

工学研究所所報第35号目次

卷頭言

- 工学研究所の活動方針 新中 新二 1

総 説

- カフレスで連続血圧を計測するウェアラブルセンサの開発 酒造 正樹 2
心理物理計測の工学的応用 中易 秀敏、森 みどり 8
量子散乱状態とメゾスコピック系の電気伝導 西野 晃徳 20
疲労損傷評価のための暴風の累積作用時間の簡易評価方法
..... 大熊 武司、安井 八紀、吉江 廉祐 30

共同研究

- 人間工学視点に基づく安全円滑な平面交差交通システムの構築
—カーブミラーの視認性向上による交差点視環境改善—
..... 堀野 定雄、森 みどり、久保 登、北島 創 37
ニオブ接合を流れる超伝導電流と有限電圧電流ステップの2次元磁界特性
..... 中山 明芳、阿部 晋、穴田 哲夫 47
品質・環境 ISO と TQM 活動に基づくリーン生産マネジメント
..... 中島 健一、松丸 正延、松井 正之 56
近代朝鮮における改良温突(オンドル)の開発と商品化に関する一考察
—日本人住宅の防寒問題とその改良のテーマとして— 金 容範、内田 青蔵 66
雷雲からの放射線を探る 日比野 欣也、有働 慈治、立山 暢人、白井 達也 76

隨 想

- 研究を振り返って 青木 勇 80

- 年次報告 83
神奈川大学工学研究所所報執筆規定 95
編集後記 101

CONTENTS

Preface

Action Policy of the Research Institute for Engineering	Shinji SHINNAKA	1
---	-----------------------	---

Review

Development of Wearable Sensor for Continuous Blood Pressure without Cuff Load	Masaki SHUZO	2
Application for Engineering Problem by Psychophysical Measurement	Hidetoshi NAKAYASU Midori MORI	8
Quantum Scattering States and Electron Transport in Mesoscopic Systems	Akinori NISHINO	20
Simple Method for Evaluating Cumulative Time of Wind Speed for Estimating Fatigue Damage	Takeshi OHKUMA Hachinori YASUI Keisuke YOSHIE	30

Joint Research

Ergonomics study on the safe and smooth road traffic system at uncontrolled intersections - Improvement of the visual environment at intersections based on installing traffic convex mirrors with enhanced visibility -	Sadao HORINO Midori MORI Noboru KUBO Sou KITAJIMA	37
Two-dimensional Magnetic Field Characteristics of Superconducting Current and Current Steps at Finite voltage of Niobium junctions	Akiyoshi NAKAYAMA Susumu ABE Tetsuo ANADA	47
Lean manufacturing management based on Quality/Environment ISO and TQM activities	Kenichi NAKASHIMA Masanobu MATSUMARU Masayuki MATSUI	56
A Study on the Development and Commercialization of Improved Heating System(On-Dol) of Modern Korea	Youngbum KIM Seizo UCHIDA	66
Search for Energetic Radiation from Thunderclouds	Kinya HIBINO Shigeharu UDO Nobuhito TATEYAMA Tatsuya SHIRAI	76

Essay

Looking Back on My Research and Development	Isamu AOKI	80
---	------------------	----

Annual Reports of the Institute	83
--	----

Manuscript Submission Instruction	95
--	----

Letters from the Editors	101
---------------------------------------	-----

卷頭言

工学研究所の活動方針

新中 新二*

Action Policy of the Research Institute for Engineering

Shinji SHINNAKA*

この度、小職は工学研究所長を拝命致しました。本年度の活動方針をお示し、就任の挨拶とさせて戴きます。

工学研究所の役割は、1) 研究所員による研究の推進支援、2) 研究所員による研究の広報、3) 地域の社会・産業との連携、であるとされています。学生教育を組織運営の柱とする本学において、所員研究の広い意味での支援を運営基本にしたユニークな組織が工学研究所といえます。上記役割を果たすための工学研究所の具体的業務は、許先々代所長、山村先代所長の指導の下に今日ほぼ固まっており、今後はこれらの斎整とした展開が期待されております。小職はもとより微力でございますが、上記方針の下、尽力させて戴く所存でございます。また、これに際し、工学研究所の運営を、研究所規則に従いつつ、少々変えさせて戴きたいと存じます。

工学研究所の最高意思決定機関は、所員からこれを委託された運営委員会でございます。本年度の運営委員会は、所長1名、所属学科・教室から選出された7委員、所長指名の2委員で構成するものと致しました。工学研究所には、その運営を斎整と遂行すべく、運営委員会直下の常設小委員会として5小委員会（所報編集委員会、自己点検委員会、講演企画委員会、研究支援委員会、大型装置管理委員会）と、若干の非常設小委員会を設けています。

5小委員会委員長は、必ずしも、学科教室選出の7委員ではございません。運営委員会と5小委員会との意思疎通を図るには、5小委員会の委員長を運営委員会に参加させる必要があるとの認識に立ち、特に重要な業務を担当する2小委員会（研究支援委員会、大型装置管理委

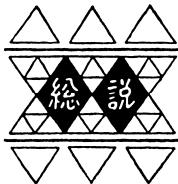
員会）の委員長を所長指名の運営委員会委員とさせて戴きました。

また、小委員会の委員構成は、各小委員会の役割を考慮の上、小委員会個々に決定させて戴きました。例えば、研究支援委員会の委員構成は学科・教室間のバランスを重視した構成とし、大型装置管理委員会の委員構成は装置の効率的管理を重視した構成とさせて戴いております。

工学研究所は、共同研究・プロジェクト研究、研究広報、講演会の企画・実行、テクノフェスタ支援、テクノサークル支援等の事業を発展的に展開致します。2012年10月現在、共同研究に関しては、5件が進行中です。また、プロジェクト研究に関しては、7件のプロジェクトAが、4件のプロジェクトCが進行中です。また、来期に向けて、共同研究・プロジェクト研究の既に多数の応募を戴き、これらの選定作業に入りつつあります。研究所主催の講演に関しては、広報的観点から、法人広報部の協力を得て、みなとみらいKUポートで、「暮らしの中のサイエンス」シリーズを展開しています。今年度のテーマは「ヒト・モノ・カネのマネイジメント」です。テクノフェスタは、開催時期の12月シフトを始めとし、斬新な企画とともに準備が進んでいることは、皆様のご存知の通りでございます。テクノサークルに関しては、3件の活動を支援中です。

以上、研究所の方針と事業概要を紹介させて戴きましたが、これらの実効のある展開には、関連委員会のご尽力のみならず、所員一同のご協力が不可欠でございます。所員皆様のご協力を改めてお願ひし、所長就任の挨拶とさせて戴きます。

*所長、工学研究所
Director, Research Institute for Engineering



カフレスで連續血圧を計測する ウェアラブルセンサの開発

酒造 正樹*

Development of Wearable Sensor for Continuous Blood Pressure without Cuff Load

Masaki SHUZO*

1. 緒言

現在、高齢化社会の進展によって、全世界で60歳以上の人口は約6億人に達したといわれる。また、慢性疾患者の数は約9億人いるとされ、これに伴い医療費が年々増加している⁽¹⁾。そこで、これまでの受身型の医療から先取型の健康管理・予防医療へのシフトによって、個人の生活の質を向上させるとともに、医療費を抑えることが急務となっている。

医療現場からのヒアリングによると、健康管理・予防医療の課題(図1)としては、「まずは現状把握」である。例えば、病院では症状が出ないこともあるので日常生活におけるデータを取りたい、連続したデータを長時間計測し変動成分を記録したい、問診による患者の主観データではなく客観データを取りたいといった要望がある。現状把握によって、身体・運動・精神などを総合的に測定し、その数値から個性、体質および現在の心身の状態を確認できたなら、次に「個人の生活習慣にあった対策の構築」が必要になる。現代人の多彩なライフスタイルや嗜好に応じた多様なプログラムの設定が必要になるであろう。また、「効果の確認」も重要であり、日常生活の中で効果を継続的に記録・提示し、次の診断にフィードバックさせることが期待されている。例えば、運動療法や食事療法を適切にこなしているか知りたい、こまめに成果を提示することによるポジティブフィードバックを期待したいといった要望がある。

そこで、H19年より5年間の計画で、日常生活における生体・環境情報を長期間に渡って常時モニタリングでき、個人が自ら生活習慣を振り返ることのできる生体・環境情報処理基盤（人間の日常生活を科学するプラット

フォーム）の開発を目標にプロジェクト（代表 東京大学山田一郎教授）を進めてきた⁽²⁾。本プロジェクトでは、医工連携のチーム体制のもとに、ウェアラブルセンサによる拘束感のないモニタリングを実現することと、複数のセンサ情報から行動・体調（体の状態）、心理・感情（心の状態）といった人間の高次情報を抽出し、量的ではなく質的な診断を可能とする分析技術を開発することが主なねらいである（図2）。

生活習慣病の多くは、運動不足、不規則な食事、睡眠不足、ストレスなどが原因といわれているので、これら

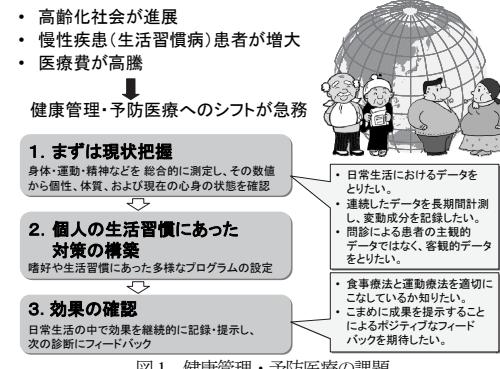


図1 健康管理・予防医療の課題

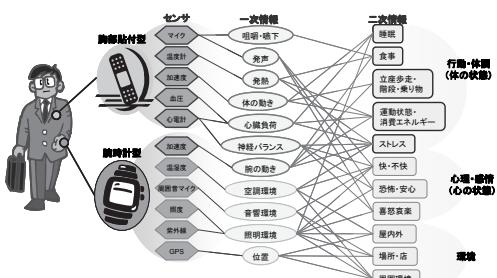


図2 ウェアラブル生体センサと分析技術

*特任准教授 機械工学科

Associate Professor, Dept. of Mechanical Engineering

表1 血圧の血圧方法の比較

Method	Advantage	Disadvantage	Sample product name (Maker)
Catheter	True value, continuous	Invasive	various type
Korotkoff	Non-invasive	Cuff pressure, sensitive to sound	水銀柱イメージ・デジタル血圧計 DM-3000 (アルス医療器(株))
Oscillometric	Non-invasive	Cuff pressure, sensitive to movement	オムロンデジタル自動血圧計 HEM-7071 (オムロンヘルスケア(株))
Tonometry	Non-invasive	Cuff pressure, sensitive to movement	生体情報モニタ BP-608 Evolution II (オムロンヘルスケア(株))
Vascular-volume compensation	Non-invasive, continuous	Cuff pressure control	連続血圧・血行動態測定装置 Finapres FINOMETER MIDI ((株)モンテシステム)

を分析できるソフトウェアモジュールについて開発を進めている。本稿では、これらを分析する上で重要な指標となる血圧に注目し、そのウェアラブルセンシング手法を紹介する。

2. 従来の血圧測定手法

血圧測定手法の分類は、侵襲性の有無による観血法(直接法)と非観血法(間接法)や、1拍ごとの測定の可否による連続法と間欠法により大別される。例えば、手術や検査などの際に、カテーテルを血管内に留置して測定されるが、観血法かつ連続法である。一方、医療現場で我々がよく目に見る、上腕に巻いたカフに加圧を行い、水銀柱と聴診器を用いて測定する聴診法は、非観血的な間欠法である。この聴診法は一定の誤差を含みつつも、今日の医療における基本測定法となっている。

手動測定による医療従事者の負担を軽減すべく、これまでに様々な自動血圧測定法が開発されてきた。代表例としては、コロトコフ法、オシロメトリック法、トノメトリ法、容積補償法などが挙げられる。現在、それぞれの特徴を活かした製品が販売されている。これらの利点欠点を比較し表1にまとめた。上述の測定法のいずれもが、病院もしくは家庭の静かで適当な室温の環境において、背もたれつきの椅子に座って数分の安静後などの制限つき条件下の単回測定を基本としている。

一方で、既知のとおり、血圧は24時間の中で常に変動している。よって、例えば高血圧患者は日常生活下でのモニタリングを要しているし、予備軍患者においては血圧の変動パターンを捕えることで心疾患などスクリーニングが期待される。こうしたニーズに対して、自由行動下血圧測定(Ambulatory Blood Pressure Monitoring, ABPM)機器が開発され、H20年より保険点数の適用にもなっている。これは、カフを用いた測定法であり、コロトコフ法とオシロメトリック法を併用した電子機器である。30分から1時間ごとにセットされたタイマーが起動し、カフ加圧と共に血圧測定が行われる。

しかし、現状のABPMでは、カフ加圧による上腕の圧迫を伴うため、これに起因する測定時の姿勢の固定や、就寝時の不快感などが解消できていない。自由な行動・姿勢において測定でき、低侵襲に連続血圧を捕えることができるなら、現在の医療に新たな知見をもたらすことができると考えられる。そこで、脈波伝播速度法に改良を加え、運動時においても連続で測定可能な血圧測定法を考案した。

3. カフレス連続血圧測定

3.1. 脈波伝播速度を用いた血圧算出原理

脈波伝播速度法では、心臓の収縮と血液の駆出のタイミングはほぼ同時であると仮定して、心電のR波と脈波の立ち上がり点の時間差である脈波伝播時間(図3)から、収縮期血圧値を算出することで血圧推定を行う。脈波伝播速度vは、Moens-Kortewegの式より、円周方向の血管壁の弾性率Eとの関係が示されている⁽³⁾。

$$v = \frac{\Delta x}{T_{\text{PTT}}} = \sqrt{\frac{Eh}{2\rho r}} \quad (1)$$

また、血圧と血管弾性の間には経験的に次式が成立する。

$$E = E_0 e^{\alpha P} \quad (2)$$

ここで、 Δx は心電と脈波の測定部位の距離、 T_{PTT} は脈波伝播時間、 h は血管壁厚、 ρ は血液密度、 r は血管内径、 E_0 は圧力無時の血管壁弾性率、 α は血管に依存する係数、 P は血管の内圧である。式(1)と式(2)より、 T_{PTT} と収縮期血圧値 P_s との関係は、 a_1 、 a_2 を係数として、次式のように示されることが従来から知られている⁽⁴⁾。

$$P_s = a_1 \ln T_{\text{PTT}} + a_2 \quad (3)$$

さらに、運動時における妥当性を確保するため、血管内径の変化に着目し、血管表面の微小区間(中心角 $\Delta\theta$)における力のつりあいの式

$$\Delta P_r \Delta \theta = 2E \left(\frac{\Delta r}{r} \right) k \sin \frac{\Delta \theta}{2} \quad (4)$$

を用いて、 b_1 , b_2 , b_3 を係数として、新たな算出式を求めた。

$$P_s = b_1 \ln \left(b_2 - \frac{b_3}{T_{PTT}^2} \right) \quad (5)$$

3.2. 運動時の検証実験

自転車エルゴーメータを用いて 160 W の段階的運動負荷を課し（図 4），血圧測定時の腕の動きがない状態でカフ血圧データを取得した校正データとした。携帯型生体アンプ（Polymate II, TEAC）を用いて測定した心電と脈波信号より脈波伝播時間を算出し、カフ血圧測定時刻の前後 30 秒間の中央値をその血圧値に対応した T_{PTT} とした。本実験において脈波信号は耳垂より得た。得られた実験参加者ごとのデータを最小二乗法によって各算出式に近似し、これを個人ごとの血圧算出式とした。1 例を図 5 に示す。

実験参加者 8 名に対して二乗平均平方根誤差を従来式（3）による算出結果と比較したところ、 $\pm 11.0 \text{ mmHg}$ から $\pm 9.9 \text{ mmHg}$ となり、特に激しい運動時（130 W から 160 W）では $\pm 9.5 \text{ mmHg}$ から $\pm 8.5 \text{ mmHg}$ となった。これは、近似には 0 W から 160 W までの全てのデータを使っていいるが、従来式は安静時から運動時にかけての血管特性変化を表現できないため、極端な状態である安静時・激しい運動時の誤差が大きくなるのに対し、提案式は血管特性変化を表現しているために安定して血圧算出を行えて

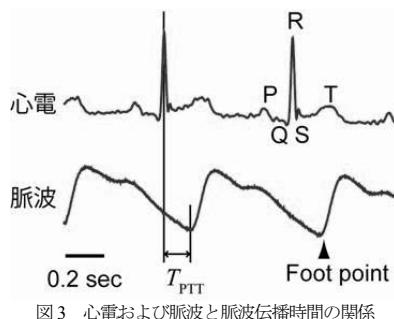


図 3 心電および脈波と脈波伝播時間の関係

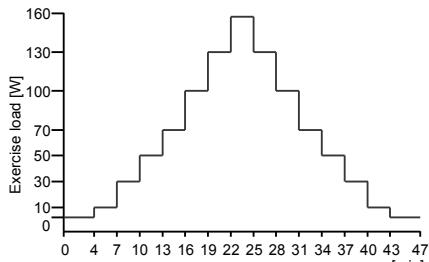


図 4 段階的運動負荷試験

いたと考えられる⁽⁵⁾。

本手法においては、個人ごとに運動負荷をかけ事前に校正式を用意しておく必要がある。健常な若者が対象であれば可能であろうが、高齢者や疾患を持つ患者になるほど、運動負荷の実施は難しくなる。今後は短時間かつ低負荷で行える簡易な校正手法の検討を模索していく必要がある。

4. ウェアラブル血圧センサの試作

前章の結果をもとに、ウェアラブルな血圧モニタリングシステムとして図 6 に示すような装置を試作した。開発時には、ユーザーが長時間、日常生活の中で使用することを想定し、携帯電話（スマートフォン）や携帯音楽プレイヤなどの既存の携帯デバイスをベースに、機能を補完する形で付属品として取り付け可能であることをめざした。よって、今回の試作機は、センサ素子と携帯デバイスとの間に制御装置が介在し、ユーザーが特別な計測機器を携帯していることなくバックエンドで計測が実行され、そのデータがいつでもどこでも参照可能であり、また、そのデータをもとに運動メニューなどのフィードバックがグラフィカルに受けられるような開発コンセプトを持たせた。

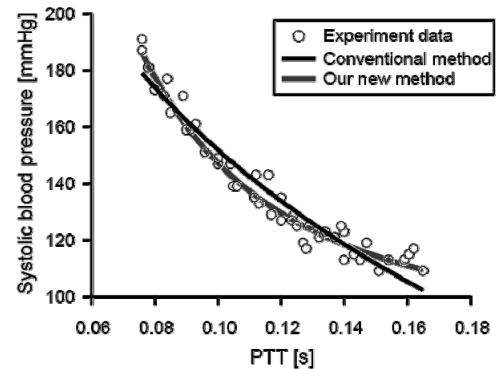


図 5 脈波伝播時間により算出した血圧結果

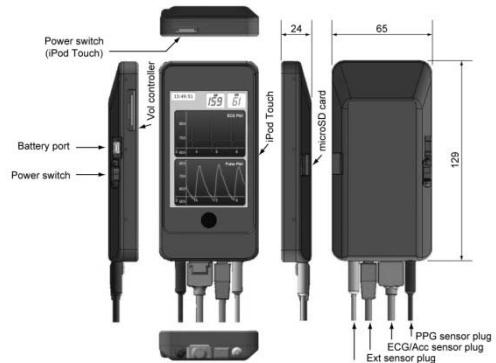


図 6 ウェアラブル血圧センサの外観図

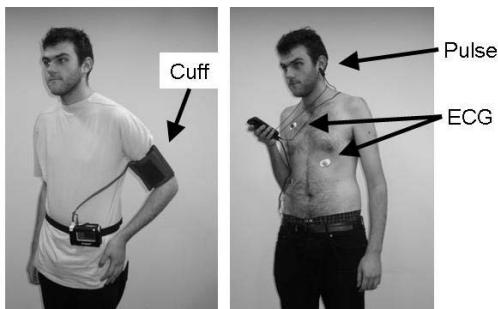


図7 従来のABPM装置(左)とウェアラブル血圧センサ(右)を装着している状態の比較

	ABPM (Cuff type)	Wearable blood pressure sensor
Cuff oppression of upper arm	yes. frequent.	no
Position while measuring	resting pose with relaxed arm	any
Pressure type	systolic and diastolic	systolic
Minimum interval of measurement	1 minute *	1 second **

* Time for inflation and deflation of the cuff is necessary.

** Theoretically beat-by-beat measurement is possible. Normal heart rate is 60–100 beats per minute.

本試作においては、Apple 社の iPod touch® (以下, iPod) をターゲットデバイスとし、これに装着可能な補助バッテリーケースの内部に電子回路基板やデータ処理プロセッサなどを収納した (この部分をコントローラとする)。ユーザが携帯するデバイスにコントローラが一体となっているため、例えばユーザは音楽を聞いたり、web ブラウジングを行ったりしながら計測が実行可能となる。また、iPod との通信を行えるため、計測の制御、データの閲覧、リモートへのデータ送信などが容易に可能である。

前節で述べた脈波伝播速度法に用いる、心電と脈波のアナログ信号は 10 bit, 1 kHz (最大) でサンプリングされる。心電は、市販のホック式電極パッドを使用し、3 点式の心電計測が可能である。ヘッドアンプのゲインは 400~2000 倍で可変、入力インピーダンスは $1 M\Omega$ 、前段には 500 Hz のローパスフィルタと 50 Hz のノッチフィルタを設けてある。脈波センサには、エルゴメータなどに用いられている市販の透過式光電脈波タイプのもの (イヤーセンサ、コンビウェルネス) を使用する。

また、従来の ABPM では患者が手書きで行動記録カードに記入を行っていたが、本モニタリングシステムにおいては、加速度情報を用いた行動判別で自動記録を行うことを想定し、3 軸加速度センサも搭載し、8 bit, 1 kHz (最大) でサンプリング可能である。オプションでイベントマーカを入力するための、マニュアルスイッチも接

続可能である。

上記のセンサ情報は AD 変換後、一時的にコントローラ内の microSD カードに保存される。iPod とはシリアルケーブルを用いて接続されており、1200 bps の通信が可能である。iPod からは、計測の初期条件の入力や、開始・終了の命令を送信することができる。また、microSD 内に蓄積されたデータを閲覧したり、iPod 内へのコピーや、外部サーバへのデータを送信することなどが可能である。

サイズに関しては、従来の ABPM 機器と比較してより可搬性が向上することをめざした。現バージョンの外形寸法は、横幅：65 mm 縦長：129 mm 厚み：24 mm であり、ポケットに収納可能である。重さは 230 g (iPod 本体 112 g およびリチウムイオン電池 (NP-20) 18 g を含む) であり代表的 ABPM 機器の 2/3 程度である (装着時の状態の比較：図 7)。計測可能な時間については、1 kHz のサンプリング条件で 1 時間の連続測定をめざした。実測で 2 時間の計測が可能である。また、ABPM と同様の間欠測定で、30 分に 1 度の計測頻度を仮定すれば、28 時間程度の計測が可能である。

本システムと従来の ABPM 機器との間で異なる点をいくつかまとめた (表 2)。なお、ここに示すウェアラブル血圧センサの特徴は固定されたものではなく、試験運用の結果を踏まえ、今後の開発過程において、必要があればその他の機能も含め、改良されていくべきものと考えられる。

5. 評価実験

現在、東京大学医学部附属病院老年病科の医療現場において臨床研究での応用を行っている⁽⁶⁾。高齢者特有の超短期血圧変動パターンを捕えること、および運動やストレス負荷時の過度な血圧上昇の連続モニタリングを目指とした。

研究への協力を得られると思われた通院または入院している患者に対して十分な説明を行い、同意を得られたものを実験参加者とした。実験には医師が立ち会い、患者へのウェアラブル血圧センサの装着は主に臨床検査技師が行った。これまでに、高血圧、糖尿病、認知症などの症状を持つ、60~85 歳の実験参加者 55 名からデータ取得を行っている。

以下に、パイロットスタディの結果の例を提示する。暗記、暗算、歩行、食事などの行動要素を含むよう指示し、自由行動させた際の例を図 8 に示す。参照値として、カフ式の自動血圧計 (NIHON KOHDEN ベッドサイドモニタ BSM2301, OMRON デジタル自動血圧計 HEM-711 ファジィ、または、フクダ電子 FM-800) も装着してお

り、約5分間隔で測定しその値も同時にプロットしている。これらのグラフより、様々な環境の変化やストレス下における高齢者の血圧の超短期変動を捕えることができていると考えられる。またカフ血圧の値(図中の白丸)と比較して、良い相関を示している。

本スタディの結果により、以下の応用が考えられる。臨床現場においては、動脈硬化の予防のための過度な血圧変動に配慮した診察が可能になるであろう。また、在宅においては、介護ヘルパーによる高齢者の血圧変動の簡易チェックが可能になり、その結果担当医への報告などにつながることが期待される。

6. 考察

6.1. ウェアラブル血圧センサの方向性

これまでの実験参加者のアンケートによると、装置自体の使用感は、装置を携帯し持続して血圧を測定するシチュエーションにおいて、装置を装着していること以外には、測定が行われていることを特に意識するようなこ

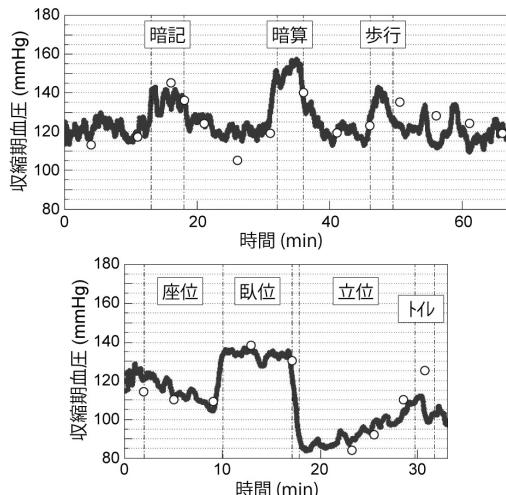


図8 ウェアラブル血圧センサによる計測結果（上：ストレス反応性昇圧に対する有用性が確認された例、下：起立性低血圧に対する有用性が確認された例）

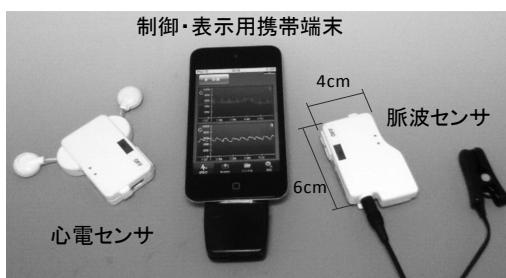


図9 無線型ウェアラブル血圧センサの試作機

とはない、というコメントが多数である。この点は、開発の方向性が適切であることを示唆していると考えている。計測部位（胸部と耳垂）から延びるケーブルについては、動作の支障になる恐れがあるが、現在開発中の無線型のデバイス（図9）で解決される見込みである。

また、既存の家庭用健康機器でよく問題になるのは、ユーザは興味本位で使用を開始するものの、比較的短期間で使用を中断・終了してしまうケースが多いことである。こうした問題は本稿におけるウェアラブル血圧センサでも生じうるが、装置を利用したサービス全体を検討する中でモチベーションの維持や利用者に本当に有用なものを検討していくべき⁽⁷⁾。データの活用方法の工夫もその対策として考えられる。装置単体でデータの収集と表示のみで完結するのではなく、外部のデータベースと連動してデータをユーザー以外の、例えば医療機関など何らかのヘルスケアプロバイダがユーザーにアドバイス等のフィードバックをする仕組みも一案であろう。ウェアラブル血圧センサの情報を外部とやりとりする機能については今後とも検討を進めたい。

6.2. 血圧測定結果の考察

今回の評価実験では、収縮期血圧が安定して把握できており、開発中のウェアラブル血圧センサが臨床現場において十分活用可能であることが示された。引き続きデバイスの完成に向けて取り組むことになる。

一方で、いくつかの考慮すべき点も明らかになってきている。全体として、血圧の変動の方向は正しく把握できていると考えられたが、従来型のカフ式血圧計の測定結果と一致しない場合が見られた。心電に比べると耳垂における脈波の到達時刻の検出にはぶれが出やすく、これが血圧の推定値のずれを引き起こす可能性がある。また、脈波伝播速度と血圧の相関はあるものの、血圧推定に影響を及ぼす因子の存在も明らかとなっている⁽⁸⁾。例えば動脈硬化の程度は個人差があり、実験参加者ごとの結果の違いはこうした部分も影響すると考えられる。こうした影響をどのように吸収していくかは今後の課題である。

また、本稿におけるウェアラブル血圧センサでは実験参加者ごとに測定値の校正を行っている。上述のように、同じ脈波伝播速度でも個人間で血圧の違いがあることから、より正確な値を得るために適切な校正を行っていく必要があると考えられる。ただ、校正の手順の簡素化や、相対変動の議論において必ずしも血圧の絶対値が必要ではないケースなどにおける校正の省略化など、使い勝手の改善は今後も検討が必要である。

7. 結言

本稿においては、運動時においても連続で測定可能な血圧測定法を考案し、また試作したウェアラブル血圧センサを用いて臨床現場で評価実験を行い有効性の確認を行った。今後このセンサを実用化に近づけるために、臨床的な観点から要求機能を明確にしていく必要がある。引き続き改良を加えながら、センサシステムとしての完成度を高めていきたい。

また、ウェアラブル血圧センサでは従来の機器に比べ、豊富な情報を得ることができる。この情報を意味のある形で医療従事者が理解できるようにするために、情報の解析、整理の工夫が必要である。「こうした情報のどの特徴が、いかに有用か?」という問題に関しては、当面はデータの蓄積と、様々な解析の試みを繰り返しながら、指標となるようなものを模索していくことになると思われる。理想的には、新しいデバイスが生まれたことによって新しい指標と、それを支える新しいエビデンスが生まれ出される、というポジティブループになることを期待したい。

より長期的な展望では、インフラの整備などの課題もあるが、こうしたウェアラブル血圧センサがある程度普及した段階では、その利用者のデータが定期的に医療機関等に収集され、個別の患者の血圧管理、治療方針の決定に応用されることも期待される。個別の患者の情報という点では、Personal Health Recordという概念があり患者情報を複数の医療機関が共有できるようになるという枠組みに発展させる可能性も出てくる。一方、大量のデータは臨床疫学研究にも有用な情報源として、医学の発展に寄与することも期待される。

謝辞

本研究は科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業（CREST）の支援によって行った。研究代表者である東京大学大学院新領域創成科学研究科 山田一郎教授、および東京大学附属病院 今井靖先生、柳元伸太郎先生、飯島勝矢先生らのご指導を頂いた。

参考文献

- (1) “つながる健康機器に、電機が集まる”，日経エレクトロニクス，vol. 2007年7月2日号, pp. 47–71, 2007.
- (2) http://www.sen.jst.go.jp/theme/theme_h19/Yamada.html
- (3) T.J. Pedley, “The Fluid Mechanics of Large Blood Vessels”, Cambridge Univ. Press, pp. 72–87, 1980.
- (4) D.J. Hughes, *et al.*, “Measurements of Young’s Modulus of Elasticity of the Canine Aorta with Ultrasound”, Ultrasonic Imaging, vol. 1, no. 4, pp. 356–367, 1979.
- (5) G Lopez, *et al.*, “Continuous Blood Pressure Monitoring in Daily Life”, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, vol. 4, no. 1, pp. 179–186, 2010.
- (6) 飯島勝矢 他, “高齢者におけるウェアラブル血圧センサーの臨床応用：～認知機能およびストレス感受性からみた血圧短期変動評価への有用性の検討～”, 人工知能学会論文誌, vol. 27, no. 2, pp. 40–45, 2012.
- (7) 浅野倫子 他, “気質分類に基づく適切な情報提示法の心理学的検討”, 電子情報通信学会技術研究報告 PRMU, vol. 109, no. 470, pp. 335–340, 2010.
- (8) W. Lu, *et al.*, “Research on the Main Elements Influencing Blood Pressure Measurement by Pulse Wave Velocity”, Frontiers of Medical and Biological Engineering, vol. 4, no. 3, pp. 189–199, 1992.



心理物理計測の工学的応用

中易 秀敏* 森 みどり**

- Application for Engineering Problem by Psychophysical Measurement

Hidetoshi NAKAYASU* Midori MORI**

1. 緒言

人を対象とする心理や挙動の計測研究には(i)アンケートやヒヤリングに基づく主観的計測(ii)人間の性能と特性の心理物理量や生理信号の計測の二通りのアプローチが良く用いられている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。このうち(i)に関する研究は、比較的多くなされ⁽²⁾⁻⁽⁴⁾、この分野の重要性が認識され始めている。これに比べ(ii)の分野の研究は、これまで主として医学や生理学および心理学の分野で盛んに研究されているが⁽⁵⁾、人間の特性を評価し工学的に応用した研究は少ない。

こうした中で、1980年代から始まる Norman が提唱した認知工学研究⁽⁷⁾は、(ii)に関与する研究として特筆される。たとえば、Card らによる研究⁽⁸⁾では人間の認知・理解・反応プロセスをそれぞれ分離して、コンピュータ内のプロセッサを模擬した人間情報処理過程のモデル化がなされている。一方、Rasmussen ら⁽⁹⁾、Reason⁽¹⁰⁾、Hollnagel ら⁽¹¹⁾による人間信頼性モデルは、人間行動をモデル化しヒューマンエラーの原因究明と防止に貢献している。しかしながら、このモデルも人間固有の非線形性や心理的要因に支配される人間の非線形性挙動を取り入れておらず、そのモデル化には限界がある⁽¹²⁾。

本稿ではこうした状況を鑑みて、著者らがこれまで前述(ii)の事柄に寄与することを目的に進めてきた一連の研究を紹介する。その研究の主な応用対象は外観検査や欠陥検査であり、工業生産プロセスのうちの検査工程に相当する作業である。この作業は生産工程の中では製品価値を左右する重要な工程であるため、今日でも検査作業の最終判定は人間の知覚能力に委ねられているケース

が多い。一方、外観検査など視覚情報に基づく判定では、検査の速度と精度が検査員の疲労などの要因によって変動するため、工程全体の中でボトルネックになっている⁽¹³⁾⁻⁽¹⁵⁾。

こうした現状にあって、画像処理や人工知能を援用した画像理解などの新しい技術を検査の自動化・機械化に導入しようとする試みも盛んに行われている。しかし、現段階においては人間による検出能力レベルに到達している自動検査法は極めて少ない。そのため、視覚情報からの判別能力の客観的評価法の研究は、検査員の技量の評価のみならず、人間の判別機構を知的機械へ移転する研究においては不可欠である。かかる見地から、本稿では視覚から得た情報を知識や経験を加えた反応として計測評価する方法を紹介する。

2. 心理の計測

2.1 精神物理学

ある人にとって「物がどのように見えるか」、「音がどのように聞こえるか」は感覚と知覚の問題である。感覚においては情報の受容と伝達が中心の問題であるのに対し、知覚はその人の感覚を基礎に「見えるものが何であるか」、「聞こえるものが何を意味しているか」を意味する。そのため知覚は、その人の知識とこれまでの経験や好み、価値観を幅広く含んだ認知・認識の問題である。感覚の研究は古くから心理学の分野で発展し、生得説と経験説などのように今日でも盛んに論争が続けられている⁽¹⁶⁾。ところで、感覚と知覚の研究には二つの側面がある。一つは研究者が自分自身の感覚・知覚経験に基づいて行う主観的方法であり、他方は光や音などの刺激に対する他人または他の動物の行動を観察し、そこに介在する感覚・知覚過程を研究する客観的方法である。

客観的方法の中でも、物理的現象とそれに対応する心理的事象との間の関係を数量的に評価する精神物理学

*教授 経営工学科

Professor, Dept. of Industrial Engineering and Management

**助教 経営工学科

Research Associate, Dept. of Industrial Engineering and Management

(psychophysics)は特筆すべき方法である。それは、この方法に基づく感覚・知覚の測定法は、刺激強度 x が観察できるかどうか、あるいは 2 種類の刺激 x_1, x_2 が主観的に同じかどうか、という質的判断と、 x_1 と x_2 のもたらす感覚の大きさや差はどのくらいかといった量的判断が測れるからである。精神物理学という名称は G. T. Fechner によるものであり、G. T. Fechner はそれまでに E. H. Weber により提唱されていた「われわれは物の間の差異そのものを知覚するのではなく、物の大きさに対する差異の比率を知覚する」とした法則に基づいて、自身の理論を展開し、感覚尺度を作ることを試み、この分野のその後の発展に寄与している⁽¹⁷⁾。

2.2 心理測定曲線

2.2.1 刺激と反応

ある刺激強度 x 以上では感覚を生じ、ある刺激強度以下では感覚をもたらさないという境界を刺激閾(stimulus threshold)と呼ぶ。しかしながら、実際には、刺激強度 x の物理量を小さい方から大きい方へ漸増させてゆく場合、 x を検出できたりできなかつたりする境界は非連続なステップ関数型のように明確なものではなく、一般に連続的な単調増加の曲線を描く。すなわち刺激強度 x が強くなるにつれて、その検出確率を P と表すと人間の反応は確率的変動を伴いながら徐々に上昇していく累積分布関数の形状を示すことが知られている⁽¹⁸⁾。

人間の知覚に対する刺激強度を考えるため、物理量 x で刺激強度が表わされるとき、その刺激強度を検出できる確率を P とすると、次式の関係がある。

$$P = f(x) \quad (1)$$

式(1)の関数は、心理測定関数(psychometric function)と呼ばれ、 x を横軸に、 P を縦軸にとって描かれる図1のような曲線を心理測定曲線(psychometric curve)と呼ぶ⁽¹⁸⁾。刺激と反応の関係は、 P を介して問題にされる場合が多いが、観察したいものは反応そのものではなく、反応カテゴリーの出現確率やその分布型である。ここでは刺激強度 x および検出確率 P の関係を図2のようにとらえ、制御可能な物理量で表される刺激強度 x に対して人間の反応をその検出確率 P として観察する。

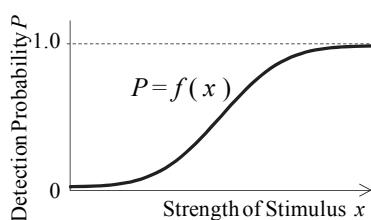


図1 心理測定曲線

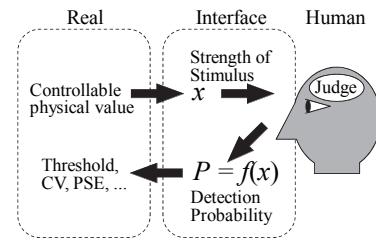


図2 外部からの刺激に対するヒトの反応

2.2.2 反応カテゴリー

精神物理学的測定で観察する反応(あるいは判断)は非常に単純なカテゴリーからなる。被験者が行う反応は、受けた刺激をその知覚特性に応じて、互いに質的に異なる少数のカテゴリーに分けることである。反応カテゴリーの多くは2あるいは3種類である。例えば、ごく弱い光刺激を提示して「見える」、「見えない」のいずれかを報告させたり、二つの音刺激を聞かせて、一方が他方と比べて、音が「大きい」、「等しい」あるいは「小さい」、というような3通りの反応を被験者に求める場合を考えられる。

2つの反応カテゴリーを用いる場合を2件法(method of two categories)、3つの反応カテゴリーを用いる場合を3件法(method of three categories)という。2件法では刺激が「強い」方向と「弱い」方向、3件法では前述の2つに加え「わからない」あるいは「等しい」という反応カテゴリーを加えた3つが一般に用いられる。なお、反応カテゴリーは必ずしも言語的なものでなく、例えばスイッチやダイヤルなどの操作であってもよい⁽¹⁹⁾。

2.3 測定の対象

2.3.1 刺激閾とPSE

刺激強度 x が強くなる方向(Upper)へ漸増するに伴って、「見える」、「聞こえる」などと判断する反応をU判断、逆に弱くなる方向(Lower)に「見えない」、「聞こえない」などと判断する反応をL判断と呼び、「わからない」あるいは「等しい」(Error or Equal)という反応はE判断と呼ぶ⁽¹⁸⁾。図3のように横軸に x 、縦軸に検出確率 P とすると、刺激強度 x の漸増に伴ってU判断の反応を示す確率は徐々に増加していく、L判断の反応を示す確率は徐々に減少していく。多くの場合は累積正規分布関数に従う曲線が得られる。このとき、ある値を設定した検出確率 P をもたらす刺激強度 x をその検出確率での刺激閾(stimulus threshold)と定義する。代表的な刺激閾は検出確率 $P=0.5$ を与える刺激強度 x である。

刺激強度 x の漸増に伴って、U判断とL判断が等しい確

率で反応する刺激強度 x が存在する。その刺激強度 x をPSE（主観的等価点： Point of Subjective Equality）と呼ぶ⁽¹⁹⁾。図3(a)は2件法の場合、図3(b)は3件法の場合を図示している。2件法の場合は確率 $P=0.5$ を与える刺激強度 x がPSEとなり、3件法の場合のPSEでの確率は $P \leq 0.5$ となる。

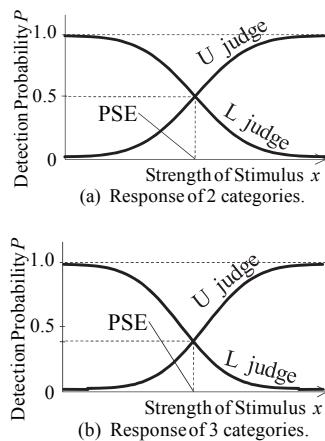


図3 心理測定曲線上の閾値とPSE

2.3.2 分別閾

比較の基準となる一定の刺激強度を標準刺激、比較の対象となる刺激強度を標的刺激といい、2つの刺激強度の差異の検出が可能な最小値を分別閾(difference limen)と呼ぶ⁽¹⁹⁾。例えば、図4のように標準刺激 x^0 と標的刺激 x を比較し、主観的に $x^0 \leq x$ であると検出するときの差 $\Delta x = x - x^0$ の最小値が標準刺激 x^0 に対する分別閾である。

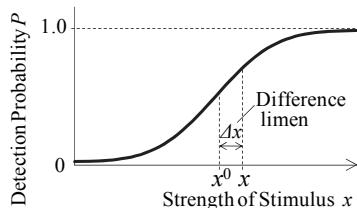


図4 分別閾

3 欠陥検査に関する知覚能力の計量的測定

3.1 検査作業における知覚認知特性の評価

Weber (1834) やFechner (1860) によって提唱された精神物理学では、物理的事象とそれに対応する心理的事象の間の関係を数量的に表現する。人間の知覚特性を外

界からの感覚刺激に対する人間の知覚反応と考えれば、この精神物理学的測定法は測定法・評価法を考える上で十分活用できる。こうした基本の方針に基づいて、欠陥検査を行う検査員の識別能力などの特徴を図5に示すようなプロセスによって計量化する。まず人が2つの対象物を見て感じた違いを回答させる実験をし、人間の反応を数量的に計測して観測値確率を算出したのち、パラメータ推定によって関数をあてはめてモデル化する。そこから導き出される欠陥検出の閾値などの欠陥検査工程を設計する上で重要な心理物理量を求める。

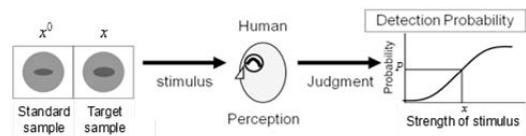


図5 検査員の識別能力を評価するプロセス

ここでは、被験者に提示される画像情報を知覚刺激、その結果得られる被験者の検出確率と刺激の強さの関係を関数化したものを作成する。知覚刺激として用いられる対象物はオブジェクトと呼ばれる。実験を通して得られる人間の知覚特性は、その個体が持っている感性の心理表出結果を精神物理学的測定法によって数量化し、普遍的な関係や個体内および個体間の特徴を示すものである。ここで対象にしているのはオブジェクトである欠陥の存在の有無であり、判断の基準となる画像と検査対象の画像を比較して人間が知覚により判断する状況を想定している。

3.2 欠陥検出能力を測る知覚評価実験法

3.2.1 知覚評価実験法の概要

図6には欠陥検査で使用するFRP(繊維強化プラスチック: Fiber Reinforced Plastics)と呼ばれる素材で作られた構造体から抽出された部材の検査画像を示す。この図の検査画像が示すように、FRP材の外観検査で発見される欠陥には、気泡、はく離、クレージング、縮みなど20種類以上のものが挙げられる⁽²⁰⁾。一方検査画像上で見いだされる画像は、均一な欠陥のない一様な灰色の画像と、これとは異なる欠陥を含む様々な形状や大きさの介在物を示す画像に二分される。よって欠陥検出作業は、検査画像内に存在する様々な形状や大きさの模様の中から、構造破損に結びつくような重要な欠陥もしくは将来それに成長すると思われるものの存在を検査画像内で発見する作業である。換言すれば、欠陥検出作業における

検査員の検出能力は、正常でない部位の中に存在するオブジェクトに関して、それらの欠陥に関する属性の刺激強度（例えば、大きさ、形など）が破損事故を引き起こす限界の刺激強度より大きいかを判断する識別能力であるといえる。

表1に示す値は、図6に示す実際の外観検査画像を画像処理によって計量し、欠陥に含まれる各種の属性情報を示したものである。これらの値を得るために欠陥画像の分類を行い⁽²¹⁾、欠陥を分類するためのIF-THENルールを表形式で表現したルールテーブル法により分類を行った⁽²²⁾。その結果、欠陥画像に含まれる欠陥を数種類に分類することができたが、画像に含まれている共通の属性値が何であるかは得られなかった。そこで、画像処理として2値化、ノイズ除去、ラベリング処理等を施して欠陥部を抽出し、その画素モーメントから最も固有値の大きい固有ベクトルを楕円の長軸方向として算出し、次に大きい固有値の固有ベクトルを楕円の短軸方向として、欠陥部と同一の面積を有する楕円をあてはめ、面積の大きい順にソートした。その結果、表1(a)に示す上位20組の属性値が得られた⁽²³⁾。これより、欠陥を検出するために利用する図形属性を、長さ(Length)、形状(Shape)、グレースケール(Grayscale)の3属性とし、表1(b)に示す各属性の平均値と標準偏差を得た。これらの数値を用いて、亀裂などの刺激強度と同じ強度を人工的に生成できるように工夫した。

上記の考えに基づき、欠陥検出能力を測る知覚評価実験では、図7に示すように人工的に作成した各属性の刺激強度を次のように定義した。まず図7に示すように、実験において被験者に提示する刺激の特徴を表すものを、楕円の長軸長さ l_1 、短軸長さ l_2 と楕円の濃度 v とし、各属性の刺激強度を表す物理量を実験用の属性強度として式(2)で定義する。ここに l_1 、 l_2 の単位はmm、 v は8bit階調(256段階)のグレースケールを白の0から黒の1までの数値としている。刺激強度が強いほど数値が大きくなるよう定義している。

$$\begin{aligned} x_1 &= l_1, \\ x_2 &= 1 - l_2/l_1, \quad 0 \leq l_2 \leq l_1 \\ x_3 &= v, \quad 0 \leq v \leq 1. \end{aligned} \quad (2)$$

こうして、これら3つの属性の刺激強度 x_1 、 x_2 、 x_3 それぞれに標準刺激強度と標的刺激強度を生成し、両者をペアとする試料图形を被験者に提示し、被験者の反応を計測する実験を実施する。被験者の判断は心理的要因により変動するため、被験者の反応を数量的にばらつきも含めて計測するため、統計的なサンプル実験を行う。

具体的な方法は、標準試料图形と各種の刺激強度を持った標的試料图形の組み合わせを数種類作成し、これらのセットをランダムな順序で複数回提示し、標準試料图形に比べ標的試料图形の刺激強度が強いあるいは弱いと感じるかを2件法⁽¹⁹⁾の反応カテゴリーとして回答させる。このとき、最終的には各段階の刺激強度を持った標的試料图形と標準試料图形の組み合わせは同じ試行回数で提示されるようにする。その結果、各段階の試行回数中に被験者が標的試料图形の刺激強度の方が標準試料图形の刺激強度より強いと感じた回数を試行回数で除した値を観測値確率として求め、こうして得られた実験結果から、被験者の心理測定曲線を統計的推定によって求める。

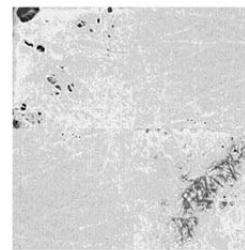


図6 Inspection image data.

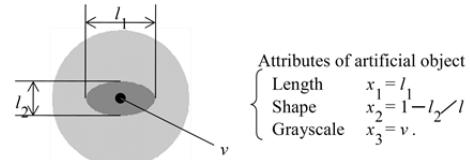


図7 刺激と刺激強度の定義式⁽³⁶⁾。

3.2.2 刺激強度決定法

人間の知覚特性の差が顕著に表れる部分は標準刺激と標的刺激が知覚として等しい効果を持つとき、すなわちPSE（主観的等価点: Point of Subjective Equality）が含まれる範囲であるため、その範囲を重点的に解析することが重要である⁽¹⁹⁾。知覚実験では弱い刺激から強い刺激に物理量が変化すれば検出確率も0から1へ変化すると仮定しており、代表的な刺激閾である検出確率0.5となる点すなわちPSEが含まれるように標的刺激を設計する。恒常刺激法の原理により、PSEは標準刺激強度の近辺になることから、標準刺激強度を含む範囲を対象とすればよい。

いま、オブジェクトに含まれる i 番目($i=1, 2, 3$)の属性の標的刺激試料の刺激強度について予め複数の強さの段階を設定して実験に用いる。第 j 段階の刺激強度を

x_{ij} と表すとき、この値を各属性の標準刺激強度 x_i^0 と階差 d_i から式(4)で生成する^(37, 38).

$$x_{ij} = x_i^0 + \left(j - \frac{L}{2} \right) d_i, \quad (3)$$

$$(i=1, 2, 3, j=1, 2, \dots, L),$$

表1 欠陥検査画像から求めた欠陥データ

(a) Result of Attributes by image processing (top 20 of Area).

No.	Area(mm ²)	Length(mm)	Shape	Grayscale
1	86.939	19.633	0.928	0.597
2	5.130	1.730	0.454	0.586
3	2.928	3.329	0.916	0.472
4	2.771	2.060	0.792	0.570
5	1.936	1.307	0.639	0.549
6	1.839	2.628	0.915	0.534
7	1.827	1.068	0.491	0.484
8	1.573	1.040	0.538	0.561
9	1.331	0.960	0.543	0.571
10	1.222	1.730	0.870	0.552
11	1.174	1.182	0.733	0.572
12	1.137	0.783	0.409	0.575
13	1.125	0.775	0.404	0.571
14	1.065	0.717	0.341	0.574
15	1.016	1.298	0.808	0.570
16	0.871	1.144	0.788	0.483
17	0.835	0.645	0.361	0.530
18	0.823	1.040	0.758	0.447
19	0.787	0.915	0.701	0.571
20	0.774	0.919	0.708	0.571

(b) Statistical values of attributes.

	Length	Shape	Grayscale
Mean value	$m_1 = 4.544$	$m_2 = 0.639$	$m_3 = 0.547$
Standard deviation	$s_1 = 14.83$	$s_2 = 0.197$	$s_3 = 0.422$

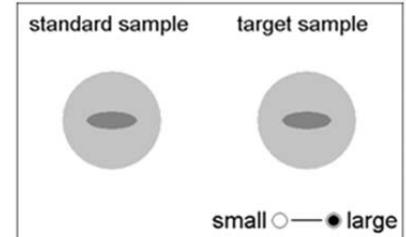
$$x_i^0 = m_i = \text{const}, \quad d_i = \frac{s_i}{L-1} z_i. \quad (4)$$

式(3), (4)で x_{ij} は、属性 i における第 j 段階での刺激強度を示しており、 L は段階総数を表している。標準刺激強度 x_i^0 は一定値として表1(b)の平均値 m_i とする。標準刺激強度 x_i^0 と標的刺激強度 x_{ij} の差を階差 d_i の $\{j-(L/2)\}$ 倍として設定している。階差 d_i は表1の標準偏差 s_i を変換したものとする。なお、階差 d_i の係数 z_i は、分解能に関する係数で、階差が小さすぎると判別が困難となり、大きすぎると刺激強度の差が顕著になって実験精度が悪くなるため、その調整のための係数である。

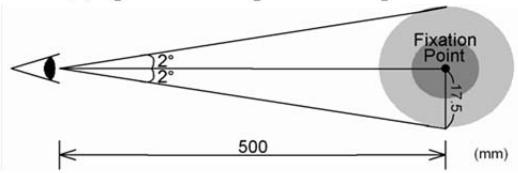
3.2.3 実験に用いる提示試料の設計

本実験に用いた試料のオブジェクトを設計する数値の調整には表1の統計量を利用して、人工的に描く属性の刺激強度を決定した。この考えに基づいて求めた視覚刺激試料のサイズの基準と試料提示イメージを図8に示す。試

料のサイズは、図8(b)に示すように有効な視力の範囲である視野角2度が保持できるようにスケール変換する。薄灰色の円形の背景の中心に検査対象のオブジェクトを配置した。これは、視覚刺激が被験者に提示されて一对比較の像として被験者が感じる際、マッハ効果⁽²⁴⁾などの心理的要素が被験者の感覚にできるだけ介入しないように中央配置のオブジェクトと背景との輝度的要素が被験者の感覚にできるだけ介入しないように、中央配置のオブジェクトと背景との輝度差が小さくなるよう配慮したためである。このため、検査に用いる図形の検査対象部位に相当するオブジェクトは図中に示すような濃灰色の橢円形状として、3.2.1項で示した3つの属性、すなわち「長さ」、「形状」、「グレースケール」をそれぞれ変化させたものを薄灰色の背景の上に重ねた画像を試料とするとした。なお、背景とする円形画像の濃度としては検査画像から欠陥の存在しない正常部位の濃度に相当するグレースケール値0.4の薄灰色とした。



(a) Specimen for paired comparison



(b) Distance from eye point

図8 検査の資料サンプルと検査条件^(36, 37).

標的刺激試料の刺激強度 x_{ij} ($i=1, 2, 3, j=1, 2, \dots, L$) については、その段階数 L を7段階とした。段階数があまり多くなりすぎると実験回数が増大して実験の要する時間が長くなり、また少ないと実験データが少なくなるため解析する際の推定精度の低下が懸念されるとの理由から、7段階が適していると判断した。被験者は図8(a)のように提示された標準刺激試料の刺激強度と L 段階ある標的刺激試料の刺激強度を一对比較し、標的刺激試料の方が刺激強度が強いか弱いかを回答する。7段階の刺激強度を設定する標的刺激試料について、提示する図形は3つ全ての属性を含めて描画するが、3種類の属性のうち1種類の属性の数値のみを変化させ、他の属性は標準刺激

強度に固定する。このようにして、比較対象となっている属性以外の属性は標準刺激強度の数値を用いて描画し、標準試料図形と差異があるのは比較対象の属性のみに限定する。

オブジェクトに含む3つの属性の標準刺激試料の刺激強度 x_i^0 ($i=1, 2, 3$) については、それぞれ表1の平均値 m_i とするが、長さの属性のみ前述のスケール変換の影響があるため、所定の範囲に納まるように調整して長さの3.85倍を施している。また、被験者の本来持っている知覚特性を精度よく得るためにには、人間の知覚特性の適応的分解能は極めて高いため、はじめは見分けることができないくらいの微細な刺激強度の差を用いる必要がある。そのため、階差 d_i を決定する係数 z_i は、本実験では、コンピュータ画面の解像度や色の階調表示も考慮して、可能な限り細かくなるように調整し $z_1=0.06$, $z_2=0.33$, $z_3=0.17$ とした。

オブジェクトの長さを属性として有する提示試料の生成のため、その刺激強度を式(5)のように設定した。ただし、このとき他の属性の刺激強度はその属性の標準刺激強度に固定している。

$$x_{ij} = x_1^0 + (j-3.5)d_1 \quad (j=1, 2, \dots, 7), \quad (5)$$

$$x_1^0 = 3.85m_1 = 17.5, \quad d_1 = 0.58,$$

ただし、

$$x_{2j} = x_2^0 = \text{const},$$

$$x_{3j} = x_3^0 = \text{const}.$$

オブジェクトの形状を属性として有する提示試料の生成のため、その刺激強度を式(6)のように設定した。ただし、このとき他の属性の刺激強度はその属性の標準刺激強度に固定している。

$$x_{2j} = x_2^0 + (j-3.5)d_2 \quad (j=1, 2, \dots, 7), \quad (6)$$

$$x_2^0 = m_2 = 0.639, \quad d_2 = 0.011,$$

ただし、

$$x_{1j} = x_1^0 = \text{const}, \quad x_{3j} = x_3^0 = \text{const}.$$

オブジェクトのグレースケールを属性として有する提示試料の生成のため、その刺激強度を式(7)のように設定した。ただし、このとき他の属性の刺激強度はその属性の標準刺激強度に固定している。

$$x_{3j} = x_3^0 + (j-3.5)d_3 \quad (j=1, 2, \dots, 7), \quad (7)$$

$$x_3^0 = m_3 = 0.547, \quad d_3 = 0.012,$$

ただし、

$$x_{1j} = x_1^0 = \text{const}, \quad x_{2j} = x_2^0 = \text{const}.$$

以上のようにして刺激強度の調整を行い、3つの属性 x_i (i

=1, 2, 3) の刺激強度を設定した。実際の実験においては極めて微少な刺激強度の変化を与える試料を用いている。その数値を表2に示す。図9には人工的に作成して実験に用いた属性「長さ」の標準試料図形および標的試料図形の見本を示す。なお、この図中で描かれている刺激強度は、説明用として実際のものより強度を誇張して表示している。

表2 検査資料に用いた刺激強度値（標準試料と標的試料）

i	x_i^0	d_i	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}
1	17.50	0.58	16.05	16.63	17.20	17.80	18.38	18.95	19.53
2	0.639	0.011	0.611	0.622	0.633	0.644	0.655	0.666	0.677
3	0.547	0.012	0.517	0.529	0.541	0.553	0.565	0.577	0.589

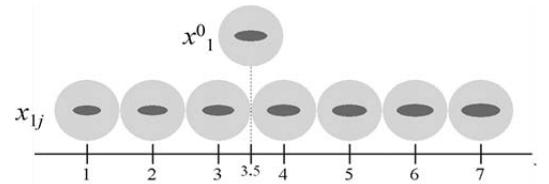


図9 検査に用いた7段階刺激強度の提示試料

3.2.4 実験方法

図8(a)の左側にある標準試料図形の刺激強度は一定とし、これに対して数種類の刺激強度を有する標的試料図形を右側に描き、これを被験者に有限回数提示して被験者の反応を観察する。すなわち、図8(a)のように被験者に対して左側の標準試料図形と右側の標的試料図形の一対比較による刺激強度の差をみた被験者が同一の比較および標準試料図形の組み合わせ回数に対し何回刺激強度が強いと回答するかを記録する。これは、段階 j の刺激強度 x_{ij} に対し、被験者が反復回数 N 回中 n_j 回刺激強度が強いと反応すれば、この被験者は刺激強度に対して確率 $p_j = n_j/N$ で反応したと計測できるからである。よって、 j を有限数設定し、 x_j を横軸に、観測値確率 p_j を縦軸にプロットすれば図5右側の心理測定曲線を計量的に描くための実験結果が得られる。

実験では、3種類の属性 i ($i=1, 2, 3$) 每に7段階の刺激強度をもつ図9に示すような標的試料と標準試料の一対比較を行う。このとき、被験者は標的試料の刺激の強さ x_{ij} が標準試料の x_i^0 より“強い”か、“弱い”のどちらかを答えるように教示する。1段階あたりの反復数 N の各段階での標的試料による一対比較で $x_{ij} \geq x_i^0$ と反応する回数 n_{ij} が得られるので、 n_{ij}/N で $\Pr(x_{ij} \geq x_i^0)$ に相当する観測値確率 p_{ij} を求める。以下は1つの属性について

の実験方法について述べることとするため、属性を示す添字*i*を省略する。

1属性における試行回数は、段階数*L*と反復数*N*の積で $7 \times 30 = 210$ 回の試行とする。恒常刺激法に基づく実験における標的刺激試料の呈示順序は心理的影響を抑えるために一様乱数を基にしたランダムな順序にシャッフルする。採用したシャッフルのアルゴリズムは次のとおりである。なおここで用いる乱数はコンピュータ上での擬似乱数⁽²⁵⁾であるが1000回以下の試行回数であれば擬似乱数の周期性の影響はない⁽²⁶⁾。

- (1) 試行回数分の配列 $T[1]$ から $T[L \times N]$ までを定義し、各配列には値として1から*L*までの数をそれぞれ*N*個ずつ代入する。
- (2) カウンタ用変数aとランダム用変数bを定義し、aの初期値は1とする。
- (3) 一様乱数に基づく関数より1から $L \times N$ までの乱数を発生させbに代入する。
- (4) $T[a]$ と $T[b]$ の値をスワップ(交換)する。
- (5) カウンタ用変数aをインクリメント(カウント)する。
- (6) カウンタ用変数aが $L \times N$ を超えるまで(3)からの手順を繰り返す。

試料の呈示はコンピュータにより制御され、標準刺激試料と標的刺激試料の一対がコンピュータディスプレイ上に表示される。実験データとしては段階毎の観測値確率を得る。1段階あたりの反復回数 *N* での一対比較で標準刺激試料 x^0 と標的刺激の段階 *j* の試料 x_j を一対で呈示し、被験者は x^0 より x_j の刺激強度のほうが「強い」と反応した回数 *n_j* が得られるので観測値確率は次式で求められる。

$$p_j = n_j / N. \quad (8)$$

恒常刺激法に基づく実験の手順として、1属性における手順を以下に示す。複数の属性を実験する場合はこの手順を属性の数だけ実行する。属性の標的刺激の段階数を *L*、1段階当たりの反復回数を *N* として、試行回数 $L \times N$ 回の順序はランダム順とする。予めその属性の標準刺激の試料 x_0 と標的刺激の試料 x_j を *L* 段階分用意する ($j = 1, 2, \dots, L$)。

Step 1: 標準刺激試料 x^0 と標的刺激の段階 *j* の試料 x_j を一対で被験者に呈示する。

Step 2: 被験者は x^0 より x_j の刺激強度のほ

うが「強い」あるいは「弱い」の2つの反応カテゴリーによる2件法で回答する。

- Step 3: x^0 より x_j のほうが「強い」と反応した回数 *n_j* をインクリメント(カウント)する。 $(n_j \leftarrow n_j + 1)$
- Step 4: 試行回数が $L \times N$ 回となるまで Step 1からの手順を繰り返す。
- Step 5: すべての試行を終えたら各水準の観測値確率 *p_j* を求める。

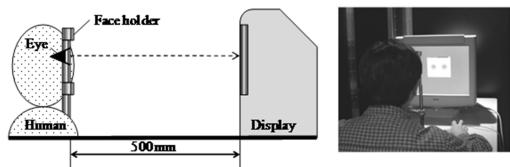


図10 検査状況の外観と寸法諸元

表3 提示試料のディスプレイ内での輝度 (cd/m²)。

Value of grayscale	luminance (cd/m ²)
White 0.000	150.0 ± 10.0
Gray 0.547	29.0 ± 5.0
Black 1.000	0.70 ± 0.05

図10に実験風景を示す。実験はこの図が示すように、あご載せ台に固定された被験者の眼前500 mmの位置に実験用の試料提示用ディスプレイを設置し、実験プログラムにより一対比較実験を行って被験者の反応を記録した。なお、実験プログラムでは、表示される試料の大きさがディスプレイの画面サイズおよび解像度の違いによって変動しないよう、Microsoft社製Visual Basic 6.0の開発言語仕様にあるtwipと呼ばれる画面上の長さの単位を用いてコーディングした。この単位はディスプレイの画面サイズや解像度に依存しておらず、1cm=567twip、1インチ=1440twipと定義されており、すべてのディスプレイ上で同じ大きさで表示させることができるよう考慮されている⁽²⁷⁾。これにより、視野角2度で距離500mmの視野となる直径35 mmの真円の背景上に前述の式で求めた刺激強度の標準および標的サンプルが図8(a)に示すように、感能検査での一対標的試料として表示できる実験システムとなっている。また、実験環境としてコンピュータディスプレイについてはCRTとLCD等の表示原理の違いや設定によって輝度が異なるため、同じ条件にするために輝度を表3に示す数値の範囲に調整した。

3.3 実験結果と考察

3.3.1 被験者と教示事項

実験における被験者は、裸眼または矯正の視力が1.0から1.5までの、20才から28才までの49人（男44、女5）とし、実験の目的、内容、回答方法を十分説明したのち同意を得て実施した。実験時の教示によって被験者心理が揺れないように統制するため、被験者には次のように統一的に教示した。

- (1) 3種類の属性毎に実験があること。
- (2) 各属性の反応カテゴリー（2件法）
- (3) 画面中央付近にウインドウが表示され、その中の左に標準刺激、右に標的刺激の図形が表示されること。
- (4) 各属性の標準刺激より標的刺激のほうが強いあるいは弱いを回答すること。
回答はマウス操作で行うこと。
- (5) 回答する際にはあまり深く考え込まないこと。
- (6) 実験開始から終了までの時間（見込み）。

3.3.2 心理測定曲線のパラメータ推定

実験から1属性あたり L 段階分のデータとして、反復回数 N 回中「強い」と反応（U判断）した観測値 n_j （ $j=1, 2, \dots, L$ ）が得られる。「強い」もしくは「弱い」の2件法による反応カテゴリーの観測値 n_1, n_2, \dots, n_L は、平均 p_j 、分散 $p_j(1-p_j)$ の2項分布に従う。

$$P(n_1, n_2, \dots, n_L) = \prod_{j=1}^L \frac{N_j!}{n_j!(N_j-n_j)!} p_j^{n_j} (1-p_j)^{N_j-n_j}. \quad (9)$$

上式において、 p_j は式(2)で定義した確率 P の観測値確率とみなすことができ、これを平均と標準偏差をもつ正規分布の累積分布関数による確率で与える。

$$p_j = \Phi(y) = \int_{-\infty}^{y_j} \phi(t) dt, \quad y_j = \frac{x_j - \mu_x}{\sigma_x}. \quad (10)$$

ここに、 $\Phi(y)$ と $\phi(t)$ は標準正規分布の確率密度関数と累積分布関数である。そのため、観測値確率 p_j が得られた時、これらのデータより母集団分布のパラメータ推定は最尤推定法で行われる。観測回数 n_j を反復回数 N で除して

た観測値確率 p_j に対応する正規偏差 y_j は正規分布

する変量 x_j と直線関係を示すため、その推定値は次式

$$\hat{y}_j = a + bx_j \quad (11)$$

を当てはめ、そこから逆に

$$\hat{y}_j = \Phi^{-1}(p_j) \quad (12)$$

の関係を使って理論確率 P_j を求める。 $\Phi^{-1}(p_j)$ は標準正規分布の累積分布関数の逆関数を表す。すなわち、

$$P_j = \Phi(a + bx_j) \quad (13)$$

の理論確率 P_j がパラメータ a, b の関数で表されるので、式(13)における正規分布関数のパラメータ推定は式(8)を尤度関数とする。

$$\begin{aligned} l(a, b) &= \sum_{j=1}^L \log \frac{N_j!}{n_j!(N_j-n_j)!} + \sum_{j=1}^L n_j \log P_j + \sum_{j=1}^L (N_j - n_j) \log (1 - P_j)^{N_j-n_j} \\ &= \sum_{j=1}^L \log \frac{N_j!}{n_j!(N_j-n_j)!} + \sum_{j=1}^L n_j \log \Phi(a + bx_j) + \sum_{j=1}^L (N_j - n_j) \log [1 - \Phi(a + bx_j)]^{N_j-n_j} \end{aligned} \quad (14)$$

なる対数尤度関数を a, b で偏微分した式を零として連立方程式の解として最尤推定量が求められる。

ところで、この連立方程式は非線形な方程式になるので解析的には解けない。このためこれを解くには数値解法に頼らねばならず、式(15)の漸化式を用いるNewton-Raphson法に基づくアルゴリズムで逐次計算を行い収束解として解く。そうすればこの収束解は最尤推定量になる⁽²⁸⁾。

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}_k + \left[\begin{array}{cc} \frac{\partial^2 l}{\partial a^2} & \frac{\partial^2 l}{\partial a \partial b} \\ \frac{\partial^2 l}{\partial a \partial b} & \frac{\partial^2 l}{\partial b^2} \end{array} \right]_k^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial l}{\partial a} \\ \frac{\partial l}{\partial b} \end{bmatrix}_k. \quad (15)$$

式(15)の a, b を k 次の値から $k+1$ 次の値に更新する過程では式(15)の値を用いる。この方法は正規偏差で表現すると直線になる性質を利用して、更新時の新しい正規偏差の候補として式(16)による仮の正規偏差 y'_{jk} （これをプロピットと呼ぶ）を用いて直線を当てはめるため、プロピット法と呼ばれている⁽¹⁹⁾。

$$y'_{jk} = \hat{y}_{jk} + \frac{p_j - \Phi(\hat{y}_{jk})}{\phi(\hat{y}_{jk})}. \quad (16)$$

ここに、 \hat{y}_{jk} は k 次の計算中に当てはめた式(11)の直線

から読みとった正規偏差を表している。

人間の感覚実験においては、判別結果にバラツキが生じることを前提としているが、特に熟練者を対象とした場合には、明確な判別によりバラツキが小さい、あるいは

はバラツキがない場合も想定される。その場合は観測値確率 p_j が0または1になるが、それに対応する正規偏差が $\pm\infty$ となるからその計算処理は困難であり、通常の回帰分析ではこれを除いた残りのデータしか扱えない。ところが、ここに示したプロビット法では式(16)によって仮の正規偏差を導入することで $\pm\infty$ となることを回避できる。この特徴によって、観測値確率が0または1になる情報も排除せずに実験から得られた情報全てを含めて計算することができ、人間の感覚実験におけるパラメータ推定法に適している。

3.3.3 心理測定曲線

実験結果に当てはめる心理測定曲線のパラメータ推定には既述のプロビット法を用い、推定における収束条件は 10^{-5} 以下とした。パラメータ推定における収束計算回数はすべて数回で収束した。プロビット法により推定されたある被験者の心理測定曲線の一例を図11に示す。この図中における縦軸の確率 P は、標的刺激試料の刺激強度 x_{ij} が横軸に示される値をとるときに被験者が標準刺激試料の刺激強度 x^0_i より「強い」と反応する確率である。換言すれば、 P は「 $x_{ij} > x^0_i$ 」と感じる確率である。心理測定曲線より、標的刺激試料の x_{ij} が大きくなるにつれ、 P も0から1に増加する傾向は、すべての被験者に対し同様であった。しかし、被験者によっては属性の種類によって急激な増加を示す場合とゆるやかな増加曲線を描く場合があり、そのような傾向を定量的にとらえることができた。

図11には比較のために回帰分析による曲線が描かれている。図中破線で示す回帰分析の曲線よりも、図中実線で示すプロビット法による曲線のほうが0または1の観測値確率が心理測定曲線の推定において、有効な確率重み

として効いている様子がよくわかる。

さて、被験者49名に対して得られた心理測定曲線から求まる確率特性値PSE、PSEと標準刺激との差、標準偏差(SD)および変動係数(CV)を比較して、これらの心理特性を大別すると4種類のカテゴリーに分類できるため、そ

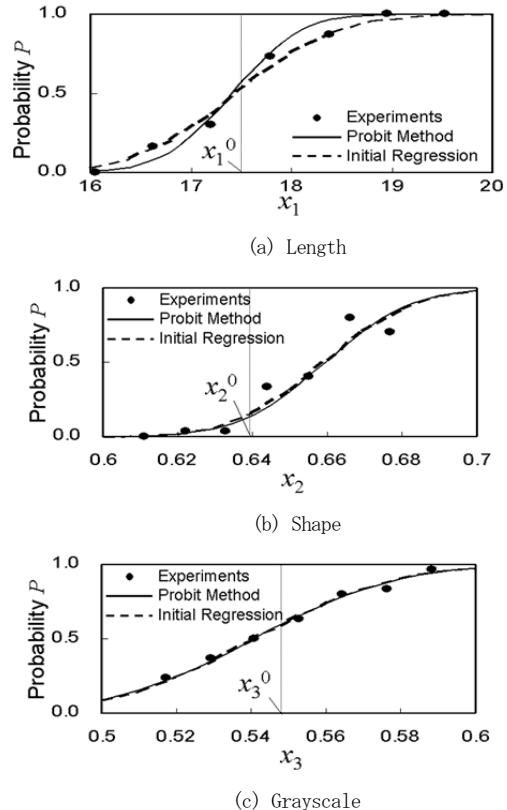


図11 実験で得られた心理測定曲線の一例

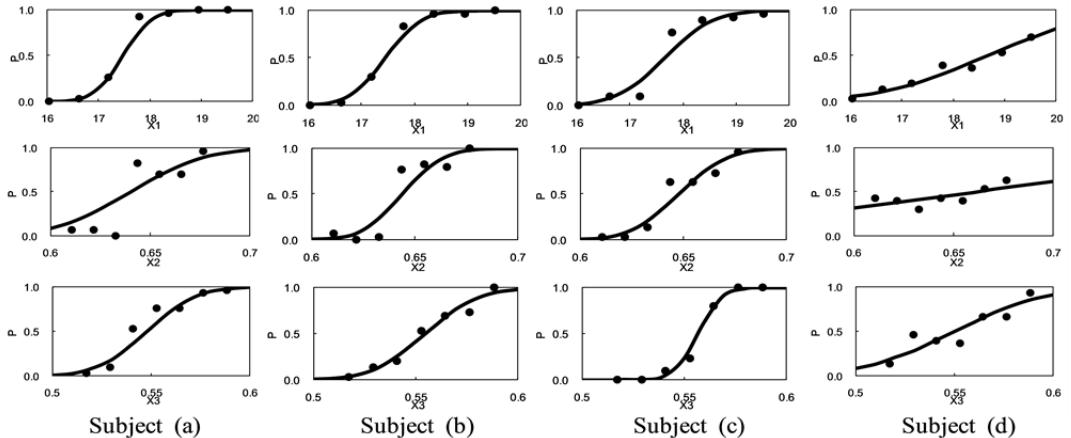


図12 実験から得られた典型的な心理測定曲線

それぞれの心理特性曲線の挙動を表す被験者の例を図12に示す。これらの図における縦軸の確率 P は、標的試料の刺激強度 x_{ij} が横軸に示される値をとるときに被験者が標準試料の刺激強度 x_i^0 より「強い」と反応する確率である。換言すれば、 P は「 $x_{ij} > x_i^0$ 」と検出する確率である。図の曲線は傾きが大きいほど、すなわち標準偏差が小さいほど、その属性に対する被験者の判別精度が高いことを示している。属性毎に標準偏差を小さい順にソートして第一四分位以上を判別精度が高いとし、第三四分位以下を判別精度が低いとした。図12の(a), (b), (c)はいずれかの属性に対して判別精度が高かった被験者のグラフで、(d)はいずれの属性も判別精度が低かった被験者のグラフである。全ての属性について判別精度が高かった被験者はいなかった。(a), (b), (c)のようにいずれかの属性に対する判別精度が高い結果となった被験者が多くみられ、図形属性の種類によってその被験者が得意か不得意かという個体の持つ特徴を計量的に示している。

一方で(d)のような判別精度がすべての属性とも低い結果を示す被験者は4人であった。このような被験者は、属性を問わず判断のバラつきが大きいことから、正当な実験参加をしていない可能性も考えられるが、誠意的に実験に協力していたことから、その個体の特性としては、この実験が当被験者にとって判別しづらい感覚刺激の一対比較実験であったと考えるほうが妥当であろう。

このように標準偏差の比較によって、その個体の持つ傾向・特性を読み取ることができる。これらの結果は、本実験方法が各属性に対する被験者の特性が判別精度という計量的な指標で比較できることを示している。

次に各属性に注目して考察する。変動係数(CV)に注目して分類すると、長さに関する属性 x_1 については、平均値を中心として前後に大きな偏りなく分布しているが、それに対して属性 x_2 と x_3 は平均値以下がそれぞれ36人(73%)、35人(71%)で大きく偏っており、変動係数が0.100を超える大きな変動を示す被験者は x_2 が3人(6%)、 x_3 が6人(12%)いた。このことから、図形の「長さ」を比較することには多くの人間が慣れているため個人差はあまりないが、「形状」や「グレースケール」については、変動係数が非常に大きくなる傾向すなわち判別精度が低くなる被験者が存在し、この属性はその被験者にとって不得意な属性であることが推察される。よって、「形状」や「グレースケール」という属性は「長さ」の属性より被験者によって個体差が出やすい属性であることが考察される。

また、グレースケールに関する属性 x_3 については、図12のように図中の被験者(a), (b), (d)のように属性 x_2 と同様に標準刺激との差が微小なところでは判断の揺らぐ

傾向がある個体と、図中被験者(c)のようにきれいに判断している個体に大別され、これは前述の考察と同様の傾向を示している。属性 x_1 , x_2 が空間的な属性であるのに対し属性 x_3 は光学的な属性であり、グレースケールに関しては個体の視覚特性によって得意な人と不得意な人の差が顕著に表れるものと思われる。

さらに、PSEと標準刺激との差を調べると、他の属性に比べ「形状」に関する属性 x_2 については、ほとんどの被験者が正であり4人(8%)だけが負となった。差が正であるということは、標準刺激よりも鋭い形状を多くの被験者はPSEとしていることを表している。これは、感覚の大きさの増加分は元の刺激の強さと刺激の増加分の比に比例するとしたWeber-Fechnerの法則に従えば、同じ階差で刺激強度が変化しても鋭い形状の方が感覚的な形状の違いはより顕著に出るために、判別しやすい鋭い形状の方向に偏ったものと考えられる。

3.3.3 PSE曲線による個体間変動の評価

個体間変動を検討するために、被験者49人の心理測定曲線より求めたPSEを小さい順にソートし、それから平均ランク法⁽²⁹⁾によって観測値確率を求め、正規確率紙上にプロットしたものを図13に示す。平均ランクの計算手順は次のとおりである。

Step 1: k 個のデータ (PSE) を小さい順にソートして、1から順番に番号 i を付ける。

Step 2: 平均ランク法における確率 q_i を次式で計算する。

$$q_i = i/(k+1) \quad (17)$$

Step 3: 横軸にPSEの物理量、縦軸に得られた確率に対応する正規偏差 $y_i = \Phi^{-1}(q_i)$ をプロットする。 $(\Phi^{-1}(\cdot))$ は正規分布の累積分布関数の逆関数)

Step 4: プロットした点の回帰直線を求め、この線から全体の平均値および標準偏差を算出する。

図13には被験者集団全体としての平均と標準偏差およびその変動係数を図中に示している。前項では標準偏差が小さいほど判別精度が高い点を考察したが、標準刺激強度と主観的な閾値であるPSEとの差も判別の正確性の指標となる。図13(b)から、属性 x_2 は他の属性と比較して標準刺激強度近傍に集中しやすいことがわかる。これは、「形状」の判別が、人間にとてある程度の差があれば他の属性より個体差が出にくい図形属性であることを示唆している。すなわち、「形状」を判別するためには、ある程度の差が必要だが、判別結果に主観的な影響は受

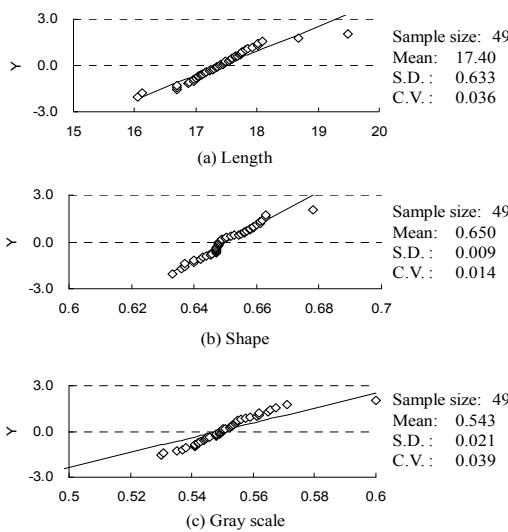


図13 PSEの分布

けにくいという図形属性の特性が推察される。

図13は、非常に重要な情報を提供している。それは、ここで示したPSEの標本分布は個体の変動も含めた特性が評価でき、しかもPSEの統計的性質より、平均値は真のパラメータの一一致推定量⁽¹⁸⁾であるため、サンプル数を大きくすれば精度が上がり、自動検査の閾値としても利用できる。したがって、欠陥検査工程の機械化に当たり、熟練者の技能や経験を抽出する方法としても有効であると考える。

5 結言

安全・快適・安心を支える技術として重要な役割を果たしている欠陥検査において、優れた能力を発揮する熟練検査員の技能・特性を抽出し、機械に技能移転するためには何が必要であろうか。

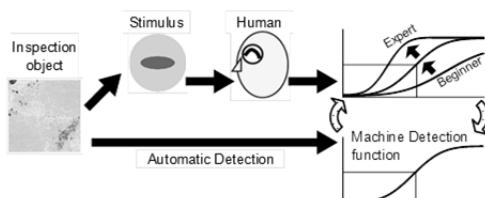


図14 検査員の知覚特性を利用した自動欠陥検査へ

熟練検査員の多様かつ高度な欠陥検出は、欠陥に関わる事象の正しい認識と、正しい判断によるものである。この事象認識と判断という創造的なプロセスを担える媒体は人間である。そこから、欠陥検査の知能化・高度化には人間と機械が調和・融合し、相互に関与し合うとい

う図式が浮かび上がってくる。では、調和するためにはどのような形態が考えられるだろうか。欠陥検査では、判別確率を保証できる閾値を解析的に求めるこどもできれば、自動検査システムの閾値設定に応用できる。そこで、熟練者の経験・知識・技量を反映した感覚・知覚に基づく閾値分布の特性を抽出できれば、熟練者の知覚特性を活かした欠陥検査工程の自動化システムの開発に寄与できるかもしれない。こうした発想に基づき図14には、熟練者の知覚特性を関数関係で表現し、その関数に基づいた欠陥検出の自動検査システムの閾値チューニングの流れを示している。この図に示すように、熟練者が一般者と大きく異なる点は、欠陥検査におけるその卓越した非線形な知覚特性を表す関数形である。個々の熟練者と一般者との相違点を検討することにも本手法は使用でき、集団の傾向を効率的に評価することも可能であるため、熟練検査員集団全体の知覚特性やその傾向を抽出し、知能機械としての自動検査システムの検出閾値エンジンにその非線形関数を移植することは不可能ではないと考えられる。

なお、本報では紙面の都合で割愛したが、検出精度を上げるために多属性間の統計的相關関係を利用したマルチモダリティを利用した検出確率を向上する方法や、精度を落とさず試験回数を少なくして、研究津確率を予測する方法などについては、文献(36), (37)を参照いただきたい。

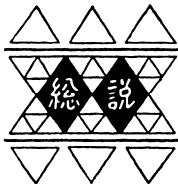
謝辞

本稿で紹介した欠陥検査に関する一連の研究は、滋賀大学経済学部中川雅央博士ならびに鳴門教育大学林秀彦准教授との共同研究の成果である。本報をまとめるに当たり研究結果の一部を転載するに当たり快諾いただき感謝する。また、研究の一部は、文部科学省ORC整備事業ならびに科学研究費補助金による経済的援助を受けたことを付記し深謝する。

参考文献

- (1) 自然の叡智に学ぶ—バイオミメティクスの無限の可能性,
<http://wiredvision.jp/archives/200411/2004111003.html>.
- (2) 宮原誠, “深い感性のテクノロジー”, ビジョン技術の実利用ワークショップ(ViEW2003)講演論文集, 精密工学会(2003), pp. 74-77.
- (3) 徳永修一, 兼田雅弘, 大崎紘一, “手話の指文字の画像処理による認識に関する研究”, 日本経営工学会誌, vol. 43, no. 4(1992), pp. 296-302.
- (4) 佐藤淳, コンピュータビジョン—視覚の幾何学—,

- コロナ社, (1992), pp. 1-9.
- (5) 三浦利章, 行動と視覚的注意, 風間書房, (1996), pp. 15-17, 97-105, 154-155.
- (6) 岡田謙一, 西田正吾, 葛岡英明, ヒューマンコンピュータインターラクション, オーム社, (2002), p. 2.
- (7) A. Norman, "Twelve issues of cognitive science", *Cognitive Science*, vol. 1, no. 4(1980), pp. 1-32.
- (8) S. Card, T. Moran and A. Newell, *The Psychology of Human-Computer Interaction*, Lawrence Erlbaum Associates, (1983).
- (9) J. Rasmussen, "Skills, rules, knowledge signals, signs and symbols and other distinctions in human performance models", *IEEE Trans. On Systems, Man, and Cybernetics*, vol. SMC-13, no. 3(1983), pp. 257-267.
- (10) J. Reason, *Human Error*, Cambridge Univ. Press, (1990), p. 53.
- (11) E. Hollnagel, *Human Reliability Analysis Context and Control*, Academic Press, (1993), p. 145.
- (12) J. Rasmussen著, 海保博之, 加藤隆, 赤井真喜, 田辺文也訳, インターフェースの認知工学 人と機械の知的かかわりの科学, 啓学出版, (1990), p. 203.
- (13) C. Drury, "The effect of speed of working on industrial inspection accuracy", *Applied Ergonomics*, vol. 4 (1972), pp. 2-7.
- (14) C. Chi and C. Drury, "Limits to human optimization in inspection performance", *International Journal of Systems Science*, vol. 32, no. 6 (2001), pp. 689-701.
- (15) C. Chi and C. Drury, "Do people choose an optimal response criterion in an inspection task?", *IIE Transactions*, vol. 30(1998), pp. 257-266.
- (16) 大山正, 実験心理学—こころと行動の科学の基礎—, サイエンス社, (2007), p. 22.
- (17) 中易秀敏, 坪野博宣, 前田多章, 前川善一郎, 情報科学—ヒューマン編—, 共立出版, (2002), pp. 69-80.
- (18) 日科技連官能検査委員会編, 新版・官能検査ハンドブック, 日科技連出版社, (1999), pp. 395-445.
- (19) 大山正, 今井省五, 和氣典二編, 新編 感覚・知覚ハンドブック, 誠信書房, (1994), p. 19.
- (20) 林毅編, 複合材料工学, 日本科学技術連盟(1971), pp. 19-39.
- (21) 中川雅央, 中易秀敏, "創発的アルゴリズムを用いた外観検査のための画像分類システム", 甲南大学紀要(理学編), vol. 46, no. 2(1999), pp. 117-136.
- (22) M. Nakagawa, K. Ohnishi, H and Nakayasu, "Human-oriented image recognition for industrial inspection system", *Proc. 9th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication (IEEE ROMAN2000)* (2000), pp. 52-56.
- (23) M. Nakagawa and H. Nakayasu, "Human oriented intelligence image processing system for integrated visual inspection", *Proc. 10th Human-Computer Interaction International (HCI2003)* (2003), pp. 814-817.
- (24) 大西昇, 生体情報処理, 昭晃堂, (2001), p. 60.
- (25) 脇本和昌, 亂数の知識, 森北出版, (1970), p. 85.
- (26) 伏見正則, 亂数, 東京大学出版会, (1989), p. 122.
- (27) Microsoft Visual Basic 6.0 ハンドブック, マイクロソフト.
- (28) 大野豊, 磯田和男, 新版数値計算ハンドブック, オーム社, (1990), p. 778.
- (29) 塩見弘, 信頼性工学入門, 丸善, (1972), p. 35.
- (30) R. Chin and C. Harlow, "Automated visual inspection: A survey", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 4, no. 6(1982), pp. 557-573.
- (31) A. Rosenfeld and A. Kak著, 長尾真監訳, ディジタル画像処理, 近代科学社, (1995), pp. 427-431, 1995.
- (32) C. Huang, T. Cheng and C. Chen, "Color images segmentation using scale space filter and markov random field", *Pattern Recognition*, vol. 25, no. 10 (1992), pp. 1217-1229.
- (33) 豊田秀樹, 非線形多変量解析—ニューラルネットによるアプローチ, 朝倉書店, (1996), p. 56.
- (34) H. Madsen and S. krenk, N. Lind, *Methods of Structural Safety*, Prentice-Hall inc., (1986), pp. 108-109.
- (35) 室津義定, 米澤政昭, 邵曉文, システム信頼性工学, 共立出版, (1996), pp. 93-102.
- (36) 中川雅央, 中易秀敏, "マルチモダリティによる欠陥検出確率の評価法", 材料, vol. 54, no. 1(2005), pp. 2-7.
- (37) H. Hayashi, M. Nakagawa and H. Nakayasu, "An evaluation method of human property using psychometric function in sensory test", *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, vol. 24, no. 4(2007), pp. 259-267.
- (38) 中易秀敏, "物理量としての感性の計測評価法—欠陥検査における知覚特性の評価法—", 科学と工業, vol. 81, no. 11(2007), pp. 545-550.



量子散乱状態とメゾスコピック系の電気伝導

西野 晃徳*

Quantum Scattering States and Electron Transport in Mesoscopic Systems

Akinori NISHINO*

1. はじめに

前世期初頭に構築された量子力学は、今やニュートン力学を「古典」の地位へと追いやり、現代物理学を支える一本の柱となったと言ってよいであろう。水素原子に束縛されている電子のエネルギーや角運動量が離散的な値をとるという衝撃的な結果は、電子が波の性質を持つことによって説明され得る。それでは身の回りにあふれる電化製品の中に流れる電子達は、波のように強め合ったり、打ち消し合ったりしているのだろうか？どのような測定をすれば、電子が波であることを実感できるのだろうか？

そのような疑問に答えてくれたのが、メゾスコピック系の研究である[1-4]。文献によれば、メゾスコピック系とはマクロ（巨視的）な系と、ミクロ（微視的）な系の「中間の大きさ」の系である。原子のようなミクロな系において、電子は波の性質を持つ。一方、金属のようなマクロな系においては、電子は他の電子や格子振動のフォノンとの相互作用により散乱され、波としての干渉性（コヒーレンス）を失ってしまう。電子が波としての干渉性を保持できる距離はコヒーレンス長と呼ばれ、メゾスコピック系はこの長さより小さい系として特徴付けられる。

近年の微細加工技術の進歩により、メゾスコピック系を半導体上で作製できるようになった。典型的なデバイスのサイズは数 μm から 100nm 程度で、そのような技術が現代のナノテクノロジーの礎となっていることは言うまでもない。このようなデバイスにおける電気伝導は、電子が干渉性を保持して流れるコヒーレント伝導であり、マクロな系のものとは全く違ったものとなる。リング型

のデバイスではリングを貫く磁場の変化で電気伝導度が振動し[5]、量子ポイントコンタクトと呼ばれるデバイスでは電気伝導度が離散値をとる[6]。これらは古典論では説明できない。さらに重要なことは、そのようなデバイスを実験室で自在に設計し、制御できることにある。

次々と新しい実験結果が発表される中で、メゾスコピック系の電気伝導理論にも大きな関心が寄せられている。半導体量子デバイスにおいては、電子はフォノンとの散乱が非常に少なく、バイアス電圧下では、系は線形応答領域を超えて、平衡状態とは「遠く離れた」非平衡状態にある。従って、平衡系の解析に用いられてきた手法はそのままでは使えない。メゾスコピック系の電気伝導の研究は、未だ発展途上の非平衡系の理論を育てる舞台を提供しているとも言える。

本解説では、ランダウラー公式を用いて、メゾスコピック系の電気伝導特性を調べる方法について紹介する[1-4][7-9]。ランダウラー公式とは、ある種のメゾスコピック系の電気伝導度が電子の散乱状態の透過確率に比例する、という実に単純なものである。この公式は、最初は現象論的に導入されたが、実験による検証を経て、現在では最も「手軽な」電気伝導度の計算方法として受け入れられている。尚、オリジナルのランダウラー公式は相互作用のない場合にのみ適用されるものであったが、最近、我々は相互作用系への拡張も成功している[10-11]。

本稿の構成は以下の通りである：第2節でメゾスコピック系の電気伝導について概説する。2つの半導体量子デバイス、量子ポイントコンタクトと開放型量子ドットを紹介し、そのようなデバイスの電気伝導度を計算するためのランダウラー公式について説明する。第3節ではポテンシャル壁の存在下で、量子力学的な散乱状態を具体的に構成し、透過確率を計算する。これにより、開放型量子ドットにおける共鳴伝導が説明される。第4節

*准教授 物理学教室
Associate Professor, Institute of Physics

では共鳴伝導を再現するように単純化された開放型量子ドットを導入する。この単純化を通じて、二重量子ドット、相互作用共鳴準位模型の電気伝導を議論する。

2. メゾスコピック系の電気伝導

2. 1 半導体量子デバイス

近年の微細加工技術の進歩により、量子ドット、量子細線などのメゾスコピック系を半導体上に作製できるようになった。図 1 の模式図のような半導体デバイスを考えよう。バンドギャップは異なるが、格子定数は近い半導体 GaAs と混晶半導体 (Al, Ga)As のヘテロ接合を作る。その接合界面にはポテンシャル阱戸が形成されて電子が閉じ込められるため、十分低温ではこの界面を 2 次元電子系とみなすことができる。このヘテロ接合に図 1 のように電極を付け、負の電圧をかけると、2 次元電子系内にポテンシャル障壁が形成される。ここで、ポテンシャル障壁間の狭い出入り口は量子ポイントコンタクト (QPC) と呼ばれる。実験[6]において作製された QPC のサイズは約 250nm であり、この場合に期待されるコヒーレンス長 10μm 程度より十分小さいため、QPC 付近ではコヒーレント伝導が実現される。実際、QPC を通過する電流の伝導度はゲート電圧に対して量子化されており[6]、これはコヒーレント伝導によって説明される。

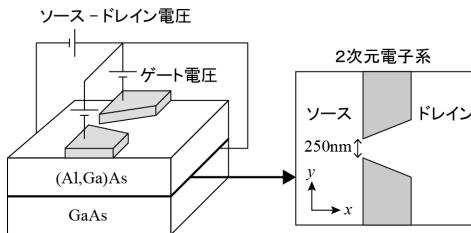


図 1 半導体ヘテロ接合の界面にできる 2 次元電子系にゲート電圧をかけて作製された量子ポイントコンタクト (QPC) の模式図[6]。

次に図 2 のような 6 つの電極 F, C, 1, 2, 3, 4 を持つデバイスを考えよう。電極 F, C, 1, 2 に負の電圧をかけることで、電子は量子ドットと呼ばれる図の中央付近の破線の円で示される領域に閉じ込められる。量子ドットには電極 F と 3 あるいは電極 F と 4 によって形成される導線（量子細線）が左右から接続されており、ソース—ドレイン電圧をかけて電流の測定ができる。実験[12]で作製された量子ドットの半径は約 300nm であり、量子ドット付近ではコヒーレント伝導が実現される。実際、量子ドットを通過する電流には伝導度の共鳴が観測され

ている[12]。

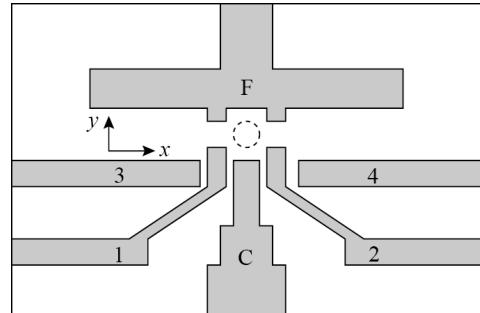


図 2 半導体ヘテロ接合の界面にできる 2 次元電子系に電圧をかけて作製された量子ドットの模式図[12]。

これら 2 つの先駆的な実験以降も、より精密な半導体量子デバイスが作製されている[13-19]。このようなデバイスの利点は様々なパラメータ領域で電気伝導を調べられることにある。例えば図 2 のデバイスにおいて、電極 C の電圧（ゲート電圧）を調整すると、量子ドットの大きさを変化させることができる。また、電極 1, 2 の電圧を調整すれば、量子ドットと導線の間のポテンシャル障壁を変化させることができる。

2. 2 ランダウアー公式

上で見たようなメゾスコピック系の電気伝導度（=電気抵抗の逆数）の計算方法の 1 つとしてランダウアー公式が用いられる[1-4] [7-9]。ランダウアー公式が適用されるのは、図 3 のような微小な試料が導線を通じて左右の電極に接続されているような系において、相互作用が無視できる場合である。電子を量子力学的に扱うことで、コヒーレント伝導が調べられる。図 3 のようにソース—ドレイン電圧をかけたとき、ソース側から試料に向けて入射される電子の 1 つに着目しよう。デバイス（試料 + 導線）はコヒーレンス長よりも十分小さいため、電子は波動として振舞い、一部は試料付近のポテンシャル障壁で反射され、一部は試料を透過してドレイン側へ進む。この反射確率を R 、透過確率を $T=1-R$ と表すと、電極間の電気伝導度 G は

$$G = \frac{2e^2}{h} T \quad (1)$$

で与えられる。これがランダウアー公式である。ここで e は素電荷、 h はプランク定数であり、因子 2 はスピン自由度による。透過確率 T は $0 \leq T \leq 1$ の値をとるため、伝導度に上限値 $G_0 = 2e^2/h$ が存在することが分かる。透過確率 $T=1$ でも電気伝導度が有限なのは、ランダウアー公式

で与えられる電気伝導度が試料と導線からなるデバイスの電気伝導度であるからである。このランダウラー公式は、QPCにおける伝導度の量子化や、開放型量子ドットにおける共鳴伝導を再現する。実は式(1)の係数 $G_0=2e^2/h$ が伝導度の量子化値を与える。

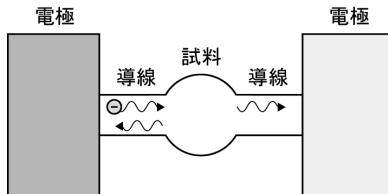


図3 ランダウラー公式が適用される系。

電気抵抗がエネルギー散逸により現れることを思い出すると、エネルギーを保存した散乱状態が電気伝導度を決めるというランダウラー公式は奇妙に思える。それではどこでエネルギー散逸が起こっているのかと言うと、次のように解釈されている[1-2]。左右の電極は試料部分に比べて十分大きいため、試料から少々電流が流れても各々平衡状態を保つと考えられる（そのような時間スケールの測定を考える）。これは熱力学における熱浴に対応するものであり、熱だけでなく電子の出入りがあることから、電子溜と呼ぶことにする。この左右の電子溜がフェルミ分布で特徴付けられ、左右の電子溜から入射される電子はインコヒーレントであると仮定すると、各入射電子のエネルギーは各々のフェルミ分布に従っているはずである。ここで左の電子溜から入射された電子は試料を通じて右の電子溜に移動するが、この電子が再び試料に入射される際に右の電子溜のフェルミ分布に従っているために、再入射前に右の電子溜で緩和されている必要がある。この緩和の過程でエネルギー散逸が起こる。

一般に透過確率は電子の入射エネルギーに依存するため、電気伝導度は入射エネルギー E の関数 $G(E)$ となる。左右の電子溜がフェルミ分布に従っていると仮定すれば、量子ドットを通過する電流はソースードレイン電圧 V の関数として

$$I(V) = \frac{2e}{h} \int_{-\infty}^{\infty} dE T(E) (f_{eV/2}(E) - f_{-eV/2}(E)) \quad (2)$$

と与えられる[8]。ここで $f_\mu(E)$ は逆温度 β 、化学ポテンシャル μ のフェルミ分布関数

$$f_\mu(E) = \frac{1}{1 + e^{\beta(E-\mu)}} \quad (3)$$

である。

ここで説明したランダウラー公式は、相互作用が無視できる場合にのみ電気伝導度、電流の計算が可能であつ

た。我々の最近の研究では、量子ドット付近の電子間クーロン相互作用を考慮すべき場合も、相互作用の効果を取り入れた多電子散乱状態を用いて同様の電流計算が可能であることを明らかにした[10-11]。これについては第4節で説明する。

3. ポテンシャル障壁による散乱状態

3. 1 単一のポテンシャル障壁

前節の議論から、電気伝導度の計算には電子の散乱状態を調べることが重要であることが分かる。電子が単一のポテンシャル障壁に対してどのように振る舞うかを考えよう。最初に、図4のようなポテンシャル障壁による散乱問題を考える[20]。これは図1のQPCの x 軸方向の運動に対応する。運動エネルギー E を持つ電子が、高さ V_g のポテンシャル障壁に向かって、左から入射されたとする。電子が古典力学に従う古典粒子であるとすれば、エネルギー保存則により、 $E > V_g$ の場合には透過確率は1となり、 $0 < E < V_g$ の場合には透過確率が0となるはずである。しかし、電子を量子力学的に扱うと異なる結果が得られる。

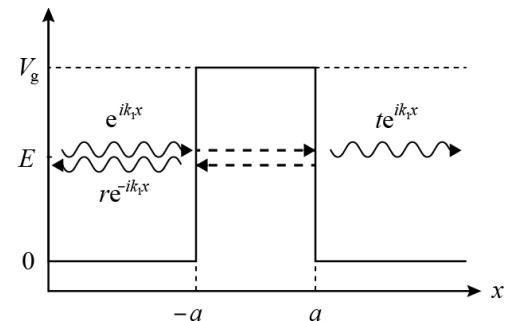


図4 ポテンシャル障壁による散乱。

電子の質量を m 、また $\hbar = h/(2\pi)$ とすると、電子の定常状態 (=エネルギーが一定の状態) を記述する波動関数 $\psi(x)$ は次のシュレディンガー方程式に従う：

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} + V(x) \right) \psi(x) = E \psi(x). \quad (4)$$

ここでポテンシャル $V(x)$ は図4に従って

$$V(x) = \begin{cases} 0 & (|x| > a) \\ V_g & (|x| < a) \end{cases} \quad (5)$$

と設定する。このシュレディンガー方程式の解は、ポテンシャルが一定の領域内では、一定の（実数あるいは純虚数の）波数を持つ右向きの平面波と左向きの平面波の重ね合わせで与えられる。従って、エネルギー E の自由電子平面波を左から入射した場合の波動関数は r, t, A, B を未知係数として

$$\psi(x) = \begin{cases} e^{ik_1 x} + r e^{-ik_1 x} & (x < -a) \\ A e^{ik_2 x} + B e^{-ik_2 x} & (-a < x < a) \\ t e^{ik_1 x} & (a < x) \end{cases} \quad (6)$$

の形をとる。ここで

$$k_1 = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}, \quad k_2 = \frac{\sqrt{2m(E-V_g)}}{\hbar} \quad (7)$$

である。左から入射したために、領域 $a < x$ には右向きの平面波のみが現れることに注意。 $E - V_g > 0$ の場合は k_2 が実数となるため波動関数は平面波になるが、 $E - V_g < 0$ の場合は k_2 が純虚数となるため波動関数は指数関数的になる。

未知係数 r, t, A, B は波動関数 $\psi(x)$ とその導関数 $\psi'(x)$ の境界 $x = -a, a$ での連続性により決定される：

$$\begin{aligned} \psi(\pm a - 0) &= \psi(\pm a + 0), \\ \psi'(\pm a - 0) &= \psi'(\pm a + 0). \end{aligned} \quad (8)$$

これらは4つの未知変数 r, t, A, B に対する連立1次方程式

$$\begin{aligned} e^{-ik_1 a} + r e^{ik_1 a} &= A e^{-ik_2 a} + B e^{-ik_2 a}, \\ k_1(e^{-ik_1 a} - r e^{ik_1 a}) &= k_2(A e^{-ik_2 a} - B e^{-ik_2 a}), \\ A e^{ik_2 a} + B e^{-ik_2 a} &= t e^{ik_1 a}, \\ k_2(A e^{ik_2 a} - B e^{-ik_2 a}) &= k_1 t e^{ik_1 a} \end{aligned} \quad (9)$$

を与え、これは手計算で扱えるレベルである。結果として、反射係数 r と透過係数 t は

$$\begin{aligned} r &= \frac{(k_1^2 - k_2^2) e^{-2ik_1 a} \sin(2k_2 a)}{(k_1^2 + k_2^2) \sin(2k_2 a) + 2ik_1 k_2 \cos(2k_2 a)}, \\ t &= \frac{2ik_1 k_2 e^{-2ik_1 a}}{(k_1^2 + k_2^2) \sin(2k_2 a) + 2ik_1 k_2 \cos(2k_2 a)} \end{aligned} \quad (10)$$

と得られる。

この散乱状態の透過確率 $T(E)$ は透過係数 t を入射エネルギー E の関数 $t(E)$ として

$$T(E) = |t(E)|^2 \quad (11)$$

と計算される。図5は $\hbar = 1, 2m = 1, V_g = 10$ で障壁の厚み $2a$ を変化させたときの透過確率 $T(E)$ である。入射エネルギーが $E > V_g$ の場合にも、古典粒子のように透過確率は1とはならず、電子の一部は反射されていることが分かる。 $0 < E < V_g$ の場合には、電子の一部が障壁を通り抜けて透過する。これがトンネル効果である。トンネル効果でポテンシャル障壁を通り抜ける電流は、当然、障壁が薄いほど大きい。

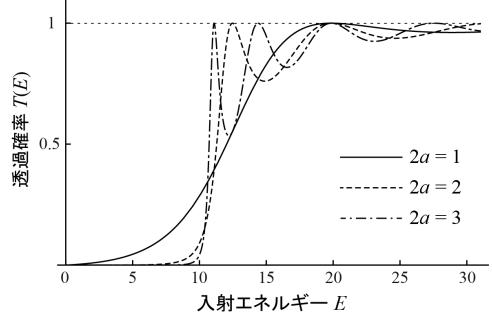


図5 単一ポテンシャルに対する散乱状態の透過確率 $\hbar = 1, 2m = 1, V_g = 10$ で障壁の厚みが $2a = 1, 2, 3$ の3つの場合。

実際にQPCの伝導度を再現するには、図1のy方向の運動も考慮し、多チャンネルの効果を取り入れる必要がある。QPC付近ではy方向の閉じ込めポテンシャルにより、y方向の運動は離散的なエネルギー固有値をとる。同じ入射エネルギーであっても、このy方向の運動が異なるエネルギーに対応する場合は、別のチャンネルとして区別する。入射エネルギーを固定して、ゲート電圧を下げるとき、寄与するチャンネル数も増加する。1チャンネルあたりの伝導度への寄与の最大値は $G_0 = 2e^2/h$ であるから、十分薄いポテンシャル障壁の場合を考えると、チャンネル数の増加に伴って、伝導度は段階的に増加する。これが伝導度の量子化である[6]。

3. 2 二重障壁ポテンシャル

次に、二重障壁ポテンシャル下での電子の散乱問題を考えよう。図6のような二重障壁ポテンシャルを考えれば図2の開放型量子ドットのx軸方向の運動を調べることができる。

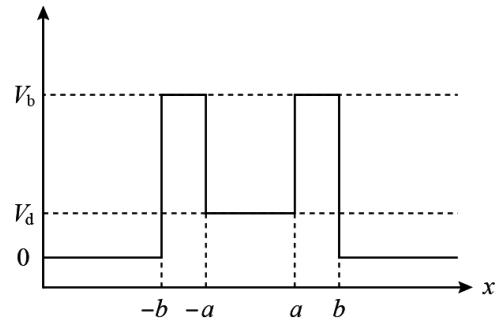


図6 二重障壁ポテンシャル。

ポテンシャル障壁が1つの場合と同様に、電子の定常状態を記述する波動関数 $\psi(x)$ に対するシュレディンガー

方程式は

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} + V(x) \right) \psi(x) = E \psi(x) \quad (12)$$

で与えられる。ここでポテンシャル $V(x)$ は図 6 に従つて

$$V(x) = \begin{cases} 0 & (|x| > b) \\ V_b & (a < |x| < b) \\ V_d & (|x| < a) \end{cases} \quad (13)$$

と設定する。波動関数 $\psi(x)$ は

$$\psi(x) = \begin{cases} e^{ik_1 x} + r e^{-ik_1 x} & (x < -b) \\ A_1 e^{ik_2 x} + B_2 e^{-ik_2 x} & (-b < x < -a) \\ A_3 e^{ik_3 x} + B_3 e^{-ik_3 x} & (-a < x < a) \\ A_4 e^{ik_2 x} + B_4 e^{-ik_2 x} & (a < x < b) \\ t e^{ik_1 x} & (b < x) \end{cases} \quad (14)$$

の形をとる。ここで

$$k_1 = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}, \quad k_2 = \frac{\sqrt{2m(E-V_b)}}{\hbar}, \quad k_3 = \frac{\sqrt{2m(E-V_d)}}{\hbar} \quad (15)$$

とする。8つの未知係数 $r, t, A_1, A_2, A_3, A_4, B_2, B_3, B_4$ は波動関数 $\psi(x)$ とその導関数 $\psi'(x)$ の連続性を要請することにより決定される。これらの係数の具体形は複雑なので数式処理ソフト(Mathematica)で扱うことにする。図 7 は $\hbar=1, 2m=1, a=1.8, b=2.0, V_b=10$ の場合にゲート電圧 V_d を変化させたときの透過確率 $T(E)$ である。入射エネルギー $E < V_b$ では、ポテンシャル障壁が 1 つの場合と同様にトンネル効果が起るが、さらに入射エネルギーの特殊値で透過確率のピークが現れるのが分かる。

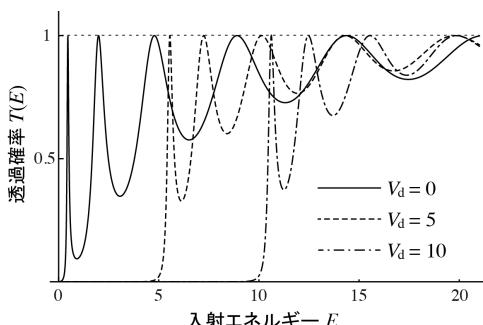


図 7 二重障壁ポテンシャルに対する散乱状態の透過確率。 $\hbar=1, 2m=1, a=1.8, b=2.0, V_b=10$ でゲート電圧が $V_d=0, 5, 10$ の 3 つの場合。

透過確率のピークは以下のように説明される。二重障壁ポテンシャルが無限に高い場合($V_b \rightarrow \infty$)には、電子は障壁間に閉じ込められ、いくつかの離散的なエネルギー

固有値 E_0, E_1, E_2, \dots のみを取り得る束縛状態となる。ポテンシャル V_b を下げていくと、エネルギー $E > V_b$ では連続スペクトルをとる散乱状態が現れ、エネルギー $E < V_b$ の束縛状態はトンネル効果により障壁の外へしみ出していく。同時に二重障壁の外にあった散乱状態も障壁内にしみ込んでくるが、その際、エネルギー固有値 E_0, E_1, E_2, \dots に近いエネルギーを持つ散乱状態ほどしみ込み易い。結果として、透過確率 $T(E)$ は E_0, E_1, E_2, \dots 付近でピークを持つ。ランダウアー公式により、これらの透過確率のピークは電気伝導度のピークを与える。このような電気伝導は共鳴伝導と呼ばれる。図 7 のように、ゲート電圧 V_d を調整することでこの共鳴伝導の準位(共鳴準位)を動かすことができる。

透過確率 $T(E)$ のエネルギー $E=E_r$ でのピークは、透過係数 $t(E)$ の複素平面上での極 $E_r - i\Gamma_r$ に対応する(この極を共鳴極と呼ぶ)。実際、透過係数 $t(E)$ を共鳴極 $E=E_r - i\Gamma_r$ の近傍で

$$t(E) \approx \frac{c}{E - E_r + i\Gamma_r} \quad (16)$$

と展開すると、透過確率がブライト—ウィグナー型(あるいはローレンツ型)のピークを与えることが分かる:

$$T(E) = |t(E)|^2 \approx \frac{|c|^2}{(E - E_r)^2 + \Gamma_r^2}. \quad (17)$$

透過係数 $t(E)$ の虚部 $\text{Im}(t(E))$ は量子ドットの状態密度を意味する。量子ドットと導線に接続することで、状態密度 $\text{Im}(t(E))$ は共鳴準位 $E=E_r$ を中心に行き渡り、程度の幅を持つため、 Γ_r は準位幅と呼ばれる。

4. 様々な開放型量子ドットの電気伝導

4.1 模型の単純化

様々なタイプの開放型量子ドットを調べるために、前節で扱った模型を単純化する。前節のポテンシャル障壁による散乱状態の具体形を書き下すと非常に複雑な形になる。さらに相互作用を考慮するとなると、多電子散乱状態の具体形は数値的に扱うことさえ困難であろう。ポイントは共鳴伝導をいかに単純に再現するかにある。

そこで共鳴準位模型と呼ばれる最も単純な開放型量子ドットを導入する。まず、スピン自由度は無視することにする(従ってランダウアー公式の因子は $G_0 = e^2/h$ となる)。図 8 のように、2本の導線を折り曲げて配置し、その間に量子ドットを置く。各導線の原点付近で量子ドットに最も接近するように x 座標系をとる。

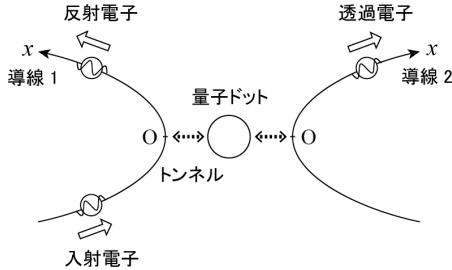


図 8 共鳴準位模型における量子ドットと導線 1, 2 の配置。導線の分散関係を線形化したため、電子は各導線上を正の向きのみに進む。

量子ドットの単純化

量子ドットは十分小さく、ドット内に存在する共鳴準位の間隔は十分広いと仮定する。低温では共鳴準位のうち 1つだけを考慮すれば十分である。ここで前節のようなゲート電圧ではなく、ドット内にできた共鳴準位 ϵ_d そのものを系のパラメータとする。

導線の単純化

各導線内で電子は自由電子として振舞うとし、導線内の 1 チャンネルのみを考慮する。このとき分散関係 $\epsilon(k)$ は図 9 のように与えられる。散乱による各電子のエネルギー変化がフェルミエネルギー E_F より十分小さいとすれば、分散関係をフェルミエネルギー E_F 附近で線形近似することができる：

$$\epsilon(k) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} \approx \hbar v_F (k - k_F) + E_F. \quad (18)$$

ここで v_F はフェルミ速度である。以下、 $\hbar v_F = 1$, $k_F = 0$, $E_F = 0$ とすることにする。この線形近似により、導線上を x 軸の正の向きに移動する電子のみを考慮していることになる。

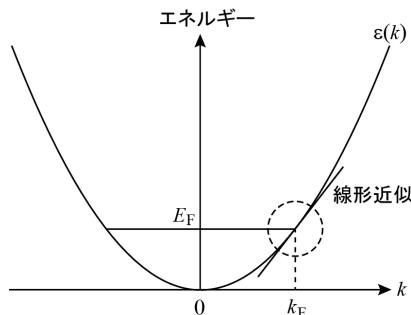


図 9 導線の分散関係をフェルミエネルギー付近で線形近似する。

量子ドットと導線の接続

量子ドットと各導線の原点 $x = 0$ をポテンシャル障壁

を挟んで接続する。電子はポテンシャル障壁をトンネル効果で透過するとし、ドットと各導線の原点 $x = 0$ の間の飛び移りの行列要素を t とする。 t は一般に複素数であり、電子の入射エネルギーに依存するが、ここでは実数の定数と仮定する。導線の線形分散により、電子は各導線上を x 軸の正の向きにしか移動しないため、散乱状態を考える際には注意が必要である。導線 1 から電子が入射される場合を考えると、電子の入射波は導線 1 の $x < 0$ の部分を正の向きに進み、原点 $x = 0$ にある量子ドットで散乱される。散乱後の電子は導線 1, 2 の $x < 0$ の部分には戻らず、 $x > 0$ の部分へ進む。つまり、導線 1 の $x > 0$ の部分に存在する電子波は反射波、導線 2 の $x > 0$ の部分に存在する電子波は透過波と解釈される。

4.2 共鳴準位模型

単純化した共鳴準位模型に対して散乱状態を構成し、ランダウラー公式により電気伝導度を計算する [10-11]。第 2 量子化されたハミルトニアンを書くと

$$H = \sum_{\ell=1,2} \int dx c_{\ell}^{\dagger}(x) \frac{d}{dx} c_{\ell}(x) + \epsilon_d d^{\dagger} d + t \sum_{\ell=1,2} \left(c_{\ell}^{\dagger}(0) d + d^{\dagger} c_{\ell}(0) \right) \quad (19)$$

となる。第 1 項が導線、第 2 項が量子ドット、第 3 項が導線と量子ドットの接続を表すハミルトニアンである。スピン自由度は考えないことにする。ここで $c_{\ell}^{\dagger}(x)$, $c_{\ell}(x)$ は導線の座標 x に電子を生成、消滅させる演算子で、 d^{\dagger} , d は量子ドットに電子を生成、消滅させる演算子で反交換関係

$$\begin{aligned} \{c_{\ell}(x), c_m^{\dagger}(y)\} &= \delta_{\ell m} \delta(x - y), \\ \{c_{\ell}(x), c_m(y)\} &= \{c_{\ell}^{\dagger}(x), c_m^{\dagger}(y)\} = 0, \\ \{d, d^{\dagger}\} &= 1, \{d, d\} = \{d^{\dagger}, d^{\dagger}\} = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

を満たす。ここで $\{A, B\} = AB + BA$ である。

この系に対して、散乱状態を構成し、電気伝導を調べよう。導線 1, 2 の電子を記述する固有関数を $g_1(x)$, $g_2(x)$ 、量子ドット内の電子の固有関数を e で表すと、固有状態は

$$|E\rangle = \left(\sum_{\ell=1,2} \int dx g_{\ell}(x) c_{\ell}^{\dagger}(x) + e d^{\dagger} \right) |0\rangle \quad (21)$$

と書ける。ここで $|0\rangle$ は真空状態である。固有関数を $g_1(x)$, $g_2(x)$, e を決めるためにはシュレディンガー方程式

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{i} \frac{d}{dx} - k \right) g_{\ell}(x) + t \delta(x) e &= 0, (\ell = 1, 2) \\ (\epsilon_d - k)e + t(g_1(0) + g_2(0)) &= 0 \end{aligned} \quad (22)$$

を解けばよい。ここで $\delta(x)$ はディラックのデルタ関数である。導線の分散関係を線形化したために $g_{\ell}(x)$ に対する 1 階微分の項が現れた。この分散関係の線形化のおか

げで、前節の式(9)に対応する未知変数と条件式の数が半分になります。容易に解くことができる。このテクニックは相互作用を考慮した場合にも有効である。

導線1から波数 k を持つ自由電子平面波を入射、といふ散乱境界条件

$$g_1(x) = e^{ikx}, \quad g_2(x) = 0, \quad (x < 0) \quad (23)$$

の下でこのシュレディンガー方程式を解く。式(22)の第1式により、 $x \neq 0$ では

$$\left(\frac{1}{i} \frac{d}{dx} - k\right) g_\ell(x) = 0 \quad (24)$$

であるので、 $g_\ell(x)$ は波数 k を持つ自由電子平面波（の定数倍）であるが、デルタ関数項のため $x=0$ で不連続性を持つ。実際、式(22)の第1式を $x=0^-$ から $x=0^+$ まで積分すると、不連続性の条件

$$g_\ell(0^+) - g_\ell(0^-) = -ite \quad (25)$$

を得る。不連続点での値 $g_\ell(0)$ はシュレディンガー方程式からは決まらないので、物理的要請から

$$g_\ell(0) = \frac{1}{2}(g_\ell(0^+) + g_\ell(0^-)) \quad (26)$$

で決めるに至る。式(25)と式(26)を式(22)の第2式に適用し、散乱境界条件(23)を用いると

$$\begin{aligned} (\varepsilon_d - k) e &= -\frac{t}{2} \sum_\ell (g_\ell(0^+) + g_\ell(0^-)) \\ &= -\frac{t}{2} \sum_\ell (2g_\ell(0^-) - ite) \\ \therefore (k - \varepsilon_d + it^2) e &= t \sum_\ell g_\ell(0^-) = t \\ \therefore e &= \frac{t}{k - \varepsilon_d + it^2} \end{aligned} \quad (27)$$

となる。さらにこれを式(25)に適用して

$$\begin{aligned} g_1(0^+) &= g_1(0^-) - ite = \frac{k - \varepsilon_d}{k - \varepsilon_d + it^2}, \\ g_2(0^+) &= g_2(0^-) - ite = \frac{-it^2}{k - \varepsilon_d + it^2}. \end{aligned} \quad (28)$$

結果をまとめると、導線1から波数 k を持つ自由電子平面波を入射した場合の散乱状態は

$$\begin{aligned} g_{1,k}(x) &= \left(\theta(-x) + \frac{k - \varepsilon_d}{k - \varepsilon_d + it^2} \theta(x) \right) e^{ikx}, \\ g_{2,k}(x) &= \frac{-it^2}{k - \varepsilon_d + it^2} \theta(x) e^{ikx}, \end{aligned} \quad (29)$$

$$e_k = \frac{t}{k - \varepsilon_d + it^2}$$

と与えられる。ここで $\theta(x)$ は

$$\theta(x) = \begin{cases} 1 & (x > 0) \\ 1/2 & (x = 0) \\ 0 & (x < 0) \end{cases} \quad (30)$$

で与えられる階段関数である。導線2から自由電子平面波を入射する場合は添え字1と2を入れ替えればよい。

結果として、反射係数 $r(k)$ 、透過係数 $t(k)$ は、導線1、2のいずれから入射する場合も

$$\begin{aligned} r(k) &= \frac{k - \varepsilon_d}{k - \varepsilon_d + it^2}, \\ t(k) &= \frac{-it^2}{k - \varepsilon_d + it^2} \end{aligned} \quad (31)$$

で与えられる。

ランダウアー公式により、電気伝導度は $G(k)$ は

$$G(k) = \frac{1}{2\pi} |t(k)|^2 = \frac{1}{\pi} \frac{t^4}{(k - \varepsilon_d)^2 + t^4} \quad (32)$$

となり、前節で見たブライト—ウイグナー型（あるいはローレンツ型）の共鳴伝導を見事に再現する。ここで $h = 2\pi\hbar = 2\pi$ としている。この共鳴伝導は透過係数 $t(k)$ の下半平面の極 $k = \varepsilon_d - it^2$ に対応していることが直ちに分かる。このように散乱状態の具体形を見ることで、散乱状態の共鳴極と伝導度の共鳴ピークの対応が明白になる。

電流電圧特性は

$$I(V) = \frac{1}{\pi} \int dk \frac{t^4}{(k - \varepsilon_d)^2 + t^4} (f_{V/2}(k) - f_{-V/2}(k)) \quad (33)$$

と与えられる。特に絶対零度においては、フェルミ分布が階段関数 $f_0(E) = \theta(\mu - E)$ になるから、容易に積分が実行でき、

$$I(V) = t^2 \left(\arctan \left(\frac{V + 2\varepsilon_d}{2t^2} \right) + \arctan \left(\frac{V - 2\varepsilon_d}{2t^2} \right) \right) \quad (34)$$

が得られる。共鳴準位が $\varepsilon_d = 0$ の場合の電流電圧特性を図10にプロットした。共鳴伝導ではこのような非線形の電流電圧特性が現れる。

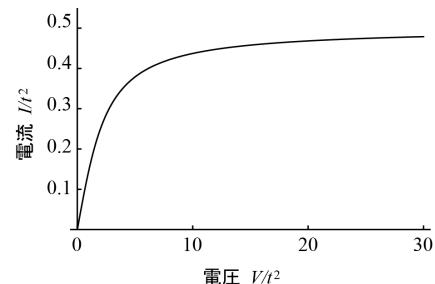


図 10 共鳴準位模型の電流電圧特性。共鳴準位を $\varepsilon_d = 0$ とした場合。

4.3 二重量子ドット模型

共鳴準位模型を拡張して、左右の導線間に2つの量子ドットが存在する場合を考える。量子ドットを1つから2つに増やしただけであるが、図11に示されているように並列二重量子ドット[15][18]、直列二重量子ドット[17]、T型二重量子ドット[19]など、様々な量子ドットの配置が可能であることが分かる。実際、これらの異なる

る配置は、異なる電気伝導特性を与える。これら全ての配置を統一的に扱うために、一旦、図 11 の下半分にあるような一般的な二重量子ドットを考えることにする[21]。ここで量子ドット $\alpha (=1, 2)$ 内の共鳴準位を $\epsilon_{d\alpha}$ とし、導線 $\ell (=1, 2)$ と量子ドット α の間の飛び移りの行列要素を $t_{\ell\alpha}$ と書いた。

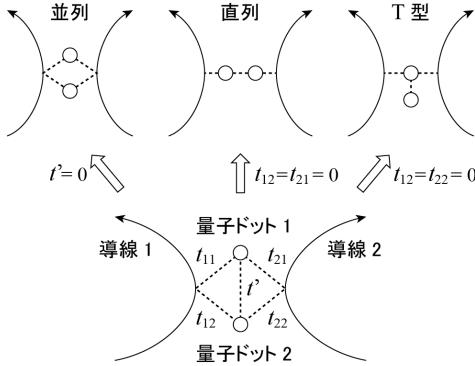


図 11 二重量子ドットの配置。飛び移りの行列要素 $t_{\ell\alpha}$ を特殊値にとることで様々な2重量子ドットが再現される：(i) 並列二重量子ドット： $t'=0$ ；(ii) 直列二重量子ドット： $t_{12}=t_{21}=0$ ；(iii) T型二重量子ドット： $t_{12}=t_{22}=0$ 。

前節と同様に、散乱状態を

$$|E\rangle = \left(\sum_{\ell=1,2} \int dx g_\ell(x) c_\ell^\dagger(x) + \sum_{\alpha=1,2} e_\alpha d_\alpha^\dagger \right) |0\rangle \quad (35)$$

と置く。ここで d_α^\dagger , d_α は量子ドット α に電子を生成、消滅させる演算子である。シュレディンガー方程式は

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{i} \frac{d}{dx} - k \right) g_\ell(x) + \delta(x) \sum_\alpha t_{\ell\alpha} e_\alpha &= 0, \quad (\ell=1,2) \\ (\epsilon_{d\alpha} - k) e_\alpha + \sum_\ell t_{\ell\alpha} g_\ell(0) + t' e_{-\alpha} &= 0, \quad (\alpha=1,2) \end{aligned} \quad (36)$$

となる。これは共鳴準位模型の場合と同じ手法で解くことができる。結果として、導線 1 から波数 k の自由電子平面波を入射した場合の散乱状態の反射係数 $r(k)$ と透過係数 $t(k)$ は

$$\begin{aligned} r(k) &= 1 - \frac{i \sum_\alpha ((k - \epsilon_{d\alpha} + i\Gamma_{aa}) t_{1\alpha} - (i\Gamma_{aa} - t') t_{1\alpha}^*) t_{1\alpha}}{(k - \epsilon_{d1} + i\Gamma_{11})(k - \epsilon_{d2} + i\Gamma_{22}) - (i\Gamma_{12} - t')(i\Gamma_{21} - t')}, \\ t(k) &= - \frac{i \sum_\alpha ((k - \epsilon_{d\alpha} + i\Gamma_{aa}) t_{1\alpha} - (i\Gamma_{aa} - t') t_{1\alpha}^*) t_{2\alpha}}{(k - \epsilon_{d1} + i\Gamma_{11})(k - \epsilon_{d2} + i\Gamma_{22}) - (i\Gamma_{12} - t')(i\Gamma_{21} - t')}, \\ \Gamma_{\alpha\beta} &= \frac{1}{2} \sum_{\ell=1,2} t_{\ell\alpha} t_{\ell\beta}, \quad \overline{\alpha} = 3 - \alpha \end{aligned} \quad (37)$$

で与えられる。一見、複雑な形をしているが、二重障壁ポテンシャルの散乱状態の計算と比べるとはるかに易しい。図 11 で挙げた 3 つの二重量子ドットの場合の電気伝導度 $G(k)/G_0$ を図 12, 図 13, 図 14 にプロットした

(ここで導線の分散関係を線形近似し $k_F=0$, $E_F=0$ ととっていることに注意)。

(i) 並列二重量子ドット (図 12)

2 つの量子ドットの共鳴準位に対応する 2 つの共鳴ピークが現れる。左右の導線をつなぐ径路が 2 本あるため、共鳴準位の差が大きくても 2 つの共鳴ピークのピーク値は 1 に保たれる。一方、2 つ共鳴準位の中間のエネルギー (図 12 の $k=0$ に対応) では、2 径路からの電子の波が打ち消し合い、伝導度が 0 となる。

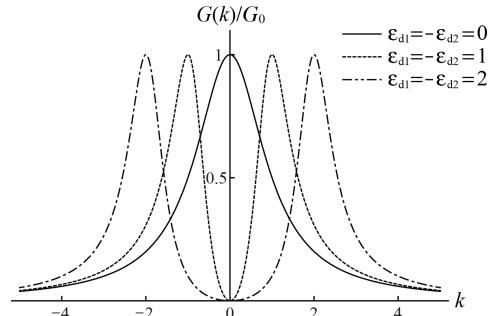


図 12 並列二重量子ドットの電気伝導度。 $t_{11}=t_{12}=t_{21}=t_{22}=1/\sqrt{2}$, $t'=0$ と置いた。

(ii) 直列二重量子ドット (図 13)

2 つの共鳴ピークが現れる。左右の導線をつなぐ径路は一本しかないため、共鳴準位の差が大きくなるにつれてそれぞれの共鳴ピークのピーク値は減少する。

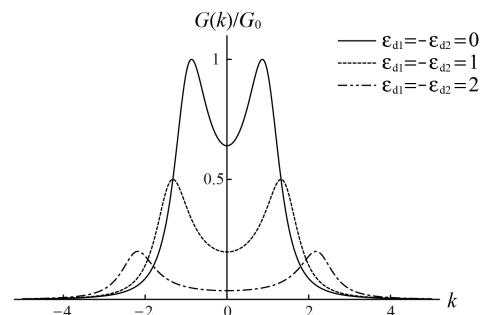


図 13 直列二重量子ドットの電気伝導度。 $t_{11}=t_{22}=t'=1$, $t_{12}=t_{21}=0$ とおいた。

(iii) T型二重量子ドット (図 14)

2 つの量子ドットの共鳴準位の差を大きくするに従って、ファノ型の非対称共鳴ピークが現れる。これは 2 径路 (量子ドット 2 を通過する径路と通過しない径路) の干渉効果である[22–23]。

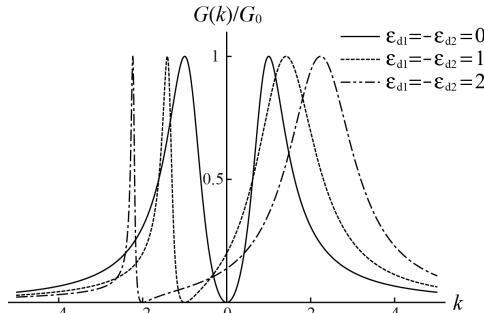


図 14 T 型二重量子ドットの電気伝導度. $t_{11}=t_{21}=t=1$, $t_{12}=t_{22}=0$ とおいた.

4.4 相互作用共鳴準位模型

量子ドット付近に電子間クーロン相互作用が存在する場合を考える. 共鳴準位模型において, 各導線の原点 $x=0$ と量子ドットに同時に電子が存在する場合にのみ, 大きさ U のクーロン反発を感じるとし, 式(19)のハミルトニアンに次の相互作用項を加える:

$$H_U = U \sum_{\ell=1,2} c_\ell^\dagger(0) c_\ell(0) d^\dagger d. \quad (38)$$

このような場合にも, 相互作用の効果を含んだ多電子散乱状態の厳密解を構成することができる [10-11] [24-25]. さらに, この多電子散乱状態を「ランダウアー公式の拡張」に適用することで, 電流電圧特性が調べられる. 相互作用パラメータ U の 1 次まで計算することで得られた電流電圧特性が図 15 である [10-11]. ここで, 相互作用を考慮した場合には, 線形近似された分散関係の低エネルギーカットオフに対して, 電流が発散してしまうため, 繰り込み群の手法による処理が必要になる. その際現れるエネルギーースケールを特徴づけるパラメータを T_K と置いた. 図 15 より, 相互作用が大きくなるにつれて, 負性微分伝導度が現れていること, すなわち, 電圧を上げると逆に電流が減少してしまうことが分かる.

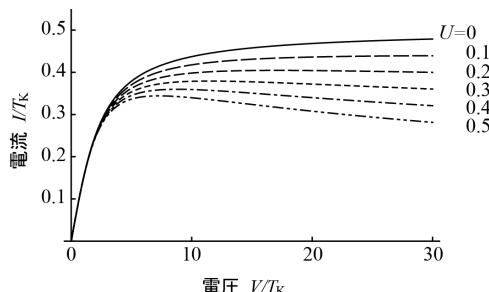


図 15 相互作用共鳴準位模型の電流電圧特性. 相互作用パラメータ U の 1 次まで計算したもの. ここで T_K は系のエネルギーースケールを特徴付けるパラメータ.

ここで用いた「ランダウアー公式の拡張」は, オリジナルのランダウアー公式よりも強い仮定を必要とする. 左右から入射された多数の電子達は, 量子ドット付近の相互作用により多体状態を形成し, 反射あるいは透過して左右の電子溜に移動する. 実際, 厳密解の構成から, 電子達は相互作用により多体束縛状態を形成することが分かる. これらの電子達が, 左右の電子溜のフェルミ分布に従うように自由電子状態に緩和されてから再入射されると仮定している. この「ランダウアー公式の拡張」が, 標準的に用いられている非平衡グリーン関数の方法と等価であるかどうかは自明ではないが, 図 15 で得られた電流電圧特性は非平衡グリーン関数を用いて得られた U の 1 次の結果 [26-27] と一致している.

5. まとめに代えて

まとめに代えて, 本文で扱ったメゾスコピック系の電気伝導理論の発展に関して, いくつか挙げておきたい.

フィッシャー—リー関係式

電子の透過確率はグリーン関数を用いて表現することができる [28]. この手法は, 複雑な格子構造を持つ試料 (例えばカーボンナノチューブ [29]) に導線が接続されている系に対して, 数値的に透過確率を計算する場合に, 特に威力を發揮する. ここで, 無限系のグリーン関数の計算は一般には困難であるが, 相互作用が無視できる場合は, 導線の効果を自己エネルギーとして (有限次元の) 有効ハミルトニアンに取り込む方法が知られている [2] [23].

ケルディッシュ形式

ランダウアー公式のミクロな導出は, 量子ポイントコンタクトや開放型量子ドットのような系に対しては, ケルディッシュ形式の非平衡グリーン関数を用いてなされている [30-36]. ここで得られた電流公式は相互作用がある場合にも適用され, 非平衡近藤効果の解析で威力を發揮している. ただし, 相互作用の存在する場合に, 無限系のグリーン関数の計算は非常に困難であり, 相互作用に関する摂動計算 [35-38], スレイブボソン平均場理論 [21] [39-42], あるいは量子モンテカルロ法 [43] 等が用いられている.

マスター方程式

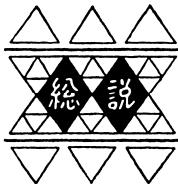
インコヒーレント伝導をランダウアー公式で扱うためには, 透過確率をマスター方程式を用いて計算する方法が有効である [44]. ここで, 各状態間の遷移率はフェルミの黄金則によって計算する. アンダーソン模型におけるクーロン閉塞等はこの方法で説明される.

謝辞

本稿の研究成果の一部は羽田野直道准教授（東京大学生産技術研究所）、今村卓史助教（東京大学先端技術研究センター）、Gonzalo Ordóñez准教授（Butler University）との共同研究によるものです。本稿の研究成果の一部はJSPS科研費若手研究(B)23740301の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Y. Imry, *Introduction to Mesoscopic Physics* (Oxford Univ. Pr., 2002), 2nd ed.
- [2] S. Datta, *Electronic Transport in Mesoscopic Systems* (Cambridge University Press, 1995).
- [3] 川畑有郷, 新物理学シリーズ31「メゾスコピック系の物理学」(培風館, 1997).
- [4] 勝本信吾, 朝倉物性物理シリーズ2「メゾスコピック系」(朝倉書店, 2003).
- [5] R. A. Webb et al., Phys. Rev. Lett. **54**, 2696 (1985).
- [6] B. J. van Wees et al., Phys. Rev. Lett. **60**, 848 (1988).
- [7] R. Landauer, IBM J. Res. Dev. **1**, 223 (1957).
- [8] M. Büttiker, Phys. Rev. Lett. **57**, 1761 (1986).
- [9] P. F. Bagwell and T. P. Orlando, Phys. Rev. B **40**, 1456 (1989).
- [10] A. Nishino, T. Imamura, and N. Hatano, Phys. Rev. Lett. **102**, 146803 (2009).
- [11] A. Nishino, T. Imamura, and N. Hatano, Phys. Rev. B **83**, 035306 (2011).
- [12] L. P. Kouwenhoven et al., Z. Phys. B Condens. Matter **85**, 367 (1991).
- [13] D. Goldhaber-Gordon et al., Nature (London) **391**, 156 (1998).
- [14] S. M. Cronenwett, T. H. Oosterkamp, and L. P. Kouwenhoven, Science **281**, 540 (1998).
- [15] W. G. van der Wiel et al., Science **289**, 2105 (2000).
- [16] S. De Franceschi et al., Phys. Rev. Lett. **89**, 156801 (2002)
- [17] H. Jeong, A. M. Chang, and M. R. Melloch, Science **293**, 2221 (2001).
- [18] K. Kobayashi et al., Phys. Rev. Lett. **88**, 256806 (2002).
- [19] K. Kobayashi et al., Phys. Rev. B **70**, 035319 (2004).
- [20] Y. V. Nazarov and Y. M. Blanter, *Quantum Transport* (Cambridge University Press, 2009).
- [21] Y. Tanaka and N. Kawakami, Phys. Rev. B **72**, 085304 (2005).
- [22] U. Fano, Phys. Rev. **124**, 1866 (1961).
- [23] K. Sasada, N. Hatano, and G. Ordóñez, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 104707 (2011).
- [24] T. Imamura, A. Nishino, and N. Hatano, Phys. Rev. B **80**, 245323 (2009).
- [25] A. Nishino, T. Imamura, and N. Hatano, J. Phys.: Conf. Ser. **343**, 012087 (2012).
- [26] B. Doyon, Phys. Rev. Lett. **99**, 076806 (2007).
- [27] A. Golub, Phys. Rev. B **76**, 193307 (2007).
- [28] D. S. Fisher and P. A. Lee, Phys. Rev. B **23**, 6851 (1981).
- [29] J. Nygård, D. H. Cobden, and P. E. Lindelof, Nature **408**, 342 (2000).
- [30] C. Caroli et al., J. Phys. C: Solid State Phys. **4**, 916 (1971).
- [31] J. Rammer and H. Smith, Rev. Mod. Phys. **58**, 323 (1986).
- [32] H. Haug and A. P. Jauho, *Quantum Kinetics in Transport and Optics of Semiconductors* (Springer, 2007), 2nd ed.
- [33] Y. Meir, N. S. Wingreen, and P. A. Lee, Phys. Rev. Lett. **66**, 3048 (1991).
- [34] Y. Meir and N. S. Wingreen, Phys. Rev. Lett. **68**, 2512 (1992).
- [35] S. Hershfield, J. H. Davies, and J. W. Wilkins, Phys. Rev. Lett. **67**, 3720 (1991).
- [36] S. Hershfield, J. H. Davies, and J. W. Wilkins, Phys. Rev. B **46**, 7046 (1992).
- [37] N. S. Wingreen and Y. Meir, Phys. Rev. B **49**, 11040 (1994).
- [38] T. Fujii and K. Ueda, J. Phys. Soc. Jpn. **74**, 127 (2005).
- [39] T. Aono, M. Eto, and K. Kawamura, J. Phys. Soc. Jpn. **67**, 1860 (1998).
- [40] B. Dong and X. L. Lei, J. Phys.: Condens. Matter **13**, 9245 (2001).
- [41] B. Dong and X. L. Lei, Phys. Rev. B **63**, 235306 (2001).
- [42] R. López, R. Aguado, and G. Platero, Phys. Rev. Lett. **89**, 136802 (2002).
- [43] P. Werner, T. Oka, and A. J. Millis, Phys. Rev. B **79**, 035320 (2009).
- [44] C. W. J. Beenakker, Phys. Rev. B **44**, 1646 (1991)



疲労損傷評価のための暴風の 累積作用時間の簡易評価方法

大熊 武司* 安井 八紀** 吉江 慶祐***

Simple Method for Evaluating Cumulative Time of Wind Speed for Estimating Fatigue Damage

Takeshi OHKUMA* Hachinori YASUI** Keisuke YOSHIE***

1. はじめに

近年、材料の塑性変形によるエネルギー吸収能力を利用した部材を超高層建築物に適用する事例が増加している。このような塑性変形を伴う部材の風荷重に対する安全性は、設計風速に対する安全性の他、累積疲労損傷度も重要な照査項目である。この風に対する累積疲労損傷度を評価するためには、対象とする期間に渡る風速の累積作用時間の算定、各風速における応答振幅の算定および疲労曲線が必要となる。また、この算定する期間には、ダンパーのように取換可能な部材を対象とした期間、積層ゴムのように取換が困難な部材を対象とした期間が考えられるが、現状いずれも法的に特定されるものではない。ここでは、照査の対象期間という意味で照査期間と呼ぶこととする。

照査期間における風速の累積作用時間の算定方法としては幾つかの方法が提案^{2,3,4)}されているが、近年では、その暴風の発生要因を台風と非台風に区分し、前者についてはMonte Carlo法に基づく台風シミュレーション(以下、台風シミュレーションと呼ぶ)、後者については近隣の気象官署の観測データをWeibull分布に当てはめ、その結果から算定する方法がしばしば用いられている⁵⁾。

しかしながら、台風シミュレーションを用いるためにには、台風データの確率統計的な分析とこの結果の運用が必要となる。また、得られる結果が「建築物荷重指針・同解説(2004)日本建築学会」(以下、荷重指針と呼ぶ)等

における設計風速に対し、どのような位置づけとなるかが解り難いといったこともある。

本報告は、文献2)～4)の考え方を参考に、荷重指針から暴風の累積作用時間を簡易に評価する方法を提案し、その有効性を示した文献1)に加筆したものである。

2. 暴風の最大風速の簡易評価方法

2.1 評価方法の概要

荷重指針には、再現期間100年と500年の平均風速(それぞれ、 U_0 、 U_{500})が風速マップとして示されており、さらに、これら以外の再現期間 r 年に対応する最大風速については、再現期間換算係数 k_{rw} を用いて以下のように算定できるとしている。

$$U_r = U_0 k_{rw} \quad (1)$$

$$k_{rw} = 0.63(\lambda_U - 1)\ln r - 2.9\lambda_U + 3.9 \quad (2)$$

$$\lambda_U = U_{500}/U_0 \quad (3)$$

これらの式から、式(1)は以下のように表わすことができる。 $r_i = 1/P_i$

$$U_r = 0.63(U_{500} - U_0)\ln r - 2.9(U_{500} - U_0) + U_0 \quad (4)$$

式(2)の再現期間換算係数 k_{rw} は、年最大風速の漸近極値分布として下式(5)のGumbel分布を仮定し、再現期間100年および500年の風速がそれぞれ U_0 および U_{500} に一致するように近似したものである。

$$U_i = b - \{\ln(-\ln F_i)\}/a \quad (5)$$

$$F_i = 1 - P_i \quad (6)$$

$$r_i = 1/P_i \quad (7)$$

ここに、 N は観測年数あるいは照査期間、 r_i は i 番目に大きな風速の経験的再現期間、 F_i は経験的非超過確率、 P_i は経験的超過確率である。因みにHazenプロットによる P_i は次式のように表される。

* 名誉教授、工学研究所客員教授
* Professor Emeritus
** 泉創建エンジニアリング都市環境技術研究所
** Izumi Sohken Engineering Co., Ltd.
*** 日建設計
*** Nikken Sekkei Ltd.

$$P_i = (i - 0.5)/N \quad (8)$$

疲労損傷評価においては、年最大の暴風だけでなく、年2位以下の暴風も考慮する必要があると考えられるため、荷重指針の再現期間換算係数の定め方を参考にしつつ、修正 Jansen & Frank 法により経験的超過確率を評価することとし、式(6)～(8)の代わりに以下の式(9)～(12)を用いる。

$$F_i = (1 - P_i)^m \quad (9)$$

$$P_i = (i - 0.5)/mN \quad (10)$$

$$r_i = 1/mP_i \quad (11)$$

$$m = N_s/N \quad (12)$$

ここに、 N_s は観測年数あるいは照査期間の暴風数、 m は年平均の暴風数であり、式(5)に式(9)を代入すれば以下のように表わされる。

$$U_i = b - [\ln\{-m \ln(1 - P_i)\}]/a \quad (13)$$

因みに、荷重指針で採用されている式(5)～(8)は、式(9)～(13)において年平均の暴風数 m を 1 とした場合の式に相当する。

式(13)によって算定される再現期間 100 年および 500 年の風速がそれぞれ U_0 および U_{500} に一致する条件を与え、荷重指針と同様の形式に書き改めると以下のように表わされる。

$$U_i = (U_{500} - U_0)C_i \ln r_i / A - (U_{500} - U_0)B / A + U_0 \quad (14)$$

$$A = \ln\{\ln(1 - 1/500m)/\ln(1 - 1/100m)\} \quad (15)$$

$$B = \ln\{-m \ln(1 - 1/100m)\} \quad (16)$$

$$C_i = \ln\{-m \ln(1 - 1/mr_i)\}/\ln r_i \quad (17)$$

再現期間を 10 年～5000 年、年平均の暴風数 m を 1～10 として、式(14)中の C_i/A および B/A を算定すると以下のようないきなり、同式が荷重指針の式(4)と殆ど差異のない式であることがわかる。

$$C_i/A \approx 0.61 \sim 0.62, \quad B/A \approx 2.9$$

したがって、年平均の暴風数 m が自明であれば、照査期間中の i 番目に大きな最大風速 U_i の再現期間 r_i は式(11)で算定でき、その最大風速 U_i は荷重指針による式(4)で得られることになる。

2.2 年平均の台風数 m_T

年平均の暴風数について検討するに当たり、まず、台風に限定して検討する。ここでは、台風シミュレーションを用いて年平均の台風数 m_T を算定する。台風シミュレーションは以下のようないきなり、条件のもとに行っている。

① 荷重指針と同質のシミュレーション結果が得られることを確認するため、荷重指針と同様に 5000 年の台風シミュレーション⁶⁾を実施する。

ただし、台風シミュレーション結果のばらつき

について検討するため、この 5000 年の台風シミュレーションを 10 組行う。

- ② 概ね日本全国に渡っての情報を得るため、台風シミュレーションの対象地点は、表 1 および図 1 に示す気象官署 29 地点とする。なお、本報告においては、伊豆諸島、薩南諸島、大東諸島、先島諸島および小笠原諸島を検討対象外としている。これは、この地域の暴風の風速の時間変化が、ここで対象とする九州以北の地域と異なると考えられるためである。従って、これらの検討対象外の地域については、ここで提案する暴風の累積作用時間の簡易評価方法においても適用範囲外である。
- ③ 再現期間 100 年の風速が基本風速 U_0 と一致するように上空風に対する地上風の風速比を決定する。ただし、基本風速 U_0 マップからの風速の読み値は 2m/s 刻みとする。
- ④ 10 分平均風速の変動係数を 0.10⁶ とする。
- ⑤ 中心気圧が 980hPa 以下で、その中心が検討地点から 500km 以内に位置した台風の数を台風数 m_T とする。

台風数 m_T と共に、荷重指針における U_{500} と台風シミュレーションによる再現期間 500 年の風速 U_{500S} を比較して表 1 および図 1 に示す。

表 1 再現期間 500 年の風速と年平均台風数 m_T

官署	U_0	U_{500}	U_{500S}	m_T
札幌	32	36	36.5	0.53
青森	32	36	36.6	0.75
秋田	36	40	41.1	0.90
宮古	32	36	36.1	0.96
酒田	36	40	40.7	1.06
仙台	32	36	35.7	1.23
新潟	38	42	42.6	1.28
小名浜	34	38	38.1	1.59
金沢	34	38	37.9	1.51
前橋	32	36	35.9	1.70
水戸	32	36	35.4	1.75
松本	30	34	33.7	1.69
東京	38	42	42.4	1.94
敦賀	34	38	37.9	1.73
鳥取	32	36	35.6	1.61
名古屋	34	38	37.7	1.94
大阪	36	40	39.8	1.96
岡山	30	34	33.3	1.79
広島	30	34	33.0	1.69
和歌山	40	42	44.2	2.05
徳島	40	44	44.0	2.03
福岡	34	38	37.9	1.59
高知	40	44	44.2	2.05
潮岬	40	42	43.6	2.35
天分	32	36	35.3	1.87
熊本	34	36	37.7	1.83
長崎	38	42	42.1	1.71
宮崎	36	40	39.7	2.18
鹿児島	42	46	46.0	2.13

U_{500S} : 台風シミュレーションによる再現期間 500 年の風速



図1 再現期間 500 年の風速と年平均台風数

荷重指針における基本風速 U_0 および U_{500} 共に 2m/s 刻みで読み取っていることを考慮すると、表1に示す台風シミュレーションによる再現期間 500 年の風速 U_{500S} は荷重指針における U_{500} に良く対応していると言え、荷重指針の風速マップ作成時に用いられた台風シミュレーションと同質の結果が得られていると考えられる。

年平均台風数 m_T は、東京より西側の太平洋側では 2.3 ~ 1.8 程度の値、北関東、中部地方の内陸部、福井県より西側の日本海側と瀬戸内海地方では 1.7 前後の値、石川県・新潟県および福島県・宮城県では 1.5~1.2 程度の値、秋田県および岩手県以北では 1 以下の値である。すなわち、本報告で対象とする九州以北における年平均台風数 m_T は 0.5~2.3 の範囲の値である。

鹿児島、名古屋、水戸および仙台を事例に、照査期間 N を 250 年とした場合の再現期間 r_i と最大風速 U_i の関係について、荷重指針と台風シミュレーション結果を比較して図2に示す。なお、台風シミュレーションについては、10組の平均、各再現期間に対応する 10 個の最大風速の内の最大値および最小値を併記している。

同図に示すように、荷重指針による最大風速は台風シミュレーションによる最大風速と再現期間 10 年を超えるような領域では良く対応する。再現期間 10 年以下での差異は、指針式により算定される暴風には台風以外も含まれていること、同式が再現期間 100 年と 500 年の値を通る近似式であることがその要因である。

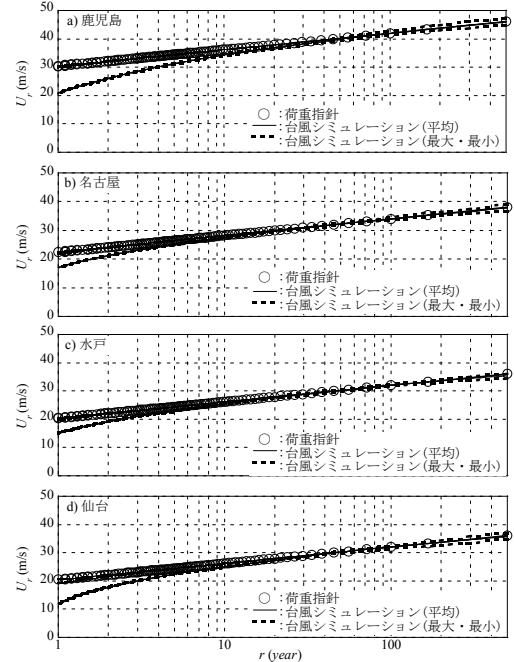


図2 再現期間と最大風速の算定法による差異

2.3 年平均の暴風数 m

ここでは、年平均の暴風数 m が経験的再現期間等にどのように影響を与えるかについて検討する。

式(11)に式(10)を代入して整理すると、経験的再現期間は以下のように表わされる。

$$r_i = N/(i - 0.5) \quad (i = 1, \dots, N_S) \quad (18)$$

すなわち、 $m \geq 1$ の場合には、上位 N 個の再現期間は暴風数 m に依存しない。さらに、筆者等は荷重指針式(4)が暴風数 m を考慮した式(13)あるいは式(14)と殆ど差異がないことを先に示した。これらを合せて考慮すると、 $m \geq 1$ の場合には、上位 N 個以内であれば、式(18)と荷重指針を用いて算定される i 番に大きな最大風速は年平均の暴風数 m に依存しないことになる。前述したように九州以北における年平均台風数は 0.5~2.3 であり、冬季から春季にかけての低気圧等を考慮すると 1 を超えるような値であるとから、上位 N 個の最大風速は年平均の暴風数 m に依存しないと考えられる。

照査期間 N 年における 1 番目および N 番目に大きな最大風速の再現期間はそれぞれ $2N$ 年および約 1 年である。式(18)の経験的再現期間を用いて式(4)より算定される N 番目に大きな最大風速は、基本風速に対して 6m/s ~ 12m/s 低く、基本風速の最も小さい 30m/s 場合で 24m/s ~ 18m/s となる。松井等⁷⁾によれば、荷重効果として累積的な影響として考慮すべき項目である疲労損傷度に

に対する等価継続時間は、風速の9乗に概ね比例する。この考え方に従うと、基本風速に対する再現期間約1年の風速の等価継続時間は13%~1%と小さく、上位N個の最大風速 U_r がある程度精度良く予測できれば、累積疲労損傷度評価には十分と考えられる。

3. 暴風の時間変化の算定法

疲労損傷評価においては、暴風の最大風速の予測だけではなく、風速の時間変化の情報も必要となる。この情報については荷重指針では得られないため、先に求めた台風シミュレーションの結果から、風速の時間変化をモデル化する。なお、荷重指針における最大風速は台風に限定されたものではないが、非台風の時間変化も台風と同様であると見なすこととする。

暴風の時間変化のモデル化手順を以下に示す。

- ① 最大風速が再現期間1年~500年の暴風のみを対象とする。これは、照査期間N年においてN番目に大きな最大風速の再現期間が概ね1年に相当すること、建築基準法施行令第81条の2に該当する建築物において安全性の検証が求められる「極めて稀に発生する暴風」の再現期間が概ね500年に相当することを考慮したものである。
- ② 暴風の継続時間は、中心気圧が980hPa以下で、その中心が検討地点から500km以内である時間と24時間内の短い方とする。
- ③ 各台風の風速を降順に並び替え^{3,4)}、時刻t毎に合計し、時刻t=0の風速に対する比 $r_U(t)$ を求める。
- ④ 風速比 $r_U(t)$ の高い12時間を式(19)で、24時間全体を式(20)によって回帰する。

$$r_U(t) = (1+C_1 t) / \text{Exp}(C_2 t^{0.70}) \quad (19)$$

$$r_U(t) = (1+C_3 t^{2.2}) / \text{Exp}(C_4 t^{1.2}) \quad (20)$$

ここに、t:時刻(h)

図1に示した29地点についての算定結果の内、16地点の結果を図3に示す。なお、図中では○印が台風シミュレーション結果、波線が式(19)による回帰曲線、実線が式(20)による回帰曲線である。

同図に示すように、式(19)による回帰曲線は台風シミュレーション結果と風速比の高い0~12時間まででは良く一致しており、12時間以降については安全側に評価されている。また、式(20)による回帰曲線は24時間全体に渡って台風シミュレーション結果と良く一致している。因みに、ここに示した簡易評価方法と成原等³⁾の方法との違いは、以下の通りである。

- ① 本法ではその基となった台風シミュレーション

に10分平均風速の変動係数を考慮していることに対して、成原等³⁾の方法では考慮していない。この違いは、風速比でみると、前者に比較して後者は高めの値を与えることになる。

本法が式(19)および式(20)に示すように風速比-時間の関係をモデル化しているに対して、成原等³⁾の方法では超過継続時間-風速比の関係がモデル化されている。

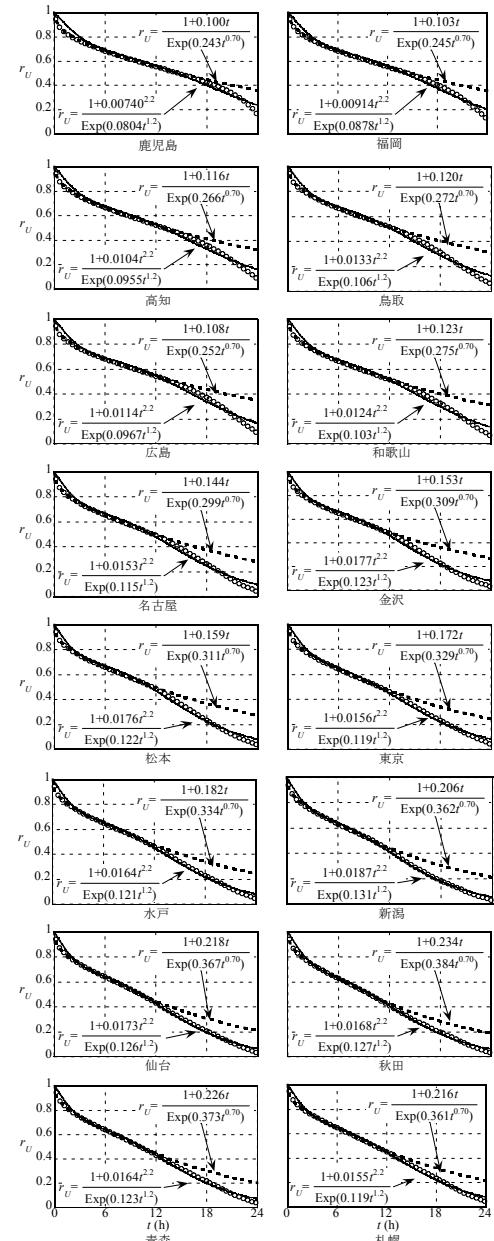


図3 風速比の時間変化

図3に示す風速比-時間の関係を地点別に比較した場合、南西側から北東側になるにつれて時間に対して風速比が大きく低減する傾向にある。また、係数 $C_1 \sim C_4$ は、緯度が高くなると大きくなる傾向がある。これらは、九州以北では、台風の移動方向がこの方向と概ね一致すること、加えて北上するに従って台風の移動速度が速くなる傾向にあることに関連していると考えられる。

この傾向を踏まえ、概ね日本全国に渡っての係数を簡単に評価するため、緯度をパラメータとし、式(21)～(24)によって係数 $C_1 \sim C_4$ を近似する。図4に図1に示した全29地点の結果を用いて近似した結果を示す。

$$C_1 = \min(-0.532 + 0.0192\theta_N, 0.217) \quad (21)$$

$$C_2 = \min(-0.444 + 0.0210\theta_N, 0.375) \quad (22)$$

$$C_3 = \min(-0.0565 + 0.00201\theta_N, 0.0199) \quad (23)$$

$$C_4 = \min(-0.196 + 0.00870\theta_N, 0.135) \quad (24)$$

ここに、 θ_N は緯度($^{\circ}$)である。

図4に示すように式(21)～(24)は、台風シミュレーション結果を式(19)および式(20)で直接近似して得られる $C_1 \sim C_4$ に良く対応している。因みに、風速比の時間変化は、 $C_1 \sim C_4$ および時間に関するべき数に比較的鈍感であり、図4に示される近似の程度で十分精度良く風速比-時間関係を表わせることを確認している。

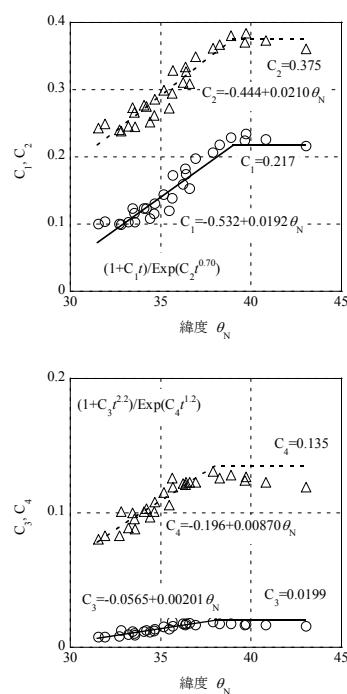


図4 風速比-時間関係を表わす係数

4. 累積作用時間の算定例とその有効性

ここでは、照査期間 N を100年および250年として、照査期間中の累積作用時間の算定例を示し、台風シミュレーション結果に基づいて算定した累積作用時間と比較することで、その有効性を示す。

4.1 算定条件の概要

最大風速が、照査期間100年の場合には再現期間200年以下、照査期間250年の場合には再現期間500年以下である暴風のみを対象とする。簡易評価方法における風速比の時間変化のモデル式には、安全側の評価となる式(19)、式(21)および式(22)を用いる。なお、松井等⁷⁾の提案する等価継続時間の考え方から判断すると、最大風速の60%以下となる12時間以降の評価精度は、累積疲労損傷度の評価精度への影響は小さく、式(19)、式(21)および式(22)を用いても、式(20)、式(23)および式(24)を用いてもその差異は小さい。

台風シミュレーションでは、照査期間100年の場合には500組、照査期間250年の場合には200組算定し、それらの平均値に加えて、松井等⁷⁾が提案する疲労損傷評価において等価継続時間が最大となる1組、および最小となる1組を抽出する。

4.2 累積作用時間の算定結果

鹿児島、名古屋、水戸および仙台を事例に、風速のビンを1m/sとして算定した各風速の累積作用時間を図5に示す。

いずれの地点においても、照査期間に関わらず、簡易評価方法による累積作用時間は、台風シミュレーションによる累積作用時間の平均から等価継続時間が最大となる組の累積作用時間の値を取り、妥当な値を示している。照査期間中で最も高い風速における累積作用時間に着目すると、台風シミュレーションによる平均値は10分に満たない値となっている。設計との整合性を考えると、照査期間中で最も高い風速の累積作用時間は、台風シミュレーションによる平均値で評価すると危険側に評価される可能性があり、注意が必要である。なお、簡易評価方法においては、算定法の性質上、累積作用時間が10分を下回ることはない。

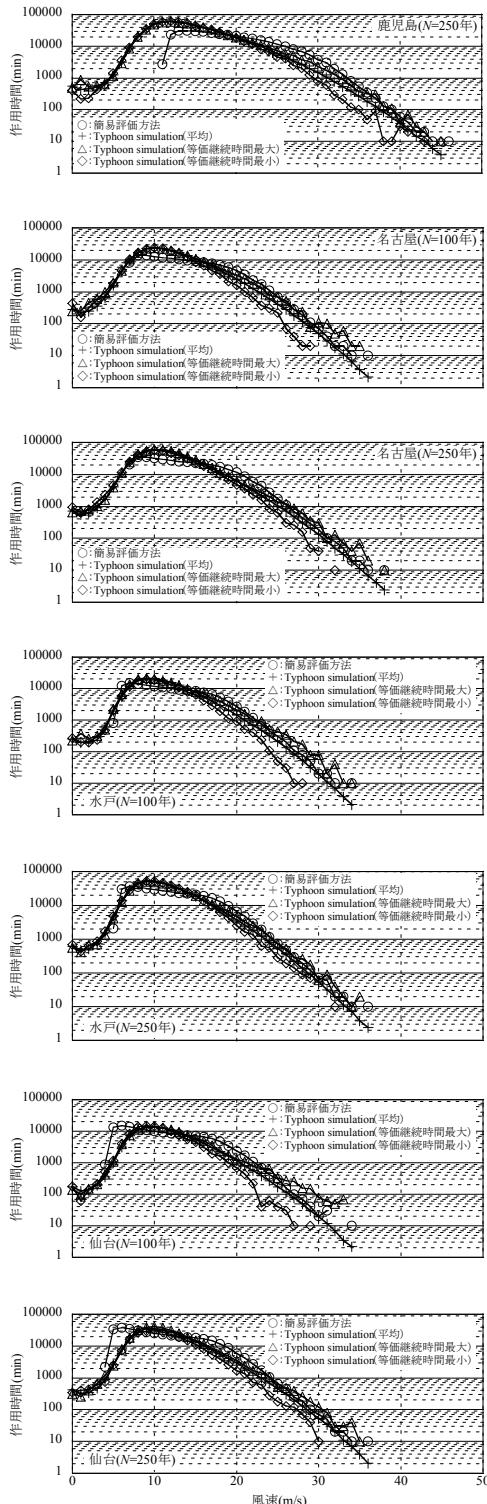


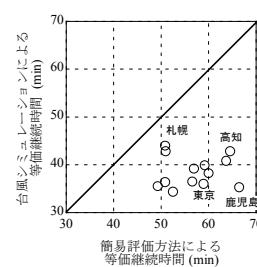
図5 風速の累積作用時間の算定例

4.3 等価継続時間

算定地点を鹿児島、福岡、高知、鳥取、名古屋、金沢、新潟、東京、水戸、仙台、秋田、青森および札幌の計13地点について、累積疲労損傷を対象として、最大風速を U_{500} とする暴風1つの等価継続時間を図6に示す。同図に示すように、最大風速を U_{500} とする暴風の等価継続時間は、簡易評価方法では50分～70分、台風シミュレーションでは30分～45分であり、簡易評価方法の方が安全側の評価となっている。また、東京における等価継続時間が、簡易評価方法では59分、台風シミュレーションでは36分であることと、松井等⁷⁾が試算した「観測記録より合成した風速記録(羽田、最大風速:42.0m/s)」の等価継続時間49分とを比較すると、簡易評価方法による等価継続時間はやや長めで、安全側の評価となっている。

図7に照査期間100年および250年の場合の等価継続時間を示す。同図に示すように、簡易評価方法による等価継続時間は、台風シミュレーションによって得られる最大の等価継続時間と概ね等しいか、大きめの値である。さらに、図7b)の照査期間が図7a)の2.5倍であることに着目して、図7a)に対する図7b)の等価継続時間の倍率を比較すると、簡易評価方法による等価継続時間は2.5倍よりやや大きめであるに対し、台風シミュレーションによる最大の等価継続時間は2.5倍より小さめの傾向にある。照査期間が250年を超えるような場合には、簡易評価方法による累積作用時間は過大となることが予想される。

図8に図6に示した各照査期間における暴風の等価継続時間を図7の最大風速を U_{500} とする暴風の等価継続時間で除した値(以降、 U_{500} 暴風への換算個数と呼ぶ)を示す。同図に示すように換算個数は、照査期間100年の場合で3～12個、照査期間250年で7～22個で、南側ほど大きい傾向にある。

図6 最大風速を U_{500} とする暴風の等価継続時間

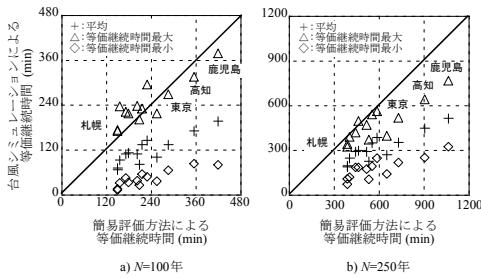
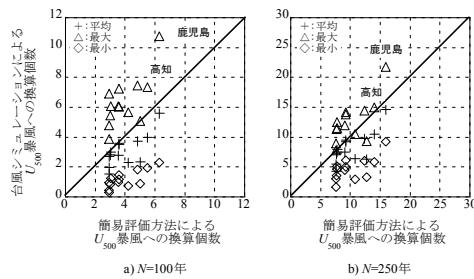


図7 照査期間と等価継続時間

図8 照査期間と U_{500} 暴風への換算個数

5.まとめ

- ここで検討と提案を事例に適用することで解ったことをまとめると次のようになる。
- ① 九州以北においての年平均の台風数は0.5～2.3程度の値で、台風以外の暴風を含めると年平均の暴風数は1を超えると考えられる。
 - ② 修正Jansen & Frank法によって算定した経験的再現期間を荷重指針に代入して照査期間 N 年における暴風の最大風速を求める方法を示した。この方法によって算定される上位 N 個の暴風の経験的再現期間および最大風速は、年平均の暴風数が1以上であれば、年平均の暴風数に依存しない。
 - ③ 松井等⁷⁾の提案する等価継続時間の考え方から、照査期間 N が250年以内の場合は、上位 N 個の最大風速がある程度の精度で予測できれば、累積疲労損傷評価には十分と考えられる。
 - ④ 提案する暴風の時間変化のモデル式(19)～式(24)は、伊豆諸島、薩南諸島、大東諸島、先島諸島および小笠原諸島を除く日本全土に渡って適用でき、簡易評価方法として有効である。

- ⑤ 簡易評価方法で算定される暴風の累積作用時間は、台風シミュレーションの平均値から最大値程度の値となり、安全側の結果を与え、有効である。
- ⑥ 台風シミュレーションによる累積作用時間の平均値は、高風速域でやや危険側の値となる場合がある。
- ⑦ 照査期間が250年を超える場合には、簡易評価手法による累積作用時間は過大となる可能性がある。

6.おわりに

文献1)は、この9月に日本免震構造協会から刊行された「免震建築物の耐風設計指針」(耐風設計部会:委員長 大熊武司)の付録整備の一環として作成されたもので、ご議論いただいた関係各位に改めて謝意を表します。

参考文献

- 1) 安井八紀、大熊武司、吉江慶祐、鶴見俊雄:供用期間における暴風の累積作用時間の簡易評価方法 その1、その2、日本建築学会関東支部研究報告集I, pp.421～428, 2012
- 2) 大熊武司、中込忠男、丸川比佐夫:強風による鋼構造骨組の累積疲労損傷 その1、その2、日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.75～78, 1988
- 3) 成原弘之、泉満、浅見豊:風荷重に対する高層鋼構造骨組の疲労設計、日本建築学会構造系論文集, 第465号, pp.129～137, 1994.11
- 4) 安井八紀、大熊武司、廣川雅一、吉江慶祐、丸川比佐夫:高層建築物の疲労損傷評価に与える強風特性のモデル化の影響に関する研究、その1 強風特性のモデル化、日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.185～186, 2001.9
- 5) 日本建築学会:風と地震による繰返し荷重効果と疲労損傷、シンポジウム資料, 2003
- 6) 安井八紀、大熊武司、吉江慶祐、片桐純治、廣川雅一:モンテカルロ法を用いた台風シミュレーションに関する研究、第16回風工学シンポジウム, pp.441～446, 2000
- 7) 松井正宏、大熊武司、田村幸雄、飯場正紀、竹中康雄、吉江慶祐:耐風設計で累積的荷重効果を評価するための強風イベントの等価継続時間、日本建築学会大会学術講演梗概集B, pp.85～86, 2011.8



人間工学視点に基づく安全円滑な 平面交差交通システムの構築 —カーブミラーの視認性向上による交差点視環境改善—

堀野 定雄*

森 みどり**

久保 登***

北島 創****

Ergonomics study on the safe and smooth road traffic system at uncontrolled intersections
- Improvement of the visual environment at intersections
based on installing traffic convex mirrors with enhanced visibility -

Sadao HORINO*

Midori MORI**

Noboru KUBO***

Sou KITAJIMA****

1 はじめに*

警察庁統計によると、わが国における交通事故は、この数年減少傾向が続いている⁽¹⁾。しかし、2009年中の発生件数736,688件、負傷者910,115人、死亡者4,914人で、事故は依然として深刻な多発状況にある。また、出会い頭事故(199,196件)は全事故の1/4(27%)を占め、市街地生活道路無信号交差点で多発している構造性に変わりはない。

著者らが行った横浜市鶴見区でのフィールド調査から、無信号交差点における出会い頭事故の要因として、一時不不停止や安全不確認を誘発する「見えない交差点視環境」があること⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾、見通しの悪い交差点で補助視界を得るために有効なカーブミラー（以下、ミラーと略）について、視認性が低いミラーが多く設置されている実態や良好な視界を得る上で必ずしも充分な設置指針が存在しないこと⁽⁵⁾⁽⁶⁾、などがわかった。

そこで、2007-2008年度の工学研究所共同研究において、全国のミラー（2009年7月現在で約224万本設置）点検および、新設・改修工事に利用できるミラー設置・調整の標準的簡便法を提案するため、(1)交差点視環境の定量評価、(2)視環境検討用の可搬型組立式ミラー・位置決め用マーカーランプなどの開発、(3)これらの実験装

置・器具を用いたミラー視認性評価フィールド実験、(4)コンピュータ上でミラー視界を含む視環境を再現する3次元コンピュータグラフィクス(3D CG)ソフトウェアを用いたシミュレーターの開発、(5)開発したシミュレーターによる最適な視環境やミラー設置位置の検討、などを実施してきた⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

同研究の成果として、これまでのミラー設置・調整法は、現場適用が容易な基礎的方法論が不足し、現場作業は感覚と経験に大きく依存していること、不良な交差点視環境の原因が種々の視覚的障害物や不適切に設置したミラー等にあること、ミラーにより良好な補助視界を得る調整範囲（位置・角度）は予想外に厳密である（狭い）こと、鏡像内に映る接近車両の最遠視認距離はミラー諸元（ミラー直径・材質等）や対象物（4輪車・2輪車の別等）によって変化すること、などが見出された。また、現場での設置・調整方法の標準化・簡易化以前に、一定の視界・視認性を確保するミラー設置条件検討用の基礎的データ、特に良好な補助視界を得るために有効な交差点ミラーの設置基準が土木工学分野に存在しないことも明らかになった⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。すなわち、2007-2008年度共同研究により、ミラーの視認性評価および適切な補助視界を確保するための設置基準導出の基盤となる研究方法論と多くの基礎的知見が得られた。

本稿は、このような研究成果をふまえて、2009-2010年度に研究助成を受けた工学研究所共同研究の成果概要を報告するものである。なお、2007・2008年度共同研究の概要については、工学研究所所報において報告しているので参照されたい⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

*客員教授 工学研究所高安心超安全交通研究所
Guest Professor, Research Institute for Well-informed and
Risk-free Transportation (KU-WIRF)

**助教 経営工学科
Research Associate, Department of Industrial Engineering and
Management

***客員研究員 工学研究所高安心超安全交通研究所
Guest Researcher, Research Institute for Well-informed and
Risk-free Transportation (KU-WIRF)

****特別研究員 工学研究所高安心超安全交通研究所
Research Fellow, Research Institute for Well-informed and
Risk-free Transportation (KU-WIRF)

2. 研究目的および研究計画

2009-2010 年度の研究では、引き続き、ミラーの視認性評価方法および適切な補助視界を確保するための諸条件を明らかにして、ミラーの設置基準、再設計・調整の指針を体系化し、交差点視環境設計の人間工学的基盤の整備をはかることとした⁽¹²⁾。あわせて、視認性に問題があるミラーの点検と新設・改修工事に際し現場での設置・調整を簡易化、効率化できる標準的方法を提案し、ミラーの視認性向上、安全円滑な交差点交通システムの実現をはかることを目標とした。

具体的研究計画としては、ミラー視認性の人間工学 3 原則 (①ミラー中央に道路が映る、②ミラー像に死角がない、③距離感を支援する路面マークが映る)⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾を満たすミラー設置条件(位置・角度)を迅速かつ正確に測定・調整する方法について、フィールド研究および 3 次元 CG ソフトウェアを用いたシミュレーション研究を併用し、実証的研究開発を試みた。すなわち、実際の交差点で最小限の交通阻害で安全円滑に実施できることを前提条件とし、下記の 3 つの課題を中心に研究を遂行した。また、必要に応じて、関係行政機関等と連携し協力を得た。

- (1) フィールド研究：実ミラーを用いた視認性評価と設置・調整方法の検討
- (2) 3 次元 CG シミュレーション研究：3 次元 CG ソフトウェアを用いたシミュレーターの構築とミラー設置状況の検討
- (3) ミラー視認性評価、ミラー設置条件の体系的整理

3. [課題 1] フィールド研究：実ミラーを用いた視認性評価と設置・調整方法の検討

3.1 ミラー視認性評価のフィールド実証実験：ミラーによる接近車両の視認距離測定

3.1.1 研究方法

2007 年度に実施した接近車両視認性評価実験の結果、ミラーの大きさ・曲率や視認対象車両に加えて、ミラー材質、実験条件、被験者属性など諸要因の効果を検証し、安全視距離について検討することが課題であると確認できた⁽⁷⁾⁽⁸⁾。そこで、各種条件においてミラーによる交差路接近車両の視認性を評価するため、実際の交差点環境を模擬した実路テストコースにおいて、以下のような条件で実車走行実験を行った((財)日本自動車研究所(JARI))。

2009 年 9 月、天候：快晴)(図 1、図 2)。

(1) 実路テストコースにおけるミラー視認距離の測定

市街地の隅切りのない見通しの悪い無信号交差点を模擬した実路テストコース交差点で、非優先側の交差点境界線に前端を合わせた乗用車の運転席に座った被験者が、

交差点カーブミラーの鏡像内の接近車両を認識する距離(視認距離)を測定する実車走行実験を行った(図 1)⁽¹³⁾。実験条件は、以下の 4 要因を組み合わせた 16 条件とした。

1. ミラー直径 ϕ ・鏡面曲率 $R[\text{mm}]$ (2 水準) :
 - (1) 小 $\phi=600, R=2200$, (2) 大 $\phi=800, R=3000$
2. ミラー材質/反射率 (4 水準) :
 - (1) A/0.85, (2) B/0.80, (3) C/0.80, (4) D/0.60
3. 接近車両 (2 水準) :
 - (1) 乗用車, (2) 原付 (50cc)
4. 被験者 (2 水準) :
 - (1) 若年者 (大学生, 3 名), (2) 高齢者 (60 歳代, 3 名)

実験は、被験者からみて優先側道路右方の交差路境界線 250m 後方から約 40km/h で車両(乗用車、バイク)を交差点に接近させ、交差点左方コーナーに設置した

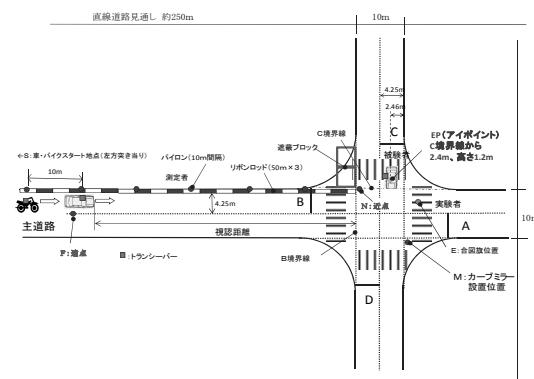


図 1 ミラー視認性評価実証実験の実験方法

表 1 車種・ミラー径(大・小)と視認距離 [m]

車種・ミラー径	最短	平均	最長
乗用車・大	89	115	154
乗用車・小	62	89	145
原付・大	57	80	108
原付・小	30	61	93

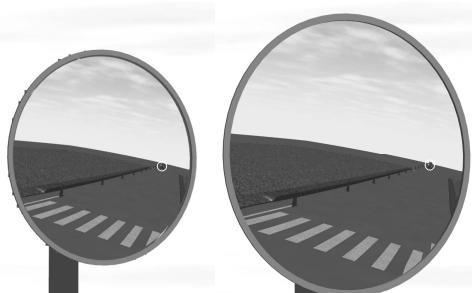


図 2 交差点環境 3 次元 CG シミュレーション：ミラー鏡像における視界と視認対象車(白円内・乗用車)の大きさ比較
(左：小, 90m 地点、右：大, 110m 地点)

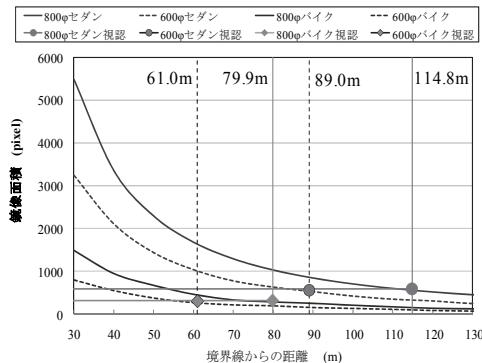


図3 ミラー鏡像における視認対象車両の大きさ
(3次元CGシミュレーション)と視認距離
(実測平均値)

ミラー鏡像で車両を視認できた距離を実測した。実験用ミラーは、「道路反射鏡設置指針」準拠の一般市販品を選択した。被験者は全員運転免許取得者で、矯正視力は左右とも1.0以上であった。

なお、今回の実験は実験条件(16条件)・回数(96回)が多く、8種類のミラーを短時間に交換・調整する必要があった。そこで、2007-2008年度研究で独自設計し、市販のアルミ製伸縮式脚立と特注アルミ製支柱で製作した可搬組立型ミラー(3.2項参照)を使用することで、円滑かつ効率的に実験できた。

(2)交差点環境3次元CGシミュレーション：ミラー鏡像における視認対象車の大きさ測定

著者らが開発した3次元CGシミュレーターを用いて、実路テストコースでの実験状況と実験用ミラー視界を再現した(図2)。さらに、乗用車運転者アイポイント(EP)からみて、交差点境界線から10mごとの地点を走行する車両の鏡像上の見かけの大きさ(ディスプレイ上のピクセル数)を測定した。

3.1.2 研究結果および考察

(1)実路テストコースにおけるミラー視認距離の測定

各実験条件における接近車両の最遠視認距離実測値は、表1のようになった。各条件における視認距離実測値は、平均61-115m、レンジ(30, 154m)に分布し、視認対象が乗用車の場合は、大型ミラー($\varphi=800$)での視認距離は平均115m、レンジ(89, 154m)に対し小型ミラー($\varphi=600$)は同89m(62, 145m)に分布していた。原付の場合は、大型ミラー視認距離は同80m(57, 108m)、小型ミラーでの視認距離は同61m(30, 93m)に分布していた。すなわち、乗用車・原付とも、ミラ一大に対し、ミラ一小は視

認距離(平均)が70-80%程度短く、原付の視認距離は乗用車に比べて、大・小ミラー共に60-70%程度短かった(乗用車に比して、交差点に近づかないと視認できない)。

4元配置分散分析の結果、ミラーの大きさ、材質、接近車両の主効果と材質×車両、大きさ×材質×車両の交互作用が、各々1%水準で有意であった。

今回の実測値では、理論的な安全視距離(50km/h接近時、交差点境界線から約60m⁽⁹⁾)に対して、いずれの条件でも平均値では安全な視認距離を確保できている。今回の実験では、ミラー諸元や車種による視認性の変化も把握でき、ミラーを介して接近車両を安全に発見しうる有効性が確認できた。ただし、道路交通環境、天候、運転タスク等がいずれも好条件であり、本結果を日常運転環境でのミラー視認性、安全性評価に適用するには、特に視認距離の短い原付(バイク)などは、個人差やミラー設置環境での視認性評価と設置条件の検討が重要である。

(2)3次元CGシミュレーション：ミラー鏡像における視認対象車の大きさと視認距離

3次元CGシミュレーションによれば、ミラ一大・小とも、ミラー視界(鏡面に映る空間的範囲)は同様であった(図2)。しかし、運転者EPからみた乗用車・バイクのそれぞれの見かけの大きさ(ピクセル数)はミラ一大・小で大きく変わった。たとえば境界線から60m地点では大は小の約1.7倍となった。また、当然、乗用車と原付では大きさが異なった(約3.9倍)(図3)。ところが、乗用車または原付同士で、ミラ一大・小における視認可能な距離(平均値)での見かけの鏡像の大きさ(ピクセル数)はほぼ一致した(図3の●と◆)。カーブミラー鏡像内の車両の被視認性(視認距離)は、対象車両の実際の距離の大小ではなく、鏡像内に映る対象車両の見かけの大きさが同一であれば同様になることが示唆された。

3.1.3 まとめ

本研究では、接近車両の最遠視認距離はミラー諸元や車種によって変化するが、市販ミラーにおいては、平均値では安全な視認距離を確保可能であること、3次元CGシミュレーションによる検討から、鏡像内の見かけの大きさが車両の視認可否を大きく左右することを示した。ミラー諸元、実験条件など諸要因の効果や、実際の交通場面におけるミラー視認性の推定、安全視距離確保の方策については、さらに検討が必要である。

3.2 ミラー設置・調整方法の検討：簡便な角度測定と微調整方法、設置手順、等

既設および新設時の簡便・正確なミラー角度測定は意

外に容易ではない。2008年までに、実験用の可搬組立型ミラーにおいて、ミラー支柱を2分割して上半部が回転可能な「水平角調整型」のものを製作した（図4）が、これは角度目盛が2度刻みで、1度以下の調整をするには適当ではない。

俯角については、ミラー背面に傾斜計を当てることで概ね1度単位の計測ができる（図5）ので、以下のような方法で水平角を概ね1度単位で計測する手法を考案した。
(考案した水平角測定方法)

図6のように、水平角の基準となる位置（たとえばアイポイント）からミラーを撮影する。この際、基準となる位置そのものではなく、ミラーから見て、その位置を通る延長線上に十分（20m程度）下がって、望遠撮影するとよい。

このミラーの写真から、映ったミラーの像の、天地方向の長さA（鉛直方向の直径）と、水平方向の長さB（水平方向の直径）を求め、水平角θを

$$\theta = \cos^{-1}(B/A)$$

として求める（図7、 $\theta=45^\circ$ ）。なるべく離れたところからミラーを撮影することにより、ミラーを見上げる仰角によるAの誤差は無視した。

この方法によれば、ミラーそのものに触れることなく、水平角をおおむね1度程度の分解能で計測することができる。

4. [課題2] 3次元CGシミュレーション研究：3次元CGソフトを用いたシミュレーターの構築とミラー設置状況の検討

4.1 3次元CGシミュレーション法の概要

現在実用化しているコンピューターグラフィックスでは、三次元物体の表面の表現が非常に進歩していて、木材や塗装面などの通常の表面の他に、ガラス・水などの透過物体、鏡面などの反射面などの表現もきわめて実感的に行える。特に、透過物体や鏡面などの光の屈折や全反射を伴う表面の表現には、レイトレスティングと呼ばれる精密な光線追跡計算を行う。このレイトレスティング表現をいわば、鏡面に映った路面や車両等の位置が正確に計算で求められる。

そこで、本研究では、2007年度より構築を開始したレイトレスティングを用いたミラー鏡像および交差点環境のシミュレーションシステムに4.3のような成果を追加した。

4.2 3次元CGソフトを用いたミラー設置シミュレーション

高速画像処理コンピュータを駆使し、テストコース・



図4 水平角が調整できる実験用ミラー



図5 ミラー背面に傾斜計を当てて俯角を測定する

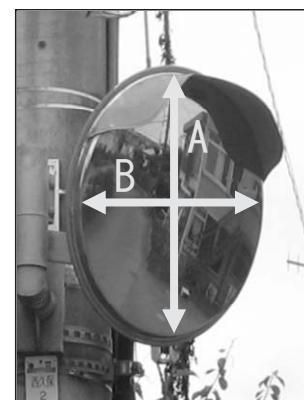


図6 基準位置の延長線上、遠方より撮影したミラー

実路を対象に、3次元CGソフトウェアを用いたシミュレーション環境・手法を実践的に開発した。シミュレーションの再現性を検証後、典型的な交差点環境におけるミラー設置条件をシミュレーションし、ミラー視認性評価、調整手順の標準化・簡易化に資することを企図した。

2008年度までに構築した3次元CGシミュレーターの概要是以下の通りである。

- (1) 市販のPC用の汎用3Dグラフィックエンジン(商品名「Shade」)を用いて、ミラー本体(鏡面・支柱含む)、路面、壁・塀・植栽、電柱等の部品を作成した。
 - (2)これらをPC内のシミュレーション空間内に配置してミラーの角度調整などを簡単に行えるように操作法を考案した。
 - (3)実際にPC内のシミュレーション環境で、ミラーを備えた無信号交差点を作成し、ミラーの位置を変化させることで、非優先側道路のアイポイント(停止線手前に停止した自動車運転者の視点)からどのように優先側の道路・車両等が見えるかを検討した。

この3次元CGシミュレーターを用いて、(1)JARI実路テストコースで実施したミラー視認性評価実験の実験状況と実験用ミラー視界の再現、(2)ミラー設置交差点のミラー鏡像シミュレーション例として横浜市鶴見区芦穂崎地区の市街地交差点、(3)ミラー未設置交差点の例として横浜市港南区日野交差点などでシミュレーションを行った。その結果、交差点に設置されたミラー反射像を、実際の道路交通状況に合わせて再現でき、ミラー鏡像における視認距離・死角発生状況を含めて鏡面内実鏡像とシミュレーションの一一致度が高く、実用化に充分な性能を備えていることを実証した。

以上の研究成果を踏まえて、本研究では、主として以下に述べる3次元CGシミュレーター研究開発とシミュレーション応用事例の拡充・発展を進めた。

4.3 3次元CGソフトウェアを用いたシミュレーターの構築：シミュレーション簡便化ツールの開発(入力専用フロントエンドプロセッサ「交差点エディタ」)

2008 年までの作業では、PC 内にシミュレーションを行いたい交差点形状を生成するのにかなりの手間を要した。このため、交差点形状を容易に生成できるようする入力容易化ツール「交差点エディター」を外注製作した。このツールを交差点形状生成に応用し、効果を検証した(図 8)。

従来、1本1本の輪郭線を引きながら交差点全体の形状(幅員・長さ・勾配・交差する道路の中心線同士の食

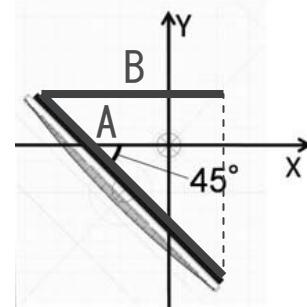


図7 ミラーの水平角の求め方

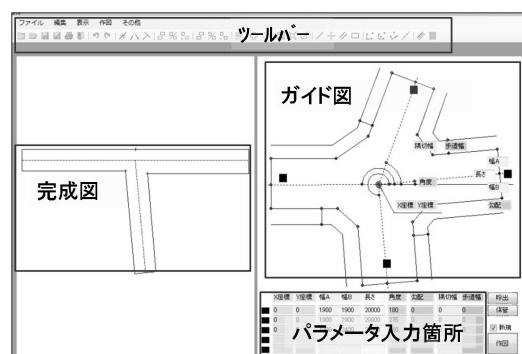


図8 交差点エディター

い違い等)を作成していくことに対して、このツールは、図8に示すように、「ガイド図」の案内に従って、交差点中心、交差道路(枝)の数、それぞれの枝の角度、幅員、勾配、枝の長さなどを入力するだけで、シミュレーション空間にそのまま取り込める形式でのデータを生成する。

このツールを用いた結果、従来の入力方法より、「交差点エディター」で作図する方が、作業時間を1/10程度に短縮できた。この「交差点エディター」では、交差点データ生成のうち、①「交差点平面図作成」を容易化するものであるが、①の後に行う、②「埠等を配置し交差点上面図作成」についても作業容易化ができるようにツールの改良が必須である。

このツールはシミュレーション法の簡便化・利便性向上に有効で、機能拡大で迅速・簡便な交差点安全性の検討が可能になる。今後はこの改良も含め、さらに入力容易化を行い、実際のミラー設置組織現場（道路事務所等）での利用を目指す。

4.4 [事例 1] 右直事故発生交差点における事故原因分析と視環境改善シミュレーション

ミラーの設置された実交差点で、ミラー視界が不適切だったために発生したと考えられる事故事例を取り上げ、原因の推定や現地交差点の改善方法を検討した⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。

4.4.1 研究方法

事故概要：県下茅ヶ崎市西久保の死角ある無信号・ミラー設置T字路で、非優先道路を右折しようとした車が、右方から来た優先道路走行自転車と出会い頭にぶつかる事故(2009年6月)が起きた。自動車運転者はミラーには自転車が映っていないかったと証言した。

ミラー設置改善シミュレーション：シミュレーターで交差点環境を再現し(図9)、非優先道路で停止中の乗用車視点(EP)から視認距離=60m以上、死角(図9)の三角部分、長さ 9.2m*最大幅 3.7m)が最小となるミラー設置改善案を作成した。



図9 事故発生交差点上面図 (無信号T字路、死角あり)

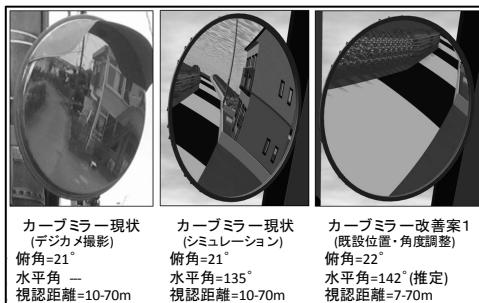


図10 ミラー設置条件の再現と既設位置での改善案
シミュレーション

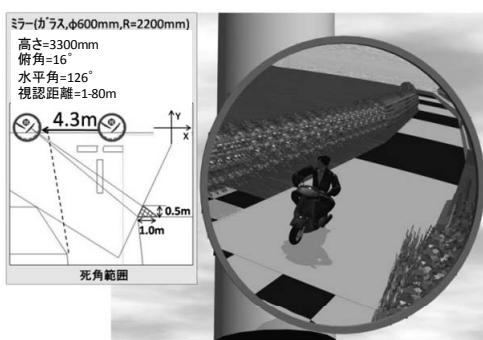


図11 ミラー設置最適改善案シミュレーション

(既設位置から x 軸-4.3m 移動、白黒スケール：道路 10m、交差点内 1m)

4.4.2 研究結果および考察

改善案の検討：構築したシミュレーション環境で交差点環境を再現後、事故原因分析及びミラー設置位置・高さ・角度を変動させ、改善案を検討した。既設ミラーでは②優先方向に 9.2m 死角があり間接視界が不十分である(図9)。改善策としてミラー(ガラス φ600, R=2000mm)位置を x 軸方向へ-4.3m 移動すれば死角を 1m に削減でき、間接視界で 80m の視認距離が確保できる(図10, 11)。シミュレーション環境を用いることで、現場では容易に実験できない、民家敷地内へのミラー移動の効果を簡単に分析することができた。

道路管理者への提案：当該ミラーを管理する道路管理者(当該交差点のある市役所内)へ改善を提案し、一定の理解を得た(2009年12月)。なお、偶然、調査後に直接・間接視界の死角要因となる生垣と家屋が撤去されて駐車場に変わったため、死角は解消し、問題となっていた状況は改善された。

4.5 [事例 2] 典型的な生活道路交差点におけるミラー視認性評価シミュレーション：道路幅員、設置位置、等の効果

前述の3次元CGシミュレーション手法を用いて、市街地交差点における非優先道路運転者からみたミラー視認性について、道路環境や設置諸元を系統的に変化させて評価し、安全視界の確保に影響を及ぼす要因を検証するとともに、適切なミラー設置条件の検討を行った^{[16][17]}。以下に、その一端を紹介する。

4.5.1 研究方法

(1)生活道路交差点におけるカーブミラー視認性評価

3次元CGシミュレーション手法により典型的な生活道路交差点環境をPC上に再現し(図12)、非優先道路の乗用車運転者視点(EP: 路面高 1200mm)からみた視認性が最大となるミラー設置最適解を検証した。ミラー設置最適解とは、鏡像で交差路右方の安全視距離(境界線から 60m 以上 : 50km/h 走行の優先車発見後、非優先車が衝突回避可能な距離)が確保でき、かつ交差点直近の死角(図12のBD距離)が最小となる条件とした。

(2)ミラー鏡像の視認性評価：道路幅員の検討

非優先道路幅員 3 条件(4, 5, 6m)、優先道路幅員 5 条件(6, 7, 8, 9, 10m)を組み合わせた計 15 条件の交差点で、交差路右方視界確保のため左コーナー角地 M に設置するミラー(800φmm, R=3000mm, ミラー鏡面下端高=2.5m)の設置最適解(俯角・水平角、最大視認距離、交差点直近死角距離)を求めた(図13)。

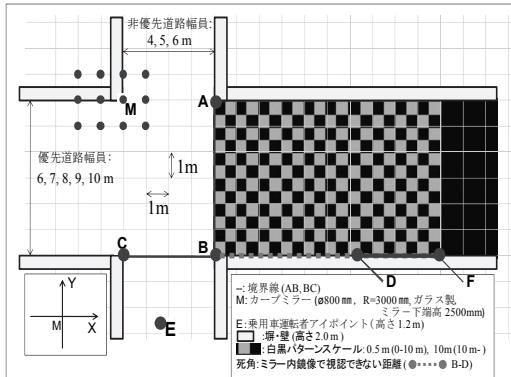


図 12 3 次元 CG シミュレーションによる生活道路交差点
ミラー視認性の評価方法

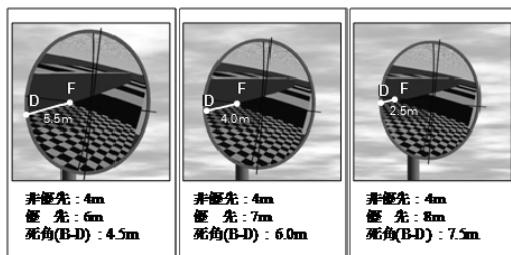


図 13 3 次元 CG シミュレーションによる評価：
ミラー鏡像と道路幅員の関係

(3) ミラー鏡像の視認性評価：水平位置の検討

次に、非優先道路 4m × 優先道路 6m の交差点を対象に、隅切りのない左コーナー角地 M を原点とし、x 軸方向 4 条件(+1, 0 -1, -2m), y 軸方向 3 条件(+1, 0 -1m)を組み合わせた計 12 地点におけるミラー設置最適解(俯角・水平角、最大視認距離、交差点直近死角距離)を求めた(図 13)。

4.5.2 研究結果および考察

(1) ミラー視認性評価と設置最適解シミュレーション：

優先／非優先道路幅員の検討

交差点右方 60m の視認距離確保を必須条件とすると、交差点直近の死角量は優先道路幅に比例して増加し、非優先道路幅に反比例して減少する。15 条件中、ミラー内死角の最小値は 2.5m(非優先 6 m × 優先 6m), 最大値は 11.0m(非優先 4 m × 優先 10m)で、死角 0 になる条件はない(図 13)。

かった(図 13, 図 14)。直接視界が不良の交差点では、自転車・バイク全長が直近の死角 2.5m に入り、発見できない危険性がある。また、12 条件で小型乗用車全長(4.7m)が隠れる死角があり、ミラーのみで直近の視界を確保することは困難である(図 13, 図 14)。

(2) ミラー視認性評価と最適設置解シミュレーション：

ミラー水平設置位置の検討

交差点直近の死角量は、ミラー位置を x 軸, y 軸共にマイナス方向に移動すると減少することがわかった(図 15, 図 16)。また、左コーナー 12 地点における死角最小値は 1.5m、最大値は 7m で、死角 0 の条件はなかった。交差

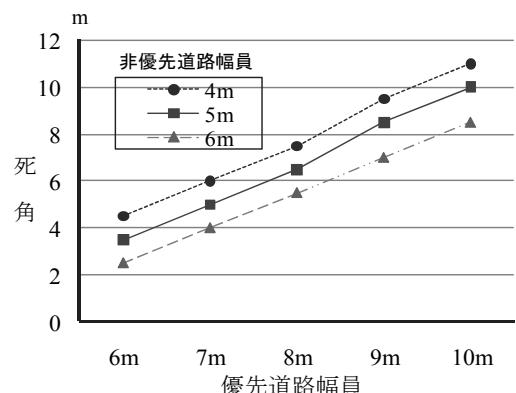


図 14 ミラー鏡像と道路幅員の関係：
シミュレーション鏡像における死角量分布

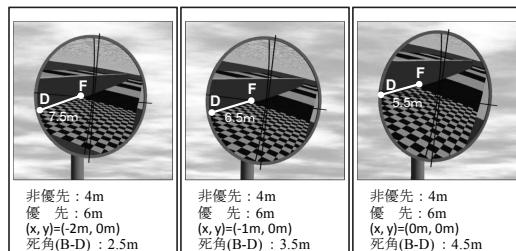


図 15 3DCG シミュレーションによる評価：
ミラー鏡像と設置位置の関係

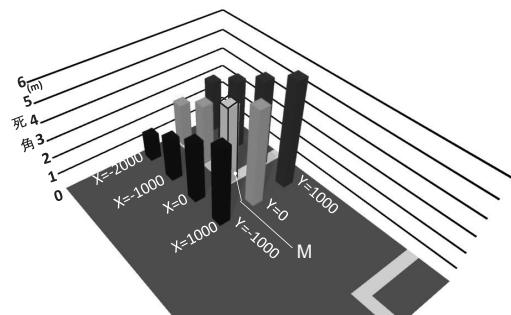


図 16 ミラー鏡像と水平位置の関係：
シミュレーション鏡像における死角量分布

水平角 俯角	-9°	-6°	-3°	最適解	+3°	+6°	+9°
-9°							
-6°							
-3°							
最適解							
+3°							
+6°							
+9°							

図17 3次元CGシミュレーションに基づく鏡像マトリクス

点境界線上の非優先方向乗用車EPからみたミラー最適設置位置は、角地Mからx軸-2m(左端), y軸-1m(近方)地点であった。

(3) 交差点直接視界シミュレーション：ミラー鏡像最適案と直接視認性のトレードオフ

交差点隅切りや歩道がなく、かつ横断歩道や停止線位置によっては境界線から10m程度手前でミラー確認が必要となる交差点もある。そのような環境では、左方の直接視界が不充分で、(2)で検討した最適位置のミラーを直接視認できず、ミラー設置位置に制約が生じることが明らかになった。

以上、適切なミラー設置条件は狭い範囲に分布し、交差点環境・ミラー諸元等のシミュレーションに基づく分析と事前の充分な設置法検討が重要とわかった。

(4)まとめ

交差点環境・ミラー位置とミラー鏡像の関係の系統的分析により、交差路視認距離、死角発生への影響、安全視界確保上重要な要因などが明らかになった。3次元CGシミュレーション法の活用により、ミラー設置最適案を

機上で検討できるばかりでなく、交差点視環境改善や危険要因の検討幅を拡大・効率化でき、ミラー設置最適化や直接／ミラー間接視界の確保により、出会い頭事故削減に有効であることが確認できた。

また、ミラー設置・点検改修にあたって、本知見をベースにすれば、設置現場と道路環境が類似したケースを参照して設置条件を絞り込み、複数の設置方法を細部にわたって検討するなど、毎回最初からシミュレーションを行う必要がなく、効率的かつ精度の高い設置案の計画が可能になる。これにより、安全視認距離の確保、交差車両の早期発見を保証し、フィージビリティの高いミラー設置最適解を導くことが可能になる。

シミュレーション法のさらなる簡便化・利便性の向上、直接／間接視界の死角解消条件の検討などが今後の課題である。

4.6 [事例4]ミラー角度微調整と鏡像変化の系統的シミュレーション：ミラー角度変化による鏡像マトリクスの作成とミラー設置最適化への活用

4.6.1 研究方法

前述のように、ミラーのシミュレーションがミラー設置の現場でも容易に実施できるようになればよいが、現在はまだ実現できていない。そこで、シミュレーションの結果を現場で容易に役立てることができるよう、図17のような「鏡像マトリクス」を作成した。この鏡像マトリクスは、標準的な十字路に設置されたミラーについて、最適な水平角・俯角のものを中心に、角度を左右・上下へわずかずつ変化させながら、鏡像の映り方がどのように変化するかを表したものである。

4.6.2 研究結果および考察

この鏡像マトリクスを、実際に調整しようとしている交差点ミラーの鏡像と照合して、現状で最も近い状況の図と、中心にある「最適」な図との水平角・俯角の差を読み取って、実際の調整の補助とすることを検討した。

本年度研究では、実際のミラー設置または調整に、この鏡像マトリクスを用いてはいないが、本研究で構築したシミュレーション環境では、このような、他の手法では非常に手間のかかる改善案も容易に作成でき、鏡像マトリクスの作成は、本研究の有効性を示すよい例といえる。

5. [課題3] ミラー視認性評価、ミラー設置条件の体系的整理：ミラー設置・調整用マニュアル開発に向けた指針の導出

本研究では、2008年度から引き続き、現場で短時間に調整出来るミラー位置決め、設置角度測定・調整簡便法と標準化手順の基礎的部分を開発・検討し、マニュアルの骨子の整備を進めてきた。今後の研究発展として、以下のような研究課題が考えられる。

(1)ミラー視認性、ミラー設置条件の体系的整理

道路幅員・勾配・カーブなどによる視環境の変化、良好な視環境を得るために必要な条件などの体系的整理と実施容易なミラー設置基準策定、などを引き続き行う。また、交差点における直接視界とミラーによる間接視界の相補性、連続性確保(隅切り・妨害物効果)について、さらに検討を進める。

(2)平易なミラー設置マニュアルに対する指針の導出

上記にあるように、今後さらに、ミラー設置者(道路管理者等)が既設ミラーの点検や新設の際、平易に利用できるようなマニュアルを構成できるように、マニュアル内容の指針を検討する。

6.まとめ

本研究では、フィールド研究として、実ミラーを用い

た視認性評価とミラー設置・調整方法の検討を行った。また、交差点の視環境を正確に再現するシミュレーション環境を構築し、これを用いて、実際の事故発生交差点の視環境改善提案や、ミラー設置位置の定量評価、実務にも使えるようなマニュアルの素材(鏡像マトリクス)の作成などを行った。さらに、このシミュレーション環境への入力容易化のために、「交差点エディター」というツールを作成した。

この結果、交差点の視環境については、その良しあしを左右する要素が定量的に明らかになり、良好な視界・視認性を確保するミラーの設置条件を検討する基礎的知見、特に良好な補助視界を得るために有効な交差点ミラーの指針が得られた。

これらの成果により、ミラー視認性評価実験やミラー視認性シミュレーション、実平面交差点でのミラー評価、ミラー設置現場への応用などを系統的に展開する方法論と指針の基礎が得られた。

なお、2010年3月、国土交通省道路局国道・防災課、同道路保全企画室、同地方道・環境課道路交通安全対策室は、上述のような著者らの研究成果⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽¹²⁾を反映し、特に市街地の道路反射鏡の点検、再調整を容易にするための技術資料として、「道路反射鏡の簡易な点検・再調整の手引き(案)」を作成した。さらに、同省全国各地方整備局道路部地域道路課、交通対策課、道路管理課等に通知し、交通事故の一層の削減に向けた取り組みに資するため、管内都府県指定市の道路管理者に対する情報提供、都道府県の管内市町村に対する情報提供を依頼している。

これらの取り組みの成果とともに、今後さらに、国・県・市町村等の行政組織の協力と連携により、ミラーの間接視界不良による出会い頭事故の低減が図られることを期待したい。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、人間工学研究室所属の卒業研究生であった、猪股裕二、笛山博樹、廣田祐子、杉山洋紀、小野雅史、福永佳洋、渡邊修平、西村洋、野口絵理香、稻村和也、吉川一茂、栗原崇浩の各氏にフィールド研究、3次元CGシミュレーションなどの実施に熱心な協力を得た。さらに、国土交通省道路局地方道・環境課、関東地方整備局、警察庁、神奈川県警察、横浜市道路局、同鶴見土木事務所、同港南土木事務所、川崎市道路整備課、(社)全国道路標識表示業協会、道路反射鏡協会、(財)日本自動車研究所、(独)国土技術政策総合研究所、横浜市港南区日野自治会の各氏に、多大の助言や

ご協力を得た。心からの謝意を表すものである。

参考文献

- (1) 警察庁交通局交通企画課，“平成21年度中の交通事故死者数について”，<http://www.npa.go.jp/toukei/kouki/> (2010-2).
- (2) M. Mori, S. Horino, S. Kitajima, M. Ueyama, T. Ebara, T. Itani, “Ergonomics solution for crossing collisions based on a field assessment of the visual environment at urban intersections in Japan”, *Applied Ergonomics* 39, (2008-8), pp. 697-709.
- (3) M. Mori, S. Horino, Y. Inomata, H. Sasayama, Y. Hirota, “Low-cost and low-technology oriented improvement of visual environment at intersections by ergonomic installation of traffic convex mirrors for preventive safety against crossing collisions”, *Proceedings of the 10th Korea-Japan Joint Symposium on Ergonomics*, CD-ROM, (2007-5).
- (4) 堀野定雄, 森みどり, 猪股裕二, 笹山博樹, 廣田祐子, “ミラー視認性改善と出会い頭事故削減－横浜市内生活道路広域交差点でのフィールド調査－”, 日本人間工学会誌第43巻特別号, (2007-6), pp. 62-63.
- (5) (社)日本道路協会, “道路反射鏡設置指針”, 丸善出版, (1980).
- (6) 国土交通省道路局監修, (社)全国道路標識表示業協会編, “道路反射鏡ハンドブック”, (社)全国道路標識表示業協会, (2001).
- (7) 堀野定雄, 森みどり, 久保登, 北島創, 平成19年度神奈川大学工学研究所共同研究中間報告“出会い頭事故未然防止の研究－交差点ミラー視認性評価と再設計マニュアル開発－”, 神奈川大学工学研究所所報, 第31巻, (2008-11), pp.78-84.
- (8) 堀野定雄, 森みどり, 久保登, 北島創, “出会い頭事故未然防止の研究－交差点ミラー視認性評価と再設計マニュアル開発－”, 神奈川大学工学研究所所報, 第32巻, (2009-12), pp. 77-83.
- (9) M. Mori, S. Horino, N. Kubo, S. Kitajima, “Ergonomics proposal for visibility requirements at urban intersections in Japan for preventing frequent crossing collisions”, *Proceedings of the Applied Human Factors and Ergonomics 2nd International Conference*, CD-ROM (2008-7).
- (10) 森みどり, 堀野定雄, 久保登, 福永佳洋, 渡邊修平, “市街地無信号交差点における視環境評価と出会い頭事故防止”, 日本人間工学会誌第45巻特別号, (2009-6), pp.286-287.
- (11) 久保登, 森みどり, 堀野定雄, “鏡像シミュレーションによる交差点ミラー視認性向上のための設置条件検討”, 日本機械学会論文集C編, 第76巻第768号, (2010-8), pp.2154-2159.
- (12) 堀野定雄, 森みどり, 久保登, 北島創, “人間工学視点に基づく安全円滑な平面交差交通システムの構築－カーブミラーの視認性向上による交差点視環境改善－”, 神奈川大学工学研究所所報, 第33巻, (2010-11), pp. 72-80.
- (13) 森みどり, 久保登, 堀野定雄, “実路テストコース実車実験に基づく交差点カーブミラーの視認性評価”, 日本人間工学会誌第47巻特別号, (2011-6), pp.112-113 (2011-6).
- (14) 森みどり, 堀野定雄, 久保登, 西村洋, 野口絵理香, “3DCGシミュレーション法による交差点ミラーの視認性評価”, 日本人間工学会誌第46巻特別号, (2010-6), pp.344-345.
- (15) 西村洋, 野口絵理香, 森みどり, 久保登, 堀野定雄, “3D CG 鏡像シミュレーション法に基づく交差点出会い頭事故事例分析”, 日本機械学会論文集C編, 第77巻第775号, (2011-3), pp.604-613.
- (16) M. Mori, S. Horino, N. Kubo, “Ergonomics study on the visual environment at urban uncontrolled intersections based on visibility simulation approach applying 3-Dimensional computer graphics software”, In: W. Karwowski and G Salvendy (Eds), *Advances in Human Factors, Ergonomics, and Safety in Manufacturing and Service Industries*, CRC Press / Taylor & Francis, Ltd., (2010-7), pp. 873-882.
- (17) 森みどり, 堀野定雄, 久保登, “3DCGシミュレーションによる交差点視環境評価－運転者視点の比較－”, 人類動態学会会報 No.92, (2010-6), pp.30.



ニオブ接合を流れる超伝導電流と 有限電圧電流ステップの2次元磁界特性

中山 明芳* 阿部 晋** 穴田 哲夫***

Two-dimensional Magnetic Field Characteristics
of Superconducting Current and Current Steps at Finite voltage of Niobium junctions

Akiyoshi NAKAYAMA* Susumu ABE** Tetsuo ANADA***

1. 緒言

超伝導は1911年カマリン オネスにより、約4.2K以下で水銀の抵抗値が測定できないほど小さくなるというかたちではじめて発見されている。この超伝導の特徴的な性質としては

- (i) 超伝導体内的磁束密度が零(反磁場の効果で磁束線が超電導体の外へ押し出される)
- (ii) 直流抵抗の消滅
- (iii) 超伝導体でつながれた接合間の干渉効果(超伝導量子干渉計(Superconducting Quantum Interference Devices)というかたちで利用)
- (iv) オーダバラメータにより表される超伝導状態
- (v) 超伝導サンドイッチ構造での超伝導電子(クーパー対)のトンネル効果

がある。

性質(v)について、イギリスのケンブリッジ大学のジョセフソン氏は2枚の超伝導体で薄い酸化膜を挟んだサンドイッチ構造で電流が流れても電位差が生じないことを1962年理論的に予想し、この現象は翌年実験的に観測されている。以来この構造はジョセフソン接合と呼ばれる。

ジョセフソン接合は基本的に二端子の素子である。超伝導デバイス及び超伝導集積回路は、超伝導体/バリア/超伝導体の構造である、この2端子のジョセフソン接合を中心的な構成素子として使い、回路的に工夫することできこれまで種々の超伝導回路が製作されてきている。

我々のグループでは、ニオビウム金属を使った超伝導薄膜堆積、バリア層用のアルミニウムの堆積とその自然酸化プロセスの最適化、及びフォトグラフィーと陽極酸化方法を使った接合部決定プロセスの改善により、実際に超伝導二端子および超伝導量子干渉計構造を製作し、その基本特性を測定している。さらに外部から加える磁界に対する超伝導接合の電流電圧特性と超伝導電流の特性を測定する新しい測定手法を開発してきている。

2. 実験

2.1 素子製作用スパッタリング装置

センサー接合の製作のためには、マグネットロンスパッタリング装置を使う。試料交換はロードロック室のみの真空を破ることにより短時間でおこなうことができる。主排気はターボ分子ポンプとドライポンプである。

2.2 磁界特性測定装置

円形コイル[ヘルムホルツコイル]を3対使い、x, y, z方向の外部磁界を生成する。パソコンコンピュータにより GPIB 制御された直流電源によりコイルに電流を流すと、その電流に比例して磁界が生じる。プログラム

*教授 電子情報フロンティア学科

Professor, Electronics and Informatics Frontiers

**准教授 電子情報フロンティア学科

Associate Professor, Electronics and Informatics Frontiers

***教授 電子情報フロンティア学科

Professor, Electronics and Informatics Frontiers

ファイルであらかじめ設定したアルゴリズムにより、外部磁界を正確に生成することが可能となる。

3. 長方形接合

外部から磁界を加えることにより、サンドイッチ型超伝導接合を流れる超伝導電流は変調するこのサンドイッチ型超伝導接合の酸化膜バリア自体を横切る経路に沿つてのゲージ不变な位相差は、バリア内部の磁界の向きに垂直な方向に空間的に変調する。この変調周期は加える磁界の大きさに反比例する。このようなわけで、超伝導ジョセフソントンネル電流の変調特性から、トンネルバリアそのものの一様性等を診断することができる[1]。これまで quartic polynomial 形[2,3]や x 線解析のための normal-distribution-function 形[4]の接合について調べられてきている。ただし、このような磁界特性は外部磁界を一次元方向に走査して調べられてきているのが現状である。これに対して我々は 2 方向、3 方向に外部磁界を走査し、 $I_c(H_x, H_y)$ 特性を調べることを提案していく、実際に数値解析と、さまざまな接合形状の素子製作、実験により測定に成功している。

2 方向に外部磁界を走査したとき、接合に流れる超伝導電流が変調される様子を、長方形の接合を例に考えてみる。図 1 は、長方形の接合の $I_c(H_x, H_y)$ 磁界特性の測定結果である。この超伝導接合が長方形の場合の $I_c(H_x, H_y)$ 磁界特性の測定結果を下の図 1 に示す。外部磁界に垂直な向きに接合電流が空間変調していると考えることにより、数値解析した結果との一致は良い。実際に作製した接合では、レジストの角が丸くなり、接合自体も丸みを帯びていることにより、特性そのものもやや実験結果の方が丸みを帯びている。

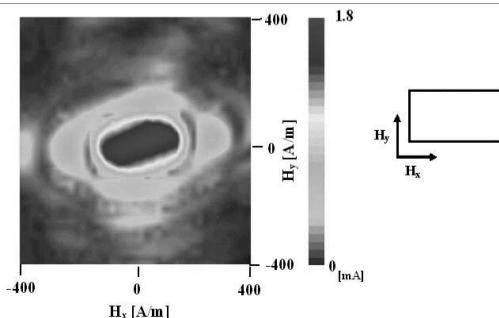


図 1. 長方形の接合の $I_c(H_x, H_y)$ 磁界特性の測定結果
数値解析した図 2 の結果との一致は良いといえる。やや実験結果の方が丸みを帯びているのは、実際に作製した接合の形のかどの丸みを帯びていることの反映であろう。

4. 正方形接合を流れる超伝導電流の磁界特性

図 2 に示す正方形の接合形状のトンネル素子接合を流れる超伝導ジョセフソン電流と、有限電圧での共振による電流ステップを詳しく調べた結果を述べる。次に電流と有限電圧の電流ステップの 2 次元磁界特性について述べる。素子はマグネットロンスパッタリング法により成膜したそれぞれ 300, 5, 150 nm のニオビウム/アルミニウム・アルミニウム酸化膜/ニオビウムのサンドイッチ構造である。アルミニウム酸化膜は、アルミニウム薄膜堆積後、酸化室で純酸素を導入して表面を酸化し形成した。図に示す $L \times L = 50 \mu m \times 50 \mu m$ の接合寸法は、ポジレジストとコンタクト式マスクアライナーを使ったフォトリソグラフィー後での溶液中の陽極酸化法で決めた。測定は GPIB (General Purpose Interface Bus) システムで制御された電源により電流を、最大 3000 A/m の磁界を発生させることができるヘルムホルツコイル対に流した。素子に加える外部磁界を階段的に変化させることで 2 次元的磁界特性測定をおこなった。測定は液体ヘリウム中 4.2 K である。

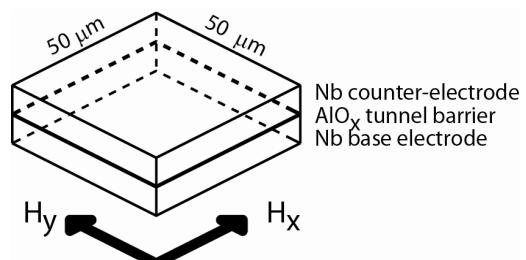


図 2 正方形のトンネル素子の構成

ニオビウムの下部電極と上部電極のロンドン侵入長を λ_1, λ_2 とし、酸化膜の厚さを t_b とおくと、和 $d = [\lambda_1 + \lambda_2 + t_b]$ が 173 nm また、ジョセフソンの侵入長 λ_J が 40 μm と求まる。 $L / \lambda_J \approx 1$ なので、外部磁界がないときほぼ同じ電流密度で超伝導電流が流れると仮定してよい。

接合内の点を定めたとき、そこで下部電極と上部電極の超伝導電極間のゲージ不变な位相差は、超伝導電極間の位相の差の項と、接合を横切って電磁場のベクトルポテンシャル A を線積分した項の $4\pi e/h$ 倍の和である。

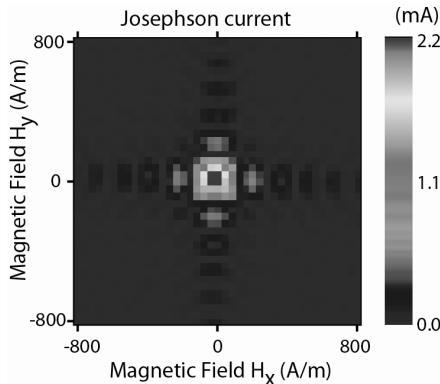


図3 ジョセフソン電流の2次元磁界特性

「非常に薄い絶縁膜を挟んで2つの超伝導体があるとき、2つの超伝導体の間に電流が流れても、2つの超伝導体の間の電位差が0であるという現象」が、ジョセフソンにより理論的に予言され、翌年実験により確かめられ、ジョセフソン効果と呼ばれることになった。この現象は、言い換えると、一方の超伝導体から他方の超伝導体へ、電子のみならず、いわば、超伝導電子対（クーパー対）もトンネルするというわけである。サンドイッチ形の超伝導接合を電流が流れても、二つの超伝導電極間に電位差は生じない。このとき、2つの超伝導体間に電位差なしで、いくらでも大きな電流を流せるわけではなくて、流しうるある上限の値がある。2つの超伝導体を下部の超伝導体電極及び上部の超伝導体電極と呼ぶことになると、この下部超伝導体電極から上部電極に向かって、接合を電位差なしで流れる電流 i は、二つの超伝導体電極間の「（ゲージ不变な）位相差 γ 」の \sin に比例し、

$$i = \sin\gamma \quad (1)$$

の関係が成り立つ。基準となる下部の電極内の任意の点 a のオーダーパラメータの位相を $\theta(a)$ 、この点 a から垂直に酸化膜バリアを横切って、もう一方の上部の電極内に入り点 b を考える。その点の位相を $\theta(b)$ としている。接合面を垂直に横切る経路に沿ったゲージによらない「ゲージ不变な位相差 γ 」は、

$$\gamma = \theta(b) - \theta(a) + \frac{2\pi}{\Phi_0} \int A \cdot ds \quad (2)$$

である。ここでゲージ不变な位相差 γ の前半は、上部電極の点 b の位相 $\theta(b)$ と、基準となる下部電極の点 a のオーダーパラメータの位相 $\theta(a)$ の差である。後半は点 a から垂直に酸化膜バリアを横切って、もう一方の電極の点 b までの経路に沿う電磁場のベクトルポテンシャル A の線積分の項が入っている。さらに、上部電極の点 c と下部電極の点 d を4点 $abcd$ が長方形 $abcd$ になるように考えてみる。このとき、経路 dc に沿うゲージ不变な位相差 γ の、経路 ab に沿うゲージ不变な位相差 γ に対する差分 $\Delta\gamma$ は、長方形 $abcd$ に鎖交する磁束 $\Delta\Phi$ の $2\pi/\Phi_0$ 倍であることになる。数式で書くと

$$\Delta\gamma = \frac{2\pi}{\Phi_0} \Delta\Phi \quad (3)$$

である。特に、長方形 $abcd$ に鎖交する磁束が磁束量子 Φ_0 1 個分であれば、位相の増分は 2π である。

$i = \sin\gamma$ により、接合全体について接合内の各点での電流値の和をとることにより、与えられた磁界における接合を流れる電流が得られる。特別な場合として、外部磁界がなければ、この位相差は、接合内で一定で、特に $\pi/2$ のとき、最大の電流 I_c が接合を流れる。この I_c は接合の臨界電流値とも呼ばれる。

電磁場のベクトルポテンシャル A の周回積分はその中を貫く磁束量に等しいので、 x 方向に磁界を加えた場合は、接合各部の位相差と電流密度は y 方向に変調される。 y 方向に磁界を加えた場合は、接合各部の位相差と電流密度は x 方向に変調されることになる。また、その空間変調波長は、加える磁界の大きさに反比例する。

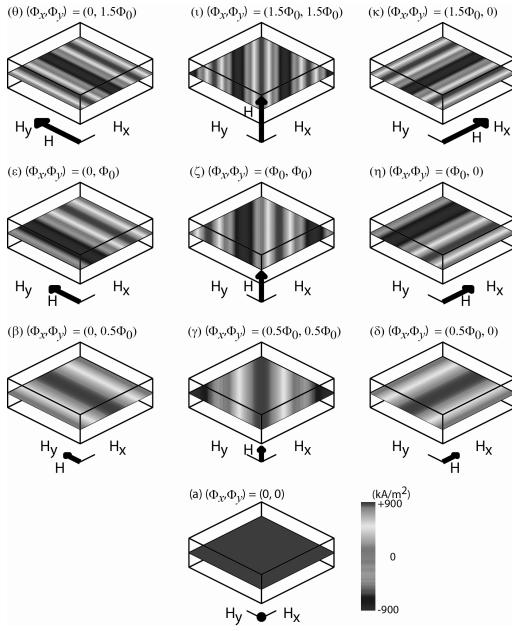


図4 正方形接合内のジョセフソン電流分布

このように考えて得た接合電流分布を次に示す。 (Φ_x, Φ_y) はそれぞれ接合バリア領域をx方向およびy方向に貫く磁束量とする。 Φ_0 を磁束量子 $h/(2e)$ として、(β)では $(\Phi_x, \Phi_y) = (0, 0.5\Phi_0)$ 、(γ)では $(0.5\Phi_0, 0.5\Phi_0)$ 、(δ)では $(0, 0.5\Phi_0)$ である。この場合は $\gamma(O)=\pi/2$ で最大の接合電流値をとることになる。さらに磁界を増やして、 (Φ_x, Φ_y) が(ε)では $(0, \Phi_0)$ 、(ζ)では (Φ_0, Φ_0) 、(η)では $(\Phi_0, 0)$ である。この3例では、変調周期がちょうど接合寸法になるので、 $\gamma(O)$ の値によらず接合電流値は零である。さらに、(Φ_x, Φ_y)は(0)で $(0, 1.5\Phi_0)$ 、(κ)で $(1.5\Phi_0, 0)$ になると変調周期が $(2/3)L$ になり、おおよそ $\gamma(O)=-\pi/2$ のとき特性全体からみて2番目に大きな極大値になる。また、(i)では $(\Phi_x, \Phi_y) = (1.5\Phi_0, 1.5\Phi_0)$ であるが、おおよそ $\gamma(O)=\pi/2$ において極大値をとる。

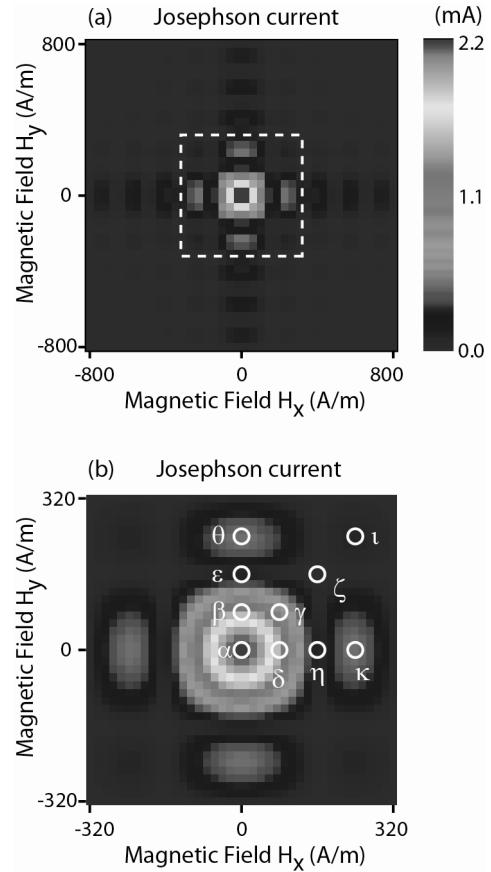


図5 ジョセフソン電流の磁界特性

(数値解析結果、図中の記号は一つ前の図の記号と対応している)

正方形接合の場合、ジョセフソン電流の接合内2次元磁界依存性は、 H_x 方向のフラウンホーファーパターンと H_y 方向のフラウンホーファーパターンの積となる。このようにして得られた数値解析結果は測定結果をよく説明している。

次に電流電圧特性の有限電圧に現れる共振ステップについても測定した。図6にしめすように、電流電圧特性において参照電圧 V_r を決めこの電圧を中心として土 $20\mu\text{V}$ の範囲の電流の最大値と最小値の差を電流ステップ高さと定義した。図7にこの電流ステップ高さの2次元磁界依存性を示す。図7において V_r をパラメータとして変えて測定した。

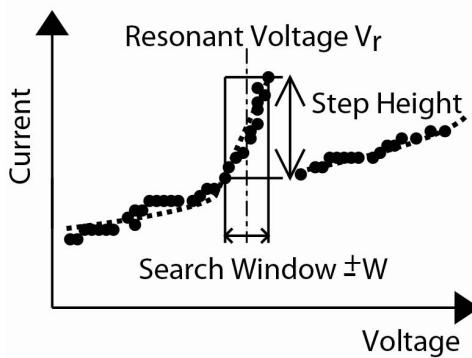


図6 有限電圧での電流ステップの測定

図7はこうして得られた電流電圧特性内の有限電圧での電流ステップの2次元磁界特性を示している。

図8には、有限電圧での電流ステップを生じさせる共振モードの接合内の電圧分布を示す。

図(a)では鎖交磁束(Φ_x, Φ_y)=($\Phi_0, 0$)であり、接合各部の電圧 V は位相差の時間微分に比例し、電圧 V の定在波は接合内の y 方向に一波長あることになる。一方で図(b)では鎖交磁束(Φ_x, Φ_y)=($0, \Phi_0$)であり、電圧 V の定在波はやはり磁束と垂直な方向に変調され、接合内 x 方向に一波長あることになる。外部磁界とこの共振モードの組み合わせで、実際の共振分布は成り立つ。その結果、位相差が $\pi/2$ の領域が広がり、時間的に平均した結果、上部電極から下部電極の向きに大きな電流が流れ、電流-電圧特性上の電流ステップになると考えられる。

さらに、参照電圧 V_r が 0.6 mV 以上の範囲では図7より、共振電流ステップの磁界 $\mathbf{H}(H_x, H_y)$ 依存性はおおよそ等方的になるようみうけられる。接合ジョセフソン電流の位相速度がバリア領域の電磁波の位相速度度 \bar{C} と一致したとき共振が発生するので、図9に示すように、特に電圧が比較的大きく空間波長が小さい領域で、最大の電流ステップの現れる共振電圧は外部からの印加磁界の大きさに比例する。その比例定数から、 ϵ_r をバリア層アルミニウム酸化膜のこの周波数領域での等価的な比誘電率として、比 t_b/ϵ_r は 0.16 (nm)と求まる。図9に共振電圧が $H > 500$ (A/m) の領域でやや飽和するのは、侵入長の周波数依存性によるとされる。

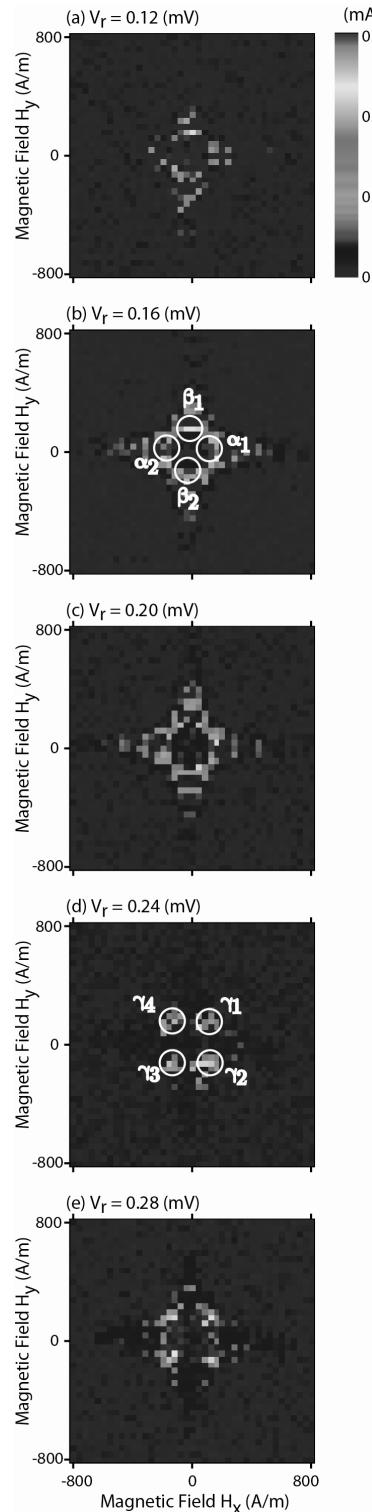


図7 (a-e)有限電圧での電流ステップ

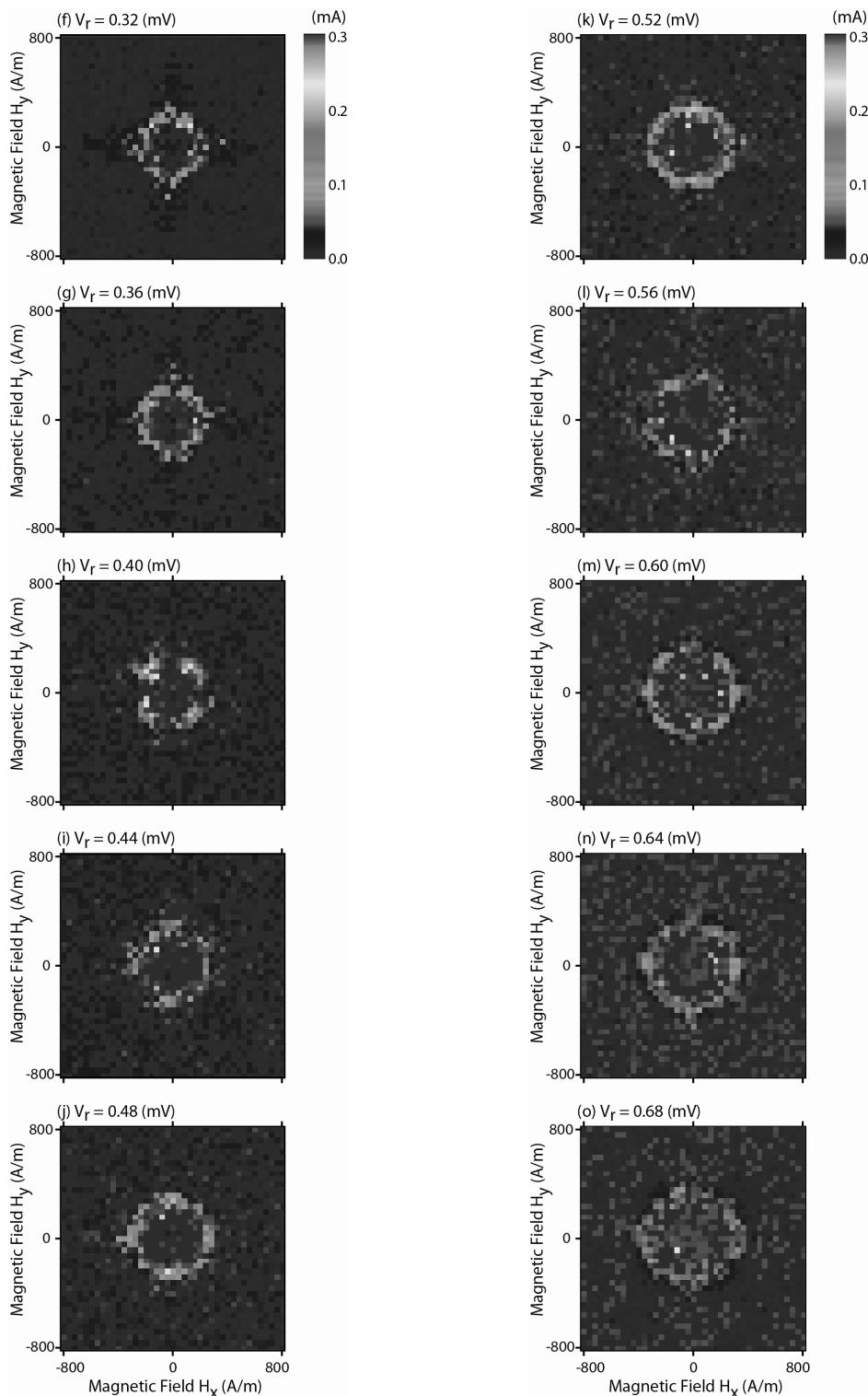


図7(f-j)有限電圧での電流ステップ

図7(k-o)有限電圧での電流ステップ

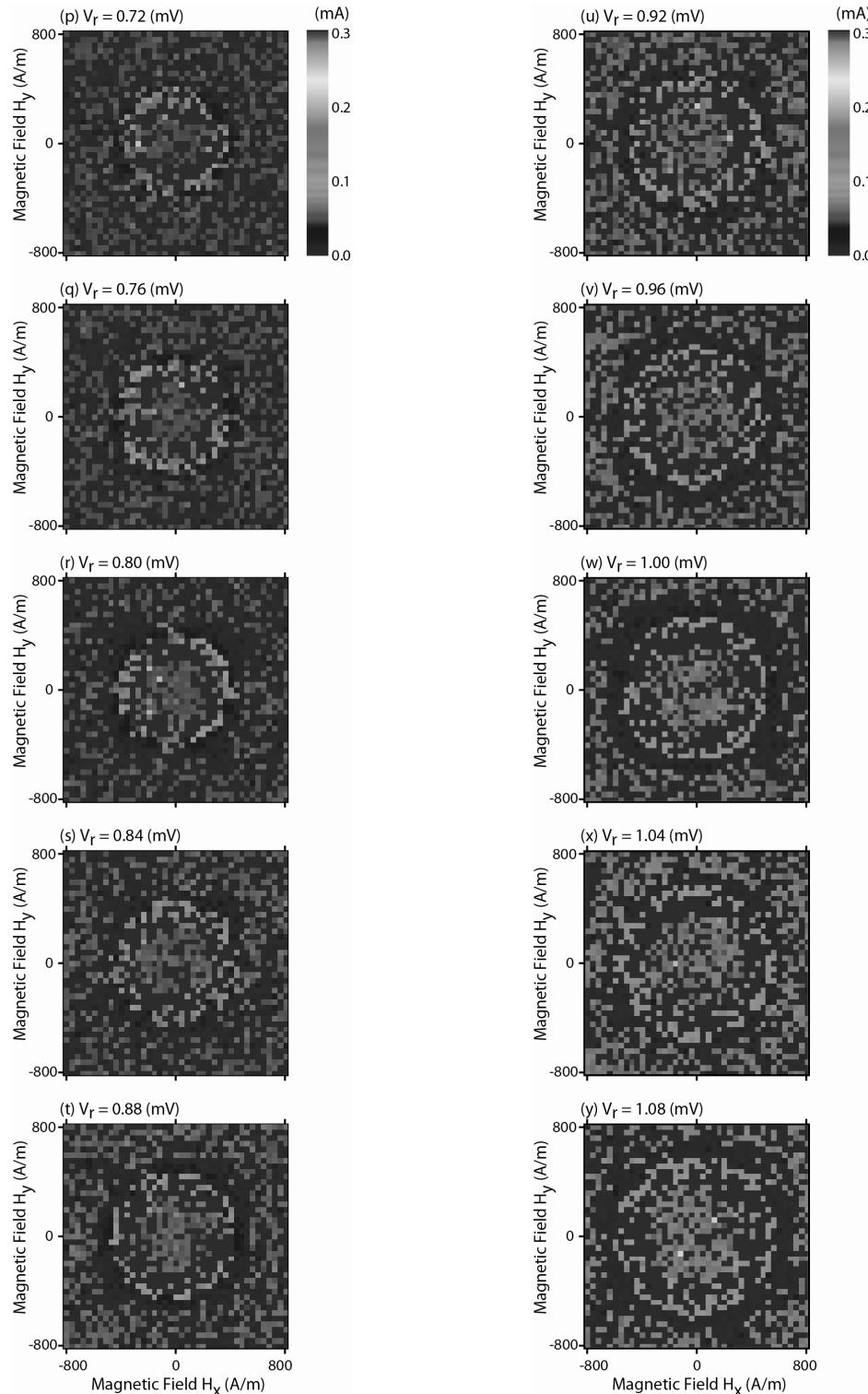


図 7 (p-t)有限電圧での電流ステップ

図 7 (u-y)有限電圧での電流ステップ

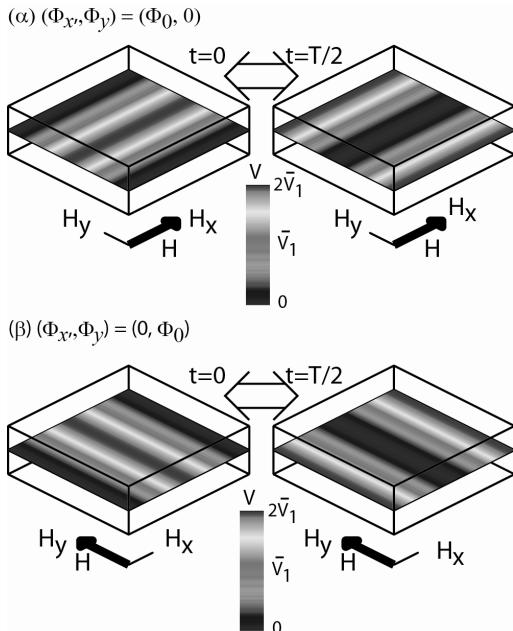


図8 共振ステップの接合内電圧分布

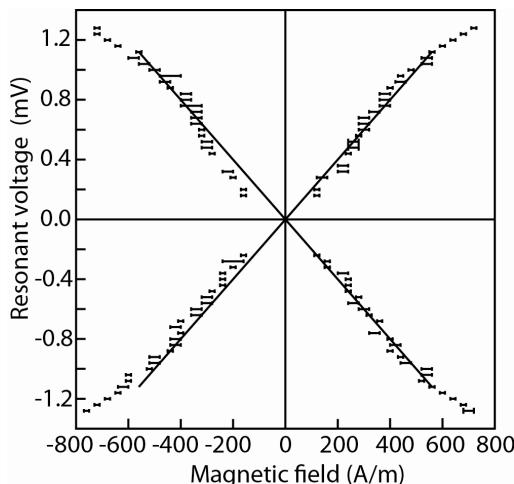


図9 最大電流ステップが現れる電圧の外部磁界依存性

バリアとしてはアルミニウムの酸化膜に加えて、磁性薄膜を堆積している。この磁性薄膜の再現性のよい堆積のために、バックグラウンド真空間を良くする必要がある。ベーキングのできない粗挽きドライポンプ、ターボ分子ポンプ下側（補助ポンプ接続側）半分を除き、装置全体が150度までベークできるようベーキングジャケットで覆った。スパッタリング用膜厚計の水晶振動子の耐ベーキング温度が105度のため、通常100度で数時間ベーキングする。ベーキング後、ドライポンプ、ターボ

分子ポンプおよびイオンポンプにより排気し、10–6Paの良いところに装置内真空度は到達する。

スパッタリングガンは、電気的な絶縁にセラミックを使い、リークなしで、ターゲットを水冷しつつ300Vの電圧を印加することが可能な構造である。スパッタリング用チャンバーに純アルゴンガスを約1Pa導入後、300Vの負電圧をターゲットに印加することにより、直流放電が開始する。ニッケルの90mmのターゲットを使用し、1nm/sの堆積速度でのニッケル薄膜のスパッタリングが可能となった。超伝導ニオビウム電極用薄膜作成も同様なプロセスでおこない、やはり、1nm/sの堆積レートが得られる。ニッケルをバリア領域に有する良質なトンネル接合を得るには至っていない。今後の課題としては、数nmの厚さのニッケルを含む磁性薄膜のM-H磁化特性等の基本特性を調べ、ニッケルをバリアとする酸化膜作成条件をさらに詳しく調べていく。熱酸化のみでなくプラズマ放電酸化も試み、トンネル特性を有する素子を得る。そのうち、このニッケル薄膜をストリップライン状に加工し、第3番目の制御電極としてトランジスタ動作をめざして素子製作をおこなっていく予定である。なお、図2-図9は文献[13]より引用した。

本共同研究の機会を与えてくださった神奈川大学工学研究所および工学研究所所長、共同研究審査委員会に感謝いたします。

参考文献

- [1] A. Barone and G. Paterno, "Physics and Applications of the Josephson Effect," Wiley-Interscience, New York, (1982)
- [2] R.L. Peterson, *Cryogenics*, Vol. 31, Pages 132- (1991)
- [3] J. G. Gijssbersen, E.P. Houwman, B.B.G. Klopman, J. Flokstra, H. Rogalla, D. Quenter, S. Lemke, *Physica* Vol. C249, Pages 12- (1995)
- [4] K. Kikuchi, H. Myoren, T. Iizuka, S. Takada, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 77, Pages 3660- (2000)
- [5] Akiyoshi Nakayama, Susumu Abe, Tatsuyuki Morita, Makoto Iwata, and Yusuke Yamamoto, *IEEE Trans.Mag.*, Vol.36, Pages 3511- (2000)
- [6] A.Nakayama, S.Abe, T.Shoji, R.Aoki, and N.Watanabe, *Physica* Vol. B329-333, Pages 1493- (2003)
- [7] Norimichi Watanabe, Akiyoshi Nakayama, Susumu Abe, Kunimori Aizawa, *J. Appl. Phys.*, Vol.97, Pages 10B116 1- May (2005)
- [8] N.Watanabe, A.Nakayama, S.Abe, K.Aizawa, *J. Appl. Phys.*, Vol. 97, Pages 10B116- (2005)
- [9] Akiyoshi NAKAYAMA, Susumu ABE, Tetsuya SHIMOYAMA, Norimichi WATANABE, Hsu Jui-Pang and Yoichi OKABE, *J.Phys.Conf.Ser.* Vol. 43 Pages 1092- (2006)
- [10] N.Watanabe, A.Nakayama, S.Abe, *J. Appl. Phys.*, Vol. 101, Pages

- 09G105- (2007) Pages 07E312- (2009)
[11] N.Watanabe, A.Nakayama, S.Abe, et.al, *J. Appl. Phys.*, Vol. 103, [13]A.Nakayama,S.Abe,N.Watanabe, *J. Appl. Phys.*, Vol.111, Pages
Pages 07C707- (2008) 113907-1- (2012)
[12] N.Watanabe, A.Nakayama, S.Abe, et.al., *J. Appl. Phys.*, Vol. 105,



品質・環境 ISO と TQM 活動に基づく リーン生産マネジメント

中島 健一* 松丸 正延* 松井 正之*

Lean manufacturing management based on Quality/Environment ISO and TQM activities

Kenichi NAKASHIMA*, Masanobu MATSUMARU*, Masayuki MATSUI*

1. はじめに

環境問題は企業の経営品質、体质改善活動等の推進において最も重要な課題の一つである。例えば、切削や仕上げ、プレス、鋳物などの廃棄物問題や有害物質に関わる環境問題が挙げられるが、それらは単に環境問題としてとらえるべきではなく、生産活動における製品品質問題にも大きな影響を与えていたと認識すべきである。このように環境配慮型社会における事業活動では、品質と環境を別々の活動としてではなく、一体化して諸問題を解決することが求められている。

環境 ISOにおいて環境側面とは「環境と相互に作用する可能性のある組織の活動又は製品又はサービスの要素」と定義され、著しい環境側面は、「著しい環境影響を与えるか又は与える可能性がある」と記されている。また環境影響は「有害か有益かを問わず、全体的に又は部分的に組織の環境側面から生じる環境に対する変化」として定義されている。環境 ISO の要求事項の中には「環境側面」の抽出と特定の作業があり、これをどのように特定するか、また環境影響をどのように評価するかが環境マネジメントシステム構築の鍵になるといえる。

本稿では、品質・環境 ISO と TQM 活動に基づくリーン生産マネジメントについての検討を行う。ここでは、新たな環境側面評価システムについてのガイドラインを議論し、さらに実際の企業活動におけるマネジメント活動の事例を示し、提案アプローチの有効性について検証する。ここで着目する環境側面は、紙、ごみ、エネルギー

消費などのように環境に良い影響を与えないマイナス面を改善することは勿論であるが、良い影響を及ぼす有益な環境側面を抽出して特定し、それを効果的に有効に改善することも期待される。本稿において、効果的な有効性のある環境側面を、Q (品質) C (コスト) D (量、納期) S (安全、情報セキュリティ) E (環境) の総合的な問題点把握とその解決策に関するマネジメントシステムパフォーマンスの視点から考察し、それを特定化するための諸問題と、リーン生産システムの継続的改善アプローチを提案する。

2. ISOとTQM

2.1 品質保証及び環境保全改善活動

環境保全活動は、品質保証のステップの新商品企画、開発計画、製造、販売、サービスに至る段階において、顧客満足を高めながら顧客に保証するとともに企業の発展にも寄与する⁽⁶⁾。各段階の機能分担へ品質、環境 ISO の要求事項を取り込むことにより品質保証活動との連携が強まる可能性がある。

「環境保全活動の主要 10 のステップ」

- ① 経営者のコミットメント
- ② 環境影響調査
- ③ 環境側面、及び著しい環境側面の特定目的と目標の設定
- ⑤ 運用管理
- ⑥ 改善実行計画
- ⑦ 実行
- ⑧ 記録管理
- ⑨ 内部監査
- ⑩ マネジメントレビュー

の主要 10 のステップについて PDCA を効果的に有効にまわすことが求められている。この PDCA のサイクルをまわすことの基本的な考え方、原則として、環境 ISO の場合は次の 4R に従って活動を進めていくことが重要である。

*教授 経営工学科

Professor, Dept. of Industrial Engineering and Management

- ①Reduce : 減らすこと
- ②Reuse : もう一度使用する
- ③Recycle : 材料を再生してリサイクルする
(リサイクル)
- ④Reject : 廃棄

①→④へ進み、減少→再使用→リサイクル→廃棄と循環することとなる。これらを事業経営に役に立つように前述の10のステップに取り込んで活用することが肝要であり、特に以下の項目に着目することが望まれる。

- ① マネジメントレビュー
- ② 内部監査
- ③ 環境側面
- ④ 順守評価
- ⑤ 文書管理
- ⑥ 緊急事態対応
- ⑦ コミュニケーション等

さらに、今日の循環型社会においては、品質 ISO、環境 ISO と TQM とは、お互いに補完し合いながら一体化して、マネジメントシステムを効率的かつ有効に運用し、経営に貢献するように活用する必要がある⁽⁷⁾。地球環境問題の解決、改善についても事業経営として最も重要な要素である。省資源、省エネ、グリーン調達、環境対応製品の開発等、他社に対して差別化し如何に付加価値をつけるかが課題となる。このような背景のもと、システムにおける環境側面を明らかにして環境負荷を低減し、環境品質の向上を推進することが求められている。これらは品質 ISO、環境 ISO と TQM を融合して進めることができあり、独自性を持って改善活動に取組んでいくことが企業体質を強くする鍵である⁽³⁾。

2.2 環境側面とその着眼点

品質及び環境と相互に影響する組織の活動、主要プロセスにおいて、環境側面の抽出を行い特定することが求められている。その場合、現場においてよく活用されているMの公式を考慮して検討を行い抽出することによって効果的な環境側面の特定になる可能性を秘めている。

Mの公式とは、4M=3M+M×2の関係である。4Mとは、Man（人）Material（材料）、Method（方法）Machine（機械）を言い、3MとはMuda（ムダ）、Muri（ムリ）、Mura（ムラ）である。M×2とはMouke Money「儲け（もうけ）」である。特にムダ、ムリ、ムラを撲滅することが重要である。それぞれのMに関して定量的評価指標が考えられるが、ここでは特に詳細は述べず実務への容易な適用例としてMの公式を挙げている。

さらに基本原則としては新5S活動（整頓、整理、清潔、清掃）の推進をすることによってかなりの部分の

環境側面の問題点が見えてくるようになる。特に環境側面の抽出と特定は製造現場では一般的には、①大気への放出（排ガス、悪臭）、②水中への放出（油）、③特定有害物（フロン、トリクロロエタン等）、④廃棄物管理（プラスチック、研磨カス、紙屑など）、⑤土壤の汚染（油）、⑥省資源、省エネルギー（電気、油、ガス、水等）、⑦リサイクル（切削油、有機溶剤、水の回収等）⑧地域の環境問題についてのコミュニケーションを図る、といったことが求められている。このような活動は通常の会社の操業状態だけでなく、停止時、スタートアップ時、予想される重大な影響、緊急事態においても考慮して特定することが重要である。

3. 品質・環境側面評価システム

3.1 環境側面改善と法規制

環境基準を達成するために各種の法的要件があり、事業活動を続けていくためには、最低限守らなければならない法規制がある。これらを整理してデータをとって順守し、管理状態に確保しなければならない⁽¹⁵⁾。典型的な公害と呼ばれている次の法規制は特に重要である。

- ①大気汚染 ②振動 ③水質汚染 ④騒音
- ⑤振動 ⑥地盤沈下 ⑦悪臭

一方、法の順守活動だけでなくこれらの活動について、QC的反省と再発防止対策が求められる⁽²⁾。現状の品質・環境問題を製品、事業活動、サービスのなかでとらえてみると、①品質・環境評価10項目の評価体制の確立、②評価基準と汚染の予防、③Mの公式の活用、④著しい環境側面の特定、⑤QMS(Quality Management Systems)、EMS(Environmental Management Systems)、TQM(Total Quality Management)により信頼を得ることのできる評価体制の確立⁽¹⁵⁾、⑥品質・環境評価の徹底による社会的信頼性向上を図る、となる。ここで、品質・環境の環境側面、著しい環境側面の特定を有益な側面を主体にどのように分類体系化できるかが重要であり、例えば以下の図1のように捉えることができる⁽²⁾⁽¹⁾。

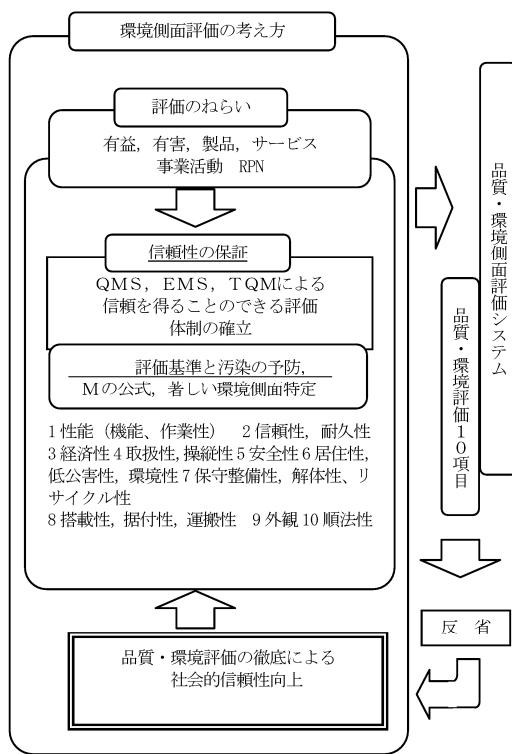


図1：品質・環境側面評価システムの概要

3.2 内部監査と製品品質監査

故障が少なく顧客に喜ばれている製品やサービスを継続的に販売し、顧客が満足することが求められている。製品品質監査は、顧客に不満のない、積極的に満足してもらう製品に仕上がったかどうかの妥当性の監査を行うもので、このように、企業にとって製品品質監査活動は不可欠なものである。新しい時代における品質は、客観的にも主観的にも要求品質が変化していく。最も重要なことは、「市場の要求品質は何か」をとらえ、要求品質を探って、これを技術的特性にうまく変換して設計品質、製造品質、販売品質、サービス品質、環境品質を高めることである。今日の大きな課題である環境品質などに対し、的確に対処し得る企業の体質づくりを実現すべきである^(1, 25)。この活動を製品品質監査として進めることがもっとも重要である。

顧客満足の視点にたった「製品品質監査項目 10 項目」⁽³⁾としては次のとおりである。

- ①性能（機能、作業性）②信頼性、耐久性③経済性 ④取扱性、操縦性 ⑤安全性 ⑥居住性、低公害性、環境性 ⑦保守整備性、解体性、リサイクル性 ⑧搭載性、据付性、運搬性 ⑨外観 ⑩法適合性、遵法性

3.3 階層別内部監査

内部監査はQMS/EMSが意図したとおりに機能しているか、システムの弱いインターフェースの部分、潜在的な問題点を顕在化して組織のゴールを実現するために内部監査を実施する。内部監査は経営者への情報提供、フィードバックシステムとして機能させる。したがって監査の対象、階層によって監査内容とその深さは異なっていかなければならない。主な監査内容をマトリックスで整理すると次のようになる(表1)。

表1: 階層別内部監査の要素

	主な階層別内部監査 項目	管理者層	現場の職長・ 作業者層
1	方針、目的、目標の有効性	◎	△
2	作業手順等の製品品質への有効性	△	○
3	決められている内容の実行性	○	○
4	顧客の不満足	○	○
5	製品に対する法・規制要求事項の遵守性	◎	○
6	経営資源の効率性	◎	△
7	方針、目的、目標の達成度	◎	△
8	パフォーマンス指標の全体到達目的、目標への合致性	○	△
9	マネジメントレビューの有効性	◎	△
10	再発防止、予防処置の仕組の有効性	◎	△

(◎: 最も影響している ○: 影響している

△: やや影響している)

QMS/EMSの有効性と継続的な改善を結び付けてテーマを設定した内部監査により、階層別に監査を行うことによってシステムは効率的な改善がなされる。自らの業務を監査することは不可能であるが、システムが有効に働いているかどうかについては、重要品質項目に絞り込んで監査を実施することが重要であるため、その視点からの対応が肝要である。

3.4 監査員の力量及び評価

各組織体においては、監査員の力量及び評価の面で、個人の力量の確保と監査チームの力量レベルの向上を行う必要がある^(1, 2)。また、管理者層の内部監査を下位職位の監査員が監査を行った場合には、形式的な監査に陥りやすいし、当該部門に対する専門知識がないと深い監査が期待できない。一方、設計課の監査を製造課長が行

い、製造課の監査を設計課長、検査課長が行うなど後工程や他の関連部門の人を内部監査員にすると監査を通じて業務や課題の共有化に役に立ち、教育の場にもなってくる。いずれにしても組織の実態に合わせて効果的な内部監査員の育成、評価が必要であるが、個人の力量のレベルが内部監査のアウトプットに大きく影響する。ここで力量とは「知識及び技能を適用する実証された個人的資質及び実証された能力」と定義されている⁽⁸⁾。また、監査員は下記の監査5原則を熟知して、実際の内部監査に適用しなければならない。

監査の5原則

- ①倫理的行動
- ②公正な報告
- ③職業専門家としての正当な注意
- ④独立性
- ⑤証拠に基づくアプローチ

3.5 TQM 統合内部監査計画のポイント

ISO および TQM の観点から、以下の点に注意した内部監査が期待される。

①製品品質監査計画は主要な製品に対して、「製品品質監査10項目」に対して、目的、範囲、責任、資源、手順、監査員、日程等を明確にして策定する。監査のチェックシートを作成して問題点を抽出する。

②QMS/EMS の内部監査計画は ISO19011（品質及び環境マネジメントシステム監査のための指針）に基づき組織の規模、性格、及び複雑度によって適切に策定する。特に監査の目的、範囲、及び基準を明確にしなければならない。

③TQM 統合内部監査計画は、アウトプットを重視する内部監査とし、Q（品質）C（コスト）⁽¹⁴⁾D（量、納期）S（安全、情報セキュリティ）E（環境）等に関する問題点把握とパフォーマンスのアウトプットが達成しているかを個別に内部監査をするのではなく製品品質監査とマネジメントシステムの監査の中で行うように策定する。これはISOのQMSの規格の中を深めることで達成できる。

ここで注意すべき点は、アウトプットに関して、ISO9001の条項で特に明確にしている部分（下記参照）に対して、計画に入れて策定されているかどうかである。

アウトプットを重視している条項

- 1 適用範囲(1.1)：
一貫した製品の提供、顧客満足の向上等
- 2 顧客重視(5.2)：
顧客要求事項を満たすこと(7.2.1, 8.2.1)等
- 3 品質方針(5.3)：
QMS の有効性の継続的改善等
- 4 マネジメントレビューからのアウトプット(5.6.3)：
製品の改善等
- 5 資源の提供(6.1)：
顧客要求事項を満たすこと等
- 6 製品に関する要求事項の明確化(7.2.1)：
製品に関する法令・規制要求事項、組織が必要とする追加要求事項等
- 7 設計・開発へのインプット(7.3.2)：
機能及び性能に関する事項等
- 8 設計・開発の妥当性確認(7.3.6)：
設計・開発の妥当性確認等
- 9 顧客満足(8.2.1)：
顧客の情報の監視等
- 10 製品の監視及び測定(8.2.4)：
製品の特性の監視、測定等

3.6 内部監査の評価指標(パフォーマンス指標)

アウトプットの評価指標を組織の特性、実態にあつた効果的な指標として明確にし、常に見直しを行い、現実的なものにしなければ、効果は期待できない。一例として次のような指標がある。

- ・利益・コスト・販売量・製品在庫数
- ・顧客情報収集件数
- ・仕様確認書の記載ミス件数・検査遵守率
- ・工程異常による不適合件数・クレーム再発防止対策完了率・開発責任不適合件数
- ・開発設計起因のクレーム件数・総クレーム件数
- ・新規開拓成功率・受注獲得率
- ・新製品投入件数・総ロスコスト・是正処置完了率
- ・教育訓練計画実施率・重要品質問題解決期間達成率・クレーム処理件数・出荷検査不良率
- ・出荷検査見逃件数・受入検査不合格率
- ・出荷ミス件数・外注責任不適合件数
- ・納期遅延件数・棚卸廃棄額・コストダウン額
- ・受注処理ミス件数・生産能力・設計不具合によるロスコスト・製造不具合によるロスコスト
- ・市場クレームによるロスコスト・労働災害件数等
- ・内部監査のコスト対効率(効率性)・品質コスト等

これらを結果系、要因系に層別した指標としてまとめることが重要である。

3.7 TQM 統合内部監査のPDCAの要素

PDCA を回すためには、以下の要素が必要となる。

(1) インプット :

組織の現状、業界の状況(SWOT分析結果)、新製品情報、顧客の苦情、QMS/EMS の過去の内部監査結果、リスク分析等

(2) アウトプット :

統合内部監査報告書、是正処置及び予防処置報告書等

(3) 誰が監査を行うか (要員、教育訓練) :

内部監査員

(4) 何を用いて行うか(設備、資材) :

内部監査計画書、チェックリスト、該当法規等

(5) どのように行うか (方法、手順、テクニック) :

ISO のQMS/EMS の規格内部監査手順書

(監査基準、頻度、方法、監査員の選定等)

(6) 結果の活用

パフォーマンス評価指標、QMS/EMS 効果的に実施、維持されているかの評価等について TQM の改善活動の視点から監査する

また監査で留意する事項として、管理の二面性を考慮した監査を行うことが肝要である。すなわち、一般に管理の定義は「ある狙いを設定し、それを実現するための全ての活動」であるが、その特性の一つとして、「現状を維持する管理」がある。例えば「作業を標準化し、作業標準を作ったならば、その通りに仕事をしなさい」ということである。しかし、通常、それは管理者には要求されず、むしろ、二つ目の側面である「現状を打破する管理」が求められている。すなわち、内部監査を行うときには、多面的な着眼点をもち、現状打破をめざすことが鍵となる。

さらに ISO のマネジメントシステムを効果的、かつ有効的に経営に役立たせるようにするために、QC 的問題解決法の3つのポイントが重要となる。

①PDCAサイクルがきちんと回っており、自分自身で自己チェックし自分自身で直していくことがきちんとできていること

②ファクトコントロール(事実に基づきデータで判断するということ)ができていること

③プロセスコントロール(予防処置に軸足を移した先手管理のPDCAが機能する統合内部監査)ができるこ

以上の点を踏まえたマネジメントシステムの構築が求められている⁽⁴⁾。

3.8 マネジメントレビューの改善

以下のような観点からマネジメントレビューの改善を行うことが必要である。

(1) 品質・環境側面評価のねらいとして、中・長期経営計画における経営方針について、品質・環境・財務・安全などと一体化して発展させるという点が挙げられる。また、QMS、EMS、ベンチマークリング・効率化を含めた経営方針・部門長方針として ISO の要求事項を含んでおり、これらを内部監査でチェックする必要がある。当然事業の運営としてこの活動を行うことによって自動的に ISO の要求事項は満たされているものとする。

(2) 品質・環境側面評価結果は、マネジメントレビューに報告するようにし、ISO の要求事項のマネジメントレビューへのインプット、アウトプットに追加するやり方にして、内部監査、マネジメントレビューなどでフォローするようにする(図2)。

(3) 経営者は経営上の問題点を把握し、自社の製品が顧客に満足される品質評価体制が出来ているかを確認するため、自らがリーダーシップをもって推進する必要がある⁽¹³⁾。自社の強み、弱みの SWOT 分析を行って、環境パフォーマンスの改善を効率よく達成する活動が必要である。

(4) インプット／アウトプット項目の着眼点

1) QMS のインプット項目

①監査の結果、②顧客からのフィードバック、③プロセスの成果を含む実施状況及び製品の適合性、④予防処置及び是正処置の状況、⑤前回までのマネジメントレビューの結果に対するフォローアップ、⑥品質マネジメントシステムに影響を及ぼす可能性のある変更、⑦改善のための提案、⑧組織の重要な課題^(8,9)

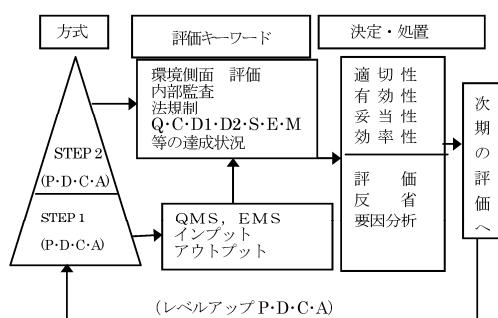


図2: 統合マネジメントレビューモデル

2) QMS のアウトプット項目

- ①品質マネジメントシステム及びそのプロセスの有効性の改善, ②顧客要求事項への適合に必要な製品の改善, ③資源の必要性に関する決定及び処置を含むこと。

3) EMS のインプット項目

- ①内部監査の結果, 法的要件事項及び組織が同意するその他の要求事項の順守評価の結果, ②苦情を含む外部の利害関係者からのコミュニケーション, ③組織の環境パフォーマンス, ④目的及び目標が達成されている程度⑤是正処置及び予防処置の状況, ⑥前回までのマネジメントレビューの結果に対するフォローアップ, ⑦環境側面に關係した法的及びその他の要求事項を含む, 変化している周囲の状況, ⑧改善のための提案, ⑨組織の重要な課題^[10,11]

4) EMS のアウトプット項目

- 継続的改善へのコミットメントと首尾一貫させて, 環境方針, 目的, 目標及びその他の環境マネジメントシステムの要素へ加え得る変更に関する, あらゆる決定及び処置を含むこと。

(5) 戰略的先手管理アプローチ

品質 ISO, 環境 ISO と TQM の融合は, 組織の体质改善と環境問題の効率的な解決促進に有効活用できるが, そのためには問題発見能力, 企画力, 改善の実行力が必要である。結果を見て結果による従来型の改善活動における PDCA サイクルではなく, リスクの回避・問題の未然防止に重点をおいた戦略的な PDCA サイクルが今後必要となる。

すなわち, 失敗してからあわてて手を打つ「後手管理」から問題が起こる前に事前に手を打つ「戦略的先手管理」がこれからの品質管理, ISO, TQM の変革に最も重要な要素である。これらの活動を効率的に展開するためには, 品質・環境評価や効果的な内部監査(品質・環境)さらにマネジメントレビューを駆使した具体的な取り組みが望まれる。

4. X 社における環境問題への取り組み事例

前章にて提案したアプローチをもとに, 実際の製造メーカーX 社において取り組んだ環境保全活動の内容とその成果を以下に示す。

4.1 QMS/EMS に基づくマネジメントシステムの構築

QMS/EMS の観点から構築されたシステムにおける重要な項目についてまず紹介する。全ての項目において環

境・品質の両面を同時に扱うことによる相乗効果を目指した取り組みとなっている。

(1) 目的

- ①地球環境基本方針を基本理念として環境側面, 環境保全問題の改善活動を全社員が推進した.
- ②公害防止管理者の機能組織と連動し, 有機的連携の基に環境保全活動を実施する.
- ③環境 ISO と品質 ISO との統合を図りながら環境保全システム再構築する.

(2) 基本理念

X 社は企業発展と地球環境保全との調和のとれた関係を基本において, 事業活動の推進を図る。

そのために, 独創的な技術によって, 人々の豊かなくらしと地球環境との調和を実現する製品やサービスを社会に提供するよう努める。あわせて企業が地球社会の一員であることを深く認識し, 環境保全のための活動の継続的な推進を図る。

(3) 行動指針

- ①環境保全に寄与する技術の確立と製品, システムの開発・提供
- ②事業活動の各段階における品質, 環境への配慮
- ③地域社会への貢献
- ④広報・啓蒙活動の推進

(4) 環境保全改善の方向づけ

具体的な環境保全改善の推進方法は次の通りである。

- ① 環境保全推進活動は「職制」による活動を基本とし, 各工場長が主体と責任を持って推進する.
- ② 組織, 職制による活動を支えるため「環境保全委員会」を設置する.
- ③ 事業活動, 製品, サービスが環境に及ぼす影響を管理することによって目的とする環境パフォーマンスを達成する.
- ④ 品質 ISO と環境 ISO と TQM を融合し, 顧客満足度の向上及び環境技術の向上を図る.
- ⑤ 公害防止活動の促進
- ⑥ コストミニマムで出来る環境保全改善推進
- ⑦ 資源の有効活用及び「ムダなくし管理」の展開
- ⑧ 各人が各「環境影響度」の低減並びに改善運動の展開
- ⑨ 環境方針に基づく継続的な改善推進
- ⑩ コストの削減

- ⑪ リスクの回避
- ⑫ マネジメント効率の向上と信頼性の確保
- ⑬ 環境影響度の低減
- ⑭ 環境問題に対する広範囲の利害関係者の要望及び社会・経済的ニーズとのバランスの中で環境保全及び汚染の予防活動に対応し適用すべき法規制値の維持管理向上を図りつつ継続的な改善を推進する。

重要な指標となる法規制値の改善管理項目を以下に示す。

表2：法規制値の維持管理改善項目

- | |
|---------------|
| ① 排出水の成分 |
| ② 工場周辺の騒音 |
| ③ 一般廃棄物、産業廃棄物 |
| ④ 省エネルギー |
| ⑤ 悪臭防止 |
| ⑥ 振動規制 |
| ⑦ 大気汚染防止 |
| ⑧ 下水道法 |
| ⑨ リサイクル |
| ⑩ 省資源 |

(5) 環境保全重点管理項目

主要な環境側面に対する環境保全重点管理項目を以下に示す。

表3：環境保全重点管理項目

- | |
|----------------------|
| ① 公害防止 |
| ② 省エネルギー |
| ③ 省資源・リサイクル |
| ④ 環境負荷低減の生産プロセス・商品開発 |
| ⑤ 商品使用の長期化 |
| ⑥ 特定フロン等の使用削減 |
| ⑦ 物流の合理化 |
| ⑧ 広報・啓蒙・環境教育 |
| ⑨ 地域環境配慮 |
| ⑩ 内部監査(品質・環境) |

4.2 品質・環境側面に基づく活動の実施

「実施項目」については以下のとおりである。

- (1) 環境方針に基づく目的と目標の明示
- (2) 環境保全委員会、公害防止管理活動の推進と関連規定の制定
- (3) 内部環境監査員の教育・認定
- (4) 環境保全投資計画策定
- (5) 法規制維持管理改善による環境パフォーマンスの向上

- (6) 品質ISOのサーバイランスに連動した環境ISOの技術指導を関係者に実施
- (7) 環境ISOの教育の実施
- (8) 公害防止管理者の計画的育成

また、品質・環境両面を含め以下のような点に注意してマネジメントシステムの運用を行った。

- (1) 環境保全活動は、日常の仕事の改善の中で定着するような進め方とし、日常管理の徹底を主眼において進めた。
- (2) 環境ISOによる環境保全システムの基本は品質ISOの仕組みをベースにして環境特有の項目としての①環境方針 ②環境側面 ③法的規制値に対する順守 ④緊急事態への準備及び対応等を融合させて構築した。
- (3) 環境パフォーマンスとしての県における公害・環境の法規制の維持・管理の問題点及び県の環境基本条例制定に基づく対応としての現状の測定可能な環境影響の実態の把握を実施した。①法規制に対する管理状態(水質、騒音等) ②産業廃棄物管理 ③各工場環境保全委員会活動 ④品質・環境マニュアルの作成、制定
- (4) エネルギー等の削減及びリサイクル率の向上に関する改善推進

さらに、新商品開発においては、環境保全型製品開発の要素が求められることになるため、既存の開発体系において、環境保全型製品のライフステージにおける環境評価方法を確立している(表4)。

また環境保全型製品のライフステージにおける環境評価方法として、環境側面とライフステージの観点から、計54項目について評価基準を定めて評価を行う。そして、開発する製品に対して環境影響が少なくなる最小化設計開発のレビューを行うことにより影響度を把握し、該当しない項目は評価不要となることを確認する(表5)。

4.3 環境教育と実施成果

ここではX社において上述の環境活動を推進し、さらに現場において水質管理における「油分」の問題について具体的な環境保全教育を行った成果を述べる。

「環境は未来の子孫からの預かり物である」という有名な言い伝えがあるように、環境や資源は、人間が適切に管理することによって初めて持続的に維持することが可能になる。例えば機械加工工程の機械で使用している「油」が漏れたものが床に飛散し、それをフォークリフ

トや作業者の靴に付着し、油の汚染を拡散していても、機械加工の現場では当たりまえの考え方があった。特にそれが目に見えるのは、雨が降った時など、工場内の外の水溜りなどに油がギラギラ光っている場合である。これが排水溝に流れ河川に排出されてしまうことになる場合もあった。目薬 1 滴程度の「油」は約 50mg である。水質の法規制では 10 の水の中にこれの 1/10 の 5mg 以下（これは仁丹一粒程度の大きさの油滴）の「油」に管

理した状態でないと河川に排出してはいけない、と取り決められている。このように「一人ひとりが自覚して「新 5S」を実行して身の回りをきれいにしていくことが、先手管理の第一歩である」との啓蒙活動を行い、公害防止の考え方から、環境保全について社員の意識改革を行った。さらに次のような関連事項について啓蒙活動を開催した。

表4：環境保全型製品開発の基本要素

基本ステップ		新商品開発における基本要素			
		品質・環境・機能	量・時期	価格・原価	システム
新商品開発	1 調査・企画	1) 現行商品の現状・動向の調査・予測・分析, 2) 競合商品の現状・動向の調査・予測・分析、相対的位置づけ, 3) 現行商品・関連商品との相対的位置づけ			
		1) 商品企画のねらい 2) 市場要求品質 3) 適用市場・用途・使用条件 4) セールスポイントなど開発方針・差別化計画の設定	1) 総需要予測・販売台数(終身年次)・ライフサイクル 2) 発売時期 3) 代替スケジュールなどの設定	1) 希望販売価格 2) 許容原価 3) 投資枠 4) 投資回収などの設定	1) 販売系列 2) 生産系列 3) 開発担当部門 4) 商品別開発責任者などの設定
	2 基本計画	1) 開発目標 2) 設計基本構想 3) 企画条件具現の手順・技術・方策 4) 部品共通化計画などの設定	1) 開発・商品化大日程 2) 試作数量 3) 実用試験時期・方法などの設定	1) 目標原価の機能別・ブロック別の割付とブレークダウン 2) 開発予算の設定 3) 採算性の確認	1) 生産方式・設備・型の計画などの設定
	3 設計試験	1) 設計品質の作り込み •品質表の展開 •デザインレビュー •市場品質にマッチした試験 2) VAVE 3) 環境評価項目	1) 販売台数 2) 発売時期などの確認	1) 目標原価達成の推進 2) 採算性の確認 3) 市場価値評価	1) 生産準備計画 2) 生産準備着手時期の調整

表5：環境保全型製品のライフステージにおける環境負荷の評価マトリックス

環境評価項目	ライフステージ					
	A 資源 採取	B 製 造	C 流 通	D 使 用	E 廃 棄	F リ サ イ ク ル
1 資源の消費状況	1	10	19	28	37	46
2 地球温暖化影響物質の排出状況	2	11	20	29	38	47
3 オゾン層破壊物質の排出状況	3	12	21	30	39	48
4 生態系破壊への影響状況	4	13	22	31	40	49
5 大気汚染物質の排出状況	5	14	23	32	41	50
6 水質汚濁物質の排出状況	6	15	24	33	42	51
7 廃棄物排出・廃棄等の状況	7	16	25	34	43	52
8 有害物質等の使用・排出状況	8	17	26	35	44	53
9 その他の重要な環境負荷の状況	9	18	27	36	45	54

- ① 側溝、雨水排水溝に油が浮かないように各職場において発生源で食い止めることを目的として特性要因図を活用して検討を行った。
 - ② 運転、試験、組立工程で使用している油が排出水へ混入しないよう各人の作業方法を改善するよう職場環境保全委員会で検討した。
 - ③ 機械工程の切削油、切粉、スクラップ置場からの油が環境へ影響を及ぼさないように「新5S」活動を展開し、汚染の予防の意識付け、自覚を行った。
 - ④ 職場のフォークリフトのタイヤ、安全靴に付着した油が路面に付着し、雨が降ったとき、雨水と共に側溝に流れることを減らし汚染の予防活動を行った。
 - ⑤ 全社員による廃棄物、ゴミ、汚泥の層別管理の改善と削減活動を行った。
 - ⑥ 水資源の大切さと水質環境影響について汚染の予防方法の改善を行った。
- 以上のような環境保全教育テキストを作成し、全社員への教育により意識改革を行った。
- そして水質への影響を与える度合いが大きい水質管理

における「油分」に関して、5 工場において監視測定個所を定めて、2 年間の油分測定を行った。環境パフォーマンス評価の結果を表6に示す。ここで示されている数値は、前年度を 100 とした時の翌年度の比率となっている。

表6：油分に関する環境パフォーマンス評価

工場名	前年度比率
A 工場	51%
B 工場	96%
C 工場	51%
D 工場	56%
E 工場	54%

この結果で示されるとおり、全ての工場において低減効果があらわしており、8割の工場で約 50% 近い低減効果を挙げている。従来の EMS のみではなく、品質に関する管理システムである QMS との統合的なアプローチによる提案マネジメントシステムの有効性が示されているといえる。本事例をはじめいくつかの企業においても、ISO

マネジメントおよびTQM活動に基づくリーン生産マネジメント構築と運用における成功例が見られる。

5. おわりに

本稿では、環境ISOにおける環境側面をQ(品質) C(コスト) D(量, 納期) S(安全, 情報セキュリティ) E(環境)の総合的な問題点把握に基づき特定し、品質・環境ISOとTQMの融合による新たな環境側面評価システムについての提案を行った。さらに同アプローチに深く関わる要因を含んだ実際の企業活動の事例を示し、環境パフォーマンスの評価や、影響物質低減効果についての有効性が示された。今後はさらにこれらのフィールドにおける一般化モデルや、EMS/QMSの統合的なアプローチに加え、問題が起こる前に事前に手を打つ「戦略的先手管理」によるマネジメントシステムの提言を検討する必要がある。リーン生産マネジメントが21世紀の環境配慮型社会における企業マネジメント活動への新たな可能性として期待される。

参考文献

- (1) 鈴木和幸著「未然防止の原理とそのシステム」、日科技連、2005
- (2) 金子浩一、「組立製造現場の標準化へのISO 9000sの有効活用によるTQM再構築」(日本品質管理学会), 1998
- (3) 金子浩一, 中島健一, 能勢豊一, ISO9000SとTQMの融合による品質経営情報の体系化に関する研究, オフィスオートメーション, Vol. 26, No. 4, pp90-96, 2006
- (4) K. KANEKO, K. NAKASHIMA, T. NOSE (2003) Integration of ISO 9000s; 2000 and TQM. —Strategic proactive management by mean of ISO 9000s—, *An International Journal Asian Pacific Management Review*; Vol.10, pp. 113-123, 2005
- (5) 栗山仙之助, 能勢豊一, 金子浩一, ISO 9000sの有効活用による設計品質評価システム、オフィスオートメーション学会誌 1999
- (6) 栗山仙之助, 能勢豊一, 金子浩一, 新商品開発・商品化プロセスへのISO 9000sの有効活用、オフィスオートメーション学会誌 1999
- (7) 栗山仙之助, 能勢豊一, 金子浩一, TQM活動とISO 9000システムの融合、オフィスオートメーション学会誌, 2000
- (8) JIS Q 9001 : 2008(ISO9001) 「品質マネジメントシステム—要求事項」, 日本規格協会, 2008
- (9) JIS Q 9004:2000(ISO9004) 「品質マネジメントシステム パフォーマンス改善の指針」, 日本規格協会, 2000
- (10) JIS Q 14001:2004 (ISO14001) 「環境マネジメントシステム要求事項及び利用の手引」, 日本規格協会, 2004
- (11) JIS Q 14004 : 2004(ISO14004) 「環境マネジメントシステム 一原則, システム及び支援技法の一般指針」, 日本規格協会, 2004
- (12) JIS Q 190011 : 2003 (ISO19001) 「品質及び/又は環境マネジメントシステム監査のための指針」, 日本規格協会, 2003
- (13) J. M. ジュラン, 石川馨, 神尾沖藏, 水野滋, 監修 東洋レーション訳「経営革新のための品質管理」, 1966, 日科技連
- (14) A. V. ファイゲンバウム著, 日立製作所訳「総合的品質管理」, 日科技連 1966
- (15) ブライアン・L・ジョイナー著 (狩野紀昭監訳, 安藤元裕訳) 第4世代の品質経営 (日科技連), 1998
- (16) 吉村達彦著「トヨタ式未然防止手法」, 日科技連, 2002



近代朝鮮における改良温突(オンドル)の開発と商品化に関する一考察

—日本人住宅の防寒問題とその改良のテーマとして—

金 容範* 内田 青蔵**

A Study on the Development and Commercialization of Improved Heating System(On-Dol) of Modern Korea

Youngbum KIM* Seizo UCHIDA**

1. はじめに

温突(オンドル)は、朝鮮半島で発達した特有の暖房設備である。朝鮮人の独特な生活文化を生み出したこの温突は、韓国人の生活の多くが西欧化されているにもかかわらず、現代でも生き続いている。すなわち、温突は、近・現代の住宅設備と技術の発展に対応しながら存在し続けているのである。

本研究は、前年度の共同研究⁽¹⁾に引き続き、朝鮮建築会という在鮮日本人の建築団体が行なった住宅改良の活動の一環として行われた温突改良の問題に注目している。すなわち、この時代は、朝鮮人の生活改善や住宅改良の論議が盛んに行なわれており、朝鮮建築会の活動を含めた改良論議において、温突改良は中心的なテーマになっていたのである。それにもかかわらず、これまで韓国の近代建築史研究では、温突改良そのものに注目した研究はほとんど行われてこなかった。また、この温突改良は、朝鮮人の生活問題だけではなく、植民地という異なった環境での日本人の生活問題との関連性も深く、朝鮮半島における日本人住宅の変遷を明らかにするためにも欠くことのできない重要な問題と考えられる。

そこで、本稿では、朝鮮建築会を始めとして温突改良に関わった人物に注目し、温突改良に関する論議の内容と、商品として開発された改良温突について考察したい。

2. 朝鮮温突に関する認識と議論

はじめに、日本人が在来の朝鮮温突についてどのように

認識し、温突改良の論議を展開したのかを見てみる。

2.1 今和次郎の民家調査と朝鮮温突

今和次郎は、朝鮮総督府からの依頼により、1922年9月から10月まで1ヶ月間、京城(当時のソウルの名)をはじめ、北は平壠・開城・咸興とその周辺、南は全州・金泉・大邱などで朝鮮民家の調査を行い、『朝鮮部落調査特別報告』(1924)を総督府に提出した。今の民家調査の内容は、朝鮮建築会の機関誌『朝鮮と建築』にも紹介されている⁽²⁾。今の前後に、小田内通敏・善生永助・村田治郎・藤島玄治郎などによって朝鮮民家の調査が行われたが、朝鮮温突に関して詳細に論じていたのは、今である。

この『朝鮮部落調査特別報告』のなかの第1章第3節が「温突」⁽³⁾の節で、今は、最初の文章を次のように記している。

朝鮮の家屋と云へば、温突と直ぐ考へる程、温突と朝鮮の住家とは關係の離るべからざる者となつてゐる。それは暖房設備の不完全な所謂海洋系の民家をもつてゐる日本内地人にとっては、當然興味を持つべきこと、研究慾をそゝられること、批評してみなければならぬところの事項である。…

この文章から、今は、温突が朝鮮住宅に必要不可欠な暖房設備であり、ユカ座の起居様式として日本の畳との類似性からも研究すべき対象であることを主張していたことが分る。そして、この第3節で、今は、朝鮮温突の起源と、温突の衛生と経済性に関して考察を行っている。

今は、朝鮮温突の起源について、日本の畳が上流階層から一般の人々に拡がっていたことに対し、温突は一般の人々から上流階層に伝わり発達したという説を立て、ロシ

*客員研究員、工学研究所

Visiting Researcher, Research Institute for Engineering

**教授、建築学科

Professor, Dept. of Architecture

ア・シベリア・満州などに住む北方民族の暖房方式の調査を行っている。すなわち、今は、この北方民族の一部にペーチカの上に横たわって寝たりする習慣や、満州では部屋の一部に温突と同じように床を暖房する「炕」があることに注目し、北方の移動民がその暖房方式を朝鮮の北部地域に伝えたと主張したのである。また、温突が日本に拡がらなかった理由としては、気候が異なり、百濟を含んだ当時の南朝鮮では温突がまだ伝えられなかつたと推測した。そして、温突のように部屋全体の床を暖める暖房方式が朝鮮に定着したのは、朝鮮人の生活様式がユカ座であったことによるもので、今は、北朝鮮の民家に見られる温突(「鼎廚」と呼ぶ)の使い方が北方の最も理想的な暖房方式に発達したものだと考えた⁽⁴⁾。

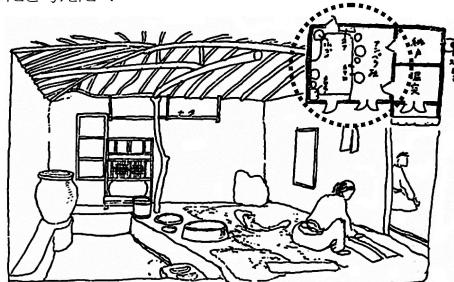


図1 北朝鮮の民家の「鼎厨」を描いた今和次郎のスケッチ。(右上の図面で○に表示された部屋が鼎厨)

また、今は、報告書の中で、京城医学専門学校の衛生学研究室が行った温突実験について紹介している。この実験は、温突と居住者の健康状態との関係を調べるためのものであったが、温突の保温効果を高めるように建てられた温突室の面積の狭さや、小さな開口部による温突室の換気の問題などの欠点の存在を示すことになった。今は、この実験を通じ、温突室の機密性から生じる衛生問題が朝鮮人の怠惰な気質にも影響を与えたと考えていたのである。

同様に、今は、朝鮮総督府林業試験場で行われた温突実験についても紹介している。この実験の目的は、温突の燃料消費量を調査することであった。温突の燃料は、薪・枝・葉・雑草・穀などが主要なものとして挙げられるが、この実験は、温突の暖房に相当量の薪などを必要とすることを示し、朝鮮温突が朝鮮の山林を荒廃させる主原因であることを指摘したものであった。

いざれにせよ、今は、自らが朝鮮で冬を過したことはないものの、どんな寒さにも朝鮮温突が適合する暖房設備であることを認めていた。そして、温突をより完全な暖房設備にするために改良すべき欠点があり、それに関する研究の必要性を報告書の終わりに記していたのである。

2.2 朝鮮建築会の住宅改良の活動と朝鮮温突

2.2.1 朝鮮住宅研究の必要性

今が朝鮮の民家調査を開始する直前の1922年3月、朝鮮建築会は、朝鮮総督府をはじめとした植民地支配機関で働いていた日本人の建築技術者により設立された。朝鮮建築会は、朝鮮建築界の結束を図ることと共に、建築の諸般に要求される調査研究を活動の目的とし、なかでも、生活改善と朝鮮の気候・風土に適する住宅の普及、防寒建築の普及など、住宅改良の活動に主眼を置いていた⁽⁵⁾。設立の直後に三つの研究委員会が組織され、そのうち、「住宅問題研究委員会」は朝鮮住宅に関する資料を収集すること、また、日本人住宅の改良問題を優先し、住宅問題の解決を目指していた⁽⁶⁾。

『朝鮮と建築』の創刊号には、小野二郎(朝鮮銀行營繕課長)の「朝鮮に於ける住宅建築の改造」の論説が掲載されていたが、小野は、住宅問題研究委員会の幹事として、朝鮮建築会の住宅改良の活動について次のように述べている。

所在の内地人将来の木造建築、官舎も舎宅も町家も料亭も凜烈なる寒氣に對しては何等の用意もなく、慘めなる喘ぎを何時まで續けんとするか有意義の新建築が生れなかつた事は今餘りに遅過ぎた憾がある。此朝鮮に於て風土に適した文化的住宅を獲んとすれば防寒建築の研究に俟つより外に道が無い。防寒建築の要點は云ふ迄もなく保溫と採暖とである。温暖なる内地に於ての住宅建築に考うるを要せなかつた此採暖保溫の二項目は、朝鮮に於ては閑却し能はざる主項目である。⁽⁷⁾

この文章から、朝鮮建築会の当初の住宅改良の活動において、日本人の住宅を保溫性能の高い防寒構造とすることが主要目的であったことが分かる。また、朝鮮建築会の初代副会長であった岩井長三郎(朝鮮総督府營繕課長)は、日本人住宅を防寒建築に改良するために朝鮮住宅を研究する必要があることを、次のように述べている。

現今我朝鮮に於て住宅改善の叫びは内地に行はるゝものと何等遼ぶ處なきのみならず歐米先進国を模倣し或は焼直し、甚しさに至つては内地在来のものを其の儘移入せんとするものが多くて眞に朝鮮の實際を理解し朝鮮を背景として誰が見ても好適の案なりと認めらるべきものが見當らない。… 尤も内鮮の異つた古い習慣と因襲とは各々の家屋の構造の相違は全く之を同一居住状態に融合せしめ様とすることは不可能かも知れないが、出来る丈の接近を圖り氣候、風土に適し且つ民度なり經濟状態なりより見るも無理のないものを求めていのである。… (中略)… 之を要するに朝鮮に於ても住宅改良と云ひ文化住宅と云ふも、問題は朝鮮獨特のものとして之れを研究し、… 在來の朝鮮建築を長所は之を採用することに努めて、其構施設に融合點を見出し、… (下略)⁽⁸⁾

これによれば、岩井は、日本と朝鮮に共通した住宅改良案を考案するのは不可能であり、朝鮮の気候と風土に適する改良策を求める必要があるため、在来の朝鮮建築の長所を採用することを主張した。すなわち、防寒建築としての朝鮮住宅が持つ構造と設備、とりわけ、温突に関する研究の必要性が認識されていたことが窺える。

2.2.2 日本人住宅の暖房設備の模索

朝鮮建築会の住宅改良の活動のでは、当初、日本人住宅の保温暖性能を得るために、温突以外の暖房設備を検討していた。すなわち、朝鮮建築会の設立時には、日本人住宅の暖房設備としてペーチカが注目されていたのである。例えば、朝鮮建築会の会合にストーブの代わりにペーチカを使用しようとする提案があり⁽⁹⁾、また、創立年の冬に行われた住宅設計競技の当選案8案中、温突を採用した2等案を除いたすべての当選案にペーチカや温水暖房・蒸気暖房が採用されていた。このことから、当初は、満州で導入の経験のあるペーチカや吹きの温水暖房の導入がめざされていましたことが窺われる⁽¹⁰⁾。

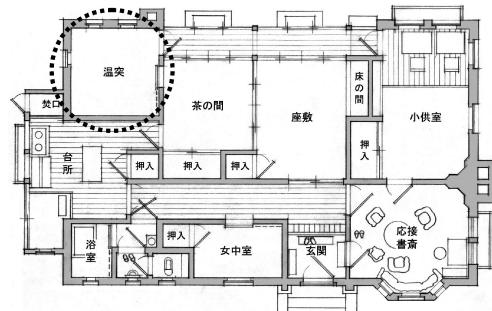


図2 朝鮮建築会主催の「改善住宅設計图案懸賞募集」(1922)の2等案(花田得郎設計)。○に表示された左上の部屋に温突を採用している。温突の焚口は台所から直接出入するようにしておる、その反対側に煙突が設けられていることがわかる。ちなみに、応接室書斎と小供室には西洋式の暖炉が設けられている。(図面は筆者が復元したもの)

ところで、朝鮮建築会は、1926年に機関誌『朝鮮と建築』で「暖房篇」の特輯号を企画している。この特輯号からも、当時の暖房設備に関する前述の傾向が見られる。表1は、「暖房篇」の特輯号に掲載された論説の題目と著者、紹介された暖房装置の種類をまとめたものである。

徳永眞一は、室内保温に関する科学的な原理を説明し、温水暖房・蒸気暖房・熱気暖房(輻射暖房)の装置を紹介している。また、「談話」を寄せた5人のうち、4人は設備業者で、暖房設備として3人がペーチカ、1人が蒸気暖房を紹介している。残りの1人は、京畿道庁の所属の山林課長であった掛場定吉で、唯一、改良温突を紹介していた。このよう

表1 『朝鮮と建築』暖房篇(5輯11号)の論説

	題目	著者	所属	暖房装置の紹介
講 話	建物の保温に就て	徳永眞一	朝鮮總督府内務局 技手	温水暖房・蒸気暖房・ 熱気暖房
	熱氣爐に就て	上田 清	特許空気暖房 製作主	熱気暖房
	各家庭に暖房装置を普及 したい	芳賀豊彦	芳賀商会主	ペーチカ
	大勢はストーブよりペー チカに移つた	川上重三郎	川上式ペーチカ スマート本店主	ペーチカ
	温突の改良に就て	掛場定吉	京畿道山林課長	改良温突
	宮崎式ペーチカ温水暖 房に就て	宮崎吉太郎	宮崎組主	ペーチカ

に、暖房設備の導入が模索されていた1920年代は、温水暖房や蒸気暖房が理想とされていたことが窺われる。ただ、現実的には、設備の資金が高くなるため、ペーチカが商品化されるなど、当時の朝鮮に建てられた日本人住宅で採用された暖房設備としては、ペーチカが一般的であったと考えられる⁽¹¹⁾。

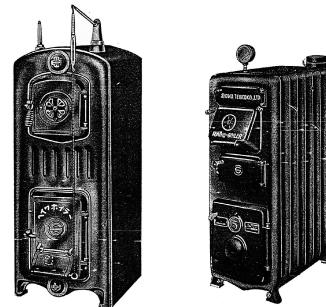


図3 朝鮮で販売された住宅用の温水暖房装置の商品。昭和鉄工株式会社製作のヘイワ・ボイラー(左)とラヂオ・ボイラー(右)



図4 1921年の京城生産品評会に出品された宮崎式ペーチカ。この宮崎式ペーチカは、朝鮮大博覧会の実物住宅展(1929)にも採用されたことがあり、広く販売されていたと考えられる。

このように、1920年代から日本人住宅に適する暖房設備に関する議論が行われて来たが、朝鮮温突に関する当時の評価は、温突推奨論・温突撲滅論・温突排斥論・温突存置論などの様々な意見があつた⁽¹²⁾。一方、朝鮮温突を温水暖房やペーチカなどの暖房設備に比べ、建築費の廉価、燃料の経済性、工作的の安易などの長所に注目した意見が増え⁽¹³⁾、朝鮮温突の欠点を改善して採用しようとする論議も

次第に展開された。

3. 朝鮮温突の改良論議の展開

朝鮮建築会を中心とした在鮮日本人は、前章のよう、暖房設備として温突の導入を認め、朝鮮温突の改良に関する論議を展開した。はじめに、改良温突の開発の前段として温突の改良に関する論議の内容を見てみる。

3.1 防寒建築としての温突室と温突の構造

1922年、小野二郎は、防寒建築としての温突室の構造について紹介していた。小野は、室内の保温を優先する気密性の高い空間として温突室の構造的な特徴を次のように述べている。

温突建築は燃料に依つて得らるゝ熱を出来る丈多量に攝取し、その放散を防がんとするものである。床下に火路を導きて床を暖めその傳導熱に依りて床下の総てを暖むる以外に、床が全き放熱面となりて室内に輻射熱を發散する。四壁は粘土を以て塗られ天井と共に紙を以て間隙なく貼り潰さる。窓及出入口は開戸を使用し熱の發散を恐れて其大きさは必要以上に小なるのみならず著しき分厚の板を使用する。室の天井も恐くは彼の巨大なる驕幹の所有者たる鮮人の住むに相應しからぬ程に低きは防寒を主目的とする上より見て又止むを得ない為めである。⁽¹⁴⁾

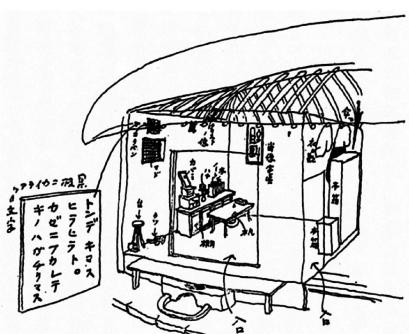


図5 溫室の内部を描いた今和次郎のスケッチ。温室の天井の高さが低くて、小さい窓が付いており、入口の下には、温室の焚口が設けられていたことがわかる。

これによると、床から与えられる熱気が外部へ発散しないように温突室は狭く、天井も低く、窓や扉もなるべく小さくしているのが、一般的な構造であったことが分かる。また、壁と天井にすき間がないように紙を張り、熱気の漏出を防いでいる。小野は、このような温突室の構造について、「防寒建築一面の理想を達成したもの」であろうと評価していた。

また、この温突室の床と床下の煙道については、『朝鮮と建築』の「温突特輯号」(1940)に掲載された野村孝文(京城高等工業学校教授)の論説⁽¹⁵⁾を参考にした。

温突の煙道は、野村によれば、その築造の形態により平行線形・放射線形・折衷形の三つに分けることができ、部屋の形と焚口と煙突の位置に従っていざれかの形で築造することに出来るという。その煙道の畔は、割栗石を粘土で積み上げるのが在来の構造であったが、割栗石の代わりに煉瓦を使用した温突も増えていたという。

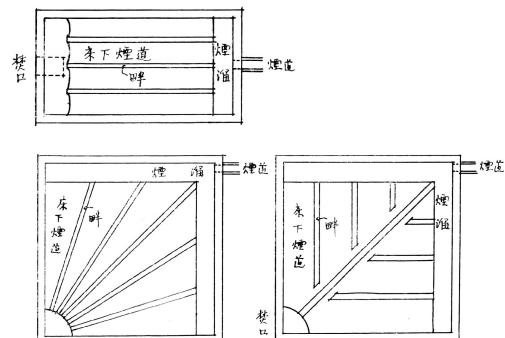


図6 煙道の構造と形態。左上から左回りに平行線形・放射線形・折衷形。

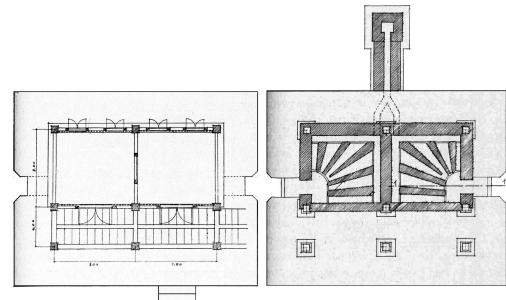


図7 温度室と煙道築造の一例。二つの温宍室の床下に、それぞれの煙道は、放射線形に築造され、一つの煙突に繋がっている。

また、野村は、煙道の畔の上に花崗岩の温突石を置くが、畔の幅が一定ではないため、畔と温突石の間に石片や煉瓦片を支石として温突石の四つの隅に置く必要があり、その後に粘土と砂を混ぜた温突石を床の面が水平になるように塗って油紙を張ると説明している⁽¹⁶⁾。

このような朝鮮在来の温突室と温突の構造について、欠点を指摘し、温突の改良の必要性を指摘した早いものに、朝鮮建築会の理事長である中村誠(朝鮮殖産銀行營繕課長)が1923年に発表した「研究すべきの温突装置」が挙げられる⁽¹⁷⁾。中村は、「保溫装置と言えば、温突が日本のものよりずっと發達したものと評価しつつ、一方ではその欠点を改善する必要がある」と述べている。そして、中村は、その温突の欠点として、室内の空気が乾燥されて湿度が足りないこと、もう一つは、温突から室内に炭酸ガスが漏出して健康と衛生に有害であることを挙げた。また、小野二郎は、前述の『朝鮮レ建築』の創刊号の論説で、温突が室内の空気

を乾燥させて湿気を好む日本人に不快感を与えており、床面から直接に熱が伝導するために怠慢な起居をもたらして生活能率を低下する欠点があると主張している⁽¹⁸⁾。このように、朝鮮温突の欠点としては、温突の衛生問題と住み心地に関係する問題が指摘されていた。こうした問題について実験を行い、科学的に証明した記事が『朝鮮と建築』に紹介されている⁽¹⁹⁾。

3.2 富士貞吉医学博士の実験

京城医学専門学校の富士貞吉博士は、日本人住宅と朝鮮人住宅の暖房に関する二つの実験を行なっていた。最初の実験は、日本住宅の火鉢暖房の効果と、縁側と廊下の保温価値に関する実験⁽²⁰⁾で、京都所在の日本家屋3例と東京所在の日本家屋2例、そして、京城に建てられた温突を使用する日本人住宅2例を対象としている。京城の日本人住宅2例は、朝鮮総督府医院の付属家屋と、苑南洞所在の日本人住宅である。

実験方法は、各住宅に暖房体の真上を除く、床面から1.5mの高さの室温を測定することである。この実験の結果として、富士博士は、火鉢暖房と温突暖房の効果を比べ、温突暖房が外気からの影響が少なくて一定の室温を長時間維持でき、保温時間と燃料の消費量から温突暖房の経済性が優勢であったと述べている。

富士博士のもう一つの実験は、温突室の温度と湿度の変化を測定したもので⁽²¹⁾、前者の実験を行った京城の日本人住宅を対象とした。この実験で、暖房開始の後に観察された温突室の温度分布は、焚口を除いたすべての場所で等温を維持していることを示し、富士博士は、西洋式の建築物に見られる対流暖房の効果と類似した暖房効果があると評価した。また、暖房開始の後に室温が上がって5~7時間頃に最高になり、その後に室温がゆっくりと下がったため、長時間の高温維持ができ、一方、湿度は暖房開始の後に下がって最低になり、その後に徐々に増加したことを示し、温突が経済的な暖房設備であることを証明した。

また、この実験を通して朝鮮温突の欠点として、湿度が低くなる問題と、室内の炭酸ガスの濃度が上がる問題が判明した。なお、富士博士は、この実験の結果から温突の改善策として、①燃料の消費を減らすために外部の煙突のダンパーや、焚口の蓋を設け、煙道に流入される空気量を調節する必要があること、②炭酸ガスの漏出を防ぐために、煙突の高さを高める必要があること、③換気の問題を根本的に解決するために、窓の面積を大きくして日照と換気を十分に取ること、を主張していた。

いずれにせよ、富士博士の実験は、朝鮮温突が持つ欠点を明らかにし、その欠点が、朝鮮温突の不備な構造から

発生したことを示していたのである。この富士博士が明らかにした煙道などの構造の改良がめざされ、その後の改良温突の開発が進められたと考えられる。

3.3 温突改良の先駆者…京畿道山林課長「掛場定吉」

最初の朝鮮温突の改良の試みは、1923年、京畿道庁山林課長掛場定吉⁽²²⁾によって行われた。掛場は、前述の『朝鮮と建築』の特輯号で改良温突を紹介した人物で、1922年から朝鮮温突の改良に関する研究を積極的に行っていった。それは、温突の燃料が山林から得るものが多いため、朝鮮人の温突を改良すれば、その燃料になる山林を守ることが出来ると考えられたためであり、その研究を主導したのが、掛場定吉であったのである⁽²³⁾。京畿道庁は、1923年から掛場の研究成果をもとに温突改良に関する宣伝活動を展開した。この掛場の研究は、1923年6月号の『朝鮮と建築』に紹介され、また、各地の官庁に小冊子で配布され⁽²⁴⁾、朝鮮語の新聞にもその翻訳文が発表⁽²⁵⁾するなど、広く知られることになる。

掛場は、研究成果をもとに朝鮮温突の構造的な欠点として、①焚口が大きすぎ燃料の消費が多いこと、②煙突が短くて空気の流通が不完全になりガスが漏出すること、③焚口と煙突に遮断幕がないため冷たい外気が浸透すること、④煙道の畔を地面上に築造するため煙道の内部に湿気が満ちること、などの問題を挙げている。また、使用上の問題としては、焚口や煙道内部の修理や掃除ができないため、温突の寿命が短いことを挙げ、また、少量の熱で部屋を十分に暖めるためには、同一の燃料でも温突の発熱量を高め、室内的熱気が放散しないようにすることが必要であると主張した。すなわち、掛場が提案した朝鮮温突の改善策は、山林を守るために考案であり、温突の燃焼効率を高めて燃料量の縮少化を目指していたのである。

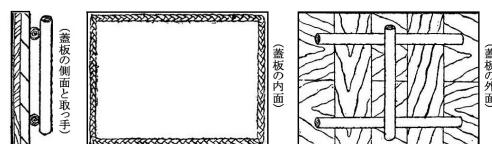


図8 掛場定吉が考案した温突の焚口用の開閉装置。

また、掛場は、改良を求めて従来の焚口の大きさを小さくした図8のような開閉装置を考案した。この開閉装置は、内面にトタンを用い、その後部に木板と取っ手を付けたものである。掛場の実験によると、この開閉装置を設けることで外気の侵入を防ぎ、燃焼の効率が上がり、焚火の回数が減って燃料量を従来より約40%に節約することができるという。また、当時に行なわれた火災の多くは、温突の焚口や煙道から発火したり、焚火の未熟がその原因であったが、掛場は、

この開閉装置で、焚口の失火による火災の予防にも効果があると主張した。

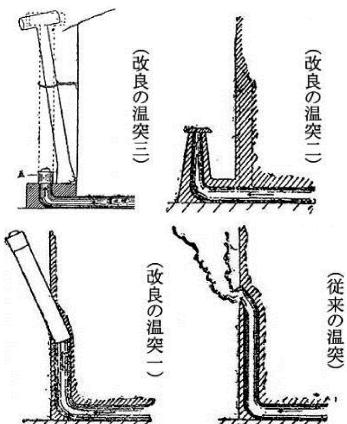


図9 掛場定吉が提案した煙突の改良の例

また、掛場は、トタン製・煉瓦・土管などの煙突を設置して耐久性と気密性を高めることや、煙道を石材で築造したり焚口内の床に石枕を置いて地面からの水分の浸透を防ぐことが出来ることを主張し、図9のような煙突の改良案を提案している。

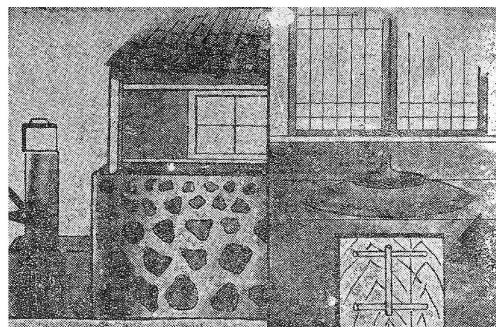


図10 掛場定吉の考案した開閉装置と煙突が用いられた改良温突のイラスト。

いずれにせよ、京畿道府は、掛場の考案に従い、温突改良を勧告する内容のポスターを京城と京畿道内に配布し、温突改良に関する活動写真を上映するなど、積極的に宣伝活動を行なった⁽²⁶⁾。それと共に、掛場の考案した開閉装置を大量生産し、朝鮮人主の「朝鮮農林商会」と、日本人主の「釘本商店」をはじめとしてその市販を行った⁽²⁷⁾。掛場は、毎日申報社が主催した婦人夏期大講演会での講演や、京畿道府が行なった温突職人養成講習会など、改良温突の工作法に関する啓蒙活動にも尽くした⁽²⁸⁾。

なお、京畿道府が宣伝活動を広めた翌年の1924年の統計によると、京畿道内に温突を改良した住宅が98,042棟、なかには、日本人住宅の1,850棟があったという⁽²⁹⁾。1925年に発表された京城の住宅統計で⁽³⁰⁾、温突を使用する朝

鮮人住宅が総53,580棟のうち51,743棟、日本人住宅が総18,811棟のうち4,590棟であったことを考えると、京畿道府の宣伝活動は、大いに効果があつたといえる。

また、京畿道府の宣伝活動が次々全国に伝えられ、他地方の住民に掛場の開閉装置を無償配布したり、大量に購入することを支援したこともあり、指導者を派遣して温突改良に関する教育を実施し、温突を改良した住民に表彰するなど、掛場の研究から始まった朝鮮温突の改良が山林勸奨運動の一環として全国に拡散されたのである⁽³¹⁾。

なお、このような京畿道府の宣伝活動をもとに、温突改良に関する関心が高まり、1920年代の後半からは、改良温突の開発や、開発された改良温突の特許出願とその商品化が始まった。

4. 改良温突の開発と商品化

4.1 朝鮮人の改良温突の開発

1920年代の後半にみられる朝鮮人が開発した改良温突は、既存の温突が持つ燃焼効率の問題を改善し、燃料を節約することが出来る装置の開発に集中している。改良品の多くは、温突の焚口を開閉する装置や燃焼の性能を高めた「火徳」(温突の炉)、焚口に入る空気量を調節する送風装置など、燃料の消費を減らしたり同一の燃料で発火を多大にすることを目指したのである。

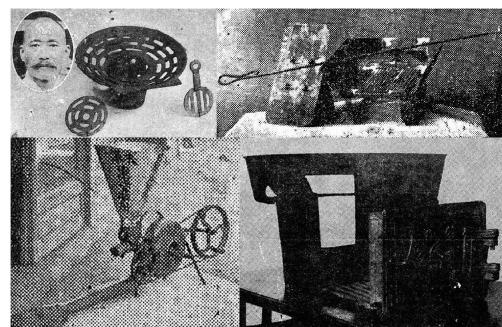


図11 温突の焚口内の焚火を増加するために朝鮮人が開発した改良温突の装置。左上から右回りに「文化焚板」、「五德厨」、「愛林竈」、「自動送風機」

1930年代に入ると、朝鮮人の改良温突の開発は、より盛んに行なわれ、東京特許局に特許を出願したり実用新案を提出した発明品が登場する。また、朝鮮の科学発展を目指して設立された朝鮮発明学会⁽³²⁾が、朝鮮人の発明を奨励し、特許や実用新案を得た発明品の商品化を支援したことでも、改良温突の開発を促したと考えられる⁽³³⁾。

こうした中で、金邦景が開発した改良温突は、特許局から特許新案(第21004号)を得て、總督府の林業試験場で2ヶ月間の実験を経て完成したもので、世間の注目を浴びた。

「愛林竈」と称されたこの改良温突は、燃料節減の効果が50~64%で、京畿道庁によって開発された既存の改良温突より燃焼効率が高かったと評価された⁽³⁴⁾。また、延禧専門学校數学科の講師である李萬鶴が考案した改良温突は、建築家が開発したものとして注目された。金属製の不良導体の材料で製作した温突床により保温時間が飛躍的に延びたのが特徴であり、温度を調節できる放熱機と開閉装置を備えていたといふ⁽³⁵⁾。

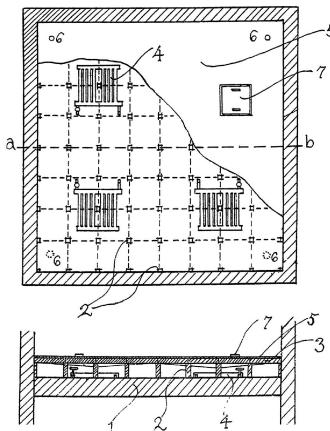


図12 建築家李萬鶴が考案した改良温突の特許申請の図面。各部の詳細は、「1.コンクリート床、2.短柱、3.板石、4.放熱器、5.セメント、6.気孔、7.蓋」と記されている。

朝鮮人が開発した改良温突は、焚口の開閉装置を設けたり、煙道や温突床を金属製・石材・セメントなどの材料を用いて温突の耐久性と燃焼効率を高めようとしているのが、共通した特徴であったと考えられる。

なお、改良温突を商品として扱った早い事例として、1924年に設立された朝鮮人主の共福商店がある。共福商店は、掛場定吉が考案した開閉装置の普及の中で、その改造に必要な工具を販売し、また、改良焚口と煙道を製造する商会であった⁽³⁶⁾。また、1936年には、京城建物株式会社の全興渓が温突石の代わりにコンクリートを使用して開発した改良温突を商品として販売していたという記事もあつたが⁽³⁷⁾、その改良温突がどれだけ販売されたのかは、不明である。

4.2 日本人設備業者の改良温突の商品化

朝鮮人により改良温突が商品化された事例も見られるが、改良温突の商品化をより積極的に推し進めたのは、日本人の設備業者であった。当時、日本人設備業者が開発・販売した改良温突は、川上式温突、更生式温突、村岡式温突、大野式温突、井出式温突などがあつた。以下、日本人が開発・商品化した改良温突の改良点とその特徴について見てみる。

① 川上式温突

川上式温突は、ストーブとペーチカを販売していた川上重三郎が1926年頃に開発し、2件の実用新案と2件の専売局の特許権を得たものである。この改良温突については、『朝鮮と建築』の「暖房篇」と「温突特輯篇」(1940)に紹介されており、1929年に行われた朝鮮大博覧会に朝鮮建築会が出品した展示住宅に川上式温突が採用され、広く知られるようになったと考えられる。また、川上式温突は、日本人の官舎や個人住宅にも広く採用されたことから、「文化温突」と呼ばれたといふ⁽³⁸⁾。

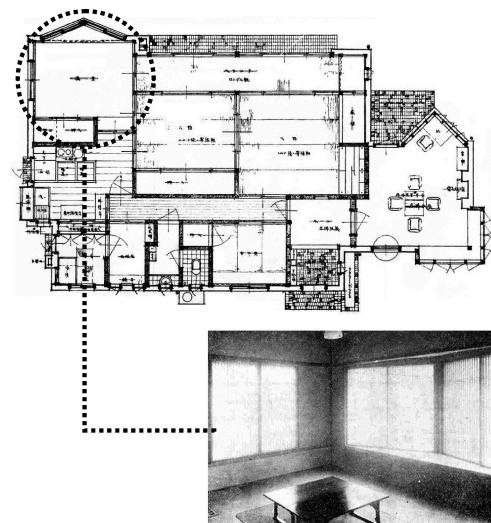


図13 朝鮮建築会が出品した朝鮮大博覧会の出品住宅1号。左上の〇に表示された部屋(茶の間)に川上式温突が設けられた。

この改良温突は、煙道の畔を煉瓦で放射線状に築造しており、その上に温突石の代わりに鉄製の網状板と正方形の耐火煉瓦を敷き、油紙を張ったものである。また、焚口の上部に鉄製の放熱機を設け、焚口と煙突に遮断板を付けて開閉できるようにした。川上式温突は、湿気発生装置を備えて室内空気の乾燥を防ぎ、大掃除口を設けて煙道内に入ることができるのが、その特徴であるといふ⁽³⁹⁾。

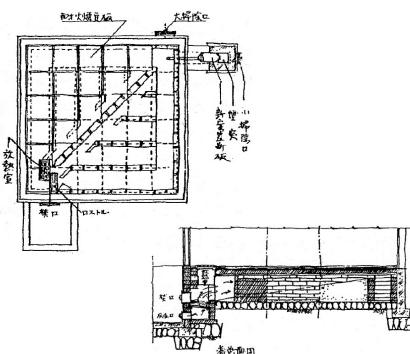


図14 川上式温突の構造。

② 更生式温突

更生式温突は、京城初音町の妹尾氏が養蚕設備の保温装置からヒントを得て開発したものである。幅45cm・深さ75cmの規格の鋼鉄板を60cmの高さに5枚を重ねて積んだ燃焼機が、この改良温突の特徴であった。この改良温突の作動原理については、「漸進燃焼法」と紹介されていたが、放熱機に用意した鋼鉄板には、通気穴と灰出口が打ち抜かれており、その穴を通じて真下の燃料から焚火された熱が上部の鋼鉄板へ次々に上がって行くような工夫であった。これは、朝鮮温突における焚口内の温度が短時間に過度に上がる欠点を改善したものであった⁽⁴⁰⁾。

③ 村岡式温突

村岡式温突は、燃料の完全な燃焼を図るために煙道の高低差を大きくして勾配を十分に置くようにしたものである。煙道の高低と長短、煙道内の分岐口の大きさによって、空気の流速を調節し、焚口と煙突の遮断板より温突の燃焼を調節することで、燃料の一時的な消費量を節約しようとしたのである。また、温突石の代わりに熱気穴を埋め込んだ温突板を使用したもの、この改良温突の特徴であった⁽⁴¹⁾。

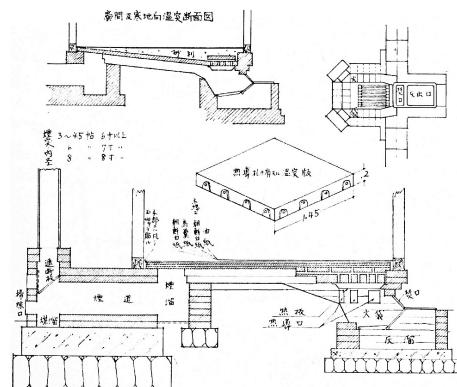


図15 村岡式温突の構造と温突板の詳細。

④ 大野式温突

大野式温突は、温突の燃料として煉炭を利用したのが、他の改良温突とは異なる特徴である。その構造は、床下の真ん中に煉炭炉を設け、コンクリート配管により通気を取り、煙道の畔の代わりに鉄筋コンクリート柱で床を支えている。温突床の材料も鉄筋コンクリートであり、その上にモルタル塗りと油紙張りをしている⁽⁴²⁾。大野式温突は、床の中央の交換口を通じて煉炭を取り替えられるようにしたが、炭酸ガスの流入の問題が行って、室外からレールを利用するよう構造が変更されたとい⁽⁴³⁾。

なお、植民地朝鮮の建築材料の総合カタログとして知られる、朝鮮建築会が1938年に発刊した『建築資料型録』に

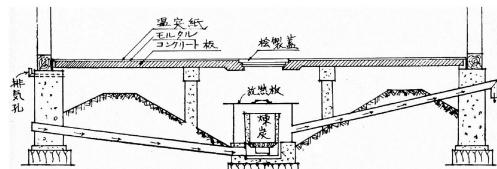


図16 大野式温突の構造。

よれば、上記の4例以外に井出式温突が紹介されている。この広告によると、この改良温突の煙道は、従来の朝鮮温突に見られる平行線の形にしており、鉄製の煙突と開閉装置が付いているのが分かる。

また、焚口をロツツル(火格子)で上下に分け、再燃焼が出来るようにしたのが、井出式温突の特徴であった。また、1941年頃には、葛西重男(京城高等工業学校教授)によれば、「模擬温突」という名称で、温突の燃料として温水や蒸気、電気を使った改良温突を考案する研究が行われたこともあつた⁽⁴⁴⁾。

なお、こうした日本人設備業者の商品化された改良温突がどれだけ販売されたのかは不明であるが、改良温突は、コンクリートや鉄製などの新材料を用いたため、建築費が増えたり、地方の場合は、建材の運搬費の費用が高くなる難点があつたと言われている⁽⁴⁵⁾。

5. 結言

本稿では、近代朝鮮で開発された改良温突について、温突改良の論議の動向の紹介を行ない、次に、朝鮮人と日本人が開発した改良温突とその特徴を明らかにした。朝鮮温突の改良に関する論議は、日本人住宅の改良を目指して行なわれた朝鮮建築会の住宅改良の活動から積極的に展開された。すなわち、温突の研究は、朝鮮半島における日本人住宅の防寒問題を解決するため、防寒建築としての朝鮮住宅の構造と設備をどのように日本人住宅に導入すべきかという研究を端的に開始され、朝鮮住宅の長所として温突の暖房方式が注目されたのである。

朝鮮温突の室内空気の乾燥、炭酸ガスの漏出などの欠点については、温突実験により燃焼効率の改善や燃料の節約などの問題を優先に改良する必要があることが論じられていた。また、こうした朝鮮温突の欠点は、温突の焚口・煙道・煙突などの不備な構造に起因するため、その構造的な問題の改善が、温突改良の主テーマとして、改良温突の開発が開始されたのである。改良温突の開発に最初に着手したと考えられる掛場定吉は、朝鮮温突の焚口を中心に

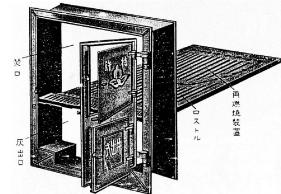


図17 井出式温突の再燃焼装。

して温突の欠点の解決を試みた。その工夫は、焚口の開閉装置の考案で、掛場の開閉装置は、温突改良に関する京畿道庁の宣伝の中で、広く普及することになり、その後の朝鮮人による改良温突の開発にも大きく影響を与えたと考えられる。日本人の改良温突の開発には、温突の築造における鉄筋コンクリート・耐火煉瓦・鋼鉄板などの新材料を用い、放熱機や湿気発生装置などの装置を考案し、朝鮮温突が持つ構造的な欠点を改良する様々な工夫が考案された。こうした日本人設備業者の改良温突は、商品化され、当時の日本人住宅に採用されたと考えられる。

今後は、近代朝鮮で開発された改良温突が、どのように日本人住宅に採用されたのかなどの事例調査を行い、近代朝鮮における日本人住宅への温突導入を通して、日本人住宅の変遷過程を明らかにしたいと考えている。

注

- (1) 金容範・内田青藏、「植民地朝鮮における朝鮮建築会の住宅改良に関する活動について—機関誌『朝鮮と建築』の住宅関連記事を中心として」,「工学研究所所報」,34号(2011-12), pp.34-42
- (2) 今和次郎,「朝鮮民家に関する研究一班」,「朝鮮と建築」,1輯5号(1922-11), pp.2-11, ———,「民家と生活」,「朝鮮と建築」,3輯10号(1924-10), pp.1-12
- (3) 朝鮮総督府,「朝鮮部落調査特別報告(第一冊)」,pp.26-37
- (4) 温突の起源に関する今の説は、他の学者や建築家が高句麗の古文献の記録から主張した温突起源説と相通じる。温突起源を論じた他の説としては次のような論説がある。金允期,「白衣と温突」,「朝鮮と建築」,8輯1号(1929-1), pp.21-24, 村田治郎,「朝鮮温突の始まりに就いて」,「朝鮮と建築」,8輯2号(1929-2), pp.19-20, 孫晉泰,「朝鮮文化問答室—温突はいつ如何に生じたのか」(朝鮮語),「朝光」,2巻1号(1936-1), pp.173-179
- (5) 「朝鮮建築会趣意」,「朝鮮と建築」,創刊号(1922-6), pp.2-3
- (6) 会報,「朝鮮と建築」,1輯2号(1922-7), p.41, 会報,「朝鮮と建築」,2輯1号(1923-1), pp.66-68
- (7) 小野二郎,「朝鮮に於ける住宅建築の改造」,「朝鮮と建築」,創刊号(1922-6), pp.27-31
- (8) 岩井長三郎,「朝鮮は如何なる住宅を要求するか」,「朝鮮と建築」,2輯2号(1923-2), pp.2-7
- (9) 会報, 前掲書, p.66
- (10) 1926年2月号の『朝鮮と建築』には、杉山製作所から「暖房装置の常識」というタイトルで、ペーチカや温水暖房などを採用した住宅の設計法と、その施工法に関する記事が発表された。
- (11) 朝鮮総督府燃料選鉱研究所の技手である手塚吉太郎は、家庭用の暖房器具の選択における検討すべき基準について論じていたが、暖房器具の外見・値段・使用場所の範囲・燃料の種類・取扱の難易・危険の有無・燃料消費量・保温時間と状態・製作の品質・特許の有無・耐久性と修理の容易、の11項目が挙げられた。手塚は、こういた選択の基準に最も適する暖房設備はペーチカであると評価していた。, 手塚吉次郎,「家庭用暖房器具の選擇に就て」,「朝鮮と建築」,6輯11号(1927-11), pp.13-15
- (12) 当時の温突に関する見解のなかでは、温突亡國論を主張したものもあつたが、それは朝鮮温突の具体的な欠点を指摘するというより、証明できない精神的な側面から朝鮮の後進性を非難する論調であったといふ。, かの子,「建築両面鏡—オンドル改造論」,「朝鮮と建築」,2輯2号(1923-2), pp.42-43
- (13) 小野二郎, 前掲書, p.28
- (14) 小野二郎, 前掲書, p.27
- (15) 野村孝文,「朝鮮宮室の温突」,「朝鮮と建築」,19輯3号(1940-3), pp.2-13
- (16) 温突土の塗りは、下塗りと上塗りの2回にかけてするが、下塗りには、温突土に葛(マクス)を混ぜたものを使うのが一般的である。また、温突土の上塗りが乾燥した後には、下張り・中張り・上張りの3回にかけて油紙を張るが、下張りには2枚の馬糞紙、中張りには2枚の三貼紙、そして、最後の上張りには、1枚の片角紙を用意して仕上げする。温突紙の種類については、馬糞紙は、朝鮮在来の黄色のものの、紙質が薄くてボール紙とは異なっており、三貼紙は白紙の一種、また、片角紙は油を引いた朝鮮の温突紙の一種である。加えて、上張りに用いる温突紙としては、片角紙が最も多く用いられるものであるといふ。, 野村孝文, 前掲書, pp.5-6
- (17) 中村誠,「研究すべきの温突装置」(朝鮮語),「東亜日報」,1923-1-2, 5面
- (18) 小野二郎, 前掲書, p.28
- (19) この記事に紹介された実験は、今和次郎が『朝鮮部落調査特別報告』に紹介した実験と同じものであると推測される。
- (20) 富士貞吉,「日本家屋の衛生的研究」,「朝鮮と建築」,2輯1号(1923-1), pp.32-39, ———,「日本家屋の衛生的研究(承前)」,「朝鮮と建築」,2輯2号(1923-2), pp.17-23
- (21) 富士貞吉,「朝鮮民家(オンドル室)衛生学的研究(上)」,「朝鮮と建築」,3輯2号(1924-2), pp.12-19, ———,「朝鮮民家(オンドル室)衛生学的研究(下)」,「朝鮮と建築」,3輯3号(1924-3), pp.8-16
- (22) 掛場定吉は、1886年に石川県で生まれ、北海道農科大学を卒業した後、1909年に朝鮮に渡って1910年3月から朝鮮総督府農商工部山林課の技手として勤務を始める。掛場は、1918年に技師になり、同年から京畿道庁山林課長として植民地の山林行政に関わった人物であったと言われる。, «朝鮮功労者銘鑑»(1935), p.649
- (23) 藤本源市,「温突の改造に就て」,「朝鮮と建築」,2輯4号(1923-3-6), pp.40
- (24) 藤本源市, 前掲書, pp.41
- (25) 「新考案の温突装置—山林の荒廃を助長する温突を如何に改良すべきか(一)」(朝鮮語),「毎日申報」,1923-6-1, 2面,「新考案

- の温突装置—山林の荒廃を助長する温突を如何に改良すべきか
 (二)(朝鮮語), “毎日申報”, 1923-6-2, 2面, 掛場定吉, 「温突の改造に就て」(朝鮮語), “東亜日報”, 1923-6-3, 7面
 (26) 「改良温突宣伝」(朝鮮語), “東亜日報”, 1923-5-31, 3面,
 「改良温突宣伝」(朝鮮語), “東亜日報”, 1924-11-15, 3面
 (27) 掛場定吉, 「温突の改良に就て」, “朝鮮と建築”, 5輯11号
 (1926-11), p.26
 (28) 「改良温突講習会」(朝鮮語), “東亜日報”, 1923-4-23, 3面,
 「燃料四割が節約出来る改良温突の利益」(朝鮮語), “東亜日報”, 1923-5-18, 7面, 「温突改良は事半功倍」(朝鮮語), “毎日申報”, 1923-8-6, 3面, 藤本源市, 前掲書, p.41
 (29) 「温突改良戸数」(朝鮮語), “東亜日報”, 1924-5-2, 1面
 (30) 「温突と住宅」(朝鮮語), “東亜日報”, 1925-10-31, 3面
 (31) 「改良焚口購入」(朝鮮語), “東亜日報”, 1924-12-11, 3面,
 「温突改良蓋配付」(朝鮮語), “東亜日報”, 1925-4-12, 3面, 「温突焚口改良」(朝鮮語), “東亜日報”, 1925-8-28, 5面, 「温突無代改造」(朝鮮語), “東亜日報”, 1925-11-22, 5面, 「林業奨励策として温突改良者の表彰」(朝鮮語), “毎日申報”, 1930-9-10, 3面
 (32) 朝鮮発明学会は京城工業専門学校の出身の朝鮮人技術者が集つて1924年に設立された科学団体である。この団体は設立から半年後に停会に入ったが、1932年の第1回の理事会から復活して1933年から機関誌『科学朝鮮』を発刊し、その活動を本格的に行つた。近代朝鮮の代表する朝鮮人建築家朴吉龍は理事として朝鮮発明学会の活動に参加していた。
 (33) 「発明学会理事会」(朝鮮語), “東亜日報”, 1935-9-4, 3面,
 「褒賞を受ける発明家廿人の選定」(朝鮮語), “東亜日報”, 1936-3-12, 3面
 (34) 「燃料節約の大王—愛林竈の発明」(朝鮮語), “東亜日報”, 1935-11-5, 3面, 金邦君, 「愛林竈発明所感」(朝鮮語), “東亜日報”, 1935-12-1, 4面
 (35) 「李萬鶴君の考案で改良温突の出現」(朝鮮語), “東亜日報”, 1939-6-29, 5面
 (36) 「改良温突紹介」(朝鮮語), “東亜日報”, 1924-10-8, 4面
 (37) 「温突をセメントに改良する新発明」(朝鮮語), “毎日申報”, 1936-7-10, 2面
 (38) 川上重三郎, 「川上式オンドルの話」, “朝鮮と建築”, 7輯6号(1928-6), pp.25
 (39) 川上重三郎, 前掲書, pp.25-26

- (40) 野村孝文, 「更生式温突に就いて」, “朝鮮と建築”, 13輯4号(1934-4), pp.19-20
 (41) 「各種改良温突の構造」, “朝鮮と建築”, 19輯3号(1940-3), p.30
 (42) 前掲書, p.31, “建築資料型録”(1938), p.109
 (43) 葛西重男, 「温突概観」, “朝鮮と建築”, 19輯3号(1940-3), p.25
 (44) 葛西重男, 前掲書, p.26
 (45) 葛西重男, 前掲書, p.25

出典

- 図1—“朝鮮部落調査特別報告”(1924), 朝鮮総督府, p.46
 図2—“朝鮮と建築”, 1輯5号(1922-11), 口絵
 図3—“建築資料型録”(1938), p.54
 図4—“京城生産品品評会宣伝写真帖”(1921), 京城中央経済会
 図5—“朝鮮部落調査特別報告”(1924), 朝鮮総督府, p.29
 図6—“朝鮮と建築”, 19輯3号(1940-3), p.3
 図7—“朝鮮と建築”, 19輯3号(1940-3), p.5
 図8~10—“東亜日報”, 1923-6-3, 7面
 図11—“東亜日報”, 1927-10-25, 7面, 1933-8-22, 3面, 1935-11-5, 3面, 1938-8-28, 5面
 図12—“実用新案公報”(1939-5-23), 特許局, p.40
 図13—“朝鮮と建築”, 8輯10号(1929-10), p.3, p.4
 図14~16—“朝鮮と建築”, 19輯3号(1940-3), p.29, p.30, p.31
 図17—“建築資料型録”(1938), p.89

参考文献

- (1) “朝鮮と建築”, 朝鮮建築会, (1922-1945)
 (2) “建築資料型録”, 朝鮮建築会, (1938)
 (3) “実用新案公報”, 特許局, (1927-1939)
 (4) “東亜日報”, 東亜日報社, (1923-1939)
 (5) “毎日申報”, 每日申報社, (1923-1936)
 (6) “朝鮮総督府及所属官署職員録”, 朝鮮総督府, (1901)
 (7) “朝鮮部落調査特別報告”, 朝鮮総督府, (1924)
 (8) “朝鮮功労者銘鑑”, 民衆時論社, (1935)
 (9) 강상훈, “日帝強占期における日本人の温突に対する認識変化と温突改良”(韓国語), 韩国建築学会論文集(計画系), 22卷11号(2006-11), pp.253-260



雷雲からの放射線を探る

日比野 欣也* 有働 慶治**
立山 暢人* 白井 達也*

Search for Energetic Radiation from Thunderclouds

Kinya HIBINO* Shigeharu UDO**
Nobuhito TATEYAMA* Tatsuya SHIRAI*

1. はじめに

NASA の高エネルギーガンマ線観測衛星「フェルミ」が、2009 年 12 月にエジプト上空を通過中に約 30 ミリ秒間に渡り、511keV のエネルギーを持ったガンマ線を検出した⁽¹⁾。511keV のガンマ線とは、電子・陽電子対消滅の際に発生する特徴的な放射であり、どこかで大量に反物質である陽電子が生成されたことを示していた。詳細なデータ解析により、陽電子の発生場所はエジプトから南におよそ 4,500km 離れたザンビアで発生した雷雲であることが突き止められ、雷雲が大量の反物質を発生させたことを示唆する貴重な発見として報告された。

反物質である陽電子の発生メカニズムに関しては、雷雲や雷放電の中で高エネルギー粒子（主に電子）の加速が行われ、その粒子が大気中の原子核の近傍を通過する際の制動放射により、高エネルギーガンマ線を発生させる（この現象は、1990 年代の初めごろに Compton Gamma Ray Observatory (CGRO) という高エネルギーガンマ線観測衛星により発見され、Terrestrial Gamma-Ray Flash (TGF) と名付けられた⁽²⁾）。次にこの高エネルギーガンマ線が対創成により電子と陽電子に替わり、その陽電子が地球の磁力線に沿って運ばれて、フェルミ衛星を造っている物質内の電子と衝突して対消滅することにより 511keV ガンマ線が発生するという複雑なシナリオが考えられている。

このシナリオの中で最も理解が進んでいないところは、

電子などの荷電粒子が雷雲や雷放電の中で加速されるメカニズムである。雷雲内で高エネルギー粒子が作られていることは、天文観測衛星や最近の地上観測装置により明らかであるが、そのメカニズムを探求するにはまだ観測データが不足しているのが現状である。

高エネルギー粒子の加速メカニズムの解明は天文学や宇宙物理学の分野では重要な研究テーマとなっていたが、最近の研究から意外にも身近な気象現象の中にその謎を解く鍵が隠されているかも知れないと考えられるようになってきた。本稿では、神奈川大学横浜キャンパスで始めた雷雲からの放射線観測実験の報告と、それに先立ち中国チベット自治区羊八井（標高 4,300m）での準備実験からの観測結果を報告する。

2. 雷雲からの放射線観測実験

天文観測衛星で発見された TGF 現象は地球全体で 1 日当たりおよそ 500 事象以上の頻度で起こっていると見積もられている。そのうちの幾つかは地上でも捉えられていたとしても不思議ではない。実際、高山では数例観測されており、2000 年に落雷現象に同期した 1MeV を越える放射線が観測されていた⁽³⁾。日本においても、柏崎原子力発電所など北陸に設置された放射線モニタリングポストの放射線量が冬季雷雲通過に伴って、増大するという報告もあった⁽⁴⁾。その後、土屋らの理研・東大グループが柏崎原子力発電所敷地内において本格的な雷雲に伴うガンマ線観測を開始し、2007 年には雷放電と同期したガンマ線放射を検出し、そのエネルギースペクトルを求める成功に成功し、雷雲での放射線発生メカニズム解明に新たな知見を与えることになった⁽⁵⁾。

*教授 物理学教室

Professor, Institute of Physics

**特別助手 物理学教室

Research associate, Institute of Physics

理研・東大グループの観測の特徴は、放射線モニタリングポストに較べ、放射線感度が高いだけでなく、荷電粒子とガンマ線との識別や放射線の到来方向の推定、および40keVから80MeVまでのエネルギー領域に感度があることであった。今回、我々が開発した検出器の特徴は、BGO無機シンチレータを用いることにより、さらに高いエネルギー領域を測定できることである。BGOシンチレータはNaIやCsIと較べて有効原子番号が大きく密度も高いため、阻止能が高く、単位面積当たりの放射線の光電吸收率が高いため、高エネルギー領域の放射線検出器として優れている。

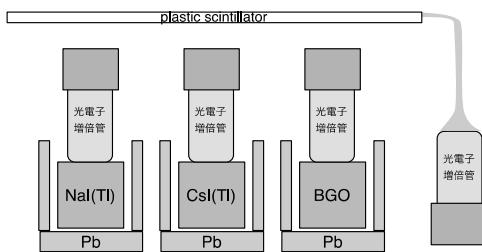


図1 雷ガンマ線検出器概念図。それぞれのシンチレーション検出器ごとに検出できるエネルギー領域を分けて、全体としてダイナミックレンジを大きく取った。

本実験装置の概念図(図1)は、40keV~3MeV領域をNaI(Tl)、300keV~20MeV領域をCsI(Tl)、1MeV~100MeV領域をBGOと、それぞれのシンチレータが検出エネルギー領域を重複させながら、広いエネルギー領域をカバーできるように設計した。これらシンチレーション検出器は上方から到来する放射線を検出するように、側面と底面には鉛ブロックで囲み、雷雲や雷放電とは関係ないバックグラウンド放射線の遮蔽を行う。シンチレーション検出器の上部にはプラスティックシンチレーターの平板を設置して、上方から入射する放射線の荷電粒子とガンマ線識別を行う。図2は製作途中の実験装置である。鉛ブロックによる遮蔽はシンチレーション検出器ごとではなく、3台をまとめて取り囲むようにした。プラスティックシンチレーターの長方形の平板は黒い光遮蔽シートで被い、側面よりライトガイドで光を集め、光電子増倍管で検出する。

本検出器は6号館4階屋外テラスに雨風を防ぐためにアルミ製の観測箱に収納して設置する。さらに雷雲および雷放電との同期を調べるために、同館屋上に設置した他の放射線検出器群や気象モニターと同時観測を行う。



図2 製作中の雷ガンマ線検出器。上面以外を遮蔽するように3台のシンチレーション検出器を取り囲んでいる。黒い光遮蔽シートの中にはプラスティックシンチレーターの平板が入っている。

3. チベットにおける雷雲放射線観測

我々は1989年より中華人民共和国西藏自治区羊八井(標高4,300m)に国際宇宙線観測所を建設し、日中共同研究として超高エネルギー宇宙物理分野の研究を行っている⁽⁶⁾。観測所では、約3,700平米の敷地に789台のシンチレーション検出器を升目上に並べた宇宙線空気シャワー観測装置(図3)を中心に様々な放射線検出器による観測実験を行ってきた。



図3 羊八井国際宇宙線観測所全景。白い点状に見えるものがシンチレーション検出器からなる宇宙線空気シャワー観測装置。中心部に制御室や中性子観測装置などの建物がある。

この観測所は標高が高いため雷雲と地面との距離が近いこと、さらに他種類の検出器との同時観測が容易に実現可能であることから、将来的に大規模な雷ガンマ線観測を行うには最適な場所と考えている。我々は2010年より気象モニター、落雷トラッカー、大気電場計をこの観測所に設置して、予備的データの収集を行ってきた。ここでは我々のデータとこの観測所に設置してある理研や名大STE研の中性子観測装置の観測データから導き出された雷放射線に関する興味深い結果を報告する⁽⁷⁾。

我々の検出器は、雷雲や雷放電が起こったときの大気の電場強度を測定する装置(図4右)と理論的に近傍数百キロメートル以内で起こった落雷を検出する落雷トラ

ッカ（図4左）を観測所の制御室屋上に設置し、24時間体制でデータ収集を行ってきた。また、赤外線センサーによる雲モニターも敷地内に設置し、これと合わせて外気温、湿度、照度などの気象のモニターも行ってきた。

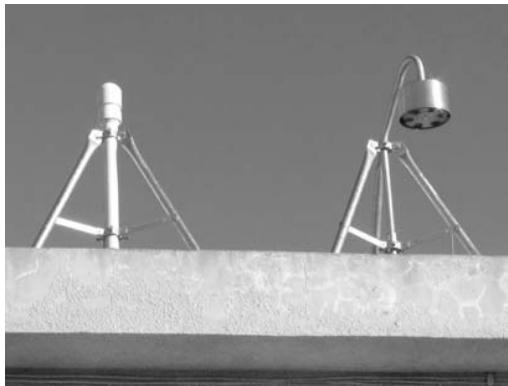


図4 三脚に設置された観測装置。右が Boltek 社のフィールドミル型大気電場計、左が同社落雷トラッカー。設置場所は図3中央の制御室屋上。

この地域は例年5月から8月が雨期にあたり、落雷を伴う激しい雷雨が多く到来する。2010年7月22日に観測所上空を通過する激しい雷雨の時には大気の電場強度は激しく変動し、これと同期して観測所内にある理研・名大 STE 研の中性子観測装置のデータにも大きな変動が記録された。図5はこのときの激しい雷雨が通過した前後の大気電場強度と中性子観測装置の計測数の時間変動である。雷雲内は強い電荷分離が進んでいるため、地上との間に大きな電位差が生じることが図5(f)から確認できる。この雷雲は下部に負電荷が生じていることが分かる。電場計の短時間のスパイクは雷放電を示しているが、中性子観測装置の計測数にその時間分解能はない。しかしながら、全体を通して電場強度と強い相関があることが分かる。図5の(a)から(e)はエネルギー領域ごとに分けても、高エネルギー領域まで同様の相関があることを示している。

これらの中性子観測装置は太陽や銀河の宇宙線強度を観測するために設定されている。そのため、宇宙からの10MeV/hのエネルギー以上の一次宇宙線が大気中で核反応を起こして生成する二次宇宙線の核子成分が検出できる。しかしながら、雷雲や雷放電から陽子や中性子のような核子成分が生成されているとは考えにくいので（もし本当なら大発見であるが）、高エネルギーガンマ線にも感度を持っているのではないかと予想された。それを調べるために、詳細な検出器シミュレーションを行い、図

6のような結果を得た。10MeVから1GeVまでのガンマ線に対して、核子成分の1/20から1/125とかなり小さいが感度があることを突き止めた。

この結果、我々は雷雲からの高エネルギーガンマ線を捉えていたという結論に至った。ここで大変興味深い事実は、雷放電というミリ秒単位の現象でガンマ線が放射されているのではなく、40~50分という非常に長時間にわたり40~160MeVを越える高エネルギー粒子放射が起こっている可能性を示していることである。最近では、イタリアのX線・ガンマ線天文衛星であるAGILEがTGFの観測からガンマ線のエネルギースペクトルが100MeVまでは延びていることを報告しており⁽⁸⁾、我々の観測結果と矛盾しない。しかしながら、雷雲の中での粒子加速およびガンマ線放射のメカニズムをこの1事象から導くことはできない。もっと多くの事象を統計的に解析できるように観測を継続しなければならない。

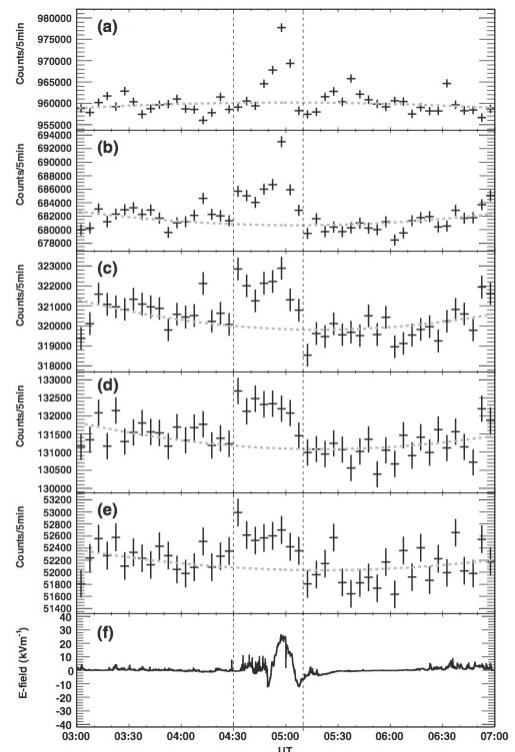


図5 2010年7月22日の落雷現象に伴う大気電場と観測された中性子観測装置の計測数の時間推移（文献7より）。(a)～(e)はエネルギー領域を>40 MeV, >80 MeV, >120 MeV および >160 MeV で分けた中性子の計測数。(f)は電場強度を示す。破線は推測されたバックグラウンドの数を表し、データ点の縦軸は1σの誤差を示す。時間は世界標準時である。

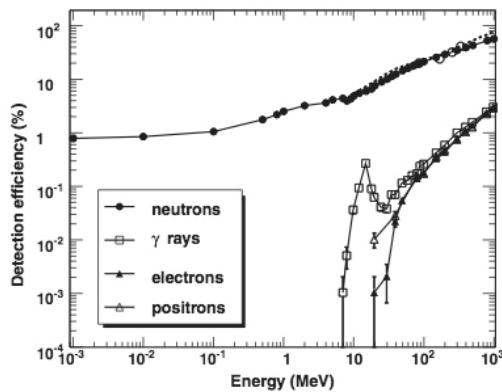


図 6 中性子観測装置の粒子ごとの検出効率（文献 7 より）。

4. 今後の展開

今後、安定的に観測を行い、多くのデータを蓄積し、事例を増やす計画である。平地での観測となるために雷放射線が地表に到達する確率も少なくなるというデメリットもあるが、長期観測が期待できる大学内に観測拠点を持つことは重要である。将来的にはチベットなどの高地での大規模な観測実験を計画することも視野に入るべきであろう。

また、Gurevich らが雷放電のトリガーが高エネルギー宇宙線による空気シャワーによる可能性を主張している⁽⁹⁾。全ての雷放電をこの仮説で説明することは困難だが、発生頻度的に TGF を引き起こす頻度程度なら有り得るかも知れない。我々は、本学 6 号館に小規模ではあるが空気シャワー観測装置も稼働させており、今度データが蓄積されれば、雷ガンマ線観測データとの照らし合せた解析も行う予定である。

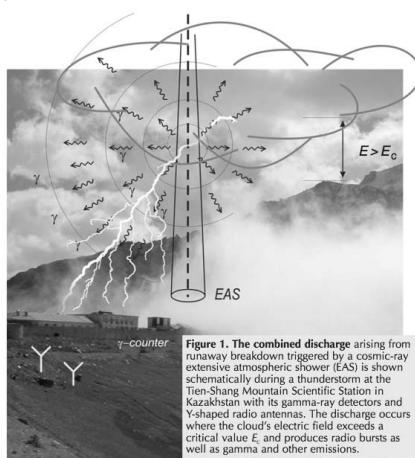


図 7 雷放電のトリガーが宇宙線空気シャワーという仮説（文献 9 より）。

謝辞

チベットにおける雷放射線観測に関しては、日中の共同研究者、特に東大宇宙線研究所の川田和正氏や宇都宮大の堀田直己氏の協力がなければ実現できませんでした。また、本学の検出器開発に関しては、理研（現在は原研）の土屋晴文氏の助言を頂きました。ここに深く感謝致します。

参考文献

- (1) M. Briggs et al., “Electron-positron beams from terrestrial lightning observed with Fermi GBM”, Geophys. Res. Lett., VOL. 38, L02808, 2011.
- (2) G. Fishman et al., “Discovery of intense gamma-ray flashes of atmospheric origin”, Science, vol. 264, p. 1313, 1994.
- (3) C. Moore, K. Eack, G. Aulich, and W. Rison, “Energetic radiation associated with lightning stepped-leaders”, Geophys. Res. Lett., vol. 28, no. 11, pp. 2141–2144, 2001.
- (4) T. Torii, M. Takeishi, and T. Hosono, “Observation of gamma-ray dose increase associated with winter thunderstorm and lightning activity”, J. Geophys. Res., vol. 107, no. 17, p. 4324, 2002.
- (5) H. Tsuchiya, T. Enoto, T. Torii, K. Nakazawa, T. Yuasa, S. Torii, T. Fukuyama, T. Yamaguchi, H. Kato, M. Okano, M. Takita, and K. Makishima, “Observation of an Energetic Radiation Burst from Mountain-Top Thunderclouds”, Phys. Rev. Lett., vol. 102, no. 25, Jun. 2009.
- (6) Tibet AS γ 実験プロジェクト公式ホームページ,
URL: <http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/em/index-j.html>
- (7) H. Tsuchiya, K. Hibino, K. Kawata, N. Hotta, N. Tateyama, M. Ohnishi, M. Takita, D. Chen, J. Huang, M. Miyasaka, I. Kondo, E. Takahashi, S. Shimoda, Y. Yamada, H. Lu, J. L. Zhang, X. X. Yu, Y. H. Tan, S. M. Nie, K. Munakata, T. Enoto and K. Makishima, “Observation of thundercloud-related gamma rays and neutrons in Tibet”, Phys. Rev. D, 2012.
- (8) M. Tavani et al., AGILE Team, “Terrestrial Gamma-Ray Flashes as Powerful Particle Accelerators”, Phys. Rev. Lett., vol. 106, no. 1, Jan. 2011.
- (9) A. Gurevich, “Runaway breakdown and the mysteries of lightning”, Physics Today, 2005.



研究を振り返って

青木 勇*

Looking Back on My Research and Development

Isamu AOKI*

1. はじめり

大学院の修士課程を終えた時点で、前任校の助手に採用されました。研究室主宰教授から当面の研究課題として提案された、「せん断加工用工具の摩耗」をその後数年間継続して研究することとなりました。摩耗に関わる一般的な研究は枚挙にいとまがありませんが、せん断加工用工具に限れば類似の研究は少なく、また、加工現場では非常に重要視されることを知り、自分なりに熱心に取り組み、成果^①をまとめ、これが博士論文となりました。地味な課題ではありましたが、行きつ戻りつしながら、不明な現象を一つずつ細かく調べた経験はその後の研究の礎になったと考えています。

2. 本学で

前任校での勤務が丁度十年目で幸いにも本学に採用していただき、現在までお世話になっています。この間、主にプレス加工の仕事を続けておりますが、研究環境の関係で、微細せん断加工に関する課題を中心と/or>きました。以前のテーマ同様、現場から多くの問題提起のある分野ですが、これに関わる研究、研究者は少なく、そのため、あまり学術的には扱われて来なかった経緯があります。

2.1 せん断加工機構

せん断加工とは図1のようにクリアランスと呼ばれる僅かな隙間を設けた一対の工具、パンチとダイスで材料にせん断変形を与え、これを分離する極めて単純な加工です。しかし、変形が刃先近傍材料に集中することや、塑性変形後にき裂を伴うなどの理由で現象はかなり複雑です。

この加工では、加工中に生ずる材料変形、ならびに、

ひずみ分布、応力分布等が明らかになれば現象の解明は概ね完結となるのですが、先に述べたようにクリアランス近傍材料の狭い領域にひずみが集中するため、現象の観察、解析は困難とされてきました。近年、数値解析技術の進歩もあり、またこの分野の研究者も増えたこともあって、実態は少しずつ明らかになってきています。

私はせん断中の材料変形による寸法精度の変化や工具の変形に興味があり、主に実験的に検討してきました。当該分野においても解析が欠かせず、幸いにも実現した共同研究（当時の共同研究者・笛田昌弘博士）で明らかになってきた部分が少なくありません。次のような事例があります。微細せん断加工ではパンチ、ダイスの整合が問題となります。例えば被加工材料が0.1mm程度の薄板材の場合、クリアランスは数ミクロン程度に抑える必要があり、しかもこの値をせん断輪郭上均一に設定しなければなりません。金型部品の加工精度、組立精度を考えると至難の技といえるのですが、加工自体は不思議にも実現できるのです。これに係わり、現場に一つの“伝説”があります。それは、クリアランスが不均等な場合、クリアランスが小さい側から大きい側へパンチが「自動調心」するというものです。実験的に調べると、この現象は確かに認められるものの、その機構はわかりにくく、

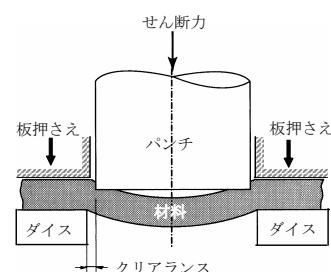


図1 せん断加工

*教授 機械工学科

Professor, Dept. of Mechanical Engineering

単純にパンチ側面に働く力の大きさだけでは説明がつかないので実験・解析の結果から、この現象はパンチ刃先に働く垂直・水平の二分力の関与の仕方が原因であることが明らかになってきました。このように伝説の正体が見えてきたのです。なお、これらの研究に係わり、共同研究者（当時）であった高橋俊典博士が以前に開発したパンチのたわみ計測法が優れた手法でした。

このほか、せん断加工中に生じる工具面上のすべり挙動や、切刃近傍材料の静水圧の大きさと材料拘束条件の影響などが明らかになり、僅かではありますが、プレス加工の実務に供せる結果が得られたと考えています。

2.2 微細せん断加工

微細せん断加工の研究の一つに微細高速穴あけ技術の開発があります。0.1～0.3mm程度の金属箔材、樹脂シート、セラミックグリーンシート等に板厚と同寸法程度の穴を高速であける技術であり、具体的な対象は半導体分野になります。この技術開発の要点は、まずは高品位の穴あけ技術の確立、ついで大量の加工を行っても工具がそれに耐え得ることの検証、さらに1分間1500回以上という高速化の実現にありました。ドイツにはすでにソレノイド駆動の高速穴あけ装置があり、優位性の観点からこの速度を越える必要があったのです。本研究では駆動源として圧電素子とその拡大機構を用いること、および駆動方式の工夫による高速化と静穏化、高速駆動であっても残留振動が生じない技術の確立に加え、材料ステージの高速移動技術、金型技術、穴あけ技術を洗練することで、問題をクリアできました²⁾。さらに、本機構においては、駆動電流のモニタリングやパンチ折れ等の異常を検知することができるようになりました。この開発では多分野の技術開発が必要であり、圧電素子、駆動回路、金型技術の専門家らの協力があつて実現し、現在、実用機が稼働しています。

せん断加工ではき裂の発生がパンチ、ダイス両刃角よりはずれた位置で生じるため、かえりと呼ばれる部分が不可避的に生じてきます。これは破断した面の延長上に形成される微小尖りで板厚の1%程度と僅かな欠陥ですが、製品が機器の中で動作するとき、この部分が脱落すると大きな障害を引き起こします。このほか、作業者の傷害の原因となることもあります。以前から問題視されてきました。対策としては、かえりを除去する、またはかえりのない加工を行う二つの方法があります。これは使い分けが必要で、私は両面から問題解決を図ろうとしました。薄板微細部品のかえり取りに関しては、振動輸送技術を用い、製品と研磨剤または研磨布紙の間に相対運動を起こさせかえりを除去する方法の提案や、磁気研磨を用い

て組立部品のかえりを除去する技術の開発を行い、一部は実用に供されました。

かえりなし断面については以前から幾つかの優れた工法の提案がありました。箔材を対象とする場合、クリアランスとパンチ食込み量の設定にミクロン台の高精度が要求されます。ここでは上記の圧電素子駆動技術を用いて数十μm厚の金属箔材のかえりなし断面に成功しました³⁾。

2.3 微細医用器具の成形

現在、新たな産業の創出がうたわれる中で、医療分野が注目を浴びています。プレス加工は金型成形ですので良好に成形する手法さえ確立できれば、同じ形状、同じ精度の製品を安定的に、しかも廉価に提供することが可能となります。このような事情で十数年前より医用器具、特に内視鏡用鉗子の成形技術について研究を進めてきました。コストの点もありますが、これからは特に微細な器具が必要になると見込みから、多様な手法を試みました。最初は、完成品断面がほぼ円に近いことから素材として丸線材を用い、三工程で鉗子主要部品を完成される技術を開発しました。ここでは、材料を強く拘束した状態では材料にき裂を生じにくいという静水圧の効果を目指して適用したところにポイントありと言えます。

その後、さらなる微細化を目指し、0.3mmの薄板を素材とする成形技術の開発に向けて研究を進める中、高度な金型技術を有するプレス企業の協力をいただき、15工程の順送方式で超微細鉗子主要部品を成形できました⁴⁾。鉗子自体は0.6mmのワーキングチャンネルで使用可能な寸法です。残念ながら、現在のところ実用には供されていませんが、本成形は難加工事例を数多く内包する総合技術としての侧面を有していますので、何らかの加工に適用できないかと可能性を模索しています。

2.4 すこし趣を変えて

思い出のある技術開発例として電磁力を用いた急加速・急停止機構があります。コンデンサに充電した電荷をコイルに放電させると、これに対向する導体板とコイル間に衝撃電磁力が発生し、コイルを固定しておくと導体板は急加速されます。条件によりますが、数mmの加速距離で数十m/sの速度を得ることができます。この原理は物理学の一般的知識として古くから知られ、電磁成形、電磁プレスにも適用されています。後者については少ないながらも実用機が製作されています。

この研究に造詣の深いH教授と雑談の折、「急加速ができるなら急停止もできるのではないか」というような話になり、早速、実験を始めました。何回かの試行実験の後、電磁力で急加速された導体板が反対側の停止用

コイル2~3mm手前で停止する結果を得て、確実に停止させるべく計算を行い、コンピュータ援用の停止用回路を試作し、どのような速度で進んでくる導体板であっても、ある範囲内であればこれを非接触で急停止させることに成功しました⁵⁾。ここでは、停止コイル直前で導体板の速度を計測し、この結果に対応する適切な時期に放電を開始するのです。

さらに本機構を用いた高速往復動機構を製作し、樹脂の高速切削できわめて美麗な面を得るなど良好な結果を得ました。実用には至りませんでしたが、ここで得た経験や技術の蓄積は、その後行った電磁力利用の打抜きや成形の研究に有形無形の支援となっています。

3. おわりに

さしたる成果を得ていない恥ずかしさを顧みず、大層な標題で書き始めましたが、単なる事例紹介に終わってしまいました。また、紙面上では問題なく進んだように述べた研究も、事実は逆に順調に進まないことがほとんどで、その度になぜかと考え込むばかりでした。大学ではそのような考える時間が十分あるのはありがたいことです。大学の環境の良さはほかにもいろいろありますが、なんといっても若い学生、院生とともに問題に取り組めるところや、彼らとの研究成果を自由に発表できるところにあると思います。そのような環境で長い間、研究(といってよいか逡巡しますが)できたことに心から感謝している次第です。

最後になりますが、お世話になった教職員の皆様に御礼を申し上げます。なかんずく、共同研究者(当時)として成果を共有する高橋俊典博士(現・埼玉工業大学)、ならびに最近の十年間、共同研究者(当時)として精力的に研究を推進され、成果を共有する笹田昌弘博士(現・本学准教授)に謝意を表します。また、本学で助手として奉職中、多方面にわたりご指導頂いた日比野文雄博士(現・本学名誉教授)に御礼を申し上げます。

参考文献

- (1) 青木勇, “せん断工具の摩耗と影響因子”, 塑性と加工, **27**-300 (1986-1), pp.140-150.
- (2) I.Aoki, M.Sasada, T.Higuchi and T.Yano, “Development of Micropiercing System with Punch-Damage Monitoring System”, J. Materials Processing Technology, **22**-125(2002-9), pp.497-502.
- (3) I.Aoki , and M. Sasada, “Burr-Free Microblanking Using Piezoelectric Actuator”, Trans. ASME., J. Manufacturing Science and Engineering, **126**-3 (2004-11), pp.653-658.
- (4) 青木勇, 笹田昌弘, 小松誠, 三池神也, “内視鏡用微細鉗子の金型成形”, 精密工学会誌, **71**-12 (2005-12), pp.1618-1621.
- (5) 青木勇, 樋口俊郎, “高速移動体の電磁力を利用した非接触急停止機構の開発”, 精密工学会誌, **55**-5 (1989-5), pp.939-944.

2011 年度（平成 23 年度）工学研究所年次報告

1. 人事

1) 運営委員

所長	山村 博	教 授
機械工学科	工藤 邦男	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	佐藤 憲一	教 授
情報システム創成学科	中島 健一	教 授
建築学科	安田 洋介	准教授
物理学教室	大成 逸夫	教 授
電子情報フロンティア学科	新中 新二	教 授（所長指名）

2) 研究所客員教授

沼田 俊一 (2011.4～2012.3)	許 瑞邦 (2011.10～2012.9)
西 和夫 (2011.4～2012.3)	武田 重喜 (2011.10～2012.9)
大熊 武司 (2011.4～2012.3)	李 杰 (2011.10～2012.9)
佐藤 祐一 (2011.4～2012.3)	堀野 定雄 (2011.4～2012.3)
小嶋 英一 (2011.4～2012.3)	大澤 康彦 (2011.10～2012.9)
杉原 淳 (2011.4～2012.3)	秦野 正治 (2011.10～2012.9)
南部 洋子 (2011.4～2012.3)	阿部 英樹 (2011.10～2012.9)

3) 研究所客員研究員

大和 裕幸 (2008.10～2013.3)	徐 �剛 (2009.10～2012.9)
久保 登 (2008.10～2013.3)	蘆 朝輝 (2009.10～2013.9)
龍 重法 (2008.10～2013.3)	周 建東 (2009.10～2013.9)
石倉 理有 (2008.10～2013.3)	金 容範 (2010.4～2012.3)
石川 博敏 (2008.10～2013.3)	川上 博司 (2011.4～2013.3)
Tomasz kujej (2009.4～2012.3)	司 宏俊 (2011.10～2013.9)

4) 研究所特別研究員

北島 創 (2008.10～2013.3)	姜 迎春 (2010.4～2012.3)
小島 真路 (2009.10～2012.9)	秋山 友昭 (2010.4～2012.3)
菅原 淳一 (2009.10～2012.9)	黃 亮 (2010.10～2012.9)

5) 研究所職員

教務技術職員 萩原 健司	技術員 八高 優勝
--------------	-----------

2. 予 算

平成23年度の予算・決算額を表-1に示す。

表-1 (単位:千円)

業務項目	予算額	決算額
研究所運営費	2,537	2,115
大型共同設備管理運営	4,000	4,311
工学研究所共同研究*	14,000	13,970
(特) テクノフェスタ	3,000	2,556
(特) 若者と語る	223	223
(特) テクノサークル	1,500	1455
合 計	25,260	24,630

*工学研究所共同研究内訳

共同研究代表者	予算額(千円)
中山 教授	3,500
中島 教授	3,000
趙 教授	3,200
内田 教授	1,300
日比野 教授	3,000
計	14,000

3. 共同研究／プロジェクト研究

平成23年度の工学研究所共同研究／プロジェクト研究を表-2に示す

表-2

共同研究

鉄筋コンクリート構造物の残存寿命予測法に関する研究	趙 衍剛／建築
磁性体材料と超伝導体材料を使った量子効果デバイスの試作	中山 明芳／電子情報フロンティア
持続可能社会実現のためのリーン生産・物流システムに関する研究	中島 健一／情報システム創成
戦前期における日韓の住宅近代化に関する比較研究	内田 青藏／建築
雷または雷雲起源放射線の研究	日比野 欣也／物理

プロジェクト研究

A	高周波回路の解析・設計理論の整備と対応ソフト開発 －固有モードに基づく厳密な等価回路を適用して－	穴田 哲夫／電子情報フロンティア
C	大気環境化学研究所	井川 学／物質生命化学
A	高性能高分子膜材料の開発と評価	西久保 忠臣／物質生命化学
C	高安心・超安全交通研究所（KU-WIPF）	堀野 定雄／情報システム創成
A	2020年の電子デバイスを想定した電子回路の研究	島 健／電子情報フロンティア
C	防災まちづくり支援研究センター	荏本 孝久／建築
C	地元住民と協力して実施する町づくり研究所の創設と運営	山家 京子／建築
A	構造物の耐震安全性及び耐久性の評価方法に関する研究	趙 衍剛／建築
A	振動エネルギー流れに基づくシステムの評価と設計	山崎 徹／機械
A	高性能熱電発電材料の開発	山村 博／物質生命化学
A	新たな低炭素エネルギー社会に対応した新型電池の開発	松本 太／物質生命化学

4.講演会

「暮らしの中のサイエンス」連続講演会

テーマ：『カガクで健康美』

—健康美つくりを支える科学・化学—

場 所：KU ポートスクエア

オガナイザー：神奈川大学工学部 教授 川口 春馬 先生

第1回 2011年11月5日（土）13:00～16:20

1 健康寿命をのばす秘訣—より長く生き生きと

浜松医科大学教授 瀬簾 光利 先生

2 動いて健康美—運動が細胞を元気づける

東京大学名誉教授 跡見 順子 先生

第2回 2011年11月12日（土）13:00～16:20

1 食べて健康美—食品とサプリメントをカガクする

お茶の水女子大学大学院准教授 森光 康次郎 先生

2 肌から健康美—清潔にすること・整えることを通して健康美

株エフシージー総合研究所 菅沼 薫 先生

「科学と工学の最前線」連続講演会

テーマ：最新光源の話題と暮らしへの展開

場 所：神奈川大学横浜キャンパス

日 時：2012年1月21日（土）13:00～16:10

1 高効率小型光源開発の現状

神奈川大学工学部教授 渡辺 良男 先生

2 青色防犯灯を科学する：有彩色光照明の課題

奈良女子大学教授 井上 容子 先生

3 新しい光源を用いた照明デザイン

伊藤達男照明デザイン研究所代表 伊藤 達男 先生

「若者と語る」シリーズ講演会

テーマ：夢を持ち続けよう

場 所：神奈川大学セレストホール

日 時：2011年9月28日（土）16:20～18:00

パデュー大学特別教授 根岸 英一 先生（2010年ノーベル化学賞受賞）

5. 神大テクノフェスタ2011 —暮らしと環境の未来—

日時：2011年10月14日（金）12:00～17:30

場所：神奈川大学横浜キャンパス2号館演習室・1号館804室・3号館301室

実施内容

1) 講演会（1号館804室）

工学研究所共同研究報告4件、プロジェクト研究報告3件

特別講演

『安心安全交通システム設計と普及：人間工学応用のGIAPコラボレーション実践』

堀野 定雄 先生（神奈川大学工学研究所客員教授）

2) 研究ポスター発表（2号館演習室）

大学院生によるポスター発表・作品展示 57件

3) 実演展示 4件（模型製作コンテスト、バーチャル地球史博物館映像、宇宙エレベータ、免震体験車）

4) 企業展示 12社、1回窓会（2号館演習室）

5) 研究相談窓口（2号館演習室）

6) 懇親会（10号館3階学生ラウンジ 18:00～19:30）

6. 大型装置使用実績

平成 23 年度の大型装置使用実績を表－3 に示す。

表－3 (時間)

研究室名	TEM	SEM	XRD	TF-XRD	XPS	ICP	CCD
機械工学科	0	120	240	0	0	0	0
工藤研究室			240				
竹村研究室		120					
電気電子情報工学科	0	405	105.5	0	0	0	0
中山研究室			8				
平手研究室		341	90.5				
山口研究室		56	15				
物質生命化学科	524.5	223	3144	316.5	439.5	262	2461
井川研究室		33				175	
池原研究室	17		83.5		1.5		
岡本研究室			7.5				
小出研究室		15					1670
佐藤(憲)研究室							24
内藤研究室	214.5	32			92.5		
西久保研究室		8	5		2.5		24
引地研究室						14	743
松本研究室	293	114	1018	298.5	343	70	
山村研究室		21	2030	18			3
化学教室	91.5	71	32	0	0	0	0
亀山研究室		26					
川口研究室	46.5	19					
田島プロジェクト	45	26	32				
理学部	0	0	0	0	196	0	0
川本研究室					38		
野宮研究室					11		
山口研究室					147		
合計時間	616	819	3521.5	316.5	635.5	262	2461

工学研究所だより

2011年5月12日 発行 No.2011-1
 神奈川大学工学研究所
 〒221-8686 横浜市神奈川区六角橋3-27-1
 Tel 045-481-5661 (内線 3631)
 hagi@kanagawa-u.ac.jp

神大テクノフェスタ 2011について

実行委員長 岩田 衛

神奈川大学工学部・工学研究科・工学研究所では、日頃の研究活動とその成果を広く社会に公表し、学外の教育・研究機関、企業との連携および地域との交流を積極的に推進していくために『神大テクノフェスタ』を企画開催しています。今年で4回目を迎えることになりますが、過去3回の開催結果については高い評価をいただいております。これはひとえに関係各位のご協力とご支援のお陰であることをお礼申し上げます。実行委員会では企画委員会より今年度の企画案(3月の教授会承認済み)を引き継ぎましたので、10月の開催に向けて工学部教職員各位のなお一層のご支援とご協力をよろしくお願い申し上げます。

開催委員長 庄司正弘 (工学部長)

副委員長 遠藤信行 (工学研究科委員長)

副委員長 山村 博 (工学研究所長)

実行委員長 岩田 衛 (建築学科教授)

神大テクノフェスタ 2011 企画案について

責任体制 :

工学部・工学研究科・工学研究所が連携して企画・実施

開催趣旨 :

技術の共有と物作りの喜びを体験する場とする

- 1) 研究成果・ポテンシャルを社会にアピールするとともに、企業との新たな連携を図る。
- 2) 専攻間・学科間での学生同士、及び教員と学生の交流の場とする。
- 3) 参加者が体験できるプログラムを用意する。

開催日時と開催場所 :

- 1) 開催日時: 10月14日 (金)
- 2) ポスター会場・企業展示会場: 2号館
講演会場: 1号館8階804会議室

コンセプト: 『暮らしと環境の未来』

プログラム例 :

- 1) 招待講演・各種講演会
- 2) ポスター発表・作品展示
- 3) 研究室紹介ブース
- 4) 学生・一般参加者を対象とした体験コーナー
- 5) 企業展示 (昨年度実績: 19社 1法人)
- 6) 研究相談窓口

2011年度運営委員の紹介と役割分担

運営委員会は各学科および教室系より選出された6人の運営委員と所長指名の運営委員(新中教授)と所長の8名で構成され、工学研究所の運営のために以下の分担で仕事を進めています。

運営委員会の構成

山村 博 (所長)

工藤 邦男 (機械:自己点検評価委員会幹事、Web責任者)

山口 栄雄 (電気:大型装置管理委員会幹事、

テクノサークル推進委員)

佐藤 憲一 (物生:工研だより編集責任者、

「若者と語る」実行副委員長)

中島 健一 (情シ:講演会企画委員会幹事)

安田 洋介 (建築:研究支援委員会幹事)

大成 逸夫 (教室系:所報編集委員長)

新中 新二 (所長指名:幹事、講演会企画委員長、

「若者と語る」実行委員長)

事務局:萩原健司、八高優勝、沼田智恵

研究支援委員会

委員長:青木 勇 副委員長:杉本 剛

委員:櫻井 忠光 穴田 哲夫

渡邊 靖志 安田 洋介 (幹事)

大型装置管理委員会

委員長:内藤 周式

委員:井川 学 岡本 専太郎 平手 孝士

横澤 勉 山口 栄雄 (幹事)

山村 博 (オブザーバー)

関連各種委員会

神大テクノフェスタ 2011 実行委員会

委員長:岩田 衛

委員:工藤 邦男 山口 栄雄 松本 太

中島 健一 津田 良樹 宇佐見 義之

工学部・工学研究科・工学研究所紹介冊子編集委員会

委員長:成田 清正 副委員長:原村 嘉彦

委員:島 健 池原 飛之 濱古沢 照治

内田 青蔵

協 力:窪谷 浩人 (広報委員長)

宇佐見 義之 (作業責任者)

講演会企画委員会

委員長:新中 新二

委員:井川 学 川口 春馬 渡邊良男

庄司 正弘 中島健一 (幹事)

工学研究所共同研究、プロジェクト研究

2010年度（終了）共同研究

- ・09-A1 人間工学視点に基づく安全円滑な平面交差交通システムの構築 一カーブミラーの視認性向上による交差点視環境改善－（堀野：情シ）
- ・09-A2 超電導粒子干渉計のオンチップ・アレイ化による高感度磁束計の製作（中山：電情）
- ・10-B1 戦前期の韓国における住宅の近代化に与えた日本の影響について（内田青：建築）

2011年度 共同研究

- ・10-A1 鉄筋コンクリート構造物の残存寿命予測法に関する研究（趙：建築 320万円）
- ・11-A1 磁性体材料と超電導材料を使った量子効果デバイスの試作（中山：電情 350万円）
- ・11-A2 持続可能社会実現のためのリーン生産・物流システムに関する研究（中島：情シ 300万円）
- ・11-B1 戦前期における日韓の住宅近代化に関する比較研究（内田青：建築 130万円）
- ・11-B2 雷または雷雲起源放射線の研究（日比野：物理 300万円）

2010年度（終了）プロジェクト研究

- ・09-A1 デジタル生産システムにおけるCAEと品質工学の適用（北岡：情シ）

工学研究所からのお知らせとお願い

1. 運営委員会報告

前号の工学研究所だより発行からこれまでに開催した運営委員会の主な議題をお知らせします。

10年度 第11回（2月19日開催）

- ・「若者と語る」実行委員会報告
- ・来年度予算ヒアリングについて
- ・工研だより10-04号発行
- ・11年度工学部・工学研究科・工学研究所紹介冊子について
- 10年度 第12回（3月30日開催）
- ・「若者と語る」実行委員会報告
- ・神奈川テクノフェスタ2011企画委員会報告
- ・11年度工学部・工学研究科・工学研究所紹介冊子編集委員会報告

第1回（4月20日開催）

- ・運営委員の紹介
- ・所長指名の運営委員の了承
- ・2011年度予算について
- ・神奈川テクノフェスタ2011について
- ・“若者と語る”講演会実行委員会報告
- ・プロジェクト研究・客員研究員・特別研究員の募集
- ・工研だより11-01号について
- ・2011年度自己点検評価実施委員について
- ・工学研究所の現状と課題

2. 2011年度工学研究所予算について

本年度の工学研究所の経常予算は、申請額どおりの20,537,000円となりました。内訳は以下の通りです。

共同研究	14,000,000円
大型共同設備運用	4,000,000円
研究所運営	2,537,000円

また、特別予算として神奈川テクノフェスタ2011として3,000,000円、若者と語るシリーズ講演会223,000円、テクノサークル支援事業1,500,000円が認められました。したがって、本年度の工学研究所総予算は25,260,000円となります。

3. 工学研究所所報原稿の募集

所報34号の総合論文、トピックス、随想等の原稿を募集いたします。詳しくは後日所員メーリングリストにてお知らせいたします。 原稿締切：9月末 発行予定：11月末

4. 工学研究所プロジェクト研究の募集

平成23年度前期 工学研究所プロジェクト研究のテーマを募集しております。詳細につきましては4/26付メーリングリストにてお知らせしたとおりです。

申請書締切：5/31（火） ヒアリング：6月開催予定

5. テクノサークルの募集

特別予算による新規事業として「テクノサークル」のテーマを募集いたします。詳細につきましては4/26付メーリングリストにてお知らせしたとおりです。

申請書締切：5/31（火）

6. 総合学術研究推進委員会／研究委員会報告

前号の工学研究所だよりからこれまでの委員会での主な議題は以下の通りです。

10年度 第8回（2月18日開催）議題

- ・「神奈川大学・サンバウロ大学学術」協力に関する覚書
- ・「神奈川大学とサンバウロ大学哲学・語学・人間科学部との教職員・研究者・学生の交換に係る国際学術合意書」の締結について
- ・プロジェクト研究所の設置期間延長及び所長変更について
- ・研究所客員教授の任用・任用更新について
- ・タスマニア大学と神奈川大学との学術交流協定書、学生交換に関する覚書の締結について

神奈川大学における競争的資金に関わる使用ルールについて
神奈川大学共同研究奨励規程、施行細則の改正について

11年度 第1回（4月20日開催）議題

- ・昨年度の活動総括
- ・本年度の活動予定
- ・平成22年度学術研究振興資金の選考結果について
- ・平成22年度私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の選考結果について
- ・2011年度日本学術振興会特別研究員の募集について
- ・教員研究費（個人研究費）の取扱いについて
- ・平成22年度科学研究費補助金採択課題一覧
- ・経常費補助金の2009年度実績について
- ・「神奈川大学・デンマーク王立芸術科学アカデミー建築大学学術交流協定書」、「神奈川大学工学部及び工学研究科とデンマーク王立芸術アカデミー建築大学との学生交換に関する覚書」の締結について
- ・各種助成金の公募案内
- ・2010年度海外学会等出張旅費配分（案）について
- ・研究所客員教授の任用及び更新について

工学研究所だよりの内容等について、ご質問、ご意見等がございましたら工学研究所 事務局：萩原（内線3631、hagi@kanagawa-u.ac.jp）までお知らせください。

工学研究所だより

2011年10月7日 発行 No.2011-2
 神奈川大学工学研究所
 〒221-8686 横浜市神奈川区六角橋3-27-1
 Tel 045-481-5661 (内線 3631)
 hagi@kanagawa-u.ac.jp

ノーベル化学賞受賞者 根岸英一博士

『若者と語る』講演会の報告

本年で第4回目となる大学主催の『若者と語る』講演会が、2010年ノーベル化学賞受賞者で、米パデュー大学特別教授の根岸英一博士をお招きし、「夢を持ち続けよう」と題して、9月28日(水)セレストホールにて開催されました。セレスホールはほぼ満席となる来場者で埋め尽くされました。根岸先生は、高校生に向けて「まず好きなことを見つけること。次に好きなことイコール得意なことなら、とこどもそれに打ち込む。そして夢、ヴィジョンを持ち続けること!」と語りかけました。後半は14人の高校生が壇上に上がり、根岸先生とパネルディスカッションを行うという新しい試みもあり、講演会は大成功に終わりました。



写真3 憇談会



写真1 第1部 講演会

神大テクノフェスタ 2011について

来る10月14日(金)に『神大テクノフェスタ 2011』を以下の要領で開催することとなりました。実行委員会では、工学研究所所員をはじめとする多くの方のご支援のもと、充実したテクノフェスタとなるよう、実行委員が準備を進めています。皆様のご来場を心よりお待ちしております。

開催の趣旨:

神奈川大学工学部・工学研究科・工学研究所の研究実績・ポテンシャルを社会に広くアピールし、「神奈川大学」のブランドを高めるため、工学研究所・工学研究科・工学部が共同して、研究成果の発表・展示・実演を実施する。

テーマ:暮らしと環境の未来

開催日:2011年10月14日(金)

開催内容:

(1)講演会

以下の3部構成として、本館804会議室にて行います。

第1部 13:00-14:10

工学研究所プロジェクト研究報告会(座長:山村)

第2部 14:25-16:20

工学研究所共同研究報告会(座長:新中)

第3部 16:30-17:20

特別講演会(座長:中島)

堀野定雄(工学研究所客員教授)

「安心安全交通システム設計と普及:人間工学応用のGIAP
コラボレーション実践」

(2)大学院生/研究室によるポスター発表・作品展示

研究内容とその成果を広く発表することを目的に、ポスター発表形式で、大学院生が研究発表をします。建築学専攻の作品模型展示を伴う発表もあります。発表件数は57件を予定。



写真2 第2部 高校生パネルディスカッション

2号館演習室において、12:00～16:00。

(3) 実演展示

- ・機械工学科の「模型製作コンテスト」を実演展示します。
- 2号館演習場において、12:00～16:00。
- ・「宇宙エレベーター」を実演展示します。
- 2号館外において、13:00～16:00。
- ・免震体験車を設置、体験コーナーを設けます。
- 2号館外において、12:00～16:00。
- ・バーチャル地球史博物館映像
- 2号館エントランスにおいて 12:00～16:00。

(4) 研究相談窓口

産官学連携課が外部からの研究相談を受け付ける窓口を開設します。2号館演習室において、13:00～16:00を予定。

(5) 企業展示

企業における技術者の仕事を中心に企業紹介をしていただきます。2号館演習室において、12社の参加により、12:00～16:00での実施を予定。

開催組織 :

開催委員長	工学部長	庄司 正弘
開催副委員長	工学研究科委員長	遠藤 信行
	工学研究所所長	山村 博
実行委員長	岩田 衛	
実行委員	工藤 邦男、山口 栄雄、松本 太、中島 健一 津田 良樹、宇佐見義之	

以上

連続講演会の企画について

工学研究所・工学研究科共催の連続講演会のテーマ、日程が以下のとおり決定いたしましたのでお知らせいたします。
なお、「科学と工学の最前線」については、現在日程の調整中です。

○暮らしの中のサイエンス

『カガクで健康美』

---- 健康美つくりを支える科学・化学 -----

オーガナイザー 工学部 特任教授 川口春馬

日時：11/5、11/12 土曜日 13:00～16:20 全2回

工学研究所からのお知らせとお願い

1. 運営委員会報告

前号の工学研究所だより発行からこれまでに開催した運営委員会の主な議題をお知らせします。

2011年度 第2回（5月26日開催）

1. 各委員会の報告

- (1) テクノフェスタ実行委員会
- (2) 講演会企画委員会
- (3) 工学系紹介冊子編集委員会
2. 終了プロジェクト研究の報告書について
3. プロジェクト研究募集状況について
4. テクノサークル支援事業募集状況について
5. 専任職員増員の申請について

2011年度 第3回（6月29日開催）

1. 各委員会の報告

- (1) 研究支援委員会（審査会）
 - ・プロジェクト研究
 - ・客員教授

・客員研究員

・テクノサークル

- (2) 講演会企画委員会
2. 工学研究所客員教授・客員研究員人事(再任)について
3. 所員会議（7/13）の議題について
4. 所報 34号の執筆者について
5. 専任職員増員の申請について
6. 工学研究所派遣職員の更新について
7. 2010～2011年度の研究所の活動状況

2011年度 第4回（7月20日開催）

1. 各委員会の報告

(1) 講演会企画委員会

(2) 所員会議報告

2. 来年度の共同研究の募集について
3. 後期プロジェクト研究の募集について
4. テクノサークル説明会の現状報告について

2. 総合学術研究推進委員会／研究委員会報告

今年度これまでの2回にわたる委員会での議題は以下の通りです。

2011年度 第2回（5月18日開催）議題

- ・助成金公募状況
- ・2011年度科学研究費補助金採択課題一覧
- ・2011年度海外学会等出張旅費配分
- ・プロジェクト研究所客員研究員の任用
- ・プロジェクト研究所客員教授、客員研究員の任期更新
- ・科学研究費補助金の研究遂行に係る「人を対象とする研究」の倫理審査
- ・神奈川大学倫理委員会および倫理審査委員会の設置
- ・大学出版会（仮称）設立準備委員会

2011年度 第3回（6月15日開催）議題

- ・2011年度共同研究奨励助成金交付の対象となる共同研究の審査結果
- ・2011年度私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の選考結果
- ・2011年度プロジェクト研究所活動報告
- ・競争的資金に係る間接経費使用報告書（平成22年度）
- ・助成金公募状況
- ・大学発・政策提案制度の提案書類の提出
- ・科学研究費補助金の研究遂行に係る「人を対象とする研究」の倫理審査結果
- ・倫理審査委員会小委員会
- ・神奈川大学出版会に関する小委員会
- ・2012年度科学研究費補助金/学術研究助成基金助成金の応募
- ・2012年度文部科学省補助金に係る構想調書・計画調書等の公募
- ・2012年度日本私立学校振興・共済事業団学術研究振興資金の公募
- ・2012年度日本私立学校振興・共済事業団学術研究振興資金（若手研究者）の公募
- ・2012年度国際交流（学術研究）事業の公募

工学研究所だよりの内容等について、ご質問、ご意見等がございましたら工学研究所 事務局：萩原（内線3631、hagi@kanagawa-u.ac.jp）までお知らせください。

工学研究所だより

工学研究所所長退任の挨拶

工学研究所長 山村 博

2010年4月に許前所長のあとを、志も含めて引き継ぎましたが、あつという間の2年間でした。この間、私の体の不調にもかかわらず工学研究所を支えてくださった運営委員会、研究支援委員会、大型装置管理委員会、冊子編集委員会などの委員の先生方にこの場をお借りしまして、深くお礼を申し上げたいと思います。以下、反省も含め、簡単に振り返ってみたいと思います。

恒例になりました“神大テクノフェスタ”も、2010年は佐藤憲一先生、2011年には岩田衛先生の実行委員長の下で、無事の開催することができました。いろいろ課題はありますが、毎年原点に立ち返って開催の意義を見直しながら発展してほしいと願っております。

若者と語るシリーズは、高校生も含む若者に科学の夢をというキャッチフレーズのもと、ここ数年ノーベル賞クラスの講師を招いて講演会を開催してきました。2011年はノーベル化学賞を受賞された根岸先生の講演会を神奈川大学主催で開催することができました。開催に当たり、東日本大震災の影響もあり、一時は開催が危ぶまれることもありましたが、新中実行委員長の下で、学長をはじめ、学長室、広報部などの支援によりようやく開催にこぎつけることができました。また、新たな試みとして県下の高校を壇上に上げて直接ノーベル賞クラスの先生と話し合える場を設けたことは、高校生にとっても良い刺激になったのではと感じております。

いわゆる世に言う“理科離れ”に歯止めをかける一助とするため、科学に関する課外活動を発足させることを所長就任に当たり提言しました。幸いにも2011年の特別予算として認められ、2011年度は“テクノサークル”活動として3つのサークルがスタートしております。これらの活動を通して神大工学部の将来を担う助手、助教の皆さんを含む若い研究者にも活躍の場を提供できるのではと期待しております。

工学研究所の業務は、工学部に所属する大型装置の保守・管理、及び工学部・理学部に所属する20を超える研究室からの学生に対する実験指導を行っております。特に、近年の装置は精密化が進むとともに、実験データの解析には専門的な知識が要求され、装置の習熟には長時間の訓練が必要な状況になっております。これらの業務に対して、現在専任教務技術職員1名、派遣技術職員1名で対応しております。以上のような任務の重要性と、昨年の東日本大震災を目の当たりにし、緊急時を考えると専任教員がうっかり年休も取れない現実から脱却するために、技術員増員の申請を継続しております。

2011年3月30日 発行 No.2011-3
神奈川大学工学研究所
〒221-8686 横浜市神奈川区六角橋3-27-1
Tel 045-481-5661 (内線3631)
hagi@kanagawa-u.ac.jp

一方、工学研究所専任教員の招聘、客員教授室の整備などは手つかずのままとなつたことは心残りになつています。

最後になりましたが、今後の工学研究所のますますの発展を祈りまして、私の挨拶としたいと思います。

神大テクノフェスタ2011開催報告

実行委員長 岩田 衛

第4回神大テクノフェスタが以下のとおり開催されましたのでご報告いたします。

1. 日時：2011年10月14日（金）12:00-17:30
2. 場所：横浜キャンパス2号館演習室・本館804室



3. 実施内容

1) 講演会（於：本館804室）

【プロジェクト研究】

- ・振動エネルギー流れに基づくシステムの評価と設計 山崎 徹 教授
- ・高性能高分子膜材料の開発と評価
- 歪分子：ジナフトチオフェンの特異な性能発現 - 南部 洋子 客員教授
- ・統計モーメントに基づく構造安全性の簡単評価法 趙 衍剛 教授

【共同研究】

- ・ニオビウム接合を流れる超伝導電流の磁界特性 中山 明芳 教授
- ・リーン生産・物流システムの現状と課題 中島 健一 教授
- ・植民時代の韓国人住宅の改良における“朝鮮建築会”の活動とその影響に関する研究 金 容範 客員研究員
- ・雷雲からの放射線を探る 日比野 欣也 教授

【特別講演】

- ・安心安全交通システム設計と普及
- ：人間工学応用のGIAPコラボレーション実践 堀野 定雄 客員教授

- 2) 研究ポスター発表（於：2号館演習室）
大学院生によるポスター発表・作品展示
機械工学専攻 13 件、電気電子情報工学専攻 12 件、
応用化学専攻 14 件、経営工学専攻 2 件、建築学専
攻 16 件（うち作品展示 2 件を伴う）計 57 件
- 3) 実演展示 4 件（模型製作コンテスト、バーチャル地球史
博物館映像、宇宙エレベータ、免震体験車）
- 4) 企業展示 12 社、1 同窓会（於：2号館演習室）
- 5) 研究相談窓口（於：2号館演習室）
- 6) 懇親会（於：10号館 3階学生ラウンジ）
4. 参加者数
企業展示関係者：24名
一般参加者：27名
学生参加者：554名
懇親会参加者：教職員 54名、企業・同窓会 5名
計 59名

工学研究所からのお知らせ

1. 連続講演会について

工学研究所企画の連続講演会が以下の通り開催され
ましたのでご報告いたします。

『暮らしの中のサイエンス』

テーマ：カガクで健康美

—健康美つくりを支える科学・化学—

わがナゾー：川口 春馬 教授

日時：11/5、11/12(土) 13:00～16:20 全 2 回

場所：みなとみらい KU ポート

参加人数：一般 33 名 合計 33 名

『科学と工学の最前線』

テーマ：最新光源の話題と暮らしへの展開

わがナゾー：渡辺 良男 教授

日時：2012/1/21(土) 13:00～16:10

場所：神奈川大学横浜キャンパス

参加人数：一般 30 名、学生 20 名 合計 約 50 名

2. 第 2 回所員会議報告

2011 年 12 月 14 日の教授会終了後に第 2 回所員会
議を開催いたしました。議題は以下のとおりです。

・工学研究所客員教授 2 名、客員研究員 2 名、特別研
究員 1 名 の申請について

・客員教授 6 名、客員研究員 1 名の再任申請について
審議の結果、下記の客員教授および研究員の申請が
承認されました。

客員教授（新規）伊藤圭昌／山田保治

客員研究員（新規）持田由幸／Li, ZhiGang

特別研究員（新規）竹内 誠

客員教授（継続）西 和夫／大熊武司／佐藤祐一
杉原 淳／小嶋英一／堀野定雄

客員研究員（継続）川上博司

3. 神大テクノフェスタ 2011 企画委員会の構成

来年度の神大テクノフェスタ開催に向け、企画委員
会を立ち上げました。

委員長：山村 博（工学研究所所長）
副委員長：伊藤勝悦（研究委員会委員長）
新中新二（工学研究所幹事、次期所長）
委員：島崎和司/瀬古沢照治/中山明芳
(大学院研究委員会)
安田洋介／山口栄雄（工研運営委員）
岩田 衛（前実行委員長）
研究支援部/広報部

4. 運営委員会報告

前号の工学研究所だより発行からこれまでに開催し
た運営委員会の主な議題をお知らせします。

2011 年度 第 5 回（10月 26 日開催）

1. 『若者と語る』講演会の報告
2. 神大テクノフェスタ 2011 の報告
3. 2012 年度工学研究所共同研究の応募状況
4. 2012 年度工学研究所プロジェクト研究の応募状況
5. 客員教授申請状況
6. 客員研究員・特別研究員申請状況
7. 次期所長選出・選挙管理委員会の構成について

2011 年度 第 6 回（11月 30 日開催）

1. 各委員会の報告
 - (1) 研究所所報編集委員会
 - (2) 講演会企画委員会
 - (3) 研究支援委員会
(共同研究・プロジェクト研究の審査結果)
2. 2012 年度特別予算
3. 所長候補について
4. 所員会議について
5. 工学部自己点検委員会からの依頼について

2011 年度 第 7 回（12月 26 日開催）

1. 2011 年度第 2 回所員会議の報告
2. 2012 年度経常予算について
3. 工学研究所の各種委員会について
4. 工学部提出用 2011 年度自己点検報告書について

2011 年度 第 8 回（1月 18 日開催）

1. 報告事項
 - (1) 経常予算提出
 - (2) 自己点検提出
 - (3) 選出依頼
2. 検討事項
 - (1) 工学研究所の各種委員会について

3. テクノフェスタ 2011 企画委員会

2011 年度 第 9 回（2月 22 日開催）

1. 報告事項
 - (1) テクノフェスタ企画委員会
 - (2) 予算ヒアリング
2. 検討事項
 - (1) 工学研究所の各種委員会について
 - (2) 今年度予算の使用予定について
 - (3) 教務技術職員の増員について

2011 年度 第 10 回（3月 14 日開催）

1. 各委員会の報告
 - (1) テクノフェスタ企画委員会
 - (2) 大型装置管理委員会

2. 検討事項

- (1) 工学研究所の各種委員会について
- (2) 引き継ぎ事項

5. 総合学術研究推進委員会／研究委員会報告

前号の工学研究所だより発行からこれまでに開催した委員会での主な議題は以下の通りです。

2011年度 第4回（10月19日開催）議題

1. 報告事項

- (1) 助成金公募状況
- (2) 「研究機関における公的研究費の管理・監査のガイドライン（実施基準）」に基づく「体制整備等自己評価チェックリスト」の提出
- (3) 平成23年度私立大学等研究設備整備費等補助金（私立大学等研究設備等整備費）の審査結果

2. 検討事項

- (1) 平成24年度学術研究振興資金に係る研究計画書の提出
- (2) 平成24年度学術研究振興資金（若手研究者奨励金）に係る研究計画書の提出
- (3) 2010年度プロジェクト研究所（視科学研究所）活動報告
- (4) 2010年度プロジェクト研究所（光機能性材料研究所）活動報告
- (5) 2010年度プロジェクト研究所（アジア問題研究所）活動報告
- (6) 工学研究所客員教授の任用及び更新
- (7) プロジェクト研究所客員教授の任用更新
- (8) プロジェクト研究所客員研究員の任用
- (9) 神奈川大学日本常民文化研究所非文字資料研究センターと東アジア文化研究との非文字資料研究に係る学術交流についての覚書（案）

2011年度 第5回（11月16日開催）議題

1. 報告事項

- (1) 助成金公募状況
- (2) 2011年度私立大学等研究設備整備費等補助金（私立大学等研究設備等整備費）の審査結果
- (3) 2011年度競争的資金に係る間接経費予算（共通経費部分）（案）

2. 検討事項

- (1) 2012年度私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の審査
- (2) 2012年度国際交流（学術交流）の事業の審査
- (3) プロジェクト研究所客員研究員の任用

2011年度 第6回（12月7日開催）議題

1. 報告事項

- (1) 2012年度私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の審査結果
- (2) 2012年度国際交流（学術交流）の事業の審査結果

2. 検討事項

- (1) 2012年度文部科学省補助金（大型装置・設備等）申請に係る審査
- (2) 神奈川大学研究倫理審査委員会規程（案）
- (3) 神奈川大学における人を対象とする研究に関する倫理規程（案）

- (4) 神奈川大学における人を対象とする研究に関する倫理審査委員会規程（案）

2011年度 第7回（1月18日開催）議題

1. 報告事項

- (1) 助成金公募状況
- (2) 2012年度私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の申請
- (3) 2012年度文部科学省補助金（大型装置・設備等）の申請

2. 検討事項

- (1) 工学研究所客員教授の任用及び更新
- (2) 2011年度自己点検・評価に係る方針の策定

2011年度 第8回（2月17日開催）議題

1. 報告事項

- (1) 助成金公募状況
- (2) 「特色ある共同研究拠点の整備の推進事業」中間評価結果
- (3) 神奈川大学研究倫理審査委員会規程（案）
- (4) 神奈川大学における人を対象とする研究に関する倫理規程（案）
- (5) 神奈川大学非文字資料研究センター海外提携機関への派遣研究員資格（附属大学院研究科・専攻）の拡張

2. 検討事項

- (1) 総合理学研究所客員教授の更新
- (2) プロジェクト研究所の設置
- (3) プロジェクト研究所客員教授の任用更新
- (4) プロジェクト研究所客員研究員の任用更新
- (5) 神奈川大学における競争的資金等に係る不正防止計画の見直し
- (6) 神奈川大学における競争的資金等に係る使用ルールの見直し
- (7) 競争的資金に係る「間接経費」取扱要項の改正
- (8) 神奈川大学共同研究奨励規程に係る助成金使用ルールの見直し
- (9) 2011年度自己点検・評価に係る方針の策定

2011年度 第9回（3月14日開催）議題

1. 報告事項

- (1) 平成24年度学術研究振興資金（若手研究者奨励金）の選考結果
- (2) 日本学術振興会特別研究員の募集
- (3) プロジェクト研究所（光合成水素生産研究所）客員教授の任期期間の変更
- (4) 科学研究費助成事業への申請支援

2. 検討事項

- (1) 神奈川大学受託研究規程（案）及び神奈川大学受託研究規程施行細則（案）の策定
- (2) プロジェクト研究所客員教授の任用更新
- (3) プロジェクト研究所客員研究員の任用更新
- (4) 神奈川大学共同研究奨励規程に係る助成金使用ルールの見直し

工学研究所だよりの内容等について、ご質問、ご意見等がございましたら工学研究所 事務局：萩原（内線3631、hagi@kanagawa-u.ac.jp）までお知らせください。

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

卷頭言

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. 頁数

以下の頁数はすべて〔刷り上り〕のものを示す。

総合論文 原則として20頁以内。和文の場合は〔欧文内容概要（1頁以内）〕、欧文のときは〔和文内容概要（1頁以内）〕をつけることができる。

論説・随想 原則として4頁以内。

総説・トピックス・その他の記事 原則として8頁以内。

6. 原稿の書き方

原稿の書き方は、この〔規程〕ならびに〔神奈川大学 工学研究所 所報 執筆要領〕による。

7. 原稿の責任と権利

掲載された論文などの内容についての責任は著者が負うものとする。またその著作権・編集出版権は〔神奈川大学 工学研究所〕に属する。

8. 採否

原稿の採否および分類は〔神奈川大学 工学研究所 編集委員会〕において行う。

9. 原稿の提出先

原稿の提出先は〔神奈川大学 工学研究所 事務室〕とする。そこで受領した日を原稿受付日とする。

10. その他

(1) 原稿の枚数が規定限度を超過する場合は委員会の承認を要するが、状況により超過分の実費を徴することがある。

(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。

工学研究所所報執筆要領

工学 太郎* 研究所 花子**

Making Reports of Research Institute for Engineering

Taro Kougaku* Hanako Kenkyujo**

1. 緒言

- この工学研究所執筆要領は、このファイル自体が所報原稿のテンプレートになっているので、著者が別にタイピしてある原稿をこの様式内にペーストすれば、以下に記載する体裁の原稿が作成される。
- テンプレートファイルは工学研究所事務室から著者あてにメールにより送付する。
- 原稿は、テンプレート(A4版)に従って執筆し、提出の際は、印刷した原稿(ハードコピー)とそのデジタルデータ(ファイル)を提出する。ファイルはMS Word(WindowsまたはMac)またはTeXとする。
- 原稿記載の順序は、標題、本文、文献、付録、である。

2. 本文及び原稿の体裁全般

- A4版用紙を用い、本文レイアウト(1ページあたりの文字数)は、25字×45行×2段=2250字とする。ただしタイトルのみは1段組である。
- MS Wordの“ページの設定”の“文字数と行数”のタブ中の設定はフォントサイズ8、段数2で文字数26、行数45とし、“余白”的タブ中の設定は上45下40左34右34としてある。
- 和文文字はMS明朝、英文文字はTimes New Romanとする。ただし、記号などにSymbolを用いることが出来る。
- 本文、図、表及び式は原則として左右の段にまたがらないように書く。
- 小数点は〔.〕を用い、カンマ〔,〕を用いない。
- 句読点は〔.〕〔.〕とし、〔,〕〔.〕を用いない。
- 脚注はなるべく避ける。

3. 記号及び単位の書き方

- 諸記号の字体は次のとおりとする。

(種 別)	(字 体)	(例)
数学的演算記号	立 体	\sin, \sinh
単位記号	立 体	$\text{cm}, \text{kg}, \text{M}\Omega$
ベクトル量	斜体ゴシック	速度 V 力 F
量記号	斜 体	周波数 f , 長さ l
化学記号	立 体	$\text{H}_2\text{O}, \text{BaTiO}_3$

- 文字の大きさは表1に示すとおりとする。

4. 図、写真及び表の作成

- 図、写真及び表が单段(片側)に収まらない場合は2段(両側)にまたがって書くことができる。
- 図、写真及び表の横に空白ができるても、その空白部には本文を記入しない。
- 図、写真、表と本文及び図表相互の間は1行余白をとる。
- 図、写真、表の見出しが本文と同一言語とする。図及び写真的見出しがその下に、表の見出しが上に書く。
- 図、表中の記号類は、小さすぎて判別不能にならないようにする。また、複雑な記号類は、大きめに描くようとする。
- 写真是本文に貼るだけでなく、写真的ファイルを添付する。

5. 数式

- 数式エディタを用いて記載する。
- 式は单列に書くように整形する。
- 字体はTimes New Romanを使う。ただし、Symbolは使用できる。
- 数式は原則として文章の行の中に入れない。やむを得ず挿入する場合には、1行高さを守る。

*教授 機械工学科

Professor, Dept. of Mechanical Engineering

**助手 建築学科

Research associate, Dept. of Architecture

例1 [分数式の例]

…これは $(a+b)/(c+d)$ の形を取る。

例2 [指数式の例]

…電流は $i = I \exp(-t/x)$ の形となる。

□文中でなく、式を別行にする場合には、次のように書いても良い。その結果、[上例の式]は次の形を取る。

例1 [分数式の例]

…その結果、これは次式の形を取る。

$$\frac{a+b}{c+d} \quad (1)$$

例2 [指数式の例]

…その結果、電流は次式の形となる。

$$i = I e^{-t/x} \quad (2)$$

6. 文献記載方法

□文中の文献引用は、引用箇所に文献ナンバーを上付きカッコでつける。

□参考文献 (References) はナンバーに () を付して本文末に列記する。

引用文献は原則として以下の A, B のように記載する。

(A) 雑誌の場合

(No.) 著者名, “標題”, 雑誌名, 卷一号 (発行年-月), p. ページ。

例

(x) 赤坂憲夫, 青山幸夫, 宮下俊夫, “広帯域増幅器の特性”, 電子通信学会誌, 52-192 (1977-8), p.1125.

(x) E. W. Euller and R. F. Stoessel, “……”, Mech. Engng., 90-3 (1968-3), p.42.

(B) 単行本の場合

(No.) 著者名, “書名”, 発行所名, (発行年), p. ページ。例

(x) 田部浩三, 竹下 誠, “塩酸触媒”, 産業図書, (1976), p.1225.

7. 原稿作成上のヒント

□このテンプレートは Windows MS Word 97 で作成している。著者が別に書いた原稿をコピーペーストすれば、自動的に割付が決定する。

□Word からコピーペーストする際、書式情報無しのテキストのみをペーストするには、コピーした後にメニューの“編集”から“形式を選択して貼り付け...”を選択し、“テキスト”を選ぶ。

□第1ページ標題部分は1段組である。この部分では、項目ごとにコピーペーストが必要である。

□本文は著者原稿から図、表、脚注を除いてコピーし、テンプレートにペーストする。その後で、図等のスペースを作ってテキストボックスを挿入し、その中に図などをペースト、あるいはファイルからの挿入をする。

□第1ページの脚注 (著者所属など) には、直接入力しても、コピーした内容をペーストしても良い。ただし、MS Word の制限により、脚注の機能を先頭の“1. 緒言”の後ろに見えないように白文字で“*”をつけてある。ここを削除すると脚注も消えてしまうので注意が必要である。(標題下の著者名に脚注の機能をつけるべきだが、その場合は脚注が両段にまたがってしまうため、この形式を採用した)

□このテンプレートについて不明な点がある場合は、工学研究所 事務局に問い合わせせる。

8. 結言

□校正は著者に依頼するので、校正刷りが到着後、速やかに校正を済ませて、工学研究所 事務室まで返送する。校正は、内容が著者提出のハードコピーと一致することを確かめるものであって、変更を加えることはできない。

□著者の責任による修正が生じた場合には、その修正に必要な実費を徴収する。

表1 文字及びサイズ

題目	MS 明朝	14 ポ
著者名	MS 明朝	10 ポ
欧文題目	Times New Roman	12 ポ
欧文著者名	Times New Roman	9 ポ
本文	MS 明朝	8 ポ
本文の各節・小項目	MS ゴシック	8 ポ
図・表の見出し	MS ゴシック	7 ポ
参考文献・脚注	MS 明朝	7 ポ

参考文献

(1) 工学太郎, 研究所花子, “執筆要領”, 工学研究所所報, 27号 (2004-11), p.126.

(雑誌の場合)

(2) 工学太郎, 研究所花子, “工学研究所所報 27 号” 工

学研究所, (2004), p.126.

(単行本の場合)

付録

[参考] 研究所所報の配布

刷上がった所報は以下の各者に 1 部宛贈呈する。

- (1) 本学理事および工学部所属教職員。
- (2) 理, 工学部を有する国内の大学またはそれに準ずる学校。
- (3) 官公庁の研究機関。
- (4) 主要の学協会。
- (5) 民間の主要研究機関。
- (6) その他委員会が認めたもの。

[資料] 英文用語一覧

Research Institute for Engineering	工学研究所
Science Reports of Research Institute for Engineering	工学研究所所報
Faculty of Engineering	工学部
Department (Dept.) of	学 科
Mechanical Engineering	機械工学

Electronics and Informatics Frontiers

電子情報フロンティア

Material and Life Chemistry	物質生命化学
Information Systems Creation	情報システム創成
Architecture	建築学
Mathematics	数 学
Physics	物 理
Chemistry	化 学
Biology	生物 学
Professor	教 授
Professor Emeritus	名誉教授
Associate Professor	助教授
Lecturer	講 師
Research Associate	助 手
Technical Assistant	技術員
Graduate (M.C.)	大学院 (博士前期課程)
Graduate (D.C.)	大学院 (博士後期課程)
Research Student	研究生
Dean	学部長
Chairman of Dept. of ...	学科主任
Abstract	概 要
注 : 工学部, 助教授, 助手, 技術員, 研究生などについては種々の呼称があるが, 上記のように統一する。	

編集後記

編集委員ならびに工学研究所事務職員のご協力のもと、工学研究所所報第35号が刊行となりました。お忙しいところ、進んで原稿をお寄せ下さいました先生方に厚くお礼申し上げます。

所報の編集にあたっては、所報を通して工学研究所の年間活動および所員の研究分野の紹介を兼ね研究のポテンシャルの高さを発信できるよう配慮しました。新任の教員には、これまでやってこられた専門分野の研究を存分にアピールして頂けるように、総説を執筆頂きました。また、本年度をもって退職される教員には大鑑を短く纏めた随想を執筆頂きました。さらに、工学研究所共同研究の成果報告に加えて工学研究所の年間活動が一目で分かる年次報告等を記載しています。産官学と連携して研究活動を行っている先生方の活動や研究成果も可能な範囲で工学研究所所報に公表していくことが必要です。これにより、産官と工学研究所とのより緊密な関係が確立されます。工学研究所との緊密な関係の中で産官学協同研究が発展することを期待しています。

なお、所報をホームページにも掲載しましたので、より多くの方々にお読み頂けるものと思います。発刊にあたりご協力頂きました方々に改めて敬意を表するとともに、ご協力に感謝申し上げます。

物質生命化学科 佐藤 憲一

工学研究所 所報 (No. 35)

工学研究所 所長 新中 新二

工学研究所 所報 編集委員会

委員長 佐藤 憲一 (物質生命化学科)
委員 工藤 邦男 (機械工学科)
山口 栄雄 (電気電子情報工学科)
奥野 祥二 (情報システム創成学科)
中島 健一 (経営工学科)
安田 洋介 (建築学科)
山崎 教昭 (数学教室)

SCIENCE REPORTS (No. 35)
of
Research Institute for Engineering (KANAGAWA University)

Director of the Institute Shinji SHINNAKA

Chief Editor Kenichi SATO (Dept. of Material and Life Chemistry)
Editor Kunio KUDOU (Dept. of Mechanical Engineering)
Shigeo YAMAGUCHI (Dept. of Electrical, Electronics and Information Engineering)
Shouji OKUNO (Dept. of Information Systems Creation)
Kenichi NAKASHIMA (Dept. of Industrial Engineering and Management)
Yousuke YASUI (Dept. of Architectonics)
Noriaki YAMAZAKI (Dept. of Mathematics)

神奈川大学工学研究所所報第35号

2012年11月27日 印刷

2012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3-27-1

印刷所 共立速記印刷株式会社
東京都千代田区飯田橋3-11-24

RESEARCH INSTITUTE FOR ENGINEERING
KANAGAWA UNIVERSITY

3-27 Rokkakubashi, Kanagawa-ku, Yokohama, 221-8686, Japan