業分割の問題が大きくなっている。待ち行列理論によれば分割数が k 個になると作業時間は位相 k のアーラン分布になる [6][7]。ここでは $M/E_k/1$ における作業分割数とシステム内の評価値の関係を調べる。評価値は 1) 客の平均数 L,2) 平均待ち行列 L_q ,3) 平均待ち時間 W,4) 行列待ち時間 W_q を用いる。 $M/E_k/1$ における評価の式は次式になる [10][11]。

1) システム内での客の平均数 L

$$L = \frac{\rho[k(2-\rho)+\rho]}{2(1-\rho)k}$$

2) 平均待ち行列 L_0

$$L_q = \lambda W_q = \frac{(k+1)\rho^2}{2k(1-\rho)}$$

3) 平均待ち時間 W

$$W = \frac{1}{\mu} \frac{\left[k(2-\rho) + \rho\right]}{2(1-\rho)k}$$

4) 行列待ち時間 W_q

$$W_q = \frac{(k+1)\rho}{2k\mu(1-\rho)}$$

作業時間と分割数の関係

 $M/E_k/1$ の待ち行列において $\rho=0.4$ のときフェーズ k とシステムの評価値の関係は表 1 のようになる。 表のように $k=1,2,3,4,10,20,\infty$ はつぎのようになる。

	$k = \infty$	k = 20	k = 10	k = 4	k = 1
L	0.533	0.540	0.547	0.566	0.660
L_q	0.133	0.140	0.140	0.166	0.260
W	27	27	27	28	33
W_q	7	7	7	8	13

表から k が小さくなるとサービス時間の分布が増加する。また、行列の数も増加する。そして、システム内で過ごす時間と待ち行列の長さは長くなる。このため、分割数の効果が出ている。しかし、セル生産では正味作業でなく、部品の供給などの準備作業が必要になる。また、製品や半製品の搬送が作業が発生する。このような付帯作業の時間は単純に分割数が増えると増加する。この2つのトレード関係を考慮しなければならない[9||10||11|。

2.4 $M^{[b]}/M/1$ 集団待ち行列

多くの場合、客は1人でなくグループで到着する。これは集団待ち行列という [8]。そして、サービスはグループで受ける。たとえば、部品の輸配送はトラックを用いる。このとき、1 台のトラックには複数個の部品を積載してある。サービスとしては積荷をトラックから降ろすのにフォークリフトを用いておこなう。工場の搬送車には複数の部品が積載されている待ち行列理論では1個当たりの作業時間が指数分布にしたがうものとする。これも集団待ち行列になる。同様に荷卸し場から保管庫までと工場の出荷場所からバースまで荷物を運ぶのにフォークリフトを用いる。このような作業内容も同様である。いま、k 人の客が到着するときの評価関数は次式にしたがって計算をおこなう。ここで $\rho = \lambda k/\mu$ とおくと次のような評価式になる [6][8][9]。

$$L_q = \frac{2\rho^2 + (k-1)\rho}{2(1-\rho)}$$

$$W_q = W - 1/\mu$$

2.5 M/G/1 待ち行列モデル

到着時間間隔はポアソン分布であるがサービス時間の分散 が σ^2 の作業が存在する。このような作業は配送センターにおける製品の受注にはポアソン分布になるが商品の出荷 作業の時間は一般分布となる。オーダピッキング作業もこのモデルに適用できる。また、工場での機械の故障発生も ポアソンであるが、複雑な機械では修理作業が一般分布と なりこのモデル式が適用される。しかし、自動機械を用いた組み立て作業や加工時間はバラつきが存在しないため、 $\sigma=0$ としてモデル式を適用する [6][9]。

$$L_q = \frac{\lambda^2 \sigma^2 + \rho^2}{2(1 - \rho)}$$

$$W_q = \lambda \left(\sigma^2 + \frac{1}{\mu^2}\right) / 2(1 - \rho)$$

2.6 D/M/1 待ち行列モデル

到着時間間隔が一定で、サービス時間がポアソン分布でサービス窓口が1個のときに適用できる。使い捨てカメラの再生処理では工程全体をサービス施設とし工程全体を待ち行列システムとしてモデル化して使用している。自動化ラインでの検査工程に人間が入り検査作業を行うとき、検査時間は指数サービス時間にしたがう。機械の加工や組み立て工程では作業時間が一定になる。そして、搬送装置から検査工程までは到着時間間隔は一定としている。そのときの式はつぎのようになる[8][9]。

$$L_q = \frac{\theta^2}{1-\theta}$$

$$W_q = \frac{\theta}{\mu(1-\theta)}$$

ここで θ は $0 < \theta < 1$ となる。またこの値は次式から求める。

$$\theta_k = e^{-(1-\theta_{k-1})/\rho}$$

3 開放型待ち行列

開放型待ち行列理論 (Open Queueing Network) とは単一待ち行列モデルを拡張した理論である。オープンネットワーク型待ち行列理論には多くのタンデム型 (直列型)、ブランチ型 (分岐型)等のタイプが存在する。SCMの内容は図1のような開放型待ち行列になる。オープンネットワーク型待ち行列理論を適用することにによりリードタイム、在庫量の解析を行うことができる。

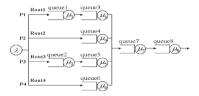


Figure 1: Network model

1) 開放型ネットワーク解析としてのジャクソンの方法

節点が M 個ある開放型ネットワークの待ち行列について ジャクソンの方法がある。ジャクソンの待ち行列ネットワー クは M 個の独立した待ち行列のサーバから構成される。ここでは図 2 に示す内容にそってつぎのような記号を用いる。

- 1) 外部から節点 i に客がポアソン分布で到着率 λ_{oi} で到着する。 λ は外部からの到着率の合計である。 $\lambda = \sum_{i=1}^{M} \lambda_{oi}$
- 2) λ_i は i 番目の節点における客の到着率である。
- 3) すべての客は異なったサーバから他のサーバに出て行く。 このとき、 $p_{i,j}$ は節点 i においてサービスが終了した客が i番目の節点に移動する確率である。
- 4) μ_i は節点 i におけるサービス率で $1/\mu_i$ は平均サービス時間である。
- 5) p_{0j} は外部から節点 j に到着する確率で、 p_{i0} は節点 i でサービスの終了した後にネットワークを退去していく確

率である

節点 $i=1,2,\cdots,M$ に対する到着率 λ_i は 1) 図 3 に示すように外部からの到着 λ_{0i} でシステムに入るものと、2)j 番目の節点でのサービス終了後に i 番目に移動する確率 $\lambda_j P_{ji}$ により他の節点から客の移動を加えたものである。したがって 次式が成立する ...

$$\lambda_i = \lambda_{0i} + \sum_{j=1}^{N} \lambda_j P_{jk} \quad i = 1, 2, \cdots, M$$
 (1)

この式はつぎのような内容である

「i番目の節点への客の到着率 $(\lambda_i)=i$ 番目の節点への外部からの客の到着率 (λ_{0i})

+j 番目の節点でのサービス終了後にi 番目に移動する確率 $(\sum_{i=1}^{K} \lambda_i P_{jk})$

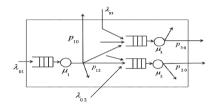


Figure 2: An open queueing network

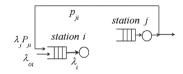


Figure 3: Flow from j node to i node

したがってネットワーク全体にたいして、外部からの入 カと外部への出力が等しい

以上の関係を拡張するとジャクソンの定理が導ける。2) ジャ クソンの定理の適用

以上の関係を用いてつぎの条件を満たし

$$\lambda_i < \mu_i \ (j = 1, 2, \cdots, M)$$

また $\rho_j = \lambda_j/\mu_j$ としたとき、ジャクソンの定理によれば各節点における確率は次式で求まる。

$$P(n_1, n_2, \dots, n_M) = P_1(n_1)P_2(n_2) \dots P_M(n_M)$$

= $\prod_{i=1}^{M} (1 - \rho_i)\rho_i^{n_j}$

ここで $P_i(n_i)$ は節点 i での確率を示す。

ジャクソンの計算手順

これまでに説明したジャクソンの公式の計算は次のような 手順で求める。

手順1: すべての節点 $i=1,2,\cdots,M$ にたいして到着率 λ : を計算する。

手順2:M/M/c の待ち行列により、すべての節点 $i=1,2,\cdots,M$ にたいして $\rho<1$ を確認する。そして、定常状態での確率を計算し、M/M/c の公式により性能評価を計算する。

手順3:ジャクソンの公式によりすべてのネットワークの 定常状態での確率を計算する。

3.1 開放型ネットワーク

1) 直列型モデル

客は最初のシステムにランダムに到着率 λ で到着する。そして、1個のサーバからサービス率 μ_1 の負の指数分布で処理される。サービスが終了すると客は2番目のシステムに入る、そして1個のサーバでサービス率 μ_2 とする。ここで $p(n_1,n_2)$ は最初のシステムの客数が n_1 で2番目の客数が n_2 の定常状態の確率を示す。ここで、 $\lambda < \mu_1, \lambda < \mu_2$ とする。最初の1個のサーバはM/M/1システムで単独の

$$\lambda \longrightarrow \prod \longrightarrow (\mu_1) \longrightarrow (\mu_2)$$

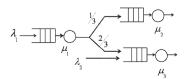
Figure 4: Two systems in tandem

システムに相当する。このシステムからサービスを受けて 退去したとき、この退去は2番目のシステムへの到着になる。このとき、1番目のシステムからの退去はポアソン過程の流れになる。この結果、2番目のシステムも到着率 λ でサービス率 μ_2 のM/M/1と同じ働きをする。これら2つのシステムはそれぞれが独立である。このときの確率は次式になることが証明できる。[4][5][18]

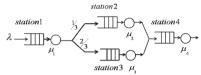
$$p(n_1, n_2) = (1 - \rho_1)\rho_1^{n_1}(1 - \rho_2)\rho_2^{n_2} \quad n_1, n_2 \ge 0$$

2) 分岐フォワード型

事例 1) 分岐フォワード型ネットワークは図のように外部から 2 つの到着がある。サービスは流れに沿って受けるものとする。このときすべてのシステムは定常状態とする。ここでシステム 1 は到着率 λ_1 でサービス率 μ_1 で $\rho=\lambda_1/\mu_1$ の M/M/1、システム 2 はサービス率 μ_2 で到着率 $\lambda_2=1/3\lambda_1$ で $\rho=(1/3\lambda_1)/\mu_2$ の M/M/1 で、システム 3 はサービス率 μ_3 で到着率 $\lambda_3=(\lambda_2+2/3\lambda_1)$ で $\rho=(\lambda_2+2/3\lambda_1)/\mu_3$ の M/M/1 である。



事例 2) 図のような生産工程は4つの処理機械から構成されている。このようなネットワークは M/M/1 が4個あるシステムである。製品 A はステーション 2 に流れ、製品 B はステーション 3 に流れる。いま、外部から注文が最初のステーション 1 に到着率 λ のポアソン分布で到着し、サービス率は μ である。そして、ステーション 2 には 2/3 の割合で製品 A は流れ、そこではサービス率 μ_2 で処理される。そして、1/3 は製品 B でステーション 3 に流れる、サービス率 μ_3 で処理される。そして、最終工程のステーション 4 ではサービス率 μ_4 で処理される。 $p(n_1,n_2,n_3,n_4)$ はステーはている。 $p(n_1,n_2,n_3,n_4)$ はステー



ション 1 の製品の個数が n_1 である確率, ステーション 2 は n_2 で以下、同様な意味をあらわす。 したがって M/M/1 の 直列システムの内容から確率は次式になる

$$p(n_1, n_2, n_3, n_4) = (1 - \rho_1)\rho_1^{n_1}(1 - \rho_2)\rho_2^{n_2}$$
$$(1 - \rho_3)\rho_3^{n_3}(1 - \rho_4)\rho_4^{n_4}$$

工程における平均処理時間はステーション1、ステーション2からステーション4に至る W_a は次式になる。

$$W_a = E[W_1] + \frac{1}{\mu_1} + E[W_2] + \frac{1}{\mu_2} + E[W_4] + \frac{1}{\mu_4}$$
$$= \frac{1}{\mu_1 - \lambda} + \frac{1}{\mu_2 - 2\lambda/3} + \frac{1}{(\mu_4 - \lambda)}$$

3) フィードバック型待ち行列を用いたジャクソンの定理の導入

図5のような2個のサーバをもつフィードバック型の待ち行列にたいして状態遷移の関係からジャクソンの定理を導入できる。サーバ1のサービス率は μ_1 で客数はm,サーバ2のサービス率は μ_2 で客数はnとする。このときシステムが定常状態であるとき状態遷移方程式を導入する。サー

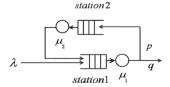


Figure 5: Feed back system of network バ1 の人数 m とサーバ2 の人数 n とする。ここでは説明 の関係で2つのサーバの m,n の確率 P(m,n) を $P_{m,n}$ と表す。m,n にたいする状態遷移は図6 のようになる。定常

$$(m+1,n)$$

$$q\mu_{1}^{\downarrow} \downarrow \uparrow \lambda \qquad q\mu_{1}$$

$$(m+1,n-1) \stackrel{\bullet}{\underset{p\mu_{1}}{\longrightarrow}} (m,n) \stackrel{\bullet}{\underset{\bullet}{\longleftarrow}} \lambda \qquad (m-1,n)$$

$$(m-1,n+1)$$

Figure 6: Transition of m, n

状態における状態遷移方程式は次のようになる [4][12][14]。

$$\lambda P_{0,0} = q\mu_1 P_{1,0} \tag{4}$$

$$(\lambda + \mu_2)P_{0,n} = p\mu_1P_{1,n-1} + q\mu_1P_{1,n} \quad n \ge (5)$$

$$(\lambda + \mu_1)P_{m,n} = \lambda P_{m-1,0} + q\mu_1 P_{m+1,0}$$
 (6)

$$+ \mu_2 P_{m-1,1} \quad m \ge 1$$
 (7)

$$(\lambda + \mu_1 + \mu_2)P_{m,n} = \lambda P_{m-1,n}$$

$$+ p\mu_1 P_{m+1,n-1} + q\mu_1 P_{m+1,n}$$

$$+ \mu_2 P_{m-1,n+1} m, n \ge 1$$
 (9)

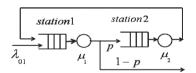
以上の方程式を解くことでジャクソンの公式が求まる。

$$P_{m,n} = \left(1 - \frac{\lambda}{q\mu_1}\right) \left(\frac{\lambda}{q\mu_1}\right)^m \left(1 - \frac{p\lambda}{q\mu_2}\right) \left(\frac{p\lambda}{q\mu_2}\right)^n \quad (10)$$

4) フィードフォワード型の生産工程の分析

1) 基本フィードバック工程: その1

図のような2台の機械で処理している生産工程がある。ジョブは他の工程から到着率 λ で到着する。機械1での処理はサービス率 μ_1 の指数分布にしたがう。製品によっては確率pで機械2にかけられ、別の製品として加工しさらに、機械1にかけられる。そのときのサービス時間は μ_2 の指数分布である。そして、普通品は確率1-pで出荷される。システムで



費やす時間 E[T] はリトルの公式から $\lambda E[T] = E[N_1 + N_2]$ となる。

$$E[T] = \frac{1}{1 - p} \frac{1}{\mu_1 - \lambda_1} + \frac{p}{1 - p} \frac{1}{\mu_2 - \lambda_2}$$
(11)

2) フィードフォワード型の工程:その2

図 7 のようなコンピュータシステムの工程は生産工程と同じモデルとなる。待ち行列モデルをジャクソンの計算手順により求める。外部から λ_{04} のデータが入出力装置 I/O に入り、そのままコンピュータの CPU で計算される。そのあとで 2 つのディスクに入る。したがって M=4 の FCFS システムになる。それぞれの節点における平均

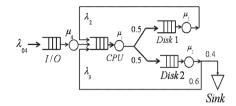


Figure 7: Queueing network for computer system

サービス時間は指数分布をしている。外部からジョブが 1 秒間に λ_{04} の割合で到着する。また、図に示すように、それぞれの分岐確率は $p_{12}=p_{13}=0.5$, $p_{21}=p_{41}=1$, $p_{31}=0.6$, $p_{30}=0.4$ として与えられてるものとする。このときの性能評価とまた, $n_1=3$, $n_2=3$, $n_3=2$, $n_4=1$ のときの定常状態の確率は先にあげたジャクソンの手順で解くことができる。

手順1:次式のような方程式が成立する。

$$\begin{array}{rcl} \lambda_1 & = & \lambda_2 p_{21} + \lambda_3 p_{31} + \lambda_4 p_{41}, & \lambda_2 = \lambda_1 p_{12}, \\[1mm] \lambda_3 & = & \lambda_1 p_{13}, & \lambda_4 = \lambda_{04} \end{array}$$

手順2:性能評価の計算をする。

$$L_{q1} = \frac{\rho_1^2}{1 - \rho_1}, L_1 = \frac{\rho_1}{1 - \rho_i}, L_2, L_3, L_4$$

$$W = \frac{1}{\lambda_{04}} \sum_{i=1}^{4} \frac{\rho_i}{1 - \rho_i}$$

手順 3: すべてのネットワークの定常状態での確率を計算 する。

6) フレキシブル生産システム

先にあげたコンピュータシステムの方法は次に示すような FMSの性能評価と同じ手順になる。FMSは図8のようなステーションから構成されている。

1) ロードステーション (LO) はワークをパレットに積載するロボットとする。2) 同じ型の旋盤 (LA1,LA2) が 2 台、3) ミリングマシン (M1,M2,M3) 3 台、3) 無人搬送車2 台 (Transfersystem) がこれらの機械間を自動的に搬送する。4) パレツトの取り出し装置 (U) でワークを取り出す装置である [15][16][17][18]。

いろいろな種類のワークを加工する。そして、加工するワークの種類と量により旋盤、ミリングマシンの稼働率は異なる。このため、過去のデータからFMSの搬送システムの中を流れるワークの分岐確率はあらかじめ既知とする。このシステムはつぎのような問題を解決することになる。

- 1)機械の稼働率,2)仕掛り在庫量、3)ワークの待ち行列、
- 4) 搬送車の稼働率,5) 機械の加工待ち時間。この FMS シ

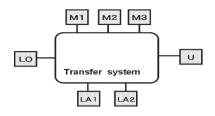


Figure 8: Layout of a simple production system

ステムは図9のような待ち行列システムに変換できる。従

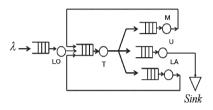


Figure 9: Open network model of production system

来、このような問題は既存のシミュレーションソフトを用いて解析することが多い。しかし、待ち行列モデルにより 理論的に解く事ができる。

4 閉鎖型ネットワーク待ち行列

4.1 閉鎖型ネットワークの例と解析

閉鎖型 (Closed Network) 待ち行列は外部からジョブや客が到着がなく、かつネットワークシステムから外部への出発もない [10][11][12][18]。すなわち、システムとして閉じたシステムである。この問題はコンピュータのバッチ処理に適用されてきた。このような条件の問題は物流センタにおけるフォークリフトの稼動、オーダビッキング作業などに見られる。工場では機械の修理問題やデータの測定問題がある。しかし、この問題をさらに拡張すると、開路ネットワーク問題も閉鎖ネットワークにおきかえることもできる。

1) 閉鎖型フレキシブル生産システム

図 10 は階層型のフレキシブル生産システムである [15][16][18]。システムは次のような要素から構成されてい ス

1) 2 台の積載と取り出しステーション LU: Load/Unloadstation, 2) 2 台の旋盤 (LA), 3) 異なった工具を持つ 3 台のマシニングセンター (M_3, M_4, M_5) , 4) 8 台の搬送装置 (T)。生産システムは 3 つの異なる生産階層に分けられて生産している。 1 番目の流れはワークが LUステーションでパレットに積載される。そして、搬送装置により旋盤か機械 1 に移動する。最終的には LUステーションに来てワークは離される。この FMS システム

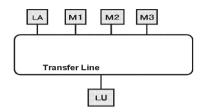


Figure 10:Layout of a closed multiclass model

の1番目の動きは図11のような待ち行列システムに変換できる。以下、2,3番目の流れについてネットワークを作成する。そして、閉鎖の解析手段により計算をおこなう。

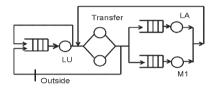


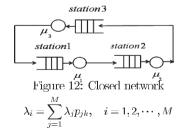
Figure 11: Closed queueing model of FMS

2) 閉鎖型ネットワークの解析

閉鎖型ネットワークの解析はつぎのような条件をもうける. 1)M は節点の数で、K は閉鎖ネットワークのジョブ数で k_1,k_2,\cdots,k_N はネットワークのジョブの状態を示す。

- $2)m_i$ は節点 i における平行したサーバ数。
- 3) すべてのジョブや客は節点iに到着して、そこで指数分布のサービス μ_i を受ける。
- $4)p_{ij}$ は i 番目の節点でのサービス終了後に j 番めの節点に移動するジョブの分岐する確率。
- $5)n_i$ は節点 i でのジョブの数。

閉鎖型システムにおける到着率 λ_i は外部からの到着はない



ここでは到着率 λ_i のかわりに e_i という記号を用いる。閉鎖型では待ち行列の到着率 λ_i や実際の利用率 λ_i/μ_i は利用できない。 e_i はジョブが i 番目の節点にたいしての平均訪問回数を定義する。これは相対到着率という。 $e_i=1$ とは節点 i への相対的な訪問回数を示す。

$$e_i = \frac{\lambda_i}{\lambda}$$

そして、閉鎖型待ち行列は次式になる。この計算は一般に $e_1 = 1$ とおいて求める。

$$e_i = \sum_{j=1}^{M} e_j p_{ji}, \quad i = 1, 2, \dots, M.$$
 (12)

4.2 性能評価

1) 限界確率 P_i(n):

閉鎖ネットワークにおいて、i番目の節点の限界確率 $P_i(n)$ は、この節点が $n_i = n$ のジョブを含む確率のことで、つぎのように計算する。

$$P_i(n) = \sum_{\sum_{j=1}^{M} n_j = N, n_i = n} P(n_1, n_2, \dots, n_M)$$

ここで、 $P_i(n)$ はすべての状態 (n_1,n_2,\cdots,n_M) , $0 \le n_i \le N$ の確率の合計である。そして、 $\sum_{j=1}^M n_j = N$ で,n は i 番目のジョブの数である。このとき次式がなりたつ

$$\sum_{\sum_{j=1}^{M} n_{j}=N} P(n_{1}, n_{2}, \cdots, n_{M}) = 1$$

2) 利用率 ρ_i:

単一のサーバiでの利用率は次式になる。

$$ho_i = \sum_{K=1}^{\infty} P_i(k)$$
 または $ho_i = 1 - P_i(0),$ $ho_i = rac{\lambda_i}{m_i \mu_i}$

3) 到着率 λ_i : ネットワーク型では到着率はスループット (Throughput) とも呼ばれている。

$$\lambda_i = \sum_{k=1}^{\infty} P_i(k) \mu_i(k)$$

4) 平均客数 (平均ジョブ数): 節点 *i* におけるジョブの平均数。

$$L_i = \sum_{k=-\infty}^{\infty} k P_i(k)$$

5) 平均待ち行列:

$$L_{q,i} = \sum_{i=1}^{\infty} (k - m_i) P_i(k)$$

6) 平均待ち時間:

$$W_i = \frac{L_i}{\lambda_i}$$

7) 行列待ち時間:

$$W_{q,i} = W_i - \frac{1}{u_i}$$

4.3 ゴードン・ニューエルの計算法

ゴードン (Gordon) とニューエル (Newell) は閉鎖型待ち 行列における効率のよい計算法を提案している。ゴードン・ニューエルの計算法は局所バランス法や全体バランス法よ りも優れている[18]。

た本基

Gordon と Newell は閉鎖型ネットワークにおける待ち行列

で、それぞれのネットワークにおえる確率はつぎのような 積形式であたえられることを示した。

$$P(n_1, n_2, \cdots, n_M) = \frac{1}{G_M(N)} \prod_{i=1}^{M} \left(\frac{e_i}{\mu_i}\right)^{n_i}$$

ここで $G_M(N)$ は正規化定数で n_i は節点i におけるジョブ数(客数)である。

詳明

この式は開放型ネットワークでの証明と同じようにしてできる。ここで外部からの到着はないため、 $\lambda_{0i}=0$ と $1-\sum_{i=1}^M P_{ii}=0$ となる。したがって次式になる。

$$\sum_{i=1}^{M} \mu_i = \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{M} \mu_i P_{ji} \rho_i^{-1} \rho_j$$

開放型ネットワーク待ち行列の関係からつぎのような局所 バランスの方程式がなりたつ。

$$P(n_1, n_2, \dots, n_M)$$

$$= \left(\frac{e_i}{\mu_i}\right) \left(\frac{e_j}{\mu_j}\right)^{-1} P(n_1, n_2, \dots, n_i - 1, \dots, n_j + 1, \dots, n_M)$$

この式に開放型ネットワーク待ち行列の関係をもちいると 次式になる

$$P(n_1, n_2, \dots, n_i, \dots, n_M)$$
= $P(0, 0, \dots, 0) \prod_{i=1}^{M} \left(\frac{e_i}{\mu_i}\right)^{n_i} = \frac{1}{G_M(N)} \prod_{i=1}^{M} \left(\frac{e_i}{\mu_i}\right)^{n_i}$

 $G_M(N)$ は正規化の定数で、 $P(0,0,\cdots,0)$ のかわりにもちい、つぎのようになる

$$G_M(N) = \sum_{\sum_{i=1}^{M} n_i = N} \prod_{i=1}^{M} \left(\frac{e_i}{\mu_i}\right)^{n_i}$$
 (13)

 $G_M(N)$ は待ち行列の数とネットワークにける総ジョブ数の関数になっている。

4.3.1 ゴードン・ニューエルの計算手順

ゴードン・ニューエルの計算は以下のようにおこなう。 **手順**1: すべての節点 $i=1,2,\cdots,M$ にたいして次式の e_i をもとめる。計算は $e_1=1$ とする。

$$e_i = \sum_{j=1}^{M} e_j P_{ji}, \quad i = 1, 2, \cdots, M$$

手順2: すべての $i=1,2,\cdots,M$ にたいして次式を計算する。

$$R_i(n_i) = (e_i/\mu_i)_i^n$$

手順3:(13)式から $G_M(N)$ を次式で計算する。

$$G_M(N) = \sum_{\sum_{i=1}^M n_i = N} \prod_{i=1}^M R_i(n_i)$$

手順4:ネットワークの確率を計算する。

$$P(n_1, n_2, \cdots, n_i, \cdots, n_M) = \frac{1}{G_M(N)} \prod_{i=1}^{M} \left(\frac{e_i}{\mu_i}\right)^{n_i}$$

4.4 たたみ込み計算法

閉鎖型の計算で代表的な方法がたたみ込み計算法 $(Convolution \quad algorithm)$ と平均値分析法 $(Mean \quad value \quad analysis)$ である。ここではたたみ込み計算法のアルゴリズムについて検討する。M 個のネットワークにおける積形式の閉鎖型待ち行列理論では次式で確率を計算する [4][5][18]。

$$\pi(k_1, k_2, \cdots, k_N) = \frac{1}{G(K)} \prod_{i=1}^{M} F_i(n_i)$$

ここで G(K) は次のようになる。

$$G(K) = \sum_{\sum_{i=1}^{M} k_i = K} \prod_{i=1}^{M} F_i(n_i)$$

さらに $F_i(k_i)$ は次式になる。

$$F_i(k_i) = \left(\frac{e_i}{\mu_i}\right)^{k_i} \frac{1}{\beta_i(k_i)}$$

この G(K) にたいして $G_n(k)$ を $n=1,2,\cdots,N,k=0,\cdots,K$ の条件で次式を定義する

$$G_n(k) = \sum_{\sum_{i=1}^{M} \sum_{k=1}^{N} F_i(k_i)} \prod_{i=1}^{N} F_i(k_i)$$

正規化された値を $G(K) = G_N(K)$ とする。そして次式のようなたたみ込み計算をする。

$$G_n(k) = \sum_{i=1}^k F_n(j) \cdot G_{n-1}(k-j)$$

ここで初期条件として n=1 にたいして $G_1(k)=F_1(k)$ とする。以上から評価値は次のような計算式になる。

1) 限界確率

$$\pi_i(k) = \left(\frac{e_i}{\mu_i}\right)^k \cdot \frac{1}{G(K)} \cdot \left(G(K-k) - \frac{e_i}{\mu_i}G(K-k-1)\right)$$

2) ノード i の出力量

$$\lambda(K) = \frac{G(K-1)}{G(K)}, \quad \lambda_i = e_i \cdot \frac{G(K-1)}{G(K)}$$

3) ノードの利用率

$$\rho_i = \frac{e_i G(K-1)}{m_i \mu_i G(K)}$$

4) ジョブの平均数

$$\bar{K}_i = \sum_{k=1}^K \left(\frac{e_i}{\mu_i}\right)^k \cdot \frac{G(K-k)}{G(K)}$$

参考文献

- [1] 森村英典、大前義次,"応用待ち行列"、日科技連、 (2000), n.83
- [2] 紀 一誠,"待ち行列ネットワーク"、朝倉書店、(2002),p.73
- [3] D.Gross and C.M.Harris," Queueing Theory", Wiley-International, (1998)
- [4] N.C.Hock, "Queueing Modeling Fundamentals", John-Wiley and Sons, (1996)
- [5] L.Kleinrock, "Queueing Systems, Vol.1", John-Wiley and Sons, p.10-395, (1996)
- [6] G.F.Lawler,"Introduction to Stochastic Process", Chapman and Hill, p.53, (1995)
- [7] J.L.Jain,S.G.Mohanty and W.Bohm,"A Course of Queueing Models", Chapman and Hill/CRC, p.84, (1996)
- [8] B.D.Bundy, "Frontiers in Queueing", Arnold, p.139, (1996)
- [9] J.H.Dshalalow, "Queueing Theory", CRC Press,p.3-116,p.117-197, (1997)
- [10] R.Nelson, "Probability,Stochastic Process,and Queueing Theory",Springer-Verlag,,p.429-501.(1995)
- [11] K.S.Trivedi, "Probability and Statistics with Reliability, Queueing and Computer Science Applicati", John Wiley and Sons, p. 337, (2002)
- [12] L.Breuer and D.Baum,"An Introduction to Queueing Theory", Springer
- [13] W W.J.Stewart, Numerical Solution of Markov Chains, Princeton University Press, (1994)
- [14] L.Breuer and D.Baum,"An Introduction to Queueing Theory", Springer, p.62, (2005)
- [15] A.Altiok, "Performance Analysis of Manufacturing Systems", Springer, (1996)
- [16] G.N.Krieg, "Kunban-controlled Manufacturing Systems", Springer, p.36, (2003)
- [17] N.U.Prabhu, "Foundation of Queueing Theory", Kluwer Academic Publisher, p. 36, (1997)
- [18] G.Bolch, S.Greiner, H.Meer and K Trivedi, "Queueing Networks and Markov Chains", p. 263-420, (1998)



流体フィルタの性能測定及び評価に関する研究

浦田 暎三* 田嶋 和夫**

Measurement and Estimate of Fluid Power Filters

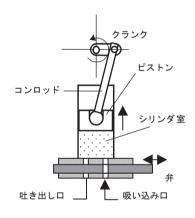
Eizo URATA* Kazuo TAJIMA**

1. 緒言

研究課題であるフィルタの性能測定は、作動流体の汚染管理を行うための基礎研究として欠かせない部分である. 研究の報告に入る前に、作動流体の汚染管理とはどういうことであるかを説明しよう. 作動流体は、流体駆動装置に充填する流体である. それでは流体駆動装置は、どのようなものか. 建設機械、たとえばショベルカーで、バケットを動かしているのは、油圧シリンダである. ポンプで加圧された流体をシリンダに送りこむことにより、シリンダのピストンが駆動され、必要な作業が行われる. この場合のポンプからピストンまでの動力伝達系をまとめて、流体駆動装置という. このような流体駆動装置は、建設機械に限らず、車両、航空機、工作機械、クレーンなど、およそ強い力を出力として必要とする、あらゆる機械に装備されているもので、機械工業における基幹技術の一つである.

流体駆動装置の基本構成要素の一つはポンプである. ポンプがなければ流体の圧力を高めることができないから,流体駆動装置が成立しない. この分野で使うポンプは容積形ポンプと呼ばれ,その動作は,固体壁の移動により流体を押し出すという原理に還元できる. すなわち,図1のようなピストンシリンダ装置と同等なものである.図には上下運動するピストンと,ピストンの上下運動に同期して往復運動する弁機構が描いてある.図において,クランクの回転によりピストンが上に向かって動くときは,シリンダ室と吸い込み口を接続し(図1(a)),下に向かって動くときは,弁が切り換わっていて,シリンダ室内の流体が吐き出し口から出る(図1(b)). 実際に使って

いるポンプでは、クランクに代わりにカムを使ったりするし、ピストン数を複数にしたりするが、原理は同じである。



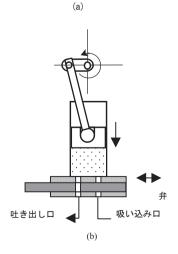


図1 流体駆動に用いるポンプ

*教授 機械工学科

Professor, Dept. of Mechanical Engineering

**教授 化学教室

Professor, Laboratory of Chemistry

ポンプは上記のように作動するのであるが、このとき、ピストンはシリンダにぴったりとはまっていなければならない、すき間があると、そこから流体が逃げてしまい、効率が下がるからである。もちろん、完全にすき間が無いならば、ピストンとシリンダ壁は固着してしまうから、微小なすき間は必要である。したがって、微小ながらすき間があり、そこを流体が流れることになる。その流体中にもし、砂粒のような固形物が混じっていたら、どうなるか、図2はすき間と、そこを通る微粒子を、やや大げさに描いたものである。

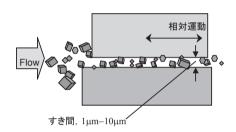


図2 すき間と微粒子

実は、二つの固体壁が相対運動するという状況は、ポ ンプ内の小さなピストンとシリンダ壁の間だけではなく, 流体駆動装置で使用される、弁やアクチュエータ(出力 要素)の中にも常に発生する. それゆえ, 図2の状況は, 流体駆動装置内では、ごく普通に生じているのである. すき間を通過する固体粒子の寸法が、すき間よりもずっ と小さくて、粒子が流体と一緒に流れてしまうならば、 別に問題は生じない. しかし, 粒子がすき間と同等程度 の大きさの場合には、複雑な問題が起こる. 粒子は一般 に不規則な形をしているから, すき間に流れ込んでから, 途中で壁と噛み合ってしまうことがある. 複数の微粒子 がすき間内で合体してしまい、すき間内で壁面に固着す ることもある. このようなときに、壁面の平行方向相対 運動が起これば、まず、壁面の摩擦力は増加し、摩耗が 生じる. 発生する摩擦により、二つの壁面の固着 (焼き 付き)が生じることもある.

固体微粒子による流体機器の損傷のおもなものは、上記の摩耗であるが、それ以外にも、いくつかを挙げることができる。弁では小さな孔を固定絞り、可変絞りとして利用する。その孔の開口面積を制御して、出力ピストンの速度制御などを行うのである。ここに微粒子群がやってくると、目詰まりや摩耗などが生じ、これが制御系の動作不良を引き起こす⁽¹⁾

以上のように、作動流体中に微粒子が混入すると、装

置の性能、機能にさまざまな障害を起こす。イギリスでだいぶ前に行われた調査では、流体駆動の代表である油圧駆動装置における故障の 80 パーセントまでが作動流体中の微粒子などの不純物が原因であったという⁽²⁾. 作動流体中の望ましからざる混入物質をひっくるめて、汚染要因物と呼んでいる。流体駆動装置を故障無く運転を続けるためには、汚染要因物を常に除去し、作動流体を清浄に保つことが大切である。作動流体の汚染状態を適切な清浄度に管理することが、一般的な作動流体の汚染管理である。

2. 流体フィルタの性能評価

では、どうやって、流体の清浄度を管理するか、最も 原始的であるが、それは細かい網のようなものを使って 微粒子を漉し取ってしまえばよい。これ以外にも、静電 気や磁気を使って、微粒子を吸引してしまうとか、渦巻 きを起こして、固体と液体を分離するとか、いろいろな 工夫はある^{(3), (4)}. しかし、これまでに圧倒的多数の流体 駆動装置で使用されてきたのは、多孔質ないし、組み合 わせた網と見立てられる、流体ろ過用のフィルタである。 以下ではこの形式のフィルタについて議論を進める。

流体フィルタの基本的なイメージは篩(ふるい)である。流体駆動装置で使うものでは、金網や、紙、布、ナイロン繊維など樹脂繊維で作った網などを積層状にする。そこを流体が通過するときに、粒子を網にかけて、からめ取るのである。このような方法では、もちろん限度があって、サブミクロンの粒子まで取ることはむずかしい。しかし、先に述べた流体駆動の中にあるすき間の大きさは、2ミクロン程度がおよその下限であるから、こうした篩方式が有効になる。

実際に装着するフィルタは、多数の小さな孔のある物体とみなすことができる.しかし、その孔の寸法、形状は一定ではない.小さな孔もあれば大きな孔もある.フィルタの上流からやってきた流体中の汚染要因物をすべて取ってしまうフィルタはない.なにがしかの汚染要因物はフィルタをすり抜けてしまうのである.フィルタ下流にすり抜ける汚染要因物が少ないほど、性能の良いフィルタということになる.工業製品としてのフィルタとなると、性能が悪いものは売れなくなるし、高性能のものほど、高い価格をつけることができる.フィルタのユーザは、自分の流体駆動装置に必要な、最低限度の性能を備えたフィルタを装備しよう、と考える.過剰設計はコスト高となるからである.ここに、フィルタ性能の評価という問題が出てくるのである.

2.1 フィルタ性能の表示方法

では、流体駆動用のフィルタのろ過性能はどのように評価すべきか. これはフィルタのメーカとユーザの共通の問題であるから、工業規格ができている^{(5), (6), (7)}. 国内では、JIS B 8356-8: 2002、油圧用フィルタ性能評価方法一第8部:フィルタエレメントのろ過性能試験(マルチパス法)であり、国際的には、ISO 16889:1999, Hydraulic fluid power filters - Multi-pass method for evaluating filtration performance of a filter element, (1999)である. JIS B 8356-8: 2002 は、この ISO 規格を、「ISO との整合性」ということで、単に翻訳したものである.

この ISO 16889: 1999 は、実は ISO 4752, Hydraulic fluid power- Filters- Multi-pass method for evaluating filtration performance, (1986)⁽⁸⁾の改訂版である。旧版に関して、実地でのフィルタ性能の順位と、規格による試験結果の順位が一致しないという苦情や、フィルタ性能に関する基本認識の訂正などを考慮して、全面改訂されたのであるが、最も重要な点は見過ごされて、フィルタのろ過性能を測定する上では、依然として問題を抱えたままである。本研究は、この点を睨みながら展開をした。

さて、規格で使われているフィルタ試験法は、マルチパス試験法と呼ばれている。これを図3によって説明しよう.スラリーとは、微粒子を流体に混ぜたものである。この場合の微粒子は、試験用の粉体である。スラリー単位体積中の粉体質量を定めておき、一定の割合で、このスラリーをタンクに投入する。一方ポンプにより流体は回路を循環している。試験フィルタ上流の粉体濃度が nu、下流での濃度が naである。この場合、nuと naは、単位体積中の微粒子の個数で表す。すなわち(個数/ml)が測定単位である。フィルタが高性能であれば、下流の濃度は低くなる。この試験装置では、フィルタを通過した微粒子と、注入している微粒子の合計がフィルタ上流に現れ、流体も微粒子も試験フィルタを何回も通過するので、マルチパス試験法と名づけられたのである。

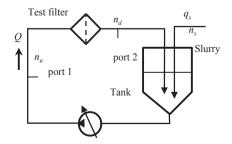


図3 マルチパス試験法

マルチパス試験法では、微粒子の上流濃度と下流濃度の比

$$\beta_{\rm r} = n_{\rm u,r} / n_{\rm d,r} \tag{1}$$

によって,フィルタ性能を表す.ここで添え字xは寸法 が x μ m 以上の粒子という意味である。この値が大きい ほど、フィルタのろ過性能が優れていると評価するので ある. 上流濃度も下流濃度も試験時間にともなって変化 する. それらの比は時間と独立な変数になるであろうか. 実は、旧版の規格 ISO 4752 では、これがフィルタ固有の 定数であるという仮定に基づいて作られていた。それゆ え, この規格では、上記のβの値を、フィルタ試験時間 内に4回測定して、その平均値を取ることにしていた. しかし、その後多くの研究機関で行われた実験結果によ って(9,(10), これは定数ではなく、試験時間の経過に伴っ て変化することが認められるようになった。そこで、時 間に依存しない定数を得るために、試験時間中における n_u の平均値と n_d の平均値を求め、それをフィルタ性能の 評価値と定義を変更したのである. 改訂規格では、フィ ルタ試験終了までに10回の粒子数濃度測定を行う.

粒子数の計数を行う場合の粒子径は、投影面積により定義する $^{(11),(12),(13)}$. すなわち、粒子の投影面積が直径 x (μm) の円の面積と等しいときに、それを粒子径x の粒子と呼ぶのである。計数はある寸法以上の粒子について行う。粒子径は連続的に分布しているので、ちょうど直径がx の粒子数を求めるというのは無意味だからである。

ISO 16889 では、k 番目の測定時刻を t_k とし、そのときに、フィルタ上流で観測される、粒子径がx以上の粒子数濃度(個数/mL)を $n_{ux}(t_k)$ 、同様に下流で観測される値を $n_{dx}(t_k)$ とし、

$$\beta_{x(c)} = \sum_{k=1}^{10} n_{u,x}(t_k) / \sum_{k=1}^{10} n_{d,x}(t_k)$$
 (2)

と定義されている。 βの添え字 x(c)はこの規格で指定する校正法(!!)による粒子計数機を用いるという拘束を表明したものである。 だんだん明らかにして行くが, このようなところに問題解決の糸口があるのではない。 何はともあれ, 改訂前の規格における明らかな誤り, すなわち上流と下流の粒子濃度に比を定数と考えるという点は, 時間平均を取ることによって回避された(*).

しかし、これはおかしな方向に進んだのである。時間的に変化するから、時間平均を取って、時間の関数であるという性質を表に見せないようにしたに過ぎない。科学や技術というものは、こういうやり方で進歩するのではないだろう。定数ではなくて、時間の関数であることがわかったならば、それがどんな関数であるかを調べる方向に進めてこそ、進歩につながるのである(13)。比が定

数にならないならば、その比が何によって変化するかを調べるべきであり、時間依存性を見えなくするために時間平均の比を取るというのでは、科学ないし技術であることを放棄するものではないか。むしろ β は旧規格のままとし、それが時間の関数として変化する様子を記述、あるいは調べるように進める方が、発展性がある。

2.2 フィルタ性能の測定方法

一般に実用されている流体駆動装置に、フィルタを装着したときには、上流微粒子濃度が一定になっているわけではない。そして、フィルタを通過した微粒子が再度上流に現れる点はマルチパス法と共通する。そこでマルチパス法は実際の装置のシミュレーションになっている、という主張は当初からあった。すなわち、マルチパス法を1960年代に提案した Fitch 氏がそう述べている(!). しかし、規格に定める試験法における微粒子濃度は、実際の装置の微粒子濃度に比べて非常に大きいもので、とてもシミュレーションという言葉が当てはまる状態ではない。フィルタのろ過性能を測る場合には、この通過微粒子の再流入は、ノイズ以外の何者でもなく、マルチパス法の測定値の意味を不明確なものとしてしまう。

このことをもう少し具体的に説明しよう. 一般の観測において、yが観測している変数で、 x_1, x_2 がそれに影響を与えるパラメータないし独立変数であるとする. すなわち、

$$y = f(x_1, x_2) \tag{3}$$

であるとする. この関数関係を実験的に知ろうとするとき、まず x_1 と x_2 の一方を固定値とし、他方を変えながら関数関係を調べる. たとえば (a_1,a_2,\cdots,a_n) を定数として、

$$y_1 = f(x_1, x_2 = a_1) = g_1(x_1),$$

 $y_2 = f(x_1, x_2 = a_2) = g_2(x_1),$
...,
(4)

 $y_n = f(x_1, x_2 = a_n) = g_n(x_1)$

のように、 x_1 とyの関数関係を表す一連の測定値から、(3)の関係を推定する。この一連の測定中において、 x_2 が定数とならずに変動していれば、それはyと x_1 の関係を表す式の誤差を増大させる。このことは、(3)右辺のパラメータの数が増えても同様である。

さて、フィルタ下流の流体の微粒子濃度は

$$n_d = F(n_u, t, Q, v, K) \tag{5}$$

のように表されるであろう.ここで、tは時間、Qは流量、 ν は流体の動粘度、Kはフィルタ固有のパラメータを代表して表示した. Kは複数に分解されるであろうが、ここでは説明を単純化するために、--つで代表させてある.

この場合、時間的に n_d が変る様子を観測するには、t 以外のパラメータは定数に保っておかなければならない、ところが、マルチパス法では、t に伴って n_u が変化してしまう。式(3)をフィルタのろ過性能の評価値とすることには、すでに述べた問題があるが、それ以前のデータそのものに上記のような、基本的な問題がある。

3 準シングルパス試験法

3.1 原理

上流側の微粒子濃度を一定に保って、フィルタ性能の 測定を行うことが、まず必要である. マルチパス試験法 の出現以前に行われていたフィルタのろ過性能試験は、 工業用のフィルタそのものを測定するのではなく、フィ ルタに使用する網などのろ材の試験片を作り、それで試 験を行うものであった。すなわち、試料を測定装置に取 り付け、これに微粒子を含んだ一定量の流体を通過させ る. フィルタ試験片上に補足した微粒子の総質量を測っ たり、試験片を通過した流体の清浄度を調べる. この方 法では、微粒子も流体も一度だけしかフィルタ試験片を 通過しないから、シングルパス試験と呼ぶ、この方法は、 小さな試験片にしか適用できない. 工業上実装されるフ ィルタをこのやり方で試験するには、莫大な量の流体を 用意しなければならないからである. マルチパス法は、 この問題を解決したのであるが、フィルタ上流の微粒子 濃度が一定でなくなるという欠陥が生じた.

本研究では、上流の微粒子濃度、流量、動粘度などを一定に保って実験を行うことを目標にした⁽¹⁴⁾. 上流側微粒子濃度を一定にすれば、シングルパス試験と同等になる. 本研究で考えた試験装置の原理図を図4に示す.

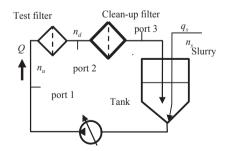


図4 準シングルパス装置

ここでは、クリーナップフィルタが導入されていて、 これによりフィルタ下流に出た流体を清浄化してからタ ンクに戻す。後述するが、スラリはポンプ入り口で清浄 な流体と混合するようになっている。スラリの微粒子濃度は一定に管理してあるので、ポンプ流量Qとスラリー流量qの比を一定に保てば、ポンプから吐き出される流体の微粒子濃度は一定になる。この場合には、試験フィルタを通過した微粒子は、クリーナップフィルタによって除去され、循環することがないが、流体は回路内を循環する。もちろん、クリーナップフィルタを通過する微粒子がゼロということは不可能であるから、準シングルパスと呼ぶことにした。

この実験では、フィルタ上流の微粒子濃度 n_a をポート 1 で、下流微粒子濃度 n_d をポート 2 で測定するほかに、クリーナップフィルタの下流のポート 3 でも測定する。 測定はオンラインで、一定時間(たとえば 5 分)ごとに行う。この場合、上流微粒子濃度は一定でなければならない。 クリーナップフィルタ下流の微粒子濃度が一定水準を越えれば、それはマルチパス法と同じように、試験フィルタ上流の微粒子濃度を上昇させる。 したがって、クリーナップフィルタ下流の流体清浄度は常に監視し、微粒子濃度が上昇したときには、クリーナップフィルタを交換しなければならない。

この実験方法が規格のマルチパス試験法と異なるもう一つの点は、スラリーの注入位置である。規格におけるマルチパス試験法では、タンクにスラリーを注入して撹拌することになっている。この方法によると、特に試験開始時に、フィルタ上流の微粒子濃度がなかなか上がらないという、過渡応答遅れを生じる。加えて、タンク内での撹拌の一様性や、微粒子のタンク内停留に注意しなければならない。本研究では、図5に示すように、スラリーの注入位置をポンプの入り口直前とした。

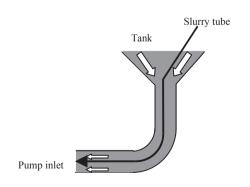


図5 スラリー注入位置

この注入位置の変更により、タンク内は常に清浄な流体で満たされ、注入したスラリー内微粒子は、すべて遅れなく試験フィルタ上流に現れるから、濃度変化に遅れ

が無くなり、また、タンク底部の配管に微粒子が滞留することも無くなる.

3.2 準シングルパス法実験装置

製作した実験装置を図 6 に示す. 装置の構成と作用 は次のとおりである. この実験は水を用いて行うので、 部品はすべて、耐食性の材料を用いて製作してある. ポ ンプ、タンク、一部の配管要素と弁はステンレス鋼製で ある. 配管要素はプラスチックを多用している.

ポンプ P_1 は装置を循環する水の流れQを生じさせるもので、ここではウェスコポンプを使用した。このポンプは動力学式のポンプであるが、高い吐き出し圧力を得ることができるからである。タンクからポンプ P_1 に吸い込まれた水は、ポンプを出て試験フィルタに至り、次いでクリーナップフィルタを通り、弁 V_1 を通ってタンク T_1 に戻る。流量Qは主にポンプ回転数制御により調節し、弁 V_1 により微調節する。

水中微粒子の濃度測定は、オンラインカウンタ APC1 と APC2 を用いて行う。試験フィルタ上流の微粒子濃度は非常に高いので、カウンタ(APC)の測定レンジはAPC1 と APC2 では異なる値に設定しなければならない。微粒子濃度を測定する試料の取り出し口は、試験フィルタ上流の Port 1、試験フィルタ下流の Port 2、クリーナップフィルタ下流の Port 3 である。流量計は主流Qを測定する F_1 、カウンタに組み込んである F_2 及び F_3 、スラリー流量 q_s を監視する F_4 である。 F_2 および F_3 に、それぞれ直列に入っている弁 V_2 及び V_4 は試料流量を設定する。弁 V_3 は切り換え弁で、APC2 がポート2 とポート3 の試料を交互に測定するようにしてある。

Port 1 には、サンプリング用のストップ弁 V_8 が併設してある。これは、APC1 のレベルと、オフラインのカウンタとの相対値を検査するためのもので、試験中は閉鎖している。

圧力計がポンプ出口に設置してあるが、これは運転 状態を監視するもので、その値は測定データとして必要 なものではない、試験フィルタの上流と下流の間の圧力 差を、差圧計により測定してある。この差圧はフィルタ の状態を指示する重要な変数であり、微粒子濃度と並列 して、観測記録の対象である。

循環回路(主回路)に対して、別回路から、一定濃度の微粒子を含んだスラリーを一定流量 q_s で供給する. スラリーと回路循環水の合流は、すでに説明したように、

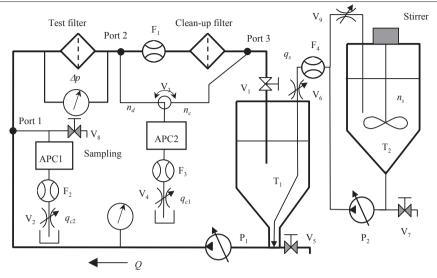


図6 準シングルパス法実験装置

ポンプ入り口において行う. スラリーは、計量した水と 試験粉体とを混合、攪拌して、タンク T_2 に蓄える. タンク T_2 はスターラにより、試験中常時攪拌しておく. スラリー流量は、流量計 F_4 で監視しながら、弁 V_6 で調節する. この場合 V_5 はバイパス弁で、これはスラリータンクを攪拌する効果がある. 主タンク T_1 の底部の弁 V_5 、及びスラリータンク T_2 の底部の弁 V_7 は、洗浄時の排水用に使う. V_5 はタンク液面の調節にも使用する.

実験の手順の詳細は後述するが、要約すると次のようになる.

まず装置に適量の水を満たし、試験フィルタ部にフィルタエレメントを装着しない状態としてポンプを運転する。このときの流量は最大流量としてよい。クリーナップフィルタにより、回路内部は比較的短時間(15分程度)で清浄になる。次にスラリーをタンク T_2 に入れる。 P_1 を止めて試験フィルタに試験すべきエレメントを装着してから、ポンプ P_1 を運転し、流量を設定する。

試験終了の指標は複数ある.まず差圧が所定値に達したときに終了する.フィルタエレメントの耐圧に限度があり、これは多くの場合、メーカーが指定している.耐圧限界を超えると、目視できる永久変形(つぶれなど)を生じる.

次にフィルタ下流の微粒濃度がある.フィルタ下流の 流体中の微粒子濃度が許容レベルを超えて使用されることは、当然許されないから、差圧の如何によらず、下流 濃度が設定した値を超えるときには、試験を停止する.

第3は、この試験装置固有のものである。クリーナップフィルタ下流の微粒子濃度が、試験精度を疑わせる水準に至ったときには、試験を中断し、クリーナップフィルタのエレメントを新品に交換する。

流量計 F_1 はロータメータであって、試験回路を流れる流体中の気泡の有無を監視する。タンク内流体が少ない場合や、戻り水出口が水面より十分深くない場合に気泡を発生することがある。当初の装置はポンプ出口に冷却器を装着していたが、水の温度があまり上昇しないので、冷却器を回路からはずして実験を行った。装置の寸法などの諸元を表1に示す。

表 1 装置の主要諸元

○回路ポンプ (か流ポンプ)

吐き出し流量: 0.04-0.15 m³/min, 全揚程: 44.5 m, 材料: SUS304.

駆動電動機: 2.2 kW, 3相220 V インバータ制御.

○スラリーポンプ: チューブ式, 流量, 0.12-4.2 L/min. 回 転制御 25-200 rpm、 チューブ径, 4-12 mm.

○回路洗浄用フィルタカートリッジ寸法:外径:64 mm,

内径: 28 mm, 全長: 509 mm.

○フィルタハウジング1(ステンレス):胴体直径:88.1mm, 全高:644.5 mm. ○フィルタハウジング 2(ステンレス): 胴体直径:88.1 mm, 全高:384.5 mm.

○圧力計(監視用):ブルドン管.

○差圧計: ひずみ計式差圧計: 定格容量: 196 kPa.

○流量計:材質:SUS304,流量範囲:0.35-3.5 m³/h..

○微粒子計数機 (APC1, APC2):

○タンク:直径240 mm, 直管部長さ, 400 mm,下部に直角円錐接続.

○スラリータンク: 主回路タンクと同一寸法. スラリータンクには羽根車式のスターラが取り付けてある.

3.3 実験の準備

フィルタ試験では、試験前に装置の洗浄などの準備が必要である。試験粉体が天然砂の場合は沈殿しやすいので、スラリータンクは常に攪拌しておく必要がある。スラリータンクにおける微粒子の沈殿を防止するには、流体循環をさせる方法とスターラによる撹拌が考えられるが、この実験では両方を同時に使用した。

(a) 試験回路のクリーナップ

このクリーナップを行うには、まず装置内の水をすべて流し出してから、水道水を入れてポンプによる流体の循環を行う。フィルタエレメントを装着しない状態で流体を循環させ、クリーナップフィルタにより汚染要因物を除去する。装置内水量15 L、ポンプ流量30L/min、とすれば10-15分程度の運転で、水は十分清浄になる。ここでいう十分清浄とは、25 mLの試料流体中に2 μm 以上の微粒子が一つも観測されないことである。これは使用した計数器(APC)の感度の限界である。

(b) 流量と圧力の制御

スラリーをタンク底部で合流する方法を取ることに より、装置内の微粒子分散の一様性の調査などの、面倒 な準備を不要にすることができ、実験を簡素化できた.

(c) スラリーの準備

水 2 L 程度に数グラムの粉体を投入して攪拌したものをスラリーとする. これをスラリータンクに投入すれ

ばよいように、準備しておく. スラリーは実験中に順次 作製しなければならない場合がある. ここで用いた粉体 は、ISO 16889 などと同じ ISO MTD-A2⁽¹⁵⁾である.

3.4 実験条件の設定

試験中のシステム体積を一定に保つ. これは ISO 16889 のマルチパス試験法の場合と異なり, タンクの水位を一定として, ポンプの運転状態や, 水の温度などを安定に保ち,また空気の巻き込みなどを防ぐためである. マルチパス試験法では, これらに加えてフィルタ上流の微粒子濃度変動がデータに影響を与えるので, システム体積を精密に維持しなければならない. これに対し,我々の実験では微粒子濃度はシステム体積とは無関係になるので, さほど厳密に体積を一定にする必要はない. スラリーポンプから注入する流量に比べて, APC から排出する流量の方が少ないので, 余剰の水を, 弁 V₈ を開いて排出する.

表2 実験条件

条件	数値
試験システム体積 $V(L)$	15
注入システム体積 $V_i(L)$	15
試験流量 Q(L/min)	20,30,40
スラリ注入流量 <i>q</i> (L/min)	0.20
フィルタ上流基準濃度 C_1 (mg/L)	3,10,15
注入チューブ Reynolds 数: R _e	1600

表において、フィルタ試験システムへの微粒子注入率R(粒子数/時間)は、

$$R = C_1 Q = C_2 q, \quad C_2 = (Q/q)C_1$$
 (6)

循環システム内の水の体積は、スラリー流量により増加し、APCへの流出により減少する. これらの平衡を保つには、ポート1から連続的に水を排出するのがよいが、適時タンク内水位を見て間歇排出しても良い.

このシリーズの実験では、スラリー注入管レイノルズ数は上記のようになる。スラリ注入チューブ内流れを乱流にするのが望ましい。そのためにはスラリー濃度を低下し、スラリータンクへの補充頻度を増加、システム水量調節など、実験手順の改良を行う必要がある。

3.5 実験手順

である.

- (1) 試験装置の洗浄が終わったら、試験回路流量を試験流量に設定し、ケーシング差圧を測定する.
- (2) ポンプを止めてケーシングに新しいエレメントを装着する.

- (3) 弁1を開き, 弁2, 3を閉じてポンプを運転し, 絞り 弁で流量を設定する.
- (4) 注入システムのポンプ運転を開始する. この時が時間原点である.
- (5) 運転開始から 5 分ごとに試料をサンプリングポートから取る. 同時に差圧を記録する.
- (6) フィルタ差圧が指定値に達した場合には、ポンプ P_1 を止め、スラリポンプ P_2 を止めて実験を終る.
- (7) 同様に、 n_d またはポート 3 微粒子濃度が急上昇した場合にも、ポンプ運転を停止し、実験を終了する.

4 準シングルパス実験結果

はじめに、3つのポートにおける微粒子数と、圧力損失の観測例を、一つのエレメントについて示す。本例では、流量20 L/min、微粒子質量濃度は15 mg/L である。

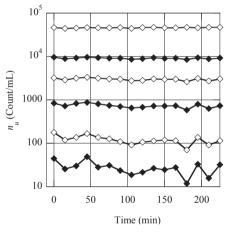


図7 上流微粒子濃度

図7は、ポート1 (フィルタ上流)の微粒子濃度である。マルチパス試験では、時間経過により nuは上昇するが、本実験では試験期間中の汚染濃度がほぼ一定に保たれている。試験時間中の微粒子濃度の変動は、粒子径が小さいほど小さい。これは他の実験例でも同様である。図8は粒子径ごとに見た変動係数である。粒子径が 2μmでは 0.03 程度であるが、20μmでは 0.34 にまでなる。これは時間的な変動ではなく、ランダムな変動であって、粒子数計測に伴うばらつきである。このばらつきを小さくするには、計測する流体の体積を増加させれば良い。この実験では流体体積を 25 mL に取っている。これを増加させてばらつきが減少することは別の測定で確かめてある。粒子数が多い 2μm、5μm のところで十分に変動係数が小さいことから、上流濃度が一定に保たれている

ことがわかる. ここで採用した方法により、上流微粒子 濃度が一定に保たれることは、これで確認できたといえ る.

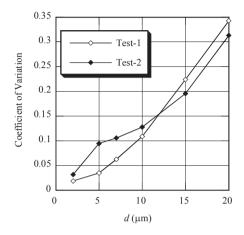


図8 変動係数

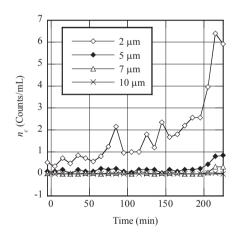


図9 クリーナップフィルタ下流微粒子濃度

次に、図9はポート3の微粒子濃度である.上流側の微粒子濃度が2 μm ではおよそ34000 個/mL に対して、クリーナップフィルタ下流では1 個 /mL レベルである.これ以外の微粒子径においても、クリーナップフィルタ下流の微粒子濃度は十分に低いことが示されている.これはクリーナップフィルタが、要求された機能を満足していることを示す.実験の末期には2 μm 以上の微粒子のみが、フィルタ上流の10⁴のオーダまで上昇するが、数値的に問題にならないレベルである.以上のことから、クリーナップフィルタの使用により、シングルパスの条件が達成できたといえる.

次に試験フィルタの状態を観察しよう. 図 10 は試験フィルタにおける圧力損失の経過を示す.この実験では、差圧は 200 min あたりから急な上昇が始まっているので、実験は 225 min で終了した. 実験終了近くでの圧力上昇は極めて急峻で、logloglog(4p)が時間の一次関数で近似できる程度である.

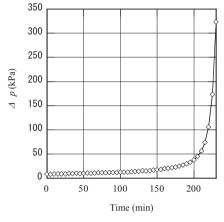


図10 差圧の変化

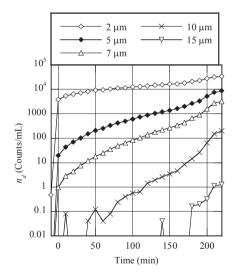


図 11 フィルタ下流微粒子濃度変化

ポート2の微粒子濃度変化全体の様子を図11に示す.これは縦軸を対数軸で示してある. 粒子径が小さい場合は, 試験開始直後から, フィルタ下流側に微粒子が現れる. 粒子径が大きくなるほど, 粒子数が増加する時刻が遅くなるし,上流微粒子数に対する比率(1/β)も小さい. 150 min くらいから 10 μm 粒子が観測されている. また, 150 min あたりでは, 小さな粒子の増加割合も急になっ

ている.

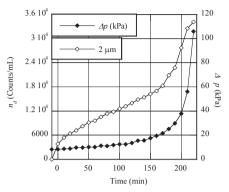


図12 2 µm 以上の微粒子濃度

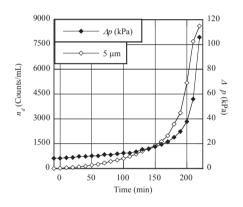


図13 5 μm 以上の微粒子濃度

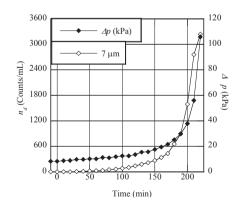


図 14 フィルタ下流微粒子濃度: 7 μm 以上

図 12-16 は、粒子径ごとの変化を示す. これらの図には、エレメント圧力損失も併記してある.

図 12 は 2 μm 以上の微粒子数の変化を線形目盛りで示

してある. 試験時間 200 min 程度以上で圧力上昇が急になるが、微粒子数濃度は、それよりもやや早く、150 min 程度から上昇が急になる.

図13は5 µm 以上の微粒子数濃度である. 図12と比べると、微粒子数濃度の上昇がやや遅れて、170 min 程度で始まる.

図12,13,14を比較すると、微粒子数濃度の急上昇が観測されるのは、粒子径が大きいほど遅いことがわかる.

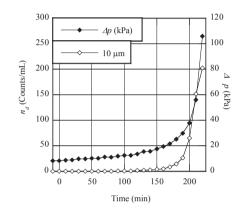


図 15 フィルタ下流微粒子濃度:10 μm 以上

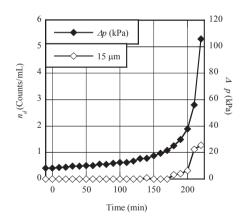


図 16 フィルタ下流微粒子濃度:15 μm 以上

図 15, 16 では、微粒子数の観測値がかなり低くなるので、数値的な再現性は悪くなるが、それでも時間経過に伴う粒子数増加が明瞭に示されている.

以上は一つの実験例について説明したのであるが、ここに示した傾向は、この形式のフィルタに対する多数の実験結果において共通するものである。ただし、フィルタの形式がデプス形でない場合の下流微粒子数濃度変化には、ここに示したような形と同じにはならないものが

ある.

5 考察

5.1 βに代わる数学モデル^{(14),(16),(17)}

フィルタ下流の微粒子数濃度は、フィルタ上流の微粒 子数濃度の影響を受けるが、それは線形ではない. すな わち、上流微粒子数濃度を2倍にするときに、下流の微 粒子数濃度が 2 倍になるのではない. この様子を図 17 に示す. 比較したデータは、同じ製造ロット内の二つの フィルタから得たものである. 図 17 では、横軸を流量(Q: L/min), 質量濃度(m: g/L)及び時間 (t: min) の積として ある. すなわち、フィルタに負荷した微粒子の総質量で ある、縦軸は5ミクロン粒子数濃度を、質量で割った値 である. したがって、これは β の逆数と同じ挙動をする 量である。横軸を単に時間としたのでは、高濃度の場合 の方が短時間でフィルタが目詰まりするので、比較にな らないからである。フィルタが寿命に達する、すなわち 圧力が急上昇して、ndも急上昇するにいたる Omt の値は ほぼ等しいといえる. しかし、ろ過特性にかかわる、上 流濃度と下流濃度の比、すなわちβがフィルタの特性値 であるためには、この二つのデータが同じ曲線を描かな ければならない. 結果は明らかに異なる曲線であって、 これは上流濃度に対して、βが線形でないことを表して いる.

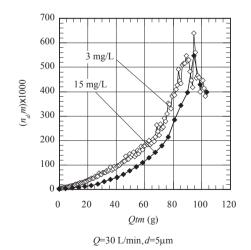


図 17 投入微粒子質量とろ過特性

それでは、フィルタ特性をどう表示するのが良いか. これはシングルパス法により、濃度や流速、流体粘度などをいろいろに変えた実験を行い、ろ過特性を表現する 数学モデルをまず作り、その数学モデルを表現するパラメータをフィルタの特性値とすべきである。これを実現するには、まず理論的に数学モデルを仮定し、実験により、その適用生を吟味する必要がある。数学モデルとして、著者は次のようなものを考えた。

フィルタの下流に至る微粒子は、流体に混じってフィ ルタの孔を通過する部分 N。と、フィルタ組織に捕捉され た微粒子が、その後で流体に洗い流される部分 N₆とから 成る. つまり任意の時刻における上流微粒子濃度が直接 下流濃度に比例するという、βの思想は採用しない、実 際すでに微粒子を多量に捕捉したフィルタの上流に清浄 な流体を供給すれば、下流には微粒子で汚染された流体 が出てくることは日常的に経験する. この意味から言っ ても,フィルタ特性値がβで表されると考えるのは無理 なのである、Fitch 氏のグループも最初のβの定義の後に、 この点に気づいて、βの定義に修正を加える試みを行っ ている(18),(19). 一方, 単層のふるい(篩)や網を考えれば, 上流の微粒子濃度に直接影響される部分もある. それゆ え,最も単純にモデル化するときには, Naは nuにほぼ比 例すると仮定するのが適当であろう. このときの比例係 数は通路が小さいと小さくなる. 通路の大きさは、流れ が層流の範囲では、圧力損失に反比例するであろう. し たがって,

$$N_a = K_1 n_u / \Delta p \tag{7}$$

とモデルを立てることができる $^{(6)}$. このとき K_1 は定数ではないであろうが、変化の少ない変数と予想できる.

次は N_b である。これも、もとの微粒子は、過去においてフィルタに捕捉された微粒子の総数に依存する。この量をMとすれば

$$M = \int_0^t (n_u - n_d) dt \tag{8}$$

である。捕捉されていた微粒子がそのままフィルタに留まるか、洗い流されるかは、どの微粒子においても同じ確率である。ただし、その確率は、MやQの関数である可能性がある。したがって、

$$N_{b} = K_{2} \int_{0}^{t} (n_{u} - n_{d}) dt$$
 (9)

と表すとき、 K_2 は定数であるという保証はない. ここまでの考察により、

$$n_b = K_1 \frac{n_u}{\Delta n} + K_2 \int_0^t (n_u - n_d) dt$$
 (10)

が一つのろ過モデルとして使えることがわかる。実際フィルタの種類と、運転時間を制約すると、このモデルで K_1 、 K_2 を定数として同定して良い場合はある。しかし、多くの場合、このモデルを使おうとすると、再び、 K_1 、 K_2

が定数ではないという問題に遭遇する。それゆえ、このモデルを使うにしても、 K_1 、 K_2 を運転パラメータの関数として、実験的に精査する必要がある。

ろ過における微粒子の吸着は網目による物理的拘束だけではない. ろ過プロセスを上記のような力学と幾何学で構成したモデルで表すことには、限界がありそうである. しかし、今の段階では、上記の K_1, K_2 をさらに運転変数と、フィルタ固有の定数に分解するための考察ないし、実験が必要である.

5.2 試験用粉体の問題

試験用粉体は、ISO 16889では、ISO MTD-A2 を使用することを指定している。これはアリゾナ砂漠の砂を分級して、粒子径分布を定めたものでる。これ以外の粉体に対する、フィルタのろ過特性は知られていない。異なる粉体を用いれば、フィルタのろ過特性が異なって表示される可能性があると考えられている。しかし、このことに関する、研究データがないので、推定の域を出ていない。異なる粉体を使ったフィルタのろ過特性試験を行って見る必要がある。なぜなら、フィールドで使用されている流体中の微粒子は、アメリカのアリゾナ州周辺以外では、ISO MTD-A2 とは異なるものが主体となっているからである。

試験用粉体を使う場合には、次のような問題がある。 第1は粒子径計測に関する問題、第2は微粒子とフィル タ素材の間の付着性(粒子の通過特性),第3は粉体の安 定性である。

まず、粒子径計測の問題には、微粒子の形状問題との透明度の問題との二つがある. ISO 16889 では、不規則形状の粉体の寸法を、等価投影面積で同定している. この場合の校正に用いる微粒子は NIST で校正済みのラテックス球である. ISO MTD-A2 以外の粉体も、同様に等価投影面積による同定と、ラテックス球による校正を行うということで、良いであろう.

自動微粒子計数機における投影面積法は、光遮断法を使う。光遮断法では、透明度の高い微粒子の寸法は小さめに評価される。このことを、フィルタ試験の実務に反映して補正することは行われてもいないし、実行する方法も見つからない。それゆえ、この問題(粒子の光透過度と色の影響)は無視しているのが現状である。現在の粒子径定義を他の粉体にも適用することの正当性は、かなり広範な調査研究を必要とするであろう。

5.3 微粒子形状とフィルタ捕捉性

形状は,フィルタの素材と粒子との付着性に影響をも

たらす可能性がある. 粒子が網状構造のフィルタ素材を 通過するときには、角ばった粒子の方が、球形粒子より もひっかかりやすいことは、すぐに体験できる. このこ とから、試験用粉体を数種類用意して、それぞれに対す るろ過性能を示すことが、一般性のある方法といえるで あろう. この場合に、基準として採用する微粒子の形状 を求めるとすれば、それは球形微粒子ということになる. 適当な寸法分布を持つ球形の試験用粉体は既存でないか ら、これは人工的に製造する必要がある. 適当な寸法分 布とは、流体駆動装置の中で観測されるような粒子径分 布である. フィルタ試験用に限定すれば、微粒子が液中 で浮上したり、沈殿したりしないことも希望項目となる. 天然砂の比重が 2.4 程度で沈殿しやすいのに対し、ラテ ックス球の比重は約0.9であるから、この点でも好都合 である、そこで、ラテックス球の試験用粒子を製作する ことを試みた(20). これはフィルタを通してエチレンモノ マーを噴出して、水中で重合させるものである. この方 法で天然砂と類似の粒子径分布を得ることができること を確かめることができたが、分布形の管理はまだ十分な 段階になっていない.

5.4 シミュレーション

マルチパス法が実際の流体駆動装置における微粒子流 れをシミュレートしているという意見は、マルチパス法 提案当初からあった(1). しかしこれに対する反論も古く からあった. その第1は、非定常流れのもとでのろ過特 性は、マルチパス法で規定する定常流れのもとでのろ過 特性よりも悪いというものである.流体及び微粒子を, フィルタ上流に間歇的に供給すれば、定常流れを基本と するマルチパス法よりも、フィールドでのフィルタへの 負荷に近づけることができる. こうした観点でマルチパ ス法を改良しようという考え方も提案されている(21),(22). しかし、シミュレーションは、回路内の個々の要素特性 が把握された後で、回路特性がどうなるかを見るときに 有効になるのである. 要素特性を単体で把握せずに回路 シミュレーションを先に行うのは、効率の良い調査とは ならない. この研究で行ったように、フィルタ単体での 特性を知る方法を確立して、単体特性を求めてからシミ ュレーションに進むのが、合理的な順序であろう.

6 結語

流体駆動装置の汚染管理は重要な問題であるにもかかわらず、その基礎になるフィルタの使用、その性能表示などは、明確ではない、現実には、ひたすらフィルタ性

能を向上させてトラブル発生を防ぐことに注力している。 その結果、現在では流体中の汚染要因物によるトラブルは著しく減少している。装置や機器のメーカではフィルタメーカが推奨するフィルタを使用すれば、問題を生じないと考えている場合が多い、フィルタの選択の根拠は特に無く、強いて要求すれば、ISO 16889 によるデータということになる。ところが、この規格自体の、技術的根拠は極めて曖昧である。これが曖昧のまま放置されたのは、次のような事情があった。

まず、1980年代における油圧駆動装置の作動油汚染によるトラブルが多発した状況に比べて、最近では、フィルタ性能が飛躍的に向上していて、油圧装置や機器のメーカが特に意識しなくて良い状態となったので、フィルタ試験法は注目を集めなくなったのである。すなわち、多少過剰設計となるフィルタを使用していても、それに気づかない状態になったのである。そのため、基礎的考察を行う動機が消滅した。ところが、20世紀の終わり頃から、水圧駆動装置の開発が始まった。この場合には、すき間の寸法を油圧の場合の1/3以下とすることが要求される。そのため、なおざりにしていた試験法や性能評価を改めて行う必要が生じてきた。

この研究では、流体フィルタの性能を客観的に表示する方法を探究した. 現在、流体駆動の分野で適用されるフィルタのろ過性能評価は ISO 16889 による. これを調べて見ると、技術上の根拠にあやしい点があることがわかった

その第1はフィルタ試験の方法である。これはマルチパス法と呼ばれているものであるが、一定に保つべき試験条件(フィルタ上流の微粒子濃度)が、一定に保たれない。この研究では、これを改めるための準シングルパス法を考案し、その有効性を確認した。

第2はフィルタ性能を表示するために規格で定義している β という量が、適切にろ過性能を表示しないことである。 β に代わるフィルタ特性を特徴づける、そのフィルタ固有のパラメータを定める必要がある。そこに至るためには、良い数学モデルが必要となる。この論文ではその数学モデルの試みを例示した。

試験用微粒子に関しても、現状のアリゾナ砂漠の砂が 適当であるかどうかを、吟味した. 試験用粉体の人工的 に製作する研究も行ったが⁽²⁰⁾、紙数制限もあるので、本 論文中に詳細を記さなかった.

この研究は、準シングルパス法の確認が主題であり、 この部分については、いちおうの区切りまでたどりついた。これだけでは非常に限られた専門的問題である。しかし、これが周辺のいろいろな問題と密接に関係してい ることは、本文で述べたとおりである.この報告では、 今回の研究課題だけではなく、周辺問題にも説明を加えて、より広い分野の人々の理解を得られるように努めた.

謝辞

本研究は神奈川大学工学研究所の平成 18 年度共同研究として、研究費の援助を受けて遂行された.この研究に関して、本年度以前から機械工学科・工藤邦男准教授、化学教室・今井洋子助手、機械工学科・鈴木健児助手の助力を受けたことを記し、厚く御礼申し上げる.浦田研究室でこの研究の基礎の構築に協力した、歴代の修士、杉山、代永、加藤、中村、折笠、土井、須田の諸君にも同じく謝意を表す.

参考文献

- L. E. Bensch, E. C. Fitch and R. K. Tessmann, "Contamination control for the fluid power industry", Pacific Scientific Co., (1978).
- (2) J. S. Stecki (ed.), "Total contamination control", Fluid Power Net Publication, (1998).
- (3) H. Wotzinski: "Permanente Überwachung der Ölreinheit", O+P, 48-1, (2004), S.40.
- (4) A. Sasaki, et al: "Criticism on Oil Cleanliness Standard and Suggestion of a New Method", SICFP-97, (Linköping, 1997), p.243.
- (5) JIS B 8356-8: 2002, "油圧用フィルタ性能評価方法-第8部: フィルタエレメントのろ過性能試験(マルチパス法)".
- (6) ISO 16889:1999, "Hydraulic fluid power filters Multi-pass method for evaluating filtration performance of a filter element", (1999).
- (7) ANSI B93.31-1973, "Multi-Pass Method for Evaluating the Filtration Performance of a Fine Hydraulic Fluid Power Filter Element", American National Standards Institute, (1973).
- (8) ISO 4752, Hydraulic fluid power-Filters-Multi-pass method for evaluating filtration performance, (1986).
- (9) P. Dahmann. "Untersuchungen zur Wirksamkeit von Filtern in hydraulischen Anlagen", Dissertation der RWTH Aachen, (1992).
- (10) M. Mager, "Untersuchung der Feststoffpartikelkontami-nationen in hydraulischen Systemen", Dissertation der RWTH Aachen, (1999).
- (11) ISO 11171:1999, "Hydraulic fluid power Calibration of automatic particle counters for liquids", (1999).
- (12) ISO 11943:1999, "Hydraulic fluid power-On-line liquid automatic particle counting systems-Method of calibration and validation", (1999).
- (13) 浦田暎三, "コンタミネーションコントロールの基礎研究", フルードパワーシステム, **37**-6, (2006-11), p.332.
- (14) E. Urata, K. Suzuki and Y. Kato, "A quasi-single-pass test method for fluid power filters", PTMC2006, Professional Engineering Pub. Ltd., (Bath, 2006-9), p.95.

- (15) ISO 12103-1, "Road vehicles-Test dust for filter evaluation-Part 1: Arizona test dust", (1997).
- (16) E. Urata, "Evaluation of filtration performance of a filter", PTMC2002, Professional Engineering Pub. Ltd., (Bath, 2002-9), p.291.
- (17) E. Urata, "Notes on Contamination Control", The Sixth JFPS Intl. Symp. on Fluid Power, Proc. CD-ROM, (Tsukuba, 2005-11), p.629.
- (18) I.- T. Hong, "The beta prime-a new advanced filtration theory", Proc. of IMech Conference, "Contamination Control in Hydraulic Systems", (1984, Bath), p.83.
- (19) I.- T. Hong, and E. C. Fitch, "An Innovative Technique in Filter Rating", SAE Paper 851590, (1985).
- (20) E. Urata, K. Tajima, K. Suzuki and T. Suda, "A Suggestion of Artificial Filter Test Dust", Proc. The Tenth Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP '07, (Tampere, 2007), Vol. 2, p.203.
- (21) L. E. Bensch and M. J. Day, "A realistic Approach To Measuring Filter Performance", IFPE 2000, (2000).
- (22) T. Namba and K. Izawa, "Realistic Filter Performance evaluation Cyclic Stabilization Test", The Sixth JFPS Intl. Symp. on Fluid Power, Proc, CD-ROM, (Tsukuba, 2005-11), p.624.



2 足歩行恐竜型ロボットの製作とその歩行理論

宇佐見 義之* 江上 正**

Bipedal Dinosaur Robot and Its Locomotion

Yoshiyuki USAMI* Tadashi EGAMI **

1. はじめに

ティラノサウルス・レックス(T-Rex)は重すぎて走ることはできないという研究がハッチンソンらによって提唱され、この考え方が現在のところ広まっている(Hutchinson & Garcia 2002)。果たして、これは正しい学説であろうか?このことをいくつかの角度から研究し、恐竜の生態を可能な範囲で再現するのが本研究の目的である。また、筆者は恐竜を含む古代の生態系を再現する作業に取り組んでいる。

2. ハッチンソンの T-Rex は走れないという説について

ハッチンソンは2002年、T-Rex は走れないという 論文を Nature 誌に投稿し、その結果が広まることとなっ た。しかし、その論文を読んでみると、肝心なことが論 文には無くて supplement にあり、どのような仮定をおい た計算からそのような結論に至ったかとてもわかりにく い論文であった。あくまでも筆者の感想であるが、この 論文の内容を把握している人はほとんどおらずに、なん だかわからないけど T-rex は走れないという結果だけを 信じる雰囲気があるように思われる。この点から明らか にした方が良いと思われるので、まずハッチンソンの計 算のポイントから要約することにしよう。ハッチンソン の理屈は次のようなものである。

- (1) T-Rex は、約時速 15 Km で走るとき、図 1 のような中間姿勢をとると仮定する。
- (2) この中間姿勢の時、垂直方向にかかる力は体重の重

力の 2.5 倍とする。

(3) その際のトルクを計算すると、その為に必要な筋肉は、両足で体重の43%必要となる。



図1 ハッチンソンらが仮定したティラノサウルスの走 行の中間姿勢

このことを検証する為に筆者らは、人間の動きをモーションキャプチャしたデータを分析することにした。

2-1 人間の走行についてのモーションキャプチャデータの分析。

モーションキャプチャは江原義弘、山本澄子ら主催の臨床歩行セミナーの際に得られたものから再構築した。データの変換ソフトは WaveEye から得られたデータを使った。

図1が左足の各関節の角度の時間的したものである。床からの鉛直抗力を合わせて描いてある。まず、膝の角度

*准教授 物理学教室

Associate Professor, Institute of Physics

**教授 建築学科

Professor, Dept. of Mechanical Engineering

は、接地時に鉛直抗力と同様のカーブを描く。

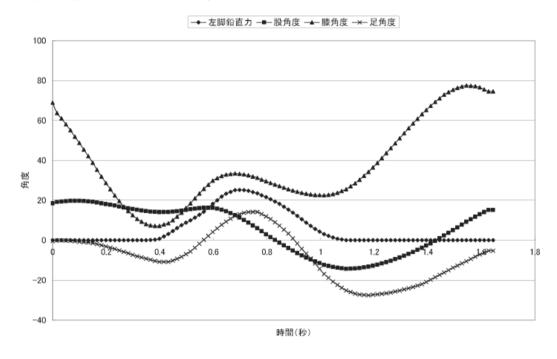


図2 人間の走行の際の各関節の角度の時間変化

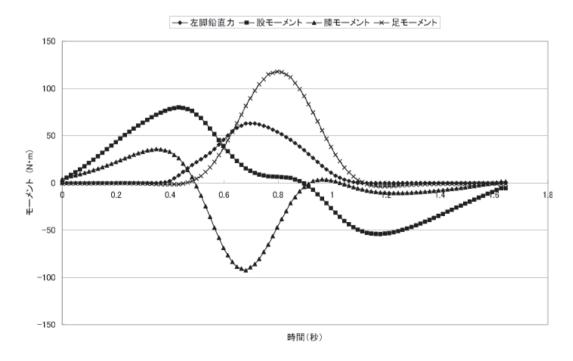


図3 人間の走行の際のモーメント(トルク)の時間変化

更に、その後の非接地時には大きく角度を狭める。股関節はこれとは異なり、接地時にプラスからマイナスへ大きく変化する。このことから、次のことが言える。つまり、走行に関しては、膝がクッションの役目を果たし主に上下運動を生じさせる。これに比して、走行のドライビングフォースは股関節によって行われる。すなわち、接地時に多く角度を変えることで、前進する力の元となる。足の関節の変化の特徴は、接地時以降のマイナスへの変化で、前進する為のキック力となっている。

2-2 トルクの変化

次に各関節のトルク(モーメント)の変化を見てみよう。 接地時にピークがあるのは膝関節と足関節であるが、ピークの位置は微妙に異なる。まず足関節からいうと、接地時の少し前に大きなトルクがかかっていることがわかる。これは接地に際してのバネの役割を果たす際に、地面への緩衝となる為に前倒しで力がかかった形になっていることを示している。次に足関節は膝関節よりも大きなトルクがかかっている。更にそのタイミングは接地時から遅れた時間にピークがある。これは接地後に前進する為に後押しの形で力を働かせている結果と言える。

一方、腿関節の接地時のトルクはあまり大きくなく、む しろゼロに近いとさえ言える。 簡潔に表現するなら、腿 関節のトルクは接地時にはゼロに近く慣性力によって動 き、前と後ろのターンオーバーの時にトルクが最大にな っていると言える。

2-3 垂直運動について

垂直方向の運動を調べるために、重心の上下位置をプロットしたものが図4である。被験者は身長 175cm であるが、その重心の位置の平均は92.5cm のところにあり、その上下3.5cm の幅で単振動を起こしている。この運動をフィッティングするときれいに sin 関数上に乗ることがわかった。すなわち、上下運動については、主に膝関節を使ったばねの運動として理解することができる。

運動の動力学を考える時に、FRF (Floor Reaction Force) あるいは GRF(Ground Reaction Force)と呼ばれる地面から受ける力は重要な要素となる。モーションキャプチャにおいては、床に測定器を置きこの力を直接計っているが、理論的にはこれは重心が受ける力と同じであり、これが再現できているかどうかが一つのポイントと言える。このことを確認したものが図5である。計測した重心の加速度の変化と重力加速度に体重をかけたものとFRFを重ねてプロットした。その結果、重心が受ける力とFRFが等しいことが確認された。

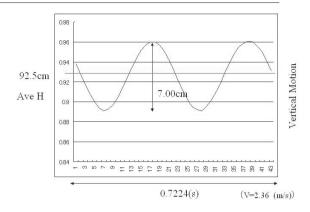


図4 重心の上下運動の時間変化

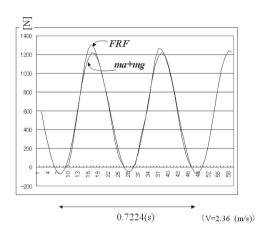


図5 床反発力(FRF)と加速度などとの比較

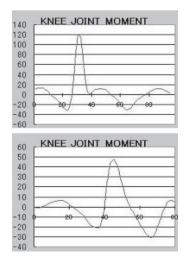


図6 歩行と走行のモーメントの比較

	Man Adult walk	Man adult run	Man child sprinting	Man adult sprinting	T-rex walk	T-rex run	T-rex sprinting
stride (m)	0.515	0.855	1.280	1.850	1.674	2.781	6.010
pitch (1/s)	1.936	2.770	3.890	4.310	1.936	2,770	4.31
speed (m/s	0.997	2.368	4.979	7.974	3.241	7.703	25.903

表 1 人間と T-rex の歩行・走行の比較

また、ハッチンソンの仮定(3)、走行の中間姿勢の鉛直 方向にかかる力は体重の重力の 2.5 倍という仮定につい ても調べてみた。図6 に歩行時と走行時の力のモーメン トを示してある。この図を読み取ると、歩行時の鉛直方 向の力は体重にかかる重力とほぼ等しく、更に、走行時 はその 2.6 倍であることがわかった。このことにより、 ハッチンソンの仮定(3)は妥当であることが検証された。

2-4 人間の走行と T-rex の走行

Trex の走行と人間の走行の詳細を考える前に、Trex の 走行の概要を把握しておくことにする。平均的な人間が 歩く場合と軽くジョギングする場合、更に全力で走る場合の歩幅とピッチ、スピードを表にした (表1)。Trex

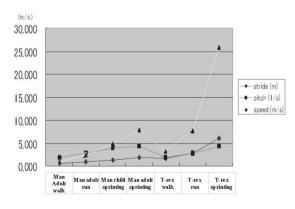


図7 人間と T-rex の歩行・走行の比較

のピッチは分からないので仮に人間と同じものと仮定し、 歩幅だけ Trex の骨格に合わせて大きくしたものを表 1 の載せた。また、この結果をグラフにしたものが図 5 で ある。これらにより、Trex が軽くジョギングすると、 人間の全力疾走と同程度の秒速 7.7m (/s)程度で走れる ことがわかる。また、仮に人間と同じピッチがでるとす ると秒速 26m/s、時速 93Km で走れることなる。

2-5 ハッチンソンの結果に対する疑義

ここまでの検証で、ハッチンソンの仮定(2)は妥当である ことが示された。ここでは(1)の仮定、中間姿勢が図1の ようなものであるかどうかの検証を行う。

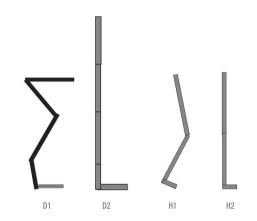


図8 D1:ハッチンソンの中間姿勢(T-rex)、D2:それを直立させたもの。H1:人間の走行(ジョギング)の中間姿勢、H2:それを直立させたもの。

図8がハッチンソンの仮定した中間姿勢を直立させたもの (D2) である。比較として、人間の走行 (ジョギング) の中間姿勢と直立させたものを示した (H1, H2)。これらを比較してみると、明らかにハッチンソンの仮定した中間姿勢を深く屈み過ぎであるように思われる。

それでは、正しい走行の姿勢はどのようなものであろ うか?このことを追求する為に次節で示す研究を行った。

3. 人間の走行の理論的分析

3-1 人間の走行姿勢はどのように決まっているか? ここで、走行の姿勢を決める要因は何かという問題について考察する。T-Rex に行く前に、結果がわかっている 人間の場合で考察する。

走行を含む運動の姿勢は果たしてどのような要因で決まっているのだろうか?このことに関しての決定的な答えは未だ知られていないように思われるが、いくつかの第一原理を考えることができる。

- (a) エネルギー最小原理
- (b) トルク最小原理
- (c) エネルギー+ α の最小原理
- (d) 一義的に決まる
- (e) 一義的には決められない。

(a)-(e)の発想は容易なので、これらに関する研究はこれまでにも多数存在するものと思われる。また筆者らの研究においても、今後研究する予定である。人間の足に関しては、関節の数が3と少ない為、走行の姿勢は一義的に決まってしまうのではないかということも考えられる。このことを追求する為に、次のような計算機実験を行ってみた。

3-2 人間の走行姿勢の再現

図4にみられるように重心の上下運動はごくわずかである。すると全体から見ると走行において体全体はほぼ水平に直進運動を行い、それを実現するような足の動きがなされているということが考えられる。このことを調べてみる為に次のような仮定をおいて計算機実験を行った。

- (I) 重心の移動はほぼ等速直線運動である。
- (II) 足が水平に地面に接地する時間がある時間間隔で 実現されている。
- (III) 重心の鉛直方向の距離は一定とする。
- (IV) 足の接地時間と体軸からの距離の和を評価値とする。
- (V) 足の運動をフーリエ級数展開で表し3次までをとる。
- (VI) 最初にフーリエ係数として最初に乱数を与え、上記 (I)-(V)の条件の範囲の運動を調べる。

この結果を図9に示す。モーションキャプチャをフーリエ分解した係数との近さを白棒で、評価値の大きさを黒棒で示す。シミュレーションは1000個の試行について行い、その中で評価地が最も大きいところの結果を

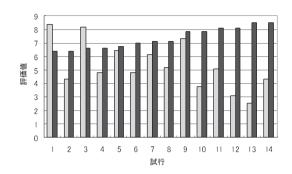


図9 (I)-(VI)の考えに基づいて行った計算機実験。黒 棒は評価値の大きさ。白棒はフーリエ係数の近さ を表す。

示してある。この結果から評価値を(IV)とするだけで、フーリエ係数が最も近い運動、すなわち走行の運動様式を再現してしまうことがわかった。つまり、(a)・(e)の原理の中で、(d)だけで再現できることがわかった。この結果と(a)・(c)との関連は今後追求する予定である。

4. T-Rex の走行姿勢の再現

人間の走行原理の一端はわかったことが前節で示された。それではTRexの場合はどうであろうか? 残念ながら、TRexの場合は関節の数が人間よりも1つ多い為に、(d)の原理が適用しにくいように思われる。結果的に(e)のような不定問題、ある原理からは決められないということになるのかも知れない。このような一つの原理からの運動の再現は今後の課題である。

唯一の解を定めることはできないが、近似的に、上記 の延長で Trex の走行様式の候補を定めることは可能で ある。

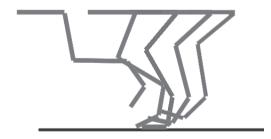


図10 ハッチンソンの中間姿勢を仮定した走行姿勢。 この走行姿勢はあまりにも膝を屈め過ぎると考 えられる。

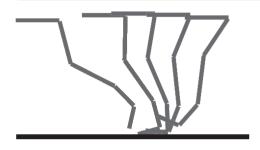


図11 人間の走行を参考にした T-Rex の走行姿勢。

そのような可能性の中の1つの軌道を図11に示した。 人間の場合との違いは関節の数が1つ増えたことと、中間姿勢の高さの調節である。ここで中間姿勢の高さは人間の走行に近い値を候補として選んだ。

表2 中間姿勢の関節モーメント

	関節モーメント(103 N·m)		
	ハッチンソン	浅い角度	
第一関節	17.8		18.9
第二関節	72.3		51.1
第三関節	27.2		4.1
第四関節	48		4
合計	165.3		78.1

この表を見ると、中間姿勢の関節モーメントはハッチン ソンの計算の半分以下になる。



図12 人間の走行と T-rex の走行の比較。人間の走行は筆者が23号館前をかなり力を入れて走ったもの。T-rex の走行はジョギング程度の走行であり、これらの速度の比較は表1にある。また、このような場合の中間姿勢の関節モーメントは表2にある。

以上をまとめて人間と Trex の走行のアニメーションを合成したものを図12に示す。 Ttrex の走行のアニメーションは現在ではいくつかのものが公表されているが、それらは Trex 単体のものであり、大きさのスケール感がいまひとつつかめない。そこで、筆者が実際に23号館の前をかなり力を入れて走ったものと、Ttrex が軽くジョギングをする程度の走行をしたものとを合成した結果を示す。このように合成したアニメーションを作成すると大きさのスケール感とスピード感がわかるようになる。 Ttrex が走る場合の特徴は、全体が大きいにもかかわらず、上下方向の運動はほぼ人間と同じようなものなので、全体から見ると上下方向の移動がほとんど感じられない点である。その結果、Ttrex の体は上下運動をせずに一直線に運動するように感じられる。ここで中間姿勢の関節モーメントを求めると表2のようになった。

5. 恐竜ロボットの脚部の試作

T-Rex の動きを再現するために、実際のT-Rex にできるだけ忠実なプロポーションを持った恐竜ロボットを試作する。ただし、原寸大のロボットを作るのは難しいので、実際のスケルトン模型から求めた寸法比を保ちつつ、実現可能な大きさまでスケールダウンしたものを考える。

今年度は動きを再現する際に要となる脚部の試作を試みた. ただし、実際の歩行を追求すると、アクチュエータの性能などから忠実なプロポーションを実現するのは難しくなるので、ここでは歩行動作を実現することに重点を置いている.

5-1 仕様

すでに述べたように実際のT-Rexの脚は4関節あるた

め、本ロボットはこれを再現するために4関節とし、根元から順に $1\sim4$ 関節とする。実際のTRexの動きを出来るだけ再現できるように第1関節はPitch軸とRoll軸の2自由度、第 $2\sim4$ 関節はPitch軸のみの1自由度とする。

横方向からみた全体を表したリンク図を図13に示す。第1関節から第4関節に向かって下に順を追って Pitch 軸の関節を①~④とする。また、股関節の左右方向に動く Roll 軸の関節を①'とする。各関節の駆動角度は、シミュレーションなどから、表3のようにする.

各リンクの寸法は、スケルトン模型の計測より、各リンクの比率 L_1 : L_2 : L_3 : L_4 を9: 9: 5: 4.5 とし、全長がほぼ 1m になるように

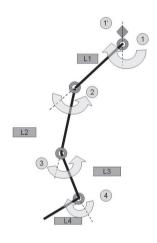


図13 恐竜ロボットの脚部のリンク図

L₁=0.330m

L₂=0.330m

L₃=0.183m

 L_4 =0.165m

と決定し、全長は1.008m となる.

表3 各関節の駆動角度

関節	駆動角度
①'	-5 ~ 5 [deg]
1	-20~20[deg]
2	0~80[deg]
3	0~30[deg]
4	-50~0[deg]

5-2 直交変換装置の導入

通常、ギヤ付きモータは全長が長くなるため、これをそのまま用いるとモータが脚部から飛び出した形状になってしまい、実際の脚部の形状と大きく異なってしまう。また左右の脚のモータが接触してしまうおそれもある。このため直交変換装置を用いて駆動装置を直線上に設置することが必要になる。

通常よく使う直交変換装置はギヤ付きモータをベベル ギヤやスパイダルベベルギヤで直交変換するものである が、ギヤの減速比が大きいとギヤの許容トルク以上の大 トルクがギヤにかかってしまったり、モータの軸径がギ ヤとあわなかったりして、市販されているものでは適当 なものがみられなかった。

そこで本研究ではスパイラルベベルギヤとハーモニックギヤを組み合わせた直交変換装置を試作した.この直交変換装置ではモータの回転をスパイラルベベルギアで直交変換した上でハーモニックギアで減速する構造となっている.このためスパイラルベベルギヤに大きなトルクがかかるのを防ぐことが可能になる.さらに図14に示すように両持ち構造にし、コンパクトな構造としている.このため軸径が大きなモータでも対応でき、ハーモニックドライブを用いているためバックラッシュがないなどの特長も持っている.





(a) スケルトン図

(b)外形図

図14 試作した直交変換装置

5-3 モータおよびギヤの選定

リンク部には厚さ 3mm で 50×50mm の正方形断面 のアルミ角柱(JIS5052)を用いる. 最大で 1 秒間に 2.5 往復の走行が可能なように計算によって求めた必要な最大トルクと必要回転数は表4のようになる. なお第2~4関節の必要トルクは負荷が最大となる水平方向の場合で算出を行っている.

表4 必要トルクと必要回転数

関節	必要トルク[Nm]	必要回転数[rpm]
①'	2.342	13
1	7.410	52
2	7.464	105
3	1.909	39
4	0.195	65

表4に対して、モータ及びギヤの選定を行った。モー タは種類が豊富でロボットなどへの使用実績も多い maxon 社のものを選定した. 一番トルクが必要で、高い 回転数も要求される第2関節については1つのモータで は仕様を満たすことが困難であったので2つのモータを 用いることにした. またドライバやカバーをアルミフレ ームに取り付けることにし、将来的には外皮なども取り 付けることを想定して、必要トルクの 1.5 倍以上のトル クが得られるように選定した. モータおよびギヤの選定 結果を表5に示す。第1関節はハーモニックギヤのみを 用い、第2関節は5-2の直交変換装置と原理は同じで 2つのモータでスパイラルベベルギヤを回転させた上に ハーモニックギヤを用いる構造にしている。また第3~ 5関節は5-2に示した直交変換装置を用いており、ト -9ルギヤ比は50:1~100:1となっている. 得 られる各関節のトルクと回転数を表6に示す.表4と比 較して回転数、トルクとも十分であることがわかる。と くにトルクは第1関節の Pitch 軸が必要トルクに比べて 1.61 倍になっている以外はすべて 2.5 倍以上になってい ることがわかる.

5-4 脚部の試作

試作した恐竜ロボットの脚部の外形図及び写真を図15,16に示す. 第1関節は Pitch 軸および Roll 軸の2軸から構成されており,第2関節はひとつのスパイラルギヤを2つのモータで回す構造になっている.第3,4関節はそれぞれ Pitch 軸のみの構成になっている.図15でアルミのフレームについているのは各モータのドライバであり,図16の実際の試作機ではすべてカバーがついている.

表 6 得られるトルクと回転数

関節	トルク[Nm]	回転数[rpm]
①'	6.000	160
1	12.000	80
2	21.600	160
3	4.752	133
4	1.123	117



図15 恐竜ロボットの脚部の外形図

表5 モータ及びギヤの選定

	モータ	スパイラルギヤ	ハーモニックギヤ	トータルギヤ比
第1関節 Roll	RE40 150W	_	50:1	50:1
第1関節 Pitch	RE40 150W	_	100:1	100:1
第2関節1	RE40 150W	2:1	50:1	100:1
第2関節2	RE40 150W	2:1	50:1	100:1
第3関節	RE35 90W	2:1	30:1	60:1
第4関節	RE25 20W	2:1	30:1	60:1

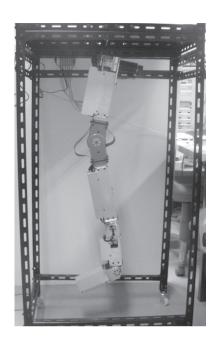


図16 試作した恐竜ロボットの脚部

試作した恐竜ロボットの脚部の制御システム構成図を図17に示す。各関節のモータは24V電源にて駆動される。各関節には最終段にポテンショメータが取り付けられており、初段(モータの出力軸)にはエンコーダが取り付けられている。エンコーダのスリット数は第4関節のみ100でそれ以外は500となっている。6枚のモータコントローラは USB・HUB を通じてパソコンへ接続されている。

試作した恐竜の脚部ロボットをシミュレーション通り に動かす作業は現在進行中である.

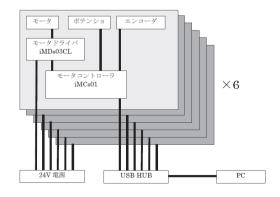


図17 恐竜ロボットの脚部の制御システム構成図

Appendix

Trex の走行に関してはハッチンソンの論文 (Hutchinson & Garcia 2002) 以降、走れるとした論文も提出されている(Sellers *et al.* 2003, Sellers *et al.* 2004, Sellers *et al.* 2005)。

参考文献

Hutchinson, J. R. & Garcia, M. 2002 Tyrannosaurus was not a fast runner. Nature 415, 1018–1021.

Sellers, W. I. & Paul, G. S. 2005 Speed potential of giant tyrannosaurs. Artif. Intell. Study Behav. Q. 121, 3.

Sellers, W. I., Dennis, L. A. & Crompton, R. H. 2003 Predicting the metabolic energy costs of bipedalism using evolutionary robotics. J. Exp. Biol. 206, 1127–1136.

Sellers, W. I., Dennis, L. A., Wang, W. & Crompton, R. H. 2004 Evaluating alternative gait strategies using evolutionary robotics. J. Anat. 204, 343–351.



新規貴金属微粒子を用いた 導電性インク、導電性ペーストの製作

高山 俊夫* 渡部 正利** 古川 成明***

Preparation for Conductive Ink and Paste Using Novel Metal Nano-Particles

Toshio TAKAYAMA* Masatoshi WATABE** Nariaki FURUKAWA***

1. 緒言

現在、ナノテクノロジーの実現を目指した多くの組織やプロジェクトが立ち上がっているが、そのターゲットとする重点産業は幾つかの分野に分けられる。その中でエレクトロニクス実装に直接関連するのは、分野の呼称で言うと「ネットワーク・ナノデバイス産業」と「ナノ計測・加工産業」に相当する。前者には、次世代半導体、特に微細加工、ネットワーク関連など高度情報機器や次世代ディスプレイなどの情報通信機器や情報家電製品が含まれる。一方、後者にはメムス(MEMS)や配線技術としてのインクジェット(LJ)技術が含まれている(1,2)。

ナノテクノロジーの実装分野、特にインターコネクト (接続や配線) での展開で最も期待されているのが、ナ ノ粒子を適当な樹脂に混合しペースト化した配線技術で ある。実装分野の利用の中で最も興味深いものは、導電 性に着目した金属ナノ粒子を用いたペーストである。ナ ノペーストは、粘度調節により流動性に富むペーストも 容易に得られ、焼成後の分散状態をコントロールするこ とで半導体的性質、或いは良好な金属導電性を得ること が可能になる。この配線技術を可能にするのが IJ 印刷 技術で、微細配線形成技術として注目されている。この 技術は、金属ナノ粒子を溶媒中に分散させた金属イオン を基板へ直接描画・焼成するのみで微細配線を形成する 方法であり、現在、回路形成法として広く用いられてい るフォトリソ薄膜回路法と比較して、工程の簡略化が可 能で、新たな回路形成法としてエレクトロニクス分野を 中心に幅広い分野にて期待されている(3,4)。

IJ 回路形成の特色は、配線だけには留まらない。セラミ ックスもナノ粒子化は簡単に出来るので、電子デバイス を IJ で形成することが出来る。さらに、最近はセラミ ックスには特性が及ばないものの有機半導体の合成が可 能になっている。有機半導体は、もともと有機物である からインク化することが容易なので、配線材料、更に絶 縁有機材料と別々のタンクに収容することで、IJ・プリ ンターでデバイス、基板から配線まですべてを描画する ことが可能になる。つまり、これまで複雑な過程を経て 回路基板を作製し、電子部品を搭載し、はんだ付けして きた実装基板が、IJ・プリンターを用いるプロセスで仕 上がることになるわけである。しかも、部品を搭載しは んだ付けする過程では、部品のずれが生じやすく歩留ま りが悪いが、IJ印刷では、これも解消される。環境調和 を達成するとともに、設備投資が少なく大幅なコストダ ウンが期待される(5)。

IJ 印刷技術のうち、金属ナノ粒子の製造が重要な鍵となる。金属ナノ粒子のエレクトロニクス材料としての利用では、やはり安定性からいって銀、金、白金などの貴金属粒子が中心となる。その合成法には、金属を真空蒸発し凝縮させる気相法や、金属無機塩や有機金属錯体の溶液に膜形成する分子を添加し還元処理する手法等が考えられているが、これらはいずれも多数の工程を要するという欠点がある。そこで、これら貴金属ナノ粒子を凝集させず独立分散させることによって安定なインキの製造方法の確立が急務となっている(6-8)。

以上のことから、本研究課題はインキ材料として化学的に安定化した貴金属を選定し、独自の製法により開発した金属ナノ粒子の製造技術を応用することで、分散性・導電性に優れた金属ナノインキおよびペーストを開発することを目的とした。

*准教授 神奈川大学物質生命化学科

Associate Professor, Dept. of Material and Life Chemistry

**教授 工学院大学

Professor,Kogakuin University *** 研究員 ワインレッドケミカル (株) Researcher,Winered Chemical Co.Ltd

2. 実験

金属ナノ粒子の合成方法として一般的に行われているのは湿式法で、金属イオン、還元剤、保護剤等を使用し、金属イオンをゼロ(0)価に還元する方法である(9-11)。我々はさらに効果的に金属ナノ粒子を得るために還元剤、保護剤の開発と研究を行った(合成1~5)。まず、還元剤として各種アミノ酸やグリシルグリシン(digly)を使用した方法で、銀ナノ粒子及びパラジウムー銀複合ナノ粒子を合成し、粒径等の特徴の違いを比較検討した。また、保護剤としてポリビニルピロリドン(PVP)を用いた場合と用いない場合についての比較検討も行った。合成1~4にそのスキームを示す(Fig.1)。

 \bigcirc Ag+ + digly + KOH \rightarrow Ag ナノ粒子 \rightarrow K₂[PdCl₄] 添加 \rightarrow Ag-Pd ナノ粒子 PVP なし 合成 3、 PVP 合成 4

Fig.1 Ag と Ag-Pd ナノ粒子の合成

さらに、合成 $1\sim4$ の還元剤より還元力の強いことが 予想される、アミノ酸シッフ塩基 2,4・ジ じト ロキンサリテリテング リシン (Salgly) を配位子とする各種金属錯体を合成し、pH 調整を行うことによって各種金属のナノ粒子の合成を試みた(合成 5)。合わせて NMR 法を用いてナノ粒子の生成機構の解明も行った。

【合成1~4】

アミノ酸類還元剤を用いた銀ナノ粒子 合成1,2

あらかじめ $78\sim80$ \mathbb{C} の湯裕で加温しておいた水に、1% w/v に 調 製 し た (合 成 2 の み PVP 溶 液 (M. W. =360,000) $22.5 \mathrm{ml}$)、 $\mathrm{AgNO_3}$ 溶液 $7.5 \mathrm{ml}$ 、 F F

<u>Digly を還元剤として用いたパラジウム - 銀複合ナノ</u> 粒子 <mark>合成3,4</mark>

あらかじめ 78~80℃の湯浴で加温しておいた水に、1% w/v に 調 製 し た (合 成 4 の み PVP 溶 液 (M. W. =360,000) 22.5ml)、AgNO₃溶液 7.5ml、Digly 溶液 15.0 ml、1M-KOH1 7.5ml、最後に 1% w/v K_2 [PdCl₄]溶液を加え、全量を 1000ml にし、 $60\sim90$ 分間攪拌反応させた。次に、透析、限外濾過をすることで未反応配位子や不純物の除去及び液の濃縮をした。その後、UV 測定、粒径測定、TEM にてナノ粒子の観測・測定を行った。本実験では、保護剤として TEM の TEM

結果及び考察 合成1~4

アミノ酸類還元剤を用いた銀ナノ粒子の特徴の比較 合成1,2

アミノ酸の種類により、粒径の違いがあることがわかった(Table 1)。また、PVP を用いることにより粒径を小さくすることができた。アミノ酸の銀イオンへの配位による保護能力及び還元力の違いが粒径の違いに影響したと考えられる。また、保護剤である PVP を添加することにより、凝集を制御でき、単分散に近い銀ナノ粒子を合成することができた。

Table 1 アミノ酸類還元剤を用いた銀ナノ粒子の特徴 (p. 9 へ)

Digly を還元剤として用いたパラジウム - 銀複合ナノ粒子 合成及びその保護システム 合成3,4

パラジウム - 銀ナノ粒子は、パラジウム添加により、 384.5nm~433.0nm の吸収波長を示すことが観測され た (Fig.2)。また、パラジウムを添加するほど、粒径は 小さくなることがわかった(Fig.3)。パラジウムナノ粒子 の存在により、銀ナノ粒子の凝集を防ぐことで粒径が小 さくなると考えられる。パラジウムを添加すると吸収波 長が大きくなるはずであったが、逆に小さくなっていた のは粒径が小さくなっていることを示唆している。この ように、パラジウム化合物の添加量の調整により、容易 に粒径コントロールが可能となった。ある程度のパラジ ウムを加えると、粒径が大きくなるのはパラジウムナノ 粒子が増加し、銀ナノ粒子を覆ったり、不規則にパラジ ウムナノ粒子が存在したためと考えられる。Fig.4には、 パラジウム添加によるパラジウムー銀ナノ粒子の色の変 化を示した。銀ナノ粒子特有の黄色から、パラジウムを 添加していくほど、パラジウムナノ粒子が増加し、パラ ジウムナノ粒子特有の黒色が強くなったことを示したと 考えれる。また、TEM 写真からも粒径が小さくなって いることが分かった (Fig.5, 6)。

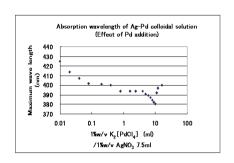


Fig.2 Ag-Pd ナノ粒子水溶液の吸収波長

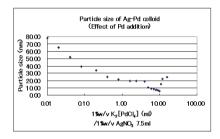


Fig.3 Ag-Pd ナノ粒子の粒径

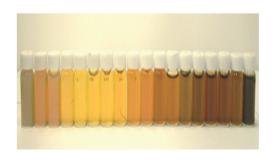
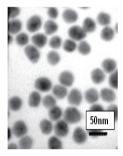


Fig.4 Ag-Pd ナノ粒子水溶液の色相変化





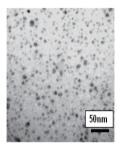


Fig.6 Pd 10.0ml の TEM 粒径≒5.76nm)

PVP 存在下での吸収波長 (Fig.7) と色の変化を Fig.8 に示す。PVP を用いるとパラジウムを添加するほど、粒径は小さくなることが分かった(Fig.9~11)。 本実験でPVP を用いることで、粒径が均一で安定なコロイドを合

成することができることが明らかになった。

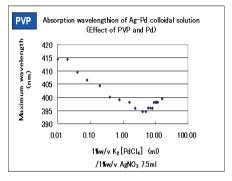


Fig.7 Ag-Pd ナノ粒子水溶液の吸収波長



Fig.8 PVP 存在下の Ag-Pd ナノ粒子水溶液 の色相変化 solution

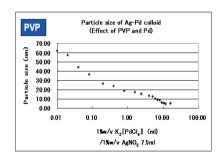
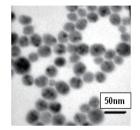


Fig.9 Ag-Pd ナノ粒子の粒径





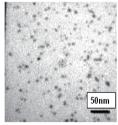


Fig.11 Pd 16.0ml の TEM 粒径≒5.51nm



Fig.12 一般的な湿式化学合成法



Fig.13 Digly を還元剤とした Ag-Pd ナノ粒子合成法

一般的なナノ粒子の調整法のうち湿式合成法は、 Fig. 12 に示すように、その前駆体を分解・還元すること によって0価の金属原子を作成、核を生成させた後、そ の凝集をコントロールすることによってナノサイズの金 属原子の塊を作るという手法である。本研究ではパラジ ウムを入れる前に、還元剤及び還元促進剤を用い、銀イ オンを還元させた。先に銀イオンがペプチドのアミノ基 やカルボキシル基と結合し、金属錯体を形成する。還元 促進剤を用いているため、急激に銀イオンを金属原子(0 価) に還元し、それらが集合して核を形成する。続いて 核が集合し、銀ナノ粒子が形成される。続いてパラジウ ムイオンも還元され、パラジウム原子が銀ナノ粒子の表 面や内部に析出してパラジウムナノ粒子を形成し、複合 ナノ粒子を形成していると推測した。PVP を用いた場合 では、PVP のカルボニル基が表面パラジウム原子や表面 銀原子に配位して錯体を形成し、核成長を防ぎ、ナノ粒 子の凝集を防いでいると考えられる。PVP は、さらに凝 集を防ぐ保護剤の役割をしていると考えられる。本実験 では、パラジウムを添加するほど粒径が小さくなってい る。これは、パラジウムが多いほど強く銀ナノ粒子を強 く保護し、凝集を防ぎ、粒径を小さくしたと考えられる (Fig.13)_o

XPS(電子分光分析システム)からは、Fig.14より、銀 及びパラジウムの存在を確認することができた。2層(約 50nm)、3層(約100nm)と共に銀ナノ粒子及びパラジウ ムが存在していることがわかり、複合ナノ粒子は銀とパ ラジウムのナノ粒子がランダムに存在して、合金ナノ粒 子のような構造をしていると考えた(Fig.15)。酸素は多 く表面に存在することがわかり、保護基の存在を確認す ることが出来た。

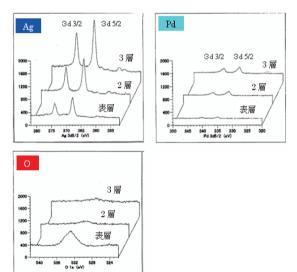


Fig.14 パラジウムー銀複合ナノ粒子の XPS

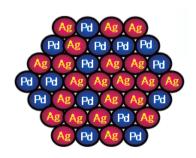


Fig.15 パラジウム-銀複合ナノ粒子構造

以上の方法で得た銀ナノ粒子の粉末を50g使用し銀塗 料を調製し、スクリーン印刷を行った。

銀ナノ粒子の導電性ペースト:



成分: エチルセルロース 約3% アルキッド樹脂 約4%

約23% 溶剤

粘土: 1000 poise/25℃ by Rion Viscotester VT-04

No. 2 Roter

スクリーン印刷品:

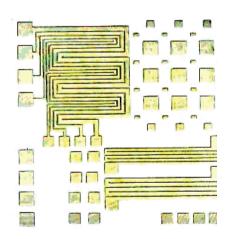
基板: 石英ガラス 乾燥: 150℃/5分 焼成:500℃/30分

①比抵抗測定: 14mΩ 200mesh 500℃/30分焼成

厚み 約4μm

厚みおよび 500℃焼成品としては、低い抵抗値で良 好であった。但し、焼結性が弱く、被膜としては脆 さが見えた。検討を要する。

②微細パターン印刷:325mesh 500℃/30 分焼成品 粘土が高く、印刷性は良好であった。 しかもマスク抜けは良好であった。



結論 合成1~4

- 1) アミノ酸類還元剤を用いた銀ナノ粒子の合成では、 アミノ酸の構造の違いにより、還元力や銀への配位 能が異なり、粒径に違いが生じた。
- 2) 保護剤(PVP)を用いることにより、アミノ酸やグリシ ルグリシン保護以上に凝集を制御することが可能で、 粒径を小さくすることができた。
- 3) Digly を還元剤として用いたパラジウム 銀複合ナ ノ粒子合成では、パラジウムの添加量の調整により、 粒径コントロールが可能であることが分かった。
- 4) ICP、EDS 及び XPS により、パラジウムー銀複合ナノ 粒子の構造は合金やランダム構造の複合ナノ粒子で あると考えられる。

実験 合成5

2.4-ジヒドロキシサリチリデングリシン(Salgly)を還 元剤として用いた金、白金、銀、パラジウムナノ粒子の 合成

合成1~4の還元剤より還元力の強いことが予想され る、アミノ酸シッフ塩基 2,4-ジヒドロキシサリチリデングリシン (Salgly) を配位子とする各種錯体を合成し、pH 調整を行うこと によって各種金属のナノ粒子の合成を試みた(12)。さら にナノ粒子の生成機構の解明を NMR 法を用いて行った。 ナノ粒子の構造解析は TEM、XRD により、反応機構解 明はNMR(JEOL-ECA270MHz)にて行った。

HCNCH2COOH + HAuCl₄• 4H₂O ÒН

Salgly (上記) は2,4-ジヒドロキシベンズアルデヒドとグリシンから 合成した。等モル量の Salgly とそれぞれの金属塩 HAuCl₄ · 4 H₂O₅ K₂[PtCl₄], AgNO₃, Pd(CH₃COO)₂ から金属錯体を合成し、次いでKOH水溶液でpH=10.8、 70 ℃ で 3 時間加熱撹拌しそれぞれ Au、Pt、Ag、Pd 金 属ナノ粒子溶液を得た。集積した沈殿をろ別し、ろ液の 水を減圧下除去し、真空乾燥してナノ粒子を得た。

【金ナノ粒子】

溶液の色はワインレッドであった(Fig. 16)。 その溶液の吸収スペクトル(AB)を Fig.17 に示す。



Fig.16 金コロイド溶液

2

(C)

400 500 600 700

nm

Fig.17 金コロイド溶液の AB スペクトル

金ナノ粒子の TEM 写真(50nm)を Fig.18 に示す。

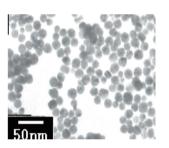


Fig.18 金ナノ粒子(50nm)

考察 金ナノ粒子

AB スペクトルから波長 525nm に金のプラズモンと 考えられる吸収極大のピークが見られ、金ナノ粒子の存在を確認することができた。また波長 350nm 付近には Salgly 酸化体のベンゼン環の $\pi-\pi^*$ 遷移に起因していると考えられるピークを確認することができた。TEM 像から平均粒径 $6\sim10$ nm のナノ粒子を得ることが確認することができた。また、XRD から金のナノ粒子であることも確認している。

【白金ナノ粒子】

溶液の色は茶色であった。 その溶液のABをFig.19に示す。

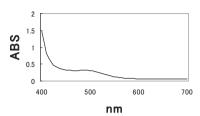


Fig. 19 白金コロイド溶液のAB スペクトル 白金ナノ粒子のTEM 写真(10nm)を Fig.20 に示す。

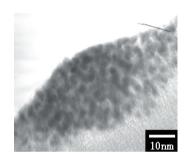


Fig.20 自金ナノ粒子(10nm)

考察 白金ナノ粒子

AB スペクトル結果から 490nm 付近にブロードなプラズモン吸収と考えられる吸収極大が見られたことから、白金ナノ粒子の存在を確認することができた。350nm 付近ではベンゼン環からなる $\pi-\pi*$ 遷移に起因していると考えられるピークを確認することができた。TEM 像から平均粒径 5nm のナノ粒子を確認することができた。若干集積している部分もあった。また、XRD から白金のナノ粒子であることも確認している。

【銀ナノ粒子】

溶液の色は黄土色であった(Fig. 21)。 その溶液の吸収スペクトル(AB) を Fig. 22 に示す。

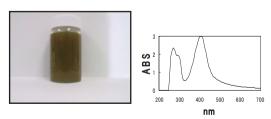


Fig.21 銀コロイド溶液(黄土色) Fig.22 銀コロイド溶液の AB スペクトル

銀ナノ粒子の TEM 写真(50nm)を Fig.23 に示す。

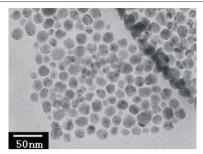


Fig.23 銀ナノ粒子(50nm)

考察 銀ナノ粒子

AB スペクトル結果から波長 405nm に銀のプラズモンと考えられる吸収極大を見ることができ、銀ナノ粒子の存在を確認することができた。また、波長 270nm 付近には Salgly 酸化体のベンゼン環の $\pi-\pi^*$ 遷移に起因していると考えられえるピークを確認することができた。また TEM 像からは平均粒径 20nm のナノ粒子を得ることができた。また、XRD から銀のナノ粒子であることも確認している。

【パラジウムナノ粒子】

溶液の色は茶色であった(Fig. 24)。 その溶液の AB を Fig. 25 に示す。

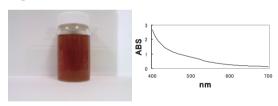


Fig. 24 パラジウムコロイド溶液(茶色)

Fig. 25 パラジウムコロイド溶液のABスペクトル

パラジウムナノ粒子の TEM 写真(20nm)を Fig.26 に示す。

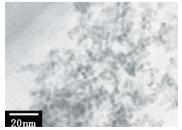


Fig.26 パラジウムナノ粒子(20nm)

考察 パラジウムナノ粒子

AB スペクトル結果から 520nm 付近にブロードなプ

ラズモンと考えられる吸収ピークを検出することができ、パラジウムナノ粒子の存在を確認することができた。 350nm 付近ではベンゼン環からなる $\pi-\pi*$ 遷移に起因していると考えられるピークを確認することができた。 TEM 像から平均粒径 5nm のナノ粒子を確認することができた。 若干集積している部分もあった。また、XRD からパラジウムのナノ粒子であることも確認している。

NMR 法によるナノ粒子形成機構解明 合成5

各種金属イオンが還元剤で還元されて、生成した金属がどのような配位子で保護されてコロイドになっているかの解明を、溶液内で時間の経過ごとの配位子の変化を 13 C-NMR を用いて行った。Salgly、それぞれの金属イオンを 12 C-NMR セルに入れ、1時間ごとに測定を行った。1回の測定(積算)時間は約10分であった。基準は 13 TMS-Na(δ =0.0)とした。

¹³CNMR スペクトルを Fig. 27 にまとめる。

- (a) Salgly のみのスペクトル、化学シフトの帰属は番号で示す。
- (b) (Salgly-Ag)/KOHaq のスペクトル、銀が配位しているために(a) の化学シフトと異なっている。
- (C) (b)の試料を一日後に測定したスペクトル。各ピーク の化学シフトが複雑に分裂していた(帰属が特定でき なかったので番号にダッシュ (')を付る。 グリシル基(-NCH₂COOH)が分裂遊離したことを示して いた。さらにジヒドロキシル基がジケトン基に変化し たことをも示している。

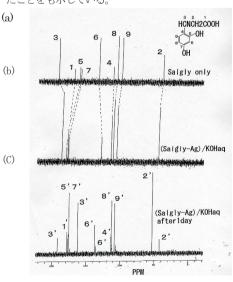


Fig. 27 13CNMR スペクトル

以上の NMR スペクトルから推定した金属ナノ粒子が生成する機構を Fig. 28 に示す。

M=Ag, Au, Pt, Pd

Fig. 28 金属ナノ粒子が生成する機構

結論 合成5

本反応は還元剤として作用するSalglyのSal基のジヒドロキシ部分がジケトンになり電子を金属に与え、自らは保護コロイドを形成し金属微粒子を安定化させることによって起こっているものと思われる。これらの金属微粒子は長期間安定な金属コロイドを形成していた。

【総括】

本研究課題はインキ・ペースト材料として化学的に安定化した貴金属を選定し、独自の製法により開発した金属ナノ粒子の製造技術を応用することで、分散性・導電性に優れた金属ナノインキ・ペーストを開発することを

目的とした。湿式法で金属イオン、還元剤、保護剤等を使用し、金属ナノ粒子を得た。還元剤として各種アミノ酸やグリシルグリシン(digly)を使用した方法で、銀ナノ粒子及びパラジウムー銀複合ナノ粒子を合成し、粒径等の特徴の違いを明らかにすることが出来た。また、保護剤として用いたポリビニルピロリドン(PVP)を用いた場合かなりの効果があることも分かった。

さらに、上記還元剤より還元力の強い 2,4 ジヒドロキンサリ チリデングリシン(Salgly)を用いることによって高濃度のナノ粒子の合成に成功した。今まではっきりしていなかったナノ粒子の生成機構の解明にも NMR 法にて明らかにすることが出来た。

「参考文献

- 「金属ナノ粒子を応用したマイクロファブリケーション」 Keunsoo KIM 菅沼克明 エレクトロ実装学会誌 vol. 9 No. 7 (2006)
- 2)「金属ナノ粒子および合金ナノ粒子ペーストによる微細回路形成」 中許昌美 エレクトロ実装学会誌 vol.9 No.7 (2006)
- 3)「金属ナノ粒子の合成・調整、コントロール技術と応 用展開」 米沢 徹 監修 技術情報協会
- 4)「ナノ粒子の調整及び分散・凝集コントロールとその 評価」 技術情報協会
- 5)「ナノ粒子の製造・評価・応用・機器の最新技術」 技 術情報協会
- 6)「コロイドの話」 北原文雄 監修 培風館
- 7)「金属ナノ粒子」 戸島直樹 分析 2004 3
- 8)「超微粒子金触媒」 春田正穀 化学と工業 第50 巻 第11号 (1997)
- Y. Wang and N. Toshima, J. Phys. Chem. B, 101 5301–5306 (1997)
- N. Toshima, M. Harada, Y. Yamazaki, and K. Asakura,
 J. Phys. Chem., 96, 9927 (1992)
- 12) M. Haruta, CATTECH, 6(3), 102 (2002)

発表論文

- 1) 栗田 哲、渡部正利、高山俊夫、「パラジウム含有銀ナノ粒子の錯体経由合成法」、第56回錯体化学討論会(広島、2006-9)
- 2) 高山俊夫、引地史郎、渡部正利、「錯体化学的手法を 用いた金属ナノ微粒子の合成」、日本化学会第87春 季年会(大阪、2007-3)

- 3) 渡部正利、栗田 哲、高山俊夫、「銀パラジウム複合 ナノ粒子の合成」、日本化学会第87春季年会(大阪、 2007-3)
- 4) 高山俊夫、引地史郎、渡部正利、田野倉 誠、「金 属酸化物ナノ粒子の合成」、第 60 回コロイドおよ び界面化学討論会(松本、2007-9)
- 5) 渡部正利、高山俊夫、田野倉 誠、「貴金属複合ナ ノ粒子の合成」、第60回コロイドおよび界面化学 討論会(松本、2007-9)

(p.2の続き)

Table 1 アミノ酸類還元剤を用いた銀ナノ粒子の特徴

Amiro acid	Side chain	Absorption Wavelength (nm)		Averagearticle size (nm)	
		PVP free	PVP	PVP free	PVP
L-serine	-CH₂OH	413	403	66	37
L-threonire	-сн(сн₃)он	423	404	115	46
D-aspartic acid	-сн₂соон	412	407	48	13
L-gutamicacid	-CH₂CH₂COOH	423	414	58	46
L-asparagine	-CH ₂ CONH ₂	390	400	38	33
L-gutamine	-CH ₂ CH ₂ CONH ₂	423	415	4 2	17
glycire	-н	×	393	×	25



放射線医療・被曝そして宇宙ガンマ線観測にも有効な

ダイヤモンド・コンプトン・リコイルテレスコープ(DCRT)の開発

柏木 利介* 日比野 欣也** 奥野 祥二* 内堀 幸夫*** 北村 尚*** 高島 健**** 矢島 佳央理**** 横田 護*****

Development of Diamond Compton Recoil Telescope

Toshisuke KASHIWAGI* Kinya HIBINO** Shoji OKUNO* Yukio UCHIHORI***
Hisashi KITAMURA*** Takeshi TAKASHIMA**** Kaori YAJIMA****
Mamoru YOKOTA*****

1. はじめに

ダイヤモンドは宝石としての価値が高いだけでなく、近年は半導体としての価値が注目されている。ただし、n型半導体ができていないことと共に、良好な大面積な素材が得られていない問題がある。最近、CVD 法によって直径 4inch φ程度の大面積の物ができているが、単結晶素材は得られておらず、電子デバイスの製作の実用化の見通しは立っていない現状である。しかし、これらの問題点が解決されれば、ダイヤモンド半導体産業設立というブレイクスルーを迎える可能性はあると思われている。最近はやりのカーボン・ナノ・テクノロジーもダイヤモンドから、ナノ・チューブやフラーレンを考えて

いくべきであり、その基礎としてのダイヤモンドの性能を明らかにして行くことは重要な観点であろう。

本研究では、単結晶であり、ダイヤモンドの本質的な性能を表していると思われる超高圧合成法によって製作されたIIa ダイヤモンドを用いて放射線センサを製作し、その動作を確かめ、ダイヤモンド・コンプトン・リコイル・テレスコープ(DCRT)の開発を行っていくものである。これは、DCRT 開発と共に、将来のダイヤモンド産業にむけて、諸問題が解決されたときのために、今からダイヤモンド本来の性能を実証しておくべきである、という観点も持っている。

ところで、ダイヤモンドの本質的な性能を確かめるためには、我々は放射線を使用することが、最も良い方法の一つであると考えている。つまり、ダイヤモンドが半導体デバイスとして有効であるということを立証するためには、ダイヤモンド内部で、電子、正孔というキャリアがどの程度良好に動くことができるかを測定することが重要である。例えば、数 MeV のエネルギーを持った α線をダイヤモンドに入射することで発生するキャリアは数 1000 個程度であり、その電荷収集が良好に行われるということは他の電子デバイスよりも高度な要求がある。つまり、放射線入射によって発生したキャリアを精度良く検出することができれば、他のダイヤモンドデバイスは当然良好に働くと思われる。放射線入射という様な高度な計測を目指すことは、単に DCRT 開発に役立つだけでなく、同時に様々なダイヤモンド電子デバイス開

*助教 情報システム創成学科

Assistant Professor, Dept. of Information Systems Creation

**准教授 物理教室

Associate Professor, Institute of Physics

***放射線医学総合研究所

National Institute of Radiological Sciences

****宇宙航空開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency *****東邦大学

Department of Physics, Toho Univ. *****神奈川県立向の岡工業高校

Mukainooka Technical High School

発にも貢献し、またダイヤモンド半導体産業設立への是 非を確かめている実験でもあると考えている。

2. DCRT の開発

ダイヤモンドは原子番号が低いため(Z=6)、光電効果を起こしにくく、約10keVのエネルギーを超えたX線・ガンマ線に対して、ほとんどがコンプトン散乱を引き起こす素材である。DCRTはそのコンプトン散乱の飛跡を計測することによって、入射してきたX線・ガンマ線の入射方向やエネルギーを測定する装置である。

現在、医療現場ではレントゲン撮影や CT スキャン装置において人体に対して X 線が多用されている。また、これらの測定では多量の放射線線量を照射しなければ鮮明な画像を得ることはできない。なぜなら、現存する装置では、一個の X 線に対して写真乾板などを反応させるのではなく、多量の X 線を入射させないと映像を見ることができないのである。簡単には、約 10 年間、X 線医療検査を受け続けた人は 1/1000 程度の確率で、放射線被曝から、ガンを誘発すると言われている。

これに対して DCRT では、人体を透過し、装置に入射してきた一個のX線の飛来方向やエネルギーを測定することができるため、放射線による検査の際に被曝する線量を軽減することができる。もし、この DCRT が実現化すれば、患者に対して現在よりも約 1/100 程度の被曝線量に抑えることができると考えている。また従来の装置を用いた物より、より鮮明な画像が得られると考えている。。

また、この DCRT は医療関係だけでなく、宇宙に於ける X線・ガンマ線観測に関しても、今までの装置では考えられなかったような飛来方向決定精度とエネルギー決定精度を持った観測を行うことができると考えている。

10keV~10MeV のエネルギー範囲の詳細な宇宙ガンマ線観測は他のエネルギー範囲と共に重要であるが、あまり行われていない。このエネルギー範囲の宇宙ガンマ線観測は1991年打ち上げられた COMPTEL 衛星 によって行われ、750keV~30MeV のエネルギー範囲の観測が行われた。その後、2002年に INTEGRAL 衛星が打ち上げられ、20keV~10MeV のエネルギー範囲のガンマ線観測が行われた。この INTEGRAL 衛星に搭載された検出器は COMPTEL 衛星に搭載された物に対して優れた物であったが、エネルギーが低い宇宙 X 線観測で行われている様な高い精度の観測が行われて来なかったのが現状である。そのために、次の世代ではさらに精度の高い検出器が必要であり DCRT が最適であると考えて

いる。

以上の様な観点で、本研究ではこの DCRT という装置 の基礎研究を行っているのである。そして、この DCRT が普及されると、全世界でレントゲン検査や CT スキャン装置に組み込まれていくことになるだろう。また、宇宙 X線・ガンマ線の観測装置としても、独壇場の計測機器になると考えている。

3. ダイヤモンド・センサの性質と応用

ダイヤモンド・センサは個体センサとして代表的なシリコン・センサに比べて、遜色の無い性能を有する可能性があることが昔から示唆されていた。1960年代、主に旧ソ連のグループによって、天然ダイヤモンドによる放射線センサ開発が行われていたが、良好な素材の入手が困難であったため研究開発は進まなかった。近年、人工ダイヤモンドの研究開発が急速に発達し、良好な素材が得られる様になったことで、我々はこのダイヤモンド・センサの開発を再開している。

このダイヤモンド素材を用いたセンサには以下の様なシリコン・センサには考えられない特徴を備えている。

(1)エネルギー・バンド・ギャップが広い

シリコンでは 1.12eV のエネルギー・バンド・ギャップを持つことに対して、ダイヤモンドでは 5.5eV の広い値を持っている。これは、冷却を必要としなくても高エネルギー分解能(エネルギー決定精度)を持つセンサができることを意味している。センサのエネルギー分解能はキャリアの発生の揺らぎで決まることになるが、エネルギー・バンド・ギャップが広いことはその揺らぎをおさえることになる。またシリコンで作られた電子デバイスはエネルギー・バンド・ギャップが狭いために、高温環境下で動作できないが、ダイヤモンドの場合は高温環境に強く、実際に 300℃の環境でα線を検出した例もある。また高温に強いことは、センサばかりでなく、他の電子デバイス、特に高温下で働くトランジスタなどへの応用が検討されている。

エネルギー・バンド・ギャップが 5.5eV と広いことはもう一つの利点がある。それは光センサへの応用である。 半導体光センサが測定できる長波長限界はエネルギー・バンド・ギャップで決まる。 シリコンの場合は 1100nmであるが、ダイヤモンドは230nmが長波長限界になる。 人間の目に感じる可視光は 500nm あたりであるから、ダイヤモンドは可視光に感じない光センサができることを意味している。これは宇宙を考えると、太陽からの可 視光に感じない、紫外光だけに感じるセンサを作ることができたり、このセンサを用いた紫外線天文学などという分野が開けてくる可能性も持っている。また、日常の生活に於いても、紫外光にしか感じないセンサがあれば、可視光、赤外光と区別した計測ができる様になり、セキュリティー関係の特別な応用が考えられるかもしれないであろう。

(2)キャリアのスピードが速い

シリコンに比較して、ダイヤモンドは数倍、キャリア (電子・正孔)のスピードが速い。これは高速のセンサを 作ることができることを意味している。またトランジス タなどをもし製作できるとしたら、同様に数倍速く動作 する電子デバイスを製作できることになる。

(3)漏れ電流が小さい

センサを形成する場合、シリコンの場合は nA 程度の 漏れ電流になってしまうが、ダイヤモンドの場合は pA という3桁低い値である。これは電流雑音ノイズが下が ることを意味しており、高エネルギー分解能センサにな りうることを意味している。

(4)誘電率が低い

シリコンに比べ、ダイヤモンドの誘電率は半分程度である。これはセンサの静電容量を小さくすることができることを意味しており、静電容量ノイズを抑えることができる。この観点でも高エネルギー分解能のセンサができるということである。

(5)放射線損傷に強い

ダイヤモンドはシリコンに比べてバインディング・エネルギーが大きいため、放射線損傷に強いと言われているが、正確な計測はまだ行われていない。もし、そうであれば、特に放射線環境に厳しい、素粒子実験、原子核実験、原子炉周辺での使用に適していると言えるだろう。

(6)原子番号が小さく6である。

シリコンの原子番号は 14 であり、ダイヤモンドの原子番号は 6 である。前述した様に原子番号が低い素材は光電効果を起こしにくく、低いエネルギーから X線・ガンマ線に対してコンプトン散乱を引き起こす。そしてコンプトン散乱の飛跡を計測することによって、入射してきた X線・ガンマ線の入射方向やエネルギーを測定するといった DCRT という装置を我々は提案し、開発しているのである。

また、原子番号が低く光電効果を起こしにくいことは、 素粒子実験の際には有利になる。これは10~100keV程 度のガンマ線バックグラウンドの無い、粒子線センサが 可能であるということも意味しているのである。

さらに、原子番号が人間の等価原子番号の 7.4 に近い ということも利点がある。つまり人体等価検出器として の応用が考えられる。

現在、混合放射線場における人体に対する放射線被曝 線量とその影響を正確に計測する測定器が無いことはあ まり知られていない。

特に宇宙から降り注ぐ放射線に対する人体への被曝は 問題である。1 万mの高度にある飛行機内での被曝、さ らに上空の 400km 程度にあるスペースシャトルやスペ ース・ステーションでの被曝、などを測定することは難 しい。それらの位置での飛翔体に降り注ぐ宇宙からの放 射線の程度は解っている。しかし、それらが総合的に人 体に対してどの様な影響をもたらしているのかは正確に は解っていない、ということである。その原因は明らか であり、一言で放射線と言っても様々ものがあることに 起因している。X線、ガンマ線などの電磁波、中性子線、 陽子線、アルファ線、重粒子線、等である。これらの放 射線は人体に対して様々な反応を起こし、エネルギーを 付与することになる。また、放射線の種類だけでなく、 例えば X 線、ガンマ線に関してはエネルギーが低ければ 原子番号の5乗に比例し、エネルギーが高くなれば原子 番号に比例したエネルギー付与を人体に与えることにな る。つまり混合放射線場における人体に対する放射線被 曝が複雑な問題になるのは、放射線には、様々な種類が あることと共に、その入射エネルギーによって被曝効果 が異なる点にある。

ここで考えられることが一つある。様々な種類、そしてエネルギーを持った放射線のエネルギー付与は放射線を照射される物質の原子番号によって決まる、ということである。つまりこれは人体と同じ原子番号を持ったセンサがあれば、上記のような多種の放射線が存在する混合場において人体に対する被曝効果を本質的に、かつリアルタイムで計測できることになる。そして、ダイヤモンドを素材にしたセンサができれば、この様な計測が可能になる。なぜならダイヤモンドの原子番号は6であり、人体の等価原子番号の7.4とほとんど同じ値を持った素材だからである。

(7)ダイヤモンドは (n,α) 反応を起こす。

現在、D-T核融合炉においてプラズマイオン温度測定を行うためにダイヤモンド・センサの使用が検討されて

いる。これは発生する 14MeV の中性子がダイヤモンド 内部で C-12(n, α)Be-9 の反応を起こし、反応によって生 じたアルファ線を計測するものである。現在、特にロシ アを中心とする他のグループがこの反応を確認しているが、彼らが使用しているダイヤモンド・センサがあまり 良好とは思われないため、良い結果が出されていない。 我々も、今後この為の検出器開発にも関わり、核融合炉 建設の発展に寄与していきたいと考えている。

4. 人工ダイヤモンド・センサの製作

人工ダイヤモンドは様々な種類があり、我々はそれらの素材に対してセンサとなりうるかどうかのテストを行った。今までにテストした素材は、超高圧合成法によって製作された Ib 型(窒素不純物が入っておりイエローダイヤとも呼ばれている)、IIa型(高純度ダイヤ)、IIb型(ボロン不純物が入っておりブルーダイヤとも呼ばれる)、CVD法によるダイヤモンド、である。

これらの素材をテストした結果、センサとして使用で きる物はⅡa 型の物だけであった。 Ib 型は窒素が含ま れているが、この不純物レベルはダイヤモンドのエネル ギー・バンド・ギャップ(5.5eV)の伝導帯の 1.7eV 下に位 置していることで、放射線によって発生したキャリア(電 子・正孔)がトラップされ、信号として取り出せないと考 えられる。Ⅱb 型はボロンが多く不純物として含まれて いる。ダイヤモンドにとって、ボロンをドープしてやる ことによって p 型の半導体ができるが、その濃度は数 10ppm 以上と多すぎ、センサに電極を着け、放射線に有 効な空乏層を作りだそうとしても、空乏層の厚さが広が らず、センサには成り得なかった。CVD 法によるダイ ヤモンドは単結晶になっておらず、発生したキャリアに 対して様々なトラッピング・センターが存在することが 原因で、センサとしては使用できなかった。現在、CVD 法によるダイヤモンドは直径 4inch φ程度の物が得られ ていることから、この製法によって、もし単結晶素材が 作られる様になれば、現在の超高圧合成法にとって替わ るダイヤモンド製造法になり、また、大きなセンサを製 作することができる様になると期待している。

さて、センサとして使用できる物はIIa型の物だけであったが、この素材は高純度ではあるが、少量のボロンが含まれていることが解っている。現在、その濃度を正確に測定する方法が無く、0.1ppm以下であるということだけが解っている。ボロンが含まれているということは、高純度ダイヤモンドと呼ばれているが、高比抵抗のp型素材であると考えるべきであろう。

現在、センサ製作に使用しているダイヤモンド素材は 3×3mm から 10×10mm の面積を持ち、厚さは 100~300 μ mt 程度である。また厚さの精度は 0.5%以内である。この素材をまず、酸や有機溶剤で洗浄した後、片面に DLC(Diamnd Like Carbon)を着け、800℃程度の高温で数時間の水素終端処理を行っている。その後、さらに洗浄を行い、ガラスエポキシの樹脂に糊で接着し、DLC を着けた面からは金を、反対側の面からはアルミニウムを抵抗加熱方式の真空蒸着装置によって着けている。

先程、述べたようにダイヤモンドはp型になっており、 アルミニウム面とショットキーバリアーを形成する。 放 射線に有感な空乏層はこのアルミニウムを着けた直下か ら電圧を印加するにしたがって逆の面に広がっていくこ とになる。

ここで問題になる事は DLC を着けた面である。ダイヤモンドの様にエネルギー・バンド・ギャップが広い半導体は、ほとんどの金属とショットキー特性を持ってしまうが、我々が行っている様に金属を蒸着する前に DLCを着けておくことでオーミック電極を形成することができるのである。実際に構成したダイヤモンド・センサの断面図を図1に示す。

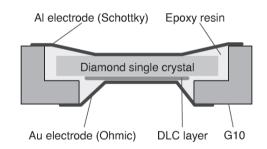


図1. ダイヤモンド・センサの側面断面図

5. ダイヤモンド・センサによる計測結果

我々はⅡa ダイヤモンドを用いて製作されたダイヤモンド・センサに対して様々な放射線源や重粒子を照射するテストを行った。以下にその結果を示す。

(1) アルファ線による測定

Am-241 からの α 線を照射した場合のエネルギー分解能を図 2 に示す。この図で解る様に、5.486MeV, 5.433MeV, 5.389MeV の α 線の分布が良好に検出されていることが解る。また、エネルギー分解能も15.4keV(FWHM)の値が得られている。シリコン・セン

サでの値は 10keV(FWHM)であるから(1)、この結果は ダイヤモンド・センサがシリコン・センサに匹敵した値 を持っていることを意味している(2.3)。

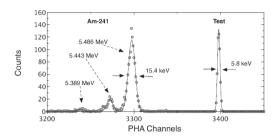


図 2. ダイヤモンド・センサに Am-241 からのα線を 入射させた場合のエネルギー・スペクトル

(2) 重粒子線による測定

アルファ線による測定は、アルファ線のダイヤモンド 内部での飛程が $\sim 20 \, \mu$ m 程度しかないことから、ダイヤ モンド・センサの表面付近のキャリア(電子・正孔)の収 集ができているかどうかを示しているにすぎない。

そこで我々のグループでは、放射線医学総合研究所の HIMAC 重粒子加速器を用いてダイヤモンド・センサを 突き抜けていく様な高いエネルギーを持った重粒子を用 いて、ダイヤモンド内部で発生したキャリアが確実に収 集されるかどうかのテストを行った。

実験では、加速された Fe 粒子ビームをアクリルとアルミを用いて破砕核にしたうえで、同時にエネルギーを変化させた場合に検出された dE×rE スキャッタープロットを図3に示す。この結果はダイヤモンド・センサをdEとし、その背後に7.7mmtの厚肉のSi(Li)検出器を置き、これを rE とした結果である。図から明らかに解る様にダイヤモンドでエネルギーをある程度付与し、rEである Si(Li)検出器で Fe 粒子が止まったことを示す良好なラインを見ることができた。ダイヤモンド・センサを用いてこの様な元素弁別を Fe という高 LET 重粒子に対して得られたデータは過去には無く、世界で初めての結果だろう。

また、この実験において、我々が製作しているダイヤ モンド・センサは、内部で発生したキャリアも良好に収 集されていることを意味していると言えるだろう。

(3) X線・ガンマ線による測定

ダイヤモンド・センサを Cd·109 からの X 線に照射した場合の結果を図 4 に示す。22.1keV の X 線のエネルギー入射に対して、8.0keV(FWHM)のエネルギー分解能が得られている、またガウス分布を示しておらず、低エネ

ルギーに尾を持つエネルギー分布になっている。

通常、シリコン・センサで計測した場合はさらにエネルギー分解能が良く、きちんとしたガウス分布が得られることで、ダイヤモンド・センサで得られた値はシリコン・センサに比べて良い値とは思われないと考えられがちだろう。しかしそうではなく、このダイヤモンド・センサで計測されたエネルギー分布の結果は光電効果とコンプトン効果の両方が影響を与えた結果である。シリコン・センサでは原子番号が大きいため(Z=14)、光電効果が支配的になり、ピークを形成するのであるが、ダイヤモンド・センサは原子番号が6と低いことで、低エネルギーまでコンプトン効果が現れることになり、この様なスペクトルが得られているのである。またこのコンプトン効果を利用できるという良好な結果を示しているのである。

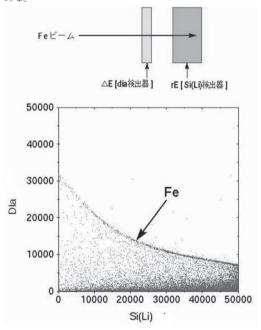


図3. Fe 重粒子の入射エネルギーを変化させ、ダイヤモンド・センサに入射させた場合のスキャッタープロット。(dE(ダイヤモンド・センサ)×(rE(Si(Li)検出器))

また、図 5 に Am-241 からの 60keV のガンマ線を照射した場合のスペクトルを示す。60keV のピークは得られていないが、これは当然の結果であって、数 10keV 程度のガンマ線入射では、ダイヤモンド・センサはコンプトン効果が支配的になるためピークが得られず、ノイズレベルに近いところにスペクトルを持つ様になる。また、

この結果はシミュレーションと一致した予想どおりの結果となっている。

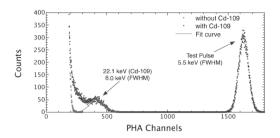


図 4. Cd-109 からの X 線をダイヤモンド・センサに照射 した場合のエネルギースペクトル

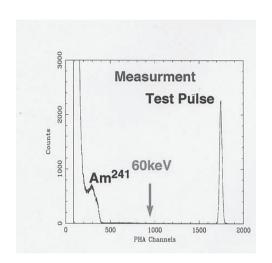


図 5. Am-241 からのガンマ線をダイヤモンド・センサに 照射した場合のエネルギースペクトル

6. DCRT のシミュレーション

ダイヤモンドをコンプトン・リコイル・テレスコープ の素材として用いる最大の利点は、ダイヤモンド素材の 原子番号(Z=6)が小さいことにある。このため、特に低エネルギーでは光電効果ではなくコンプトン効果の影響を 多く受ける。そのため、このタイプのテレスコープとしてはシリコン(Z=14)や、カドミウムテルル(CdTe: Z=50) などを素材とするセンサと比べてコンプトン効果を起こしやすく有利である。

図 6 にダイヤモンド、シリコン、CdTe に対して、エネルギーが異なった入射ガンマ線に対する各効果のシミュレーションを表す。図中では、各センサに対する光電効果(Photo-Electic)、コンプトン効果(Compton)、電子

陽電子対生成(Pair Creation)が発生する確率を表している。図で明らかなように、他のセンサに比べて、ダイヤモンド・センサのコンプトン効果領域が、約10keV~10MeVと広いことが解るだろう。

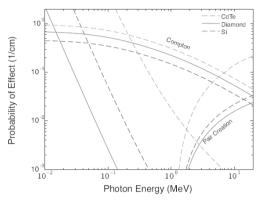


図 6. ダイヤモンド、シリコン、CdTe に入射したガンマ線 の各相互作用の確率

例えば、ダイヤモンド・センサを数枚重ね、X線、ガンマ線を入射させると、コンプトン散乱を続けていくことになり、最終的にエネルギーが低くなった時点で全エネルギーが吸収されることになる。この性質を利用してやると、X線、ガンマ線の入射方向と共に、全エネルギーを決定することができるのである。現在のシミュレーションでは一つの500keVのエネルギーを持ったガンマ線に対して、0.5 度程度の角度分解能(入射角度の決定精度)が得られている。

ところで、飛来方向の入射方向を決定するには、数層に重ねられた各々のダイヤモンド・センサの、どの位置でコンプトン効果が生じ、リコイルした電子の飛跡を明らかにすることが重要である。また、DCRTの検出効率はどの程度であるのかを明らかにすることが必要である。

このため、ストリップタイプのダイヤモンド位置センサを数層置き、その背後に原子番号が大きく、光電吸収を起こしやすく、エネルギーを測定することに適している CdTe センサを置いた DCRT の構造でシミュレーションを試みた。また、シミュレーションでは、モンテカルロ・シミュレーション EPICS code を用いた(4)。

ここで DCRT は、4cm×4cm×0.5mmt からなるダイヤモンド位置センサを 20 層積み上げ、その下に 10cm×10cm×4cmt の CdTe センサを置いた構造とした。この様子を図7に示す。また、この図の中では500keVのガンマ線が、ある層のダイヤモンド・センサでコンプトン散乱し、リコイル電子を散乱させている一つの例を示し

ている。この様な DCRT を想定して、1回のコンプトン 散乱を引き起こした場合だけでなく、多重コンプトン散 乱を引き起こした場合の飛来方向の検出効率のシミュレ ーションを行った。この結果を図 8 に示す。

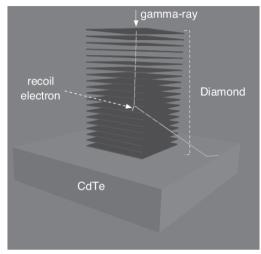


図 7. 今回、シミュレーションを行った DCRT の構造。あるダイヤモンド・センサで 500keV の入射ガンマ線がコンプトン散乱している例を示している。

この図の中で○は入射ガンマ線がコンプトン散乱して CdTe 検出器内で止まり、入射方向と共にエネルギーが 決定できたイベントを表し、●は多重コンプトン散乱して DCRT の外に出てしまったイベントを示している。これはガンマ線がダイヤモンド・センサに衝突する際、まっすぐに進む場合だけでなく、跳ね返ってしまったり、 横に散乱される確率を持っていることによる。また、エネルギーが高くなると CdTe 検出器をも突き抜けていくイベントも生じてくることになる。また、エネルギーが 高くなるにつれて 20 層のダイヤモンド・センサでは足りず、検出効率は下がっていく傾向にある。

今回の条件でシミュレーションした結果、20keVでは 24%、200keVでは 13%の検出効率が得られた。この結果は DCRT が約 10keV 以上のガンマ線に対して有効な検出装置であることを示している。しかし、検出効率はあまり高くない。これはダイヤモンド・センサの下だけに CdTe が置いてある構造になっているからではないかと考えている。検出効率を増加させるためには、ダイヤモンド・センサの側面も CdTe で取り囲むような構造が良いのではないかと思い、現在検討を行っている。

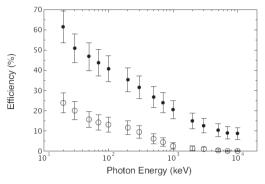


図 8. 20 層のダイヤモンド・センサを用いた DCRT の検出 効率のモンテカルロ・シミュレーションの結果

参考文献

- (1)Knoll, G.F.:Radiation Detection and Measurement, 3rd edn. Wiley, New York(1999)
- (2)「人工ダイヤモンドを用いた放射線検出器の開発」柏木利介、奥野祥二、吉田賢二、日比野欣也、NEW DIAMOND 第50号 vol.14.No.3(1998)21-22
- (3)Kashiwagi, T., et. al.: Investigation of basic characteristics of synthetic diamond radiation detectors. IEEE Trans. Nucl. Sci. 53, 630(2006)
- (4)Kasahara, K.:http://cosmos.n.kanagawa-u.ac.jp/ (2007)
- (5)Hibino, K., Kashiwagi, T. et al: The design of diamond Compton telescope. Astrophys Space Sci(2007)309: 541-544



濃厚粉流体用 FEM ソルバーの開発

轟木 義一* 酒井 俊元**

Development of FEM simulator for heavy particle fluid

Norikazu TODOROKI* Toshimoto SAKAI**

1. はじめに

この地球を含む太陽系は宇宙空間中のダストが集まっ て形成されたものである. また, 今ある地球上の大地の 形状も数十億年という歴史を経て出来上がったものであ り、今現在も堆積・侵食が進行形の状態にある. いずれも 多粒子が集まって出来上がったものであり、粉流体のダ イナミクスとして理解できる. また、地球規模のみなら ず材料工学や、火砕流など身近な災害においても粉流体 が重要な役割を担っている面が多い. 粉流体の解析はい ままで、複雑さゆえに特別な場合を除いてあまりなされ ていなかったが、近年、コンピュータ技術の発達により、 粉流体に対し計算機シミュレーションを行うことが可能 になり、粉流体の研究が盛んに行われつつある. 計算機 シミュレーションを用いた研究では、粒子法、格子ガス 法など様々なアプローチで研究がなされている.(1,2) しか し、これらのアプローチはアプリオリな仮定に基づく近 似モデルを構築し解析を行っているため、現象の再現に 留まっているのが現状である.

一方で、このような粉流体の現象は、流体中の粒子の運動とみなすことが出来る。流体中の粒子の運動を調べるためには、粒子の運動はニュートン方程式を用いて解析を行なう。その際、粒子に働く力を求めるためには、流体に関して流体力学の基本方程式であるナビエ・ストークス方程式を解き、速度場および圧力場を求め、その結果、流体の応力を求めることにより粒子が流体から受ける力を計算しなくてはならない。しかしながら、ナビエ・ストークス方程式は非線形項があるために一般に解析的に解くことを困難である。そこで解析的に解く手法

として従来から、レイノルズ数が非常に小さい状況(非 常に粘性が強い状態)を考え、その状況のみに成り立つ 非線形項を無視するストークス近似を用いて理論的に研 究されてきた。3,4 また、この近似は1粒子だけの運動な ど非常に特殊な場合にのみしか適用できないため、数粒 子以上の挙動を知るためには、ストークス近似に加えて 更に粒子同士の相関が非常に弱いとするオセーン近似を 用いて、粒子間相互作用などを計算してきた.(4) しかし ながら、オセーン近似は、粒子間距離が十分大きいとい う事が前提となっており、粒子同士が近傍にある多粒子 (粉流体) 系のさまざまな現象を説明する事はできてい ない. そこで、本研究では、二次元非圧縮粘性流体中の 粒子間距離が近い多粒子系に対し高速・高精度シミュレ ーションを行う有限要素法 (FEM) ソルバーの開発を行 った. これにより、従来の理論的な研究からは議論でき なかった部分を、シミュレーションを通じて議論を進め ることを可能にした.

本論文では、まず、FEM ソルバーに用いた手法の概要について解説する。さらに、解析例として 2 次元円管の粒子の沈降の運動のシミュレーション結果を示す。混相流の学門分野において、粒子一流体系の挙動、特に多粒子の集団的挙動を丁寧、且つ厳密に分析されることが必要とされており、本研究はその一助となるであろう。

2. 粒子--流体系の基礎方程式

非圧縮粘性流体を支配する基本方程式は、連続の式

$$\operatorname{div} \boldsymbol{u} = 0. \tag{1}$$

および、ナビエ・ストークス方程式

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = -p + \frac{1}{Re} \Delta \mathbf{u}, \tag{2}$$

で与えられる. ここで、uは速度ベクトル、pは圧力、t

*助手 物理学教室

Research Associate, Institute of Physics **クレディ・スイス証券株式会社 Credit Suisse Securities (JAPAN) Ltd. は時間, Reはレイノルズ数である.一方で、粒子に対しての基礎方程式は、重心運動および回転運動のニュートン方程式、

$$m\frac{\partial V}{\partial t} = F,\tag{3}$$

$$I\frac{\partial\Omega}{\partial t} = M,\tag{4}$$

で与えられる。ここで、m は粒子の質量、V は粒子の重心速度、F は粒子にかかる力、I は粒子の慣性モーメント、 Ω は粒子の角速度、M は粒子にかかる力のモーメントである

以上の方程式に初期条件および境界条件を与えること により、流体の速度場、圧力場および、粒子の位置、速度 を求めることができる.

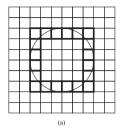
3. 解析手法

3. 1. 離散化手法

まず、離散化手法について説明する. はじめに、粒子が一つある場合についての離散化手法について説明する. 空間を図 1(a)のように同じ大きさの正方形に切っておく. そのとき、考える最小単位の正方形をセルと呼ぶ. セルの中で粒子の境界面が属するセルを境界セルと呼ぶ. それ以外のセルを非境界セルと呼ぶ. 図 1(a)の太線で囲まれたセルが境界セルである. まず、境界セルを探査する. 境界セルは粒子の中心座標と半径が解っていれば求めることができる. 境界セルは二つの切断点とその切断点を通る直線で近似する. 切断点の位置は粒子と考えているセルの辺との交点を用いる. このようにして、図 1(b)のように空間を三角形および四角形に分割することができる. それに対し縮退四角形要素、もしくは四角形要素をそれぞれ用いて有限要素法解析を行えばよい.

粒子が二つ以上ある場合は、一つのセルに二つ以上の 粒子が存在する可能性がある。メッシュを粒子の半径に 比べて十分小さくすれば、一つのセルに含まれる粒子は たかだか二つにすることができる。この場合、二組の切 断点と二本の直線によって現すことができる。図 2 に実 際に本研究で開発したメッシャーを用いたメッシュ生成 例を示す。

この離散化手法は三次元にも容易に拡張できるという ところは、強調すべき点である。三次元の場合は、六面 体要素および縮退六面体要素を用いて解析を行えばよ い。⁽⁶⁾



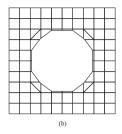


図1:離散化手法. (a) 境界セルの探索(太線で囲まれた部分が 境界セル), (b) 三角形および四角形に分割.

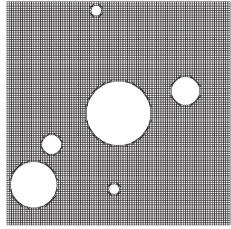


図2:メッシュ牛成例

3. 2. 速度修正法

流体に関しては、ナビエ・ストークス方程式を解き、圧力場と速度場を求めればよいのであるが、圧力場と速度場を同時に求める方法では圧力振動を起こし、数値的に不安定になることが知られている。そのため、本研究では、速度修正法と呼ばれる手法を用いて基本方程式の離散化を行い、有限要素方程式を導出する。速度修正法は、SMAC法に準拠して開発された手法であり、圧力場と速度場を分離して解く分離解法の一つである。何

3. 3. 弱連成法

一般に、固体と液体から成る固液二相流の問題を解く際、時間的に相境界が移動するという移動境界条件の下でナビエ・ストークス方程式を解かなければならない。このような移動境界条件の下の解析には、どのように移動境界を取り扱うかが重要な問題になる。移動境界を取り扱う方法としては強連成法、弱連成法および拘束条件を用いた手法等が用いられる。(8.9) 本研究究では、弱連成法を採択する。つまり、固体粒子と液体の幾何学的連続条件および、平衡状態を満たすように、固・液体の境界条件を修正しながら交互に解き、境界における連続条件・平衡条

件を満たすように解く.このとき, 粒子が移動するのに伴い, 領域内でメッシュを張り替える必要がある.

4. 解析例

本研究で開発したソルバーを用いた例として、二次元円管の粒子の沈降の運動の解析を示す。このとき、レイノルズ数とフルード数(重力加速度を特徴的な長さと時間で規格化したものの逆数)のパラメータを与えておく必要がある。海底での土砂の堆積・粉流体などの他粒子沈降を考えた際、レイノルズ数の領域は

$$10^{-1} < Re < 10^3$$
.

である。本研究では低レイノルズ数領域 Re=1.0 とした. また,フルード数はレイノルズ数とは独立のパラメータ であり,任意に決定することができる。実際の重力を考 慮し、フルード数を

$$\frac{1}{F_{r}} = 5,$$

とした. はじめに、1 粒子の沈降についてシミュレーションを行った. ストークス近似を行わない場合と行った場合の粒子の速度の大きさの比較を図3に示す. ストークス近似を行った場合, 粒子の流体に関する慣性がつかなくなり, 結果的にストークス近似を行わない場合に比べて たらのsec において速度が??パーセント遅くなっていることがわかる. 低レイノルズ数での流体中の粒子系の解析では、今まで、ストークス近似が多く用いられてきたが、この解析結果から、たとえ、低レイノルズ数においても高精度の解析を行うためには、非線形項を無視することはできないことが解る.

次に、2粒子の沈降についてシミュレーションを行った。粒子の散乱を見るために、x成分の初速度をそれぞれ v_x =-2、2m/s とした。図4(a)にそのスナップショットを示す。図4(b)は比較のため、ストークス近似を行ったもののスナップショットである。散乱においてもストークス近似を行わない場合と行った場合で違いが現れており、高精度の解析にはたとえ低レイノルズ数領域でも非線形項を無視することはできないことが解る。

最後に、多粒子(粒子数 18 個)のときの沈降についてシミュレーションを行った。図 5 のスナップショットを示す。多粒子のシミュレーションにおいても計算が破綻することなく、安定に解析を行えていることが確認できる。このことより、本研究で開発したソルバーの有用性が示すことができた。

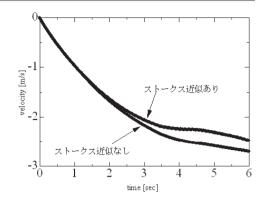


図3:1粒子の沈降における重力方向の速度

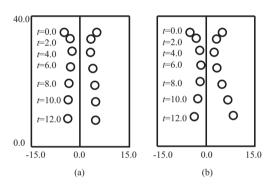


図4:2 粒子の沈降のスナップショット. (a) ストークス近似な し. (b) ストークス近似あり.

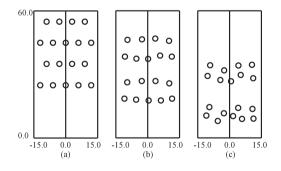


図5: 多粒子(粒子数 18 個) の沈降の様子. (a) =0.0sec, (b) =6.0sec, (c) =12.0sec.

5. まとめ

本研究では粒子流体系の問題を解く手法としての,動 的境界を有する粉流体の高精度・高速 FEM ソルバーの 開発を行った。また、実際にそれを用いてシミュレーションを行った。シミュレーションの結果では、たとえ低 レイノルズ数においても非線形効果が出ることが分かり、 高精度の解析には無視できないことを本シミュレーションで確認した.

粉流体の学門は非常に広範囲な応用が可能な分野でもある。地球惑星科学の領域においては、マクロレベルでは惑星の生成過程・惑星表面上の堆積過程・侵食過程・火砕流の挙動、ミクロレベルでは、マントル中での多粒子沈降及びその結晶成長など、そして医療分野においては、異なる種類の薬の混合による新薬の開発、血液流中の薬の運搬(Drug Delivery System)など広範囲に渡って、本研究の応用により実現が可能であり、その貢献度は大きい。このように医学治療から地球の環境にまで広範囲に影響を与える粉流体の性質を知ることは非常に重要なことであり、それにより火砕流などの災害対策などに応用することも出来えよう。また、「粉流体」はミクロ的な相互作用がマクロ的な結果をも及ぼす「複雑系」の本質と相通ずるところがあり、本研究はその先駆けとなるであろう。

参考文献

- S.Koshizuka, H.Tamako, and Y.Oka, "A Particle Method for Incompressible Viscous Flow with Fluid Fragmentation", Comput. Fluid Dynamics J., 4 (1995), p.29.
- (2) Inamuro, T., Tomita, R. and Ogino, "Lattice Boltzmann. simulations of drop deformation and breakup in shear flows", F., Int. J. Mod.Phys., B17 (2003), p. 21.
- J. Happel and H. Brenner, "Low Reynolds number Hydrodynamics", Nordhoff, (1973).
- (4) 五島洋之, "粘性流体中を落下する粒子集団の数値シミュレーション-集団の回転・分散を支配する要因-", Master thesis, Tokyo University, (1997).
- (5) D. D. Joseph, A. F. Fortes and T. S. Lundgren, "Nonlinear mechanics of fluidization of beds of spherical particles", J. Fluid Mech., 77 (1987), p.467.
- (6) K. Kase, Y. Teshima, S. Usami, H. Ohmori, C. Teodosiu, and A. Makinouchi, "Volume CAD, Volume Graphics 2003", Eurographics/IEEE TVCG Workshop Proceedings, (2003), p.145.
- H. P. Langtangen, "Computational Partial Differential Equations, Numerical Methods and Diffpack Programing", Springer, (1999).
- (8) Bathe, K. J., Zhang, H. and Wang, M. H., "Finite element analysis of incompressible and compressible fluid flows with free surfaces and structural interactions", Computers & Structures, 56-2/3, (1997), p. 193.
- (9) Kalro, V. and Tezduyar, T. E., "A parallel finite element methodology for 3D computation of fluid-structure interactions in

airdrop systems", Fourth Japan-US Symposium on the Finite Element Methods in Large-Scale Computational Fluid Dynamics Proceedings, (1998), p. 31



建築学科草創記

髙木幹朗*

Recalling the Foundation of the Department of Architecture

Mikio TAKAGI*

1. はじめに

本学の建築学科は、昭和40 (1965) 年4月にその第一歩を踏み出した。工学部5学科の中では最も遅い出発ではあったが、それでも既に40年を超えて2014年にはめでたく半世紀の歴史を重ねることになる。

当初の学科設立と教育に情熱を注ぎ、初期の授業を担 当されておられた諸先生方は、すでに全員がご定年で退 官されており、建築学科草創期の状況を今に伝える術は 極めて少なくなりつつある。

数年に及ぶ学科設立準備に奔走され、初代学科長として学科運営に努力されていた谷口忠先生(耐震工学。東京工業大学・神奈川大学名誉教授。筆者の大学時代の構造力学の先生)から、新しい学科づくりに当たって是非ともデザイン系の若い人の手を借りたい、とのご要望をいただいた私は、大学卒業以来勤めていた石本建築設計事務所を辞して、初年度の半ばを過ぎた昭和40年10月に、本学建築学科の助手に身を転じた次第である。

当初は、数回の卒業生を輩出して社会での活躍を見届けて、学科もある程度軌道に乗ったところで、再び設計事務所に戻るか或いは自分でアトリエを構えようかと考えていたことは否めない。しかし、常に新鮮で元気な若い人たちと接しながら、共に学ぶ生活は思いの外楽しくかつ魅力的で、私のそうした思いを徐々に薄らげていくこととなった。その後、紆余曲折はあったものの、とうとう定年を迎えるまでお邪魔してしまったようである。

退職に際して、拙文を掲載する機会を頂いたので、何とか設立時のことを思い出しながら、少しでも学科草創期のことなどを記し残しておきたいと思い、「草創記」なるタイトルで、ここに一筆したためさせていただいた。

Professor, Dept. of Architecture

2. 学科創設時の社会状況

学科創設の昭和 40 (1965) 年といえば、その前年 (1964年) 10 月に「東京オリンピック」が開催され、それに向けたオリンピック関連施設の建設や、開会直前の東海道新幹線の開業。高速道路網の整備などとともに、多くの建築のスクラップ&ビルトが続いていた時期である。そして 1968年4月には、我が国超高層ビルの先駆けとなる「霞ヶ関ビル (147m)」がオープンした。そうした建設ラッシュはさらに、1970年の EXPO'70 (大阪万博) へと続き、正に「岩戸景気」から「いざなぎ景気」と呼ばれた高度経済成長期の真只中である。建設業界ではのちに「黄金の60年代」などとも言われ、「メタボリズム (代謝建築論)」が 60 年代の支配的なイデオロギーであった。

しかも、そうした高度経済成長の産業界を支え推進するのは理工学分野であるとされ、すでに 1950 年代中頃から「理工系ブーム」が訪れ、理工学部には志望者が集中し、暫くは高い受験競争率を見せた時代でもあった。そのため当時の全国の大学では、理工系学部学科の新増設が盛んに行われた。中でも、花形産業の一つとしてもてはやされた建設業界を担うため建築学科も多数創設された。本学科もまさにその時流に乗った開設と言うことになる。

因みに、この時期の大学建築学科新設数 (国・公・私) の推移を見てみると、

1961 (昭和36) 年2校、62年2校、63年3校、 64年5校、65年12校(含・本学科)、66年6校 67年5校

という具合である。

本学科発足時の学生定員は1学年80名であったが、資料を見ると、初年度入学者(第一期生)数は156名で実に定員の2倍である。しかし4年後の卒業生数はというと、なんと88名であり、入学者の半数強に過ぎないという厳しさであったことが分かる。これは谷口学科長の「新

^{*} 教授 建築学科

設の学科を社会に認めてもらうためには、まずは優秀な一期生を世に送り出し信頼を得ることが重要である」という信念によるもので、初期生は可成り絞られたものである。その後も約2倍の定員オーバーが継続するが、二期以降は留年生を含めて180名前後の卒業となった。

3. 横浜キャンパスでは

さて、こうして建築学科が出発はしたものの、当時の 横浜キャンパス内もまた建設ラッシュの中にあり、1号 館から10号館までのキャンパス・マスタープランが RIA (現・株式会社アール・アイ・エー)によって提案され、 私が着任した時には、まさに8・9・10号館が足場に囲わ れて突貫工事の最中であった。今日では1号館(本館) と2号館(講堂)は跡形もなく、3・4号館は1/4にカット縮小され、かろうじて5~10館が往時の姿を止めて いるが、6号館はかつて図書館であった。

そんな訳で、学科発足時にはまだ独自の居場所(現在の8号館や12号館)は全く無く、4号館の1・2階に1室ずつの間借りをしていた。1階の一室には、白濱謙一教授(建築計画、設計製図)、川崎浩司助教授(建築基礎構造)の両先生が、2階の方には谷口忠学科長、堀口捨巳教授(建築意匠、日本建築史)、竹島卓一教授(図学・東洋建築史)と、渡辺要非常勤教授(計画原論、建築設備)という錚々たるたる先生方が、小学校の教員室のように机を並べて居られ、その手狭な部屋の大先生方に混じって、申し訳ないことに私も机を並べることになった。

その頃は、連日何十個となく搬入されてくる多種多様の新しい機材(主に構造・材料・設備の実験用機器類)についての確認・受領と帳簿への記載、そしてその一つ一つに記号のラベル貼付やペンキ記載などを行い、4号館1階の倉庫に整頓収納する作業とともに、授業の準備やアシストに追われる多忙な日々だった。

最初の1年生(第一期生)への授業は、もっぱら前年9月に竣工していた7号館を使ってなされていた。やっと8号館が完成し、4号館からの移転が行われて先生方が研究室に入られたのは、翌昭和41年1月に入ってからのことである。その4月に進級してくる新2年生のために、8号館製図室の製図机や製図板等の準備が大急ぎでなされた。製図机は、アングルを溶接して天板を張るシンプルデザインで(上級生用は脇棚あり)白浜先生が設計された。製図板に傾斜を付けるための三角形の木製の枕と耐水ベニヤ製図板をその上に置き、T定規を使用するものであった。その製図机は非常に頑丈に出来ているため、40年以上を経た今でも4階の製図室で十分使用に耐えている。その後、平行定規製図板を導入することに

なり、傾斜をつけ、かつ模型などの作業のために立てて 固定する器具を設計発注して現在の状態になっている。

近年では、ほとんどの学生が CAD 使用となり、3・4年用の製図机と製図板の多くは廃棄処分されてしまったが、未だに6階製図室で見かけることは出来る。しかしほとんどが本来の用途には供されていないようである。

このように、学生の受け入れ準備はいささか泥縄的ではあったが、当時のカリキュラムでは専門科目 (殆どが必修) は基本的に2年次からになっていたので、これでも何とか間に合わすことができたのである。

4. 12号館のこと

こうして、8号館の $4\sim6$ 階に何とか先生方の研究室も整い、2年次からの製図の授業も出来るようになりほっとしたのも束の間で、次は、翌年の新3年次の学生実験や研究実験のための準備をしなければならない。それは「建築総合実験所」(12号館)の建設である。

とはいうもののまだ建物の構想はなく、どのような実 験をするのかも全くの白紙状態であった。ただ唯一明確 であったのは、まず何と言っても谷口忠先生の永年の夢 であった「構造物用動的試験装置」なる実物大実験が可 能な巨大な装置を設置することだけである。そのため、 建物の設計に先立ち、なによりもまずその機械と基礎の 設計に取りかかり寸法を割り出す必要があった。島津製 作所との機械の打ち合わせはもとより、その巨大な基礎 部分に関しても谷口先生自らが構造計算をされた。その 計算書を持ってこられては私に配筋図を画くように指示 され、さらに様々な位置での(配筋の)断面図の要求が あり、手書きで何十枚となく製図を行った (CAD があれ ばどんなにか楽だったろう)。しかも、先生は帰宅されて からも計算をやり直されることも度々で(当時は計算尺)、 翌朝にはやり直した新たな計算書を持ってこられて、再 びその配筋図の作図を行うなんてことはしょっちゅうで、 一夜で前日の配筋図は没となるのである。設計事務所に いたときには、意匠図は連日徹夜ででも沢山画いていた し、現場でも配筋図を読みながら監理をしていたとはい うものの、まさか神奈川大学に来て自分が配筋図を画く 羽目になろうとは思ってもみなかったことである。

こうして、実験室の目玉とも言うべき「構造物用動的 試験装置」の設計と試験体の搬出入方法・測定位置など の計画が終わった段階で、いよいよその他の構造・材料 実験装置とその計測のためのスペースや動線などを勘案 しつつ、さらに環境・設備関係の実験についても、東工 大の勝田千利先生(後の本学科教授・学長)に相談に伺いながら基本計画のエスキスを行った。ただし私がタッ チしたのはその基本計画のエスキスまでで、実施設計は RIAが行うことになり、その後は一切関与できなかった。 残念ながら、そのときのエスキスの過程に関する資料等 は全て逸散してしまい、いまは見ることができない。

その現場でも、まず最初に「構造物用動的試験装置」 の杭打ちと基礎工事から始まり、それが出来てから建物 に取りかかるという工程であった。こうして1967年6月 12号館が竣工し、4号館の倉庫から機材も搬入された。 その後も基礎部についてはほぼそのままで、新たな試 験装置を交換設置して利用され続けている。

5. 当時の学内状況について

第三期生を送り出した 1970 年に開催された大阪万博が一つの区切りのように、さしもの 1960 年代の高度経済成長にもいささか翳りが見え始めた。それまでの華やかな成長・繁栄の背後で蓋をされてきた様々な矛盾(自然や生活環境の破壊・汚染と公害問題など)が徐々に噴出し始め、3年後のオイルショックによってそれまでの高度成長が終焉を迎え、一変して実質マイナス成長になってしまう。途端に建設業界は不景気風が吹き荒れ、第六期生達からの就職は極めて困難な時期に突入してしまった。せっかく順調に就職先を開拓し、卒業生達もどうやら社会で認められ活躍し始めた矢先のことである。

この頃の学内状況に目を転じると、「1968 (S. 43) 年1月22日、3号館前で学生が『原子力空母エンタープライズ佐世保寄港阻止支援カンパ』活動を行っていたところ、これを職員が学生の政治活動などを規制した『学内規定』に基づき制止したところ、学生達は強く反発しやがて全学をおおう紛争へと進展し、その後の学内民主化の発端となった。」(「神奈川大学50年小史:紛争の発端と経緯」)とある。以来、新たな「学長選考規定」の制定とそれに基づく新学長の選出・就任(1977年4月)までの凡そ10年にも及ぶ民主化への試行錯誤が続けられた。

そうした中、1968年2月に「教授会の構成を専任講師 以上に改正」があり(それまでは助教授以上)、私は運悪 く(?)その翌年4月に専任講師〜昇任してしまったた めに、突然連日連夜にわたる教授会やら団交やらに出席 せざるを得なくなってしまった。当時の教授会は全学教 授会であって、学部学科に関係なく全教員による会議で あった。そのお陰で、他学部の先生方とも隣り合わせに なり、親しくお話しする機会を得ることができた。あの 「ドン・キホーテ」の最初の全篇完訳刊行をされた、著 名なスペイン文学者の会田由先生とも、たまたま隣り合 って色々とお話ししたことなどが記憶に残っている。

そうした闘争の中の一つのテーマとして「カリキュラ

ム改革」があった。始まって4年ばかりの建築学科でもその基本方針に沿って大きく変更せざるを得ず、大わらわで1969年3月に「新カリキュラム」として改訂・決定した。その大きな改訂点は、それまで専門科目の殆どが必修科目(80単位)であったのを、約半分の40単位とし選択の余地を広げたこと。同時に、卒業研究における、「論文」と「設計」の両方とも必修から、いずれかの選択必修に変更したことなどが上げられる。

その後も、「大学立法」反対無期限ストの決定と全共闘による本館と3号館の封鎖。教職員による封鎖解除。以後も部分的封鎖の繰り返し。大学による休講措置と学外教授会。教学執行部によるロックアウトの強行と解除などなど。ついに1975年度には学年末試験のレポート切り替え措置がとられた。建築第八期生が4年の時である。

また当時の学生運動のスローガンの一つに、「産学協同反対」というのがあった。今日では大学に「産官学連携推進室」が置かれ、むしろ積極的に連携・協同することが奨励されている。こうしたことを見るにつけても、隔世の感がある。

6. あるコンペのこと

そうした学生運動の対応に追われる中、落ち着いて製図室で設計を楽しむことも出来ない学生達に、設計の面白さを少しでも体験してもらおうと思い、少々無謀ではあったが、1971年に研究室で国際コンペにチャレンジすることにした。対象は「NEW NATIONAL HEADQUARTERS FOR TANU, AT DAR ES SALAAM, TANZANIA」である。要求は、基本的に TANU (Tanganyika African National Union)国民党本部、国民議会議事堂、国民文化センター からなる延面積約30,000㎡という大層なものである。締切は12月31日消印までであった。

6月中頃に登録料 US \$20 を送金し、要項が送られてきたところで細かな設計条件について共通認識を持つために、みんなで翻訳作業やらダイアグラムの作成などを行い、その後送られてきた質疑応答書についても同様な作業を行い設計要件への理解を深めた。メンバーはゼミ生(第四期生)を中心に希望する1年生まで含め10数名だったと思う。「ヘイ・ジャンボ!」、「スー・ジャンボ!」などの現地語の挨拶が飛び交って楽しい作業であった。

ところが、エスキスやスタディ模型づくりなどいよい よこれからという10月31日に、教学執行部による突然 のロックアウトが行われ、全資料は研究室の中に置いた ままで誰も学内に立ち入ることが不可能になってしまっ た。やむなく学生達と街の喫茶店などに集まり、いつま で続くか分からないロックアウトなので、コンペを諦め るかどうかの相談の日々が続いた。諦めかけた 11 月 19 日にロックアウトは解除されたが、20 日間の空白は取り戻すべくもなく、それからの作業の大変さは言うまでもない。手画き図面を青図屋に、模型写真フィルムは DPE屋へと走り、学生達と大晦日の郵便局に駆け込み、除夜の鐘を聞きながら帰宅したのも今となっては良い思い出である。結果は駄目だったが、なによりも、もの造りの熱気や楽しさを味わってもらえたと思っている。いまでも時折、卒業生と当時のことを語り合うことがある。

7. 地域との関わり

1985 年秋には、「建築学科創設 20 周年記念」を盛大に 祝うことができた。その 1980 年代後半には、いわゆる「バ ブル景気」の時代を迎え、再び就職も引く手あまたの時 代を迎えていた。この頃の卒業生諸君は本当に幸運な巡 り合わせであったと思う。

研究室では、1976年のゼミ(第九期生)から数年間にわたり、当時へドロで汚れ埋め立てられようとしていた横浜市内の河川(多くは運河)に注目し、サーヴェイとアンケートや聞き込み調査を実施しながら、「横浜の運河一都市の中の河川」というテーマで討論を行っていた。これは後に、1987年度から3年間にわたる「横浜市地域研究費補助金」の交付をうけて、「横浜の『親水空間』一運河から見た横浜の都市構造とその景観」という成果報告書(横浜市総務局行政部教育課)にまとめることが出来た。このことに関しては、横浜市大での講義や横浜シティガイド協会のガイド養成講座などで何度かお話しする機会を与えられた。

そうしたこともあり、またそれまでのいわゆる「箱物」造りが一段落した時期ということもあって、世は利便性を求める物的な環境づくりから快適な生活環境(生活景)の創出へと目を転じつつあり、1980年代後半からは、横浜市や神奈川区からの街づくりに関わる調査と基本構想策定などの委託を受ける機会が多くなった。

私としても、せっかくの知識や技術の蓄積を社会に還元できるひとつの良い機会であると捉えていた。しかし大学側には、当時そうした受託などの受け皿に関する十分な態勢が整っておらず、市長と学長との契約書作成や金銭の管理など余計な仕事がいつもついて回っていた。

その委託業務の幾つかを列挙してみると、 ・「新子安駅周辺地区整備構想調査報告書」(神奈川区

1988.3) ・「区の魅力づくり実施計画策定調査報告書」 (都市計画局都市デザイン室 1988.3) ・「東神奈川駅 周辺地区整備基本構想策定調査報告書」(都市計画局再開 発課 1989.3) ・「よこはまビューポイント整備基本構 想策定調査報告書」(神奈川区 1990.3) ・「公共モニュメント調査報告書」(建築局 1992.3) ・「東横線地下化に伴う反町駅周辺等のありかたに関する調査報告書」(神奈川区 1992.3) などがある。

「東横線地下化」に関する調査報告書は、東急東横線が地下化されるという情報を受けて、神奈川区がいち早くその跡地利用についての指針を示そうそうとして私の研究室に調査委託したものである。この報告書を下敷きにして、更に1996年11月から1998年3月までの約1年半の間に7回の「東横線上部利用懇談会」がもたれ、様々な角度からの検討と計画に関する具体的要望がだされた。そのメンバーは、横浜国大教授と助教授各1名、横浜市企画局長・緑政局長・道路局長・都市計画局長・神奈川区長、東急交通事業部工事部長、周辺地域の自治連絡協議会会長、その他私を含めて総勢16名であった。最終的には、「東急東横線地下化に伴う鉄道上部用地の利用に関する提言書」(平成10年3月)としてとりまとめられた。

現在、東横線はすでに東白楽駅を出てすぐに地下に入り、横浜駅の最下部を通って「みなとみらい線」となり、元町・中華街駅に至っている。さて、東白楽駅から横浜駅までの間の跡地は、現在、基本的には報告書の提案通り「緑道」としての整備工事が進められていが、まだ工事の囲いがしてあるので一寸目には何をしているのか分かりにくいようである。しかしやがては緑道によって、神奈川工業高校脇から反町駅前の国道1号線を跨ぐ高架の旧東横線ガード上を通り、反町トンネルを抜けて横浜駅付近まで散策が出来るようになるだろう。

8. ヨーロッパ建築研修旅行のこと

在職中には、中断しながらも計10回の「ヨーロッパ建築研修の旅」を企画・実施した。企画のみで同行しない場合もあったが、春休みの2~3週間で極めて効率良く建築・街・都市を巡る旅で、移動と宿のみは一緒で、日中は殆どが自由行動という旅である。デザインが生まれ出る基盤となる人々の生活や文化を体感することが重要で、参加した諸君には極上の栄養素になったことと思う。08に会うと、今でも良くその時の楽しい思い出話になる。

9. おわりに (謝 辞)

昨今の大学を取り巻く状況はますます厳しくなる一方ですが、これからは外にあって、神奈川大学の発展を見守っていきたいと思っています。長いようでもあり、あっという間のことにも思える40数年間でした。この間には、非常に多くの教職員の方々にお世話になり、末筆ながら心より御礼申し上げます。 有り難うございました。



「神奈川大学に来てよかった」

三相乳化の発想から基礎研究・実用化への路程

田嶋 和夫*

"Thank Heaven, Kanagawa University where I have been auspiciously"

The starting point of newly-invented technology on three-phase emulsification and its development to the industrial applications

Kazuo TAJIMA*

停年を迎える時になって、急にこれまで長い間無意識に過ごしてきた諸事に思いを新たに感じる様になるのは人の業であろうか。それは「停年」と言う言葉が物理的に人生の転換を求めさせることになるからなのかも知れない。急に身辺整理をしながら、なんとか切り抜けてきた半世紀にもおよぶ過ぎし日をそれこれとなく哀愁の思いに心を浸らせることになる。私は「界面化学」の研究を一途にやってきた。現在、ナノケミストリーとかナノテクノロジーと言われている分野で、言葉や研究系は異なっていても自己組織体の形成や現象についての研究対象はほぼ同じである。半世紀も過ごし、消えかかっている足跡を振り返ってみられるのもこのような執筆の機会を与えて下されたお陰であり、工学研究所所報編集委員会に深く感謝いたします。

人に会い、「もう来春は停年です」というと、よく「まさか」、「ほんとう?」と言われる。私はまだ年甲斐もなく小僧子に見えるからであろうか。それもそのはずである。私がまだ精神的に小僧子で居られるのも、学生時代の直接の恩師が90歳半ばを過ぎてもまだまだ御健勝で矍鑠としておられるからに違いない。私の論文や学会発表などをみて、未だにコメントを頂けるのにはこの上なく光栄であると同時に、学に職を求めた者の責務であり、恒に研究に対する緊張の連続である。この恩師からの言葉として「ゼロオーダーの研究」をやるようにと研究に対して教えられた。研究結果について、「・・・だと仮定すれば」説明ができるというのはまだその研究が足りないからであると教えられた。また、闊達な学兄達か

らは、「教科書に残る研究をやるように」とよく聞かされた。その先輩達は残念ながら若くして他界してしまっている。でも幸いにして、私が行った「界面活性剤の吸着」の研究は今でも界面化学の多くの教科書に取り上げられ、利用されている。

私が一番大きく影響を受けたのは、アメリカ国立 衛生研究所 (National Institutes of Health, NIH) に 1970年代に2年半程招聘され、また神奈川大学に赴 任 (1985年4月) して暫く経った 1992年から1年 間 (Research Scientist) 長期海外出張として、Prof. Norman Gershefeld の研究室 (Biophysics of Biological Membrane) で過ごしたときである。いろいろな国から 研究者が集まってきていた。その様な研究室で「独創的 な研究」をするためにはどの様にすればよいのかについ てよく話し合った。大変気さくな人柄の Norman は「夜 空に星座を描く如く, ある現象と別の現象をいかにした ら関連づけられるかだ」と言っていた。この言葉は印象 的に心に残った。夜空に輝く一つひとつの星が真夏の 蠍座になり、冬のオリオン座となり、一つの組織体とし て描ける創造力はロマンであり、夢である。模倣や後追 いでない、独創的な研究はまさに良く似ている。テレビ でプロジェクト X と言う放送番組があった。その中で、 研究開発で行き詰まったときに解決する手口は、発想の 転換や別の現象からのヒントや類似性が解決への糸口に なったという場面を何度か見たことがあった。正にこれ だと思い, 大変興味深く感じた。

新規な研究開発が成功するかどうかは研究費や研究施設も大事であるが、それよりもモット大事なのは研究経過や研究結果について忌憚のない論争ができる同僚が居てくれたことである。専門的な観点から互いに、妥協が

* 教授 化学教室

Professor, Laboratory of Chemistry

できるまで議論を積み重ねることである。一つの実験結果を解釈するために3~4日も泊まりがけで議論したことがあった。生体膜と同じで、生理的に温和なリン脂質二分子膜で作ったベシクルは安定性がないために、そのままではどうしても実用化することができない。我々はリン脂質ベシクルがどうして長期間安定に保持できないのかということについて、その原因となる新しい現象を発見した。その現象はベシクルの不安定化の説明として認められ、また安定化させる方法も見出している。このように、自由活発に議論し合う研究環境の中から新しい乳化技術の「三相乳化法」を創成させることができた。

牛乳のように油を水に安定に分散させた状態がエマルションである。現在,一般的には油を水に分散させてエマルションにするには石鹸などの界面活性剤を使って作られている。このようなエマルション状態は医薬・農薬の剤形に,また香粧品や各種工業における生産工程などで極めて広範に利用されている。しかし,油と水の界面に界面活性剤の分子がどのように吸着していると安定なエマルション状態になるのかは分子論的にはなかなか解決されていない。その難しさは、例えば液体の界面に存在する単分子状態を観察するにしても現在の科学技術でもまだ大変困難である。私は40年も前に水面や油と水の界面に吸着する界面活性剤分子を直接測定し、理論的解析を行った。しかし、実際のエマルション界面はミクロンやナノサイズであるために今後の更なる研究が必要であろう。

さて、話を三相乳化に戻そう。NIH で生体二分子膜 の研究をしているときに、赤血球などの生体粒子は互い に接触をしても、簡単に合一をしないと言う現象に気づ き、その不思議さに強く惹かれた。最近ではよくテレビ で「あなたの血液はドロドロですね」として目にする現 象である。ドロドロになった赤血球はまたすぐにバラバ ラになり、初めのような1ッコ1ッコの粒子状態に戻 れる。しかし、この様子は石鹸のような界面活性剤分子 (両親媒性分子とも言う) で油を乳化させていた従来形 の粒子現象と全く異なる。界面活性剤のエマルションは 単分子膜で油滴粒子間の安定性を保持している。そのた め、ドロドロな赤血球のように集まってしまうと油滴粒 子は直ぐに融合をして大きな液滴になってしまう。この ため、界面活性剤のエマルションは粒子状態が大きくな り、結果として油相と水相に分離してしまう。そこで、 私は親水性の生体二分子膜状態で油を安定に乳化させる ことができないのであろうかと直感的にイメージした。 親水性の二分子膜粒子が油水界面に付着固定することが できるとはまだ誰も考えていなかったし試みもされてい なかった。

レシチンなどのリン脂質は水に溶けないために、水 中で自己組織体の一種である閉鎖小胞体(ベシクルと 呼ばれる) を形成する。中空で直径が 20~50 nm 程の親 水性の球状粒子になる。このベシクルの内相に医薬品 を封入させることによって薬物運搬体 (Drug Derivery System)として現在でもその医薬品への応用研究が盛 んに行われている。所で、私はNIHから戻り、1994年 頃から研究室の今井洋子さんと共に学生達とリン脂質の 生体膜物性の研究をすることにした。リン脂質生体膜と 油脂との相互作用と安定化はそのまま「三相乳化」とい う大きな開発研究のゴールに至る道に繋がるとはまだ全 くその時点では気付いていなかった。共同研究者の帝京 大学の越沼征勝先生、名古屋市立大学の中村昭雄先生を 交えて、今井洋子さんと4人で合宿をしたり、相互訪問 をしたり、数年に亘って ESR, XRD, DLS, TG/DTA, 固 体 NMR、SEM など多くの研究手段によって得られた現 象について、データーを一つひとつ積み重ね解析をして いた。

多くの現象が解析されたと思うとまたその先が見えなくなることも多々あった。1グラムがウン万円もするような合成リン脂質(輸入品)を5グラム,10グラムと使って脂質に対する油脂の可溶化状態を徹底的に研究を重ねていった。ある輸入商社から日本に輸入するある種の合成リン脂質の9割は神大が使用していると言われたことがあった。でも幸いにして、これらの研究は多くの学術論文として発表をしただけでなく、日本油化学会から学会賞を受けることができた。

そして、1997年頃であった。私はこのとき発想を逆 転させて、親水性ナノ粒子が疎水性油滴表面に付着固定 させることができるのであれば、油滴は水中で安定化さ れるはずであり、新しい乳化状態が作れると推測した。 ベシクルを用いて親水性の自己組織体が水中の油滴表面 に付着固定化が起こる乳化法は誰も考えが及ばないこと であった。前述した NIH の Prof. Norman Gershfeld に 教えていただいた夜空に星座を描くような感じが直感的 に閃いたことを今でも忘れることができない。リン脂質 の二分子膜状のベシクルナノ粒子は工業的エマルショ ン形成に応用ができるのではないかと気づき検討を始め た。しかも、ナノ粒子の物性化学である「コロイド化学」 の理論からはナノ粒子の表面への付着を理論的に予測す ることができていた。ただそれは、微粒子が水中で不安 定化して互いに「凝集」をしてしまい、微粒子分散系が 大きな固まりになってしまい、沈降する時に起こる作用 力として理解されていた。

大地にリンゴが万有引力によって引きつけられるよう に、ナノ粒子とミクロンサイズの油滴粒子間にはファン デルワールス引力が作用することが判っている。一方, 静電気的斥力や構造的斥力も同時に働くが、引力が勝る 条件が可能であれば、ナノ粒子は図1のように油表面に 付着固定されうると理論的に予測された。そして、日夜 この理論の予測の基で乳化系の研究を続けた。また、そ の一方では理論的予測モデルが実際に起きているかどう かを調べるために電子顕微鏡で随分いろいろ工夫を凝ら して、多くの乳化系について観察を行った。そして、つ いに電子顕微鏡でその乳化状態(写真1)を実際に観察 することができた。電子顕微鏡の写真は撮るのに大変困 難であった。しかし、予測通りの写真が撮れたときは本 当に嬉しかった。さらに一方では、リン脂質のような高 価な薬剤ではなく、モット安価な硬化ひまし油誘導体で も同様のベシクルを水中で形成することを我々はすでに 先の研究で発見していた。そこで, リン脂質より何百分 の1も安価な「硬化ひまし油誘導体」でも乳化が可能 になることを見出した。従って、乳化粒子は大地にリン



図1 理論的予測モデル

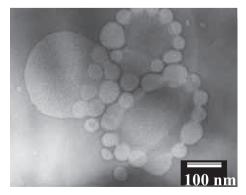


写真1 電子顕微鏡によるエマルション粒子

ゴも落ちれば、ナシも落ちるようにナノ粒子の化学種には依らない現象であることを実験的に証明したことになる。このような現象は三相乳化の基本的物性であり、特許庁の調査官も大変強い関心を示してくれた。そして、特許の内容も物質ではなく乳化の作用力という概念で承認してくれた。

さて、学生教育としての講義や研究指導でも同じである。個々の学生が本来持っている自己の知識がどの様な資質であるのか。その資質を掘り当ててそこから新しい専門的な知識を付与していかないと、決して学生のための教育や研究指導をしていることにならない。学生達と我々との間に、互いに自由に議論ができるような雰囲気と人間関係を如何に構築するかに随分心掛けてきた。例えば、富士見研修所にも毎年研究室で3~4泊のゼミ合宿で春・夏の2回、それに大学院合宿として北里大岩橋ゼミ、武蔵工大小林・高橋ゼミ、慶応大小山内・朝倉ゼミ、東理大河合ゼミなどの大学院生間のゼミ合宿「尾花の会」も行い、学問研究のみならず人格の向上にも心掛けた。これが学生を教え育てる事の本質であると思っている。

富士見研修所は学生時代に登攀した南アルプスの山脈を眼前に望み、背に八ヶ岳の霊峰を抱く富士見高原は雑噪の都会での疲れを癒してくれる大変素晴らしいところである。合宿ではついつい開放的になり、学生には負けたくないので時には2時3時まで杯を交わし、学生には迷惑だったかも知れないが、人生観や初恋の話など楽しい場がいつもあった。管理人の伏見さんには先代から随分とご厄介になった。研修所の皆さんからの暖かい歓迎のお陰で、学生達にも研修所でのゼミは忘れることのできない学生時代の良い思い出になったと思う。

我々の研究室で開発をした「三相乳化法」が実用に要せる形として社会に発表したのはテクニカルショウヨコハマに本学の産学連携推進室から出展依頼を受けた2002年2月であったと思う。その時、「界面活性剤を使用せずに三相乳化法はどんな油剤でも安定に乳化することができる新規な乳化技術」ということで、会場での来訪者は大変な関心を持たれ、展示ブースには人が一杯であった。特に、シリコン油や炭化フッ素油を始め、石油系油剤や植物油がたった1種類のナノ粒子で安定に乳化させることができるという夢のような乳化技術のため、大変強く関心を持ってもらえた。それは、界面活性剤による乳化技術しかない現状では寧ろ不思議な現象であるとしか思えないからであった。

一方,「三相乳化法」を本学の産学連携推進室から特許申請する際、理事会も我々の研究内容に大変高い関心



写真2 産学連携プロジェクト記者発表会の光景 理事長の挨拶、学長、常務理事、工学部長が同席

を持っていただき、数回に亘り報告説明をした。その内容は「環境適応型の乳化技術で、エマルション燃料、香粧品、農薬、潤滑など」、極めて多岐に応用が可能な基本的な乳化概念であった。特に、エマルション燃料は従来の界面活性剤型と全く異なるので、大学が実用化に向けての開発研究に取り込むことを推進してくれた。そのため他企業との連携を必要とするので、2004年7月に、大学内に「三相乳化開発プロジェクト」を作った。大手企業の協力の下で、積極的にエマルション燃料の調製、性能、燃焼性などについての研究データーを重ねた。この時期は大変多忙で、学会活動で地方に出張中でも、またゼミで富士見の研修所にいても何回となく大学から緊急の電話があり、それに対応をしたことが今は懐かしく笑い話として思い出される。

幸いにして、これらの努力は2006年7月12日に、理事長、学長、工学部長、さらに協力企業も参列して、公開実験を入れて「大学として」プレスリリースをすることができた(写真2)。また、その年の8月には学内外の方々に向けて一般公開の講演会も行い、「三相乳化法」の特徴を報告をした。NHKやTVKテレビのニュース、NHK国際ラジオ、さらに新聞・雑誌などで記事として大変多くのメディアで報道してくれた。お陰で国内外からの社会的反響も大変大きく、その対応の時間に益々追われる日々が続くことになった。

そして、ついに 2007 年 8 月 6 日に、神奈川大学は大学の会社として「未来環境テクノロジー(株)」を設立した。いよいよ大学が開発した環境適応型技術として実用化に向けて社会に漕ぎ出すことになった。図 2 は将来への発展を期待する成長を表すシンボルマークである。

今年の8月19日、新会社の海外初仕事として韓国で



図2 大学が設立した会社のシンボルマーク

C 重油エマルションの燃焼テストに出かけていた。丁度 その翌日に FM 横浜から、朝 8 時 30 分から「ナマ放送」で神奈川大学の会社設立の目的とエマルション燃料が如何に環境適応型燃料であるかについてインタビューの依頼があった。私は韓国・ソウルで自動車の中から携帯電話で、小林(孝)、田口、今井の諸氏に囲まれた中で、幾分上ずった声で応対した。そして、私は神奈川大学が如何に地球環境の保全と温暖化防止に努力しているかを強調した。これらも今となっては大変楽しかった思い出である。

科学技術は企業で実際に携わっている研究者や現場の 人たちがその新規な技術の有用性について判断すべきで あって、決して直接関わりのない人たちにはその技術の 優劣の判断はできるものではない。しかし、神奈川大学 の一研究室がオリジナルな科学的発明として提出した三 相乳化技術を大学は積極的に支援し、大きく育ててくれ た。その上、JSTやNEDOからの呼びかけも度々あっ たが、三相乳化法およびエマルション燃料の基本特許は 大学で全て知財権を確保するという観点から現在まで大

学の管理下で守ってくれている。神奈川大学が研究の推 進に全面的に支援をしてくれたことは我々にとって幾 倍もの力となっている。私が前に居た大学(63歳停年) ではもうとっくに停年となっている歳である。その時が 過ぎてからでもまだ研究の自由とチャンスを与えてくれ て、日々研究に携わっていられることに、私は神奈川大 学に心より感謝申し上げる。それと同時に, 研究・教育 を一つの形になる最後まで、大学がご支援をして下され ていることは本当に腹心より「神奈川大学に来てよかっ た」と実感する次第である。研究の成果で学術論文を書 くことは楽しい。学会で報告するのも楽しい。だが、オ リジナルな研究を特許化するために研究情報が漏洩しな いように機密にしておくことは、研究者としてまた大学 人として大変苦しいことでもあった。しかし、これらも また貴重な体験で人生を豊かにしてくれるための社会的 教育として喜んでいる。

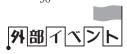
最後に、私は次の3点を「三相乳化法」の考え方ができるまでに思った。それは① 持続力。昔は「石の上にも3年」で済んだかも知れてないが、私には10年もの研鑽が必要であった。② 執着力。技術の完成に向けて内発的目標と外発的評価が必要である。失敗や無駄道が進歩や発展のチャンスを作ってくれた。③ 想像力。空の星から雄大な星座を瞑想するように、自然現象のハイブリット化に依る新規性の想像であり、追従の忌避を忘れないことである。

鮹に骨なし、海鼠に目なし。それでも活発に動いている。自分の学生もあと少ない。

だけどやれることには頑張りたい。

謝辞 本稿を書き終えるに当たり、長いこと研究推進のためにご協力をして下された学校法人神奈川大学の関係者、教職員御一同様並びに研究で苦楽を共にしてきた今井洋子女史を初めとする研究室の関係各位に心より感謝申し上げます。また、研究推進に快くご協力下された関係企業の皆様方にも深く御礼を申し上げます。

後書き:2007年10月19日 神奈川県松沢成文知事が環境対応型「エマルション燃料」の技術開発視察のため、神奈川大学が設立した未来環境テクノロジー(株)に来訪。



第 22 回国際電気自動車シンポジウム& 展示会への出展報告

新中 新二*

A Report about Participation of EVS 22

Shinji SHINNAKA*

第 22 回国際電気自動車シンポジウム&展示会(The 22nd International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exposition, EVS22)が2006年10月23日(月)~28日(土)の間、パシフィコ横浜で開催された。EVS22は、電気自動車に関する国際会議とモータショーとを兼ねた国際的会合であり、この種の会合としては恐らく世界最大であろう。日本での開催は10年ぶりである。ショーには、日本勢としては、トヨタ、日産、ホンダなどの主要な車メーカに加えて、関連独立行政法人、省・県・市、及び大学4校が参加した。

電気自動車駆動制御技術のトップラナーである神奈川 大学としては、地元横浜での開催を見逃すことはできず、 当初より、国際会議とモータショーの両面での参加を企 図した。国際会議の参加は研究室自力でもちろん可能で あるが、モータショーの参加は組織力が不可欠と考え、 法人側の全面協力を得て準備を進めた。周到な準備が奏 功し、会場中央部に36平米の展示スペースを確保するこ とができた。

展示前日には試作電気自動車2台(新1号、新2号)、 B1パネル4枚、配布資料を搬入し、夕方まで設営を完了した。右の写真1が展示ブースの全景であり、写真右が新1号、左が新2号である。新1号、新2号は、それぞれ、駆動モータとして誘導モータ、永久磁石同期モータを利用したセンサレス電気自動車である。本コンセプトの電気自動車の開発成功は、少なくとも国内では神奈川大学が最初である。会場では、東芝、日野自動車が2番手として同類の展示をしていた。また、明電舎が3番手として技術発表を行なっていた。

展示説明は、学生教育の観点より、当学科の学部生・ 院生15名に、授業に支障がでないようにシフトを組み、



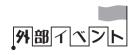
写真1 展示ブースの全景



写真2 新2号の展示風景

当たらせた。写真 1、2 では、赤いジャケット (デザイン は教育上の観点から学生に行なわせた) を羽織っている のが担当学生である。約300名の方が名刺を置いていかれたように記憶している。

最後に、この場を借りて、産官学連携推進室・田口室 長を始め、本展示に尽力をして下さった方々に対し慎ん で御礼を申し上げる。



展示会に出展して

一テクノトランスファーかわさき—

山口 栄雄*

A brief report on Techno-Transfer Kawasaki exhibition

Shigeo YAMAGUCHI*

1. 報告

平成 18 年 7 月 12~14 日に川崎市で開催された、テクノトランスファーかわさきに研究室から出展を行った。 展示会の規模は比較的小さく、出展者は地元の中小企業を中心に、他に数校の大学が見られた程度であった。

我々の展示ブースには何社かの企業の方に関心を持って頂いたが、具体的に共同で何かを推し進めるような形には至らなかった。しかし、このような展示会は、大学の研究成果を世間にアピールする意味で重要な役割を担い、大学にとって大きな宣伝や貢献になると思われた。

これまでの出展について、神奈川大工学部に関する限り研究室や分野は偏っている感がある。展示内容をもっと充実させ、教員が意欲的に出展に協力するようなシステムを構築することが、今後の産官学連携には不可欠であると思われる。

参加教員にとっては、学期期間中の出展となれば講義 や会議が開催期間と重なり、実際には負荷が相当大きく 当日ブースに立てない事もある。その場合には、複数の 大学院生や卒研生に活躍してもらうこととなり、アルバ イト費用等がそれなりに必要となる。このような負荷を 越えて、出展へのモチベーションを生み出すための方策 として、産官学連携推進室からの研究費(アルバイト費 以外)等の援助と教職員の連携・協力をお願いしたい。 これによりさらに産官学連携が推し進められる事が期待 でき、多方面へのさらなる発展に繋がると思われる。例 えば、展示会への参加学生は補助の役割を越え、卒業す る彼らにとって参入していく社会との接点にもなり経験 ともなる。実際、展示会に参加し、企業の方々と議論を 行った学生は全員、参加してよかった、勉強になったと 口に揃えて言う。このように、展示会に参加すること自 体には深い意義があるのである。

最後に、これまでの様々な展示会出展に関する産官学 連携推進室による報告書の作成および公表を、われわれ の認識と理解を深めるためにも、強くお願いしたい次第 である。



写真1. 展示会開会式の模様



写真2. 神奈川大学の展示ブース

2. 謝辞

本研究の一部は、文部科学省ハイテクリサーチセンタープロジェクトの援助による。

*教授 電子情報フロンティア学科

Professor, Dept. of Electronics and Informatics Frontiers



回回 質量分析装置 AXIMA-CFR plus 及び JMS-T100CS

横澤 勉*、 小野 晶*

Mass Spectrometer AXIMA-CFR plus and JMS-T100CS

Tsutomu YOKOZAWA* Akira ONO*

1. はじめに1

平成19年度、工学研究所「質量分析室(23-B111)」に2台の質量分析装置、AXIMA-CFR plus 及びJMS-T100CS、が設置された。ともに最先端装置であり、かつ、一方の短所を一方の長所が補う相補的組み合わせである。両者が並置されたことにより工学部及び研究所の研究基盤が飛躍的に充実した。以下にこれらの装置を概説する。

2. レーザーイオン化飛行時間型質量分析装置 AXIMA-CFR plus

これまでの質量分析装置は分子蒸気に高エネルギーの電子流を当て、電子衝撃の結果を質量/電荷 (m/z) に基づいて分離された正イオンのスペクトルとして記録していた。しかし、このイオン化法では低分子はばらばらに分解し、測定化合物の分子イオンピーク (化合物の分子量に相当するピーク) は小さいか、またはほとんど測定できないことが多い。まして分子量の大きいタンパク質のような生体高分子や合成高分子の分子量を測定することは不可能であった。そこで種々のイオン化法が開発され、その中でもレーザーイオン化はイオン化が極めてソフトであり、分子量が10万を超えるタンパク質のような試料でも分子を分解させずにイオン化できる。この装置の開発によって島津製作所の田中耕一博士が2002年/一ベル化学賞を受賞されたことはまだ記憶に新しいことと思われる。

本学では新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NE DO)の 1996 年の独創的産業技術開発促進事業プロジェクト(西久保、中村、横澤)の機器設備として MALDI-TOF 質量分析装置が導入された。まだ日本でも数台しか導入

されてない時期であり、ノーベル賞を受賞する前の田中博士が装置の説明に本学に来ている。この約10年間、合成高分子の絶対分子量の測定、高分子末端の同定、および環状ポリマーの同定に威力を発揮してきたばかりでなく、測定が簡便なことから低分子化合物の分子量測定にも広く使われてきた。しかしながら、老朽化が進んで高額の修理の回数が増え、また測定感度も低下して以前測定できた高分子の分子量ピークが現れない場合も増えた。

これに対して平成 18 年度私立大学大型研究装置助成によって島津製作所製 レーザーイオン化飛行時間型質量分析装置 AXIMA-CFR plus 型 (図1)が導入された。この10年間に本装置も改良が進んでいる。具体的には分析管の飛行距離の伸長、グリッドレス化によるイオン損失の減少、ディジタイザーの高速化、排気系の改善が進み、本機種では分解能は以前の機種の約10倍である。また、感度も向上し、5 fmol の試料を測定できる。測定分子量範囲はたんぱく質の場合、分子量50万まで可能である。このように分解能が向上したことによってこれまで



図1 AXIMA-CFR plus の概観

*教授 物質生命化学科

Professor, Dept. of Material and Life Chemistry

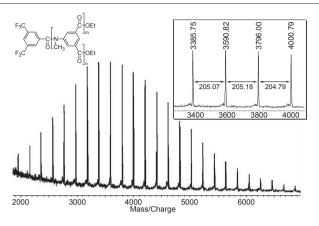


図2 多分岐ポリアミドの質量分析スペクトル

分子量差が2以下の2種の化合物を識別できなかったことが可能になり、さらに多くの種類の化合物の分析ができるようになった。また、本機種のAXIMA-CFRシリーズは既に100台近くの納入実績があり、信頼できる機種と言える。実際に本装置を用いた研究例として、多分岐ポリアミドの分子量測定を以下に紹介する。

私たちの研究室では分子量分布の狭い縮合系高分子を、 分子量を制御して合成する手法を開発している。これま で反応点が2つあるAB型モノマーが、まず開始剤と反 応してさらに成長末端に順次反応して重合が進行し(連 鎖重合という)、分子量分布の狭いポリマーを与えること を見出している。この重合反応を多分岐構造ポリマーを 与えるAB。型モノマーに応用した結果、ゲルろ過クロ マトグラフィーでは分子量分布の狭いポリマーが生成し ていることが確認できた。次に重合機構を検討した。A B型モノマーと同様な重合が進行していれば、すべての ポリマー末端に開始剤部位が結合しているはずである。 MALDI-TOF 質量分析装置ではポリマー1本ずつの分子 量が測定できるので、得られたピークの分子量が(モノ マーの繰り返し単位) × 重合度 + (開始剤部位) の分 子量と一致するかを見た。図2にそのスペクトルを示す。 期待したとおりピーク間隔はモノマーの繰り返し単位の 分子量であり、それぞれのピークの分子量は開始剤部位 の結合したポリマーの分子量と良い一致を示した。これ によってAB。型モノマーも開始剤から連鎖重合が進行 していることを明らかにできた。

このように本装置は高分子の絶対分子量を測定できる ばかりではなく、これまであまり明確にできなかった高 分子末端の構造や環状高分子の同定が行なえる。今後、 ますます本学工学部の研究に貢献すると期待される。



図3 JMS-T100CS の概観

3. コールドスプレーイオン源搭載 TOFMS システム JMS-T100CS

JMS-T100CS (図3) は学術フロンティアプロジェクト (代表:内藤周弌、平成18~22年度)の大型装置である。本装置のエレクトロスプレーイオン化法 (ESI 法) は、最もソフトなイオン化法の一つであり、イオン性・高極性化合物に対して有効なイオン化法として広く使用されている。さらにコールドスプレーイオン化法を利用することにより、水素結合や配位結合により溶液中で形成される超分子複合体を検出することが可能である。

以下に、DNA duplex の質量分析例を紹介する。DNA duplex (二本鎖 DNA) は、二本の DNA 鎖が水素結合を介して結合することにより形成される超分子複合体である。また、多数のリン酸基が結合しているイオン性の高極性複合体であり、その解析は従来の質量分析装置では不可能であった。例えば、上記の AXIMA-CFR plus 型質量分析装置の MALDI イオン化法はソフトなイオン化法ではあるが、一本鎖 DNA の質量分析は可能であるものの、二本鎖 DNA 複合体を検出することは出来ない。図4に JMS-T100CS で測定した DNA duplex 一水銀(II)イオン

5'-d(GTGACCATAGCAGTG)-3' 3'-d(CACTGGTTTCGTCAC)-5'

C₂₉₂H₃₆₃H₁₂₇P₂₈Hg

Found, 1866.20; calculated for [(duplex + Hg^{II} - 2H_{imino}) - 5H]⁵⁻, 1865.92

 $C_{292}H_{362}H_{127}P_{28}Hg$

Found, 1554.94; calculated for $[(duplex + Hg^{II} - 2H_{imino}) - 6H]^{6}$, 1554.76

 $C_{292}H_{361}H_{127}P_{28}Hg$

Found, 1332.65; calculated for [(duplex + Hg^{II} - 2H_{imino}) - 7H]⁷-, 1332.51

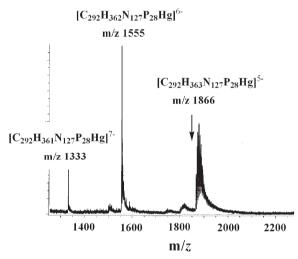


図 4 DNA duplex—水銀(II)イオン複合体の質量分析スペクトル

複合体のスペクトルを示す。超分子複合体である DNA duplex に、更に金属イオンが結合した、極めて複雑な構造を有する複合体である。水銀イオンは DNA duplex 中で向かい合った二つのチミン残基に結合し、その過程で二つのプロトンが放出される。DNA duplex の多数のリン酸基の一部が解離することで様々な電荷を有するピークを与え、さらにリン酸基が緩衝液中のアンモニアと反応してアンモニウム塩に変化したピークも観測されると予想した。図4に示したスペクトルには、これらの条件を満たすピークが観測された。m/z1866のピークの高分子がわに複数見られるピークはリン酸基が次々とアンモニウム基に置き換わった分子種に対応するものである。超分子複合体の構造解析は容易ではないが、JMS-T100CS質量分析装置は超分子研究に有用な機器の1つであることが明らかとなった。

本稿では、その特徴的な利用分野である超分子複合体の解析を紹介したが、JMS-T100CS は一般的有機分子の分析にも有用であり、広く本学の研究に貢献すること多大であると期待される。



日中二国間共同研究

ー東アジア巨大都市における新エネ・省エネ技術導入の 実現可能性に関する調査研究-

庄司 正弘*

Japan-China (NSFC/JSPS) Cooperative Study Project

-Feasibility Study on the Application of Innovation Energy Conservation Technology in the Large Cities in Eastern Asia -

Masahiro SHOJI*

1. 共同研究のあらましと内容

中国と日本はいずれも東アジアに位置し、東京、北京、 上海といった巨大都市を抱え、共通するエネルギー・環 境問題を抱えている。本共同研究は日本学術振興会およ び中国科学院の支援のもと、両国が直面するエネルギー 問題を技術面から打開するためいかなる新エネルギー・ 省エネルギー技術が適用可能であるか技術的議論を継続 的に行うことを目的に計画されたものである。プロジェ クトの期間は3年で本年が最終年度であり、筆者は計画 の当初から主要メンバーとしてこの共同研究に参画して いる。

2. 日本と中国のエネルギー事情と技術状況

中国は日本の隣国であり、貿易および工業生産のパートナーとして米国に次ぐ位置を占める。急速に発展する中国経済は同時にエネルギー問題、環境問題を伴い、酸性雨など大気汚染は国境を越え、日本にも影響を及ぼす怖れがある。中国側でも近年のエネルギー問題、悪化する都市環境の対策を急ぐ必要性が認識され、種々の新技術導入に積極的である。しかしこれまでの中国の科学技術は生産技術など工業化に力点が置かれ、新エネ・省エネ技術研究はまだ歴史が浅い。一方我が国では、石油ショック以来の努力により工業生産部門における省エネルギー技術は極限に達した感がある。が、今後どのような省エネ・新エネ技術が中国において受容されるかについて調査しておくことは、将来中国において生産活動に携わる日本企業にとってもメリットがある。

*教授 機械工学科

Professor, Dept. of Mechanical Engineering

中国と日本では社会組織・経済発展フェーズが異なる ため、環境対策を行う際の政策的・経済的条件もまた異 なる. 日本では省エネルギー技術の工場など生産部門へ の普及が進み、個人住宅の空調や自家用車といった個人 のアメニティ動機がエネルギー使用を増大させている. 一方中国では生産、個人、輸送のいずれの分野において もエネルギー利用は急進しており、大都市の夏季の電力 危機は深刻なものとなっている. 中国においても環境問 題は政府・市民双方に重要な問題と認識され、抜本的な 環境対策や都市インフラの建設を官主導で行いやすい条 件がある. 日本では土地価格, 都市機能の低下や局所的 な環境悪化に対する反発が強く、新たな都市インフラの 建設は経済的にも難しい面がある. 両国ではこうした条 件の違いはあるとしても,経済成長を鈍化することなく エネルギー危機・環境問題を克服するためには新たな技 術開発によるしかないという問題意識では共通している.

3. 共同研究構成と研究課題及びメンバー

本研究では、共通する技術課題に取り組んでいる日中 双方の研究者、特に日本側から独立行政法人産業技術総 合研究所(つくば市)に関係の研究者が、また中国側からは上海交通大学の研究者が中心となり、特に下記の5 つの代表的課題を取り上げ、個別の技術と両国における 技術受容の可能性を探り、実効的な技術普及の問題点を 明らかにしようとしている。それらの課題とは

- 火力発電システムにおける加湿空気タービンサイク ルおよび水注入サイクルの評価
- 2) 空調・冷凍機に対する低温度排熱エネルギー利用
- 3) 流れの抵抗低減による空調システムの高効率化
- 4) ジメチルエーテル燃料等のディーゼルエンジンへの

適用

5) 高度熱システムへのマイクロ熱流体現象の応用である。

上海は中国最大の都市であり、大気・水・土壌汚染、 自動車の急増、エネルギーの欠乏といった問題を肌で感 じうる環境にある. 相手研究機関である上海交通大学は 北京の清華大学と並び称される理工系大学の頂点であり, 中央政府および市政府の投資が手厚く、急速に経済発展 を遂げる上海とその周辺を後背地として科学技術の実用 化にはきわめて有利な地位を占めている. そして民間の 研究能力がまだ充実していない中国では、上海市および 周辺の生産工場、建設業者等は上海交通大学に技術的指 針を求めるケースが多く,同大学と共同で開発した技術 はいち早く中国の民間セクターに波及するため、メリッ トが大きいものと期待できる。本共同研究に参画してい るのは翁史烈中国学士院院士 (前交通大学校長), 黄震教 授, 王如竹教授(いずれも長江学者), 鄭平教授(前ハワ イ大, 香港科技大教授), 林忠欽副校長と言った世界的に 著名な研究者である. 一方日本側メンバーは, 研究代表 の川口靖夫東京理科大学教授, 筆者, 矢部彰, 白石正夫, 小熊光晴、壱岐典彦(いずれも産総研博士主任研究員) であり、本年より新たに鈴木康一教授(東京理科大学)、 中納暁洋博士 (産総研主任研究員) がメンバーに加わっ ている.

4. 過年度の学術交流経緯と本年度の学術交流

2005年8月以来これまで4回,日中の研究メンバーが相互訪問して研究発表シンポジウム,エネルギー関連施設の見学と現地調査,意見交換などを行ってきた.本年度はその5回目であり,8月19日から23日,上海交通大学の新キャンパス関行校区(Minhang Campus)において会議が開催された(右図参照).会議では下記12件の講演と研究発表がなされ,また本研究プロジェクトのこれまでの総括と今後の展開についても討議された.

- Basic study on turbulent drag reduction with surfactant additives toward the energy conservation of air conditioning systems, by Prof. Yauo Kawaguchi
- Study on heat transfer performances in heating water system with CTAC additives, by Dr. Zhang Hong Xia
- 3. Fuel Design and HCCI combustion, by Prof. Huang Zhen
- Talent of DME fuel for heavy-duty vehicles, by Dr. Mitsuharu Oguma
- Small gas turbine with ceramic and metal components, by Dr. Norihiko Iki
- 6. Several application problems of gas turbine distributed power in big cities in Asia, by Prof. Zang Shusheng

- Introduction to micro-bubble emission boiling for advanced cooling technology for future power electronics and energy saving, by Prof. Koichi Suzuki
- Tree-shaped micro-channel network for microelectronic cooling, by Dr. Hong Fangjun
- Development of ultra small-sized absorption refrigerator, by Prof. Masahiro Shoji
- Composite reactive block for heat transformer system and improvement of system, by Prof. Zhang Peng
- Ecomonic evaluation and Japanese research and development status of cellulose-based biomass utilization systems, by Dr.Akira Yabe
- High-pressure hydrogen storage for fuel cell vehicles, by Dr.Yokokawa

この会議で筆者は、産総研において企画、共同研究したハイテクものづくりプロジェクト「超小型吸収式冷却器」の開発成果に関し研究紹介を行った(上記9の講演).



会議場建物前での会議参加者(中央前が筆者)

4. むすび

エネルギーの問題は単に一国の問題ではなく地球規模のグローバルな問題であり、また政治的、政策的にも難しい問題を含む.しかしこと技術に関する限り、研究者の継続的、地道にして不断の研究努力が必要である.周知のごとく中国は近年目覚しい経済発展遂げつつあるが、反面大きな社会的問題も産んでいる.筆者は本共同研究以外にも過去十数年、拠点大学方式を始めとした幾つかの共同プロジェクトに参画し中国の発展を眺めてきた.この間大学の施設、設備は目を見張るばかりに改善、進歩しているが、何よりも文化大革命の影響もあってか若手研究者の活躍と台頭が著しい.我が国としても、それ相応の早急な対策と協力関係の構築が必要と感じられる.

2006年度(平成18年度)工学研究所年次報告

1. 人事 (運営委員)

本研究所の職員 教務技術職員 萩原健司 技術員 八高優勝

2. 予 算

平成18年度の予算・決算額を表-1に示す。

#	4	(2)////		- m
表-	1	(単位	:	十円)

業務項目	予 算 額 🥻	央 算 額
研究所運営費	2,157	2,186
大型共同設備管理運営	4,200	3,799
工学研究所共同研究*	14,000	13,812
合 計	20,537	19,797

*工学研究所共同研究内訳

共同研究代表者 予算額(千円)

字佐見 助教授 3,800 浦 田 教 授 3,300 柏 木 専任講師 2,900 高 山 専任講師 3,000 轟 木 助手 1,000 計 14,000

3. 共同研究

平成18年度の工学研究所共同研究を表-2に示す。

表-2

	物理	助教授	宇佐見義之	2足歩行恐竜型ロボットの製作とその歩行理論
İ	機械	教授	江上 正	
	機械	教授	浦田暎三	流体フィルタの性能測定及び評価に
	化学	教授	田嶋和夫	関する研究
	情シ	専任講師	柏木利介	放射線医療・被爆そして宇宙ガンマ線観測にも
	情報	助教授	日比野欣也	有効なダイヤモンド・リコイル・テレスコープ
	情シ	助手	奥野祥二	(DCRT)の開発
	他学外者	2名		

物質生命	専任講師	高山俊夫	新規貴金属微粒子を用いた導電性インク、
他学外者	2名		導電性ペースト、導電性薄膜の制作
物理	助手	轟木義一	地球惑星科学における濃厚粉流体力学
他学外者	1名		シミュレーション

4. 講演会

『難病患者のコミュニケーション支援』

講師:日立製作所 小澤 邦昭 氏

日時: 平成 18 年 11 月 4 日 (土) 14:00~15:00

場所: 23 号館301 教室

講演内容:

頭脳の動きは正常であるが、自分の気持ちを伝えられない人がいる。手足が動かず、話したり、筆談できなくなる病気の人だ。「伝の心」はわずかに身体を動かすとセンサが感知して、望みの文字をパソコンに入力する。「心語り」は脳血液量を測定して「Yes」「No」を伝える。

5. 大型装置使用実績

平成18年度の大型装置装置使用実績を表-3に示す。

表-3

(時間)

研究室名	TEM	SEM	XRD	XPS	ICP	CCD
機械工学科	32	26	98.5	0	0	0
工藤研究室			43.5			
竹村研究室		26				
田島研究室	32		55			
電子情報	0	424	43.5	12. 5	0	0
<u>フロンティア学科</u> 大野研究室		3	4			
中山研究室		3	4	10.5		
平手研究室		382. 5	39.5	2		
山口研究室		35. 5	59. S	Δ		
物質生命化学科	486.5	421. 5	337. 5	647.5	181	250
井川研究室	400.0	129	331.3	047.0	28	230
池原研究室		123	2		20	
岡本研究室			2			20
小出研究室	4. 5	56		130. 5		190
佐藤(憲)研究室	7. 0	00		100.0		40
佐藤(祐)研究室	129	180. 5	171	201	111	10
内藤研究室	331.5	8	35. 5	106	111	
西久保研究室	001.0	1.5	00.0	100		
引地研究室	4.5	1.0		10	21	
横澤研究室	17	44				
山村研究室		2.5	129	200	21	
建築学科	0	0	0	29. 5	0	0
岩田研究室				29.5		
共通教室	409.5	134.5	276	112	0	0
亀山研究室	129	48.5				
田島研究室	280.5	86	276	112		
理学部	0	0	49	111	0	0
杉谷研究室				17.5		
森研究室			44			
山口研究室			5	93.5		
合計時間	928	1006	804.5	912.5	181	250
機械工学科(%)	3.4	2.6	12.2	0.0	0.0	0.0
電子情報フロンティア 学科 (%)	0.0	42.1	5. 4	1.4	0.0	0.0
物質生命化学科(%)	52.4	41.9	42.0	71.0	100.0	100.0
建築学科(%)	0.0	0.0	0.0	3.2	0.0	0.0
共通教室(%)	44.1	13.4	34.3	12.3	0.0	0.0
理学部(%)	0.0	0.0	6. 1	12.2	0.0	0.0

工学研究所小史

1998年 9	月 横浜市民講座開催「環境を考える工学」
1999年 2	利 神奈川大学工学研究所研究成果公開発表会開催
	講演1「鋼構造柱梁溶接接合部の疲労損傷に関する研究」
	講演2「最適化の問題の効率的な解法」
	講演3「キャビテーション壊食とその対策」
1999年 3] 講演会開催「次世代自動車とエネルギー技術」
1999年12	工学研究所研究成果公開報告会開催
	講演1「高性能,大トルクの超音波モータに関する研究
	講演2「新しい3次元光導波路型素子の開発」
2000年11	工学研究所研究成果公開報告会開催
	「地球環境を守る触媒技術」
	プログラム
	「一酸化窒素の還元活性や直接分解に高活性な触媒の検索」
	「めっき法による環境浄化触媒の調製と評価」
	「固体電解質を用いた NO および VOC の分解」
	「使い捨て型グルコースセンサー」
2001年 1	月 23 号館地価階へ移転
2001年12	工学研究所共同研究成果公開報告会開催
	「新鋭電気自動車の開発」
	「逆ミセル制限反応場による機能性ナノサイズ微粒子の調製と新展開」
2002年 3	月 JEM 2 0 1 0 (TEM) 、JPM9010MC (XPS) 導入
2003年11	月 講演会開催「建物の基礎構造とは」
2004年 3	引 Staturn70(単結晶 X 線)導入
2004年10	講演会開催「スマート建築構造」
2005年10	月 講演会開催「建築物の美装性とエイジング」

2006年11月 講演会開催「難病患者のコミュニケーション支援」

2007年 3月 JMS-T100cs (MS)、AXIMA-CFR (MS) 導入

工学研究所歴代人事

2006年 3月 UltimaⅢ (XRD) 導入

14期 (H. 10. 4. 1~	H12. 3.	31)			経営工学科	*	内田	智史	専任講師
H10. 4. 1~H11. 3. 1						\triangle	柏木	利介	専任講師
所長(運営委員)		渡部	尚三	教授	建築科	\triangle	仕入	豊和	教授
工学部長		松村	晃	教授		**	川崎	浩司	助教授
機械工学科	\triangle	浦田	暎三	教授	数学教室	*	山田	敬吾	教授
	*	竹村	兼一	専任講師	物理教室	\triangle	立山	暢人	助教授
電気工学科	*	新中	新二	教授	[注]:**所報 21	号編集委員	員長		
	\triangle	中山	明芳	教授	*同編集委	員			
応用化学科	*	新井	五郎	専任講師	△自己点検	評価委	員		
	\triangle	山村	博	教授	本研究所の職員	效務技術員	員 阿普	邓勇輝	萩原健司

H11. 4. 1~H12. 3. 1						*	山崎	徹	助教授
所長(運営委員)		渡部	尚三	教授	電気工学科	\triangle	許	瑞邦	教授
工学部長		松村	晃	教授		**	平手	孝士	教授
機械工学科	*	竹村	兼一	助教授	応用化学科	*	小池	芳雄	助教授
	\triangle	中尾	陽一	助教授		\triangle	在間	忠孝	助教授
電気工学科	\triangle	新中	新二	教授	経営工学科	*	内田	智史	助教授
	*	中山	明芳	教授		\triangle	柏木	利介	専任講師
応用化学科	*	新井	五郎	助教授	建築科	*	岩田	衛	教授
	\triangle	山村	博	教授		\triangle	荏本	孝久	助教授
経営工学科	*	内田	智史	助教授	数学教室	\triangle	永野	興彦	専任講師
	\triangle	柏木	利介	専任講師	物理学教室	*	鳥居	祥二	助教授
建築科	*	岩田	衛	教授	[注]:**所報 24 号	号編集委	員長		
	\triangle	荏本	孝久	助教授	*同編集委	員			
数学教室	**	山田	敬吾	教授	△自己点検	評価委	員		
物理教室	\triangle	立山	暢人	助教授	本研究所の職員 教	務技術	職員 素	灰原健司	
[注]: **所報 21 ⁺ * 同編集委		員長				技行	術員 ノ	\高優勝	
△自己点検		5 員			16期(H. 14. 4. 1~	∽H16. 3	. 31)		
本研究所の職員 巻			羽輝・	萩原健司	H14. 4. 1~H15. 3. 1				
					所長(運営委員)		岩田	衛	教授
15期 (H. 12. 4. 1	~H14. 3	. 31)			工学部長		西久伊	果忠臣	教授
H12. 4. 1~H13. 3. 1		·			機械工学科	Δ		李 久二	教授
所長(運営委員)		小嶋	英一	教授		*	山崎	徹	助教授
工学部長		西久信	果忠臣	教授	電気工学科	\triangle	許	瑞邦	教授
機械工学科	*	竹村	兼一	助教授		*	山口	栄雄	教授
	**	佐藤	昌夫	専任講師	応用化学科	**	小池	芳雄	助教授
電気工学科	\triangle	新中	新二	教授		\triangle	岡本耳	 事太郎	助教授
	*	中山	明芳	教授	経営工学科	*	上野	俊夫	教授
応用化学科	*	新井	五郎	助教授		\triangle	柏木	利介	専任講師
	\triangle	在間	忠孝	助教授	建築科	*	高木	幹郎	教授
経営工学科	*	内田	智史	助教授		\triangle	荏本	孝久	助教授
	\triangle	柏木	利介	専任講師	数学教室	\triangle	伊藤	博	教授
建築科	*	岩田	衛	教授	物理学教室	*	宇佐見	見義之	専任講師
	\triangle	荏本	孝久	助教授	[注]:**所報 25 爿	号編集委	員長		
数学教室	\triangle	永野	興彦	専任講師	*同編集委	員			
物理学教室	*	鳥居	祥二	助教授	△自己点検	評価委	員		
[注]:**所報23	号編集委	員長			本研究所の職員 参	務技術	職員 若	灰原健司	
*同編集委	:員					技征	術員 ノ	高優勝	
△自己点検	評価す	員							
本研究所の職員を	效務技術區	職員 『	可部勇輝	・萩原健司	H15. 4. 1~H16. 3. 1 所長(運営委員)		岩田	生	₩ ₩
H13. 4. 1∼H14. 3. 1					所長 (連呂安貝) 工学部長			衛 R忠臣	教授 教授
而3. 4. 1~而4. 3. 1 所長(運営委員)		小小帕	英一	教授		^		*心足	教授
					機械工学科	△ *			
工学部長		四八1	果忠臣	教授	東 左丁兴到	*	中四	裕二	助教授

△ 穴田 哲夫

教授

	*	山口	栄雄	助教授	応用化学科	岡	本専太郎
応用化学科	\triangle	井川	学	教授	経営工学科	瀬	古沢照治
	\triangle	岡本耳	專太郎	助教授	建築学科	室	伏 次郎
経営工学科	**	上野	俊夫	教授	生物学教室	朝	倉 史明
	\triangle	柏木	利介	専任講師			
建築科	*	室伏	次郎	教授	本研究所の職員	教務技術職員	萩原健司
	\triangle	荏本	孝久	助教授		技術員	八高優勝
数学教室	*	長	宗雄	教授			
物理学教室	*	宇佐見	見義之	専任講師	18 期(H. 18. 4. 1~H2O. 3. 31)		
「注」、メル正却 90 旦炉生禾昌 E					⊔10 / 1 a ⊔10 2 1		

[注]: **所報 26 号編集委員長

*同編集委員

△自己点検・評価委員

本研究所の職員 教務技術職員 萩原健司

技術員 八高優勝

17期 (H. 16. 4. 1~H18. 3. 31)

H16. 4. 1~H17. 3. 1

所長 (運営委員)		岩田	衛	教授
工学部長		西久伊	R 忠臣	教授
機械工学科	\triangle	浦田	暎三	教授
	*	細川	修二	専任講師
電気電子情報工学科	*	中山	明芳	教授
	\triangle	山口	栄雄	助教授
応用化学科	*	岡本耳	 厚太郎	助教授
	\triangle	高山	俊夫	専任講師
経営工学科	*	上野	俊夫	教授
	\triangle	柏木	利介	専任講師
建築科	**	室伏	次郎	教授
	\triangle	富井	正憲	専任講師
物理学教室	*	立山	暢人	助教授
生物学教室	*	朝倉	史明	助教授

[注]: **所報 27 号編集委員長

*同編集委員

△自己点檢·評価委員

本研究所の職員 教務技術職員 萩原健司

技術員 八高優勝

H17. 4. 1~H18. 3. 1

平成 17 年度工学研究所年次報告

人 事

 所長(運営委員)
 岩田
 衛
 教授

 工学部長
 西久保忠臣
 教授

 機械工学科
 浦田
 暎三
 教授

 電気電子情報工学科
 中山
 明芳
 教授

H18. 4. 1~H19. 3. 1

所長 (運営委員) 許 瑞邦 教授 教授 機械工学科 浦田 暎三 電子情報フロンティア学科 中山 明芳 教授 物質生命化学科 山村 教授 博 情報システム創成学科 瀬古沢照治 教授 建築学科 室伏 次郎 教授 生物学教室 朝倉 史明 助教授

助教授 教授 教授 助教授

本研究所の職員 教務技術職員 萩原健司 技術員 八高優勝

H19. 4. 1~H20. 3. 1

所長 (運営委員) 許 瑞邦 教授 機械工学科 伊藤 勝悦 教授 電子情報フロンティア学科 山口 栄雄 教授 物質生命化学科 池原 飛之 准教授 物質生命化学科 山村 博 教授 情報システム創成学科 瀬古沢照治 教授 建築学科 鎌田 元康 教授 三田 一郎 物理学教室 教授

本研究所の職員 教務技術職員 萩原健司 技術員 八高優勝

総 目 次 (20号-29号)

巻頭言

松村 晃, いま工学研究所について思うこと, 20号, 1

桜井那朋、本學創立七十周年を迎えて、21号、1

鈴木芳徳,産官学連携と大学の未来,22号,1

西久保忠臣、工学研究所に期待すること、23号、1

小嶋英一, グローバリゼーションと技術者に課せられた責任, 24号, 1

岩田 衛、大学教員の職務、25号、1

岩田 衛, 大学発ベンチャー, 26号, 1

成田清正, 異分野融合, 27号, 1

岩田 衛, 工学研究所の過去・現在・未来, 28号, 1

許 瑞邦、工学研究所所報巻頭言(所長就任にあたって)、29号、1

論説

渡部尚三, 先端研究, 先見性と社会のニーズ, 20号, 2

渡部尚三、繁栄それは天使?悪魔? **横浜市民講座「環境を考える工学」に寄せて**、21号、2

渡部尚三、理科離れ現象、22号、2

田嶋和夫、神奈川大学工学研究所への夢:学生の研究教育を拡充するために、25号、2

総合論文

北尾誠英・小澤幸夫・山崎京子・見藤隆子・平野かよ子,「地域ケアネットワーク構築へのシステム的接近(2)」-医療機関、保健所及び福祉施設の現実的課題-、20号、5

工藤邦男・大野幸彦・日吉 博、鋼と超硬合金工具の拡散現象と工具摩耗に及ぼす印加電流の影響、20 号、27

新中新二. 誘導電動機の新ハイブリッドベクトル制御法、20号、35

大河内博・井川 学,降水の酸性化と酸性沈着物の森林生態系に及ぼす影響,20号,47

竹村兼一・藤井 透。円孔を有する平織り GFRP の引張り/ねじり組み合わせ荷重下における疲労に関する研究, 20 号,

宮田忠治, ねじのゆるみ, その防止対策の提案 (ナットの締結機能、ゆるみ防止機能付きナット: スカート付きナットの 開発と実用化を踏まえて, およびボルトのゆるみ防止機能付き対策), 21 号, 4

柿沼克良・笛木和雄・山村 博, 超伝導酸化物の伝導性と電子構造, 21 号, 17

小澤幸夫・北尾誠英, 病院 (看護部) における総合的「職場診断」と改善のための行動計画, 21 号, 41

仕入豊和, コンクリート建物の汚れ, 21 号, 53

北尾誠英・小澤幸夫,地域保険従事者のためのモチベーションマネジメントに関する考察(第 1 報)ー全国的にみた問題の抽出一,22 号,4

宮尾敏広・永井正敏・内藤周弌, モリブデン窒化物および炭化物系触媒の調製とその触媒活性, 22 号, 23

山崎 徹、構造物を伝搬する振動エネルギ流の可視化、22号、33

進藤 晋, 半正定値計画問題に対する主双対内点法アルゴリズム, 22号, 54

岩田 衛, 建築鋼構造のシステム化: 構造システムの成立, 22号, 60

北尾誠英・小澤幸夫, 地域保健従事者のためのモチベーションマネジメントに関する考察(第2報) 一施策決定過程における判断基準の明確化一, 23号, 2

島崎和司, 応答変位に基づく鉄筋コンクリート建築物の耐震設計法-変位応答に基づく必要耐力の設定-, 23 号, 24

奥村一雄・辛 重基, 大環状抗生物質 GE2270A および Micrococcin 類の全合成研究, 23 号, 42

狩野朋敦, 不平衡送電線路における過渡現象解析方法に関する研究, 23 号, 60

米田征司, 熱電半導体 PbTe の熱電特性の結晶粒径依存性, 23 号, 86

紀谷文樹、建築の給排水衛生設備と水環境計画の研究、24号、2

伊藤 博、3次のGauss 和と楕円関数に関する若干の結果、24号、10

西川昌弘, ファジィシステムの安定化, 24号, 16

李 家斉, 北岡正敏, 非線形時系列データの解析に対する GA と SA による閾値 AR モデルの構築, 24 号, 32

呉 勇周、ビジョンに基づく計測システムの知能化、24 号、44

山口栄雄・天野 浩・赤崎 勇, In を含んだⅢ族窒化物半導体の歪みと応力の制御, 24 号, 51

猪俣克巳・西久保忠臣、複合機能型高文子増感剤の合成とそれらを用いた光反応、24 号、58

笹田昌弘, 自動二輪車用一体型ブレーキディスクの耐久性向上に関する研究, 25号, 4

松澤和光. 大規模集積システムの符号論的設計法に関する研究, 25号, 22

工藤邦男, 切削工具の磨耗に及ぼす熱電流の影響, 26号, 2

高山俊夫, 燃料電池電解質の機能と固体 NMR によるその分子運動解明, 27 号, 2

山口智浩、ニューラルネットワークによる4脚歩行ロボットの障害物回避行動の獲得、27号、14

総説

大熊武司・三城繁伸・丸川比佐夫・小川秀雄、免震構造の設計について-安全で快適な建物の実現を目指して-, 20 号, 83

川崎浩司、建築総合学(Architectonics)のすすめ、21号、62

北岡正敏、ニューロ情報処理による HBC モデルの構造とシステム設計への適用、22 号、112

山崎丈明, 作用素不等式における最近の話題, 23号, 122

宮尾敏広・内藤周弌, ナノ構造を有する無機多孔質化合物の合成と触媒としての利用, 24 号, 112

岡本専太郎、光学活性アレニル金属の合成と利用 アレニルチタンを中心に、25号、70

土屋健伸・穴田哲夫・遠藤信行, 広角放物型方程式による海洋音波伝搬の数値解析, 25 号, 77

池原飛之、パルス法 NMR の高文子物性への適用、26号、22

稲積泰宏、帯域制限下における動画像通信のための最適フレームレートの推定、26号、29

木村達人、分子動力学法による固液接触現象のシミュレーション、26号、37

万谷義和, 準安定 6 型チタン合金の変形誘起相変態, 26 号, 45

冨井正憲. 折衷の美一金閣、27号、34

品田正昭, 複合管路系内流体過渡現象のモード近似法に基づく実用的で高精度なシミュレーション法の開発, 27号, 41

熊倉 進, 引張荷重によるねじ結合体のゆるみ, 27 号, 49

細川修二、ねじ締結におけるトルクと軸力に関する研究、27号、56

山崎丈昭. 作用素のアルスゲ交換について、27号、61

Hun-ok Lim, Walking Pattern and Compensatory Body Motion of Biped Humanoid Robot, 28 号, 2

椿 郁子・齊藤隆弘・森田寿哉, 映像が生体に与える影響の防止方法, 28 号, 10

小出芳弘、鉱物ベーマイト([AlO(OH)] n)と有機配位子の直接反応によるアルミニウム配位化合物の合成、28 号、17

小野 晶, DNA のバイオナノエンジニアリング, 28号, 24

森田 光, 情報システム設計のためのセキュリティ要素, 28号, 32

瀬古沢照治, 日本における地震防災水道運用管理システム, 28号, 40

庄司正弘, 気泡微細化沸騰とその応用可能性, 29号, 2

引地史朗, 人工酸化酵素の開発を指向した遷移金属-活性酸素錯体の研究, 29 号, 10

北岡正敏、インダストリアルエンジニアリングの成果と現状、29号、18

曽我部昌史、団地映画を通してみる公共空間の活用についての研究、29号、27

三田一郎, CP の破れ-新しい物理を探る, 29 号, 35

国際交流研究

中山明芳, イギリス・ケンブリッジ留学報告, 20 号, 100

亀山 敦. コーネル大学留学記, 20 号, 109

亀山 敦, ブロック型高分子電解質の合成と自己組織化, 20号, 111

荏本孝久, スペイン滞在記, 21 号, 72

川崎浩司,文化から見た日本とオランダの比較,21号,77

中尾陽一, UC Berkeley 滞在報告, 22 号, 141

横澤 勉, イリノイ大学留学記-日本の大学との比較-, 22号, 154

佐藤祐一, カナダの思い出, 23号, 135

矢島幸信, 国際会議を終えて, 23 号, 140

中西裕二、ミュンヘン工科大学留学記、24号、120

栗原謙三, Vanderbilt 大学滞在記 活力溢れるアメリカの大学, 24号, 125

大河内博, 英国イースト・アングリア大学滞在記, 24号, 132

竹村兼一、米国デラウエア大学滞在報告、25号、85

上野俊夫。 ウイスコンシン大学の環境と IE 教育、25 号、90

杉本 剛, ケンブリッジ大学 国際交流記ならびに研究成果報告, 26 号, 105

長 宗雄、成均館大学との交流協定を祝して、26号、115

山崎 徹, 英国サザンプトン大学 ISVR 滞在記, 27 号, 68

亀山 敦, 成均館大学との理工系学術交流, 29号, 74

冨井正憲, 2006 年度東アジア建築学術交流セミナーの報告, 29 号, 78

随想

日野太郎. 夢, 20号, 115

高浜和秀, 舟塚雅恵, 椅子, 照明器具のデザイン, 21号, 91

児玉之宏, グラフの彩色問題, 22 号, 137

松村晃一,変わりゆく大学,23号,133

桜井邦朋, 歴史を語ることの難しさ, 24号, 117

久保田喬, 地球温暖化と発電用水車, 25号, 94

田島 守, すばらしき先達に恵まれて, 29号, 67

高橋志保彦, デザインの理論と実践, 29号, 70

共同研究

共同研究報告(Y)

西久保忠臣・中村茂夫・亀山 敦 光エネルギー変換・蓄積機能を有する高分子材料の開発,20号,125

共同研究報告(Z)

西村 純・笠原克昌・白井達也・立山暢人・鳥居祥二・吉田健二, 宇宙環境ガンマ線測定装置の基礎研究, 20 号, 143

共同研究報告(ⅡA)

大熊武司・小川秀雄・細川修二・梅山嘉夫, 鋼構造柱梁溶接接合部の疲労損傷に関する研究, 20 号, 151

大熊武司・小川秀雄・細川修二・梅山嘉夫、鋼構造柱梁溶接接合部の疲労損傷に関する研究(第3報)、21号、99

共同研究報告(IIB)

北岡正敏・吉田賢二・中村 塁・宇佐見義之,組み合わせ最適化の高速解法に対するハード,ソフト,両面にわたる実験・ 理論的研究とその応用、20号、155 **北岡正敏・吉田賢二・中村 塁・宇佐見義之**,組み合わせ最適化の高速解法に対するハード,ソフト,両面にわたる実験・ 理論的研究とその応用,21号,111

共同研究報告(IC)

浦田暎三・佐藤祐一・小早川紘一・中尾陽一,水圧駆動に用いる機器部品のめっきによる適合性向上に関する研究, 20 号, 158

浦田暎三・佐藤祐一・小早川紘一・中尾陽一,水圧駆動に用いる機器部品のめっきによる適合性向上に関する研究(第3 報), 21 号, 121

共同研究報告(IID)

辻野次郎丸・浦田暎三・中村茂夫・大熊武司・上岡哲宜, 高性能・大トルクの超音波モータに関する研究, 20 号, 160 **辻野次郎丸・浦田暎三・中村茂夫・大熊武司・上岡哲宜**, 高性能・大トルクの超音波モータに関する研究(第2報), 21 号, 130

辻野次郎丸・浦田暎三・中村茂夫・大熊武司・上岡哲宜, 高性能・大トルクの超音波モータに関する研究(第3報), 22 号、79

共同研究報告(ⅡE)

穴田哲夫・許 瑞邦・中山明芳・平岡隆晴・大出英長, ブレーナ光波回路の開発と FD-BPM による解析及び作製・測定 に関する研究, 21 号, 133

穴田哲夫・許 瑞邦・中山明芳・平岡隆晴・大出英長, ブレーナ光波回路の開発と FD-BPM による解析及び作製・測定 に関する研究(第2報)、22号、90

共同研究報告(IIF)

内藤周弌・佐藤祐一・山村 博・新井五郎, 新規環境浄化触媒の開発, 21 号, 136

内藤周弌・佐藤祐一・山村 博・新井五郎, 新規環境浄化触媒の開発(第2報), 22号, 102

内藤周弌・佐藤祐一・山村 博・新井五郎 新規環境浄化触媒の開発(第3報), 23号, 94

共同研究報告(IG)

田嶋和夫・今井洋子・内藤周弌・宮尾敏広、逆ミセル法による金属ナノスフェアー超微粒子の調製とその触媒活性(第 1 報)、 22 号、105

田嶋和夫・今井洋子・内藤周弌・宮尾敏広, 逆ミセル法による金属ナノスフェアー超微粒子の調製とその触媒活性(第2報), 23 号、106

田嶋和夫・今井洋子・内藤周弌・宮尾敏広, 逆ミセル法による金属ナノスフェアー超微粒子の調製とその触媒活性, 24 号, 77

共同研究報告(ⅡH)

江上 正・新中新二, AC サーボモータのインテリジェント制御とそのメカトロシステムへの応用に関する研究(第1報), 22 号, 108

江上 正・新中新二, AC サーボモータのインテリジェント制御とそのメカトロシステムへの応用に関する研究(第2報), 23 号, 110

江上 正・新中新二, AC サーボモータのインテリジェント制御とそのメカトロシステムへの応用に関する研究, 24 号, 87

共同研究報告(III)

大熊武司・荏本孝久・小川秀雄・山本俊雄・佐藤憲一・北岡正敏・窪谷浩人、強震地震計と連動したリアルタイム地震被

害予測システムに関する共同研究, 23号, 113

大熊武司・荏本孝久・小川秀雄・山本俊雄・佐藤憲一・北岡正敏・窪谷浩人、強震地震計と連動したリアルタイム地震被害予測システムに関する共同研究、24号、98

共同研究(III)

大熊武司・荏本孝久・小川秀雄・山本俊雄・佐藤憲一・北岡正敏・窪谷浩人、GIS を活用した強震計連動型即時簡易被害 予測システムに関する研究、25 号、43

共同研究報告(IIJ)

柏木利介・杉本 剛・奥野祥二・吉田賢二・日比野欣也、人工ダイヤモンド・センサの開発、23 号、117 柏木利介・杉本 剛・奥野祥二・吉田賢二・日比野欣也、人工ダイヤモンド・センサの開発、24 号、100

共同研究(IIJ)

柏木利介・奥野祥二・吉田賢二・日比野欣也・高橋和信・内堀幸夫・北村 尚・高島 健・矢島佳央理, 人工ダイヤモンド・センサの開発, 26 号, 95

共同研究報告(IK)

中山明芳・許 瑞邦・大成逸夫・穴田哲夫・阿部 晋, 超伝導多層薄膜デバイスの設計, 製作と特性評価, 24 号, 103

共同研究(ⅡK)

中山明芳・許 瑞邦・大成逸夫・穴田哲夫・阿部 晋, 超伝導多層薄膜デバイスの設計, 製作と特性評価, 25 号, 53

共同研究報告(ⅡL)

横澤 **勉・田嶋和夫・平岡秀一・今井洋子**,連鎖重合で進行する重縮合による新規精密高文子の合成とその自己組織化に 関する研究、24 号、106

共同研究(IL)

横澤 **勉・田嶋和夫・横山明弘・今井洋子**,連鎖重合で進行する重縮合による新規精密高文子の合成とその自己組織化に 関する研究、25 号、60

共同研究報告(ⅡM)

遠藤信行・大成逸夫・杉本 剛・穴田哲夫・土屋健伸,日本近海での潮流を横切る音波伝搬解析のための広角波動音波伝搬送の開発,24号,109

共同研究(ⅡM)

遠藤信行・大成逸夫・杉本 剛・穴田哲夫・土屋健伸, 日本近海での潮流を横切る音波伝搬解析のための広角波動音波伝搬送の開発, 25 号, 63

共同研究(ⅡN)

中尾陽一・浦田暎三、超精密工作機械用モーター体型スピンドルの研究、25号、66

共同研究(d)

阿部吉弘・児玉之宏・酒井一博・酒井政美・矢島幸信, 位相空間の基礎研究とその応用, 20 号, 163

共同研究(e)

柏木利介・奥野祥二・吉田賢二・日比野欣也, 高純度人工ダイヤモンドの新たなる展開, 21 号, 139

共同研究(f)

新中新二・江上 正. AC サーボモータのインテリジェント制御とその応用に関する研究。21 号、143

共同研究報告(g)

栗原謙三・西山信之・北岡正敏・唐沢 豊, FA システム制御ソフトウェアの高信頼化と高効率開発に関する研究, 22 号, 71

共同研究報告(h)

宇佐見義之・石岡俊也、絶滅した生物の生態をコンピューターで再現する、22号、75

共同研究報告(i)

中尾陽一・浦田暎三、超精密工作機械用モーター体型スピンドルの基礎研究。24 号、73

共同研究(i)

田村忠久・鳥居祥二,スペース実験のための VLSI を用いた高速画像読み出しシステムの開発,25 号,32

共同研究(K)

岩田 衛・山家京子、鋼構造建築物における環境負荷の評価、25号、36

共同研究

山口栄雄, Ⅲ族窒化物半導体における熱電気現象に関する研究, 26 号, 52

山崎 徹・小嶋英一・寺尾道仁・穴田哲夫, 波動場の計測及び解析技術の統合, 26 号, 57

亀山 敦・櫻井忠光 新しい複素環類の光化学反応による反応性化学種の選択的生成とそれを用いた光重合、26 号、67

横澤 **勉・田嶋和夫・横山明弘・今井洋子・鈴木幸光**,連鎖重合で進行する重縮合による新規精密高文子の合成とその自己組織化に関する研究,26号,77

遠藤信行・大成逸夫・杉本 剛・穴田哲夫・土屋健伸,日本近海での潮流を横切る音波伝搬解析のための広角波動音波伝搬送の開発,26号,87

鳥居祥二・田村忠久・常 進・高柳昌弘・大津一郎, 宇宙ステーションに搭載可能な多チャンネル光電子増倍管システム の開発、27 号、76

岩田 衛・藤田正則・三宅康彦・森正忠・木村修, 建築鋼構造のリユースシステムに関する研究, 27 号, 83

荏本孝久・山本俊雄・菊池敏男・杉本 實・岩楯敞広・松田磐余, IT 技術を活用した地盤情報管理のシステム化と活用技 術に関する研究、27 号、95

中山明芳・穴田哲夫・阿部 晋, 超伝導三端子素子の基礎研究, 27号, 105

宇佐見義之・北岡正敏・吉田賢二, PC クラスターで実現するスケーラブルなバーチャルリアリティ機の開発, 27 号, 114

田村忠久・鳥居祥二・常 進・高柳昌弘・Maurice Haguenauer,宇宙環境におけるシンチファイバー検出器の実証化研 究。28 号、49

島崎和司・荏本孝久・大熊武司, 平面形状の大きな免震建物の地震時の捩れ振動を伴う挙動に関する研究, 28号, 59

中山明芳・穴田哲夫・阿部 晋, 外部磁界の2次元走査法による超伝導量子干渉計の接合形状および接合配置の最適化, 28号,69

山口栄雄・米田征司、マイクロ熱電発電素子に関する研究、29号、43

田村忠久・鳥居祥二・高柳昌弘・久保 信,放射線高速計測システムの耐放射線性能向上のための研究開発,29号,51

柏木利介・日比野欣也・奥野祥二・内堀幸夫・北村 尚・高嶋 健・矢島佳央理・太田幸夫、横田 護、放射線医療・被

曝そして宇宙ガンマ線観測にも有効なダイヤモンド・リコイル・テレスコープ (DCRT) の開発, 29 号, 59

トピックス

能登正人, インターネットの光と影, 22 号, 120

荏本孝久, 1999年台湾(集集)大地震の被害調査速報, 22号, 125

朝倉史明, ゲノム解析とそれがもたらすもの, 23 号, 131

講演会

佐藤洋一郎, 気相からのダイヤモンド合成, 20 号, 166

佐藤 登, 次世代自動車と新エネルギー技術, 22号, 159

武村雅之, 関東大地震の強振動と都市防災, 24 号, 140

設備紹介

萩原健司,液体イオン化質量分析計,22号,161

施設紹介

宮尾敏広・内藤周弌, 透過型分析電子顕微鏡 JEM-2010, 29 号, 82

年次報告

所長, 20号, 167

所長, 21号, 147

所長, 22号, 165

所長, 23号, 147

所長, 24号, 142

所長, 25号, 98

所長, 26号, 119

所長, 27号, 122

所長, 28号, 78

所長, 29号, 86

編集後記

丹下 敏, 20号, 181

川崎浩司, 21号, 149

山田敬吾, 22号, 169

佐藤昌夫, 23 号, 149

平手孝士, 24 号, 144

小池芳雄, 25 号, 100

上野俊夫, 26 号, 121

室伏次郎,27号,124

朝倉史朗, 28号, 80

浦田暎三, 29号, 93

編集後記

工学研究所運営委員の先生方と事務局職員のご支援を戴き、所報 30 号を無事刊行する事が出来ました。お忙しいところ、原稿をお寄せ戴きました先生方にお礼申し上げます。当初、所報を神奈川大学のホームページに公開する事を予定しましたが、諸般の事情により次年度以降に繰り延べされる事になりました。

昨年度の所報 29 号より、原稿はテンプレートに載せてご提出戴くことになりました。システムを構築戴いた前年度の編集委員会の皆様・事務局職員のご尽力にお礼申し上げます。今から 40 年ほど前には、英文タイプで原稿を作成していましたが、数式部分は手書きでした。活字を拾って組版を整える方は、慣れてはいるものの著者の思うような形にはならず、ゲラ刷りは赤で埋まりました。現在は、複雑な数式まで著者の思うようにワードプロセッサーで打ち込めるため、ゲラ刷りに入る赤も少なくなりました。本当に便利な時代になったものと思っています。

工学部教員の研究内容を学内外に発信していく事は、ますます重要になってくるものと思われます。この観点からも、所報のホームページ掲載は有用な事であり、次年度には実現される事を期待いたしています。

(機械工学科 伊藤勝悦)

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1988年(昭和63年)4月13日 改訂1990年(平成2年)7月18日 改訂1991年(平成3年)5月29日 改訂1994年(平成6年)1月26日 改訂2005年(平成17年)1月27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嘱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, その現状が報告される.

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 その時々のト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. 百数

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.

論説・随想 原則として4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ある.
- (2) 図が印刷に不適当な場合は、専門家に依嘱 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 (No. 30)

工学研究所所長 許 瑞邦

工学研究所 所報 編集委員会

委員長 伊藤 勝悦 (機械工学科)

委 員 山口 栄雄(電子情報フロンティア学科)

池原 飛之(物質生命化学科)

山村 博(物質生命化学科)

瀬古沢照治 (情報システム創成学科)

鎌田 元康 (建築学科)

三田 一郎(物理学教室)

SCIENCE REPORTS (No. 30)

of

Research Institute for Engineering (KANAGAWA University)

Director of the Institute Zuihou KYO

Chief Editor Shouetsu ITOU (Dept. of Mechanical Engineering)

Editor Shigeo YAMAGUCHI (Dept. of Electronics and Informatics

Frontiers)

Takayuki IKEHARA (Dept. of Material and Life Chemistry)
Hiroshi YAMAMURA (Dept. of Material and Life Chemistry)

Teruji SEKOZAWA (Dept. of Information Systems Creation)

Motoyasu KAMATA (Dept. of Architecture) Ichiro SANDA (Institute of Physics)

神奈川大学工学研究所所報第30号

2007年11月27日 印 刷 2007年11月30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丁目27番

印 刷 者 中 村 栄 一 東京都港区三田5丁目14番3号

印 刷 所 昭和情報プロセス(株) 東京都港区三田5丁目14番3号

RESEARCH INSTITUTE FOR ENGINEERING KANAGAWA UNIVERSITY

3-27 Rokkakubashi, Kanagawa-ku, Yokohama, 221-8686, Japan