

ISSN 0286-3391

茨城工業高等専門学校

# 研 究 彙 報

第 46 号

平成 23 年 3 月

RESEARCH REPORTS  
OF  
IBARAKI NATIONAL  
COLLEGE OF TECHNOLOGY

NO. 46

MARCH 2011

茨城工業高等専門学校

# 茨城工業高等専門学校研究彙報 第46号

## 目 次

- 1 茨城高専経済シンポジウム「上手なツーリズムの作り方 空港は出来たけれど…」  
..... 箱山 健一・井坂 友紀・熊坂 敏彦 (1)
- 2 LSC(Language-specific cognitive)-system 仮説について ..... 池松 峰男 (11)
- 3 英語検定試験において高い聴解スコアを示す学生に対する調査研究(1) ..... 池松 峰男 (17)
- 4 複合材料・構造における微小き裂の探索に向けたき裂要素の構築  
～簡便な均質化有限要素法と行列の摂動評価法の融合を目指して～  
..... 河原 永明・五十嵐 浩・中川 英則・山本 茂樹 (23)
- 5 茨城高専1, 2年生を対象とした数学共通テストの実施と分析  
..... 河原 永明・山本 茂樹・長本 良夫・五十嵐 浩・中川 英則 (31)
- 6 Simultaneous Separation Measurement of Principal Electrical Conductivities and Principal Axis  
Angle of Two-Dimensional Anisotropic Material Using Multi-Probe Measuring Method  
..... 根本 栄治・小沼 碧海 (37)
- 7 QCM法によるアルコールセンシング ..... 高安 基大・青木 克仁・丸山 智章・若松 孝 (45)
- 8 量子論における実在性と自由意志定理について ..... 四王天 正臣 (51)
- 9 EPR論文と現在から見たその意義について(I) ..... 四王天 正臣 (57)
- 10 MP I を用いた分散処理型データ収集システムの開発および性能評価  
..... 村田 和英・高橋 舟平・安西 則晃 (63)
- 11 独立成分分析による音源分離に関する検討 ..... 芝野 恭章・市毛 勝正 (67)
- 12 アントコロニー最適化による巡回セールスマン問題の解法の研究 ..... 浅野 貴哉・弘畑 和秀 (71)
- 13 グラフの点素な閉路の存在性について ..... Ronald J. GOULD・Paul HORN・弘畑 和秀 (77)
- 14 複数の分野の混成グループによるソフトウェア開発の方法論に関する検討 ..... 滝沢 陽三・小飼 敬 (81)
- 15 ディスクレスによるプログラミング演習室システムの構築 ..... 滝沢 陽三・小飼 敬・山田 真 (85)
- 16 アミン・BF<sub>3</sub>付加物の熱分解をキーステップとしたポルフィンの新規合成法の開拓  
..... 蝦名 不二夫・瀬田 敬太・佐藤 稔・小松崎 秀人・金谷 奨武・飯野 晃次・市毛 達郎・渡辺 尚美 (89)
- 17 酸化亜鉛及び酸化ジルコニウム繊維の作製とその性質  
..... 砂金 孝志・藤 貴大・黒澤 悟史・福田 和正 (95)
- 18 チタン化合物によるレジオネラ抗菌効果 ..... 小松崎 秀人・島田 明夫・鈴木 康司 (99)
- 19 ジュニア走幅跳選手における助走歩数が跳躍距離、助走速度、踏切時間に及ぼす影響  
..... 木野村 嘉則・森 信二 (105)
- 20 高専教育における文化系クラブの役割と使命  
－特にイメージーション触発の場としての「文芸同好会」について－  
..... 瀬尾 邦雄・桐生 貴明・鈴木 僚 (116)
- 21 文部科学省科学研究費補助金採択研究(平成22年度) ..... (117)
- 22 外部資金受入による共同研究・受託研究(平成21年度) ..... (118)
- 23 教員事績(平成21年10月～平成22年9月) ..... (119)
- 24 専攻科特別研究題目一覧表(平成21年度) ..... (137)
- 25 卒業研究題目一覧表(平成21年度) ..... (138)

## 茨城高専経済シンポジウム

### 「上手なツーリズムの作り方 空港は出来たけれど・・・」

箱山 健一, 井坂 友紀, 熊坂 敏彦<sup>1)</sup>

How to make Ibaraki inbound tourism

Kenichi HAKOYAMA, Tomonori ISAKA, and Toshihiko KUMASAKA<sup>1)</sup>

**Abstract:** This is a paper read at the symposium held at Ibaraki National College of Technology on 17 October 2010. The main theme is how to make Ibaraki inbound tourism. There are three panelists — two from INCT, and one from Tsukuba Bank.

#### シンポジウムの趣旨説明

箱山 健一 (オルガナイザー)

##### I. 作ってしまった茨城空港

2010年3月11日に国内98番目の空港として茨城空港が開港した。最初に就航表明したのはアジアナ航空で(2009年2月6日)、3月11日以降毎日一往復のソウル定期便を運航している。また、定期便ではないものの、春秋航空が7月28日から上海チャーター便を週3往復運航している。開港初日にチャーター便を飛ばせてみせたスカイマークは、今のところ唯一の国内路線である神戸定期便を4月16日から飛ばせている。この路線は8月31日を以て一旦休止となるも、今月(10月)から再開となった。ほかに若干の不定期チャーター便の飛来実績がある。県当局による路線誘致が今後もある程度進捗したとしても、当初構想における「大手航空会社による千歳・伊丹・福岡・那覇便就航」には程遠く、県が造成した空港テクノパークに至っては未だに入居企業がゼロという有様であり、空港事業の経営採算点を議論すること自体が馬鹿らしく思える程の低迷ぶりだ。

この茨城空港の苦闘は、予期されていた当然の事象であって、想定外の不幸ではない。百里飛行場共用化の構想は1993年に具現化したが、事業見通しが殊更に甘かったバブル期の開発プランを県当局が抜本的に見直さない間に、航空情勢が全く変化してしまった。すなわち、バブル崩壊(1991年)、9.11後の航空需要の後退(2001年)、リーマン・ショックによる世界同時不況(2008年)、日航の経営破綻と不採算路線の整理(2010年)、羽田再国際化(2010年)、成田のLCC(Low Cost Carrier)積極受け入れ(検討中)と、事業計画の見直しを迫る重大な情勢変化が再々あった。特に、D滑走路と国際線ターミナルが竣工して羽田の発着スロットが増え、他方、日航の不採算路線整理で既存のスロットにも空きが生じた状況下では、LCCを含む航空会社にとって、羽田・成田でなく敢えて茨城へ乗り入れるメリットは乏しい。現状で茨城空港にどの程度の旅客需要が存在するのか現実的に見積もり直し、空港事業の中止ないし延期も視野に入れて検討

するべきであっただろう。百里共用化を断行するにしても、どのようなビジネスモデルならば少ない旅客需要でも空港事業が経営的に成り立つか客観的に検討すべきであった。この意味で、少なくとも、第二滑走路建設と109億円かけた工業団地整備は明らかに当面不要だったのでないか。なにしろ、茨城空港が手本としたであろう福島空港でさえ赤字なのだ。殆ど飛行機が飛ばないバブルの残滓と云うべき茨城空港事業が今後の県財政に深刻な問題を投げかけるであろうことは殆ど自明と思われる。

##### II. 茨城空港の可能性

さて、このシンポジウムでは空港建設の是非について今更これ以上論じない。税金のムダ遣いかもかもしれないが、既に作ってしまったのだ。作った以上は地域経済のために有効活用したい。以下でまず、その可能性を検討してみよう。

茨城空港は、現時点では国内線利用者にとって使い勝手が宜しくない。スカイマークの茨城神戸間航空運賃は繁忙期の普通運賃は¥14,800だが、閑散期の前割21適用なら¥5,800であって、確かに安く設定されている。とはいえ、神戸発茨城行はまだしも、茨城発神戸便の到着予定時刻は12:05であるから午前中の仕事に間に合わない。対して、羽田発便の神戸空港到着予定時刻は7:50、鉄道の始発ではJR神戸駅へ10:09に到着する。この差は大きく、前泊を要するのでは運賃が多少安くても割に合わない。加えて、運休すれば次便は翌日、神戸でなく大阪や京都へ行きたいのなら神戸空港からの現地交通の時間と費用と手間も考慮する必要がある。ビジネス客は、たいいていの場合において、鉄道か羽田発着便を使った方が穏当である。

国際線の旅客にとっても事情は同様だ。羽田発着ならばソウルから東京日帰り出張も可能なのに、一日一往復の茨城便なら往復の移動に各1日を要する。しかも、茨城空港で搭乗予定便が欠航すれば当日内の代替のしようがなく、翌日の便を待つか羽田か成田へ急ぎ移動するしか方法がない。上海便は週3便であるが、ビジネス客が空港で最大3日も足止めされては堪るまい。

航空貨物においても、茨城空港に利点は無い。まず、貨物機の運用能力に問題がある。現代の貨物機はLD3 コンテナを並列積載可能なワイドボディ機が常識である。特に、古くなった旅客型を改造した B747 など比較的大型の機材が航空貨物輸送の過半を担っているのが現状であり、一例として三発の MD11F の積載能力はLD3 最大 32 個である。ところが、茨城空港は、現状では滑走路の長さや強度が足りず、大型機の運用能力を備えていない。なお、茨城空港には旅客型の A320 と B737 が就航しているが、A320 の貨物積載能力はLD3 コンテナ 7 個と旅客手荷物輸送の域を越えず、B737 に至ってはパレット積載のみであって貨物コンテナの搭載自体が不可能である。第二に、輸送先の始業前に貨物が到着するように逆算して発航時間を決めているのが現代の国際貨物航空である。だから、国際貨物便はしばしば深夜便となるのであり、また、その方が日中に集中する旅客便との離着陸スロットのシェアの点で好都合である。だが、茨城空港では、地域住民との運行時間の協定に従って、深夜はおろか早朝・夜間の離発着さえ行なわない。羽田の沖合展開以前の段階では関東に深夜運航が可能な民間空港が存在しなかったから、茨城空港を離陸した大型機が直ちに霞ヶ浦上空へ飛び去るようにもっと西南方向へ離して第二滑走路を設置していれば、騒音問題にあまり制約されずに関東の深夜発着便を一手に引き受けることが出来たであろうし、また、二つの滑走路を十分に離すことで、自衛隊が主用する第一滑走路との同時離着陸も可能だったろう。そうした配慮が出来ていれば、茨城空港は貨物便に特化した「小さな大空港」となり得たかもしれない。もっとも、羽田の再拡張が完成すれば、この競争条件も怪しくなってしまうけれども。

茨城空港への国際線誘致は、下記の二つの条件で他の地方空港よりも恵まれている。第一に、中国の所得水準が向上し、富裕層に海外旅行の機会が拡大しつつあり、上海などから日本へのインバウンドが激増しつつある。茨城空港はゴールデン・ルートの東端に位置しているため、成田や羽田の機能を一部代替する可能性を秘めている。ゴールデン・ルートとは、成田-東京-京都-大阪-関空(またはこの逆順)という日本観光の王道の行程ルートのことである。たいてい、秋葉原などでのショッピング、富士山登山、TDL がツアーの目玉となっている。ゴールデン・ルートの旅行者は主に海外旅行自体が初めての団体客であり、ツアー・バスに乗車して東京から大阪まで東海道沿いの観光地を走り抜ける。団体旅行なのでツアーを催行する旅行会社が使用空港を東京・大阪両方面でのオープン・ジョーで設計するのだが、その際に、例えば、成田インの代わりに茨城インとしてもツアー設計が可能である。茨城空港周辺の交通アクセスは個人客には劣悪だが、空港に到着した団体客を直ちにツアー・バスへ詰め込むのなら支障にならない。成田・羽田・関空・伊丹以外で、このゴールデン・ルートの起点となり得る空港は茨城と神戸だけである。

茨城空港は東京圏アクセス空港の条件をかなり満たしているため、設定運賃次第では東京単純往復の観光客が茨城空港を利用する可能性もある。この旅客は主として TDL や東京でのショッピングを目的としている。ただ、ファースト・ビジターと

は限らず、時間の制約が多いツアーを嫌った個人旅行のリピーターが少なくない。個人旅行者は団体ツアーのように専用の団体バスで移動するのでないから、茨城空港-東京駅間の交通手段が個人客でも確実に確保出来て、なおかつ、羽田や成田の発着便よりもチケット代金がかかり安く済むのならば、便数が極めて少ない茨城空港にも可能性がある。関東鉄道が茨城空港-東京駅間の高速バスを運賃 500 円(航空機利用者に限る)で運行し始めた。現状の片道二時間半では競争力に欠けるとはいえ、成田-東京間の交通アクセス距離も充分遠いのであるから、競争術が無いわけでない。東京圏アクセス空港としての条件を満たす空港は、成田・羽田と茨城だけである。

アジア航空と春秋航空が羽田の国際化を待たずに茨城空港へ乗り入れて当地に現地事務所を開設したのは、上記二つの国際線旅客需要を見込んだからである。茨城県への旅客需要だけでは両社が運用する A320 は過大である。国内線の誘致活動は今のところスカイマーク以外の航空会社には相手にされていないのに、ソウル便・上海便の搭乗率は機体サイズの割に健闘している。開港当初の物珍しさもあろうが、茨城空港国際線には他の地方空港には無いインバウンド旅客の競争条件があるから、かくて国際線が国内線を上回る珍妙な状態が続いている。かかる国際空港は成田と茨城だけである。

### Ⅲ. 空港政策と観光政策のミスマッチ

茨城空港について、航空貨物、ビジネス旅客、アウトバウンド旅客において経費に見合う可能性を見出すことは現状では困難であるが、国際線インバウンド観光旅客については有利な競争条件を秘めていることを、既に指摘した。とはいえ、この有利な競争条件は羽田の代替としての位置に立脚しているためであり、団体観光客が空港からバスに乗車して直ちに県外へ立ち去ってしまうのでは茨城県には殆どお金が落ちない。つまり、アジア航空・春秋航空利用の外国人東京観光客の利便のために茨城県民の税負担で空港を用意してやったようなものだ。茨城空港に地域経済のために貢献してもらうためには、インバウンド旅客の一部を、東京でなく茨城観光へ引き込まなければならぬ。

ところが、茨城県の空港政策と茨城県の観光政策のマッチングがとれていない。茨城県庁の組織において空港政策を担当する部署は企画部の下に配置された空港対策課であり、課内に就航誘致を担当する技佐・課長補佐と利用促進を担当する副参事・課長補佐がそれぞれ配置されている。企画部空港対策課に観光施策の専門能力はない。他方、県の観光政策を本来担当する部署は商工労働部の下に配置された観光物産課である。茨城県平成 22 年度一般会計予算において商工労働部内の課別予算をみると、産業政策課の課別予算が 704 億円なのに対し商工労働部物産観光課は 4 億円、一般財源充当額だけをみても中小企業課の 1/10 に満たない。商工労働部の本庁事務職員数 121 名中の 17 名が観光物産課である(再任用職員、嘱託職員、臨時職員を除く)。観光物産課内部の観光担当の予算は物産担当に比してもともと遙かに少ない。平成 22 年度予算で国際観光誘客促進事



業費を初めて計上したが、泥縄であり、生産的とはいえまい。以上のように県の観光行政の軽視と県観光行政の物産行政への従属は明らかだ。県の物産販売促進の観点では主たる市場は当然ながら東京であるから、物産政策に従属した茨城県の観光行政は、主に東京からの日帰り旅行に特化しているということである。茨城空港便の就航地は現時点で神戸、ソウル、上海であるから、茨城空港へのインバウンド観光客を増やすには、これら茨城空港便就航地における茨城の観光ブランド・バリューの構築が必須である。日帰りは不可能だから、その観光コンテンツは当然に宿泊に見合うものでなければならないはずだ。

開港が先に在りきの空港対策課は、何処とでもいいから就航航空会社の確保に躍起であり、観光政策担当者と事前に綿密に詰めることなく路線誘致を進めた。路線誘致だけを進めたのである。他方、東京市場への物産販促を軸に活動してきた物産観光課には、空港対策課が独自に誘致して来る就航地に対する観光アピールのノウハウも予算も全く不十分なままだ。この結果、茨城空港便就航地で茨城県の観光ブランド・バリューは現状ではゼロに等しく、ソウルと上海では茨城の認知自体が無に近い。空港を作ってしまったからには、次に、茨城空港就航地における茨城の観光ブランド・バリューの構築が必要だ。

このシンポジウムでは、まず内外の観光事情・観光政策の状況について井坂が発表する。次いで、県内で現在実際に行っているツーリズム開発の事例として、笠間地区のニュー・ツーリズムの取り組み事例をゲストの熊坂氏に発表していただく。最後に、他の都道府県や海外での成功事例を、わたくしが若干紹介する。

茨城高専経済シンポジウム(2010. 10. 17. 於茨城高専)



## 「観光政策」の現状と展望 —EUの事例を中心に— 井坂 友紀

私は「観光政策」の現状と展望について、EUの事例を中心に報告する。今回のシンポジウムのテーマは「上手なツーリズムの作り方」である。本報告ではこの「上手なツーリズムの作り方」を考えていく上での前提となるような、大きな視点からの話をしたい。

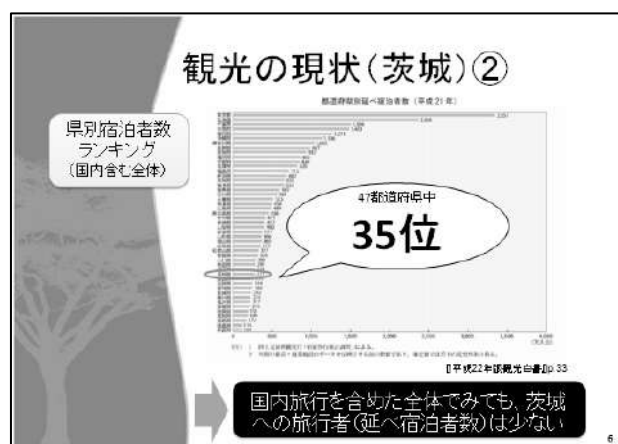
### I. 観光の現状（概観）

はじめに、「観光の現状（概観）」として、『観光白書』を基にいくつかのデータを確認したい<sup>1)</sup>。まず訪日外国人旅行者の推移についてであるが、2008年秋以降の「世界同時不況」の影響から直近（平成21年）については急激な落ち込みがみられるものの、基本的には年々増加している。

しかしながら世界の中での順位をみると全体で28位、アジアでも6位となっており、日本における外国人旅行者の数は世界的にみると非常に少ないことがわかる。

こうした中で、茨城県は、外国人宿泊者数（延べ宿泊者数）が47都道府県中32位、国内の旅行者を含む全体でみても35位と、残念ながら観光客の数は非常に少ない状況にある（図1参照）。ではこの茨城県の観光をどうすればよいのかという点については、後ほど熊坂、箱山両氏よりご報告があるので、冒頭に述べたように、ここでは「観光政策」というより大きな枠組みの話をしたい。

図1



### II. 観光政策をめぐる動向（日本）

日本の観光政策をめぐる動向についてであるが、まず2006年12月にそれまでの観光基本法が「観光立国推進基本法」へとリニューアルされる。翌2007年6月には「観光立国推進基本計画」が制定され、2008年10月には観光庁が発足。そして今年の6月に閣議決定された国の『新成長戦略』においては「観光」が成長戦略分野の1つとして位置づけられることとなった<sup>2)</sup>。

このように「観光立国」の実現に向けた国を挙げての政策推

進がなされているわけであるが、その背景にあるのは観光の促進が日本の今後の社会経済全体の発展にとって不可欠だという認識である。先述の『新成長戦略』の言葉を借りれば、「公的支出による地域活性化策を期待することが難しい現在、人口減少・少子高齢化に悩む地方都市にとって、観光は、地域経済の活性化や雇用機会の増大の切り札」なのである。

### Ⅲ. 観光政策をめぐる動向（EU）

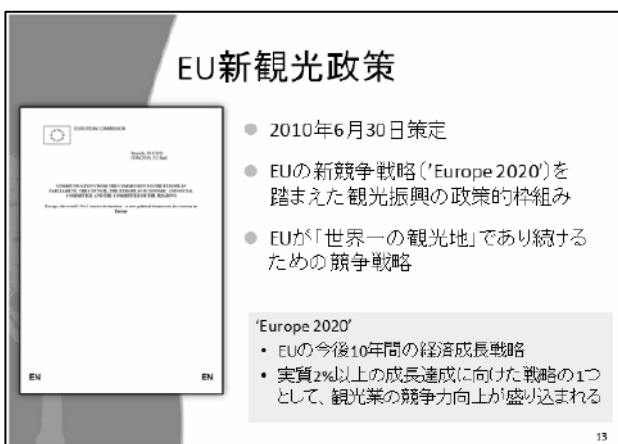
#### EU 新観光政策

さて、ここからはEUの観光政策をみていきたい。今年6月30日に策定されたEUの新しい観光政策（European Commission, *Europe, the World's No 1 Tourist Destination*）<sup>3)</sup>については、日本経済新聞でも「EU、観光振興へ包括策」という見出しで大きく取り上げられたところである<sup>4)</sup>。

ではなぜEUの新しい観光政策がわざわざ日本の新聞で取り上げられるのか。まず前提にあるのは、先ほど述べた通り、観光が今後の日本の社会経済全体の発展の重要な担い手となるのだという認識であると思われる。その上で指摘すべきは、EUが世界一の観光地、世界一の「観光先進国」であるということであろう。つまりこのEUの新たな観光政策をみれば、「世界一の観光地が今何を考え、どう動こうとしているのか」がわかるのである。

こうした点を踏まえつつ、このEUの新観光政策の中身を見ていきたい（図2参照）。タイトルにあるように、この政策はEUが「世界一の観光地」であり続けるための政策的枠組みである。2010年3月にEUの今後10年間の経済成長戦略である"Europe 2020"が策定され、実質2%以上の成長達成に向けた戦略の1つとして観光業の競争力向上が盛り込まれた<sup>5)</sup>。今回の観光政策はこの"Europe 2020"を受けて策定されたものである。

#### 図2



新観光政策では、まずEUにとっての観光産業の重要性が次のような観点から明示されている。第1に、観光業は、関連産業を含めれば、EU全体の10%超、雇用の12%を占めるということ。第2に、この10年間、全産業の中で最も大きな雇用の伸びを記録していること。そして第3に、EUは何よりも世界一の観光地であり、年間3億7000万人の海外旅行者を呼び込んでいるということだ（2008年）。ちなみに日本の海外旅行者数は年間835万人（2008年）であるから、文字通り「桁違い」である。

しかしながら、EUの観光業は大きな環境変化に直面している。まず新興国も含めたグローバルな競争激化があり、競争力をどのように維持・向上させるかが問われている。次に、ヨーロッパにおいても人口構造が変化し高齢化が急速に進んでいるが、観光客の高齢化に対応できているかどうか大きな問題となる。また、環境問題がわたしたちの大きな課題となっている中、観光業においても環境問題への対応をはじめ「持続可能な観光」を実現することが求められている。最後に、目覚ましい進化を続けている情報通信技術について、観光業の主体である中小企業が的確に対応し有効に活用することができるかが懸念されている。

以上のような現状認識のもと、新観光政策は(1)競争力強化 (2)持続可能な観光業の発展 (3)イメージの確立・向上 (4)他の政策との連携 という4つの政策課題を提示している。以下ではこのうち(1)～(3)を概観する。

(1)競争力強化の大きな柱となっているのは観光商品の多様化 *diversification* である。具体的には「テーマのある観光商品」の開発として、文化遺産観光、現代文化観光、自然保護区域観光、健康観光、教育観光、ワイン・グルメ観光、歴史観光、スポーツ観光、宗教観光、農業観光、田舎 *rural* 観光、産業遺産観光等が掲げられている。またこうした商品開発の促進策として、「ヨーロッパ遺産」「ヨーロッパ遺産週間」「EU文化遺産賞」の創設等が示されている。

(2)「持続可能な観光業の発展」の背景にあるのは、観光地のクオリティーが自然環境や文化的環境、そして地域社会との関わり等に強く影響されるという事実である。観光業の持続可能性 *sustainability* を確保するためには、ゴミの問題や水、土地、生物多様性への影響といった環境負荷の考慮、あるいはクリーンエネルギーの使用などがこの先大きな課題となる。また、観光業に従事する人々の仕事がまっとうで持続可能であること、さらには地域経済に及ぼす影響を考慮することも重要である。観光業の担い手である労働者が「使い捨て」されていたり、観光業がその地域社会に負の影響を与えているようでは持続可能な発展は実現しえないのである。

(3)「イメージの確立・向上」については説明を要さないかもしれないが、「フランス」や「スペイン」といった個々の国ではなく、ヨーロッパ全体としてのブランドの確立が課題とされている。ここで具体策として掲げられているのはウェブサイト *visiteurope.com* の更なる活用促進である。これは2006年に立ち上げられたもので、ヨーロッパ39カ国の政府観光局が協力しヨーロッパを1つの旅先として宣伝しているという点が特徴的である<sup>6)</sup>。

#### Calypso（カリプソ）について

さて先に述べたEU新観光政策の政策課題(1)競争力強化では、具体的な課題の1つに「観光シーズンの拡張」すなわち「オフ・シーズン」対策が掲げられ、既にスタートしている「カリプソ Calypso」計画の推進が謳われている<sup>7)</sup>。

「カリプソ」とは、2009年にEU委員会によって発案された観光促進計画である（図3参照）。この計画の目的の1つは「通

常ならば旅行することが困難な人々」に観光の機会を提供することで、これはまさに「社会的観光 social tourism」の精神である。もう1つの重要な目的は観光地のオフ・シーズン対策である。つまり「カリプソ」は価格が安く混雑の少ないオフ・シーズンに旅行困難者の観光を促進するという計画なのである。

図3

**Calypso (カリプソ)とは**

- 2009年にEU委員会によって発案された観光\*促進計画 \*社会的観光(social tourism)
- 目的①「通常ならば旅行することが困難な人々」に、観光の機会を提供
- (と同時に)② 観光地のオフ・シーズン対策を支援

価格が安く混雑のないオフ・シーズンにおける旅行困難者の観光を促進

「カリプソ」の主な対象は、(1)青年層 (18 歳～30 歳) (2) 家計にゆとりのない家族 (3)障害を抱えた人々 (4)高齢者の4グループである。いずれも金銭その他の支援がなければ旅行することが困難な人々である。

「カリプソ」の目的である「オフ・シーズンにおける旅行困難者の観光促進」は、主に次の3つの手段によって達成される。1つは「観光交流メカニズム tourism exchange mechanism」である。これはオフ・シーズンに他国の観光客を呼び寄せるもので、財政的支援を伴う。2つ目は「観光クーポン European Holiday Vouchers」で、観光サービスに利用できるクーポン券の発行・流通メカニズムの確立を目指す。そして最後はウェブサイトであり、上に述べた観光交流を促進するウェブサイト(「カリプソ・プラットフォーム」)を構築するとしている。

「カリプソ」では既に多くの具体的研究・検討が進められ、いくつかの報告書もまとめられている。しかしながらこの計画はまだ準備段階にあり、実践はこれからというところである。そこで最後に、「カリプソ」が今後の取組みのモデルとなる先進的事例として取り上げているスペインの観光交流政策を簡単に見ていく。

### スペインの観光交流政策

フランスと並ぶ「観光先進国」であるスペインは、2009年10月から観光交流政策の先駆けともいべき取組みをスタートさせた。「欧州高齢者観光多国間プログラム Europe Senior Tourism Transnational Programme」と呼ばれるこの政策は、スペイン政府、具体的には産業観光省 Ministry of Industry and Tourism が主体となって行っているものである<sup>8)</sup>。

このESTTPの中身を一言で言えば、外国人高齢者を対象としたオフ・シーズン観光サービスの提供及び財政的支援ということになる(図4参照)。対象となるのは55歳以上のEU加盟国在住者で、時期(第1期)は2009年10月から2010年4月、まさにオフ・シーズンである。提供される観光サービスには、7

～8泊までの宿泊、交通、アクティビティプログラム、保険が含まれる。財政的支援として、通常想定されるパッケージの価格から100ユーロまたは150ユーロが割引されるという仕組みである。

図4

**スペインの観光交流政策**

● 概要: 外国人を対象としたオフシーズン観光サービスの販売及び財政的支援

|          |   |
|----------|---|
| 対象者      | 55歳以上のEU加盟国在住者                                      |
| 時期 (第1期) | 2009年10月～2010年4月 (オフ・シーズン)                          |
| パッケージ内容  | 7～28泊までの宿泊、交通、アクティビティプログラム、保険                       |
| 財政的支援    | 通常のパッケージ価格から100ユーロまたは150ユーロを割引 (約12,000円または18,000円) |

ESTTPの第1期はこの4月に終了したわけだが、結論から言えば、かなりの成果が挙げられている。ESTTPの下で実際に観光をした旅行者数は4万5千人、延べ宿泊者数でいえば37万人である。スペイン政府の総投資額は530万ユーロで、税収等による「リターン」は投資額1ユーロあたり1.55ユーロだったと計算されている。経済効果は2,900万ユーロ、スペイン国内でも2,250万ユーロで、600人以上の雇用創出がなされたとのことであった。

### IV. まとめと展望

以上見てきた内容を整理すれば次のようになる。すなわち、第1に、観光振興はいまや社会経済全体の発展にとって不可欠な政策課題となっていること。これは日本においてもEUにおいても同様であった。第2に、「観光先進国」であるEUの新観光政策では、観光業の競争力強化策や「持続可能性」の重要性等が盛り込まれているということ。そして第3に、この競争力強化策の柱の1つである「オフ・シーズン対策」は、一国レベルでは既に実践され成果も出されているということである。

最後に、これらの事実を踏まえての「展望」として、2点ほど述べたい。1つは、観光業に対する国の政策的関与が今後一層強まっていくのではないかとということだ。観光業が社会経済全体の発展にとって重要であると位置づけられた以上、良い悪いは別として、国がこれまではなかったようなかたちで観光業に口や手を出してくる。そうであるとすれば、観光地そしてその全ての利害関係者にとっては、国の政策動向ならびにそれに影響を与える海外の政策動向を注視し、それらを踏まえた「早めの対応」を行っていくことがこれまで以上に重要になると考えられる。

このことと関連して言えるのは、EUの新観光政策のいくつかの項目が、今後日本においても重要な政策課題としてそのまま入り込んでくるのではないかとということだ。今日見てきた中



から具体的に言えば、「観光の多様化」や「持続可能な観光」、そして高齢者対応を含めた「社会的観光」、さらにはその手段としての「観光交流」などである。実際、例えば「観光の多様化」について言えば、既に今年の初めから「エコツーリズム」、「グリーンツーリズム」や「産業観光」等のいわゆる「ニューツーリズム」に関する議論が日本でも進められ、また課題の頭出しレベルとはいえとりまとめもなされている<sup>9)</sup>。

こうした政策動向を注視し、観光業の今後の展望を踏まえながら、先手を打っていくこと。これが「上手なツーリズムの作り方」を考える上での1つのポイントになるのではないかとと思われる。(以上)

- 1) 観光庁『平成22年版 観光白書』2010年7月。
- 2) 『新成長戦略～「元気な日本」復活のシナリオ～』2010年6月閣議決定。
- 3) European Commission, Europe, *the World's No 1 Tourist Destination—A New Political Framework for Tourism in Europe*, European Union, June 2010.
- 4) 『日本経済新聞(夕刊)』2010年9月6日。
- 5) European Commission, *Europe 2020—A strategy for smart, sustainable and inclusive growth*, European Union, March 2010.
- 6) <http://www.visiteurope.com/home.aspx>.
- 7) European Commission, *Calypso Study Final Report*, European Union, July 2010; *Calypso Study Compendium of Good Practices*, European Union, March 2010.
- 8) 以下、本項の詳細については *Calypso Study Final Report*, 4.1, 5.2.4 を参照。
- 9) 観光庁 観光立国推進本部 観光連携コンソーシアム『とりまとめ』2010年8月。

## 茨城の特徴を活かした茨城らしい観光振興 —笠間市の地域密着型ニューツーリズムを中心に— 熊坂 敏彦

### I. はじめに

政府は、「新成長戦略」(平成22年6月閣議決定)の中で、観光を文化遺産や自然環境を活かして振興することにより地域活性化の切り札になるとして、7つの戦略分野の一つに位置づけている。

茨城県においても、2006年に「茨城県観光振興基本計画」が策定され、「2010年までに観光客5000万人」の実現に向けた取り組みが展開され、入込観光客数の増加についてはそれなりの成果をあげてきた。しかしながら、茨城県は首都圏に近く、様々な観光資源に恵まれてはいるが、入込観光客数は5000万人と栃木県の8000万人、群馬県の6000万人を大きく下回り、北関東3県の中で最下位にあって、必ずしも観光振興策が十分とはいえない。そこで、茨城県の観光振興のためには、足元の観光諸

資源を再評価し、それらを活かして入込客数を倍増させるような、かつ、茨城らしい独自の観光振興策が待たれる。

ここでは、茨城の特徴を活かした茨城らしい観光振興策として、地域密着型「ニューツーリズム」をとりあげ、その先行的な事例として笠間市の観光振興策を紹介したい。

### II. 茨城らしい観光振興

北関東3県の中で、茨城県の入込観光客が低位にある理由は何か。たしかに、茨城県には栃木県や群馬県のように国立公園が無く、温泉地が少ない。結果的に地域ブランド力が低い。しかしながら、これをもって諦めてはならない。茨城県の観光の潜在力は他2県にひけをとらないと思われる。茨城県には、筑波水郷国立公園、県立自然公園9ヶ所の観光資源をはじめとして、魅力的な観光資源が数多い。たとえば、五浦(いづら)海岸の温泉地から見える日の出、露天風呂から見える太平洋の沖行く船、四季折々の風情が楽しめる袋田の滝など県北部には魅力的な観光資源が多い。首都圏からの日帰り客や宿泊客をもっと呼び込めるように思われる。総じて、本県観光はまだまだ宣伝不足かもしれない。

さらに、茨城県には県内全域に潜在的な観光資源が沢山あり、それらは地域密着型ニューツーリズムを構成する中に数多くあるように思われる。

### III. 地域密着型ニューツーリズムとは

ニューツーリズムとは、従来型の観光が名所旧跡を団体で周遊するマストツーリズムが主流であったのに対して、全国に点在する埋もれた見所の探訪や地元との交流を楽しむタイプの観光である。国の「観光立国推進基本計画」の中で、地域密着型のニューツーリズムの類型として、次の6つが取り上げられている。①中期滞在型観光：地域との深い交流により豊かな生活を実現するもの。②エコツーリズム：自然環境や歴史文化を対象とし、それらを損なうことなく、それらを体験し学ぶ観光のあり方。③グリーンツーリズム：農山漁村地域において自然、文化、人々との交流を楽しむ滞在型の余暇活動。④文化観光：日本の歴史、伝統といった文化的な要素に対する知的欲求を満たすことを目的とする観光。⑤産業観光：歴史的・文化的価値のある工場等やその遺構、機械器具、最先端の技術を備えた工場等を対象とした観光で、学びや体験を伴うもの。⑥ヘルスツーリズム：自然豊かな地域を訪れ、そこにある自然、温泉やおいしい料理を味わい、心身ともに癒され、健康を回復・増進・保持する新しい観光形態。

それらの中で、茨城県では、特に③グリーンツーリズム、④文化観光、⑤産業観光が有望であると思われる。

### IV. 茨城県の潜在的な観光資源

#### (1) グリーンツーリズム

県央から県南西地域にかけての地域は、肥沃な平地が広がる

豊かな穀倉地帯となっており、米、野菜、果樹など多様な農産物が産出される。その生産額は全国第2位である。本県の緑豊かな農山漁村地域において、そこに滞在し、農業を体験しながら農民と都市住民との交流を図りながら地域振興を図ろうとするものがグリーンツーリズムである。笠間市には、グリーンツーリズムの代表事例として、東日本一のクラインガルテンがある。この他、農家民宿、農家レストラン、農産加工・直売所、観光農園などが具体的な内容である。

## (2) 文化観光

茨城県は、万葉集に数多く詠まれた筑波山やその周辺の古代遺跡、常陸風土記の編纂や国分寺・国分尼寺の建立など、長い歴史と文化を有しており、水戸藩の「大日本史」編纂事業や藩校弘道館、日本三名園の偕楽園に代表される学問や文化の振興が全国に先駆けて行われてきた。文化観光の資源は数多くある。笠間地区には、日本三大稲荷の笠間神社や親鸞聖人ゆかりの西念寺などがある。これら社寺の参拝、芸術・文化の鑑賞、歴史散歩などが文化観光の内容である。

## (3) 産業観光

茨城県の過去10年間の工場立地面積は1000haを超え全国第1位である。日立地区には100年の歴史を誇る高度なものづくり産業が、東海地区には世界最先端の大強度陽子加速器「J-PARC」をはじめ、原子力関係の研究機関が集積し、鹿島地区には鉄鋼・石油化学などコンビナート企業が集積している。さらに、筑波地区には、国の研究機関の3割が集中し、バイオ、ナノテク、ロボットなど200社を超えるハイテクベンチャーが集積するなど、最先端の科学技術の集積が図られている。産業観光とは、こうした地区での工場見学や産業記念館などの見学などである。また、茨城県の伝統的工芸品に指定された伝統的地場産業としては、結城紬、笠間焼、真壁石燈籠があるが、そうした地場産業産地でのものづくり体験なども産業観光の内容である。

## Ⅴ. 笠間市の地域密着型ニューツーリズムへの取組み

笠間市は、大洗町、水戸市、つくば市につぐ県内屈指の観光都市であり、自然資源・農産物（笠間つつじ公園、栗）、歴史資源（笠間稲荷神社、西念寺、合気神社）、芸術文化資源（笠間芸術の森公園、茨城県陶芸美術館、笠間日動美術館、笠間芸者）、産業資源（笠間焼、稲田みかげ石）が豊富に存在する（資料1）。そして、笠間市は、市役所の産業経済部商工観光課や社団法人笠間観光協会が中心となったユニークな観光への取組みを行っている（資料2）。

### (1) グリーンツーリズム：笠間クラインガルテン

この「市民農園」は、総面積4ha、総事業費8億3千万円で、東日本一の規模を有する。主な施設は、①宿泊施設付の市民農園50区画、②日帰り市民農園50区画、③クラブハウス、④農産物販売所、⑤そば処などである。利用者の構成は、東京都44%、千葉県26%、神奈川県14%、埼玉県14%であり、首都圏の団塊の世代から高い人気を得ている。また、国内外からの見学者も多く、地域振興に寄与している。

### (2) 地場産業の観光化：陶炎祭（ひまつり）等

笠間市は、笠間焼、稲田石の2つの地場産業の産地である。

これら地場産業を観光と結びつけるような催事・イベントが年間を通じて開催されている。初窯市、陶炎祭（ひまつり）、道の市、笠間焼フェア、いなだストーンエキシビジョン、匠のまつり、ストーンフェスティバル、陶のオルゴール展などである。その中で最大のイベントが、ゴールデンウィーク中に笠間芸術の森公園で行われる陶炎祭（ひまつり）である。今年で30回を迎えたが、期間中に30万人以上の来客数がある。

### (3) ネットワークづくり：笠間ファン倶楽部

笠間市が観光振興のために、都会と笠間を結びつけるネットワークをつくり、一度来た人をリピーターにするような仕掛け作りのひとつとして、笠間ファン倶楽部は位置づけられる。この会員になると、会員証が発行され、3ヶ月一度「笠間ファン倶楽部通信」が送られてくる。2010年1月現在の会員数は、1465名であり、県内850、東京203、千葉201、埼玉75、神奈川60、栃木22、群馬10となっている。

### (4) 着地型旅行商品：「笠間発見伝」

笠間市と観光協会が連携して作り上げた地域主導の着地型旅行商品「笠間発見伝」は、国の地域密着型ニューツーリズムの内容が数多く盛り込まれた商品である。日時を限定した募集商品ではなく、通年型で顧客が選んで創る旅行商品の先駆けである。客は、インターネットや電話で申し込み、当地集合当地解散で、笠間でしかできない様々な笠間体験ツアーを満喫する。コースは現在17ある。基本形としては、①笠間焼の作家・窯元で陶芸体験ができるコース（産業観光）、②採石場を見て、石彫を体験するコース（産業観光）、③陶芸の美術館を巡るコース（文化観光）、④天然の木でMY箸を作るコース（産業観光）、⑤クラインガルテンでそば打ちを体験するコース（グリーンツーリズム）、⑥英国風庭園でハーブの香りを楽しむコース（グリーンツーリズム）、⑦写経や座禅を体験し精進料理を味わうコース（文化観光）、⑧ふるさと案内人と一緒に愛宕山をハイキングするコース（ヘルスツーリズム）などがある。

利用者は、20-40歳代のカップル、女性同士が多く、地域別には東京、千葉、埼玉、神奈川在住者が多い。最近、県内からの申し込みも出てきた。また、団体で申し込みたいという問い合わせも出てきている。周辺の宿泊施設からコラボのオファーも来るようになった。地域密着型ニューツーリズムの先駆的な事例として注目される商品である。

## Ⅵ. むすび

以上、笠間の地域密着型ニューツーリズムへの取組みを中心にみてきたが、茨城ツーリズムのブランドバリューを向上させるためには、足元の潜在的な観光資源を再発見して、それぞれの地域の特徴を活かした茨城らしい観光の振興が重要であると思われる。とりあえずは、首都圏からの日帰り観光客を増やしていくことが第一歩であろう。そうした中で、観光客に茨城の良さを知ってもらい、リピーターを増やし、宿泊客へとつなげてゆく地道な努力が必要となろう。ここで取り上げた笠間市の取組みは、そうした地域密着型ニューツーリズムの先駆的な事例として参考になるものと思われる。



（資料1）笠間の主な観光資源

|        |   |
|--------|---|
| 自然資源   | 笠間つつじ公園（7ha、25種8500本）、佐白山麓公園（笠間藩下屋敷跡、桜）、北山公園（桜）、あたご天狗の森（桜、スカイロッジ）、シヤクナゲ（鳳台院、17千本）、八重の藤・大藤（笠間稲荷神社、樹齢400年）、かたくり群生地（福原地内）、すずらん群生地（上郷地内）、ヒメハルゼミ（天然記念物、片庭地内）、ホタル（駒場地区、南指原地区） |
| 歴史資源   | 笠間稲荷神社（1350有余年、日本3大稲荷神社）、西念寺（親鸞聖人ゆかりの寺）、笠間城跡、大石邸跡（大石内蔵助の祖父の居宅跡）、合気神社（合気道の開祖・植芝盛平翁が合気道を完成させた地）   |
| 芸術文化資源 | 笠間芸術の森公園（55ha、総工費150億円）、笠間工芸の丘（体験工房、展示室、販売）、茨城県陶芸美術館（東日本初の陶芸専門美術館）、匠工房・笠間（県窯業指導所）、笠間日動美術館、春風萬里荘（北大路魯山人）、笠間稲荷美術館、音楽によるまちづくり（クールシェヴュール国際音楽アカデミー等）、笠間の芸者衆                  |
| 産業資源   | 笠間焼（企業数250社、出荷額14億円）、稲田みかげ石（企業数70社、出荷額15億円）、石の百年館（みかげ石の歴史資料館）、笠間クラインガルテン（東日本最大規模）   |
| 特産品    | 栗、菊、梅、米、地酒、いなり寿司、常陸秋そば、自然薯  |

笠間市「笠間市観光振興基本計画」等より作成

（資料2）笠間市におけるニューツーリズムへの取組み

| 類型        | 内容  | 笠間市の取組み                                     |
|-----------|---|---|
| 長期滞在型観光   | 地域との深い交流により豊かな生活を実現するもの。  | クラインガルテン                                    |
| エコツーリズム   | 自然環境や歴史文化を対象とし、それらを損なうことなく、それらを体験し学ぶ観光のあり方。                       | 笠間発見伝                                       |
| グリーンツーリズム | 農山漁村地域において自然、文化、人々との交流を楽しむ滞在型の余暇活動。                               | 笠間発見伝（そば打・洗米）<br>クラインガルテン<br>笠間ファン倶楽部       |
| 文化観光      | 日本の歴史、伝統といった文化的な要素に対する知的欲求を満たすことを目的とする観光。                         | 笠間発見伝（アート巡り）<br>クールシェヴュール音楽祭                |
| 産業観光      | 歴史的・文化的価値のある工場等やその遺構、機械器具、最先端の技術を備えた工場等を対象とした観光で、学びや体験を伴うもの。      | 笠間発見伝（陶芸・石彫）<br>陶炎祭<br>匠のまつり<br>ストーンエキシビジョン |
| ヘルスツーリズム  | 自然豊かな地域を訪れ、そこにある自然、温泉や身体に優しい料理を味わい、心身ともに癒され、健康を回復・増進・保持する新しい観光形態。 | 笠間発見伝（ハイキング）<br>マラソン大会                      |

国土交通省「観光立国推進基本計画」より作成

笠間における地域密着型ニューツーリズムの事例

My 箸作り（左右写真）



体験陶芸



座禅体験



地方空港活用の諸条件

—秋田空港の成功事例と国際観光へ整備すべき諸点—  
箱山 健一

以下では二つの成功事例を紹介する。まず、フィルム・ツーリズムで観光ブランド・バリューの構築に成功した秋田の事例。次に、茨城への海外インバウンド旅客を増加させていく際に事前に解決しておくべき課題である語学の問題の成功例として韓国の事例である。

I. 茨城フィルム・ツーリズムの可能性

観光において茨城県が他の都道府県と比較して圧倒的に勝っている点の一つが映画やテレビのロケーションの多さである。撮影所が所在する東京と京都を別格とすれば、茨城県は全国トップと云って良い。茨城県の利点は、何と云っても、東京から日帰り圏内であることだ。ロケ班自体は宿泊しても宜しいのだろうが、主役級のタレントは他の出演番組等の都合があるため、夜には東京に帰着出来るという点がロケ地としての圧倒的な魅力となる。

名画のロケ地を回る観光旅行をフィルム・ツーリズムと呼ぶ。観光地のブランド・バリューの形成においてメディアに取り上げられることの影響力はとても大きい。以前「冬ソナ」ブームの際に、韓国のとある田舎町に日本からの団体ツアー客が殺到して大変な賑わいになったことは、記憶に新しい。

フィルム・ツーリズムで最も成功したのが1953年の「ローマの休日」である。当時のアメリカはレッド・ページが盛んな頃でアメリカ国内では自由な映画製作に困難が伴った。他方、ヨーロッパには映画表現を芸術として寛容に受け入れる気風があり、また、当時はドル高での固定相場制であったから、経費も安く

で済んだ。こうして全編ローマ・ロケで撮影されたのが「ローマの休日」である。今日でこそローマは世界屈指の観光地でファッションモードの発信地であるが、1953年当時は第二次世界大戦で疲弊し、社会インフラの整備も遅れており、観光地としての価値はあまり高くなかった。しかし、「ローマの休日」がアカデミー章を受章したことで(主演女優賞、脚本賞、衣装デザイン賞)、この映画でとりあげられたロケ地が一躍注目を浴びた。少なからざるアメリカの若者が戦時中にイタリア戦線に従軍した経験があった。大西洋旅客が客船から航空機へ切り替わって海外旅行が一部の富裕階級の特権でなくなりつつあったこともあって、新婚旅行やパッケージでアメリカから再びローマを訪れる観光客が激増した。観光ばかりでない。映画で使われたFIATの小型車、ベスパのスクーター、ジェラートのアイスクリーム、オードリー・ヘップバーンが着用したジバンシィなどの工業製品は、この映画によって大いに有名になった。観光地としてのローマは映画「ローマの休日」によって作られたと云って過言でない。

2009年に「水曜劇場」を復活させたTBSは、「ドラマのTBS」の威信をかけて韓流ドラマを初めてゴールデンタイムにぶつけたのだった。

制作段階から日本側が制作に加わったことで、韓国ではそれまで全く無名だった田沢湖温泉街を作品の主要なロケ地に採り上げさせた。また、秋田県の観光当局と緊密に連携して「田沢湖スキー場」「男鹿水族館」「横手城のかまくら」「なまはげ太鼓」など県内の主要な殆どの観光地の映像をドラマの中に採り込んだだけでなく、「田沢湖辰子像」の前でのシーンが前半のロマンスの山場に来るようにシリーズ構成している。韓国は大陸性の気候のため、冬の寒冷が厳しい割に積雪は少なく、秋田の積雪はノスタルジックな光景である。また、スキーは韓国では極めて歴史の浅いレジャーないしスポーツであり、バブルの頃の日本のようにスキー場は高級感のあるリゾートである。かくて劇中に冬の秋田の情景を効果的に用いた秋田県は「あのドラマのロケ地に行ってみよう！」冬の観光地としてのブランド・バリューの構築に一気に成功した。韓国からの観光客にとって、「秋田」は「ニセコ」に劣らないアジアのウィンター・リゾート・ブランドとなったのである。

秋田空港には、2001年10月から大韓航空ソウル便が定期就航しており、現在、仁川空港との間を週3回往復している。

「IRIS」放映前の韓国における秋田の知名度はゼロに近く、リーマン・ブラザーズ・ショック以降の景気低迷や円高ウォン安にで旅客数が減少し続け、2010年3月を以て運休が予定されていた。ところが、ドラマ「IRIS」のロケ地に使われたことで冬の観光地として韓国で一躍注目を浴び、秋田便の旅客数が激増した。このため、大韓航空秋田便の運休は延期となって現在に至っている。ドラマ「IRIS」に主演したイ・ビョンホン氏は、このIRIS効果の功績により、「龍馬伝」主演の福山雅治氏らとともに10月20日に日本の観光庁長官表彰を受ける。

秋田県がドラマ「IRIS」でやってのけたことを、日本一のロケ地茨城県が何故出来ていないのだろうか。「大洗水族館」が「男鹿水族館」に劣るとは思えないし、太平洋の海浜の情景には秋田の冬景色とは別種の魅力がある。しかし、水族館にせよスキー場にせよ、それ自体は今時何処にでも代替物は存在する。「あの水族館」「あのスキー場」というブランドバリューがなければ、わざわざ国際便に乗ってまで訪れてみたいとは思わないだろうし、思ってもらえない。観光資源が、それが単に存在するというだけで魅力となるような事例は稀有である。重要なのは観光資源そのものの存在如何でなく、「他処でなく其処へ行ってみよう」と思わせる魅力の演出である。閉園の危機に立った地方の動物園に行動展示を採り入れて「上野動物園」を上回る日本一の来場者数をもたらした小菅正夫の「旭山動物園」の実例が、このことを雄弁に物語っている。

さて、茨城フィルムツーリズムであるが、現状では茨城県の観光に殆ど結びついていない。理由は二つある。

第一に、映画やTVにおいて、秋田県と比較するまでもない膨大なシーンが茨城県内でロケ撮影されているとはいえ、その殆ど全てが劇中で無名の雑多なシーンとして扱われており、そもそも、そのドラマのどのシーンを茨城県で撮影したのか殆ど

### フィルムツーリズムの成功例①

■ 名画のロケ地になったことで、ローマは史跡観光地としてのブランドバリューを獲得

フォルム・ロマム (セブティクス観光部門)  
 トレヴィの泉  
 スパイン広場  
 バルベネ (カポッカ)  
 コロッセオ  
 真実の口  
 サンタジコ口城  
 ナブエレ川  
 コロンナ宮殿  
 バルベネ宮殿  
 ナブエレ宮殿  
 トラヤヌスの記念柱  
 ヴィットリオ・エマヌエーレ記念堂  
 ヴァネチア広場  
 ナブエレ・レオナルド通り (航空市場)  
 赤十字病院  
 サンタ・マリヤ・イン・モンテサント教会  
 サンタ・マリヤ・イン・ミラーコリ教会  
 赤十字門 (フランミニ門)  
 赤十字病院  
 サンタ・マリヤ・イン・コスモデイン教会  
 フォルム・ローマの神殿  
 サン・ピエトロ大聖堂

日本におけるフィルムツーリズムで、地域経済への経済波及効果に定評があるのが1987年「独眼竜正宗」以降のNHK大河ドラマである。今年の「龍馬伝」放映開始直後の2010年1-3月期における都道府県別延べ宿泊者数伸び率で高知県は前年同期比+15.6%で伸び率全国2位と観光客を大いに増やした。ところが、その龍馬人気を上回る+19.6%を達成したのが秋田県だ。秋田県への観光客急増は旺盛な海外インバウンド需要に牽引された結果だった。同期における都道府県別外国人延べ宿泊者数伸び率は秋田県が+156.9%(約26倍!)と突出していた。

2009年10月から12月にかけて韓国KBS第2テレビでドラマ「IRIS」が放映された。人気俳優イ・ビョンホン主演のスパイアクションで、アメリカFOXテレビが放映した「24-TWENTY FOUR-」を意識した大作である。韓国で平均視聴率30%を越えた。

同作品には放映権購入を前提に日本のTBSが制作委員会に加わり、制作費の一部拠出や意見交換を行なった。TBS系列水曜21時の「水曜劇場」枠は「時間ですよ」「寺内貫太郎一家」「ムー一族」などの所謂「久世ドラマ」を送り出した名門であるが、久世光彦が独立した後の1982年に休止となっていた。

判別出来ない。このため、折角のロケ大国でありながら、映像が茨城県の観光・ブランド・イメージに焦点を結ばない。その理由として、映画やTV番組の制作会社は主に東京に所在し、都内の撮影所では撮影し難い景観の借景のため、少なくとも主演級の出演者が日帰り出来る圏内でロケを組み、県内のフィルムコミッションがこのロケ隊に便宜を図る。したがって、ロケ隊はロケ地の無名性を求め、観光地とは見ない。一方、フィルムコミッション側はロケ件数が多いことで満足して企画段階から介入したいとは考えない。

第二に、茨城空港との関連でいえば、茨城空港便就航地は神戸・ソウル・上海であるのに、フィルム・コミッション側は東京からのロケ申込件数に満足しているのか、京阪神・ソウル・上海の映像関連会社に茨城県を売り込む努力を殆ど行っていないように見受けられる。ソウル・上海の映像関連会社にとって茨城県は、IRIS以前の秋田と同様に、未だ無名のままである。

## II. 語学と案内

アジア(とくに中国)からのインバウンドのファーストビジットの一般的な形態は、成田から関空へ(または逆ルートで)主要観光地を最低限の日数で通り抜ける所謂「ゴールデンルート」の団体ツアー旅行である。このゴールデンルートの東端の一部を成田に替わって茨城空港が担い得る可能性があるとはいえ、これではインバウンドが秋葉原かTDLへ直に抜けてしまっただけで茨城県に殆どお金が落ちない。茨城空港利用の海外インバウンドの一部が茨城観光へ向かうとすれば、ファーストビジターは考え難い。限られた日数内に茨城訪問まで加えたならば、ゴールデンルートの主要観光地の何れかを犠牲にするかまたは滞在日数をそれなりに増やす必要があり、最低限の日数での団体ツアーにはまとめ難いからだ。

茨城インバウンド・ツーリズムにマーケットが成り立つとすれば、主な市場は来日リピーターである。初来日はゴールデンルート観光だったとして、再訪日時には「前回とは違うところへ行きたい」と考えるのだから。ところが、リピーターは団体ツアーをあまり好まず、一般に個人旅行の比率が高い。ツアー旅行は行動に時間の縛りが多く自由に行動し難いからである。だから、茨城インバウンド・ツーリズムは、中国等からの個人旅行者に correspond 出来るように準備しておかなければならない。個人旅行で課題となるのは語学と案内である。不幸なことに日中韓台四か国民は共通して英語が不得手だ。「茨城空港でタクシーが中国人グループを乗せたら、あちらは誰一人として日本語が出来ない。こちら中国語は出来ない。そして誰一人として英語は出来ない」ということが普通に有りうる。宿泊施設や交通機関の関係者は当然に想定しておかなければならない。

売り子は速やかに片言の単語を覚えるだろうが、中国語・韓国語の教育に泥鰌式に注力しても効果的でない。韓国の事例を紹介しよう。

ソウルではタクシー運転手は地方から出て来た低賃金の働き手の代表的な職業である。ソウル・オリンピックを体験した韓国では外国人観光客の対応が課題となった。日本ならば、タクシ

ー会社が英会話教室を用意するのだろうが、韓国では悪質業者の排除や運転手のマナーの改善が優先課題であり、運転手の語学教育にまではとても手が回りかねる。そこで、携帯電話の普及が早かった国情を活かして、案内センターで待機している通訳者と携帯電話を介して三者で会話出来るシステムを用意した。ドアガラスに右写真のステッカーを貼付して



あるタクシーでサービスを利用出来る。茨城空港を利用するインバウンド茨城観光が増大するとき、求められるのは英語よりもむしろ中国語や韓国語による会話能力だ。即席語学教育ではとても賄えそうにない。交通機関、宿泊施設等のために、こうしたシステムを用意すべきだ。

街路や建物の表示の日英中韓四か国語表示化も速やかに改善しなければならぬ課題である。現在、日本の主要観光地では表示の四か国語化が進んでおり、茨城県内では空港、主要駅での改善が行なわれたが、市内は殆ど手つかずのまま。日英二か国語表記のようにみせかけた単なるローマ字表記も珍しくない。県当局は、空港利用者への各種優待料金の設定に用いている予算の一部を県管理施設の四か国語表示化のために充当すべきでないか。現状のままでは、茨城県を訪れた日本語も英語もままならない観光客は途方に暮れてしまう。

引退や結婚等で職場を退職した者が観光客のための施設案内を買って出るボランティア・ガイドを欧米ではよくみかける。かつてそこで実際に勤務していたのだから、実に詳しい。また、人材の有効活用の点からいっても望ましい。

案内士は国内では極めて少ない。不幸なことに日本では案内士制度の法規制が極めて進んでいて、ボランティアでの案内行為は禁止されてはいないものの、無報酬を義務付けられており、違反すれば刑罰に処せられる(通訳案内士法)。このため、ボランティア・ガイドの活動が低調だけでなく、プロの案内士制度の知名度もあがらない。茨城県での国際インバウンド観光客を増加させるとして、そのためのインフラ整備が間に合わない。したがって、観光客案内士が添乗するのが好ましいが、プロの案内士の料金は個人観光客には高額に過ぎる。そこで、市民のボランティア・ガイドが張り付くしくみの拡充とその宣伝が有効だと思われる。

以下の諸点を再度強調して、このシンポジウムを締めくくりたい。

第一に、観光は現代の地域経済を支える重要産業である。グローバル化の時代にあって、いつまでも製造業主体の地域経済の感覚であっては、地域の斜陽化はまぬがれない。とくに若年層の非団体客の取り込みが市場の将来性への鍵となる。

第二に、茨城県の観光行政・観光事情は、現状では東京圏からの日帰り観光に偏っている。茨城空港を有効活用するには、ソウルや上海からのインバウンドに活路がある。

第三に、茨城県に観光資源がないわけでないが、国際インバウンド観光客を受け入れるには諸事準備不足である。(以上)



## LSC(Language-specific cognitive)-system 仮説について

池松峰男

### On the working hypothesis of LSC (Language-specific cognitive)-system

Mineo IKEMATSU

**Abstract:** An experimental design is proposed for examining if LSC (Language-specific cognitive)-system restores its function even in adult when some factors are removed. The LSC-system inhibitors are proposed as such a factor to consist of motivation, culture, instruction, physiological elements, etc. The possible results during the course of removal of LSC-system inhibitors are also shown for the decrease in the right-hemisphere contribution and in the language-specific functional separation in the Wernicke's area, and the variation in the peak (N400) of the event-related potential (ERP).

#### 1. はじめに

我々大人は一般に「その他」のコトバを話すことができない。これは第一言語 (L1:母国語) を当たり前のように獲得してきたこととは対照的である。この問題は、第2言語 (L2) 習得研究において、学習者の年齢的要因が習得のメカニズムにどのように関与しているか、というテーマで長年議論されてきた。もし大人の L2 学習者が母語話者の言語能力を習得不可能ならば、その原因は何か。言語習得には単にコトバだけではなく、個人差、文化的社会的要因など、さまざまな要因が絡んでいるため、この疑問に対する研究者の見解は、これまでのところ統一されていない。

言語習得は一般に、年齢を重ねるにつれて困難になるというのが定説(1-3)である。Chomsky(4)は人間には L1 獲得を可能とする生得的機能(Language Acquisition Device: LAD)が備わっており、言語環境からの入力に加わることによって子供の脳内に文法が生成されていくという「生成文法」(Universal Grammar: UG)の考え方を提唱した。Felix(5)は UG と同義の言語占有の認知能力を Language-Specific Cognitive system (LSC-system)、一般的問題解決能力を Problem-Solving Cognitive system (PSC-system)と定義し、形式操作期 (Piaget による発達第4期、おおよそ12歳)以前の L2 学習者は L1 の幼児同様、LSC-system を使って言語習得をするものの、それ以降の学習者は、もう一方の認知能力である PSC-system と競合すると主張した。

他方 Flynn(5)は UG が大人でも機能していることを示していることから、LSC-system が大人でも消失していないと考えてよいと思われる。しかしながら Flynn(5)も述べているように、大人の L2 学習者間での習得レベルの差に関しては、理由が不明のままである。

このようにこれまでのところ L2 習得理論は未完成であり、大人の L2 学習者は試行錯誤を余儀なくされている。本論では、大人が広く一般的に用いることができる学習法の開発を目指し、大人の

LSC-system の機能消失の原因とその原因を取り除くことによる LSC-system 顕在化を提案し、その可能性を確認するための実験計画について述べる。

#### 2. 仮説 (LSC-system 阻害要因とその除去による LSC-system の顕在化)

前節では LSC-system が大人でも残存していると考えることが妥当であること、そして、とはいえ L2 習得レベルに個人差があることが認められていることについて述べてきた。では習得レベルの差は何に起因するのだろうか。筆者自身の経験からいえるのは、「大人」というひとつのくりでは類別不可能なほど、学習者の特性は様々であるため、従って原因も様々であるということである。これは例えば、「学習動機」の強弱、「文化的背景」の違い、「学習法」の適性、「学習環境」の良否、あるいは生理学的要因 (脳機能や感覚機能の性能低下) などである。これらの「個人差」はたとえ最良の学習法が存在したとしても、学習者の習得レベルに影響を及ぼすことは論を待たない。

L2 習得に影響を及ぼすこれらの要因を何らかの方法で除くことができれば、大人においても機能していると考えられる LSC-system が L2 においても L1 獲得時と同様の働きをするのではないだろうか。このスキームに類似の方法論を適用して成果を上げている例がある。トマティス・メソッドと呼ばれるその方法は、L1 の周波数範囲に限定されてしまう聴覚器官が有する元来広い可聴周波数範囲を特殊な訓練によって元の状態に戻す、というもので、L2 の持つ周波数範囲への聴覚反応を向上させることで L2 習得を促している。このトマティス・メソッドは聴覚の可聴範囲限定という生理学的要因を「除去」することで本来の機能を顕在化させたといつてよいだろう。筆者は本方法に鑑み、その他の「要因」も類似の方法で除去することができれば本来の機能をより顕在化させられると考える。

そして上記の L2 習得に悪影響を及ぼす要因を「LSC-system 阻害要因」と呼び、この LSC-system 阻害要因が除去されれば見掛け上消失したようにみえていた LSC-system が顕在化する、との仮説（図 1 および図 2）を提案する。

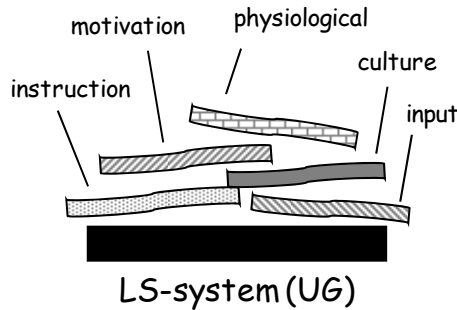


図 1 種々の「LSC-system 阻害要因」によって見掛け上消失したかに見える LSC-system

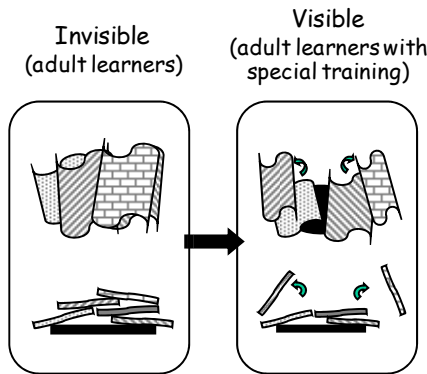


図 2 「LSC-system 阻害要因」の除去による LSC-system 顕在化仮説

3. 仮説確認実験計画

3.1. L2 脳内表象（分散処理から機能局在へ）

LSC-system 阻害要因除去の効果を確認するには、被験者（学習者）の体調（心理状態や健康状態）に影響される出力（発話や試験結果）よりも体調に影響されにくいと考えられる脳活動の変化を調べることが適している。そのため既往の研究においても古くから L2 習得レベルと脳活動との関連が調べられてきた（6-8）。この中で Genesee (8)によるパイリンガルを対象とした ERP (Evoked Response Potential)を用いた研究から、L2 習得時期が遅くなるほど右脳の反応が左脳より速くなることが明らかとなり、L2 習得時期と右脳の関与との関係が実証された。そして、脳機能可視化手法の発達や ERP を用いた実験結果に対する別の解釈が提案されるにつれ、習得レベルの差がいかにか左右半球脳機能へマップされるかが明確になってきた。

例えば、脳機能可視化手法の一つである fMRI (functional Magnetic Resonance Imaging) を用いた Dehaene ら (9)の研究において、パイリンガルの L1 はどの被験者においても脳の同じ領域を活性化するのに対し、L2 が活性化する領域は被験者によって異なるという結果が得られている。彼らはこの結果をもとにパイリンガルの L1 が左脳の生得的言語野に依存しているのに対し、L2 は左脳におけるこの言語野とは無関係である可能性を指摘した。そしてさらにパイリンガルの L2 習得レベルが高くなるにつれて L2 も左脳に依存するようになる、つまり L2 機能は左右に分散しているものの、その習得レベルが高くなる（L1 に近づく）に従って左脳に局在するようになる、との仮説を提唱している（図 3）。

同時期 Ojemann と Whitaker (10) は複数の言語を習得している被験者への大脳皮質刺激実験によって、Broca 言語野（前頭葉下前頭回腹側部に存在する、主に発話に関わる中枢）周辺、そして Wernicke 言語野（側頭葉側頭平面から上側頭回後部にかけて存在する、主に話し言葉の理解に関わる中枢）において、各言語（L1, L2...Ln）に特異的に活性化する領域を見出した。そして最近になって Ojima ら (11)は子供の L2 習得過程を ERP により 3 年間追跡した結果、L2 習得レベルが高まるにつれ脳活動が L1 のものに近づいていくことを明らかにしている。

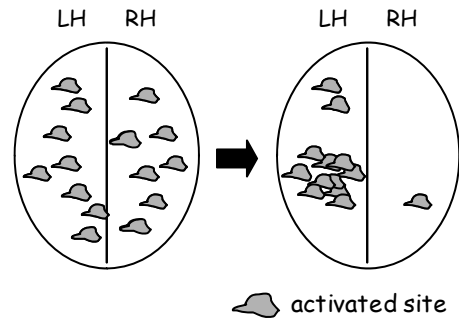


図 3 L2 習得レベル向上に伴う L2 脳内表象の左脳局在化

以上の既往研究結果から L2 脳内処理は学習過程で以下のように進行すると考えられる。すなわち、

- ① L2 は一旦、Wernicke 野（左側頭葉）、Broca 野（前頭葉）、角回・縁上回（頭頂葉）などの言語中枢以外の領域を使って処理される。
- ② その後習得が進むにつれ L2 は L1 が局在している言語野で処理されるようになる。その際、局在領域での各言語はそれぞれに割り当てられた（各言語について独立の）領域で（分散）処理される。
- ③ さらに習得が進むと局在領域での各言語分散処理もなくなり、L1 処理が行われている領域で L2 も処理されるようになる。

3.2. 仮説確認実験の提案

L2 習得に伴う脳活動は上述のように「機能分散から機能局在へ」と変化する。従って、今回提案する仮説（3.1. ①～③）の検証においては、LSC-system 阻害要因の除去操作（指導）による機能局在



促進の有無を確認することが必要である。

ここでは仮説検証のための LSC-system 阻害要因と LSC-system 阻害要因解除方法のそれぞれが具体的に特定されたと仮定、特に音声言語に焦点をあて、L2 処理機能局在の促進効果を評価する実験を実施するための計画について述べる。

### 3.2.1. 方法

#### 3.2.1.1. 学習

##### (標的言語)

実験に用いる L2 としては特に指定はないが、被験者が学習したことのない言語を選択するのが、学習履歴の影響を避けるためにも望ましい。被験者として、以下の 4 種類を対象とする。

##### (被験者)

###### Subject 1: Natives

実験に用いる言語 (標的言語) の母語話者。

###### Subject 2: Bilinguals (early and late)

標的言語の early learner と late learner。Early learner として 9 歳までに学習を開始した者、理想的には L1 と同時に習得開始したものを選択する。Late learner としては 9 歳以降、より正確を期するため大人になってから学習を開始した者を選択する。

###### Subject 3: Non-natives with a “LSC-system restriction factor-relief program” and learning materials of the target language

標的言語の学習経験がないものに、LSC-system 限定解除プログラムを施し、同時に標的言語学習教材を学習させる。

###### Subject 4: Non-natives with the materials only

標的言語の学習経験がないものに、Subject 3 と同様の標的言語学習をさせる。

##### (コントロール)

###### Control 1: Quantity of input

Subject 4 には Subject 3 に対するコントロールとして Subject 3 が受ける LSC-system 限定解除プログラムとは異なる内容で同等の刺激量を与える。これは例えば一定の処理が施された聴覚刺激がプログラムに含まれる場合、非処理刺激を統制刺激とする、ということである。

###### Control 2: Learning period of Materials

Subject 3 および Subject 4 に対して実施する Materials を用いた標的言語学習内容および学習時間を統一する。具体的には、実験期間中は同一教室で同時に学習させ、教室外での学習を可能な限り抑制するといったことである。

#### 3.2.1.2. 測定

##### Check 1 (fluency): Native judges

音声言語に関連した LSC-system 限定解除プログラム (以降、本プログラムとよぶ) 実施による標的言語の習得成果をここでは、「流暢さ」で判定する。

具体的には、標的言語のスピーチサンプル 10 種類を被験者に読んでもらい録音する。被験者数 x10 のデータをランダムに並べ替え、標的言語の Native speaker が発音を 5 段階で評価する。ただし、judge の経験の有無によって評価が異なることがある(12)ため、実験を実施する際は先行研究を参考に judge を人選する必要がある。Nativelikeness については、Flege ら(13) の基準を用いる。

##### Check 2 (proficiency : 言語遂行能力): Test

本プログラム実施による標的言語の習得成果をここでは、「言語遂行能力」で判定する。具体的には標的言語の検定試験を用いる。

##### Check 3 (syntax formed : 構文の定着): ERP

本プログラム実施による標的言語の習得成果をここでは、「構文の定着」で評価する。

具体的には、正常能動文と非構文的能動文を聴きとってもらい、その際現れる ERP を記録する。非構文聴取後 400 ms に現れるピーク(N400)の潜時 (遅れ) および強度を測定する (図 4)。

##### Check 4 (right hemisphere contribution & functional division in Wernicke’s Area): 例えば OT (Optical Topography (14))

本プログラム実施による標的言語の習得成果をここでは、「音声言語の右脳処理の割合」で評価する。これは 3.1. で述べたように、音声言語が主に左側頭葉で処理されるものの、L2 学習開始時に L2 は左右両半球を使って処理がなされ、学習の進行に伴い L1 同様、左側頭葉において処理されるようになるためである。具体的には、Check 1 で用いたスピーチサンプルおよび同じ意味の L1 をそれぞれの言語処理の Native speaker が読み、それを被験者が聴取した際の脳活動を記録する。右脳処理割合は標的言語聴取時の脳全体の活動領域に対する右脳活動面積の割合で評価する (図 5 a)。また音声言語処理の Wernicke 野における機能分担 (3.1. 項参照) は標的言語スピーチ聴取時の活動から L1 スピーチ聴取時の活動を差し引いた際の活動を Wernicke 野での位置と強度で評価する (図 5 b)。

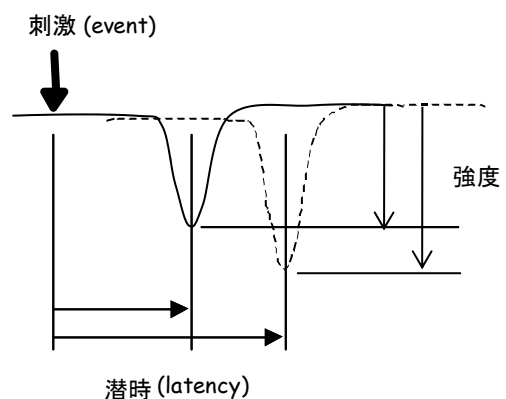


図 4 L2 習得レベル向上に伴う ERP 変化

#### 3.2.2. 予想される結果

Check 1-4 から得られる (と予想される) 結果、すなわち学習時間に対する 1. 習得レベル、2. 右脳処理割合、3. Wernicke 野機能分担

およびそれらの結果に対する考察を述べる。

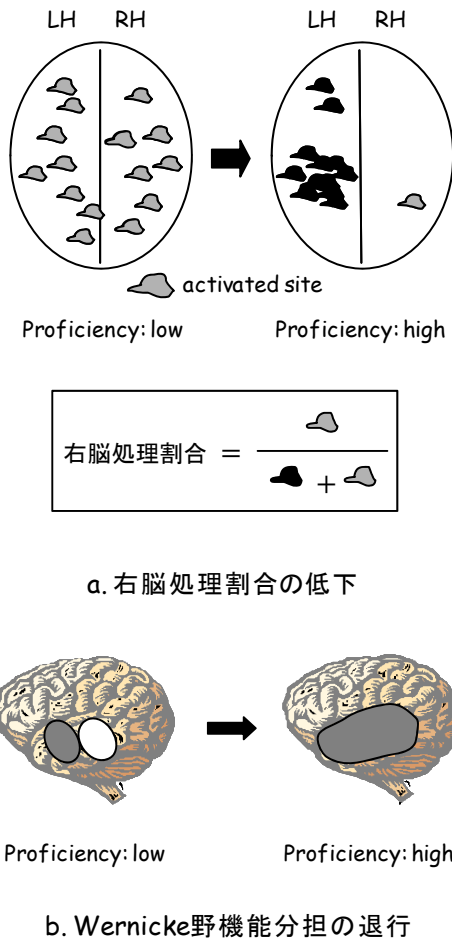


図5 L2 習得レベル向上に伴う脳活動領域変化

3.2.2.1. 習得レベル

図6に学習時間に対する習得レベルの関係を模式的に示す。Material だけで学習した場合、学習時間とともに習得レベルは向上する（実線）。但し、この関係は必ずしも線形ではなく、劇的な向上と一時的な停滞を繰り返すのが一般的である。また、この向上と停滞の割合および期間は学習者によって異なる上、各学習者におい

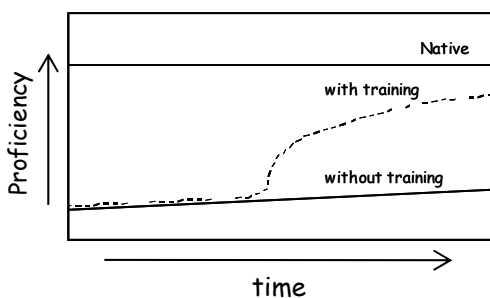


図6 L2 習得時間と習得レベル

ても学習意欲等の変化によって都度影響を受ける。本図はこれらの特性は盛り込んでおらず、学習レベル向上の傾向を模式的に示したに過ぎない。

実線で示した一般的な学習レベル向上に対して、LSC-system 限定解除方法による訓練によって LSC-system 阻害要因を解除された学習者の学習レベルは、その訓練を境に大きく異なるようになっていくと予想される。習得レベルの変化様式が LSC-system 阻害要因を除去することで影響を受けるのであれば、学習者間の習得レベルの差が LSC-system 阻害要因に起因することになる。

3.2.2.2. 右脳処理割合

図7に学習時間に対する右脳処理割合の変化を示す。Material のみによる学習者に対して、LSC-system 限定解除方法による訓練を受けた学習者では、右脳での言語処理割合が減少して、より Native に近づいていくと予測される。これは、大人の学習者では LSC-system 阻害を克服するために、L1 処理機能が局在する左脳だけでなく、右脳を含めた言語機能処理専用でない領域を援用していると考えられるためである（L2 習得レベルの高い late bilingual ほど、右脳処理割合は低い（3.1参照））。従って、LSC-system 阻害要因の一つを除去した分だけ右脳を含めた左脳以外の領域の負担が減少し、結果的に右脳処理割合の低下へとつながる。

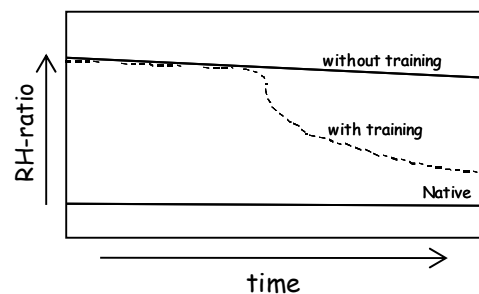


図7 L2 習得レベル向上に伴う右脳処理領域の低下

3.2.2.3. Wernicke 野機能分担

図8に学習時間に対する Wernicke 野の機能分担の変化を示す。Monolingual natives では機能分担はなく、Early bilingual において機能分担が見られると考えられる。LSC-system 限定解除方法による訓練を受けていない学習者では、Monolingual natives 同様、機能分担は見られないのに対し、訓練を受けた者の機能分担は訓練を境に Early bilingual のレベルに近づいていくと予想される。

3.2.2.4. 構文の構築

図9に学習時間に対する ERP N400 の潜時と極性の変化を示す。LSC-system 限定解除方法による訓練を受けた学習者は、訓練を境に N400 ピーク強度が一段と強くなり、潜時も低下していく。他方、訓練を受けていない学習者は、ピーク強度・潜時において、それぞ

れ学習時間に応じた増加と減少を示すと予測される。

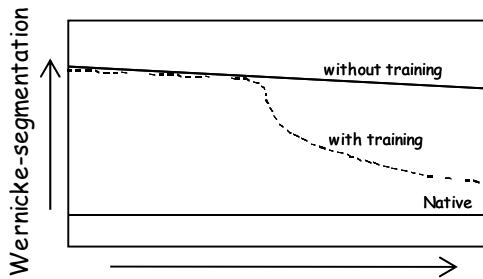


図8 L2 習得レベル向上に伴う Wernicke 野機能分担の退行

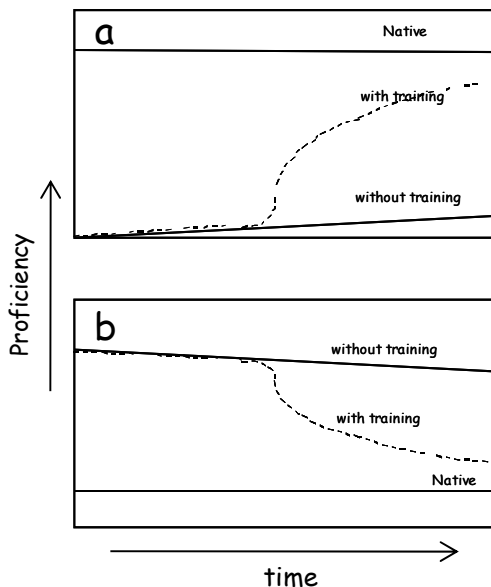


図9 L2 習得レベル向上に伴う a. N400 強度及び b. N400 潜時の変化

### 3.2.3. 予想結果に対する考察

実験の結果が上述の通りになれば、第1に本研究の仮定、すなわち LSC-system 阻害要因が L2 の L1 レベルに到達しない原因の一つであることが実証されたことになる。ただし上述の予測は理想的であり、実際の結果が全てこの通りになる可能性は低いと思われる。特に最後に示した構文の構築については、たとえ LSC-system 限定解除による訓練を受けたとしても N400 が Native のものに劇的に近づくことはないだろう。その理由の第1に、LSC-system 阻害要因には多くの要素がその候補として挙げられ、しかもそれらが全て排除されて初めて L2 の L1 レベル到達度が実現すると考えられるためである。理由の第2に、LSC-system 自体が加齢とともに変化して、たとえ大人になって維持されているとしても、その機能が子供の LSC-system とは異質なものになっている可能性があることが挙げられるためである。しかしながら、本稿で提案した阻害除去の中のとえ一つ

でもその除去効果が得られれば、それは大人においてもなお LSC-system を活用可能であることを意味している。

## 4. 今後の課題 (限定解除方法の提案)

いわゆる臨界期を過ぎた大人に LSC-system が存在することを前提に L2 習得レベルの差が「LSC-system 阻害要因」によって引き起こされるという仮説を提案し、この仮説を実証するための実験計画について述べた。今後の課題は、LSC-system 阻害要因のリストアップおよびそれぞれの L2 学習阻害過程を、実験を通じて明らかにすることである。そして更にそれぞれの阻害要因について、それらの除去方法とそれに基づく L2 学習方法を提案していかなければならない。

## 参考文献

- 1) Krashen, S.D. Lateralization, language learning, and the critical period. *Language Learning*, 23 (1973) 63-74.
- 2) Curtiss, S. *Genie: a Psycholinguistic study of a modern-day "Wild Child."* Academic Press (1979).
- 3) Hakuta, L., Bialystok, E. and Wiley, E. Critical Evidence: A Test of the Critical-Period Hypothesis for Second-Language Acquisition. *Psychol. Sci.*, 14(1) (2003) 31-38.
- 4) Chomsky, N. *Knowledge of Language: Its Nature, Origin, and Use.* New York: Praeger (1986).
- 5) Flynn, S. Interactions between L2 Acquisition and Linguistic Theory, in *CONFLUENCE Linguistics, L2 Acquisition and Speech Pathology.* eds. by F.R. Eckman, Amsterdam/Philadelphia: John Benjamins Publishing (1993).
- 6) Starck, R. et al. Multiple language experience and the development of cerebral dominance. in *Language development and neurological theory.* ed. by Segalowitz, S.J. and Gruber, F.A., New York: Academic Press (1977).
- 7) Krashen, S.D. and Galloway, L. The neurological correlates of language acquisition: Current research. *SPEAQ Journal*, 2 (1978) 21-35.
- 8) Genesee, F. Neuropsychology and second language acquisition. in *Neurolinguistic Perspective* ed. by Beebe, L.M. (1988) 81-112.
- 9) Dehaene, S. et al. Anatomical variability in the cortical representation of first and second language. *NeuroReport*, 8 (1997) 3809-3815.
- 10) Ojemann, G.A. and Whitaker, H.A. The bilingual brain. *Archives of Neurology*, 35 (1978) 409-412.
- 11) Ojima, S. et al. Neural Correlates of Foreign-language Learning in Childhood: A 3-Year Longitudinal ERP Study, *JoCN*, 23 (2011) 183-199 (Posted Online 24 Sept.

2010).

- 12) Bongaerts, T. et al., Authenticity of pronunciation in naturalistic second language acquisition: The case of very advanced late learners of Dutch as a second language. *Studia Linguistica*, 54(2) (2000) 298-308.
- 13) Flege, J. et al., Factors affecting strength of perceived foreign accent in a second language. *J. Acoust. Soc. Am.*, 97 (1995) 3125-3134.
- 14) Watanabe E. et al., Non-invasive assessment of language dominance with near-infrared spectroscopic mapping. *Neurosci. Lett.*, 256 (1998) 49-52.

## 英語検定試験において高い聴解スコアを示す学生に対する調査研究 (1)

池松峰男

Research on students with higher score in listening than reading on English comprehension tests (1)

Mineo IKEMATSU

**Abstract:** Students with much higher score in listening than reading on English comprehension tests are examined with regard to finding the reason of their listening preference since most Japanese show opposite preference. The students are first interviewed and it is found that they had an experience of listening to foreign (English) music during childhood. It is also confirmed that they do not feel any difficulties in listening unlike most Japanese. Although their capacity in working memory is also measured using Japanese version of RST (Reading Span Test), no distinguished capacity is found in those students.

### 1. はじめに

筆者は企業研究員より転身し、平成 22 年 4 月から高等専門学校において英語を教えている。現在 7 カ月が経過し、教えることに徐々に慣れつつあるが、今なお消えない違和感がある。それは、学生が英文を読む際の「意味不明な単語に出くわすたびに辞書を引くという行為」を見る時に感じるものである。言葉は意思を間断なく伝えるためにあるはずであり、音声認識および文字認識の何れにおいても途中でその流れが途切れれば情報の流れが寸断され、意図した意志が伝わらない。従って、筆者の違和感は「この行為を繰り返す限りいくら教えても英文の意味を全体像として捉えることは不可能であると思われること」ということになる。

我々(社会経験を積んだ人)は「意味を了解しない単語は飛ばす」ことを普通に行っているが、学生は違う。不明単語を逐一辞書にあたる学生の行為は、多くの学生が英語の世界に足を踏み入れる際、まずアルファベットの識字から学習を始めることに起因すると考えられる。音声は逐次処理を必要とするため、不明な箇所は飛ばさざるを得ないのに比べ、文字はゆっくりと意味を調べることができる。文章の正確な意味を理解することが学習目標である限り、「不明箇所は飛ばす」意識付けなしでは辞書への逐次参照は不可避である。そして文字という「消えない」対象をゆっくりと調べ上げて意味をとっていくこの行為に慣れた結果、入力する先から消えてゆく音声から意味をとる聴解は、一般の日本人にとって、読解より困難なものとなっている(1,2)。

この点、子どもの第一言語獲得との違いが顕明である。子供への最初の母国語刺激は母親の胎内にいる時に浴びる音声で、それが多量であるため、母国語音とそれ以外の言語を聴き分けることができる状態で出生するとされている(3)。出生後も、識字能力が発達するまでは音声刺激のみである。そして文字を習い文章を書き始めるころには、第一言語・言語音の習得は完了しており、意味不明な文

章を聴かせた際にも正確に聴解文を口頭で再生することが可能である(4)。そしてそれは、「十分な聴解訓練の後に読解訓練がある」ことによって培われている。このような習得過程と習得結果との間に必然的に関連があるとするのが Krashen の Natural Approach (5) の考え方である。一方で Hammond による批判(6)もあるため、学習順序に関しては一概に結論を出すことはできないが、少なくとも文章を途中で分断する習慣がついてしまう読解訓練から始まる日本の英語教育においては、聴解力の向上を期待することには困難が伴う。

筆者は上記英語学習法の課題に鑑み、未だ道半ばである「確立した」英語学習法を探るべく、元来、聴解力が乏しいと考えられる「日本人」学生の中から英語運用能力テスト(後述)において読解力に比し聴解力が際立って高い学生を抽出し、英語に対する彼らの取り組みなどを調査した。具体的には 2 名の当該学生へのインタビューを実施し、その結果、両者とも幼少の頃から洋楽を継続的に聞いてきていること、そして入力された音声リハーサルをする習慣が自然に身に着いていることを了解した。筆者は更にこの音声リハーサルに着目し、洋楽刺激のみでのワーキングメモリ(短期記憶の一種)容量の増大を検証したが、残念ながらその増大は認められなかった。本稿ではそれらの結果の詳細、およびそれらの結果を踏まえての英語(外国語)学習法を確立するために今後なすべき課題について議論する。

### 2. 実験

#### 2.1. インタビュー

平成 21 年 12 月に本校にて実施された英語検定試験(GTEC for STUDENTS、(株)ベネッセコーポレーション)(7)を受験した茨城工業高等専門学校第 1 および 2 学年の学生(当時。インタビュー時



はそれぞれ第2および3学年)のうち、聴解セクション(L)の順位(L####)が読解セクション(R)の順位(R####)の1/10以下で、かつ全学生200名中の(L)の順位が一桁である学生2名(学生A: L9/R163, 学生B: L9/R119)を抽出し、インタビューを実施した。具体的には各学生とも筆者との対面方式で行い、約1時間に渡る双方のやり取りをボイスレコーダーを用いて録音した。インタビューで用いた質問は表1の通りである。

表1 インタビューに用いた質問

|                          |
|--------------------------|
| A. 目的の説明                 |
| B. インタビューでの質問項目          |
| 1. 「聴解」に関して感じたり、意識していること |
| 2. 生い立ち、人と違うことをした経験      |
| 3. 「読解」に対する感じ方           |
| 4. その他                   |

## 2.2. リーディングスパンテスト (8,9)

リーディングスパンテスト (RST: Reading Span Test) は Daneman & Carpenter (10)によって開発されたもので、読みのプロセスと関連するワーキングメモリ容量を測定することができる。彼らは、リスニングについて同様に実施したリスニングスパンテスト (LST) が RST と高い相関を示すとしている。そこで本稿の目的であるリスニング関連のワーキングメモリ容量の測定のために、より実施が容易な RST を使用することとした (RST 日本語版: 荻阪 & 荻阪 (8))。

RST は荻阪 & 荻阪 (8) に従って行った。先ずテストに用いる短文を、高等学校用国語教科書から 160 文を抽出した。文の長さも先行例にならない、30 字までの文を選択した。160 文は本校第2 学年一クラス(40 名)の学生によって7段階の難易度評定 (1:非常にやさしい, 7: 非常に難しい) で評価された。実験には評定値 3.0-4.0 の範囲にある 70 文を用い、先行例通り 2 文から 5 文条件までそれぞれ 5

表2 リーディングスパンテストに用いた文の例

|                               |
|-------------------------------|
| 4文条件                          |
| その他の動物は、その後になって現れてきた。         |
| 山すそを切り開いて人間はみごとな麦畑を作り出していた。   |
| 濡れたコンクリートが黄色い明りに光っていた。        |
| わたしは、しだいに、彼が気を許し始めているのを感じていた。 |
| ターゲット語: 現れてきた 人間 濡れた 始めている    |

試行を行った。実験には表2に示したような短文一文を、縦 15 cm, 横 21 cm のカードに一行に収まるように印刷し、文中、ターゲットとする単語に赤線を引いたものを使用した。学生 A および B はそれぞれ別々に各文を声に出して読み、1 試行が終わると直ちにターゲット語を報告するというスキームを 2 文から 5 文までの各 5 試行に渡って行った。評定も先行例通り、5 試行中 3 試行正解を「パス」とみなし、2 試行正解を 0.5 とした。例えば、2 文を 3 試行、3 文を 2 試行正解した場合は、2.5 とした。

## 3. 結果と考察

### 3.1. インタビュー

インタビューの結果を表3に示す。学生 A および B の双方ともに幼少のころから母親が運転する車の中で、母親が好んで流していた音楽 (洋楽) を聴いていた経験を持つことが分かった。そしてこれも双方共通の行動として、音楽を聴きながら無意識に聴取音声のリハーサルを行っていたこと、さらに聴取・リハーサルを行っていた「一つの音」が「実際には3つの単語からできていることを後で調べて分かった」という経験をもつことも明らかとなった。

英語学習を訳読法によって学ぶと、不明な単語に出会う度に逐一意味を確かめたいくなる弊害が発生することは前述の通りであるが、この負の影響は音声聴取時にも及び、意味不明な音声に出会うと意識がそこに集中するため、それ以降の音声の聴取に支障をきたしたり、音声の意味を既知の単語を (認知的に) 参照しながら理解を進めていくところから抜け出せない場合がある。つまり、意味不明な音声の意味不明なまま記憶に蓄えることが困難であることを意味する。この点、今回インタビューした学生 A および B のように意味不明な音声のまま記憶 (リハーサル) できることは対照的である。

学生 A および B が行っているリハーサルとは、短期記憶の一種であるワーキングメモリに (一時的に) 保存されている内容を忘却から防ぐために行う認知行為である。これは、学生 A および B のように無意識的にリハーサルを行うことは、意味不明な音声であっても、少なくとも一時的にはワーキングメモリに蓄えられたことを意味している。よって、学生 A および B が示す高い聴解力が、幼少時からの洋楽聴取によってもたらされたと考えざるを得ない。そうであると一つの可能性として考えられるのは、幼少時からの洋楽聴取によってワーキングメモリの容量そのものが増大 (向上) するのではないか、ということである。

### 3.2. リーディングスパンテスト (RST)

学生 A および B に対してワーキングメモリ容量 (能力) を知るために RST を実施した。結果を表4に示す。西崎&荻阪 (9)の研究により、RST の得点が 4.0 以上の高得点者が、意味的に情報を保持するのに対し、2.0 以下の低得点者は音韻的に情報を保持するということが分っている。従って、本報告における学生 A および B は低得点者、すなわちワーキングメモリを主に音韻保持だけに用いていると

表3 インタビューの結果

|   |
|---|
| <p><b>学生 A</b></p> <p>1.「聴解」: テレビを見ている感じ。受け身で楽。<br/>1かたまりの楽音が、実は3単語で構成されていることが調べてみて分った、という経験あり。</p> <p>2.・母親が運転する車中、洋楽を聞き流していた経験あり。<br/>(小学校低学年より)<br/>・「きれいな英語を聴くように」と指導されてきた経験あり。<br/>・小学校時に渡豪経験あり。英語が分からなくても意志を伝えられることを実感。</p> <p>3.「読解」: 読まなければならないため、抵抗あり。<br/>文法・構文自体が分かっていない。訳ができない。</p> <p>4. 普通は「文字」が先にあって、その上に音。<br/>私の場合、「コミュニケーション」の上に文字。</p> |
| <p><b>学生 B</b></p> <p>1.「聴解」: 音に対して抵抗なし。テストでは点の取りどころ。<br/>意味不明であっても記憶に残り、再生可能。<br/>1かたまりの楽音が、実は3単語で構成されていることが調べてみて分った、という経験あり。<br/>(学生Aと同様)</p> <p>2.・母親が運転する車中、洋楽を聞き流していた経験あり。<br/>(就学前(幼稚園の頃)より)<br/>・洋楽の歌詞を無意識に口ずさんでいた経験あり。</p> <p>3.「読解」: 憶えていないとできないことがあるため、抵抗あり。<br/>嫌いではないが、気楽に取り組むことが困難。</p> <p>4. 音楽の聴き方: 音声を大まかな理解→日本語確認→再度音声の聴取</p>            |

表4 リーディングスパンテストの結果

|   |     |
|---|-----|
| 学生A   | 2.0 |
| 学生B   | 2.5 |
| 高得点群: $\geq 4.0$ , 低得点群: $\leq 2.0$ (西崎&荻阪(2004)) |     |

いうことになる。そしてこれを、言語能力とRSTには相関がある、しかも言語能力には母国語と同時に外国語も含まれるとしている荻阪ら(11)およびMiyakeら(12)の見解に照合すれば、学生AおよびBは、言語能力は必ずしも高くない、という結果となる。しかしながら、今回用いたRSTは日本語によるリテンション能力を調べるためのものであり、従って聴解力だけではなく読解力も含めた総合的な言語能力を測る尺度となるものと捉えることもできる。さらに低得点者がワーキングメモリの2つの機能、すなわち意味的情報の保持と音韻的情報の保持のうち、主に後者を用いていることも分

ってきている。よって学生AおよびBは言語能力、あるいはワーキングメモリの容量を議論することは現段階では困難であり、今後、より聴解力に特化した評価方法を検討する必要がある。

上述のように現段階で有用とされている方法では、学生AおよびBのワーキングメモリ容量が乏しいと判断せざるを得なかった。聴解に特化した方法の必要性も上述の如くであるが、学生AおよびBのインタビュー結果(表3)をもう少し詳細に、特に彼らが試験中の読解を敬遠している点に注目して考察したい。

彼らは聴解セクションについてその印象を「点の取りどころ」あるいは「抵抗感がない」と表わす(表3)。一方、読解セクションについては「読まない」と答えが分からないところあるいは「気楽にできない」と表現する。筆者には、読解のように見直すことができない聴解は、問題に対峙する際に「緊張が強いられる」セクションであると感じられる。従って、聴解に対して緊張感を持たない学生AおよびBの感覚は、特殊な環境を経験していることに、その根源があると考えてよいのではないだろうか。そしてこの「特殊な環境」が幼少時の洋楽聴取である、というのが筆者の見解である。彼らは異口同音に幼少時の洋楽体験を挙げ、無意識に口ずさむこと(リハーサル)も行っている。さらに両者とも聴解に対して抵抗感を示していないなどがその根拠である。

冒頭、子供が第一言語で語られる文章をたとえ意味不明であっても正確に再生できることを述べた。意味不明であることは当然、読解も不可能であり、仮に本稿で述べたRSTを実施したとしても得点を得ることは不可能である。このことは今回の学生AおよびBが示す聴解特性(意味不明のまま言語音を記憶可能であること)とRSTが低得点であることと類似している。何度も読み直しが可能な「緊張が強いられない」読解時に意味不明な単語を逐一調べようとする学生にとって、情報が一度ないし二度しか得られないため「緊張が強いられる」聴解が困難であるのは当然である。従って、「読解時に緊張感を持たない」ということは、今後の学習を考えた場合大きな利点であり、それを可能とする要素が幼少時の洋楽聴取にあることが明らかとなれば、より容易な方法で言語習得を可能とするプログラム開発へとつながると考えられる。

#### 4. 今後の課題

英語検定試験における聴解セクションで読解と比較して際立った高得点を挙げた学生2名に対するインタビューを実施し、幼少時からの洋楽聴取がリスニング能力と関係があり、さらに洋楽聴取が短期記憶(ワーキングメモリ)容量の向上に寄与しているとの仮説を提案した。短期記憶についてはRSTによって確認を試みたが、日本語で作成されていたこともあり、容量向上は確認できなかった。より簡便ながら効果的な外国語学習法を確立するために今後必要な課題を、以下に挙げる。

##### 1. 聴解能力>読解能力を示す学生のさらなる確保

今回は2人に対して調査を実施したが、今後さらなる調査を進めるだけでなく、他校も視野に入れ可能な限り多くの学生をサンプリングすることにより信頼性を向上させることが必要である。

## 2. 英文リテンション能力の洋楽聴取との関連調査

短期記憶容量の測定に用いた RST は日本語版であったため、記憶容量向上の有無を確認することができなかった。そもそも読解を敬遠する学生に対して読むことを強要する RST は適切ではなかった可能性もある。音楽トレーニング (音楽聴取ならびに楽器演奏) が言語習得に好影響をもたらすことは知られている (13, 14) が、その作用機序や音楽の種類、あるいは必要とされるトレーニングの質・量については不明なままである。本稿にあるような洋楽聴取という容易な手続きが既往の研究にある音楽トレーニングを代替可能ならば、新しい知見を提供するだけでなく、言語習得の分野に貢献することができる。今後は本研究をさらに進めるため「英語音声の短期記憶能力」に焦点を絞り、英文を用いてリテンション能力を調べることが必要である。

## 3. 可聴周波数範囲と洋楽聴取との関連調査

第一言語を獲得することと比較して外国語を習得することが困難であるということ、各言語音声を含む周波数範囲の違いで説明する研究 (15, 16) がある。彼らは、第一言語の獲得過程でその言語特有の周波数範囲に固定された聴覚特性を、特殊な訓練によって他の言語が有する周波数範囲にも反応可能とすることで、外国語運用能力を向上できる、と報告している。これらの訓練と言語習得の向上の関連については池松 (17) の実験計画に譲るとして、本研究では今後、洋楽聴取が可聴周波数範囲を広げる効果を有するか否かを調査していく必要がある。

以上、今後の課題として挙げた 3 点を追及することによって、従来確立していなかった外国語習得法に一定の方向性を与えることが可能になると期待される。今後もリスニング能力が高い学習者の調査を継続していくことになるが、その際、Krashen のインプット仮説への Swain の批判 (インプットのみでアウトプットをしない場合でも名詞、動詞、形容詞などの内容語の理解のみで文法的知識なしで内容理解が可能となってしまう、というもの) (18) を厳粛に受け止め、本研究の主題となっている聴解力が、意味理解を経由しない音声言語リテンションである可能性があることを念頭に置きながら、研究を進めていかなければならない。

## 謝辞

本研究の実施にあたり協力いただいた茨城工業高等専門学校人文科学科の井坂友紀先生およびインタビューに協力頂いた学生の皆さんに感謝申し上げます。

## 参考文献

- Shimizu, K. Listening characteristics of Japanese learner of English, SST-Abstracts, 467-472 (1996).
- Lee, W.-h. The listening comprehension problem of an adult Japanese language learner – From the viewpoint of my learning experience, 日本語教育 64, 154-158 (1988).
- Pena, M. et al. Sounds and silence: An optical topography study of language recognition at birth, Proceedings of the National Academy of Sciences USA, 100 (20) 11702-11705 (2003).
- 「アインシュタイン物理学はいかにして創られたか (アインシュタイン&インフェルト著、石原純 訳 岩波新書 1977)」の一節を筆者が句読点で区切りながら朗読し筆者の長女 (6 歳) に聴取させ、その区切り毎に入れる休止期間に聴取内容を再生させた。数ページに渡る試行中、彼女は一度もつかえることなく聴取音を完全に再生することができた。
- Krashen, S. Second language acquisition and second language learning. New York: Pergamon. (1981).
- Hammond, R. Accuracy versus communicative competency: the acquisition of grammar in the second language classroom. Hispania 71, 408-417 (1988).
- GTEC for STUDENTS: (株) ベネッセコーポレーションが提供する英語検定試験。Core (中 2、中 3 レベル)、Basic (高 1、高 2 レベル)、Advanced (高 2、高 3 レベル) の 3 タイプがあり、どのタイプも Reading, Listening, Writing セクションで構成されている。茨城工業高等専門学校では第 1 学年および第 2 学年の学生が年に一回、それぞれ Basic および Advanced を受験することになっている。
- 荻阪満里子, 荻阪直行 読みとワーキングメモリ容量 - 日本語版リーディングスパンテストによる測定-, 心理学研究 65(5), 339-345 (1994).
- 西崎友規子, 荻阪満里子 文章理解とワーキングメモリの個人差 - 保持と検索の視点から-, 心理学研究 75(3), 220-228 (2004).
- Daneman, M. & Carpenter, P.A. A capacity theory of comprehension: Individual differences in working memory, and reading. Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior, 19, 450-466 (1980).
- 荻阪ら ワーキングメモリと第二言語処理 - バイリンガルを対象としたリーディングスパンテストの結果- 脳とワーキングメモリ (荻阪直行編著) 京都大学学術出版会 (2000).
- Miyake, A. et al. Working Memory Constraints on the Resolution of Lexical Ambiguity: Maintaining Multiple Interpretations in Neutral Contexts, J. Memory and Language 33, 175-202 (1994).
- Ho Yim-C. et al. Music training improves verbal but not visual memory: Cross-sectional and longitudinal explorations in children, Neuropsychology, 17(3) (2003).
- Tallal, P. & Gaab, N. Dynamic auditory processing, musical experience and language development, TRENDS in Neurosciences 29(7), 382-390 (2006).
- 眞田亮子 「傳田式聴覚訓練法」の原理と英語教育に対する有用性 英語表現研究第 24 号, 15-26 (2007).
- 村瀬邦子 最強の外国語学習法 日本実業出版社 (1996).

- 17) 池松峰男 LSC(Language-specific cognitive)-system 仮説  
について 茨城高専研究集報第 46 号 (2011).
- 18) Swain, M. Communicative competence: Some roles of  
comprehensible input and comprehensible output in its  
development, In S.M. Gass & C.G. Madden (Eds.) Input in  
second language acquisition. Rowley, MA: Newbury House  
(1985).





# 複合材料・構造における微小き裂の探索に向けたき裂要素の構築

～ 簡便な均質化有限要素法と行列の摂動評価法の融合を目指して～

河原永明・五十嵐浩・中川英則・山本茂樹

Construction of finite element used to search for  
minute cracks in composite materials

Nagaaki KAWAHARA, Hiroshi IGARASHI, Hidenori NAKAGAWA, and Shigeki YAMAMOTO

**Abstract:** In this paper, a numerical computation method is proposed to search for minute cracks in composite materials precisely and efficiently by means of the changes in the characteristic frequencies of structures. To deal with inhomogeneous materials, the Eshelby equivalent inclusion method coupled with the Mori-Tanaka theory is incorporated into the formulation of finite element analysis. The method to construct finite elements accounting for effects of inhomogeneity of materials is mainly described in this paper, which are applicable to Branch and Bound evaluation algorithms based on Weyl's monotony theorem to identify the position and the size of minute cracks in composite materials.

## 1. はじめに

本論文は、構造物の部材に生じた欠損やき裂の位置や寸法を、固有振動数の変化から同定する方法について考察するものである。特に、前著<sup>1),2)</sup>での研究を受けて、本稿では実際の材料や部材を考慮して複合材料からなる不均質な連続体を扱う。

構造物の部材や材料に生じた欠損やき裂の探査といった比較的小規模のヘルスマonitoring手法<sup>3)</sup>は、現在ではその多くが実用化されており<sup>4)</sup>、目的に合わせてその手法も様々である。現在では、個々の部材や材料レベルのヘルスマonitoringの次にくる段階として、大規模な範囲における精度、効率のよい探査・同定手法の構築が目指されている。特に、廉価で高精度のセンサーの開発であり、大規模な範囲を多くの高精度センサーでどう同期して一元モニタリングしてゆくに注目が集まっている。

このような中で、個々の部材や材料レベルでの欠損やき裂を、固有振動数の変化から探ってゆく方法について本研究では扱っている。その理由は、衝撃振動試験や AE(Acoustic Emission) 解析<sup>5)</sup>に代表されるように部材の固有振動数を測定する検査方法が実用段階で多く使われていること、応用数理の面からはき裂の数理解モデルはまだ確立されておらず、それを受けて計算力学を用いての材料の欠損やき裂の探査・同定手法はまだ発展途上にあるためである。特に、き裂の進展などに代表される材料の破壊に関する問題は、強不連続性を伴う非線形問題として、数理的に未解決でありその研究が始まったばかりともいえる。20世紀にほぼ連

続体力学は完成の域に達し、21世紀に入り線形、連続レベルから非線形、不連続レベルを扱う段階にきたともいえる<sup>6)</sup>。人類の叡智は音よりも速く飛ぶことを可能にしたが、その基礎である Navier-Stokes 方程式の数理については、その強い非線形性のために現在も様々な研究が行われている<sup>7)</sup>ことと同じである。その意味で、「複合材料における微小き裂の探索手法の構築」は、材料の不均質性が固有値の摂動にどう絡んでくるのか、といった数理的にみても非常に面白い側面を有している問題である。本論文では、固有振動数の計算に用いるための効率的で精度の良い有限要素の開発の一環として、複合材料に代表される不均質な材料物性をどのようにき裂要素に組み込むのか、その点に的を絞って述べる。

さて、本論文は研究彙報であるという利点を活かして、研究の紹介およびノート作成としての意味も加味して、以下の構成をとっている。第2章において複合材料の力学モデルの概要を示す。特に、多数の介在物の影響を母材中の平均応力場に置き換える森-田中の平均場の理論<sup>8)</sup>を取り上げ、その上で第3章では、均質化弾性を組み込んだき裂要素の構築を行う。ここでは、森-田中の平均場の理論を Eshelby 等価介在物法<sup>9)~12)</sup>に適用することで均質化を行い、さらに静的縮合法<sup>13)</sup>によりき裂を含む部材による剛性マトリックスの硬化を緩和させる手続きをとっている。第4章では、固有振動数の変化から微小き裂の同定を行う本研究の要の理論である Weyl の単調性定理<sup>14)~17)</sup>を示した上で、き裂探索の概要を説明する。最後にこれからの展望を踏まえて結びとする。

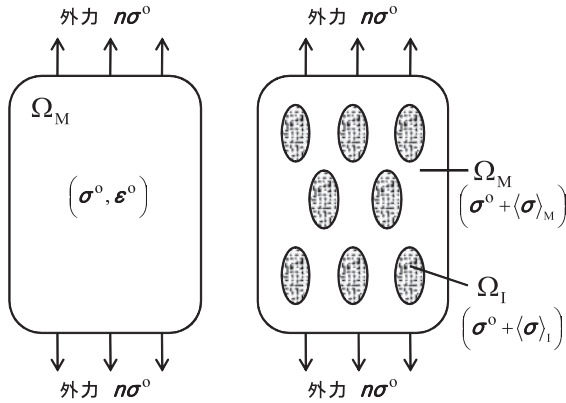


図-1 (左) 均質材料, (右) 不均質材料

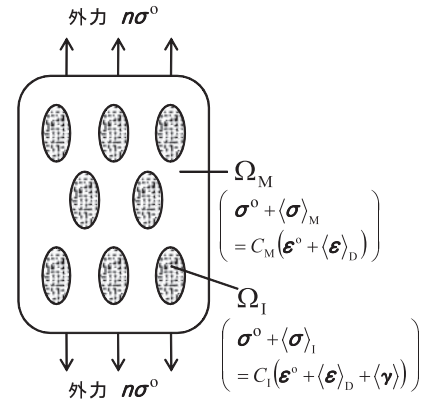


図-2 森-田中理論の概念図

## 2. 複合材料の力学

### 2.1 複合材料の力学モデル

ここで述べる複合材料とは、力学特性の異なる素材からなる不均質物質を主に意味するが、3章で用いる等価介在物法 (equivalent inclusion method)<sup>9)~12)</sup>は元々は物体全体で熱膨張係数が異なる弾性体の問題を解く際の熱膨張ひずみから発想が繋がっている。すなわち、異なる素材からなる不均質物質以外にも、適用可能であることを強調しておく。実際に、2章、3章で用いている理論が成功を収めたのは、複合材料について金属材料だそうである<sup>10),11)</sup>。特に、金属材料の熱処理の際に現れる、母相に対してミスフィットを持った析出物、鋼の焼入れの際に生じるマルテンサイトなどに応用されている。また、以下では便宜上、全ての物質において等方性を仮定しているが、理論自体は等方性、異方性には関係しない<sup>9),12)</sup>。また、弾塑性材料にも適用されており、その意味でも、Eshelby 等価介在物法は強力な手法といえる。

弾性係数  $C_M$  をもつ無限弾性体からなる母材  $\Omega_M$  に、弾性係数  $C_I$  の介在物  $\Omega_I$  が含まれる 2 相からなる複合材料の力学モデルを考える。  $\Omega_I$  とは、1つの介在物が占める領域のことである。ここで、無限弾性体を用いるのは、あくまで問題の取り扱いを数理的に簡単化するためである。実在の物体の大きさは有限であり、厳密には一つの部材内であっても弾性係数は必ずしも均一ではないが、ここでは無限大かつ弾性係数の一様な母材を扱う。多くの実際問題では、介在物一つ一つの大きさは、母材に比べて非常に小さく、また、表面からも遠いところにあるので、実用上、十分に近似できると考えられる<sup>12)</sup>。

複合材料の全体積を  $V$ 、母材の体積を  $V_M$ 、介在物全体が占める体積を  $V_I$  で表す。複合材料の全体に占める介在物の体積比率  $f$  を以下のように定義する。

$$f = \frac{V_I}{V} = \frac{V_I}{V_M + V_I} \quad (1)$$

複合材料の力学モデルを扱う場合、応力、ひずみは全て微視的な応力、ひずみの体積平均によって表わされる。すなわち、体積  $V$  をもつ物質について、そこでの応力  $\langle \sigma \rangle$ 、ひずみ  $\langle \epsilon \rangle$  は、以下となる。

$$\langle \sigma \rangle = \frac{1}{V} \int_V \sigma \, dV \quad (2)$$

$$\langle \epsilon \rangle = \frac{1}{V} \int_V \epsilon \, dV \quad (3)$$

こうした上で、無限遠場で平均的な外力として、 $n\sigma^0$  の表面力が母材に作用している問題を考えてみる。 $n$  は外向きの単位法線ベクトルである。もし、介在物が母材の中になければ内部には図-1の左に示すように一様なひずみ  $\epsilon^0$  と一様な応力  $\sigma^0$  が発生するだけであるが、介在物が母材の中に存在すれば、ひずみ、応力ともに乱れることになる (図-1の右)。ここで、乱れが加わった母材中の応力を  $\sigma^0 + \langle \sigma \rangle_M$ 、乱れが加わった介在物中の応力を  $\sigma^0 + \langle \sigma \rangle_I$  と表す。ここに  $\langle \rangle$  は、その下添え字で示した物体中の体積平均量である。

以下の節で扱う、森-田中理論<sup>8)</sup>は、母材と介在物でそれぞれ異なる乱れをどのように数式に上手く取り込むかという点に特徴があり、この点が森-田中理論の非常に巧妙な点であると思われる。

### 2.2 森-田中の平均場の理論<sup>8)~12)</sup>

図-1の右に示すように、介在物が存在することにより、ひずみ、応力は共に乱れることになる。ここで、介在物の材質は本論文では1種類のみとする (すなわち母材と介在物の2相からなる不均質物質) が、介在物の種類は以下の理論とは関係ないため何種類に増えようとも構わない。また、図-1の右に示すように、多くの介在物が母材に含まれる状態を想定する。

森-田中理論では、多くの介在物が既に含まれている状態における系全体のひずみ場の乱れを  $\langle \epsilon \rangle_D$  とする。ここに一つの特徴がある。すなわち、森-田中理論では、多数の介在物による影響を母材と介在物からなる系全

体に対する平均ひずみ場の乱れ量  $\langle \epsilon \rangle_D$  に置き換えたものと言え、これによって不均質物を多く含んでいる現実的な複合材料に第3章で扱う Eshelby 等価介在物法を適用できることになる。

ここで、系全体に対する平均ひずみ場の乱れ量  $\langle \epsilon \rangle_D$  が生じている状態において、さらにもう一つ介在物を追加することを考える。この追加した1個は既に多数ある介在物のうちのたかが1個となるため、この新たな1個の追加による系全体への乱れの影響はほとんど無視できよう。すなわち、系全体の大部分を占める母材は、この新たな1個の介在物の追加によってほとんど影響を受けることはないと考えられる。逆に、この1個の介在物  $\Omega_I$  が多くの介在物から受ける影響は大きい(無視できない)。その影響を、 $\Omega_I$  内の乱れ  $\langle \gamma \rangle$  として表す。実は、介在物周辺の母材内部におけるこの  $\langle \gamma \rangle$  の平均はゼロになることが分かっている。したがって、 $\Omega_M$  および  $\Omega_I$  に発生する平均的な応力の乱れを、それぞれ、 $\langle \sigma \rangle_M, \langle \sigma \rangle_I$  と表すと、それぞれの領域で以下のような平均応力-平均ひずみ関係が成立する (図-2)。

Mori-Tanaka

$$\sigma^\circ + \langle \sigma \rangle_M = C_M (\epsilon^\circ + \langle \epsilon \rangle_D) \cdots \Omega_M \quad (4)$$

$$\sigma^\circ + \langle \sigma \rangle_I = C_I (\epsilon^\circ + \langle \epsilon \rangle_D + \langle \gamma \rangle) \cdots \Omega_I \quad (5)$$

### 3. 均質化弾性を組み込んだき裂要素

#### 3.1 森-田中理論を用いた Eshelby 等価介在物法

等価介在物法 (equivalent inclusion method)<sup>9)~12)</sup> とは、介在物を含む弾性体問題を巧妙に解くために提案された手法である。等価介在物法という手法に常に森-田中理論が必要ということではなく、正確に言えば、Eshelby によって考案された等価介在物法に森-田中理論を組み込むことにより、多数の介在物が存在する不均質物を扱えるようにした、ということである。組み込む理論は、他にも、Eshelby 法、self-consistent 法など様々である。

さて、無限体の複合材料全体の平均的な応力  $\bar{\sigma}$  とひずみ  $\bar{\epsilon}$  を、介在物の体積比率  $f$  および  $\Omega_M, \Omega_I$  それぞれの内部に生じている平均応力、平均ひずみを用いて、

$$\bar{\sigma} = (1-f) (\sigma^\circ + \langle \sigma \rangle_M) + f (\sigma^\circ + \langle \sigma \rangle_I) \quad (6)$$

$$\bar{\epsilon} = (1-f) (\epsilon^\circ + \langle \epsilon \rangle_D) + f (\epsilon^\circ + \langle \epsilon \rangle_D + \langle \gamma \rangle) \quad (7)$$

と表すと、複合材料全体の平均弾性テンソル  $\bar{C}$  は、 $\bar{\sigma}$  と  $\bar{\epsilon}$  を結びつける

$$\bar{\sigma} = \bar{C} \bar{\epsilon} \quad (8)$$

として定義できる。本研究で用いる Weyl の単調性定理を応用したき裂探索/同定アルゴリズム<sup>1),2)</sup>に、材料

の不均質性を均質化させた平均弾性として取り込むためには、この  $\bar{C}$  を求める必要がある。以下、 $\bar{C}$  の導出を行う。

複合材料全体の平均応力  $\bar{\sigma}$  は、無限遠場で作用している平均外力  $\sigma^\circ$  に等しい。したがって、式 (6) において、 $\bar{\sigma} = \sigma^\circ$  とおくと、

$$(1-f) \langle \sigma \rangle_M + f \langle \sigma \rangle_I = 0 \quad (9)$$

が導かれる。式 (5) は、

$$\sigma^\circ + \langle \sigma \rangle_I = C_I \{ C_M^{-1} (\sigma^\circ + \langle \sigma \rangle_M) + \langle \gamma \rangle \} \quad (10)$$

$$= C_M \{ C_M^{-1} (\sigma^\circ + \langle \sigma \rangle_M) + \langle \gamma \rangle - \epsilon^* \} \quad (11)$$

とおくことができる。このとき式 (11) に現れた  $\epsilon^*$  を、eigen ひずみとよぶ。式 (10) から式 (11) への展開において、介在物の平均弾性テンソル  $C_I$  が母材の平均弾性テンソル  $C_M$  に置き換わっている。その際に式 (10) と式 (11) を釣り合わせるためにおいたひずみテンソルが eigen ひずみ  $\epsilon^*$  である、と理解すると分かり易い。ただ、式 (11) が示すことは、eigen ひずみ  $\epsilon^*$  は応力に関係しない非弾性的なひずみ、ということである。したがって、力学的に言うと、eigen ひずみとは「まわりの拘束がない状況において、均一に変形しても応力を生じないような変形があるとすると、その変形を記述しているひずみ」ということになる。具体的な例で言えば、熱膨張ひずみ、などがそれに相当する<sup>12)</sup>。そして、式 (11) で導入された手法は、Eshelby によって発案された<sup>9)</sup>ので Eshelby 等価介在物法とよばれている。一般に、介在物を含む無限体の境界値問題は、介在物と母材の間に生じる変位やトラクションが連続しなければならないため、解くことは容易ではない。そこで、介在物を除いた均一な無限帯を考え、介在物の代わりに仮想的なひずみを分布させる。それが eigen ひずみ  $\epsilon^*$  ということになる。大切なのは、式 (10) と式 (11) を結ぶ、このような仮想的なひずみ  $\epsilon^*$  を実際に求めることができるという点である。これには実は、

Eshelby

等方弾性の無限体中に形状が楕円体である介在物  $\Omega_I$  が含まれているとする。このとき、楕円体  $\Omega_I$  内に eigen ひずみ  $\epsilon^*$  を一様に分布させることで作られた  $\Omega_I$  内の全ひずみは一様であり、 $\epsilon^*$  と

$$\langle \gamma \rangle = S \epsilon^* \quad (12)$$

というように、定数テンソル  $S$  を介して結びつく。

という Eshelby による大きな発見が関係している。この定数テンソル  $S$  のことを Eshelby テンソルとよぶ。そして、式 (12) の関係と、式 (10)=式 (11) という関係から、6 個の未知数  $[\epsilon_{ij}^*]$  に対して、6 個の独立な連立方程式が揃うため、このような仮想的なひずみ  $\epsilon^*$  の構築は可能であることが分かる。なお、紙面の関係上、

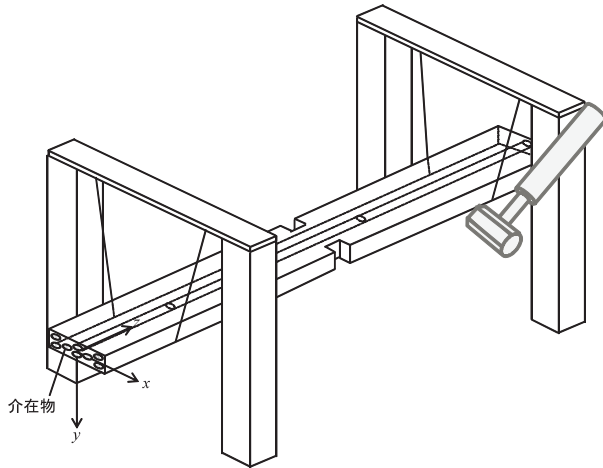


図-3 介在物を含んだ梁の自由振動問題 (平面応力状態)

式 (12) の導出は特に記さなかった. この導出については, 多数の文献や書籍<sup>10)~12)</sup>にその詳細が載っているので, そちらを参考願いたい. また, 最近では, 任意の形状の介在物に対して, 数値解として式 (12) のような関係を求めた研究報告<sup>18)~21)</sup>がある.

さて, 式 (12) の関係を式 (11) に用いると,

$$\langle \sigma \rangle_I - \langle \sigma \rangle_M = C_M (S - I) \epsilon^* \quad (13)$$

が導かれる. 式 (9), 式 (13) より

$$\langle \sigma \rangle_M = -f C_M (S - I) \epsilon^* \quad (14)$$

$$\langle \sigma \rangle_I = (1 - f) C_M (S - I) \epsilon^* \quad (15)$$

ここで, 式 (10)=式 (11) の関係に, 式 (12) および式 (14) を用いることで, eigen ひずみ  $\epsilon^*$  は

$$\epsilon^* = \left[ C_M - (C_M - C_I) \{ S - f(S - I) \} \right]^{-1} \cdot \{ (C_M - C_I) C_M^{-1} \sigma^o \} \quad (16)$$

ここで, eigen ひずみ  $\epsilon^*$  の式 (16) における前半部を

$$T \stackrel{\text{put}}{=} \left[ C_M - (C_M - C_I) \{ S - f(S - I) \} \right] \quad (17)$$

とおくことにする.

最後に, 複合材料全体の平均ひずみの式 (7) は,

$$\begin{aligned} \bar{\epsilon} &= (1 - f) (\epsilon^o + \langle \epsilon \rangle_D) + f (\epsilon^o + \langle \epsilon \rangle_D + \langle \gamma \rangle) \\ &= (1 - f) C_M^{-1} (\sigma^o + \langle \sigma \rangle_M) + \\ &\quad f \{ C_M^{-1} (\sigma^o + \langle \sigma \rangle_M) + \langle \gamma \rangle \} \\ &= (1 - f) C_M^{-1} (\sigma^o + \langle \sigma \rangle_M) + \\ &\quad f C_M^{-1} (\sigma^o + \langle \sigma \rangle_I + C_M \epsilon^*) \end{aligned}$$

と展開できるので, ここに式 (15) および式 (14) を順次用いることで,  $\bar{\epsilon}$  は次のように表せる.

$$\bar{\epsilon} = C_M^{-1} \sigma^o + f \epsilon^* \quad (18)$$

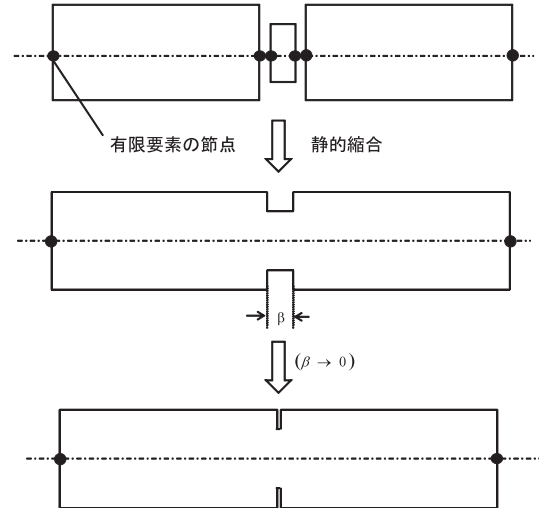


図-4 静的縮合によるき裂梁要素の作成

したがって, ここに eigen ひずみ  $\epsilon^*$  の式 (16) を代入することで,

$$\bar{\epsilon} = T^{-1} \{ C_M - (1 - f) (C_M - C_I) S \} C_M^{-1} \sigma^o \quad (19)$$

すなわち,

$$\sigma^o = C_M \{ C_M - (1 - f) (C_M - C_I) S \}^{-1} T \bar{\epsilon} \quad (20)$$

の関係を得る.  $\bar{\sigma} = \sigma^o$  であったから, 式 (20) は, 式 (8) の関係を表していることが分かる.

以上より, 複合材料の平均弾性テンソル  $\bar{C}$  は,

$$\bar{C} = C_M \{ C_M - (1 - f) (C_M - C_I) S \}^{-1} \cdot [ C_M - (C_M - C_I) \{ S - f(S - I) \} ] \quad (21)$$

と求められる. なお, 次の節で, 平均弾性テンソル  $\bar{C}$  から, き裂要素を組み込んだ FEM 解析用の複合材料平均化はり要素を構築する.

### 3.2 均質化弾性を組み込んだき裂要素

本節では分かりやすさのために具体例を用いる. 図-3 に示すような, 両端自由および単純支持の表面き裂を有する梁の自由振動問題を扱う. この梁構造には回転楕円形状の介在物が含まれており, 回転楕円体の各主軸方向がそれぞれの座標軸に平行となるように配置されているものとする. また, 簡単のため梁の長手方向である  $z$  方向が  $\infty$  である平面応力問題とする.

このとき, 曲げ振動の運動方程式は,

$$\bar{E} I \frac{\partial^4 u}{\partial z^4} + \bar{\rho} A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = q(z, t) \quad (22)$$

と書ける. ここに,  $u(z, t)$  は梁のたわみ量,  $q(z, t)$  は梁に作用する分布荷重,  $A$  は部材の断面積,  $I$  は部材の断面 2 次モーメント,  $\bar{E}$  は式 (21) で表す複合材料の平均弾性テンソル  $\bar{C}$  から求めた複合材料の平均弾性係数,  $\bar{\rho}$  は体積平均化された質量密度をそれぞれ表す. 但し, 複合材料の平均弾性係数  $\bar{E}$  が式 (22) において係数



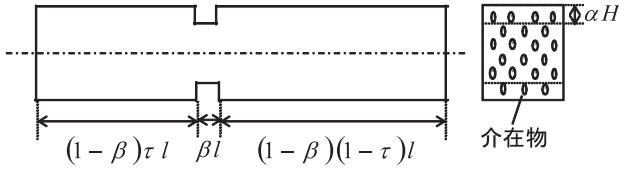


図-5 表面き裂要素

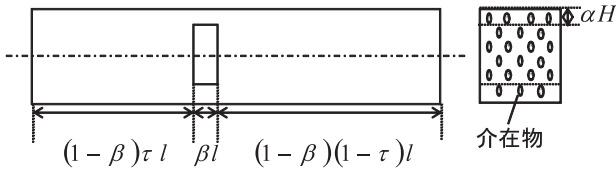


図-6 内部き裂要素

として前に出せているのは、はり要素として”断面剛の仮定”により、断面の変形を考慮せずポアソン比をゼロとしているためである<sup>22)~24)</sup>。本問題の場合は、自由振動より  $q(x, t) = 0$  である。式 (22) を弱形式化し、その領域積分項に含まれる未知関数を有限要素近似することで、最終的に以下の一般固有値問題を<sup>24)</sup>。

$$\mathbf{K}\mathbf{a} = \omega^2 \mathbf{M}\mathbf{a} \quad (23)$$

ここに、 $\mathbf{K}$  は剛性マトリックス、 $\mathbf{M}$  は質量マトリックス、 $\omega$  は固有振動数、 $\mathbf{a}$  は各有限要素の端部におけるたわみ量およびたわみ角を各成分にもつ未知ベクトルである。

式 (23) で表される一般固有値問題を、Cholesky 分解を介して標準固有値問題に帰着させる。

$$(\mathbf{R}^*)^{-1} \mathbf{K} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a} = \omega^2 \mathbf{a}, \quad \mathbf{M} = \mathbf{R}^* \mathbf{R} \quad (24)$$

そして、Householder 変換を介して三重対角行列の固有値を bisection 法で求めるという一般的によく知られた方法<sup>15), 17)</sup>で固有振動数を求めている。固有値解析に用いるため、き裂要素におけるき裂の進展は仮定しない。フレーム構造の固有値解析では、一般に連続体要素に比べて、はり要素を用いる方が実際の挙動に近い結果を示す。そのため、き裂要素の作成には、はり要素を用いた。き裂要素は、3つの断面の異なる要素から成っている。実際の表面き裂の作成では、中央に位置するはり要素の長さ  $\beta$  を限りなく短縮し、その左右に位置する要素との静的縮合によって構築<sup>13)</sup>される(図-4)。本研究で用いているき裂要素について、質量マトリックスおよび剛性マトリックスの詳細を図-5 およ

び図-6 に示す。

$$\mathbf{M} = \bar{\rho} A l \begin{pmatrix} \frac{13}{35} & \frac{11l}{210} & \frac{9}{70} & \frac{-13l}{420} \\ \frac{11l}{210} & \frac{l^2}{105} & \frac{13l}{420} & \frac{-l^2}{140} \\ \frac{9}{70} & \frac{13l}{420} & \frac{13}{35} & \frac{-11l}{210} \\ \frac{-13l}{420} & \frac{-l^2}{140} & \frac{-11l}{210} & \frac{l^2}{105} \end{pmatrix} \quad (25)$$

$$\mathbf{K} = \frac{\bar{E}I}{B_0}, \begin{pmatrix} \frac{B_1}{l^3} & \frac{B_2}{l^2} & -\frac{B_1}{l^3} & \frac{B_1 - B_2}{l^2} \\ \frac{B_2}{l^2} & \frac{B_3}{l} & -\frac{B_2}{l^2} & \frac{B_2 - B_3}{l} \\ -\frac{B_1}{l^3} & -\frac{B_2}{l^2} & \frac{B_1}{l^3} & -\frac{B_1 - B_2}{l^2} \\ \frac{B_1 - B_2}{l^2} & \frac{B_2 - B_3}{l} & -\frac{B_1 - B_2}{l^2} & \frac{B_1 - 2B_2 + B_3}{l} \end{pmatrix} \quad (26)$$

$$\text{表面き裂 } A = \alpha^3$$

$$\text{内部き裂 } A = 1 - \alpha^3$$

$$B_0 = A^2 + (1 - A)^2 \beta^4 + A(1 - A)(4\beta - 6\beta^2 + 4\beta^3) - 12A(1 - A)(\beta\tau - 2\beta^2\tau + \beta^3\tau) + 12A(1 - A)(\beta\tau^2 - 2\beta^2\tau^2 + \beta^3\tau^2)$$

$$B_1 = 12A\{A + (1 - A)\beta\}$$

$$B_2 = 6A\{A + (1 - A)\beta^2 + 2(1 - A)(\beta\tau - \beta^2\tau)\}$$

$$B_3 = 4A^2 + 4A(1 - A)\beta^3 + 12A(1 - A)(\beta^2\tau - \beta^3\tau) + 12A(1 - A)(\beta\tau^2 - 2\beta^2\tau^2 + \beta^3\tau^2)$$

$$\bar{E} = -\frac{n}{d}$$

$$n = E_M[2\{f(E_M - E_I) + E_I\}\{(-1 + f)E_M - fE_I\} + \{(-1 + f)E_M^2 - 4fE_ME_I + 3(1 - f)E_I^2\}\alpha - 2E_ME_I\alpha^2]$$

$$d = E_M^2\alpha + 3f^2(E_M - E_I)^2\alpha + 3E_I^2\alpha + 2E_ME_I(1 + \alpha^2) + 2f(E_M - E_I)(E_M + 3E_I\alpha + E_M\alpha^2)$$

ここで、均質化弾性係数  $\bar{E}$  は、式 (21) で表す複合材料の平均弾性テンソル  $\bar{\mathbf{C}}$  から求めている。 $\bar{E}$  の式中に現れる  $f$  は全体に対する介在物の占める体積比率であり、介在物が含まれない均一体であれば  $f = 0$  となる。また、 $E_M$  および  $E_I$  はそれぞれ、母材の弾性係数、介在物の弾性係数であり、 $\alpha$  は介在物の楕円形断面における2つの半径比で  $\alpha = r_y/r_x$  を表す。均質化弾性係数という形で、複合材料の不均質性を非常に簡単に梁の振動問題に取り込んでいる点が第3章で紹介した「森田中理論を用いた Eshelby 等価介在物法」の効力である。また、Eshelby テンソルは寸法比の関数であり、寸法そのものは含まれないため、全体に対する介在物の占める体積比率  $f$  を用いればよく、介在物の1つ1つの実スケールそのものを憂慮する必要はない。



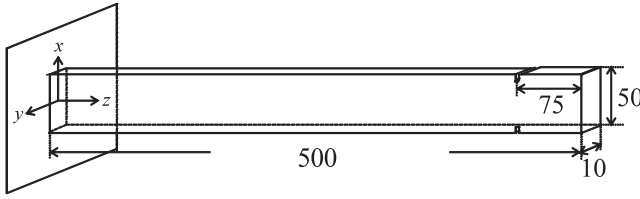


図-7 解析モデル

#### 4. Weylの単調性定理とき裂探索

##### 4.1 Weylの単調性定理<sup>14)~17)</sup>

H.Weyl

$A, B$  を  $n$  次エルミート行列とし、その固有値を大きさの順にそれぞれ  $\alpha_1 \leq \alpha_2 \leq \dots \leq \alpha_n$ ,  $\beta_1 \leq \beta_2 \leq \dots \leq \beta_n$  とする. このとき、 $B - A$  が正値 [[半正値]] ならば、 $\alpha_k < \beta_k$  [[ $\alpha_k \leq \beta_k$ ]] ( $1 \leq k \leq n$ ) が成り立つ.

この定理は、Courant-Fischer の定理からすぐに帰結される. 以下ではまず、Courant-Fischer の定理を述べる.

Courant-Fischer

$A$  を  $n$  次エルミート行列とし、 $A$  の固有値を重複も込めて大きさの順に  $\lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \dots \leq \lambda_n$  とする. このとき、 $\mathbb{C}^n$  の部分空間  $W$  に対し、 $\mu(W) \stackrel{\text{def}}{=} \sup\{x^*Ax; x \in W, x^*x = 1\}$  とおくと、 $\lambda_k = \inf\{\mu(W); x \in W, x^*x = 1\}$  が成り立つ.

[証明]

$A$  はエルミート行列より、 $Aq_i = \lambda_i q_i$ ,  $q_i^* q_j = \delta_{ij}$  ( $i, j = 1, \dots, n$ ) がとれる. 以下、 $\mu_k = \inf\{\mu(W); \dim W = k\}$  として、 $\mu_k = \lambda_k$  を示す. いま、 $W_k = \text{span}\{q_1, \dots, q_k\}$  にとる.  $\forall x \in W_k$  を  $x = x_1 q_1 + \dots + x_k q_k$  と展開すれば、 $x^*x = |x_1|^2 + \dots + |x_k|^2 = 1$  および  $x^*Ax = \lambda_1 |x_1|^2 + \dots + \lambda_k |x_k|^2$  であるから、 $\mu(W_k) = \lambda_k$ , したがって  $\mu_k \leq \lambda_k$ . - ① 一方、 $U_k = \text{span}\{q_k, \dots, q_n\}$  とすると、任意の  $k$  次元部分空間に対し、 $\dim(U_k \cap W) = \dim U_k + \dim W - \dim(U_k + W) \geq 1$ . ゆえに、 $x_0 \in U_k \cap W$ ,  $x_0^*x_0 = 1$  を満たす  $x_0 = (x_{0i})$  が存在して、 $x_0^*Ax_0 = \sum_{i=k}^n \lambda_i |x_{0i}|^2 \geq \lambda_k$ . よって、 $\mu(W) \geq \lambda_k$ . したがって、 $\mu_k \geq \lambda_k$ . - ②

以上、①, ②より、 $\mu_k = \lambda_k$  である. □

さて、ここまでくれば、Weylの単調性定理の証明はすぐに帰結される.

[証明 (H.Weyl)]

$x^*x = 1$  となるすべての  $x \in W$  に対して、 $x^*(B - A)x \geq 0$  であるから、 $x^*Bx \geq x^*Ax$  が成立する. し

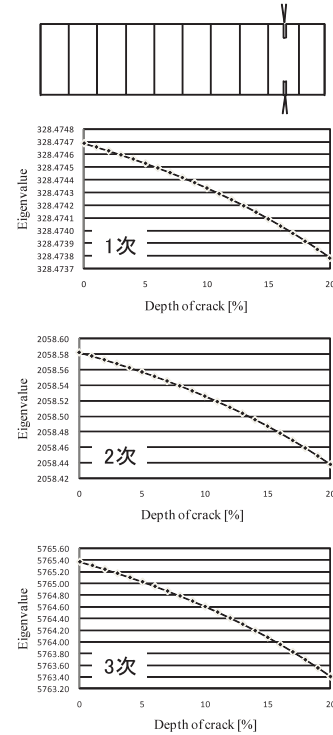


図-8 き裂の深さと振動数の変化

たがって、一つの  $k$  次元部分空間  $W$  の中を動かして、supをとると、

$$\mu_B(W) = \sup\{x^*Bx; x \in W, x^*x = 1\}$$

$$\mu_A(W) = \sup\{x^*Ax; x \in W, x^*x = 1\}$$

に対して、 $\mu_B(W) \geq \mu_A(W)$  となる. そこであらゆる  $k$  次元部分空間  $W$  を考えて、その中で  $\inf$  をとると、

$$\inf\{\mu_B(W); x \in W, x^*x = 1\} \geq$$

$$\inf\{\mu_A(W); x \in W, x^*x = 1\}$$

である.

よって、Courant-Fischer の定理より、 $\beta_k \geq \alpha_k$ . □

##### 4.2 評価関数を用いた探索/同定アルゴリズムの概要

図-7に示す解析モデルについて考える. この解析モデルには回転楕円形状の介在物が含まれており、また表面き裂を表すスリットが端部から75[mm]の位置に入っているものとする. その他の寸法については、図-7に示す通りである. スリットの深さと解析モデルの固有振動数の変化を、図-8に示す. スリットの深さの増加に伴い部材に蓄えられるひずみエネルギーは減少するため、Weylの単調性定理により、各次数の固有振動数は単調減少している.

さてここで、スリットが入っている位置を、測定された部材の固有振動数から探し当てる方法について考えてみる.

(1) 距離関数としての評価関数構築の概要

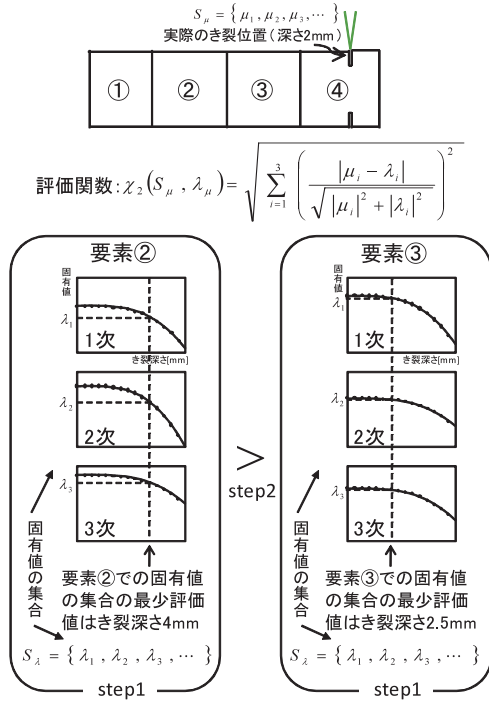


図-9 き裂の位置の同定アルゴリズム

本問題解決のためには、解析で得られた固有値の集合  $S_\lambda = \{\lambda_1, \dots, \lambda_n\}$  より、与えられた (測定された) 固有値の集合  $S_\mu = \{\mu_1, \dots, \mu_n\}$  に最も近い点を選出する必要がある。ここに、各固有値の添え字は次数を表すものとする。そこで、これら2つの固有値の集合間に距離を導入することにより、固有値の集合からなる集合族を距離空間として扱うことで、その要素である固有値の集合  $S_\lambda$  の中から、 $S_\mu$  との距離が最少となるものを探し出すことを考える。また、距離関数の作成では、各次数の固有値の特性であるオーダーの違いによる差の積み残し現象の緩和が重要な課題となる。このことは、与えられた固有値の集合に最も近い集合を選出するため探索の精度向上につながるからである。

距離の公理は、関数が次式の I.~III. の性質を満たすことである。

$$\begin{cases} \text{I.} & d(\alpha, \beta) = d(\beta, \alpha) \\ \text{II.} & d(\alpha, \beta) \geq 0, \quad d(\alpha, \beta) = 0 \Leftrightarrow \alpha = \beta \\ \text{III.} & d(\alpha, \beta) \leq d(\alpha, \gamma) + d(\gamma, \beta) \end{cases}$$

一般的な評価関数として、ユークリッドの距離関数を正規化した次の関数がよく用いられている。

$$\chi_1(S_\mu, S_\lambda) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{|\mu_i - \lambda_i|^2}{|\lambda_i|^2}} \quad (27)$$

しかし、式 (27) で表される評価関数  $\chi_1$  は距離の公理 I. を満たしておらず距離関数とはなっていない。そこで、式 (27) の関数の分母に着目し、新たな III. の三角

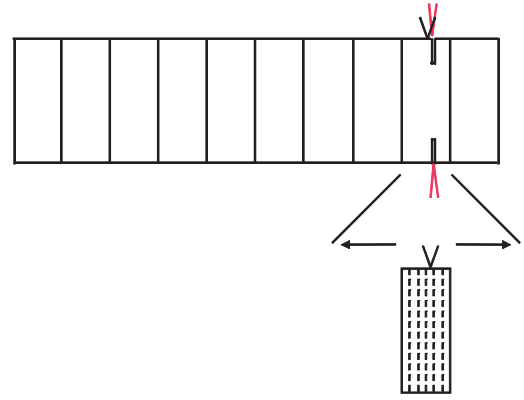


図-10 細分化要素による階層的探索法

不等式を満足する次の評価関数を提案する。

$$\chi_2(S_\mu, S_\lambda) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{|\mu_i - \lambda_i|}{\sqrt{|\mu_i|^2 + |\lambda_i|^2}} \right)^2} \quad (28)$$

ここに、関数  $\chi_2$  は公理 I.~III. を満たす。なお、使用する固有値の数は、比較する点が同一超球面上に存在しないために各点の成分数は3~4個必要である。

#### (2) 探索/同定法の計算手順の概要

分かりやすさのため、部材のはりを4つの要素に分割したものを図-9に示す。実際の有限要素解析では、さらに細かく分割をしている。はり上辺のV印は、実際のき裂位置を示す。

[step1.] 先ず図-9における任意の1つの要素の中央に1個のき裂があると仮定する。そして、き裂を順次深くし、それぞれの深さに対応する固有値を求める。次に、それらの固有値から各深さの評価値を求め、その最小値を要素の評価値とする。例えば、図-9における要素②において、中央に1個のき裂があると仮定して、き裂を順次深くしてゆく。そのときの各次数における固有値の減少を表したグラフがstep1の枠内に示されている。そして、要素②の中だけで、き裂を順次深くしていったときの評価関数の値を比べると、4[mm]のときの固有値の集合が最少であったとする。

[step2.] き裂のある要素を順次全ての要素に拡張して、step1と同様の操作をする。図-9では、要素②の時と同様の操作を要素③についても行ったことを示している。

[step3.] step2で得た各要素についての評価値を互いに比べることで、き裂存在の可能性が高い要素を数個求め、き裂を含む要素と考える。図-9では、要素②に対する評価値と要素③に対する評価値を比べた結果、要素③に対する評価値がより小さい値を示したことを表している。

[step4.] step3で得たき裂が予想されるの要素を図-10のように更に  $m$  個に分割する。これは、1個のき

裂が任意の区間に存在できることを意味する。これを細分要素と呼ぶ。そして、この細分化要素を用いて再度評価を行う。

以上のように同定すると、全要素にわたる総当り法を回避した分枝限定法的同定法が実現できる。さらに、図-9、図-10の過程を階層的に繰り返すことによって本同定法を再帰的に組み合わせることができる。その結果、能率的で、高精度の探索が可能になる。

## 5. おわりに

本彙報は、複合材料からなる構造物の部材に生じた欠損やき裂の位置や寸法を、固有振動数の変化から同定する方法について、研究の紹介も含めて述べたものである。前著での研究<sup>1),2)</sup>を受けて、Weylの単調性定理を応用したき裂探索の分枝限定法的同定アルゴリズムに、森・田中理論を用いたEshelby等価介在物法を組み込んでいる。これによって、Weylの単調性定理を基本理論として用いている本研究において、材料の不均質性を均質化させた平均弾性として有限要素法の定式化に簡便に取り込むことが可能になる。今後の展望として、材料の不均質性の全体積に占める割合および不均質物質の角度による固有値の単調性の変化を踏まえた摂動解析<sup>2)</sup>、およびその上でのき裂探索/同定のための理論の開発およびその検証、複数き裂の探索/同定のための理論の構築を考えている。

## 参考文献

- 1) 浅野 直輝, 山本 茂樹: 計算力学による微小き裂探索, 日本機械学会第17回計算力学講演会講演論文集, No.04-40, 1421, pp.405-406, 2004.
- 2) 浅野 直輝, 山本 茂樹: 固有値解析による微小き裂の探索/同定のための数学理論とその応用, 日本機械学会第6回最適化シンポジウム(OPTIS2004)講演論文集, No.04-46, pp.115-120, 2004.
- 3) 山本 鎮男: ヘルスマニタリング - 機械・プラント・建築・土木構造物・医療の健全性監視, 共立出版, 1999.
- 4) 国土交通省鉄道局監修, (財) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等維持管理標準・同解説 (構造物編), 丸善, 2007.

- 5) 羅休, 羽矢洋, 稲葉智明, 中西康博, 塩谷智基: AE法による鉄道橋梁下部工の損傷調査法に関する実験的検証, 鉄道総研報告 Vol.17, No.3, 2003.
- 6) 大野克嗣: 非線形な世界, 東京大学出版会, 2009.
- 7) 岡本 久: ナヴィエ-ストークス方程式の数理, 東京大学出版会, 2009.
- 8) Mori, T. and Tanaka, K.: Average stress in matrix and average energy of materials with misfitting inclusions, *Acta Metall.*, Vol.21, pp.571-574, 1973.
- 9) Eshelby, J. D.: The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems, *Proc. Roy. Soc. London*, Vol.A214, pp.376-396, 1957.
- 10) 東郷 敬一郎: 材料強度解析学 - 基礎から複合材料の強度解析まで-, 内田老鶴圃, 2004.
- 11) 村上 章, 登坂 宣好, 堀 宗朗, 鈴木 誠: 有限要素法・境界要素法による 逆問題解析 - カルマンフィルタと等価介在物法の応用-, コロナ社, 2002.
- 12) Mura, T.: *Micromechanics of Defects in Solids* (Second, Revised Edition), Kluwer Academic Publishers, 1987.
- 13) K.J.Bathe, E.L.Wilson 菊池 文雄訳: 有限要素法の数値計算, 科学技術出版社, 1985.
- 14) G.W.Stewart, Ji-guang Sun: *Matrix Perturbation Theory* (Computer Science and Scientific Computing), Academic Press, 1990.
- 15) Horn, R. A., Johnson, C. R.: *Matrix Analysis*, Cambridge University Press, 2008.
- 16) 齋藤 正彦: 基礎数学4 線形代数演習, 東京大学出版会, 2001.
- 17) J. H. Wilkinson: *Algebraic Eigenvalue Problem*, Oxford Press, 1965.
- 18) Yuji Nakasone, Hirotsada Nishiyama, Tetsuharu Nojiri: Numerical equivalent inclusion method: a new computational method for analyzing stress fields in and around inclusions of various shapes, *Materials Science and Engineering*, A285, pp.229-238, 2000.
- 19) Dunn, M. L., M. Taya: Micromechanics predictions of the effective electroelastic moduli of piezoelectric composites, *em Int. J. Solids Struct.*, Vol.30, pp.161-175, 1993.
- 20) GREGORY J. RODIN: ESHELBY'S INCLUSION PROBLEM FOR POLYGONS AND POLYHEDRA, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 44, No. 12, pp.1977-1995, 1996.
- 21) V. A. LUBARDA, X. MARKENSCOFF: ON THE ABSENCE OF ESHELBY PROPERTY FOR NON-ELLIPSOIDAL INCLUSIONS, *Int. J. Solids Structures*, Vol. 35, No.25, pp.3405-3411, 1998.
- 22) 小林 昭一: 構造力学 基礎/理論 上, 下, 培風館, 1990.
- 23) 崎元 達郎: 構造力学 [上], [下], 森北出版, 1994.
- 24) 川井 忠彦: マトリックス法振動および応答 (コンピュータによる構造工学講座 I-4-B), 培風館, 1975.

## 茨城高専 1, 2 年生を対象とした数学共通テストの実施と分析

河原 永明、山本 茂樹、長本 良夫、五十嵐 浩、中川 英則

An Analysis of Achievement Test of Mathematics for The First and Second Year Students of Ibaraki National College of Technology

Nagaaki KAWAHARA, Shigeki YAMAMOTO, Yoshio OSAMOTO, Hiroshi IGARASHI, and Hidenori NAKAGAWA

**Abstract:** In 2008, a mathematical achievement test was given to the first and second year students of Ibaraki National College of Technology. This article includes a detailed description of the test results, and we identify and analyze the students' weak areas as revealed by their test results.

### 1. はじめに

平成 14 年に改定された学習指導要領で学習した生徒が入学するようになり、学生の基礎学力の低下が社会的に懸念される時代を迎え、いろいろな高専でも低学年を中心とした達成度調査が行われるようになった<sup>1)～5)</sup>。茨城高専数学科の教員間でも新入生の基礎学力の低下は感じられてはいたが、具体的な調査は行ってはなかった。授業や定期試験の単なる印象のみでの議論は不毛であるので、定量的資料が必要ではないかということになり、平成 20 年より 1 年生の 4 月に数学の基礎学力調査を実施することとなった。また平成 21 年より 2 年生に対しても 1 年生の学習内容に関する学力調査を行っている。

本論文はこれらの調査の分析を行い、茨城高専 1, 2 年生の数学の学力の状態を明らかにし、茨城高専の数学教育の改善に役立てることを目的とするものである。

### 2. 1 年生共通テストの分析

1 年生共通テストの出題範囲は中学 3 年間で学習する内容からである。1 年生のテストは平成 21 年、平成 22 年が同一問題であり、平成 20 年は関数の単元と立体図形の単元が異なる問題になっている（点数に換算すると 20 点分）。各年度の受験者数は平成 21 年度が 220 名、平成 22 年度が 217 名、平成 20 年度が 217 名であった。年度別・学科別平均点は表 1 のようになっており、平成 21 年度と平成 22 年度を比較すると M 科と C 科を除き平均点は下がり、学年全体の平均点も下がっている。平成 20 年度は問題が一部異なっている関係で平均点がやや高めになったと考えられる。（ここで M は機械システム工学科、S は電子制御工学科、E は電気電子システム工学科、D は電子情報工学科、C は物質工学科の略称である。）

表 1 年度別・学科別平均点

|     | M    | S    | E    | D    | C    | 全体   |
|-----|------|------|------|------|------|------|
| H20 | 82.4 | 83.5 | 80.2 | 86.4 | 88.3 | 84.1 |
| H21 | 76.1 | 79.7 | 79   | 79.5 | 77   | 78.3 |
| H22 | 77.3 | 76.7 | 77.7 | 74.3 | 78.9 | 77.1 |

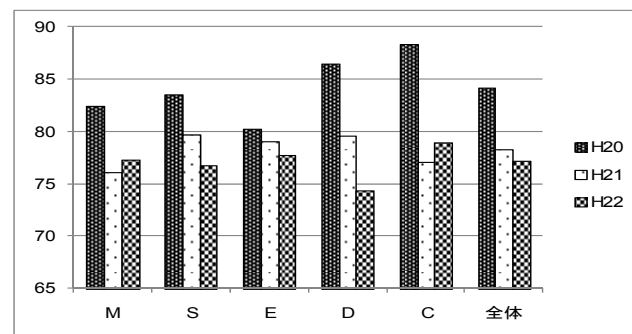


図 1 年度別・学科別平均点

そこで平成 20 年度、平成 21 年度、平成 22 年度の共通問題の平均点を比較したものが以下の表 2 および図 2 である。

表 2 年度別・学科別平均点（共通問題）

|     | M    | S    | E    | D    | C    | 全体   |
|-----|------|------|------|------|------|------|
| H20 | 80   | 82   | 78.5 | 84.7 | 87.1 | 82.4 |
| H21 | 78.7 | 83.6 | 82.2 | 83.4 | 80.1 | 81.6 |
| H22 | 79.9 | 81   | 82.3 | 78.3 | 82.1 | 80.7 |

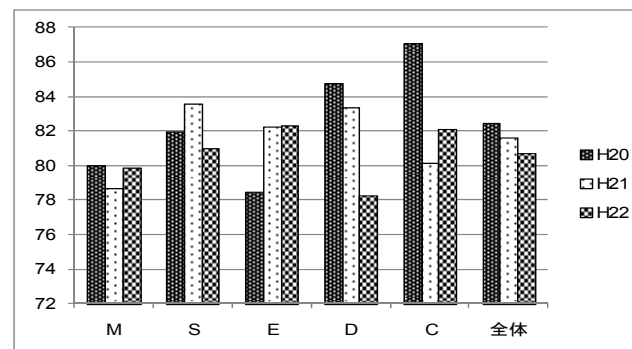


図 2 年度別・学科別平均点（共通問題）



学科別では年度ごとに多少の上下はあるが、全体の平均点を見ると僅かながら減少している傾向がある。

次の表3および図3に単元別正解率を年度別に比較したものを示す。

表3 単元別正解率

|      | H20  | H21  | H22  |
|------|------|------|------|
| 数と式  | 79   | 78.6 | 77.7 |
| 関数   | 99.5 | 83.4 | 82.5 |
| 確率   | 96.1 | 96.3 | 94.2 |
| 平面図形 | 89.1 | 85   | 85.3 |
| 立体図形 | 82.5 | 46.5 | 43.1 |

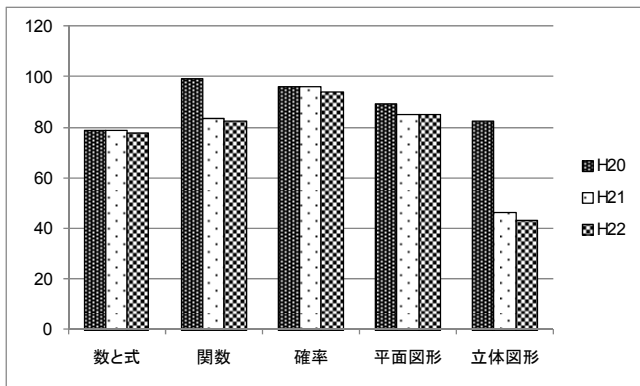


図3 単元別正解率

平成20年度と平成21、平成22年度は関数と立体図形で問題が異なっているので正解率に差があるが、その他の単元ではほとんど差は見られない。また平成21、平成22は同一問題であるがこの2年間では差はないと言える。

1年生の出題範囲の概要は次のとおりである。

1. (1) ~ (3) 基本的な計算問題
  - (4) 式の展開
  - (5), (6) 因数分解
  - (7), (8) 1次方程式とその応用問題
  - (9) 連立方程式
  - (10) 2次方程式
  - (11) 2次方程式の文章題
2. 関数
3. (1) 場合の数
  - (2) 確率
4. (1) 直線図形
  - (2) 円
5. 立体図形

問題別の各年度ごとの正解率を示したものが以下の図4、図5、図6である。(問題は1問5点で計20題の出題である。)

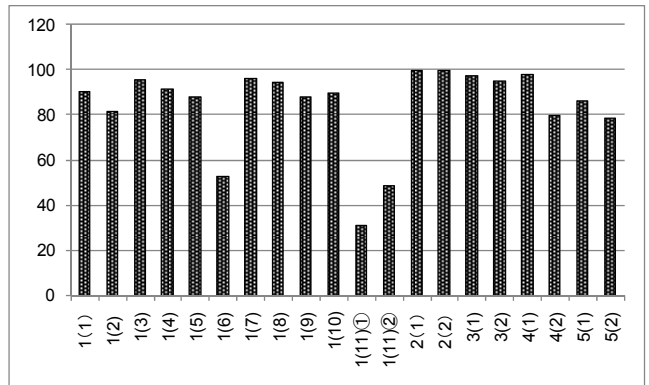


図4 平成20年度問題別正解率

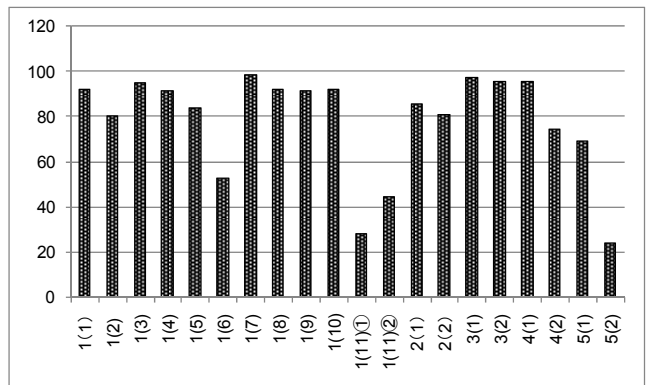


図5 平成21年度問題別正解率

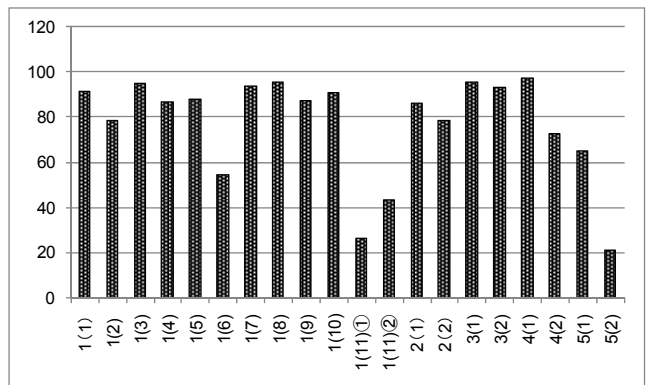


図6 平成22年度問題別正解率

全体的に見ると正解率は高く、本校の1年生については中学校で学習する数学の基本に関する理解度は十分であると考えられる。しかし問題1(6), 1(11)①, 1(11)②, 5(2)は正解率が低い。これについては以下のような要因



が考えられる。

問題 1(6)は  $9p^2q^2 - 25q^2$  の因数分解であるが誤答の多くは  $(3pq - 5q)(3pq + 5q)$  となっており因数  $q^2$  を括りだしていなかったものである。基本的な因数分解の公式は活用できるが、式の細かな整理という点までは注意がいかない学生が多いという印象を受ける。

問題 1(1)①②は 2 次方程式の文章題であるが①の方程式を立てる問題の正解率は平成 20 年度が 30.9%、平成 21 年度が 28.1%、平成 22 年度が 26.3% と他の問題の正解率に比べて非常に低くなっている。文章から題意を読み取り式を立てることが学生共通の弱点であることがこの数字から読み取れる。

平成 21 年度、平成 22 年度の問題 5(2)の正解率が平成 21 年度が 24%、平成 22 年度が 21.2% と大変低くなっている。この問題は三角柱を切断した立体の体積を求める問題で計算自体は難しいものではないが空間図形の把握が学生にとって困難であったと考えられる。

年度別・学科別得点分布を図 7、図 8、図 9 に示す。平成 20 年、21 年、22 年の 3 年間とも高得点の領域に多く的人数が集中しており、基礎学力に関しては均一な集団であることが窺われる。ただ平成 21 年度に比べると平成 22 年度は学科ごとで多少のばらつきが見られる。

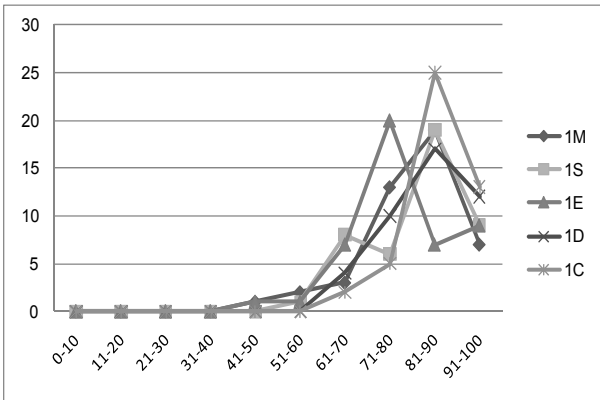


図 7 平成 20 年度学科別得点分布

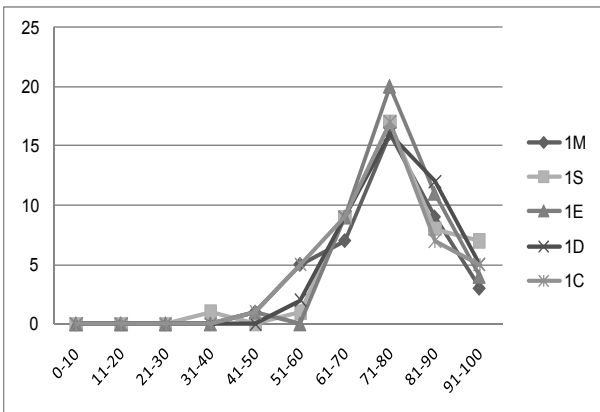


図 8 平成 21 年度学科別得点分布

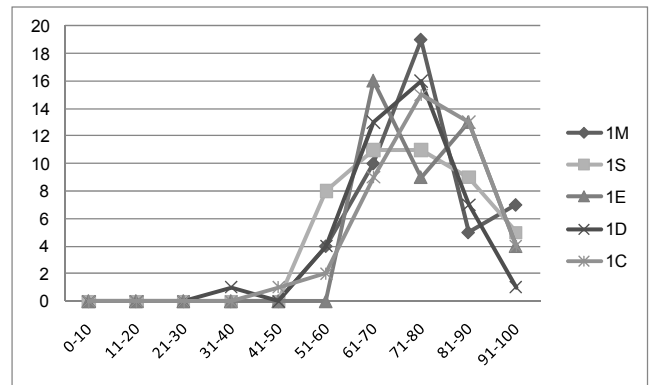


図 9 平成 22 年度学科別得点分布

### 1 年生の分析のまとめ

以上の分析から 1 年生の 4 月時点では中学数学の基礎的部分については本校の学生のレベルは高いと言える。また学科間の差は認められない。この要因としては次の点が考えられる。

- (1) 本校の入学試験を突破してきた学生はもともと学力レベルが高いと考えられる。
- (2) 本校の 1 年生に対しては入学前の春休みに中学数学の復習用の問題集を課題として課している。このことが中学数学の復習に大きく役立っている。

### 3. 2 年生統一テストの分析

2 年生のテストは平成 21 年度、平成 22 年度の 2 年にわたり同一問題で実施した。受験者数は平成 21 年度が 214 名、平成 22 年度が 210 名であった。表 4、図 10 に年度別・学科別平均点を示す。

表 4 年度別・学科別平均点

|     | M    | S    | E    | D    | C    | 全体   |
|-----|------|------|------|------|------|------|
| H21 | 29.8 | 33.1 | 30.2 | 35.6 | 34.9 | 32.7 |
| H22 | 25.6 | 35.7 | 29.3 | 34.4 | 29.2 | 31   |

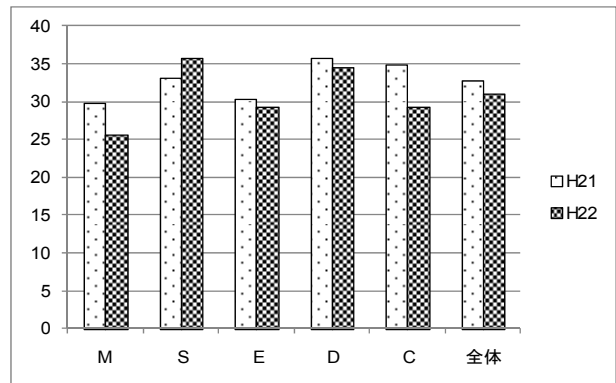


図 10 年度別・学科別平均点

2年生の特徴としては、年度・学科によらず平均点が極めて低いことである。2年生全体の年度別得点分布を図11に示す。

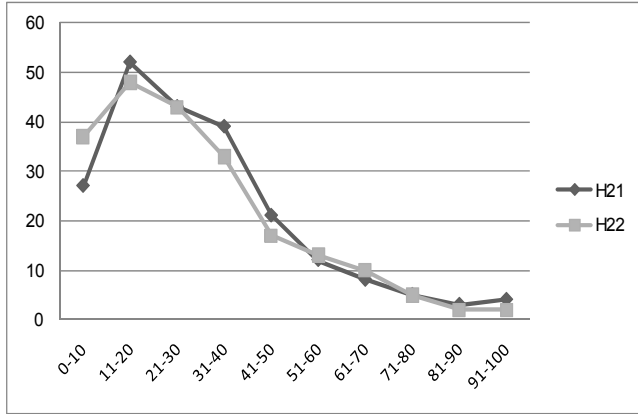


図11 年度別得点分布 (2年生全体)

平成21年度、22年度とも30点付近をピークとし右下がりの分布になっている。21年、22年度とも30点未満の学生数が全体の60%程度を占めており、分布の形状は両年度とも同様の形状を示している。集団としては均一と言えるが残念ながら低いレベルでの同質な集団であると結論づけられる。

次に2年生の学科別得点分布を図12および図13に示す。学科ごとの分布はサンプル数が各学科40数名となるのでばらつきが学科により多少生じるが全体の傾向としては学科間で大きな差はないと言える。年度別でみると、22年度の方が21年度に比べ若干学科間のばらつきがあるといえる。

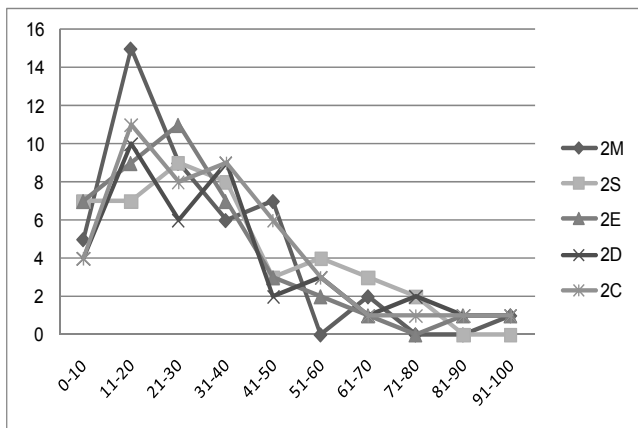


図12 平成21年度学科別得点分布

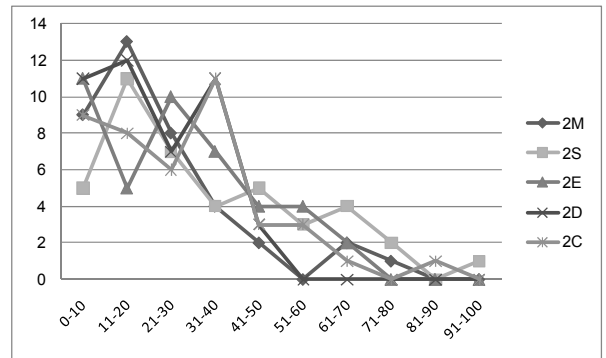


図13 平成22年度学科別得点分布

2年生の出題範囲の概要は次のとおりである。

1. (1) 因数分解
- (2) 式の計算
- (3) 3次方程式
- (4) 恒等式
2. 2次方程式の応用問題
3. 2次関数の応用問題
4. 円と直線の問題
5. 三角比
6. 指数・対数方程式

次に問題別正解率の学科別正解率を図14、図15に示す。

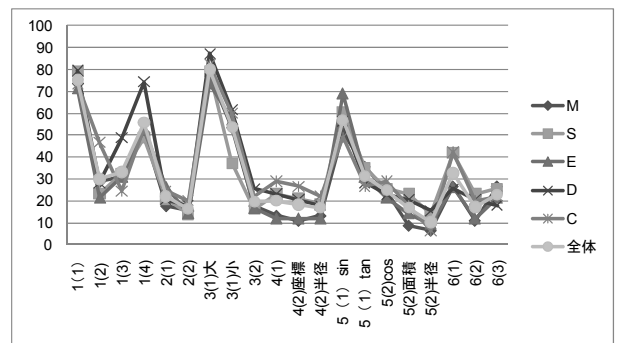


図14 平成21年度学科別問題正解率

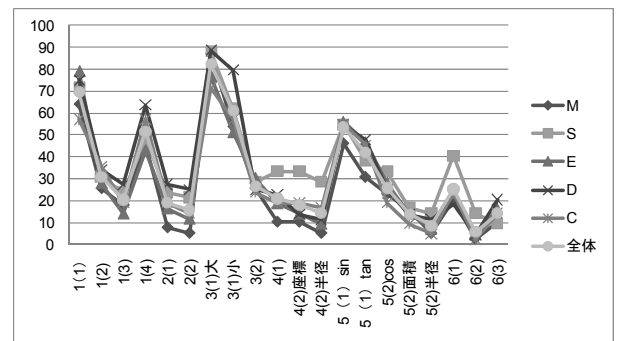


図15 平成22年度学科別問題正解率

問題別の正解率については数問の問題を除き正解率は極めて低いが、学科間での正解率の差はほとんど見られない。これは混合学級であるので当然ともいえるが、1 年分の学習内容の定着という観点から見ると、クラス間や教える教員の差の影響はあまりないということを示唆していると考えられる。

## 2 年生の分析のまとめ

2 年生では平均点も低く、得点の人数分布は低得点層に人数が集中しており、グラフは右下がりである。問題別の正解率に関しては、年度別・学科別ともに大きな相違は見られない。以上のことから 2 年生については 1 年生で学習した内容の定着率が極めて低いことが分かる。この原因としては次のようなことが考えられる。

(1) 学生は定期試験をクリアすればそれでよいと考えており、長期的視点に立ち学習を継続するという姿勢に欠けている。高専の学生は高校 3 年で大学受験をする高校生とは異なり学習の最終目標が明確に捉えられない。

(2) テストそのものに対するモチベーションの低さも要因の一つである。成績評価に直接結びつかないテストに対する取り組みの姿勢に真剣味が欠けるという点は否定できない。これは 3 年生対象の全国高専到達度試験についても同様に見られる傾向である。

(3) 答案の内容から判断すると、特に既習事項の復習をほとんど行っていないことが分かる。学生は継続的な家庭学習や長期休業中の自学自習を殆ど行っていないと想像される。

## 4. 今後の課題

(1) 1 年生については継続してテストを実施し経年変化を分析するとともに、入学後の成績との相関を調査することが必要である。

(2) 2 年生については問題の難易度をもう少しやさしいものにし、その代り問題数を増やし、1 年生で学習する範囲の全体から出題するようにする。そのためには試験時間を延ばす必要がある。

## 5. まとめ

1 年生については 3 年間、2 年生については 2 年間の資料しかないので断定的な結論を得ることはできないが、次のようなことが言えると思われる。

(1) 1 年生入学時の基礎学力は学生間での顕著な差は見られない。

(2) 高専入学後の学習指導に問題があり、今後の改善が急務である。

(3) この種の調査を継続して実施することにより、高専に入学してくる生徒の学力の動向を把握し、高専での学習

指導に役立てることが必要である。

## 参考文献

- 1) 小鉢 暢夫：「平成 14 年度八代高専 1 年生に対する数学試験結果の追跡調査」八代高専紀要 第 26 号、p.81~p.86(2004)
- 2) 上原 成功ほか：「高松高専の 16 年度四国共通試験(数学)結果の分析」高松工業高等専門学校研究紀要 41 号、p.45~p.51(2006)
- 3) 高田 功ほか：「大島商船高専における 5 年間の新入生学力診断テスト(数学)の分析」独立行政法人国立高等専門学校機構大島商船高等専門学校紀要 第 41 号、p.105~p.112(平成 20)
- 4) 長岡 耕一：「1 年数学における單元ごとの理解度アンケートの実施とその分析」論文集「高専教育」第 32 号、p.585~p.590(平成 21 年 3 月)
- 5) 荒金 憲一ほか：「1・2 年生を対象とした共通テストの実施とその分析」論文集「高専教育」第 32 号、p.661~p.666(平成 21 年 3 月)





# Simultaneous Separation Measurement of Principal Electrical Conductivities and Principal Axis Angle of Two-Dimensional Anisotropic Material Using Multi-Probe Measuring Method

Eiji NEMOTO and Aomi ONUMA

**Abstract:** We measured the principal electrical conductivities and the principal axis angle of a Pyrolytic Graphite Sheet (PGS, Panasonic Corp.) has a thickness of 100- $\mu\text{m}$  and a 12- $\mu\text{m}$ -thick aluminum foil by the multi-probe conductivity measurement method. To determine its principal electrical conductivities, a sample is electrified using a point power supply touches at the sample surface and each of three electrified probes contact with three axes which center a point power supply on the sample surface and the transient voltage changes of three directions with  $\beta=120^\circ$  are measured by this method. The average of the calculated two principal electrical conductivities of PGS are  $\sigma_{p1}=4.91 \times 10^3$  S/cm and  $\sigma_{p2}=4.02 \times 10^3$  S/cm. The geometrical mean of the two measured principal thermal conductivities of PGS is  $\sigma=(\sigma_{p1} \cdot \sigma_{p2})^{1/2}=4.45 \times 10^3$  S/cm. The anisotropic factor  $\zeta$ , which is the ratio of  $\sigma_{p1}$  to  $\sigma_{p2}$ , is 1.23. And the average of calculated  $\sigma_{p1}$  and  $\sigma_{p2}$  values of isotropic Al film are  $\sigma_{p1}=3.84 \times 10^5$  S/cm and  $\sigma_{p2}=3.69 \times 10^5$  S/cm. The geometrical mean of the two measured principal electrical conductivities of the Al film is  $\sigma=(\sigma_{p1} \cdot \sigma_{p2})^{1/2}=3.76 \times 10^5$  S/cm. And the average of anisotropic factor of the aluminum film is  $\zeta=1.04$ . So this method can measure and determine the electrical anisotropic factor. And there is a possibility for PGS to become a standard two-dimensional anisotropic material.

## 1. Introduction

The materials which bring new character and are born as cutting-edge substance accompany development of science. These are used in a wide variety of applications of industrial product and has formed human world. But, forming things contains natural materials. For making the most of these properties, we should understand physical property parameters rightly and deeply. The crystal structures of these materials have various anisotropy properties, e.g. individual electrical conductivities and thermal conductivities in the different axial directions. These anisotropies affect electrical and thermal travel. Therefore, it is valuable to measure the electrical and thermal conductivities of these anisotropic materials when frontier materials and products are designed.<sup>1),2)</sup> However, to measure these conductivities on the principal axis of an anisotropic material are very difficult. There was the only trial method. So it takes lots of time to find the correct principal values and principal axis. Thereupon, we had proposed a simultaneous separate method of measuring principal thermal conductivity using multi-temperature probes from geometrical property. And we had considered this method utility to determine principal thermal conductivity and principal axis. The thermal and electrical physical values resemble in shape of formula. Meaning of physical values in formulas correspond each other. At that we tried to apply this method to simultaneous separate measurement of principal electrical conductivities and principal axis angle of isotropic and two-dimensional anisotropic material by using multi-probe electrical conductivity measurement method.

We report the measured result for the principal electrical conductivities and the principal axis angle of a Pyrolytic Graphite Sheet (PGS) of a two-dimensional anisotropic material and aluminum foil of an isotropic material.

## 2. Theory

First, we assume two-dimensional anisotropic or isotropic samples of thickness  $h$  to measure the principal electrical conductivities. Axes  $L_i$  ( $i=1,2,3$ ) which are measured directions are taken as shown in Fig.1. We defined  $\sigma_i$  ( $i=1,2,3$ ) as the measured electrical conductivities on Axes  $L_i$  ( $i=1,2,3$ ) of the sample. The measured electrical conductivities  $\sigma_i$  ( $i=1,2,3$ ) are expressed in the following expressions, using the well-known Jacobi matrix method, with the principal axis angle  $\phi_\sigma$ , electrified probe setting angle  $\beta$ , and the parametric electrical conductivities  $\sigma_{k1}$  and  $\sigma_{k2}$ .<sup>3),5),6)</sup>

$$\sigma_1 = \sigma_{k1} + \sigma_{k2} \cos 2\phi_\sigma \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\sigma_2 = \sigma_{k1} + \sigma_{k2} \cos 2(\phi_\sigma + \beta) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\sigma_3 = \sigma_{k1} + \sigma_{k2} \cos 2(\phi_\sigma + 2\beta) \quad \dots\dots\dots (3)$$

Solutions (4) and (5) of the electrical conductivities  $\sigma_{k1}$  and  $\sigma_{k2}$  and solution (6) of the principal axis angle  $\phi_\sigma$  are obtained respectively when simultaneously equations (1)-(3).

$$\sigma_{k1} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3 - 2\sigma_2 \cos 2\beta}{4\sin^2 \beta} \dots\dots\dots (4)$$

$$\sigma_{k2} = \frac{1}{\sin 2\beta} \left\{ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + 2(\sigma_1 - \sigma_2)(\sigma_3 - \sigma_2)}{4\sin^2 \beta} + (\sigma_1 - \sigma_2)(\sigma_2 - \sigma_3) \right\}^{1/2} \dots (5)$$

$$\phi_\sigma = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{\sqrt{\sigma_{k2}^2 - (\sigma_1 - \sigma_{k1})^2}}{\sigma_1 - \sigma_{k1}} \dots\dots\dots (6)$$

The following relations exist between the parametric electrical conductivities  $\sigma_{k1}$  and  $\sigma_{k2}$ , and the principal electrical conductivities  $\sigma_{p1}$  and  $\sigma_{p2}$ .

$$\sigma_{p1} = \sigma_{k1} + \sigma_{k2} \dots\dots\dots (7)$$

$$\sigma_{p2} = \sigma_{k1} - \sigma_{k2} \dots\dots\dots (8)$$

Finally, eqs. (9) and (10) can be obtained by substituting eqs. (7) and (8) for eqs. (4) and (5).

$$\sigma_{p1} = \sigma_{k1} + \sigma_{k2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3 - 2\sigma_2 \cos 2\beta}{4\sin^2 \beta} + \frac{1}{\sin 2\beta} \left\{ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + 2(\sigma_1 - \sigma_2)(\sigma_3 - \sigma_2)}{4\sin^2 \beta} + (\sigma_1 - \sigma_2)(\sigma_2 - \sigma_3) \right\}^{1/2} \dots\dots(9)$$

$$\sigma_{p2} = \sigma_{k1} - \sigma_{k2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3 - 2\sigma_2 \cos 2\beta}{4\sin^2 \beta} - \frac{1}{\sin 2\beta} \left\{ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + 2(\sigma_1 - \sigma_2)(\sigma_3 - \sigma_2)}{4\sin^2 \beta} + (\sigma_1 - \sigma_2)(\sigma_2 - \sigma_3) \right\}^{1/2} \dots\dots(10)$$

**3. Measurement method**

**3.1 Straight disposed four-probe method<sup>4)</sup>**

At first, the electrical conductivity using straight disposed

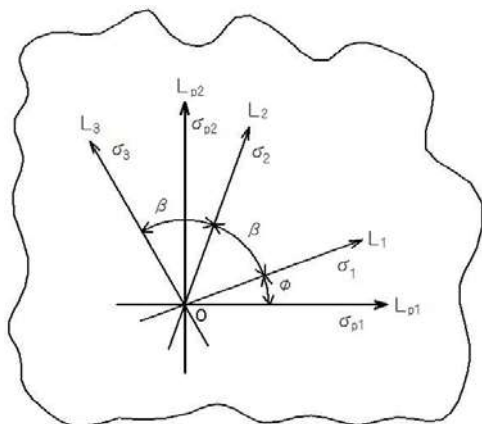


Fig.1 Geometrical relation among equiangular measuring axis  $L_i$ , principal axis x ( $L_{p1}$ ), and axis y ( $L_{p2}$ ) on the surface of a two-dimensional anisotropic or isotropic material.

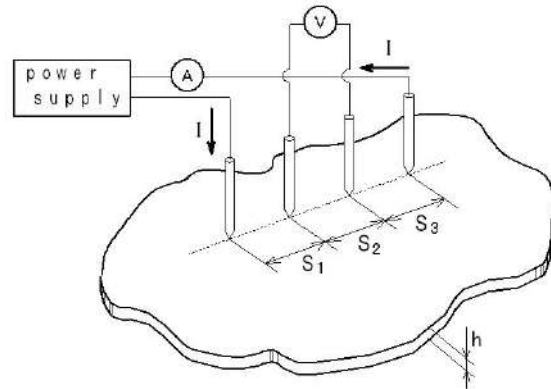


Fig.2 The image of straight disposed four-probe method in case we interpret sample as limited thickness.

four-probe method which can obtain one direction value only is expressed eqs. (11) and (12). The straight disposed four-probe method is schematically shown in Fig.2. The case in which we interpret sample as enough thickness and expands, we use eq. (11). And the other case where sample has limited thickness like Fig.2, we use eq. (12). This values can be calculated using the electrical potential difference  $\Delta V$  between inside two terminals, the sample thickness  $h$ , the added electrical current  $I$  by a point power supply, the distance of adjoining probes  $s_i$  ( $i=1,2,3$ ).

$$\sigma = \frac{I}{\Delta V} \frac{1}{s_1} - \frac{1}{s_1 + s_2} - \frac{1}{s_2 + s_3} + \frac{1}{s_3} \dots\dots\dots (11)$$

$$\sigma = \frac{I}{\Delta V} \frac{\ln \frac{(s_1 + s_2)(s_2 + s_3)}{s_1 s_3}}{2\pi h} \dots\dots\dots (12)$$

**3.2 Multi-probe conductivity measurement method**

This method order straight disposed four-probe to three directions. The schematic diagram of this method in case we interpret sample as limited thickness is shown in Fig. 3. The electrical conductivity using multi-probe method is expressed eqs. (13) and (14). The case in which we interpret sample as enough thickness and expands, we use eq. (13). And the other case where sample has limited thickness as shown in Fig.3, we use eq. (14). In the experiment, these values can be calculated using the electrical potential difference  $\Delta V_i$  between inside two terminals of own axis direction, the sample thickness  $h$ , the added electrical

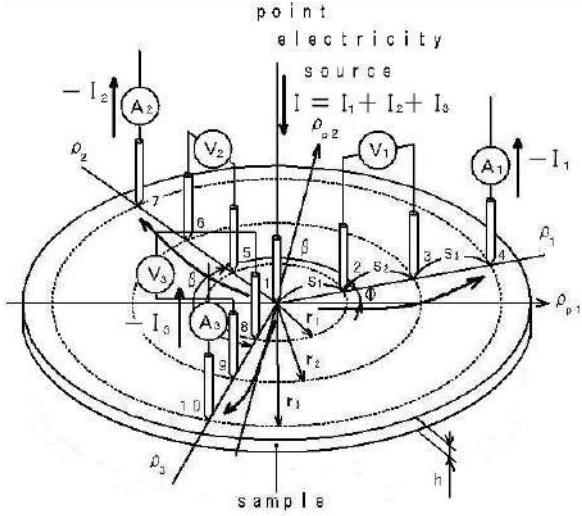


Fig.3 Schematic diagram of the multi-probe electrical conductivity measurement method in same case with Fig.2.

current  $I$  by a point power supply, the quantity of the current in each direction  $I_i$  ( $i=1,2,3$ ), distance of adjoining probes of own axis direction  $s_i$  ( $i=1,2,3$ ), distance from two terminals measure voltage to probes electrify out of sample other axis directions  $dx$  and  $y$ . Eqs. (13) and (14) are used for calculate first axis direction electrical conductivity. Second and third direction values are figured similarly. Three probes in each direction are set with radii  $r_i$  ( $i=1,2,3$ ) center a supplying probe.

$$\sigma_1 = \frac{I \frac{s_2}{s_1(s_1+s_2)} + I_1 \frac{s_2}{s_3(s_2+s_3)} + I_2 \frac{d_{2,7}-d_{3,7}}{d_{2,7}d_{3,7}} + I_3 \frac{d_{2,10}-d_{3,10}}{d_{2,10}d_{3,10}}}{2\pi\Delta V_1} \dots (13)$$

$$\sigma_1 = \frac{I \ln \frac{s_1+s_2}{s_1} + I_1 \frac{s_2+s_3}{s_3} + I_2 \ln \frac{d_{2,7}}{d_{2,7}} + I_3 \frac{d_{2,10}}{d_{2,10}}}{2\pi\Delta V_1} \dots (14)$$

The distance from two terminals measure voltage to probes electrify out of sample other axis directions which are used to measure of the first axis's electrical conductivity are expressed eqs. (15)-(18).

$$d_{2-7} = \sqrt{s_t^2 - 2s_t s_1 \cos \beta + s_1^2} \dots (15)$$

$$d_{3-7} = \sqrt{s_t^2 - 2s_t(s_1+s_2) \cos 2\beta + (s_1+s_2)^2} \dots (16)$$

$$d_{2-10} = \sqrt{s_t^2 - 2s_t s_1 \cos 2\beta + s_1^2} \dots (17)$$

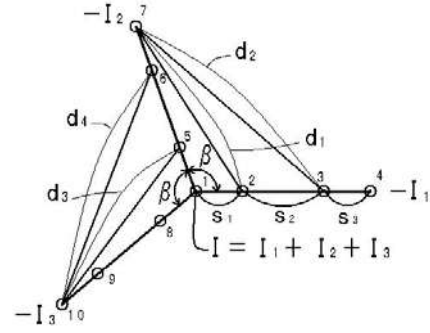


Fig.4 Distance from two terminals measure voltage to probes electrify out of sample other axis directions  $dx, y$ .

$$d_{3-10} = \sqrt{s_t^2 - 2s_t(s_1+s_2) \cos 2\beta + (s_1+s_2)^2} \dots (18)$$

From the geometrical relationship among the three axes, we can show  $dx$  and  $y$  by eqs. (15)-(18). We express Eqs. (15)-(18) as  $d_1, d_2, d_3, d_4$  each other, Those geometrical relationship is expressed eqs. (19)-(22) and Fig.4.

$$d_1 = d_{2-7} = d_{5-4} = d_{5-10} = d_{10-5} \dots (19)$$

$$d_2 = d_{3-7} = d_{6-4} = d_{6-10} = d_{10-6} \dots (20)$$

$$d_3 = d_{2-10} = d_{8-4} \dots (21)$$

$$d_4 = d_{3-10} = d_{9-4} \dots (22)$$

### 3.3 The principal electrical conductivities and the principal axis angle<sup>(3),5),6)</sup>

By using this theory, the principal electrical conductivities  $\sigma_{p1}$  and  $\sigma_{p2}$  are obtained the following eqs. (23) and (24) by substituting the angle  $\beta=120^\circ$  for eqs. (9) and (10).

$$\sigma_{p1} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) - \frac{2}{3}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \lambda_2)(\sigma_2 - \sigma_3)} \dots (23)$$

$$= \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) - \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}$$

$$\sigma_{p2} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) + \frac{2}{3}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \lambda_2)(\sigma_2 - \sigma_3)} \dots (24)$$

$$= \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) + \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}$$

Similarly, the principal axis angle  $\phi_\sigma$  can be used to calculate  $\sigma_{p1}$  and  $\sigma_{p2}$  from eqs. (23) and (24), and  $\sigma_{p1}$  and  $\sigma_{p2}$  from (7) and (8), can substitute for eq. (6), and can be obtained using eq. (25).

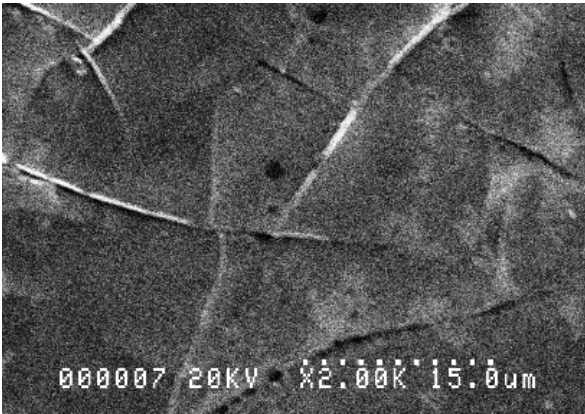


Fig.5 Scanning electron microscopy image of surface of PGS (magnification ×1000).

$$\varphi_\sigma = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{\sqrt{3}(\sigma_2 - \sigma_3)}{2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3} \dots\dots\dots (25)$$

4. Samples

The PGS sample was made by Panasonic Corp. The sample is 11.5×18cm<sup>2</sup> and has a thickness *h*=100μm. The sample is lusterless silver black. The density of the sample is  $\rho=1232 \text{ kg/m}^3$ .<sup>7)</sup> In Fig.5, a surface of the PGS measured by scanning electron microscopy with a magnification of 1000 and an applied voltage of 10 kV is shown. The surface of PGS is composed of many flat board-shaped combined with thin films. As shown in Fig.6, the crystal structure of PGS is  $\alpha$  graphite structure of hexagonal series. The lattice parameter can be calculated to be *c*=0.6704 nm, which indicated that the PGS and a-b planes are in the same direction. Fig.7 shows the X-ray diffraction spectrum of PGS. It was examined by using Ultima IV X-ray diffraction meter (RIGSKU Co. Ltd). PGS is measured on condition that a cooper X-ray that is Cu-K $\alpha$ 1 ray with a wavelength of 1.5405 Å

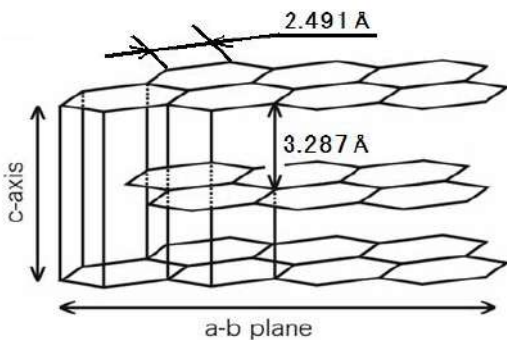


Fig.6 Crystal structure of PGS<sup>7),8)</sup>.

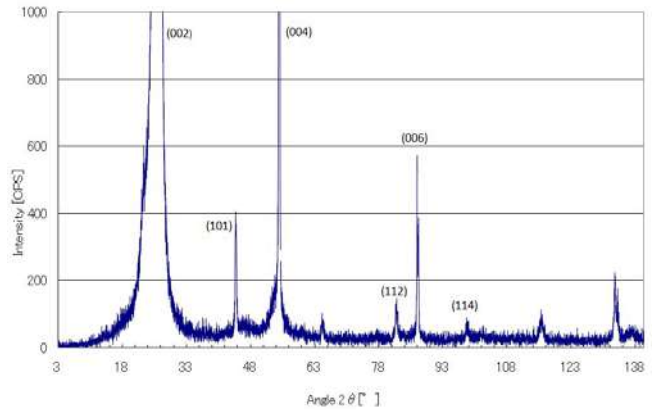


Fig.7 X-ray diffraction spectrum of the PGS.

and an applied voltage of 40 kV and electrical current of 40 mA.

In Fig.7, the peak angle  $\theta$  is 13.27°. It estimated that the PGS has impurity by the reason of this data can be observed unknown peak.

The aluminum foil is popular material that is used for cooking in home. The sample has a thickness 12μm and enough expands which doesn't affect electrification by the edge. The sample is lustrous silver. The density of the sample is  $\rho=2699 \text{ kg/m}^3$ .<sup>7)</sup> The crystal grain is returned to near to sphere by annealing. So it is regarded as isotropic sample.

5. Experimentation

An outline of the experimental apparatus for the principal electrical conductivities and principal axis angle measurements is shown in Fig.8. The copper bars are made up into probes by sharpening the top. The current *I* of the point electricity source is controlled using the power supply that supplies constant current and voltage. Samples is set on isolated board and placed on the multi-probe. Changes of voltage are measured with the data recorder (R2M-2G3, M-systems Co., Ltd.). A supplying electricity probe is common. First, a point power supply touches at the sample surface and electrified probes contact with the sample surface on three axes which center a point power supply. Then we measure distributed current with ammeter and voltages of three directions by touching two probes between center and electrified probe in each axis direction when it enters constant state. Finally, we calculate electrical conductivities in each axis direction and the principal electrical conductivities and principal axis angle using eqs.(14), (23)-(25).



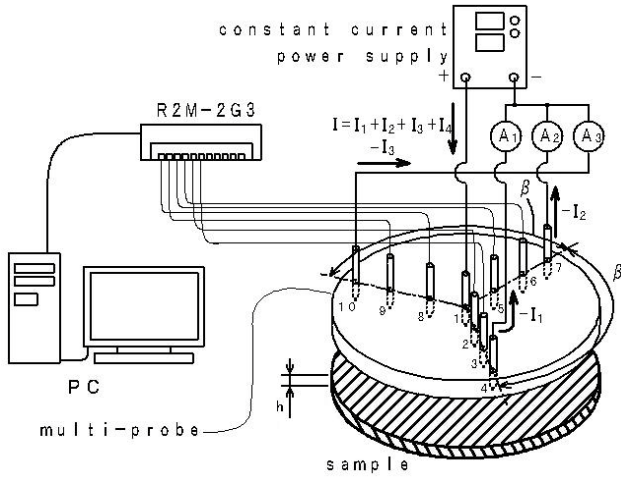


Fig.8 Outline of the experimental apparatus for the multi-probe electrical conductivity measurement method.

## 6. Results

An example of the typical distributed voltage of three directions of the PGS at room temperature  $T=300$  K are shown in Fig.9. At this point these are measured in a current  $I= 1.5$  A the power supply. From the changes of voltage shown in Fig. 8, we interpret sample as limited thickness and calculated electrical conductivities in each axis direction  $\sigma_i$  ( $i=1,2,3$ ) using eq. (14) and the principal electrical conductivities  $\sigma_{p1}$  and  $\sigma_{p2}$  using eqs. (23) and (24) and principal axis angle  $\varphi_\sigma$  using eq. (25). The calculated  $\sigma_{p1}$  and  $\sigma_{p2}$  values are  $\sigma_{p1}=4.90 \times 10^3$  S/cm and  $\sigma_{p2}=4.03 \times 10^3$  S/cm and  $\varphi_\sigma$  is 0.237 rad.

In Fig.10, we show calculated principal electrical conductivities  $\sigma_{p1}$  and  $\sigma_{p2}$  of PGS in measurement. The average of calculated  $\sigma_{p1}$  and  $\sigma_{p2}$  values are  $\sigma_{p1}=4.91 \times 10^3$  S/cm and

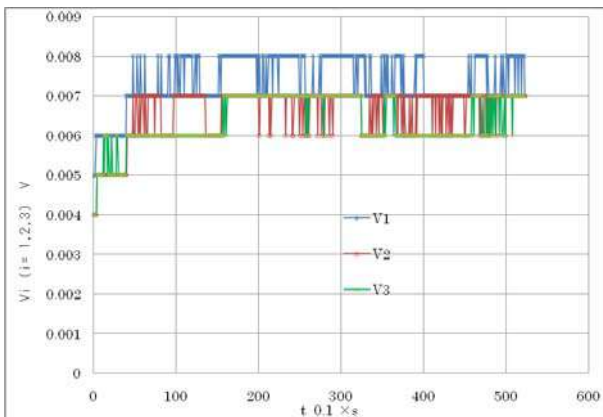


Fig.9 Voltages change of PGS obtained by multi-probe electrical conductivity method.

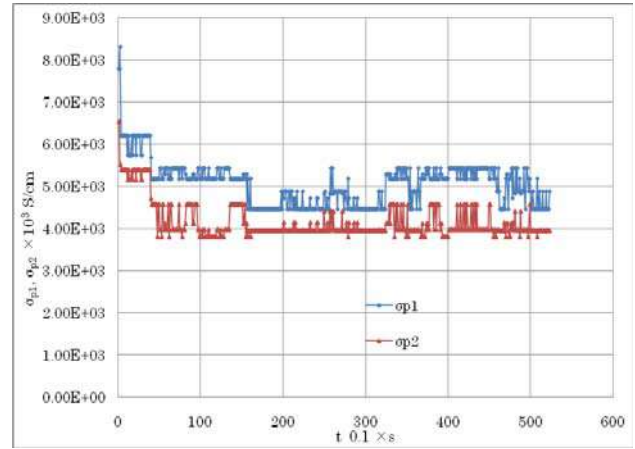


Fig.10 Calculated principal electrical conductivities  $\sigma_{p1}$  and  $\sigma_{p2}$  of PGS.

$\sigma_{p2}=4.02 \times 10^3$  S/cm. Two principal electrical conductivities of PGS converge on constant values when voltages enter constant state. The geometrical mean of the two measured principal thermal conductivities of PGS is  $\sigma = (\sigma_{p1} \cdot \sigma_{p2})^{1/2} = 4.45 \times 10^3$  S/cm. But the documented value is  $1.00 \times 10^4$  S/cm offered by Panasonic Corp<sup>8</sup>). We say about the cause of experimental value is half of the documented value later. The anisotropic factor  $\zeta$  is defined as  $\sigma_{p2}$  divided by  $\sigma_{p1}$ . The average of anisotropic factors of PGS is  $\zeta=1.23$ . From this value, we see PGS as a two-dimensional anisotropic material.

To confirm the validity of this measurement method, we measured the principal electrical conductivities and principal axis angle of an aluminum film that is considered to be isotropic material of thickness  $h=12$   $\mu\text{m}$ . If used eqs.(23)-(25), an example of the typical measured principal electrical conductivities are  $\sigma_{p1}=3.69 \times 10^5$  S/cm and  $\sigma_{p2}=3.52 \times 10^5$  S/cm, and the principal axis angle  $\varphi_\sigma$  is 0.686 rad. The average of calculated  $\sigma_{p1}$  and  $\sigma_{p2}$  values are  $\sigma_{p1}=3.84 \times 10^5$  S/cm and  $\sigma_{p2}=3.69 \times 10^5$  S/cm. The geometrical mean of the two measured principal electrical conductivities of the aluminum film is  $\sigma = (\sigma_{p1} \cdot \sigma_{p2})^{1/2} = 3.76 \times 10^5$  S/cm. This geometrical mean is close to the documented value of  $3.64 \times 10^5$  S/cm offered by the Chronological Scientific Tables<sup>7</sup>). And the average of anisotropic factor of the aluminum film is  $\zeta=1.04$ . This shows that it is an isotropic material.

In Table 1 and 2, the measured data of the principal electrical conductivities obtained by the multi-probe conductivity measurement method are shown. To ascertain that sample is two-dimensional anisotropic material or isotropic material, it is extremely effective to judge the anisotropic factor. In Table 1 and 2, we don't show the average of the principle axis angle because measured direction varies from other measurement.

Table 1 Measured principal electrical conductivities and anisotropic factor of PGS.

| The number of measurement | Principal electrical conductivities $\sigma \times 10^3$ S/cm |               | Anisotropic factor $\xi$ | Principal axis angle $\varphi_\sigma$ rad |
|---------------------------|---|---------------|--------------------------|---|
|                           | $\sigma_{p1}$   | $\sigma_{p2}$ |                          |   |
| 1                         | 4.90  | 4.03          | 1.22                     | 0.238                                     |
| 2                         | 4.79  | 4.00          | 1.20                     | 0.126                                     |
| 3                         | 4.90  | 4.03          | 1.22                     | 0.239                                     |
| 4                         | 5.05  | 4.00          | 1.26                     | 0.394                                     |
| average                   | 4.91  | 4.02          | 1.23                     |   |

## 7. Speculation

The thickness and the degree of surface's smoothness and the range of electrical conductivity are the key that whether the sample is possible to measure. We can measure materials which have  $\mu\text{m}$  order thickness and electrical conductivity of metal of class. But we can't measure sample that has thickness of mm order. Measured values are nearly general value. We had experimented with other samples that aren't introduced. These samples of electrical conductivity is lower than metal and sample's surface is rough. So these samples aren't able to measure of electrical conductivity. Since it exists the difference of current distribution and formation of electric field between sample as enough thickness and expands and sample has limited thickness when we supply point current source, we make two eqs. (13) and (14). These values calculated by these eqs. come to originate large remainder in sample's thickness is more than mm order. To calculate the revising factor which show borderline use these eqs. properly, many experimental data are an absolute necessity.

We had proposed a simultaneous separate method of measuring

Table 2 Measured principal electrical conductivities and anisotropic factor of aluminum film.

| The number of measurement | Principal electrical conductivities $\sigma \times 10^5$ S/cm |               | Anisotropic factor $\xi$ | Principal axis angle $\varphi_\sigma$ rad |
|---------------------------|---|---------------|--------------------------|---|
|                           | $\sigma_{p1}$   | $\sigma_{p2}$ |                          |   |
| 1                         | 3.63  | 3.58          | 1.01                     | 0.401                                     |
| 2                         | 3.95  | 3.78          | 1.05                     | 0.680                                     |
| 3                         | 3.69  | 3.52          | 1.05                     | 0.685                                     |
| 4                         | 3.95  | 3.78          | 1.05                     | 0.680                                     |
| average                   | 3.84  | 3.69          | 1.04                     |   |

principal thermal conductivities using multi- temperature probes from geometrical property by a point heat source. And we had considered this method utility for determine principal thermal conductivities and principal axis are accurate. We had measured the principal thermal conductivities  $\lambda_{p1}$  and  $\lambda_{p2}$  and the anisotropic factor  $\zeta$  (that defined as  $\lambda_{p2}$  divided by  $\lambda_{p1}$ ) of PGS. As a result, we obtained  $\lambda_{p1}=746$  W/(m·K) and  $\lambda_{p2}=925$  W/(m·K) and  $\zeta$  is 1.24. The geometrical mean of the two measured principal thermal conductivities of PGS is  $\lambda=(\lambda_{p1} \cdot \lambda_{p2})^{1/2}=831$  W/(m·K).<sup>3)</sup> This geometrical mean is close to the documented value of 600-800 W/(m·K) offered by Panasonic Corp<sup>8)</sup>. The anisotropic factor and principal axis angle of the principal thermal conductivities and the principal electrical conductivities must be equivalent. Although there is the problem that multi-probe electrical conductivity measurement method gives rise to the error yet, we can interpret this method to be useful to determine the anisotropic factor.

## 8. Conclusions

(1) The two principal electrical conductivities  $\sigma_{p1}$  and  $\sigma_{p2}$  and the principal axis angle  $\varphi_\sigma$  of the PGS made by Panasonic Corp. and aluminum film can be simultaneously measured and determined with a new methodology of the multi-probe electrical conductivity measurement method.

(2) This method is useful for determine the electric anisotropy of electric conductive material.

(3) We can measure the material which has  $\mu\text{m}$  order thickness.

(4) But we can't measure the material that has rough surface and electrical conductivity is out of range that metallic class.

(5) We assume that the contact resistance and bad contact condition with rough surface, the dent of samples due to probes by sharpening the top and unstable conductivity by unsteady contact pressure set up error.

(6) The anisotropic factor of electrical conductivity are almost equal to the anisotropic factor calculated and measured by a simultaneous separate method of measuring principal thermal conductivity using multi-temperature probes.

(7) It's possible to confirm that the identity of the degree of the anisotropic factor between electrical conductivity and thermal conductivity.

## NOMENCLATURE

- $\sigma_i$  : electrical conductivities on Axes Li (i=1,2,3), S/cm  
 $\sigma_{k1}, \sigma_{k2}$  : parametric electrical conductivities, S/cm  
 $\sigma_{p1}, \sigma_{p2}$  : principal electrical conductivities, S/cm  
 $\sigma$  : geometrical mean of the two measured principal thermal conductivities  $= (\sigma_{p1} \cdot \sigma_{p2})^{1/2}$ , S/cm  
 $\beta$  : angle between two measured axes, °

$\varphi_\sigma$  : principal axis angle, rad  
 $\xi$  : anisotropic factor  
 $h$  : sample thickness, mm  
 $I$  : added electrical current by a point power supply, A  
 $I_i$  : quantity of electricity each direction (i=1,2,3), A  
 $s_i$  : distance of adjoining probes (i=1,2,3), mm  
 $dx,y$  : distance from two terminals measure voltage to probe  
           electrify out of sample other axis directions, mm  
 $r_i$  : radii center a supplying probe (i=1,2,3), mm  
 $\rho$  : density of the sample, kg/m<sup>3</sup>  
 $T$  : room temperature, K  
 $\lambda_{p1}, \lambda_{p2}$  : principal thermal conductivities, W/(m·K)  
 $\lambda$  : geometrical mean of the two measured principal  
           thermal conductivities= $(\lambda_{p1} \cdot \lambda_{p2})^{1/2}$ , W/(m·K)

## REFERENCES

- 1) E. Nemoto and A. Takahashi: The 8th Asian Thermophysical Properties Conf., 2007, No. 119.
- 2) H. Harigae: The Study of The Principal Thermo Conductivities by a Point Heat Source Heating, 2003 year Special Study Thesis of Mechanical and Electrical Control Major Engineering of Ibaraki National College of Technology, 2004, p.2 [in Japanese]
- 3) E.Nemoto, T. Gunji, K.Yamashita, H. Nukaga: J.J.A.P. 48(2009) 05EB03-1-4
- 4) Y. Suga: Thermoelectric Semiconductor, Maki book shop, 1966, p.132-163 [in Japanese].
- 5) E. Nemoto, et.al: 1st International Symposium on Thermal Design and Thermophysical Property for Electronics, 2008, Tsukuba, Japan, p.102-103
- 6) E. Nemoto, K. Yamashita: H. Nukaga, 29th Japan Thermophysical Properties Lecture Thesis, 2008, Tokyo, p.287-289 [in Japanese].
- 7) National observatory: Chronological Scientific Tables, Maruzenn joint-stock company, 2007,p.371, p.408, [in Japanese].
- 8) Panasonic Corp. Data [in Japanese].

1) E. Nemoto and A. Takahashi: The 8th Asian Thermophysical





# QCM 法によるアルコールセンシング

高安 基大<sup>1)</sup>, 青木 克仁<sup>2)</sup>, 丸山 智章, 若松 孝

Sensing of alcohol molecules using Quartz Crystal Microbalance method

Motohiro TAKAYASU<sup>1)</sup>, Katsuyoshi AOKI<sup>2)</sup>, Tomoaki MARUYAMA, and Takashi WAKAMATSU

**Abstract :** The Quartz Crystal Microbalance (QCM) is a highly sensitive detection method for very small materials such as molecules. This detection method is based on a physical adsorption of molecules on the quartz crystals. Sensing of the absorption of alcohol molecules was demonstrated. In the experiments, an oscillator frequency of the quartz crystal vibrator was sensitively shifted to low frequency for the adsorption of alcohol molecules, which was proportional to the dropped alcohol amount.

## 1. はじめに

近年、飲酒運転による事故が社会問題となっており、飲酒運転の取り締りなどでは、アルコールの摂取量を正確かつ早急に知ることが重要である。

アルコールの検出には、主にアルコールの化学反応を利用した方式が使われている<sup>[1]</sup>。これは、重クロム塩酸の還元反応を利用したもので、化学反応による感知剤の色の変化によって、アルコール量を測定する。この方法は、制御デバイスを必要としないために、安価である。しかし、使い捨てであること、検出反応までに 10 分程度の時間を要すること、目視による測定のため定量的な測定が難しいこと等の問題がある。

そこで、アルコールの高感度測定、及び迅速な測定を行うために、分子の物理吸着による水晶振動子発振(Quartz Crystal Microbalance ; QCM)法<sup>[2]</sup>に着目し、アルコール分子の吸着による極微量の質量変化を高精度に検出した。

QCM 法は、その高感度検出能力を利用して、従来、真空蒸着装置の膜厚計などの超微量天秤として用いられてきた。最近では、水晶振動子の電極表面を、有機材料などで修飾することによって、吸着効率を向上させ、特定の化学物質

の検出に応用しようとする研究が盛んに行われている<sup>[3]</sup>。

## 2. アルコールの検出方法

### 2.1. 水晶振動子発振 (QCM) 法

QCM 法は、水晶振動子面に分子等の微小粒子が付着すると、その付着した分の質量によって発振周波数が敏感に変化する特性を利用したものである。

QCM 法によるアルコールの検出では、蒸発したアルコール分子が、水晶振動子の電極面上の吸着分子層による質量が微量に増加して、増加質量に比例して発振周波数が低下する。水晶振動子の発振周波数の変化  $\Delta f$  は、次式のように変化する。

$$\Delta f = -\frac{2f_0^2}{S\sqrt{\rho_q\mu_q}}\Delta m \quad (1)$$

ここで、 $f_0$  は水晶振動子の初期発振周波数、 $\Delta m$  は水晶振動子電極面への付着質量、 $S$  は水晶振動子の面積、 $\rho_q$  は水晶振動子の密度、 $\mu_q$  は水晶振動子水晶のせん断応力である<sup>[4]</sup>。本研究では、 $f_0 = 10\text{MHz}$  の AT カット水晶振動子を用いた。この水晶振動子の場合  $\rho_q = 2.648\text{ g/cm}^3$ 、 $\mu_q = 2.947 \times 10^{11}\text{ g/cm} \cdot \text{s}^2$  である。

1) 平成 21 年度 電気電子システム工学科 卒業生

2) 平成 21 年度 専攻科 電気電子工学コース 修了生

## 2.2. 吸着膜材料

アルコール分子は、水晶振動子の金属電極表面への吸着が比較的小さい。そこで、アルコール分子が吸着し易いように、銅(II)フタロシアニン(略称: CuPc)を吸着膜として使用した。CuPcは、図1のような分子構造であり、中心に銅原子が配置された金属錯体である<sup>[5]</sup>。この有機材料は、可視波長域に強い吸収帯を有しており、鮮やかな青色を呈する。有機ELのホール注入層として使用されている他、有機材料の中でも高い光電変換効率で知られており、有機太陽電池などにも広く用いられている<sup>[6]</sup>。CuPcは、アルコールに難溶性であり、分子が比較的大きいため、水晶振動子のアルコール吸着膜として今回の実験で採用した。

CuPc 薄膜の作成には、図2に示すように抵抗加熱式の真空蒸着装置 (ULVAC 製、VPC-260) を用いて行った。水晶振動子の電極面上に長方形に蒸着した (蒸着面積:  $10 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} = 20 \text{ mm}^2$ )。作製した CuPc 薄膜の厚さ  $d$  は、50 nm、100 nm、200 nm の 3 種類である。なお、CuPc は市販(東京化成工業製)のものを使用し、昇華精製せずに用いた。

真空蒸着する際の装置内の気圧は、 $4.0 \times 10^{-4} \text{ Pa}$  程度であった。電極面に吸着膜(CuPc 薄膜)を蒸着した水晶振動子の概要を図3に示す。

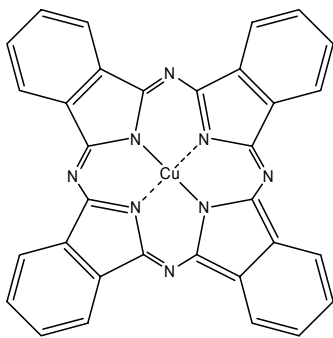


図1 銅(II)フタロシアニン(CuPc)の分子構造

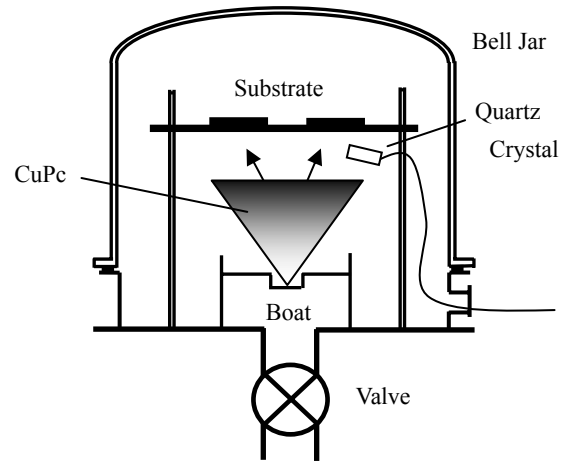


図2 吸着膜作製に用いた真空蒸着装置

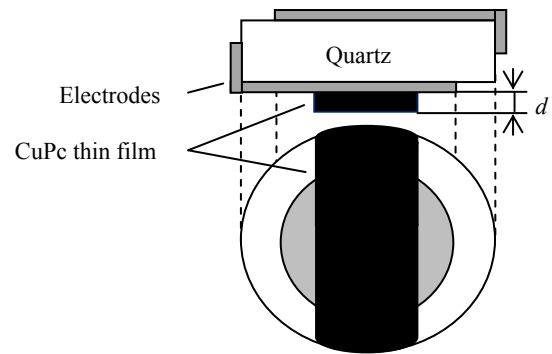


図3 吸着膜(CuPc 薄膜)を蒸着した水晶振動子

## 2.3. アルコール分子付着量

吸着膜へのアルコール分子の付着による、単位時間当たりの発振周波数の変化率が実験でわかれば、アルコール分子の単位時間当たりの付着量を次式より求めることができる。

$$\frac{\Delta A}{\Delta t} = \frac{\Delta m}{\Delta t} \frac{N}{M} \quad (2)$$

ここで、 $M$  はエタノール ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) の分子量  $46 \text{ g/mol}$ 、 $N$  はアボガドロ数  $6.02 \times 10^{23}$ 、 $\Delta m$  は微小質量変化、 $\Delta t$  は微小時間変化、 $\Delta A$  はアルコール分子数である。

### 2.4. アルコール検出装置

アルコール検出装置の概略を図4に示す。水晶振動子の電極面(吸着膜)がアルコール蒸発源の方向に向け、水平になるように、容器(60 mL)内に設置した。水晶振動子面とアルコールとの距離は、6 cmであった。水晶振動子を外部の発振回路(自作)に接続し、周波数カウンタ(岩通計測SC-7207H)を用いて発振周波数を測定した。測定値は、RS-232Cケーブルを介して、コンピュータに10 s毎に取り込み、データを記録した。

測定は、温度21°C一定で行い、微量のアルコールを容器に滴下し、密閉した状態で行った。なお、アルコールの滴下では、シリカゲルで湿度を調整した自作のグローブボックス中で行った。

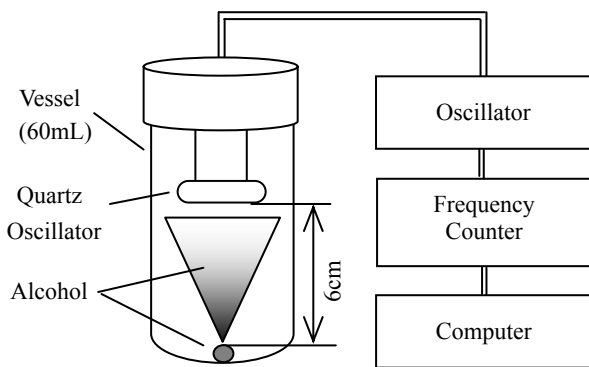


図4 アルコール検出装置

### 2.5. 水晶振動子発振回路

用いた水晶振動子発振回路を図5に示す。発振回路には、オペアンプを用いる場合もあるが、本研究では、バイポーラトランジスタ(2SC2644)を用いた。この発振回路は、 $C_1$ 、 $C_2$ (=39 pF)のコンデンサ2つが帰還コンデンサとなり、インダクタンス成分を水晶振動子と  $C_3$ (=22 pF)のコンデンサを用いた、コルピッツ型発振回路である。また、 $R_1$ (=22 k $\Omega$ )と  $R_2$ (=33 k $\Omega$ )の抵抗は、トランジスタのバイアス抵抗で、 $C_4$ (=0.01  $\mu$ F)のコンデンサは、バイパスコンデンサ、 $C_5$ (=22 pF)は出力電圧の直流成分をカットするコンデンサである。駆動電源  $V_{cc}$ は18 Vである。

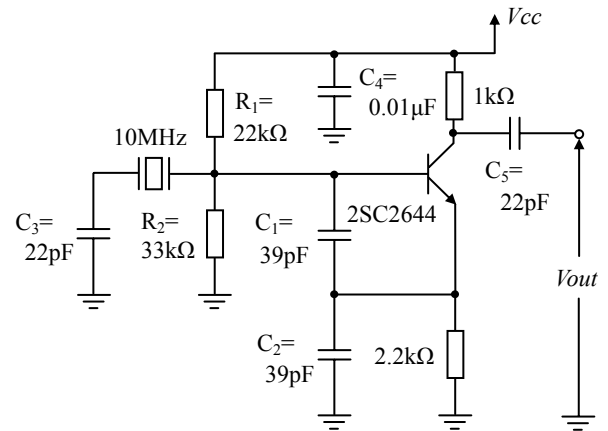


図5 水晶振動子発振回路

### 2.6. 発振周波数の測定プログラム

水晶振動子の発振周波数の測定は、プログラムによって、周波数カウンタで自動的に測定データがコンピュータ(PC)に取り込めるようにした。図6に発振周波数自動測定プログラムのフローチャートを示す。

測定を開始すると、PC内のタイマで10 sカウントされ、PCから周波数カウンタへRS-232Cケーブルを介し、発振周波数の値を出力するよう命令が出される。これにより、周波数カウンタから水晶振動子の発振周波数の値がPCに出力され、PCの画面上に表示される。この時、測定を終了する命令が出されていれば、プログラム動作を終了し、出されていないならば、この動作を繰り返す。なお、プログラムの作成には、Visual Basicを使用した。

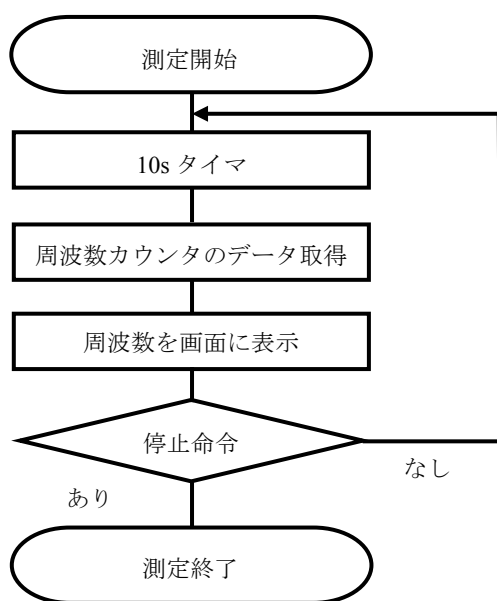


図6 発振周波数測定プログラムのフローチャート

### 3. 実験・考察

#### 3.1. アルコール吸着による発振周波数変化

温度 21°C、湿度 52%一定において、水晶振動子面の CuPc 厚を 100 nm でエタノールを検出した。エタノールを 15  $\mu\text{L}$  を容器内に滴下した直後に、水晶振動子の周波数を測定し始め、測定開始後 2100 s 後に、容器のふたを開けた。その測定結果を図 7 に示す。縦軸は発振周波数のシフト量であり、CuPc 膜を形成した水晶振動子の初期発振周波数 (9.9551 MHz) と、測定中の発振周波数との差である。横軸は測定時間である。

測定の初期状態において、時間の経過に伴い水晶振動子の発振周波数が低下している。蒸発したアルコール分子が CuPc 吸着膜に付着し、その質量増加により、周波数がシフトした。初期の減衰過程を経て、その後(1000 s 付近から)周波数の変化率が緩やかになる定常状態になった。これは、水晶振動子へのアルコール分子の付着量と、吸着膜からの再蒸発量が平衡になった結果と考えられる。

$t = 2100$  s 時に容器のふたを開けたところ、低下していた発振周波数は、急速に元の発振周波数 (初期発振周波数 : 9.9551 MHz)まで戻った。これは、容器を開けることによって、水晶振動子に付着していたアルコール分子が、急速に

蒸発したと考えられる。

低下していた発振周波数が、急速に元の発振周波数まで戻った後、初期発振周波数(図 7 の  $\Delta f = 0$  の位置)よりも、25 Hz だけ大きな値となった。実験では、アルコールを容器に滴下した後、蒸発したアルコールが容器の隙間から漏れないようにビニールで容器蓋の部分をシールした後に、測定を開始している。従って、測定開始に至るまでに、水晶振動子の初期発振周波数の値が、実際には低下していたことが原因であると考えられる。

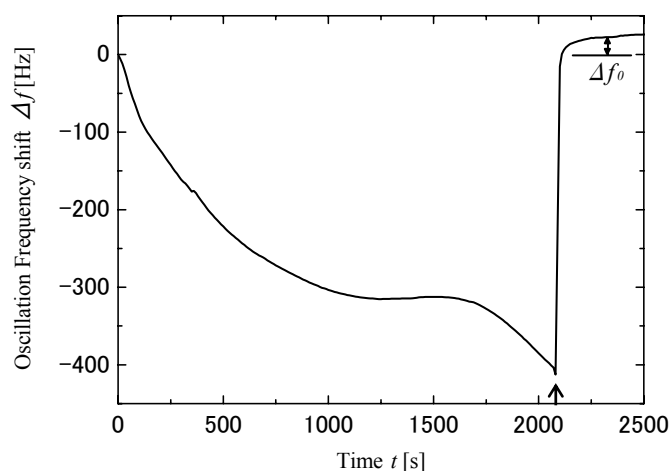


図7 アルコール分子付着による発振周波数の時間変化

#### 3.2. アルコール滴下量による発振周波数の比較

次にアルコール検出の高速化を目指し、初期状態における発振周波数変化率を比較・検討する。

水晶振動子の発振周波数がアルコール滴下量によって変化するかどうかを測定した。湿度 52%、温度 21°C の一定に保ち、エタノール滴下量を、5  $\mu\text{L}$ 、10  $\mu\text{L}$ 、15  $\mu\text{L}$  と変化させ、初期状態における発振周波数の変化率を比較した。その測定結果を図 8 に示す。また、単位時間あたりの周波数変化率と、式(2)によって求めたアルコール分子付着量の値を表 1 に示す。アルコールの滴下量が増加するにつれて、発振周波数の変化率が大きくなっていることが分かる。

また、湿度 22% の一定に保ち、同様にアルコール滴下量を変化させて測定した。図 9 に測定結果を示す。また、単位時間あたりの周波数変化率とアルコール分子付着量の値を表 2 に示す。



湿度 52%一定の場合と同様に、湿度を 22%の場合もアルコールの滴下量が増加するにつれて、発振周波数の変化率が大きくなっている。これは、滴下アルコール量の増加に伴い、蒸発量が増え、水晶振動子へのアルコールの付着量が増加したことが原因であると考えられる。

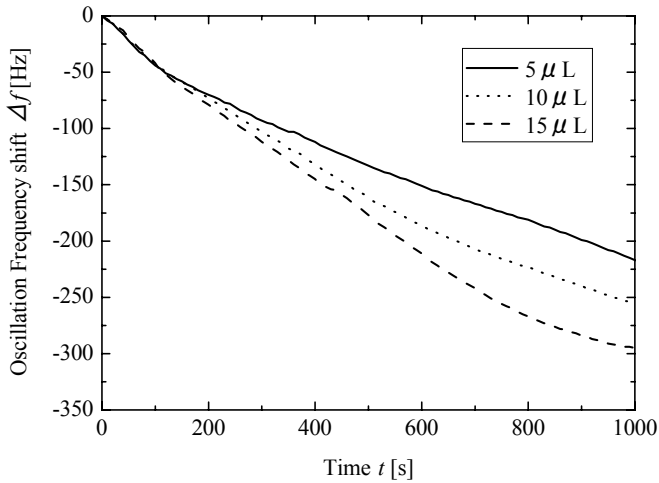


図 8 発振周波数の時間変化 (湿度 52%)

表 1 周波数変化率とアルコール分子付着量(湿度 52%)

| 滴下量                               | 5 $\mu$ L | 10 $\mu$ L | 15 $\mu$ L |
|-----------------------------------|-----------|------------|------------|
| 変化率[Hz/s]                         | -0.212    | -0.279     | -0.334     |
| アルコール分子の付着量( $\times 10^8$ [個/s]) | 3.57      | 4.70       | 5.63       |

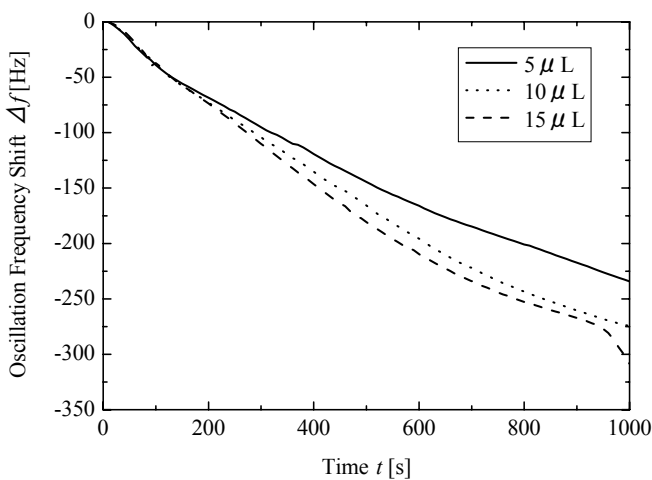


図 9 発振周波数の時間変化 (湿度 22%)

表 2 周波数変化率とアルコール分子付着量(湿度 22%)

| 滴下量                               | 5 $\mu$ L | 10 $\mu$ L | 15 $\mu$ L |
|-----------------------------------|-----------|------------|------------|
| 変化率[Hz/s]                         | -0.258    | -0.317     | -0.344     |
| アルコール分子の付着量( $\times 10^8$ [個/s]) | 4.35      | 5.34       | 5.80       |

### 3.3. 湿度の違いによる発振周波数の比較

前節の測定結果(図 8, 図 9)を、湿度による観点から比較する。滴下アルコール量が 5  $\mu$ L の場合、湿度 52%のときの変化率が -0.212 Hz/s であったのに対し、湿度 22%の場合は、-0.258 Hz/s と、湿度が低い方が、発振周波数の変化率が大きくなっている。10  $\mu$ L、15  $\mu$ L の場合も、同様に湿度が低い方が、アルコール分子の付着量が増加する傾向が見られた。これは、水晶振動子へのアルコール分子の付着を、容器内の水蒸気(水分子)が妨害するため、湿度を下げることによって、アルコール分子が付着しやすくなり、発振周波数の変化量が増加したものと考えられる。

### 3.4. 吸着膜の厚さによる発振周波数の比較

水晶振動子の電極面に作成した吸着膜 (CuPc 薄膜) が、アルコールの検出に与える影響を確かめるため、吸着膜が無い場合と、吸着膜の厚さがそれぞれ、50 nm、100 nm、200 nm、である場合について測定を行った。湿度 22%、温度 21 $^{\circ}$ C の一定下で、アルコールの滴下量を 10  $\mu$ L で行った。測定結果を図 10 に示す。また、表 3 に、式(2)から求めた、それぞれの単位時間当たりの周波数変化率と算出したアルコール分子付着量を示す。

吸着膜が無い場合の発振周波数の変化率は、吸着膜が形成された場合に比べ、明らかに低い。従って、吸着膜の形成された水晶振動子の方がアルコール分子の付着量が多く、CuPc 薄膜が、アルコール分子の吸着膜として機能していることが分かる。

次に、吸着膜の膜厚の違いによる、発振周波数の変化を比較する。膜厚による発振周波数の変化率には大きな差が

見られない。また、吸着膜の厚さと発振周波数の変化量の大きさには、関係性は見られなかった。従って、水晶振動子電極面へのアルコール分子の付着は、吸着膜表面のみであり、吸着膜の内部へは浸透していないものと考えられる。

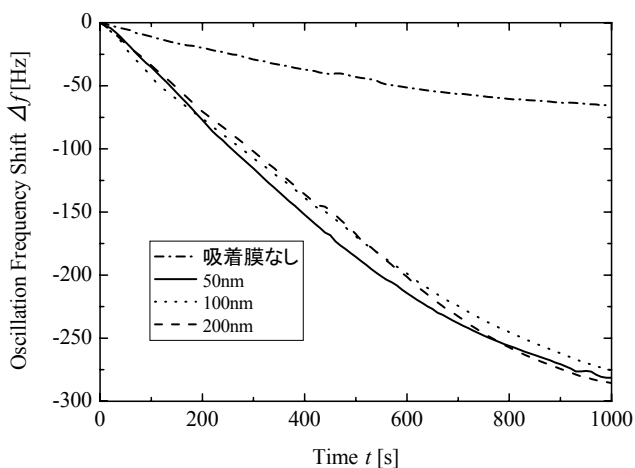


図 10 膜厚による水晶振動子発振周波数特性

表 3 周波数変化率とアルコール分子付着量(湿度 22%)

| 吸着膜の膜厚 [nm]                     | 0      | 50     | 100    | 200    |
|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| 変化率[Hz/s]                       | -0.066 | -0.326 | -0.317 | -0.329 |
| アルコール分子の付着量 $\times 10^8$ [個/s] | 1.11   | 5.49   | 5.34   | 5.54   |

#### 4. まとめ

QCM 法は、化学反応方式に比べ、アルコール量の判定が色ではなく、周波数の変化量で確認でき、定量的な判定ができる。また、センサは使い捨てではなく、繰り返し測定に使用することができる。

従来法による測定では、発振周波数が安定した定常状態において行われる場合がほとんどであった<sup>[7]</sup>。それに対して、QCM 法は、初期の段階で発振周波数の変化によって、アルコール量を判定できる可能性がある。

#### 謝辞

本研究を進めるにあたり、本校の機械システム工学科 小堀繁治先生から、ご協力を賜りました。心より感謝いたします。

#### 参考文献

- [1] 西島 基弘:薬毒物化学試験法と注解, 南山堂, 日本薬学会編, p13, 1992.
- [2] 三宅靖仁:水晶振動子マイクロバランス(QCM)法による微量分析, 技術情報誌テクノロジー, p273, 2006.
- [3] 長倉 三郎, 他:理化学事典 第5版, 岩波書店, 1998.
- [4] Sauerbrey, Günter: Verwendung von Schwingquarzen zur Wägung dünner Schichten und zur Mikrowägung, Zeitschrift für Physik, 155 (2), pp206–222, April 1959.
- [5] 青木克仁:可視 ATR 法による銅フタロシアニン薄膜の光学特性評価, 茨城工業高等専門学校専攻科 平成 21 年度電気電子工学コース 特別研究論文, 2009.
- [6] 城戸淳二:有機 EL のすべて, 日本実業出版社, 2003.
- [7] 室田孝昭, 他:LB 膜水晶振動子センサのにおいガス吸着特性, 信学技報, pp94-32, July 1994.

## 量子論における実在性と自由意志定理について

四王天 正臣

On Reality and The Free Will Theorem in Quantum Theory

Masaomi SHIODEN

**Abstract:** Quantum Mechanics that was formulated around 1925 can explain experimental results extremely well. It's leading faction advocates "Copenhagen interpretation" which takes the position standing on positivism. The possibility, however, that there are "hidden variables" in an underlying theory based on realism has been explored since the birth of quantum theory. Accompanied by the development of experimental methods over the recent years, the possibility of the realism can now be discussed on the basis of experiments, not just theoretically. Here we review the approach of realism and examine the implications of The Free Will Theorem which was presented lately.

## 1. はじめに

量子力学は西暦 1900 年(以降、西暦を省略する)ドイツの Max Planck による作用量子の概念の導入を嚆矢とする前期量子論を基礎に、1925 年～1926 年頃、Werner Heisenberg (ドイツ) による行列力学と Erwin Schrödinger (オーストリア) による波動力学を中心として、一応の完成を見た。

量子力学の建設に当っては、1905 年に光量子論で作用量子の概念を積極的に活用し、この仕事が後の Nobel Prize の受賞理由となった Albert Einstein (ドイツ)、前期量子論の頃から中心的指導者として活躍した Niels Bohr (デンマーク)、Heisenberg の師匠で当初は行列を知らなかった彼の発見が行列によって表現できることに気付いた Max Born (ドイツ)、粒子の統計性を規定する排他原理を提出した Wolfgang Pauli (スイス)、反粒子の存在を示唆した Paul Adrien Maurice Dirac (イギリス) を代表とする多くの優秀な物理学者が関与した。

誕生して 100 年になろうとする量子力学であるが、今のところその理論に破綻が見られている訳ではなく、対象とする実験結果を完全に説明できている。しかし、量子論の生みの親の一人であった Einstein は、量子力学の成果を十分に認めつつも、その波動関数による記述や確率法則について、それが本来の物理理論としては不完全であるという考えを、1935 年に所謂 EPR 論文として有名な論文の中で投げかけた[1]。EPR 論文の議論の前提は、

「物理的実在のあらゆる要素は、その物理理論の中に必ず一つの対応する部分をもっていなければならない。」

という「物理理論の完全性」と、

「一つの系を決して攪乱することなく、ある物理量の値を確実に(即ち 1 に等しい確率で)予言できるならば、その時、この物理量に対応する物理的実在の要素が存在している。」

という「物理的実在」の条件である [1]。

量子力学は、確率論的な意味では、それが対象とすべき実験の全ての結果を再現することができるが、現在の量子力学の主流とされる Bohr 達の所謂 Copenhagen 解釈では、量子力学が現象の完全な記述になっているとみなし、実証主義的姿勢をとっている。

しかしながら、Einstein 達は、物理的実在と対応する古典物理学的な決定論的理論になってこそ、完全な物理理論であるとして、量子力学は不完全な理論であるという考えを翻すことがなかった。

この論文に対する議論としては、発表直後の 1935 年に Bohr による反論、Schrödinger による所謂「シュレーディンガーの猫」の論文などがあつたが、1964 年になって John Bell が画期的な論文を提出した。その中で Bell が示したことは、EPR 論文で示唆されたと考えられるような、完全性をもつ所謂「隠れた変数(hidden variable)」の理論が局所性を持つためには、物理量の相関に対して Bell 不等式が成り立つ必要があるということである[2]。隠れた変数は、実在論的理論を構築するための必須の要素となるものである。

本稿では量子論における実在性に論点を置き、1967 年に提出された Kochen-Specker の定理を紹介し、これをもとに約 40 年を経た 2006 年および 2009 年、Simon Kochen と John Conway が提唱した自由意志定理(Free Will Theorem) について説明し、その妥当性についての議論とともに論評を加える。

## 2. 隠れた変数とこれによる理論

本章ではまず、実験結果を全て再現している量子力学の結果を正しいものとみなし、隠れた変数の理論が量子力学を再現するにはどのような条件が必要か、ということについて考えることにする。

決定論的な隠れた変数の理論には、何らかの決定因子というものが存在し、その決定因子が決まれば全てが決まり、物理量は実在していることになる。この決定因子を  $\lambda$  で表わすことにすると、 $\lambda$  は一般的には変数の集合であり、これを「隠れた変数」と呼ぶ。隠れた変数と呼ぶのは、この変数が物理量の背後に在って、実験的に観測されるような実証的な存在ではないからである。一方、量子力学においては、これに対応するような決定因子は存在しない。

一般的に、実験において測定対象に対応するものは「状態」である。これは量子力学においては、Hilbert 空間  $\mathcal{H}$  のベクトル  $|\psi\rangle$  によって表わされる。即ち、 $|\psi\rangle \in \mathcal{H}$  である。

隠れた変数の理論においては、状態  $|\psi\rangle$  は決定因子の分布関数(ensemble) に対応させることができる[3]。隠れた変数の理論において、決定因子  $\lambda$  の分布関数を  $\rho(\lambda)$  と書くと

$$\int d\lambda \rho(\lambda) = 1 \quad \text{確率の規格化}$$

$$\rho(\lambda) \geq 0$$

という条件を満たし、量子力学と隠れた変数の理論は波動関数  $\psi$  に対応する分布関数  $\rho(\lambda)$  を与えて関係をつける。

$$\psi \rightarrow \rho_\psi(\lambda)$$

量子力学と隠れた変数の理論との関係を纏めると次のようになる。

|      | 量子力学                    | 隠れた変数の理論                 |
|------|-------------------------|--------------------------|
| 決定因子 | 存在しない                   | 隠れた変数 $\lambda$          |
| 状態   | $\psi$ : 波動関数           | $\rho(\lambda)$ : 分布関数   |
| 物理量  | $\hat{A}$ : Hermite 演算子 | $\psi$ : 統計集団            |
| 測定値  | $\hat{A}$ の固有値 $a$      | $A$ : 抽象的量               |
|      |                         | $v_\psi(A; \lambda) = a$ |

以下では、 $v_\psi(A; \lambda) = v(A)$  のように略記する。

量子力学を再現するための隠れた変数の理論の可能性は、EPR 論文が知られる前から議論されているが、John von Neumann の no-go 定理 (1932 年) により、量子力学の再現は不可能だとされていた。しかしながらその後、こ

の定理は非可換で同時測定できない物理量を同時測定した時の関係式に対応させていて、不必要に厳しい条件を課していることになり、妥当とは言えないことが明らかにされている[4]。

## 3. Kochen-Specker の定理と非状況依存性

Kochen と Specker は 1967 年に発表した論文において、新たな no-go 定理を提唱した[5]。

その前提条件の 1 つは、同時測定可能な物理量の間の整合性についての次の条件である。

「同時測定可能(交換可能)な物理量、 $\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}, \dots$  に対して、

$$f(\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}, \dots) = 0 \quad \text{が成り立つとき}$$

量子力学の表現では、同時固有状態  $|\psi\rangle$  に対して、

$$f(\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}, \dots)|\psi\rangle = f(a, b, c, \dots)|\psi\rangle = 0$$

となる。ここで、 $a, b, c, \dots$  は物理量  $\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}, \dots$  の固有値である。この結果は実験的にも検証されているので、隠れた変数の理論においても再現できなければならない。そこで隠れた変数の理論では、

$$f(v(A), v(B), v(C), \dots) = 0$$

という関係式を満たさなければならない。」

もう 1 つの前提条件は、非状況依存性(non-contextuality) と呼ばれる次の条件である。

物理量の組として、

$$A, B, C, D, \dots, L, M, N, \dots$$

があったとして、

$$\{\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}, \hat{D}\} \quad \text{と} \quad \{\hat{A}, \hat{L}, \hat{M}, \hat{N}\}$$

が、それぞれ可換な組だったとしたとき、

$$v(A), v(B), v(C), v(D)$$

のように、物理量  $A, B, C, D$  を同時測定した結果で得られた  $v(A)$  と、

$$v(A), v(L), v(M), v(N)$$

のように、物理量  $A, L, M, N$  を同時測定した結果で得られた  $v(A)$  の値は必ず一致する。

この条件は、 $A$  という物理量を何と一緒に測定するかによらず測定値の値が定まるということ、すなわち測定値の割付が状況に依存しないことを意味する。

Kochen-Specker の定理は、上記の 2 つの前提条件を満たすような隠れた変数の理論は、対応する量子力学系の次元が 3 以上 ( $\dim \mathcal{H} \geq 3$ ) の場合には存在しない、というものである。

その証明には、スピン 1 の粒子の例を用いる。スピン 1



の粒子に対して直交する 3 方向  $x, y, z$  軸方向のスピン成分の 2 乗  $\hat{s}_x^2, \hat{s}_y^2, \hat{s}_z^2$  を測定すると、常にいずれかの方向が 0 で他の 2 方向が 1、例えば、1, 0, 1 という値が得られる。なぜなら、量子力学においては、成分の 2 乗のスピン演算子  $\hat{s}_x^2, \hat{s}_y^2, \hat{s}_z^2$  は互いに交換し、それらの固有値が 0 と 1 であり、その総和は

$$\hat{s}_x^2 + \hat{s}_y^2 + \hat{s}_z^2 = 2$$

となるからである。ここで、次にあげる 3 つの性質をもつ関数  $v(w)$  を、1 0 1 関数と名付ける。

- (i) 3 次元の直交する 3 つの組について、1, 0, 1 の値がいずれかの順序で割り当てられている。
- (ii) いずれの互いに直角な 2 方向  $x, y$  について、 $v(x) = v(y) = 0$  とすることはできない。
- (iii) 反対方向を向いたいずれの組  $w$  と  $-w$  について、 $v(w) = v(-w)$  となる。

Kochen-Specker は直交する  $x, y, z$  軸方向をいろいろ回転させて、回転した直交軸の中の 1 つが、既に存在している直交軸のいずれかと一致するような選び方をして、各々の軸に 1 か 0 を割り当てていくと、当初 117 番目の軸で矛盾が出ることを見出した。その矛盾点とは、はじめに 1 か 0 かを割り当てた軸と回転後の軸が一致したような配置において、今度は初めに割り当てた 1 または 0 と異なる数値を当てはめないと、1 0 1 の性質が維持できない状況が起こるということである。

Peres はこれに改良を加え、16 通りの直交軸の組に対し、117 よりもずっと少ない 33 番目の軸で矛盾が起きることを突き止め、1 0 1 関数は存在しないということを証明している[6]。これを、Peres 配置と呼ぶ。すなわち、上記の 1 0 1 関数は数学的に存在しないことになる。

Kochen は、これから紹介する自由意志定理の論文の中で、この Peres 配置で選ばれた 16 通りの直交軸の組に、他の 24 通りの直交軸を合わせ、合計 40 通りの直交軸の組を用いて議論を行っている。

つまり、スピン 1 のような  $\dim \mathcal{H} = 3$  の系では状況依存性のないような測定値の割り当て(1 0 1 関数に対応)は不可能であることになる。 $\dim \mathcal{H} > 3$  の場合は、部分系として  $\mathcal{H}$  の 3 次元部分空間を考えればよい。

参考のため、定理の条件をやや緩めて  $\dim \mathcal{H} \geq 4$  とした場合の David Mermin による簡単な別証明を紹介しておく[4][6][7]。

それぞれスピン  $\frac{1}{2}$  をもつ、2 個の電子について、スピン

の各成分  $\sigma^a_i$ ,  $i = x, y, z$  を測定することを考えてみる。右上の添え字  $a$  ( $a = 1, 2$ ) は電子の区別を表わす。すなわち、

$$1, \sigma_x^1, \sigma_y^1, \sigma_z^1 \quad \text{と} \quad 1, \sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2$$

が、各々の電子のスピン演算子である。

このとき、同時に測定できる 3 つの物理量からなる 6 種類の組み合わせを作り、図 1 のようにそれらを 3 行、3 列に並べる。

|                                 |                                 |                                 |
|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| $\sigma_x^1 \otimes 1$          | $1 \otimes \sigma_x^2$          | $\sigma_x^1 \otimes \sigma_x^2$ |
| $1 \otimes \sigma_y^2$          | $\sigma_y^1 \otimes 1$          | $\sigma_y^1 \otimes \sigma_y^2$ |
| $\sigma_x^1 \otimes \sigma_y^2$ | $\sigma_y^1 \otimes \sigma_x^2$ | $\sigma_z^1 \otimes \sigma_z^2$ |

図 1 Mermin の魔方陣

Pauli 行列の性質  $(\sigma_i^a)^2 = 1$  や  $\sigma_x^a \sigma_y^a = i \sigma_z^a$  の関

係式を使えば、行や列の 3 つの組の演算子が、それぞれ可換になっていることがわかる。ここで、行の組を掛けると、 $1 \otimes 1$ ,  $1 \otimes 1$ ,  $i 1 \otimes (-i) 1$  となり、列の組を掛けると、 $1 \otimes 1$ ,  $1 \otimes 1$ ,  $i 1 \otimes i 1$  となる。従って各々の組の測定値の積は、第 3 列の  $-1$  を除き、すべて 1 となる。

|                                    |                                    |                                    |
|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| $v(\sigma_x^1 \otimes 1)$          | $v(1 \otimes \sigma_x^2)$          | $v(\sigma_x^1 \otimes \sigma_x^2)$ |
| $v(1 \otimes \sigma_y^2)$          | $v(\sigma_y^1 \otimes 1)$          | $v(\sigma_y^1 \otimes \sigma_y^2)$ |
| $v(\sigma_x^1 \otimes \sigma_y^2)$ | $v(\sigma_y^1 \otimes \sigma_x^2)$ | $v(\sigma_z^1 \otimes \sigma_z^2)$ |

図 2 隠れた変数理論による物理量の値の割り付

一方、隠れた変数の理論の方で各々の物理量に値を割り付けると、図 2 のような表記になる。測定結果を再現するためには、各欄にはそれぞれ 1 か  $-1$  が入るはずであるが、上記の演算子の積の結果と、本章の初めに述べた整合性条件より、行の組で同時測定した場合の測定結果を掛けたものは、上から順番に 1, 1, 1 という値になるのに対し、同様に列の組で同時測定した場合は、左から順番に 1, 1,  $-1$  になることになる。しかしながら、9 つの欄の数値を全部掛けることを考えると、行をもとにすれば 1 となり、列をもとにすれば  $-1$  になり、掛け方の違いで結果が異なることになって矛盾となる。(証明終わり)

#### 4. 自由意志定理についての前提

Kochen-Specker の定理が提出されてから約 40 年後、Kochen は John Conway と共に、自由意志定理という新たな定理についての論文を発表した[8][9]。その前提は、以下の3つである。

##### (1) SPIN の公理

3 つの直交方向についてスピン 1 の粒子のスピン成分の 2 乗を測定すると、必ず 1, 0, 1 という値が、いずれかの順序で得られる。

Kochen-Specker の定理でも用いられた、この SPIN の公理は量子力学と実測から支持されるものであって、疑いを挟む研究者は居ない。

##### (2) TWIN の公理

対をなしているスピン 1 の粒子  $a, b$  があって、測定者  $A$  は粒子  $a$  の 3 つの直交方向  $x, y, z$  軸方向について、その成分の 2 乗を 3 つ測定し、測定者  $B$  は粒子  $b$  の 1 つの方向  $w$  について測定したとする。そのとき、もし  $w$  がたまたま  $x, y, z$  軸方向の 1 つと同じ方向であれば、測定者  $B$  の測定は必然的に測定者  $A$  の相当する測定結果と同じ結果を与える。

そのような状態は、量子力学では、 $a$  の粒子を  $w$  方向に測定したときにスピンの 1 であることを  $|S_w^a = 1\rangle$  と書くことにすると、次の量子もつれ状態 (entangled state)

$$|\psi\rangle = |S_w^a = 1\rangle |S_w^b = -1\rangle + |S_w^a = -1\rangle |S_w^b = 1\rangle - |S_w^a = 0\rangle |S_w^b = 0\rangle$$

で与えられる。

##### (3) MIN の公理

測定者  $A$  と測定者  $B$  とによってなされた実験が、空間的に隔てられていたとする。測定者  $B$  が 33 の特定の方向のどれか 1 つ  $w$  を選んだとすると、 $a$  という測定値はこの選択とは独立している。同様に、測定者  $A$  は  $w$  としてとりうる 40 通りの  $x, y, z$  という 3 つの組のいずれか 1 つを自由に選ぶことができ、 $b$  という測定値はこの前提とは独立である。

この性質の実測による完全な検証は困難であるが、情報

の伝達が真空中の光速を超えられないことは特殊相対論の前提であり、これに反する実験的事実は今のところ見つかっていない。

#### 5. 自由意志定理

自由意志定理の主張は次のとおりである。

「任意の 3 方向成分の測定に対するスピン 1 の粒子の応答は自由である。即ち、与えられたいかなる慣性系に関しても、その慣性系でこの応答よりも以前の宇宙空間部分の性質の関数にはなっていない。」

証明の概要は以下の通りである。

今、図 3 のように、慣性系  $F$  系、 $G$  系という 2 つの光円錐があって、

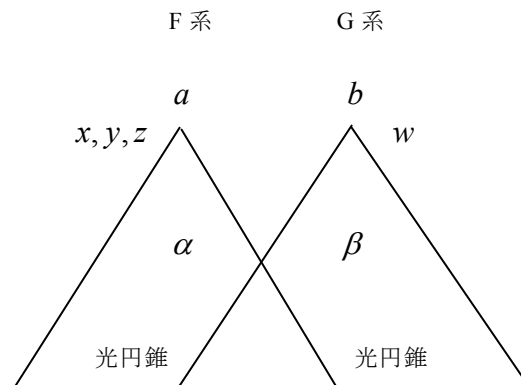


図 3 2 つの系の測定粒子と光円錐の関係

空間的に離れた 2 点  $a, b$  にある粒子についての測定を行うことを考える。

それぞれの光円錐内の過去の情報を  $\alpha, \beta$  とし、 $\alpha', \beta'$  をそれぞれの 2 点  $a, b$  で測定する軸方向以外の要因とする。もし、 $F$  系における  $a$  地点での測定結果が決定論的に決まっているとすれば、

$$\theta_a^F(\alpha) = \theta_a^F(x, y, z, w; \alpha')$$

のように書ける。空間的に離れているので MIN の公理により、情報は光速を超えて伝わらないから、 $\theta_a^F(\alpha)$

は  $w$  には依らない。また、 $\alpha'$  を固定してしまえば、測定結果は  $x, y, z$  のみに依存する。

一方、 $\theta_b^G(\beta)$  についても、

$$\theta_b^G(\beta) = \theta_b^G(x, y, z, w; \beta')$$

と書けるが、空間的に離れているので、この値は  $x, y, z$  に

は依存せず、 $\beta'$  を固定しても、MIN の公理により  $w$  は自由に選択できる。したがって、それぞれ測定結果は、

$$\theta_a^F(\alpha) = (v_x(x, y, z), v_y(x, y, z), v_z(x, y, z))$$

$$\theta_b^G(\beta) = (v_w(w))$$

の形に書くことができる。

ここで、TWIN の公理により、もし  $w$  が  $x, y, z$  のいずれかと同じであれば、測定結果は同じでなければならない。即ち、

$$w = x \quad \Rightarrow \quad v_x(x, y, z) = v_w(w)$$

$$w = y \quad \Rightarrow \quad v_y(x, y, z) = v_w(w)$$

$$w = z \quad \Rightarrow \quad v_z(x, y, z) = v_w(w)$$

となる。SPIN の公理により  $\theta_a^F(\alpha)$  は、

$$\theta_a^F(\alpha) = (0, 1, 1), (1, 0, 1), (1, 1, 0)$$

のいずれかであり、このことは、 $v_w(w)$  が、101 関数であることを意味するが、これは Kochen-Specker の定理によって否定される。すなわち、決定論的に測定結果が決まるという仮定が誤っていることになり、定理の主張が導かれる。

## 6. 自由意志定理に関する議論

提唱者である Kochen と Conway は、この定理は

「測定者が、ある自由意志 (free will) をもって測定装置を設置したり測定対象の物理量を選択できるのと全く同じ意味合いで、測定される粒子達も測定結果を定める自由を持っている。」

ことを意味していると述べている[9]。

”free will” を日本語に翻訳して「自由意志」と表現すると、誤解を招き易いと思われるが、これは、粒子のスピン値を、あたかも粒子が自分自身で決めている、というニュアンスで表現したに過ぎない。

このことは、もし、 $x, y, z$  軸や  $w$  軸を選択することを測定者ではなく擬似乱数発生装置付きのコンピューターに置き換えても彼らの証明は有効であるだろう。2006 年の彼らの論文[8]で指摘されているとおり、決定論者がこの選択は時間の始まり以来決まっていたと主張するのであれば、乱数発生装置を選ぶために自由意志は依然として必要であることになる。ただし、Peres 配置からある方向

を測定者が選ぶことは、完全に自由で独立な行為であるが、粒子の持つ自由度について推定される幅は、TWIN の公理によって制限されている。

歴史的には、この種の相関はたいへん驚くべきものであって、多くの研究者は一方の粒子が他方の粒子に影響を与える結果として説明しようとするが、Kochen 達は論文[8]で論じたように、相関は相対論的に不変であり、そのような説明は適当ではないと指摘している。

「決定論(determinism)」に代わる物として、「ランダム(randomness)」という表現を挙げる研究者達がいるが、認められるようなランダムは、現実には自由意志を理解する助けにはならない。コイン投げのような古典的確率過程が自由意志を説明する助けにはならないことは真実であるが、加えてランダムもまた、この定理で述べられる量子力学的効果を説明しない。正確に言えば、TWIN 公理に従う半自由な粒子、もっと一般的に言えば量子もつれ状態の性質に対して、古典的確率論とはかなり異なった何か働いているのである。

自由意志定理は決定論の破綻を示唆しているが、それでも Einstein の「神は宇宙でサイコロを振らない」という主張を認める余地を残している。現在までの知識に於いて、粒子と人間の間の自由決定の関係を理解することは人間の能力を超えているが、そのどちらでもない自由意志というものは単にランダムとして説明される。

人間の自由意志と物理的な決定論の間の葛藤には長い歴史があり、多くの哲学者や科学者が決定論を採用するに到ったのは、とりわけ現代物理学から遠く離れた分野に於いて、決定論的古典物理学が大きな成功を収めたからであった。

Kochen 達はもし決定論が正式に証明されるのであれば、それは古典物理学が、決定論的理論ではない量子力学によってとって代わられたという事実を支持するような証拠は何も無いことになると指摘している。自由意志定理の趣旨は、現代の量子力学のみならず世界自身が決定論的ではないということを表わすことにある。

以上が自由意志定理を提唱した Kochen 達の議論である。これに対して、たとえば Nicolas Gisin は今年に入って以下のようなコメントを寄せている[10]。

自由意志定理を提唱した Conway と Kochen は、

- 実験者が自由に測定装置を制御できる
- Bell 不等式の破れを含む、既によく検証された状況において量子論と特殊相対論は正しい予言をする

ことを仮定をしている。そして、Conway と Kochen の主張は 2006 年に Tumulka が提出した隠れた変数のモデルと

矛盾するように見えると指摘している[11]。Gisin は、「共変な量子過程とはどういうことを示しているのか」という点について、非常に異なった理解や解釈が存在し、このことが矛盾や混乱の原因になっていると指摘する。

しかし、確率分布は共変であるが、波動関数の収縮や実在化(realization)は共変ではないことを認識すれば、矛盾はなくなると議論している。

さてここで、自由意志定理の証明の際に前提とした3つの公理の中のMINの公理を、

(3-1) 情報は光速を超えて伝わらない

(3-2) 測定者には

「測定装置を自由に制御できる」

「測定する物理量を自由に選択できる」

という自由意志がある。

の二つに分けてみよう。

自由意志定理を導く際、公理(1),(2)は疑う余地がないが、その上で暗黙の仮定として関数仮説(決定論)を前提としていた。したがって、もし決定論を否定しないとすれば、(3-2)の測定者の自由意志の前提が破れていることになる[12]。すなわち、Conway と Kochen の主張は反語的な形で、粒子の自由意志という少なからず衝撃的な表現を前面に出しつつ、その意図するところは決定論的な実在性の否定であると考えられる。

Kochen-Specker の定理に基づいた、Conway と Kochen による自由意志定理を紹介し、その結果に対する議論の一端を提示した。自由意志定理は最近提出された定理であり、この評価については、まだ研究者の間で議論が続けられている。

## 7. 付記

もし、宇宙が現在の主流の考え方、Big Bang によって130億年前頃に、非常に小さい領域から膨張を続けて形成されてきたということが真実であれば、

基本粒子→素粒子→原子→分子→物質→宇宙

という階層の進化の方向で、その階層における物理理論が構成されていく過程を辿ることが自然である。人類という物質の階層に住む我々が地球の近傍に於いて、最初に物理学を創始したため、初めに出来上がった物理学がたまたま、現在表現するところの古典物理学になっただけである。

仮に、基本粒子や素粒子が自ら物理学を構成できたとすれば、おそらく現在我々が手に入れた量子場の理論や量子力学よりも透徹したすっきりした理論体系になっていただろう。

筆者は大学時代から大学院時代にかけて、基本粒子や素粒子の行動にも何かの指導原理が働き、たとえば仮に粒子心理学(particle psychology)というような表現が当てはまるような考え方が可能なのではないかと模索したことが

ある。しかしながら、それを推し進める前方には、実在論と実証論の大きく厚い鉄壁が立ち塞がり、具体化することは困難であった。

大学院にて高エネルギー物理学実験の研究室に配属になり、TRISTAN 実験に参加して Detector Simulator の作成や物理現象の Monte Carlo Simulation にも携わってきた。Simulation においては、それぞれの粒子反応についての実験結果の集積や確認されている理論、検出装置の寸法、位置関係、検出効率、分解能などの情報が前提条件として入力されるわけであるが、そういう点を考えてみたとき、Simulationがある意味では筆者が思い描いた粒子心理学に近いものではないかと考えるようになった。

最近の実験技術の進歩によって、かつては思考実験の域に止まっていた量子基礎論に関する実験が実施可能になってきている。もし、Conway と Kochen が主張するように、粒子があたかも自由意志をもつように見えるという自由意志定理が確定されれば、従来とは異なる角度から基本粒子や素粒子の世界が記述できる可能性があるであろう。

## 謝辞

本稿を纏めるに当っては、高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所理論部の筒井 泉氏に大変御世話になりました。また、筒井氏の指導する大学院学生の佐々木寿彦氏と森田辰弥氏にも資料提供や議論で御助力をいただきました。ここに篤く御礼申し上げます。

## 8. 参考文献等

- [1] A.Einstein, B.Podolsky, N.Rosen, Phys.Rev.47,777-780 (1935); 翻訳は アインシュタイン選集 1, 共立出版, 185-192, (1971) 等にある。
- [2] J.S.Bell, Physics 1, 195-200 (1964)
- [3] 筒井 泉, 総合研究大学院講義「現代物理学」(2009)
- [4] N.D.Mermin, Rev.Mod.Phys.65, 803-815 (1993)
- [5] S.Kochen, E.P.Specker, J.Math.Mech.17, 59-87 (1967)
- [6] A.Peres, J.Phys.A24, L175-L178 (1991)
- [7] 筒井 泉, 数理科学, 548, 7-13 (2009)
- [8] J.Conway,S.Kochen, Found.Phys.36, 1441-1473(2006)
- [9] J.Conway,S.Kochen, Notice of the AMS 56, 226-232 (2009)
- [10] N.Gisin, "The Free Will Theorem,Stochastic Quantum Dynamics and True Becoming in Relativistic Quantum" arXiv:1002.1392vl [quanta-ph] (2010)
- [11] R.Tumulka, J.Stat.Phys.125, 821 (2006); R.Tumulka, Collapse and Relativity, arXiv:quant-ph/0602208
- [12] 筒井 泉, 高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所理論部, 談話(2009)



## EPR 論文と現在から見たその意義について (I)

四王天 正臣

On the paper by EPR and its significance today (I)

Masaomi SHIODEN

**Abstract:** The tendency to understand more profoundly the basis of quantum mechanics has become prominent lately along with the development of quantum information and computation. Accordingly, the famous paper written by A.Einstein, B.Podolsky and N.Rosen (EPR) that had influenced deeply the discussion on the basis of quantum mechanics is now being cited quite frequently in the literature. We review the background of the EPR paper and its significance from the viewpoint of today.

### 1. はじめに

量子力学は西暦 1900 年(以降、西暦を省略する)ドイツの Max Planck による作用量子の概念の導入から始まった前期量子論を基礎に、1925 年～1926 年頃、Werner Heisenberg (ドイツ) による行列力学と Erwin Schrödinger (オーストリア) による波動力学を中心として、一応の完成を見た。

量子力学の建設に当っては、前期量子論の頃から Niels Bohr (デンマーク) が中心的指導者として活躍し、Heisenberg、Wolfgang Pauli (スイス)、Paul Adrien Maurice Dirac (イギリス) を代表とする多くの優秀な物理学者が関与した。

現在、量子力学の主流と考えられているのは、Bohr が推し進めた実証論的手法をとる、所謂 Copenhagen 解釈に基づく理論体系である。

一方、1905 年に光量子論で作用量子の概念を積極的に活用し、この仕事後の Nobel Prize の受賞理由となった Albert Einstein (ドイツ) は、光量子論の他にも

1907 年 比熱の量子論

1917 年 輻射の量子論、量子カオス

1924 年 ボーズ・アインシュタイン凝縮

1935 年 EPR 論文 [1]

など、量子論関係でも第一級の業績が複数存在している [2][3]。

このように、Einstein は量子論の建設期にあつて、中心的な役割を果たしてきたが、完成した量子力学には不満足であつて、この意向は終生変わらなかった。

EPR 論文は 1935 年に、Einstein が B.Podolsky と N.Rosen と共に、Copenhagen 解釈における波動関数や確率法則に従う理論体系に異を唱える形で提出されたものである。これは、Einstein がもともと考えていたアイデアを、若い学生の Rosen の発案で論文にまとめることになり、三人で議論した結果を、Podolsky が英文の論文にして発表したのが経緯のようである [2][4]。

近年になって、実験技術の向上により、今までは物理実験として実施できなかった実験が実施可能になってきたという事情や、量子力学的発想に基づく量子情報理論や量子コンピューターの研究が活発になってきている現在、量子力学の基礎をしっかりと解明し把握しておくことが重要であるという認識が高まってきている [5]。

このような趨勢のため、EPR 論文は近年、引用件数が増え、Einstein の論文の中でもその回数が最も多くなっているばかりでなく、すべての物理学の論文においても、最も引用件数の多い論文の一つに数えられている [5][6][7]。

筆者は、本彙報に掲載予定の別の論文にて、量子基礎論の分野で最近提出され、まだ日本にはあまり紹介されていない The Free Will Theorem (自由意志定理) の紹介とそれに関する考えを述べる予定である。それが、量子基礎論の研究分野においてどのような位置を占めているものかという背景説明が必要と考えられるため、本稿によって、その背景の梗概を提供したい。

筆者はまた、ここ数年来、専攻科 2 学年の「科学技術史」の「電気・電子分野」を担当しており、20 世紀における科学全体の基礎となっている物理学の最先端領域の発展の状況についても重要な部分として講義の中で紹介している。

かつて Einstein は「ほとんどの科学史家は文献考証学者であり、物理学者が何をねらいどのように思索し、いかにその問題と格闘したかを理解しない」と言い、また、物理学者についてはその多くが物理の歴史をみるさいに“歴史的感覚”を欠いているということも指摘している [8][9]。

このような評価は他の物理学者からも聞いたことがある。そこで、この点に留意しながら、何回かに分けて、量子基礎論に関する研究の進展の過程を紹介し、それに論評を加えていこうと考える。

## 2. EPR 論文発表までの経緯の概略

EPR 論文が発表されるまでの経緯について、文献[10]の解説を参考にしながら辿ることとする。

Einstein と Bohr が初めて直接に会って話を交わしたのは、1920年の春、Bohr がベルリンを訪れた際といわれる。

1927年10月24日から29日までブリュッセルで開催された第5回ソルヴェイ会議において、Einstein は会議では公式の報告をせず、討論でも「あまり量子力学に通じておりませんので」と言って、確率解釈に控えめな異論を唱えたのみであったようだが、その場に居合わせた Stern の回想によれば、毎朝、朝食時に量子力学ではうまく説明がつかないような巧妙な思考実験を考えてきては、夕食時に Bohr がそれに解答を与えるというようなことが続けられたとある。

その頃の Einstein は主に不確定性関係に対する反例を挙げて、Copenhagen 解釈の矛盾点を突こうとしていたようである。

1930年に開催された第6回ソルヴェイ会議において Einstein は光子箱の質量測定という、エネルギーと時間の間の不確定性関係に関する思考実験を持ち出してきた。会議に参加していた Rosenfeld の回想によると、Bohr は即座に解答を見い出すことができず、大変なショックを受けたようだといわれる。それでも Bohr は一晩考えて、重力場中の時計の進みの変化という Einstein の重力理論を利用して反論し、この会議こそ Bohr - Einstein 論争の最大のハイライトとなる。

これ以後 Einstein は不確定性関係についての反例を挙げることを諦め、量子力学の物理理論としての不完全性を指摘する方法に方向を変えたようである。そして、1933年にアメリカに渡り、1935年に所謂 EPR 論文を発表する運びとなる。

## 3. EPR 論文の概要

原論文およびその翻訳[1]と文献[10]の解説に基づいて、少し長くなるが、次回以降の議論の基礎となるので、論文の概要を纏めておくことにする。

ある物理理論の成功の度合を判定しようとするとき、

- (1) この理論は正しいか？
- (2) この理論によって与えられる記述は完全であるか？

という疑問を提示し、この二つの疑問に肯定的に回答が与えられる場合に限り、この理論は満足すべき理論であると言える。と考える。

完全な理論にとって必要な要請は、

「物理的実在のあらゆる要素は、その物理理論の中に必ず一つの対応する部分をもっていなければならない

い。」

という「完全性」の条件である。

この中の「物理的実在」の要素とは、

「一つの系を決して攪乱することなく、ある物理量の値を確実に(即ち 1 に等しい確率で)予言できるならば、その時、この物理量に対応する物理的実在の要素が存在している。」という規準を用いて設定する。

量子力学においては、通常、「一つの粒子の運動量が知られているときは、その座標は決して物理的実在性をもたない。」と結論する。もっと一般的には、交換可能ではない二つの物理量の一方についての正確な知識が他方についての正確な知識を排除することを示すことができる。

このことから、

- (1) 波動関数によって与えられる実在についての量子力学的記述は完全でない
- (2) 二つの物理量に対応する演算子は、それらが交換可能でないときは、同時には実在性をもちえないかのいずれかであることが導かれる。

いま、二つの系 I と II とがあって、時刻  $t = 0$  から  $t = T$  までの間、相互作用があり、その後はなんら相互作用がないものとする。 $t < 0$  における二つの系の状態を知っていると仮定すると、 $t \geq 0$  の任意の時刻、特に  $t > T$  の任意の時刻における、この合成系 I + II の状態は、Schrödinger 方程式を使って計算することができる。その状態に対応する波動関数を  $\psi(x_1, x_2)$  で表わすことにする。

系 I に属したある物理量  $A$  の固有値を  $a_1, a_2, a_3, \dots$  とし、それに対応する固有関数を  $u_1(x_1), u_2(x_1), u_3(x_1), \dots$  とする。そうすると、 $x_1$  の関数であるとみなしたときの  $\psi(x_1, x_2)$  は

$$\psi(x_1, x_2) = \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n(x_2) u_n(x_1) \quad (1)$$

のように展開できる。

同様に系 I に属した別の物理量  $B$  の固有値を  $b_1, b_2, b_3, \dots$  とし、それに対応する固有関数を  $v_1(x_1), v_2(x_1), v_3(x_1), \dots$  とする。そうすると、 $x_1$  の関数であるとみなしたときの  $\psi(x_1, x_2)$  は同様に

$$\psi(x_1, x_2) = \sum_{s=1}^{\infty} \varphi_s(x_2) v_s(x_1) \quad (2)$$

となる。

いま、系 I の物理量  $A$  を測定して、その値が  $a_m$  であったとすると、二つの系 I + II の波動関数は

$$\psi(x_1, x_2) = \phi_m(x_2) u_m(x_1) \quad (3)$$

に収縮する。同様に、系 I の物理量  $B$  を測定して、その値が  $b_r$  であったとすると、二つの系 I + II の波動関数は

$$\psi(x_1, x_2) = \varphi_r(x_2)v_r(x_1) \quad (4)$$

に収縮する。したがって、系 II の状態は、物理量  $A$  を測定した場合は関数  $\phi_m(x_2)$  で表わされ、物理量  $B$  を

測定して場合では関数  $\varphi_r(x_2)$  で表わされる。

このことは、系 I に対して行われた異なる二つの測定の結果、系 II においては二つの異なった波動関数をもった状態になる。ところが、 $t > T$  では二つの系は、もはや相互作用していないので、系 I にたいして、いかなる測定をしたとしても、系 II にはなんら影響がないはずである。このことは、系 II における同一の实在に対し、異なった波動関数を対応させることができたことを意味する。

EPR 論文でとりあげられている波動関数は

$$\psi(x_1, x_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(\frac{2\pi i}{h}\right) \exp(x_1 - x_2 + x_0) p dp \quad (5)$$

( $x_0$  は定数)

で、 $A$  が第一粒子の運動量であれば、その固有関数は、固有値  $p$  に対して

$$u_p(x_1) = \exp\left(\frac{2\pi i}{h}\right) p x_1 \quad (6)$$

となる。ここでは連続スペクトルの場合を考えているから、式(1)は次のように書くことができる。

$$\psi(x_1, x_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi_p(x_2) u_p(x_1) dp \quad (7)$$

ただし、

$$\phi_p(x_2) = \exp\left(-\frac{2\pi i}{h}\right) (x_2 - x_0) p \quad (8)$$

であるとする。しかも、この  $\phi_p$  は、第二粒子の運動量演算子

$$P = \left(\frac{2\pi i}{h}\right) \frac{\partial}{\partial x_2} \quad (9)$$

の固有値  $-p$  に対応する固有関数になっている。

他方、 $B$  が第一粒子の座標であるとすると、固有値  $x$  に対応する固有関数として Dirac の  $\delta$  関数を用いて、

$$v_x(x_1) = \delta(x_1 - x) \quad (10)$$

をもっている。この場合、式(2)は、

$$\psi(x_1, x_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_x(x_2) v_x(x_1) dx \quad (11)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \varphi_x(x_2) &= \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(\frac{2\pi i}{h}\right) (x - x_2 + x_0) p dp \\ &= h \delta(x - x_2 + x_0) \end{aligned} \quad (12)$$

となる。さらに、この  $\varphi_x$  は、第二粒子の座標演算子

$$Q = x_2 \quad (13)$$

の固有値  $x + x_0$  に対する固有関数になっている。

交換関係

$$PQ - QP = \frac{h}{2\pi i} \quad (14)$$

であるから、一般に  $\phi_k$  と  $\varphi_r$  が、それぞれ固有値が  $p_k$

と  $q_r$  に対応する二つの交換可能でない演算子  $P$  と  $Q$  の固有関数になりうることを示されたことになる。

したがって、I の系において、 $A$  か  $B$  かのどちらかを測定することにより、II の系における物理量  $P$  の値(すなわち  $p_k$ )か、物理量  $Q$  の値(すなわち  $q_r$ )か、どちらかを II の系を攪乱することなしに確実に予言できることになる。

そして、

波動関数が物理的实在の完全な記述を与えるという仮定から出発して、交換可能でない演算子をもつ二つの物理量が、同時に实在性をもつことができるという結論に達したのだから、波動関数によって与えられる实在についての量子力学的記述は不完全である。

という主張を導いている。

ただし、その後で次のようなコメントを付している。

この結論に対して、实在についての我々の規準が十分厳密でないという理由でもって、反論できるであろう。事実、二つまたはそれ以上の物理量が、それらが同時に測定できるか、または、予言できるとき、そのときにのみ限って同時的な实在の要素であると見なすことか

きるという主張をするならば、我々の上の結論には到達しないであろう。この見地からは、量  $P$  と  $Q$  のどちらか一つだけが予言でき、同時に両方は予言できないのであるから、それらは同時に実在的でない。このことは、 $P$  と  $Q$  の実在性を、第二の系を決して攪乱しないように第一の系に対して行なわれる測定の方法に依存させることになる。納得できるような実在の定義であるかぎり、そんなことを認めるわけにはゆかない[1]。

#### 4. EPR 論文への反応

EPR 論文の主張を要約すれば、それぞれの系において、たとえば運動量と座標のように非可換で同時測定不可能な物理量を測定する場合、「量子もつれ状態(entangled state)」という現象があるので、I の系で粒子の運動量を測定すればIIの系で、これと量子もつれ状態にある粒子の運動量は決まるし、座標を測定しても同じく決まるので、IIの系の粒子の運動量も座標もその値は予め決まっていると考えられ、それを表現できない量子力学は不完全であるということである。

EPR 論文が Bohr に与えた衝撃はかなり強かったようで、他の仕事を止めてこれに対する反論の作業に全勢力を注ぎ込んだ[10]。その反論を纏めるためには、本稿の2で紹介した、第5回ソルヴェイ会議の際の食卓での議論のような訳にはいかず何週間もかかったが、EPR 論文が1935年5月15日号の Physical Review に掲載され、1935年6月22日号の Nature に紹介されたのに対し、Bohr の反論は、1935年7月13日号の Nature に短信として、また、1935年10月10日号の Physical Review に本批判として掲載された。

その論旨は以下のようなものである。

$p_1$  の測定と  $x_1$  の測定とは、相互に排他的であり、相互作用した後の  $t > T$  に  $p_1$  の測定を選択するならば、確かに  $p_1$  の値と同時に  $p_2$  の値も決まるが、その時には  $x_1$  の値は決まらない。逆に、 $x_1$  の測定を選択すれば、 $x_1$  の値と同時に  $x_2$  の値は決まるが、その時には  $p_2$  の値は決まらない。この場合でも、Einstein の主張する意味で、ある粒子の運動量と座標が同時に実在性をもつわけではない[10]。

Bohr によれば、(5)の波動関数によってあたえられる状態で、第一粒子の位置の測定によって第二粒子の位置が決定できるためには、距離  $x_0$  の間隔をもった二つのスリットのある衝立が必要で、これが空間的にしっかりと固定されていなければならない。しかし、この場合、

運動量が不確定になってしまう[1—訳者注]。

運動量測定について考えても同様な議論が可能である。したがって、量子力学的測定を詳しく検討してみると、その過程は、Einstein が考えているようにはなっていないというふうに結論づけられる。

Schrödinger も EPR 論文が出るとすぐに影響を受け、所謂「シュレーディンガーの猫」として有名な論文を発表した[11]。これは、ミクロの世界を記述する理論をマクロレベルにまで外挿して論じたもので、量子力学による表現が、如何にマクロな世界で生活している我々の常識にそぐわない内容をもっているかということを実際立たせたものとなっている。スケールのみにて、量子力学の適応限界が何処にあるかということは、それだけでも重要な研究テーマになりうると考えられる。

また、Louis de Broglie は、Einstein 達の量子力学批判に対する Bohr の反論を支持しながらも、量子力学の対象に関する測定において、常にマクロな測定装置を用いなければならないとする Bohr の考え方に疑問を呈していたといわれている。特に、運動量測定については、運動量保存則を利用して、ミクロな測定法が可能なのではないかと考えていたようである[1—訳者注]。

ずっと下って1964年に、John Bell が画期的な論文を提出した。その中で Bell が示したことは、EPR 論文で示唆されたと考えられるような、完全性をもつ所謂「隠れた変数(hidden variable)」の理論が局所性を持つためには、物理量の相関に対して Bell 不等式が成り立つ必要があるということである[12]。

Bohr—Einstein 論争が繰り返り広げられていた時代は、思考実験に頼らざるを得ない状況下にあり、とりあえず Copenhagen 解釈によって原子核や素粒子の振る舞いを説明することができていたので、正統派と認められてきたところがあると思われる。ところが、20世紀も終わりに近づくと、実験技術が非常に進歩してきて、それまでは思考実験しか出来なかった量子力学の基礎に関する実験が、物理実験として実施可能になった。その一例として、1982年に行われた Aspect 達の Bell 不等式の検証実験が有名である。このような検証実験については、別の機会に触れることにする。

#### 5. EPR 論文の意義

EPR 論文も含め、それまでに Einstein によってなされた量子力学に対する疑問の提出は、その主張自身は誤りだとされたが、その御蔭で量子力学の基礎をしっかりとものにし、Bohr が Copenhagen 解釈を練り上げていく上で、非常に大きな貢献をしたというのが、現在まで待つことなく、その当時から認識されていた標準的評価であると考えら



れる。

第5回ソルヴェイ会議の折、Einstein が提出した疑問に対し、Pauli や Heisenberg は Bohr 程、深く注意を払わなかった。彼らの興味は、量子力学を使って原子核内部の研究を行う方へ向かっていたのではないかという指摘がなされている。Einstein は Bohr が「相対性原理」に対比させる意識で持ち込んだ「相補性原理」を同レベルでの認識原理と認めることが出来なかったようであるが、Bohr に対する評価としては、次のような表現をしていたという[10]。

「私の知っている正統派量子論の理論家の中では、Niels Bohr が問題の正しい扱いにもっとも近い地点にいますように思われます。」

現在から見たとき、EPR 論文の議論の中で最も重要な指摘は、3.の概要で紹介した最後のコメントであると考えられ、そこではそのような反論が許されるような実在の定義を認める訳にはいかないと強調しているが、Bohr にしてみれば、それは矛盾でも何でも無いということであった。

EPR 論文に到るまでの量子力学に対する Einstein の執拗な疑問の提示がなされなかったとしたら、量子力学は今程の完成度は達成されていなかったであろう。現在、量子情報科学や量子コンピュータの開発といった分野が開拓されつつあり、ここにも影響は及んでいると見なすことが出来るだろう。その一例としては、1991年に Artur Ekert が発表した量子暗号の体系が、EPR 論文の Bohm による手法に基礎をおいていることが挙げられる [13]。

## 6. 付記

1974年、筆者が受講していた大学4年次の前期科目「素粒子論」の講義の中で、

「物質の究極粒子は、どこまで小さくなっているのだろうか？」

という、ギリシア以来の知的疑問が話題に上った。

その講義の担当教官は、超対称性理論の先駆的業績を上げられた宮沢弘成教授であったが、そこで黒板に示された選択肢は、

- (1) 電子、陽子、中性子など、現在、素粒子とよばれている階層が最小単位。
- (2) u, d, s といった quark の階層が最小単位。
- (3) 階層の理論により、どこまでも、より小さい階層が続いている。

という、3つを提示されて、

「案外(3)かも知れませんか」というコメントをされた。筆者はその時、4番目の選択肢があるものと思っていた。それは、

- (4) 何回かはより小さい階層まで進むことがあっても、どこかで最小の階層が存在する。

というものである。それは、かなり単純な考え方であるが、無限小の物質要素が有限個集まっても、有限大の物質が構成されるわけではない、と思っていたからである。その上で、その階層は quark のレベルかも知れないし、sub quark などと表現されているレベルかも知れないと考えていた。因みに、c-quark が Samuel Ting 率いるグループと Burton Richter 率いるグループによって別々の方法で発見され確認されたのは、その年の秋、11月のことで、これにより停滞気味であった素粒子論が quark model の完成に向かって一気に進んだことは記憶に新しい。(素粒子物理学の11月革命)

ところが、後期になって、木原太郎教授のもとで一緒に理論演習を行っていた東 義文氏(大学院を経て島津製作所へ進む)、西口 裕氏、および別の研究室所属だった檜尾守昭氏(大学院を経て気象庁に進む)の4人で話をしていた時、筆者がこの話題を出すと、確か西口氏が最初に発言したように記憶しているが、

「微小な世界において、われわれの周囲と同じ幾何学が成立しているものだろうか？」という疑問を投げかけた。筆者は、かつての多くの科学者がそう考えてきたように、微小な世界であろうが、巨大な世界であろうが、その空間はわれわれの周囲の空間を相似形で縮小・拡大した性質を持つものと、漠然と、しかし当然のように考えていた。

しかし、宇宙空間が Riemann 空間で表わされるように、われわれの周囲の空間の性質は、どこまでも外挿できるわけではないと考えた方が自然である。すなわち、有効な物理理論というものは、それぞれの空間において、その空間の性質に適した性格と理論構成を持つべきであると考えた方が自然で自由ではないのかということである。

Einstein が、本来の物理理論は古典物理学的な決定論的理論でなければならぬと考えていたとすれば、過去の古典物理学の諸理論の輝かしい成功という事実に、いささか引張られていたのではあるまいか。

しかしながら、文献[10]の392ページに見られるように、EPR 論文発表直後に Einstein が Schrödinger に宛てた手紙で、次のようなことが書かれていたという。引用すると、

「これは(EPR 論文を示す)何回も議論を重ねた上で、言語上の理由からポドルスキーによって執筆された。しかしそれは、私が望んだほどよくできていない。ど

ちらかという本質的な事柄が、博識のなかに埋もれてしまった。」[14]

理論物理学教程を著して有名な万能の理論物理学者 Lev Davidovich Landau が対数表を使って物理学者を分類していたことは有名であるが、そこでは、

0.5 級 Einstein

1.0 級 Bohr, Schrödinger, Heisenberg, Dirac, Fermi など

そして、当初、自分のことは 2.5 級に分類し、ある仕事に満足してから、

「これで、やっと私も 2.0 級になった。」と言ったそうであるが[15]、Landau からみても勿論のこと、Bohr や他の一流の物理学者から見ても、Einstein はやはり群を抜いていたのであろう。だからこそ、Bohr は必死になって Einstein の説得を試みたのではないか。

しかし、Schrödinger に宛てた手紙の内容を見ると、Einstein が真に解決したかったことを、他の物理学者が把握しきれていなかったのかも知れない。

最後に余談であるが、2010 年 10 月 28 日(木)の朝日新聞朝刊に、「米経済誌フォーブスが、昨年 10 月からの 1 年間の著作やレコード売り上げなどの推定収入が多かった著名な故人ランキングを発表した」という記事が掲載された。

|     |                |           |
|-----|----------------|-----------|
| 1 位 | マイケル・ジャクソン     | 27500 万ドル |
| 2 位 | エルビス・プレスリー     | 6000 万ドル  |
| 3 位 | J.R.R. トールキン   | 5000 万ドル  |
| ・   | ・              | ・         |
| 8 位 | アルバート・アインシュタイン | 1000 万ドル  |

という結果である。10 位までは、殆どが歌手、音楽家、作家などで、アインシュタインが唯一の科学者である。10 位までの中で没年は、アインシュタインが最も古く、このような結果は、死後 55 年を経ても、アインシュタインのスーパースター振りを発揮していると言えるのではあるまいか。

## 7. 参考文献等

- [1] A.Einstein, B.Podolsky, N.Rosen, Phys.Rev.47, 777-780 (1935) 翻訳は アインシュタイン選集 1, 共立出版, 185-192, (1971) 等にある。
- [2] 佐藤文隆、量子の世紀、別冊・数理科学、6-12、(2006)
- [3] アインシュタイン選集 1, 共立出版, (1971)
- [4] 吉田伸夫, 「EPR 論文を巡って」, [http://www005.upp.so-net.ne.jp/yoshida\\_n/P12\\_01](http://www005.upp.so-net.ne.jp/yoshida_n/P12_01)
- [5] 筒井 泉氏, (高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所) 談話
- [6] Sidney Redner, Physics Today, 49-54 ( June 2005)
- [7] 筒井 泉, 数理科学, 548, 5-6 (2009)
- [8] 高林武彦, 量子論の発展史, ちくま学芸文庫タ 37-1, 筑摩書房 (2010) および 中央公論社 (1977)
- [9] 西尾成子編, アインシュタイン研究, 中央公論社 (1977)
- [10] 山本義隆編訳, 因果性と相補性 ニールス・ボーア 論文集 1, 岩波文庫 青(33) - 940 - 1, 岩波書店, (1999)
- [11] E.Schrödinger, Naturwissenschaften 23, 807-812 (1935)
- [12] J.S.Bell, Physics 1, 195-200 (1964)
- [13] Artur K. Ekert, Physcal Review Letters 67, 661-663, (1991)
- [14] A.Einstein to E.Schrödinger, 19 Jul. 1935, M.Sachs: 「アインシュタイン vs ボーア はてしない物理学の論争」, 原田 稔・杉元賢治訳, 丸善 (1991) p.294, 注 63 より
- [15] マイヤ・ベザラブ著、金光不二夫訳、「ランダウの生涯」、東京図書 (1973) 4 章

# MPIを用いた分散処理型データ収集システムの開発および性能評価

村田和英、高橋舟平\*、安西則晃\*\*

Development and Evaluation of Distributed Processing System for Collecting Data with MPI

Kazuhide MURATA, Shuhei TAKAHASHI, and Noriaki ANZAI

**Abstract:** Today, there is a lot of information on the Internet. It is said that there are about 1 billion web pages on the Internet. And, there are a lot of business search engines. For example, the search engine of Google is constructed by a lot of computers as distributed processing system. In such a situation, we thought that small or middle scale search engines are needed according to various purposes and this system can be constructed by personal computers. Therefore, we decided to construct distributed collecting system as search engine with MPI and DBMS, and to evaluate the system.

## 1. はじめに

近年、インターネットの急速な普及に伴い World Wide Web (WWW) 上に存在する情報量も著しい増加の一途をたどっており、現在では1兆を超える Web ページが存在するとされている。WWW とはハイパーテキスト・システムとインターネットを結びつけて 1989 年に誕生したアプリケーションであり、その歴史はまだ浅い。しかし、WWW は最早ひとつの巨大なメディアとして文書や画像、音声などの多様な情報を発信し、社会に大きな影響を与えていることは既知の事実である。また WWW はその性質上、情報の変化が速く情報量も膨大である為、現在も検索手法などについて様々な議論や研究が行われている。

WWW は、HTML によって記述されたテキストを送受信し、ユーザインターフェースであるウェブブラウザを介することによって成り立っている。HTML は記述形式が決まっており、構造的であるという特徴を持っている。この特徴を利用して有益な情報を取得する、というシステムも数多く存在する。

現在の多くの商用検索システムは、大規模かつ高性能なシステムを要して膨大な情報を取得している。例えば、世界で最も普及している検索エンジンである Google は、大規模な分散型システムにより負荷分散を行いながらデータの処理を行っている。

以上のような現状において、今後その目的に沿った小規模ないし中規模の検索システムへの需要が個人や企業のレベルで高まっていくものと考えられる。また、そういった規模でのシステムならば、家庭などに普及しているパーソナルコンピュータ (PC) といった低スペックのものを計算媒体として確立可能であると考えられる。

本研究では、Web 上に存在する多くの情報を、低性能な計算機を用いて如何に高速に収集するかという観点から、PC を計算媒体として MPI (Message Passing Interface) や DBMS (Database Management System) などを駆使し、検索機能を提供するシステムの開発と、その性能評価を報告する。

## 2. システムの構成

### 2.1 全体構成

本システムの全体構成図を図1に示す。

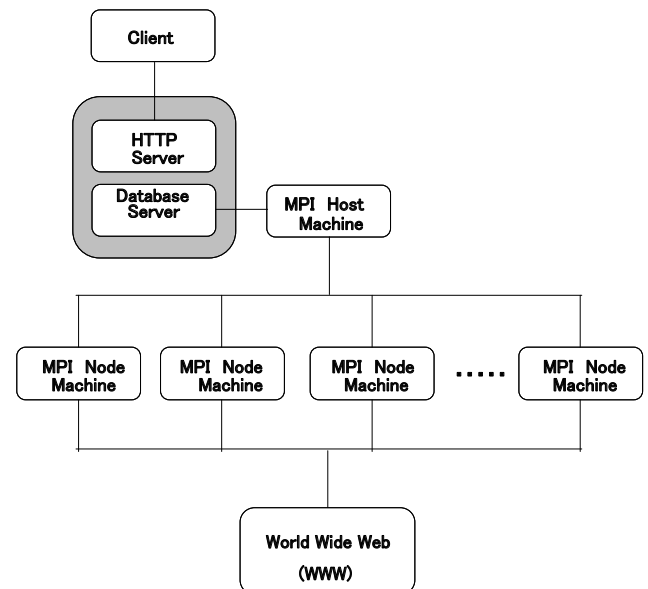


図1 システムの構成

本システムは WWW から並列分散処理を用いて情報を取得するデータ収集部と、クライアントが要求を出しその結果を得るためのデータ閲覧部の二部構成となっている。なお、HTTP サーバと Database サーバは同マシンにおいて稼働している。

\* 茨城高専専攻科情報工学専攻修了生

\*\* 茨城高専電子情報工学科卒業生

クライアントが HTTP サーバに検索ワードの要求を出し、これを MPI ホストマシンが HTTP サーバから取得する。取得した検索ワードを各 MPI ノードマシンに渡し、WWW から必要なデータを取得しホストマシンに渡す。ホストマシンがデータを Database サーバにアップロードすることによって、クライアントがデータを閲覧することが可能となる。

## 2. 2 システムの特徴

### (1) 動的負荷分散

本システムでは動的負荷分散を採用している。量的に時々刻々と変化するネットワーク上の情報を、プログラム実行前に各プロセッサに均等に割り振ることは非常に困難であり、また計算資源の有効活用の面からも動的負荷分散が適しているものと判断した。

### (2) 集中制御

本システムでは、データベースへのアクセスが検索ワードの取得時及び検索結果のアップロード時の計2回ある。分散制御を用いてシステムを構築した場合は、この2回のアクセスにおいて全てのプロセッサがデータベースへアクセスすることになり、アクセス競合が発生してしまう。プロセッサを多くすればするほど検索時間は短くなるが、アクセス競合により大幅な時間のロスにつながるという背反問題が発生することになる。そこで本システムでは、集中制御を採用しホストとノードを区別し、それぞれに個別の仕事割り当てることにした。

## 3. 実験と結果

### 3. 1 実験

#### (1) 実験環境

システムに用いたコンピュータの性能を表1に示す。なお、ホストマシンとノードマシンの性能面での区別はない。データベースサーバ及び HTTP サーバに使用したコンピュータの性能を表2に示す。

表1 検索用マシンの性能

|        |                   |
|--------|-------------------|
| CPU    | Pentium4 2.8[GHz] |
| Memory | 1024[MB]          |
| NIC    | 100[Mbps]         |
| OS     | Vine Linux 2.6.1  |
| Tool   | Windows XP Home   |

表2 サーバ用マシンの性能

|        |                   |
|--------|-------------------|
| CPU    | Pentium4 2.4[GHz] |
| Memory | 512[MB]           |
| NIC    | 100[Mbps]         |
| OS     | Vine Linux 2.6.1  |
| Tool   | MPICH             |

### (2) 実験方法

実験では、QUICK のウェブサーバ上にある株式に関するデータの中から、検索ワード 100 件にヒットした分のデータを取得し、データベースを構築するまでに要した処理時間を以下の条件のもとで測定した。

条件1：コンピュータ数を1～10台、コンピュータ1台当たりのプロセス数を1～5まで変化させ測定。

条件2：検索ワードに100個の企業名を使用した。これらは、プロキシサーバのキャッシュの影響が少なくなるように作為的に選出したものである。

### 3. 2 結果

測定結果を示すにあたり、使用する用語の意味は次のとおりである。

- ・処理時間：プログラムの起動からデータベース構築までに要する時間
- ・台数効果：1プロセスでの処理時間/Nプロセスでの処理時間
- ・NET\_TIME：Web にアクセスしてからデータを取得するまでに要する時間
- ・DB\_TIME：データベースにアクセスしている時間
- ・READ\_TIME：取得した HTML テキストから必要な情報を得るまでに要する時間
- ・IDLE\_TIME：ノードマシンのアイドル時間

システムの処理時間に関する結果を図2に示す。図2より、PC数、プロセス数の増加に伴いシステムの処理時間が短くなっていることが読み取れる。本システムではプロセス数が最低2つないと動作しないため、PC数=1、プロセス数=1のときの値は2プロセスで稼働しているときからプロセス間の通信時間を引いた理論値である。この値とPC数=10、各マシンのプロセス数=5（総プロセス数=50）の時の値では、約8.5倍の差がある。しかし、総プロセス数が15を超えた辺りから処理時間に殆ど差が見られないことが判る。最短の処理時間は約33.5秒であった。

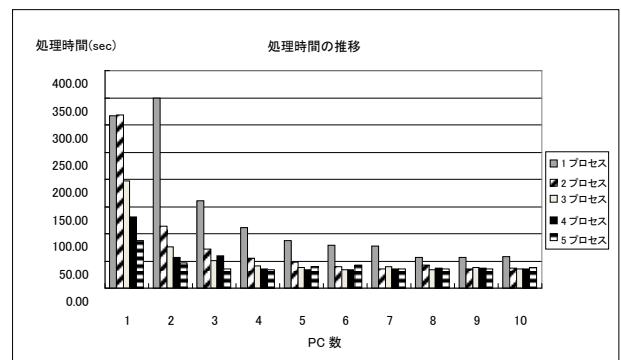


図2 PCとプロセス数に対する処理時間の変化

台数効果に関する結果を図3に示す。図3より、PC数、プロセス数の増加に伴い台数効果の値も増加していること

が読み取れる。総プロセス数がおよそ 15 以上では、平均しておよそ 8～9 倍の台数効果が得られているが、それ以上の伸びは見られず、台数効果に上限があることが判る。

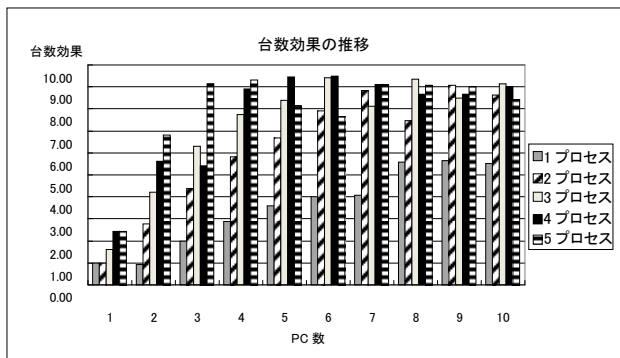


図3 PCとプロセス数に対する台数効果の変化

全体の処理時間の内訳に関する結果を図4～図6に示す。処理時間としては、Web にアクセスしてからデータを取得するまでの時間(NET\_TIME)の割合が高く、次いでデータベースへのアクセス時間(DB\_TIME)となっている。取得したHTMLテキストから必要な情報を探るのには殆ど時間を費やしていないことが判る。また、プロセッサ数が増加するとNET\_TIMEの割合が小さくなることも判る。

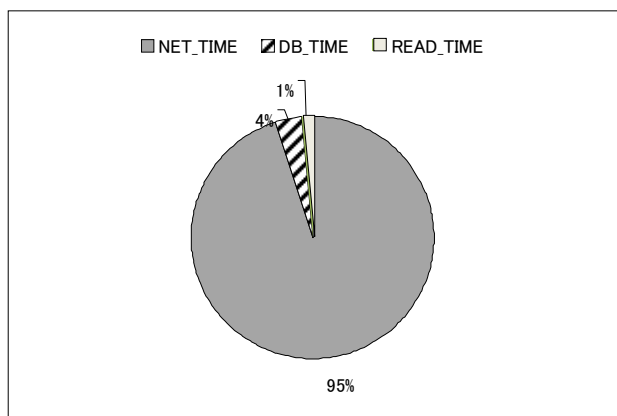


図4 プロセス数2における処理時間の内訳

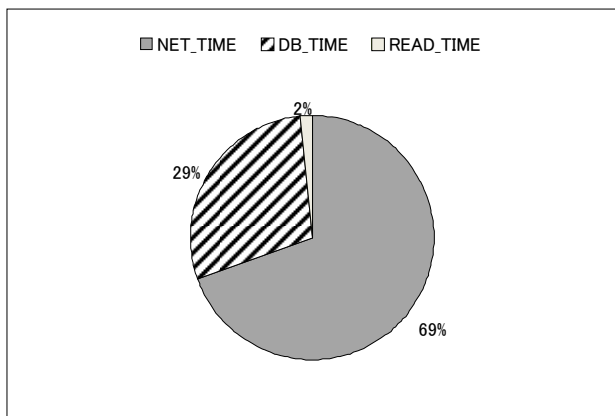


図5 プロセス数20における処理時間の内訳

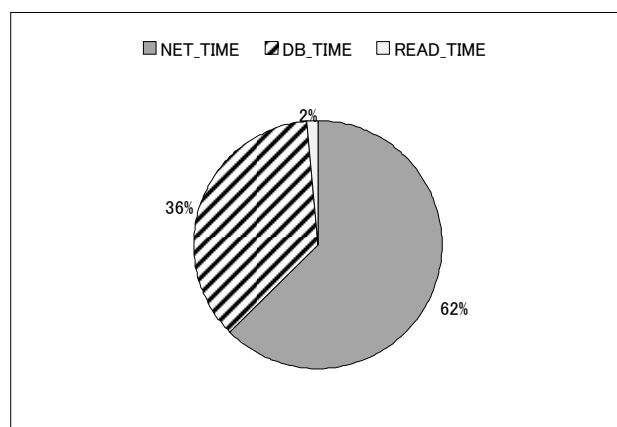


図6 プロセス数50における処理時間の内訳

ノードマシンのアイドル時間に関する結果を図7に示す。図7より、ノードマシンのアイドル時間についてはどのプロセス数においても殆ど違いは見られず、比較的安定していることが判る。全体的に5秒前後のアイドル時間があることが読み取れる。

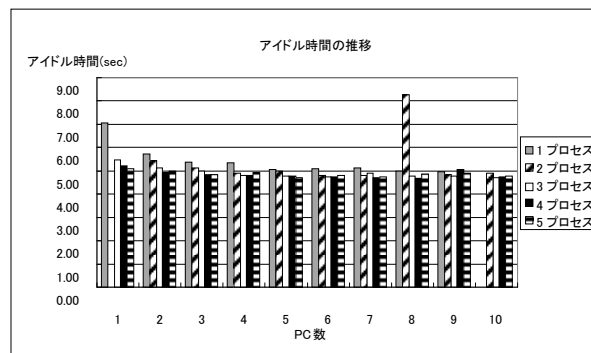


図7 PCとプロセス数に対するアイドル時間

#### 4. まとめ

プロセス数を増加させることによって約 8.5 倍の処理時間の短縮に成功し、Web 上のデータを高速に収集するという観点においては評価できる。また、最高で約 9.5 倍の台数効果を得ることができた。しかしながら、プロセス数を増加させても 15 以上では殆ど差異が見られなかった。これは Web から情報を取得する際に要するサーバ側のレスポンスや回線速度などに応じた絶対的な処理時間と、プロキシサーバを経由していることによるアクセス競合に依存しているものである。これらにより大きく処理効率が低下してしまう。また、15 以上のプロセスの増加はホストマシンへの負荷を増大させるものであり、プロセス間の結合方式についても対策が必要となってくる。

並列効率は、処理時間や台数効果とは逆にプロセス数が増加する程低下していく傾向にあった。本研究の目的がデータの高速収集という点にある以上、重要度はさほど高く



はないが、計算資源の有効活用の観点からは問題が残る結果となった。

処理時間の内訳の結果を見ると、プロセスの数を増加させると NET\_TIME の割合が減少している。データベースへのアクセスはホストマシンのみが行っており、プロセス数には依存しない。取得した HTML テキストからの情報の抜き取りには殆ど時間はかからない。従ってプロセス数の増加が Web にアクセスしている時間の大幅な短縮に貢献していることが分かる。また本システムにおいて最もネックとなるのは、Web へのアクセスだということが判った。今回の実験では検索ワードが 100 件であったが、これを増加させた時には 1 プロセスで処理を行う時に比べて、さらなる時間の短縮が期待できることになる。

アイドル時間については、かなり安定した結果を得ることができた。全体的に 5 秒前後の待ち時間があるが、これの殆どはホストマシンがデータベースへアクセスしている時間であり、それを除くとほぼ常時稼動していることになり、計算資源の有効活用ができていと考えられる。このことは、Web 上のデータを取得するのに動的負荷分散を用いることの妥当性が証明できたことになる。

今後の課題としては、処理時間の短縮、管理プロセッサの負担を軽減するための結合方式の検討、システムの汎用性、安定性の向上などが挙げられる。

#### 参考文献

- 1) P. パチェコ : MPI 並列プログラミング(2001)
- 2) MPI で並列プログラミング ([http://www.fireproject.jp/pc\\_cluster/mpi/index.html](http://www.fireproject.jp/pc_cluster/mpi/index.html))
- 3) グリッドコンピューティングによる数値最適化問題の高速処理([http://jstore.jst.go.jp/cgi-bin/research/advanced/detail.cgi?data\\_id=2919](http://jstore.jst.go.jp/cgi-bin/research/advanced/detail.cgi?data_id=2919))
- 4) 高橋、他 : MPI を用いた分散処理型システムの開発、第 17 回電気学会東京支部茨城支所研究発表会講演予稿集(2009)

## 独立成分分析による音源分離に関する検討

芝野 恭章\* 市毛 勝正

### Examination of Source Separation by Independent Component Analysis

Yasuaki SHIBANO\* and Katsumasa ICHIGE

**Abstract:** Blind source separation is a technique of sound source separation. The technique for presuming an independent component by non-Gauss maximum is examined in this study. The algorithm for the fixed-point approach is examined.

#### 1. はじめに

音声認識システムを搭載したカーナビゲーションや携帯電話などの電気機器が普及してきている。使用環境下では他人の会話音声など様々な雑音飛び交っていることが多くみられる。そのような状況下では、認識対象ではない音声認識されてしまったり、雑音によって音声がかき消されたりして、音声認識システムの本来の性能を十分に引き出してやれないということになる。

雑音と混合された認識対象音声を、混合される前の音源に分離し、認識すべき音声のみを抽出することで、音声認識システムの認識率が向上すると考えられる。音源分離を実現するには様々な手法がある。あらかじめ音源の位置を特定しておき、その情報を元に目的の音源方向の音のみを抽出する手法や、目的の音が鳴っていない状態を無音区間として学習させておき、雑音とともに入力された音から、その無音区間の情報を差し引いて目的の音を抽出する手法などである。

今回、音源を分離する過程の手段として、ブライント信号源分離 (Blind Source Separation) を用いる。本研究ではブライント信号源分離の手法のひとつである独立成分分析 (Independent Component Analysis) を用いる。尖度を非ガウス性の尺度に用いた不動点法の手法の検討を行った。

#### 2. ブライント信号源分離

ブライント信号源分離とは、複数の未知の信号系列を未知の線形混合系で混合した複数の測定値系列から、それぞれの信号を分離することである。図1にブライント信号源分離のモデルを示す。まず、複数の隠れた信号源があり、その信号源が混合された複数の観測信号があるとす

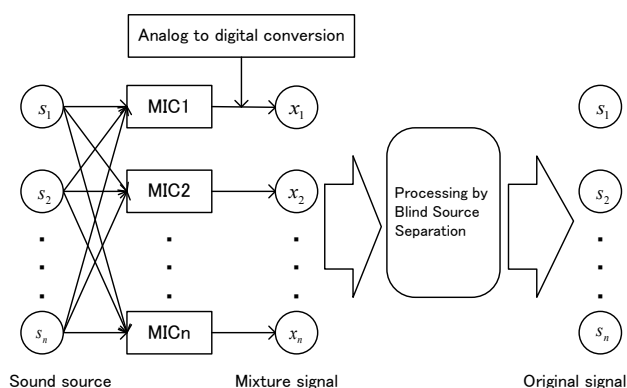


図1 ブライント信号源分離のモデル

観測信号を  $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ 、未知の信号源を  $s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t)$  とする。ここで観測信号  $x(t)$  は信号源  $s(t)$  の荷重和とする。ここで、荷重係数  $a_{ij}$  は信号源と観測するセンサの距離に依存し、信号源とセンサ間の時間遅延はないものとする、

$$\begin{aligned} x_1(t) &= a_{11}s_1(t) + a_{12}s_2(t) + \dots + a_{1n}s_n(t) \\ x_2(t) &= a_{21}s_1(t) + a_{22}s_2(t) + \dots + a_{2n}s_n(t) \\ &\dots \end{aligned} \quad (1)$$

$$x_n(t) = a_{n1}s_1(t) + a_{n2}s_2(t) + \dots + a_{nn}s_n(t)$$

となる。ここで、 $a_{ij}$  を要素とする混合行列  $A$  を式(2)とすると、観測信号  $x$  は式(3)によって表せる。

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$x = As \quad (3)$$

本研究の目的である音源分離は、観測信号  $x(t)$  から混合行列  $A$  を推定し、未知の信号源  $s(t)$  を見つけることである。

\*茨城高専専攻科電気電子工学コース2学年

混合係数  $a_{ij}$  は互いに十分異なっていて、混合行列  $A$  は正則であるとする。ここで  $A$  の逆行列  $W$  を式(4)とすると、信号源  $s$  は式(5)によって表せる。

$$W = A^{-1} = \begin{Bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1n} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{n1} & w_{n2} & \cdots & w_{nn} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

$$s = Wx \quad (5)$$

つまり、

$$\begin{aligned} s_1(t) &= w_{11}x_1(t) + w_{12}x_2(t) + \cdots + w_{1n}x_n(t) \\ s_2(t) &= w_{21}x_1(t) + w_{22}x_2(t) + \cdots + w_{2n}x_n(t) \\ &\dots\dots\dots \\ s_n(t) &= w_{n1}x_1(t) + w_{n2}x_2(t) + \cdots + w_{nn}x_n(t) \end{aligned} \quad (6)$$

となる。

### 3. 独立成分分析

独立成分分析とは、多変量の信号の中に隠れている統計的に独立な成分を求める計算手法である。観測信号から未知の信号源を分離するには、混合行列  $A$  の逆行列  $W$  を求めることになる。まず、信号源は統計的に互いに独立であるとする。さらにその信号が非ガウスのであると仮定する。この手法は、中心極限定理をもとにしている。2つの独立な信号が混合された信号から非ガウス性が極大となる成分を特定すれば独立成分を求めることができる。非ガウス性の尺度には尖度を用いる。平均値が0であるとき、 $x$ の尖度  $k(x)$ は

$$k(x) = E\{x^4\} - 3[E\{x^2\}]^2 \quad (7)$$

で定義される。

独立成分分析において観測されたデータベクトルを白色化すると、信号源の推定が非常に単純化される。確率ベクトル  $z = (z_1, z_2, \dots, z_n)^T$  を考えたとき、 $E\{z_i z_j\} = \delta_{ij}$  であれば白色であると定義される。これは確率ベクトルの要素  $z_i$  が無相関で分散が1ということである。すなわち、式(7)の第2項の  $E\{x^2\}$ が1となる。

ここで、 $n$ 個の要素をもつ確率ベクトル  $x$  が与えられ、 $x$ の線形変換を  $z$ とした場合を考える。 $x$ を白色化するには、 $z = Vx$ の  $z$ が白色となればよい。この行列  $V$ には

$$V = D^{-\frac{1}{2}} E^T \quad (8)$$

を用いる。 $E$ は共分散行列  $C_x$ の固有ベクトルからなる直交行列であり、 $D$ はその固有値からなる対角行列

$D = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$  ( $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_n$ )である。 $E$ は  $C_x$ の固有ベクトルを並べたものであるので、

$$E^T E = E E^T = I \quad (9)$$

を満足し、対応する固有値からなる行列  $D$ を用いると、共分散行列  $C_x$ は

$$C_x = E D E^T \quad (10)$$

で表される。ここで、

$$E\{zz^T\} = V E\{xx^T\} V^T = I \quad (11)$$

となるので、 $z$ の共分散行列が単位行列となることから、 $z$ は白色であるということがわかる。

## 4. 独立成分分析による音源分離

### 4.1 アルゴリズム

独立成分を求めるためには、尖度の極大となる部分を探し出す必要がある。そのために、制約条件の元で、尖度の絶対値の最大化を行う。まず、白色化されたベクトルを  $z$ とし、任意のベクトル  $w$ を定め、 $x = w^T z$ の尖度の絶対値が急激に増大する方向を探し、その方向を新しいベクトル  $w$ とする。尖度は、

$$k(w^T z) = E\{(w^T z)^4\} - 3[E\{(w^T z)^2\}]^2 \quad (12)$$

で与えられる。白色化されたベクトル  $z$ に対して、

$$E\{(w^T z)^2\} = \|w\|^2 \text{ が成り立つので、}$$

$$k(w^T z) = E\{(w^T z)^4\} - 3\|w\|^4 \quad (13)$$

となる。つまり、 $k(w^T z)$ が最小化したい関数となる。ここで制約条件から、制約方程式は、

$$H(w) = \|w\|^2 - 1 = 0 \quad (14)$$

となる。ラグランジュの未定乗数法は最適化問題の最小化の解を求めるものである。そのため尖度が最大となるために評価関数  $L(w, \lambda)$ は、

$$L(w, \lambda) = -\left(E\{(w^T z)^4\} - 3\|w\|^4 + \lambda(\|w\|^2 - 1)\right) \quad (15)$$

となり、 $L(w, \lambda)$ を  $w$ で偏微分し、 $\partial L(w, \lambda) / \partial w = 0$ とおくと、

$$w = \frac{2}{\lambda} [E\{(w^T z)^3 z\} - 3\|w\|^2 w] \quad (16)$$

となる。ここで、重要となるのは  $w$ の方向であるので、 $w$ の分散を1とすることで、 $2/\lambda$ は無視してもよい。

アルゴリズムを以下に示す。

1. 観測されたデータを白色化し、それによって得られたデータをベクトル  $z$ とする。
2. 初期値  $w_0$ を乱数によって定め、 $k=0$ とする。さらに、 $\|w_0\|=1$ とする。
3.  $w_{k+1} = E\{(w_k^T z)^3 z\} - 3w_k$ を用いて、 $w$ の方向を動かす。
4. 新しく得られたベクトル  $w_{k+1}$ を、 $\|w_{k+1}\|=1$ とする。
5.  $|w_{k+1}^T w_k|$ が1に収束していなければ、 $k=k+1$ として、3へ戻る。
6.  $|w_{k+1}^T w_k|$ が1に収束すれば終了。

本研究では、以上のアルゴリズムをもとにC言語を用いてプログラムを作成し、シミュレーションを行った。

## 4.2 シミュレーション結果と検討

音源分離をする信号は、図2に示す1000Hzと2000Hzの正弦波を加算した波形 $s_1$ と図3に示す白色雑音 $s_2$ とする。

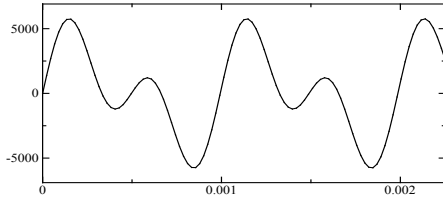


図2 信号源 $s_1$

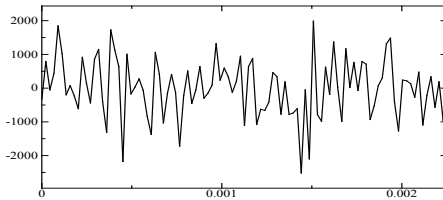


図3 信号源 $s_2$

$s_1$ と $s_2$ をそれぞれ確率ベクトルとし、 $s = (s_1 \ s_2)^T$ とする。式(17)の混合行列 $A$ によって信号を混合させ混合信号 $x = (x_1 \ x_2)^T$ を生成する。

$$A = \begin{pmatrix} 0.6 & 0.9 \\ 0.7 & 0.4 \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.6s_1 + 0.9s_2 \\ 0.7s_1 + 0.4s_2 \end{pmatrix} \quad (18)$$

生成された混合信号波形 $x_1$ 、 $x_2$ を図4、5に示す。

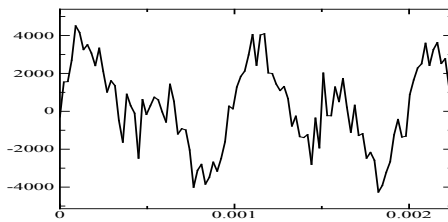


図4 混合信号 $x_1$

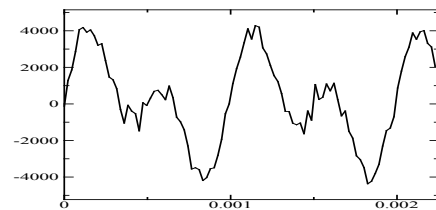


図5 混合信号 $x_2$

まず、混合波形 $x$ を白色化する。共分散行列 $C_x$ を数値計算によって求め、得られた行列より共分散行列の固有値からなる対角行列 $D$ 、共分散行列の固有ベクトルからなる直交行列 $E$ を求める。得られた白色化行列 $V$ を以下に示す。

$$V = \begin{pmatrix} 0.676984 & 0.735998 \\ 0.735998 & -0.676984 \end{pmatrix}$$

この行列を用いて混合信号 $x$ を白色化し、ベクトルを $z = (z_1 \ z_2)^T$ とする。ここで、 $z = Vx$ である。

次に、任意に定めたベクトル $w = (w_1 \ w_2)^T$ をもとに $w^T z$ の非ガウス性が極大となる成分を探す。

初期値は乱数を用いて決定し、 $\|w_0\| = 1$ としなるとして正規化し、

$$w_0 = \begin{pmatrix} 0.002220 \\ 0.999998 \end{pmatrix}$$

となった。ベクトル $w$ を求めると、

$w = (-0.963263 \ 0.268561)^T$ が得られた。ここで、ベクトル $z$ は、 $z = VAs$ である。これより、

$$E\{zz^T\} = (VA)E\{ss^T\}(VA)^T = (VA)(VA)^T \quad (19)$$

である。 $E\{zz^T\}$ は単位行列であるので、 $(VA)(VA)^T$ も単位行列となり、 $(VA)$ は直交行列となる。

これより、 $s = (VA)^T z$ が求められる。ここで、次の行列 $w'$ を考える。

$$w' = (VA)^T \begin{pmatrix} w_1 & w_2 \\ w_3 & w_4 \end{pmatrix}^T \quad (20)$$

先に求めた $w$ による線形結合 $w^T z$ は、混合波形の尖度が最大となる成分、つまり独立成分のひとつであるので、信号源が $s = w'z$ によって求められるとすると、 $w = (w_1 \ w_2)^T$ となる。これより、

$(w_3 \ w_4) = (0.268561 \ 0.963263)$ と求められる。この結果から、 $x' = w'^T z$ として求めた波形が図6、7である。独立成分分析によって、混合信号から未知の信号源を抽出できていることがわかる。

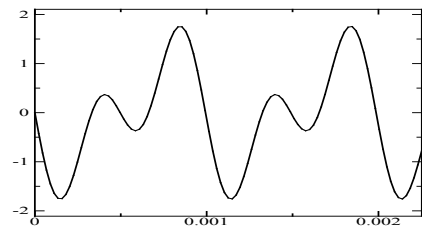


図6 独立成分分析によって求められた信号 $x_1'$

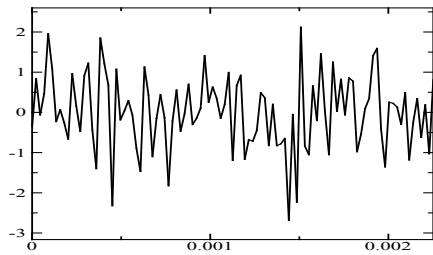


図7 独立成分分析によって求められた信号  $x'_2$

## 5. まとめ

混合された波形から元の信号に分離するシミュレーションを行い、尖度が極大となるような成分を見つけ出すことで独立な信号の音源分離が可能であることを確認できた。今回は反響等の観測環境による要素は考慮していないので、実環境下での音源分離を実現するために反響等を考慮したアルゴリズムの構築が今後の課題である。

## 参考文献

- 1) Aapo Hyvarinen, Juha Kahunen, Erkki Oja、訳者：根本幾、川勝真喜「独立成分分析」、東京電機大学出版局、2006
- 2) 羽鳥貴大, 市毛勝正: 「DSP 実装のための音源分離の検討」, 第16回 電気学会東京支部茨城支所研究発表会 2008
- 3) 芝野恭章, 市毛勝正: 「独立成分分析による音源分離に関する検討」, 第18回 電気学会東京支部茨城支所研究発表会 2010



# アントコロニー最適化による巡回セールスマン問題の解法の研究

浅野 貴哉\*、弘畑 和秀

A Study of the Solution of Traveling Salesman Problem by the Ant Colony Optimization

Takaya ASANO\* and Kazuhide HIROHATA

**Abstract:** Ant Colony Optimization (ACO) is a paradigm for designing meta heuristic algorithms on combinatorial optimization problems. This paper proposes a improvement technique of Rank-based Ant System ( $AS_{rank}$ ). We apply proposed method to Travelling Salesman Problem (TSP) and show that proposed method gives better performance than standard  $AS_{rank}$ .

## 1. はじめに

巡回セールスマン問題(Traveling Salesman Problem, TSP)とは組み合わせ最適化問題の一つである。TSP を解くメタヒューリスティクスとして、アントコロニー最適化(Ant Colony Optimization, ACO)が有効な結果を得ている。ACO は群知能とよばれる人工知能技術の一つである。ACO の基礎となる Ant System が Dorigo らによって提案されてから、これまでに数々の改良型アルゴリズムが提案されている。本研究では、その手法の一つである Rank-based Ant System ( $AS_{rank}$ )を改良し、従来の  $AS_{rank}$  と比較することでその有効性を検証することを目的とする。

## 2. 巡回セールスマン問題の概要

TSP とは、 $n$  個の都市集合  $V=\{1, 2, \dots, n\}$  と、 $V$  に含まれる二つの都市  $i, j$  ( $i, j \in V, i \neq j$ ) 間の距離  $d(i,j)$  が与えられたとき、最短のハミルトン閉路を求める問題である。例を図 1 に示す。都市間の距離が対称、つまり  $d(i,j) = d(j,i)$  を満たすものを対称 TSP と呼び、そうでないものを非対称 TSP と呼ぶ。

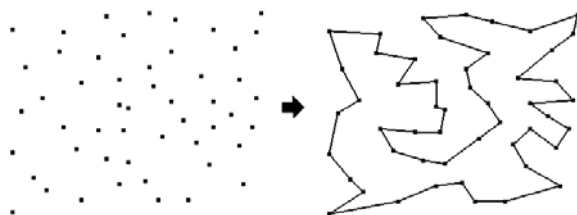


図 1 TSP の例

$n$  都市における巡回路の総数は  $(n-1)!/2$  である。つまり、都市数に応じて指数関数的に増加していく。32 都市の TSP を考えた場合、巡回路の総数は約  $4.11 \times 10^{33}$  通りとなる。厳密解法で最適解を求めることは可能だが、計算コストが膨大となり、実用的な時間で解くことが困難となる。そこで近似算法やメタヒューリスティクスといった、厳密に最適解を求めることを諦める代わりに、短い時間で質の良い解を出す手法が研究されている。近似算法には、都市が与えられた状態から巡回路を作成する構築法、何らかの方法で得た巡回路に対して変更を加えることでコストを小さくする改善法がある。構築法、改善法の例を図 2, 3 に示す。メタヒューリスティクスでは、今回用いる ACO や、焼きなまし法(Simulated Annealing)や遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm), タブーサーチ(Tabu Search)といった手法が提案されている。

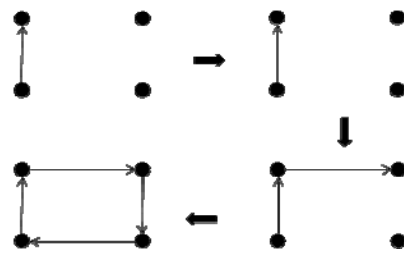


図 2 構築法の例

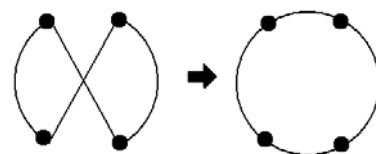


図 3 改善法の例

\* 茨城工業高等専門学校専攻科  
産業技術システムデザイン工学専攻 情報工学コース 2 年

### 3. アントコロニー最適化の概要

ACO は人工アリエージェントとフェロモンの相互作用に基づいて組合せ最適化問題を解くアルゴリズムの総称である。

#### 3.1 アリの経路探索のメカニズム

ACO は自然界のアリの食料収集における行動をモデルとしている。アリはフェロモンという物質を介して他のアリとコミュニケーションをとる。食料を見つけると、アリは道しるべフェロモンとよばれるフェロモンを地面に残しながら巣に戻る。他のアリは道しるべフェロモンを辿ることにより食料を見つけ、同様に道しるべフェロモンを残しながら巣に戻る。フェロモンは揮発性の物質で徐々に蒸発していく。また、アリがフェロモンを分泌する度、フェロモンの濃度は濃くなる。

図4のように分岐する経路があるとすると、アリの移動する速度は一定とすると、下の短い経路が上の長い経路より早くフェロモンが強化される。フェロモンは時間とともに蒸発するが、短い経路はそれよりも早くフェロモンが強化されるため、後からきたアリは濃度の高い短い経路を選ぶ可能性が高くなる。長い経路に置かれたフェロモンは蒸発し、やがて選ばれなくなる。このように、1匹のアリは単純な行動しかしないが、集団になることで高い知能を持っているかのように振舞う。

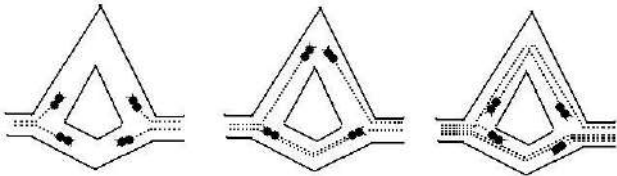


図4 アリの経路選択

#### 3.2 Ant System (AS)

AS は Dorigo らによって提案された最初の ACO に基づくアルゴリズムである。AS のアルゴリズムを以下に示す。 $t$  は反復回数を表す。

1.  $t := 0$ , フェロモンの初期化
2. エージェントを都市に配置
3. 終了条件  $t_{max}$  に達するまで
  - 3.1. 各エージェントについて、巡回路を生成するまで都市選択を繰り返す
  - 3.2. フェロモン情報を更新
  - 3.3.  $t := t + 1$
4. 最良解を出力

アリを模したエージェントは都市間の距離とフェロモンの量から、確率的に次の移動先を選択する。エージェント  $k$  が都市  $i$  にいるとき、都市  $j$  に移動する確率  $p^k$  は次のよう

に定義される。図5にイメージ図を示す。

$$p^k(i, j) = \frac{[\tau(i, j)]^\alpha [\eta(i, j)]^\beta}{\sum_{l \in N^k} [\tau(i, l)]^\alpha [\eta(i, l)]^\beta}$$

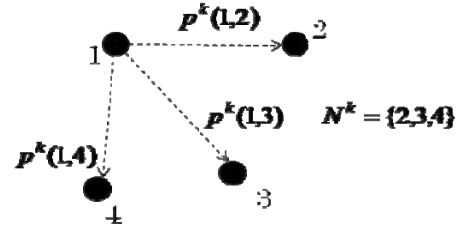


図5 都市選択のイメージ

$\tau(i, j)$  は都市  $i, j$  間のフェロモン量、 $\eta(i, j)$  はヒューリスティック情報と呼ばれる問題固有の情報を表す。TSP の場合距離の逆数  $\eta(i, j) = 1/d(i, j)$  が用いられる。 $\alpha, \beta$  は正の実数で、フェロモン情報、ヒューリスティック情報をどの程度重要視するかを決定するパラメータである。 $N^k$  はエージェント  $k$  の未訪問都市集合である。

各エージェントが巡回路を生成した後、次のようにフェロモン情報が更新される。

$$\tau(i, j) = (1 - \rho)\tau(i, j) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau^k(i, j)$$

$$\Delta\tau^k(i, j) = \begin{cases} 1/L^k & \text{if } (i, j) \in T^k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$\rho$  はフェロモンの蒸発率を表すパラメータで、 $0 < \rho < 1$  の値をとる。 $m$  はエージェントの総数である。 $\tau^k$  はエージェント  $k$  によって置かれるフェロモンの値である。 $T^k$  はエージェントが生成した巡回路で、 $L^k$  はその経路長を表す。つまり、巡回路の距離が短いほど経路に置かれるフェロモンの量が多くなる。また、選択されない経路に対してフェロモンの量は減少していく。このような処理を終了条件を満たすまで繰り返す。

#### 3.3 Rank-based Ant System (AS<sub>rank</sub>)

AS<sub>rank</sub> は AS の改良型で Bullnheimer らによって提案された。AS<sub>rank</sub> では、AS と同様に各エージェントが巡回路の生成を行い、フェロモン情報を更新する。その際、巡回路を経路長が短い順にソートを行う。このとき、 $\mu$  番目の巡回路を  $T^\mu$ 、その経路長を  $L^\mu$  とする。AS<sub>rank</sub> におけるフェロモン情報の更新ルールは次のように定義される。

$$\tau(i, j) = (1 - \rho)\tau(i, j) + \Delta\tau^+(i, j) + \sum_{\mu=1}^{\sigma-1} \Delta\tau^\mu(i, j)$$

$$\Delta\tau^+(i,j) = \begin{cases} \sigma/L^+ & \text{if } (i,j) \in T^+ \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\Delta\tau^\mu(i,j) = \begin{cases} (\sigma - \mu)/L^\mu & \text{if } (i,j) \in T^\mu \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$T^+$ はこれまでに得られた最良の巡回路、 $L^+$ はその経路長である。 $\sigma$ は上位何位までフェロモンを置くことを許すかを定めるパラメータである。つまり、最良解に対して最も多くのフェロモンが置かれ、さらにそのステップの上位  $\sigma-1$  位までフェロモンが置くことができる。これにより探索の集中化の度合いが強化される。 $AS_{rank}$  は  $AS$  より優れていることが報告されている。[1]

#### 4. $AS_{rank}$ の改良

ACO やその他のヒューリスティクスで重要となるのが探索における集中化と多様化のバランスである。局所最適解に陥ることを避けるため、良さそうな領域を集中的に探索しつつ、他の領域の情報を得ることが必要である。 $AS_{rank}$  では、良い結果が得られた巡回路にしかフェロモンが置かれないため、局所最適解に陥ると抜け出すことが困難であると考えられる。そこで、結果の悪かった巡回路にもフェロモン更新を行う  $AS_{rank}$  を提案し、従来の  $AS_{rank}$  の改善を図る。従来の  $AS_{rank}$  のフェロモン情報更新ルールを以下のように変更する。

$$\tau(i,j) = (1 - \rho)\tau(i,j) + \Delta\tau^+(i,j) + \sum_{\mu=1}^{\sigma-1} \Delta\tau^\mu(i,j) + \sum_{\nu=m-\sigma+2}^m \Delta\tau^\nu(i,j)$$

$$\Delta\tau^\nu(i,j) = \begin{cases} 1/L^\nu & \text{if } (i,j) \in T^\nu \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

そのステップで得られた上位の巡回路と同じ数だけ悪い巡回路のフェロモン更新を行う。悪い巡回路は  $L^{m-\sigma+2}$  位から  $L^m$  位の巡回路、つまりワースト  $\sigma-1$  までの巡回路に対してフェロモンを置くことになる。

### 5. 実験

#### 5.1 実験条件

$AS$ ,  $AS_{rank}$ , 提案  $AS_{rank}$  について、TSPLIB の 100 都市のベンチマーク問題(kroA100)を適用させる。図 6 に kroA100 の都市配置及び最適解を示す。kroA100 の最適解の経路長は 21282 である。[2]

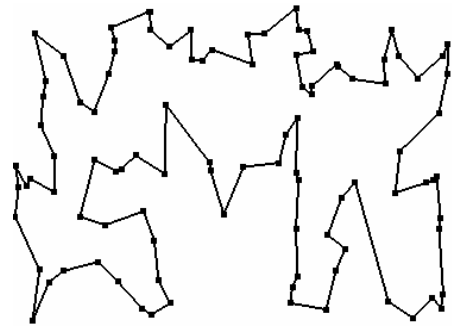


図 6 kroA100 の都市配置及び最適解

エージェント数は都市数と同じ 100、初期配置はそれぞれの都市に 1 エージェントとする。実験に用いたパラメータは  $\alpha=1.0$ ,  $\beta=5.0$ ,  $\rho=0.9$  とし、終了条件は  $t_{max}=10000$  とする。 $AS_{rank}$  について、 $\sigma=5$  と  $\sigma=101$  の場合について行い、それぞれ  $AS_{rank5}$ ,  $AS_{rank101}$  とする。 $AS_{rank}$  は  $\sigma=5$  程度の値が用いられるが、比較のため  $\sigma=101$  についても行うことにする。提案  $AS_{rank}$  については  $\sigma=5$  とする。各手法について 20 回試行を行う。

実験環境を以下に示す。

開発環境：Visual C++ 2008 Express Edition

OS：Windows XP Home Edition

CPU：Atom N280 1.66GHz

メモリ：1GB

#### 5.2 実験結果・考察

各手法について試行し、得られた巡回路の経路長の最小値、最大値、平均値をまとめたものを表 1 に示す。括内の数値は最適解の経路長である 21282 に比べてどの程度長いかが示している。この表より、最大値では  $AS_{rank5}$  より悪い値が出ているものの提案  $AS_{rank}$  が一番良い結果を得ていることが分かる。

次に、ステップごとに得られた最良解の一例を図 7.1 から図 7.3 に示す。 $AS$  は最良解の値はステップごとにバラバラである。これは、探索における集中化と多様化のバランスが多様化のほうに偏っているためであると考えられる。 $AS_{rank101}$  ではフェロモン情報更新の際、 $AS$  と同様に全てのエージェントが生成した経路に対して行われ、 $AS$  より、良い巡回路に対して置かれるフェロモンの量は多くなっているものの、まだ集中化の度合いは低い。 $AS_{rank5}$ , 提案  $AS_{rank}$  はそのステップでの最良解がそのステップまでの最良解と等しくなった。この 2 つの手法は探索の集中化がよくなっていると考えられる。 $AS_{rank5}$  と提案  $AS_{rank}$  を比較すると、解が改善されていく速度が異なる。図 7.3 の例では  $AS_{rank5}$  が 23000 から 22000 まで数百ステップで改善されているが、提案  $AS_{rank}$  の場合 3000 ステップ以上かかっている。これは提案  $AS_{rank}$  の探索する領域が  $AS_{rank5}$

に比べて広がっているためである。この結果より、フェロモンを置く巡回路をある程度限定させるとよいことが分かった。

AS<sub>rank5</sub> と提案 AS<sub>rank</sub> が生成する解の質について比較する。2つの手法で得られた20個の解を最適解(21282)と比較してどの程度の長さであるか4段階に分け、その割合を図8に示す。これにより提案 AS<sub>rank</sub> は、最適解より1%以内の解を見つけやすいことが分かる。これまでの結果から、提案 AS<sub>rank</sub> は従来の AS<sub>rank</sub> と比べ探索の集中化と多様化のバランスがよくなり、探索能力が上がったと考えられる。

表1 各手法について kroA100 を適用した結果

|                       | 最小値                | 最大値                | 平均値                  |
|-----------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| AS                    | 22572<br>(106.06%) | 23771<br>(111.70%) | 23228.7<br>(109.15%) |
| AS <sub>rank5</sub>   | 21406<br>(100.58%) | 22755<br>(106.92%) | 21944.3<br>(103.11%) |
| AS <sub>rank101</sub> | 22117<br>(103.92%) | 23200<br>(109.01%) | 22436.9<br>(105.43%) |
| 提案 AS <sub>rank</sub> | 21375<br>(100.44%) | 22997<br>(108.06%) | 21854.1<br>(102.69%) |

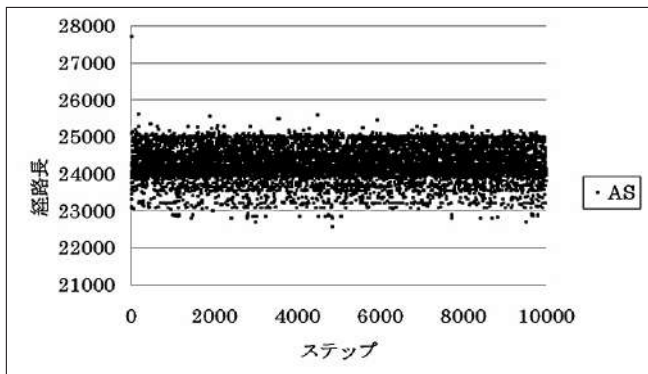


図7.1 ステップ毎の最良解(AS)

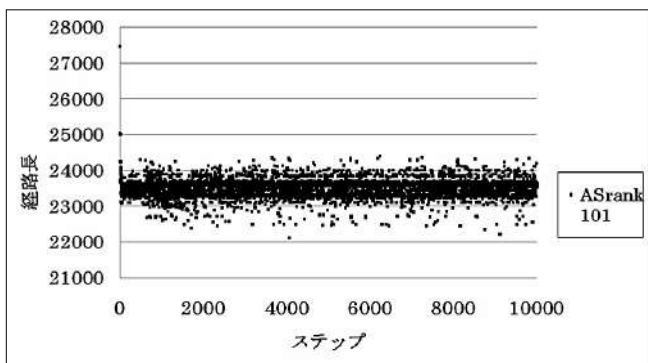


図7.2 ステップ毎の最良解(AS<sub>rank101</sub>)

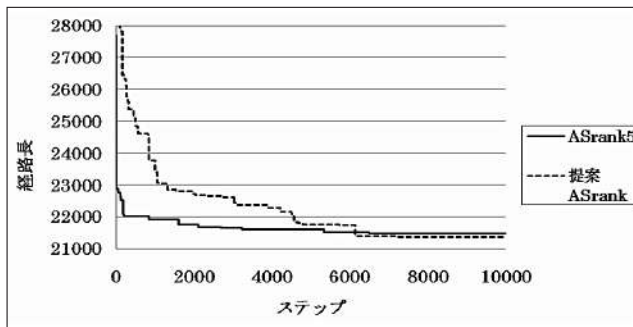


図7.3 ステップ毎の最良解(AS<sub>rank5</sub>, 提案 AS<sub>rank</sub>)

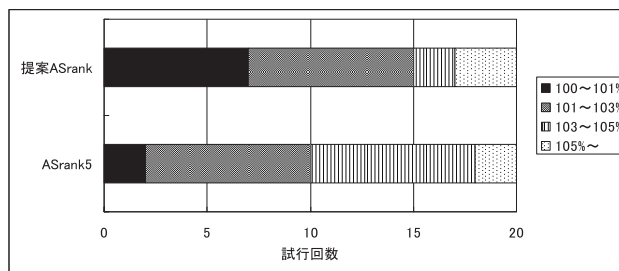


図8 AS<sub>rank5</sub> と提案 AS<sub>rank</sub> の解の質の比較

6. 結論

本研究では、上位と下位の巡回路に対してフェロモン情報の更新を行う AS<sub>rank</sub> を提案し、従来の AS<sub>rank</sub> に比べて優れた結果を得ることができた。下位の巡回路を含める際、AS<sub>rank101</sub> のように全てのエージェントが生成した巡回路に対してフェロモンを置くのではなく、範囲を限定させることにより、探索における集中化と多様化のバランスがよくなることが分かった。しかし、従来の AS<sub>rank</sub> より悪い解を出すことがあったため、改善していく必要がある。今回は最下位から  $\sigma-1$  分の巡回路を用いたが、どの部分の巡回路に対してフェロモン情報の更新を行うかによって探索の精度や速度が変わってくると考えられる。よって、今後はどの部分の巡回路を用いることで有効な結果を得られるか検証していきたい。また、他のベンチマーク問題に対して適用し、今回提案した方法が有効であるか検証することが課題として挙げられる。

参考文献

[1] B. Bullnheimer, R. F. Hartl and C. Strauss, "A new rank-based version of the ant system," a computational study, Working Paper No.1, 1999  
 [2] <http://comopt.ifi.uni-heidelberg.de/software/TSPLIB95/>  
 [3] 山本芳嗣, 久保幹雄著 「巡回セールスマン問題への招待」 朝倉書店 1997

- [4] 大内東, 山本雅人, 川村秀憲, 柴肇一, 高柳俊明, 當間愛晃, 遠藤聡志著 「生命複雑系からの計算パラダイム」 森北出版 2003





# グラフの点素な閉路の存在性について

Ronald J. GOULD\*, Paul HORN\*, 弘畑 和秀

On the Existence of Vertex Disjoint Cycles in Graphs

Ronald J. GOULD\*, Paul HORN\*, and Kazuhide HIROHATA

**Abstract:** In 2005, Faudree and Gould proved that if  $G$  is a graph of order at least  $3k$  such that  $|N_G(x) \cup N_G(y)| \geq 3k$  for all non-adjacent pairs of vertices  $x$  and  $y$ , then  $G$  contains  $k$  vertex disjoint cycles. Also, they conjectured it might be possible to replace their neighborhood condition by one of the form  $2k+c$ . We show some lemmas to prove their conjecture under the large order of  $G$ .

## 1. はじめに

$G$  をグラフとする。ここで扱うグラフはすべてループや多重辺を持たない有限無向グラフである。 $G$  の頂点集合を  $V(G)$ 、辺集合を  $E(G)$  で表す。 $G$  の頂点  $x$  に対して、 $G$  における  $x$  の近傍とは  $G$  の中で  $x$  に隣接している頂点集合で、 $N_G(x)$  と表す。 $G$  における  $x$  の次数とは  $x$  に隣接している頂点の個数で、 $d_G(x) = |N_G(x)|$  と表す。 $G$  の部分グラフ  $H$  に対して、 $G-H$  は  $V(G) - V(H)$  によって誘導される部分グラフとする。頂点数が  $n$  の完全グラフを  $K_n$  で表し、グラフ  $G$  に対して  $G$  の  $m$  個のコピーからなるグラフを  $mG$  と表す。グラフ  $G_1$  と  $G_2$  に対して  $G_1$  と  $G_2$  の結びを  $G_1 + G_2$  で表す。他の用語や表記については [1] を参照のこと。

次に以下の定義を行う。

$G$  の最小次数

$$\delta(G) = \min \{d_G(x) \mid x \in V(G)\}$$

$G$  の非隣接 2 頂点の最小次数和

$$\sigma_2(G) = \min \{d_G(x) + d_G(y) \mid x, y \in V(G), x \neq y, xy \notin E(G)\}$$

$G$  の部分グラフを  $H$  とし、 $x \in V(G) - V(H)$  とするとき、 $N_H(x) = N_G(x) \cap V(H)$  で表す。

次にこれまでに得られているいくつかの結果を紹介する。1963 年、Corrádi と Hajnal は Erdős の予想である点素な閉路の存在に関する次の定理を証明した。

### 定理 1 (Corrádi and Hajnal [2])

グラフ  $G$  は頂点数が  $3k$  ( $k \geq 1$ ) 以上で  $\delta(G) \geq 2k$  とする。このとき  $G$  には  $k$  個の点素な閉路が存在する。

この結果は 1989 年、Justesen によって非隣接 2 頂点の最小次数和に改良された。

### 定理 2 (Justesen [3])

グラフ  $G$  は頂点数が  $3k$  ( $k \geq 1$ ) 以上で  $\sigma_2(G) \geq 4k$  とする。このとき  $G$  には  $k$  個の点素な閉路が存在する。

さらに、この結果は 1998 年に Enomoto、1999 年に Wang によって独立に非隣接 2 頂点の最小次数和が最良の値に改善された。

### 定理 3 (Enomoto [4], Wang [5])

グラフ  $G$  は頂点数が  $3k$  ( $k \geq 1$ ) 以上で  $\sigma_2(G) \geq 4k-1$  とする。このとき  $G$  には  $k$  個の点素な閉路が存在する。

定理 3 の  $\sigma_2(G)$  の下限  $4k-1$  は  $G = K_{2k-1} + mK_1$  を考えることにより最良の値であることがわかる。すなわち  $\sigma_2(G) \geq 4k-2$  では  $G$  に  $k$  個の点素な閉路は存在しない。

定理 2, 3 は非隣接 2 頂点の最小次数和  $\sigma_2(G)$  に関する結果であるが、非隣接 2 頂点共通の隣接点を持つ場合、 $\sigma_2(G)$  ではこれらを重複して数えることになり、隣接点の個数を正確に表したものでなくなる。この点を改善するため、本研究では近傍和の概念を導入する。近傍和に関する結果として、2005 年、Faudree と Gould によって次の定理が証明された。

### 定理 4 (Faudree and Gould [6])

グラフ  $G$  は頂点数が  $3k$  ( $k \geq 1$ ) 以上で、 $G$  のすべての非隣接 2 頂点  $x, y$  に対して  $|N_G(x) \cup N_G(y)| \geq 3k$  とする。このとき  $G$  には  $k$  個の点素な閉路が存在する。

[6] の中で、Faudree と Gould は近傍和の下限  $3k$  が下げられるのではないかと予想している。

\* Department of Mathematics and Computer Science  
Emory University

**予想 1 (Faudree and Gould [6])**

グラフ  $G$  は頂点数が  $4k$  ( $k \geq 1$ ) 以上で、 $G$  のすべての非隣接 2 頂点  $x, y$  に対して  $|N_G(x) \cup N_G(y)| \geq 2k+c$ , ( $c$  は定数) とする。このとき  $G$  には  $k$  個の点素な閉路が存在する。

本研究では予想 1 において  $G$  の頂点数が大きい場合の予想 2 を証明する際に使われるいくつかの補助定理を得ることができた。

**予想 2**

グラフ  $G$  は頂点数が  $30k$  ( $k \geq 1$ ) 以上で、 $G$  のすべての非隣接 2 頂点  $x, y$  に対して  $|N_G(x) \cup N_G(y)| \geq 2k+1$  とする。このとき  $G$  には  $k$  個の点素な閉路が存在する。

予想 2 が証明できれば、近傍和の下限  $2k+1$  は最良の値であることが次のグラフを考えることによりわかる。 $|N_G(x) \cup N_G(y)| \geq 2k$  とすると、 $k=1$  のとき点素な辺からなるグラフは近傍和条件を満たすが 1 個の閉路も持たない。 $k=2$  のときホイールグラフ (閉路の領域内に 1 点を置き、その点と閉路上のすべての点を結んでできるグラフ) は近傍和条件を満たすが 2 個の点素な閉路を持たない。

**2. 補助定理**

予想 2 を証明するために、 $k$  に関する数学的帰納法を用いる。 $k=1$  のときグラフ  $G$  の最小次数  $\delta(G)$  が 2 以上ならば、 $G$  には一つの閉路が存在するので、 $\delta(G) \leq 1$  としてよい。このとき  $G$  には次数 1 以下の点  $x$  が存在し、予想 2 の近傍和条件より、 $G$  から  $x$  とその近傍を除いたグラフ  $G'$  の最小次数が 2 以上とわかる。よって  $G'$  には一つの閉路が存在するので、 $k \geq 2$  としてよい。

ここで  $k-1$  個の点素な閉路  $C_1, C_2, \dots, C_{k-1}$  の存在を仮定する。 $C = C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_{k-1}$  とし、頂点数が最小の  $C$  を選ぶ。また  $H = G - C$  とし、連結成分の個数が最小である  $H$  を考える。 $H$  が閉路をもてば  $k$  個の点素な閉路を構成できるので、 $H$  は閉路を持たないとしてよい。すなわち  $H$  は forest (林) である。次に閉路の取り替えを行う補助定理を準備する。

**補助定理 1**

グラフ  $H$  は  $|N_H(x_i)| \leq 1$ , ( $1 \leq i \leq 3$ ) を満たし相互に非隣接な 3 点  $x_1, x_2, x_3$  を持つとする。このとき、 $k-1$  個の点素な閉路の中で次の取り替えを行うことができる閉路  $C_m$  と点  $z \in V(C_m)$ 、及び  $i, j \in \{1, 2, 3\}$ , ( $i \neq j$ ) が存在する。

[取り替え]  $(C_m - \{z\}) \cup \{x_i\}$  は閉路 ( $zx_j \in E(G)$ )

さらに、 $|N_{H'}(z)| = 1$ , ( $H' = H - \{x_i\}$ ) である。

補助定理 1 を証明するために、 $|C|$  の最小性から容易に導かれる次の命題 1 を必要とする。

**命題 1**

閉路  $C \in \mathcal{C}$  に対して  $x \in V(H)$  が  $|N_C(x)| \geq 2$  を満たすとき  $|C| \leq 4$  である。また、 $|N_C(x)| = 3$  ならば  $|C| = 3$  である。

[補助定理 1 の証明]

条件より、

$$|N_C(x_1) \cup N_C(x_2)| + |N_C(x_1) \cup N_C(x_3)| + |N_C(x_2) \cup N_C(x_3)| \geq 3(2k-1) = 6k-3$$

であるから、

$$|N_C(x_1) \cup N_C(x_2)| + |N_C(x_1) \cup N_C(x_3)| + |N_C(x_2) \cup N_C(x_3)| \geq 7 \cdots (1)$$

を満たす閉路  $C \in \mathcal{C}$  が存在する。

これより、 $(x_1, x_2)$ ,  $(x_1, x_3)$ ,  $(x_2, x_3)$  の中で近傍和が 3 以上となるものが存在することがわかる。一般性を失うことなく  $(x_1, x_2)$  がこれに該当するものとしてよい。すなわち  $|N_C(x_1) \cup N_C(x_2)| \geq 3$  を満たす。さらにこれより、 $|N_C(x_1)| \geq 2$  としてよいので、命題 1 の前半より  $|C| \leq 4$  であることがわかる。よって  $2 \leq |N_C(x_1)| \leq 4$  である。

$|N_C(x_1)| = 2$  のとき

$x_1 = x_1$ ,  $x_j = x_2$  とおく。 $|N_C(x_1) \cup N_C(x_2)| \geq 3$  であるから、 $x_j$  は  $x_1$  の  $C$  上にある近傍とは異なる点  $z$  と隣接していることになる。このとき明らかに補助定理 1 の前半の主張は成り立っている。また  $|N_{H'}(z)| \geq 2$  とすると、連結成分数の最小性に矛盾するか、新たに閉路が 1 個できて  $k$  個の点素な閉路が構成される。よって補助定理 1 の後半の主張についても成り立つ。

$|N_C(x_1)| = 3$  のとき

このとき命題 1 の後半より、 $|C| = 3$  であることがわかる。(1) より  $x_2, x_3$  の少なくとも一方は  $C$  に近傍を持たなければいけない。ここでそのような点を  $x_2$  とし、 $x_1 = x_1$ ,  $x_j = x_2$  とおくと補助定理 1 の前半の主張は成り立ち、後半の主張についても同様に成り立つ。

$|N_C(x_1)| = 4$  のとき

このとき  $|C| = 4$  で、 $x_1$  が  $C$  のすべての点と隣接していることになる。よって triangle (長さ 3 の閉路) ができ、 $|C|$  の最小性に矛盾する。

以上より、補助定理 1 が証明された。□

補助定理 1 を使えば次の命題 2 が得られる。

**命題 2**

$H$  は孤立点を持っても高々 2 個である。

[証明]

$H$  が孤立点を 3 個以上持つとする。このとき補助定理 1 を使えば、連結成分数を少なくすることができ、 $H$  の連結成

分数が最小であることに矛盾する。よって命題 2 は成り立つ。□

ここでグラフ  $G$  の path(道)で non-branching path と呼ばれる新しい概念を導入する。non-branching path とは path  $v_1v_2\cdots v_p$  で  $|N_G(v_i)| \leq 2$ ,  $(1 \leq i \leq p)$  を満たすものである。また、 $G$  が木であるとき次数 1 の頂点を leaf と呼ぶ。

**補助定理 2**

$H$  は頂点数が 4 以上である 2 本の点素な non-branching path (ただし 1 本は  $H$  の leaf を端点に持つ)、または頂点数が 8 の non-branching path のどちらかを部分グラフとして持つ。

[証明]

$H$  に leaf を端点とする頂点数 8 の non-branching path が存在するならば補助定理 2 の主張を満たすので、 $H$  にはそのような path は存在しないと仮定してよい。

$\ell$  を path からなる連結成分に含まれない  $H$  の leaf の数とし、 $p$  を path からなる連結成分の数とする。 $|C|$  と  $H$  の連結成分数が最小であるという条件のもとで、 $\ell+p$  が最小になる  $H$  を選ぶ。ここで  $L$  を  $H$  の leaf の集合とし、path からなる連結成分からは 1 個の leaf を集めてきたものとする。このとき、 $|L| = \ell+p$  である。ここで、任意の leaf を端点を持つ non-branching path が存在することに注意する。

$\mathbf{v}$  は  $(v_1, v_2, \dots, v_{|G|})$  を成分に持つベクトルで、 $v_i$  が頂点数  $i$  の non-branching path に接続している  $L$  の leaf の数を表すものとする。このとき  $v_i = 0$ ,  $(i \geq 8)$  である。ここで  $\mathbf{v}$  の重さを次のように定義する。

$$wt(\mathbf{v}) = \sum_{i=1}^{|G|} v_i (1 - 2^{-i})$$

また、 $wt(\mathbf{v})$  が最小になるような  $H$  を選ぶ。

次に任意の  $i$  に対して  $v_i \leq 2$  であることを示す。

$v_i \geq 3$  であるならば、頂点数  $i$  の 3 本の non-branching path の端点に補助定理 1 を適用する。このとき、 $H' = (H - \{x_i\}) \cup \{z\}$  と  $C'$  ができ、 $wt(\mathbf{v}') < wt(\mathbf{v})$  となる。これは  $wt(\mathbf{v})$  の最小性に矛盾する。よって  $v_i \leq 2$  である。

$\sum_{i \geq 4} v_i \geq 2$  なら補助定理 2 は成り立つ。 $\sum_{i \geq 4} v_i = 1$  なら  $v_i \leq 2$  であるから、 $H$  には高々 7 個の leaf が存在することになり、 $\sum_{i \geq 4} v_i \leq 19$  である。 $\sum_{i \geq 4} v_i = 0$  なら上と同様な議論により、 $H$  には高々 6 個の leaf が存在することになり、 $\sum_{i \geq 4} v_i \leq 12$  である。

ここで補助定理 2 を証明するために次の補助定理 3 が必要になってくる。

**補助定理 3**

$H$  が頂点数 4 以上である 2 本の点素な non-branching path (ただし 1 本は  $H$  の leaf を端点に持つ) を部分グラフとして持たないとき、 $|V(H)| \geq 40$  である。

$H$  での次数が 3 以上である  $H$  の頂点集合を  $J$  とし、 $j = |J|$  とする。また、 $H$  の連結成分数を  $c$  とおく。 $J$  の点は  $H$  を

$$\begin{aligned} & c + \sum_{v \in J} (|N_G(v)| - 1) \\ &= c + j + \sum_{v \in J} (|N_G(v)| - 2) \\ &= j + \ell - c \end{aligned}$$

個の切片、すなわち non-branching path に分離する。ただし、 $J$  の点で隣接しているものがある場合には、non-branching path は空となる。

この  $j + \ell - c$  個の切片の中で、 $\ell + p$  個は  $L$  の点に接続しており、それらの切片を構成している点の総数は  $\sum_i i v_i$  である。よって残りの点は  $|V(H)| - 2 - j - \sum_i i v_i$  個以上となり、これらは  $j + \ell - c - (\ell + p) = j - c - p$  個の切片に含まれる。

$\sum_{i \geq 4} v_i = 1$  のとき

このとき  $0 \leq 7$  で  $\sum_i i v_i \leq 19$  である。補助定理 3 より  $|V(H)| \geq 40$  であるから  $H$  には頂点数が

$$\begin{aligned} & \left\lceil \frac{|H| - 2 - j - 19}{j - c - p} \right\rceil \\ & \geq \left\lceil \frac{|H| - 2 - (\ell - 2) - 19}{(\ell - 2) - c - p} \right\rceil \\ & \geq \left\lceil \frac{40 - 26}{4} \right\rceil \\ & = 4 \end{aligned}$$

以上である non-branching path が存在しなければならない。 $\sum_{i \geq 4} v_i = 1$  の場合を考えているから、 $H$  には頂点数が 4 以上で 2 本の点素な non-branching path (ただし 1 本は  $H$  の leaf を端点に持つ) が存在する。

$\sum_{i \geq 4} v_i = 0$  のとき

このとき  $0 \leq 6$  で  $\sum_i i v_i \leq 12$  である。補助定理 3 より  $|V(H)| \geq 40$  であるから  $H$  には頂点数が



$$\begin{aligned}
& \left\lceil \frac{|H| - 2 - j - 12}{j - c - p} \right\rceil \\
& \geq \left\lceil \frac{|H| - 2 - (\ell - 2) - 12}{(\ell - 2) - c - p} \right\rceil \\
& \geq \left\lceil \frac{40 - 18}{3} \right\rceil \\
& = 8
\end{aligned}$$

以上である non-branching path が存在しなければならない。従って、 $H$  には頂点数が 8 の non-branching path が存在する。

以上より、補助定理 2 が証明された。□

補助定理 3 を証明するために、次の補助定理 4 が必要となるが、ここで二つの閉路とそれらを結ぶ辺によって構成されるグラフを定義する。グラフ  $G(a, b, c, d)$  とは、頂点数が  $a$  の閉路  $C_1$  と頂点数が  $b$  の閉路  $C_2$  の和で、指定された  $C_c$ , ( $c \in \{1, 2\}$ ) 上に  $v_1$  と  $v_2$  は距離  $d$  で存在している。また、 $v_1$  は他方の閉路のすべての頂点と隣接し、 $v_2$  は他方の閉路の 1 頂点に隣接している。

また、閉路  $C$  に向きを付け、その向きに従って閉路の頂点を  $v_1, v_2, \dots, v_t$  と順序付ける。このとき  $v_i, v_j$  に対して  $i \leq j$  ならば  $v_i \leq v_j$  とし、 $i < j$  ならば  $v_i < v_j$  と表記する。 $v_i \leq v_j$  に対して  $(v_i, v_j)$ ,  $[v_i, v_j]$  をそれぞれ  $v_i$  から  $v_j$  への開区間、閉区間とし、 $[v_i, v_j] = [v_i, v_j] - \{v_j\}$ ,  $(v_i, v_j) = [v_i, v_j] - \{v_i\}$  とする。

#### 補助定理 4

閉路  $C_1, C_2$  は  $|C_1| + |C_2| \geq 7$  を満たし、 $C_1$  と  $C_2$  を結んでいる辺の集合を  $e(C_1, C_2)$  とする。 $|e(C_1, C_2)| \geq 9$  ならば、ある媒介変数  $c$ , ( $c \in \{1, 2\}$ ),  $d$  に対して  $C_1 \cup C_2 \cup e(C_1, C_2) \subseteq G(|C_1|, |C_2|, c, d)$ 、または二つの点素な閉路で、長さがより短い閉路が存在する。

[証明]

$|e(C_1, C_2)| > 9$  ならばちょうど 9 本からなる辺集合を考えればよいので、 $|e(C_1, C_2)| = 9$  としよ。  $v \in V(C_1)$  とするとき、 $|e(v, C_2)| \geq 8$  を示せばよい。ここで  $C_2$  に向きをつける。

$|e(v, C_2)| = 7$  のとき

$C_2$  の向きに沿って  $v$  の  $C_2$  上の近傍を  $x_1, x_2, \dots, x_7$  とし、 $x_1 < x_2 < \dots < x_7$  とする。 $|e(C_1, C_2)| = 9$  であるから  $C_1 - \{v\}$  から  $C_2$  へ 2 本の辺が出ており、 $C_2$  上の近傍を  $a_1, a_2$ , ( $a_1 \leq a_2$ ) とする。このとき  $x_1, x_2, \dots, x_7$  の中の 3 点以上が  $[a_1, a_2]$  の内外に存在する。どちらの場合においても、長さがより短い二つの点素な閉路を構成でき、 $|C|$  の最小性に矛盾する。

$1 \leq |e(v, C_2)| \leq 6$  の場合についても、 $|e(v, C_2)| = 7$  の場合と同様に証明でき、 $|e(v, C_2)| \geq 8$  であることがわかる。□

### 3. まとめ

今後は補助定理 3 の証明を行い、補助定理 2 よりグラフ  $H$  は頂点数が 4 以上である 2 本の点素な non-branching path (ただし 1 本は  $H$  の leaf を端点に持つ)、または頂点数が 8 の non-branching path のどちらかを部分グラフとして持つことがわかったので、これをもとに  $G$  には  $k$  個の点素な閉路が存在することを証明する。

### 参考文献

- [1] G. Chartrand and L. Lesniak, Graphs and Digraphs (Third Edition), Chapman & Hall, London (1996).
- [2] K. Corrádi and A. Hajnal, On the maximal number of independent circuits in a graph, Acta Math. Acad. Sci. Hungar. 14 (1963) 423-439.
- [3] P. Justesen, On independent circuits in finite graphs and a conjecture of Erdős and Pósa, Annals of Discrete Math. 41 (1989) 299-306.
- [4] H. Enomoto, On the existence of disjoint cycles in a graph, Combinatorica 18 (1998) 487-492.
- [5] H. Wang, On the maximum number of independent cycles in a graph, Discrete Math. 205 (1999) 183-190.
- [6] J. R. Faudree and R. J. Gould, A note on neighborhood unions and independent cycles, Ars Combinatoria 76 (2005) 29-31.

## 複数の分野の混成グループによるソフトウェア開発の方法論に関する検討

滝沢陽三, 小飼 敬

Study to Methodology for Software Development by a Group Composed of Experts in Various Fields

Yozo TAKIZAWA and Kei KOGAI

**Abstract:** In this paper, authors show their study for a software development methodology, which to solve a problem that consumers or users can not require nor hold their responsible for a system development appropriately. Authors quote results of their problem-based learning subject of curriculum to analysis the above problem. They propose a methodology to resolve the problem and further themes for a requirement analysis by a group composed of experts in various fields.

### 1. はじめに

ソフトウェア工学分野の長年の懸案事項のひとつに、コンピュータの専門家ではない顧客や業務担当者が、ソフトウェアもしくはコンピュータのシステム開発に適切な要望や責任を提供できないまま開発が進められてしまうことが多い、という問題がある。本稿は、本校専攻科学生対象の特別実験（プロジェクト実験）の成果を用いて、この問題を解決するための事例分析や開発手法の検討を報告する。

### 2. プロジェクト実験の概要

本校専攻科のカリキュラムには、平成15年から2年次の特別実験として『プロジェクト実験』が設けられている。これは、4つのコース（機械工学コース、電気電子工学コース、情報工学コース、応用化学コース）の学生による混成チームがひとつの実験に取り組み、プロジェクトとして協力しながら体験的に進めるものである。いわゆる Problem Based Learning (PBL) の一種であり、グループで課題を分析し、解決策を導き、報告書をまとめていく。PBL型学習は3年前より順次本科にも取り入れられている。

筆者らは平成16年よりプロジェクト実験を担当し、今年で7年目である。筆者らが提示している課題は一貫して『コンピュータ演習室システム開発演習』であり、演習室システムの提案・設計・検証をグループで進めていくものである。情報工学（コンピュータ）分野そのものを扱うテーマ設定はプログラミングを伴うものがあるため、他分野コースの学生にも関心がありアイデアや調査・検討を行いやすく、かつ、実社会で経験することが多くなってきた。コンピュータシステムの仕様策定をテーマに選んだ。また、情報工学コースの学生においても、ソフトウェア開発やコンピュータのシステムセットアップ（パーソナルコンピュータ）は本科で一通り講義・演習で学んでいるもの

の、システム全体の仕様策定の経験は模擬的にもなく、広い視点を養うためにも導入した次第である。

なお、プロジェクト実験の進捗としては、5~6人で構成されるひとつのグループが前期で3つのテーマを行い、ひとつのテーマを4週×5時間で進める。また、3つ目のテーマについては他のグループを交えた報告会において発表を行い、質疑応答が行われる。

### 3. コンピュータ演習室システム開発演習の内容

筆者らの実施するテーマは、本校で導入・運用されているクラス規模のコンピュータ演習室と同等のシステムについて技術仕様を策定し、仕様書としてまとめることである。ただし実際には、どのような演習室を構築するべきかといった、『要求者』側の立場での要求仕様策定も行う。

当初、このテーマを導入した初年度の際には、基本的な趣旨のみ学生グループに伝え、技術仕様書および進捗状況の報告を示す発表資料のみを最終成果物として提出することとしていた。したがって、グループでどのような形で進めるかは学生ら自身が決め、指導教員としての筆者らはアドバイスのみに留めていた。これは、PBLもしくはプロジェクト実験としては標準的なスタイルである。

ところが、前章で述べたように、情報工学分野はプログラミングや離散数学、コンピュータアーキテクチャなど、通常の工学分野とは基礎から異なる形式数学・数理科学の要素が多い。このため、他分野コースの学生は、コンピュータや演習室の利用経験はあるものの、演習室やコンピュータシステムがどのような原理で成り立っているか見当がつかない場合がある。グループによっては、プログラミング以前に、プログラムないしはソフトウェアの存在そのものが未知、という学生の方が多数派という状況も見られた。この場合、グループを構成する学生のうち1~2名のみが進行・発言・策定を進め、他の学生は実験時

間中何もしないに等しい、という結果を招く。評価の都合もあり、筆者らがアドバイス等で他の学生に演習への参加を促すが、上記の理由から、本格的な参加というわけにはいかないのが現状だった。結果、グループの成果物としては非常に技術的ではあるものの、システム全体としての統合性・有用性は大きく欠けたものとなる。すなわち、選定 PC や OS、アプリケーションソフトウェアなどの個々のレベルは非常に具体的な技術や構成を提案する一方、システム全体の目的や意図などは不明確のままとなった。

この問題は、ソフトウェア工学分野において長年の懸案事項である『顧客や業務担当者がコンピュータのシステム開発に十分な要望を反映させることができず、開発者側の推測のみで開発が進められてしまう』ケースが多い問題と同質である。他の工学分野は歴史が長いこともあり、その分野の技術に根ざしたシステムや製品は、普及が高ければ高いほど、専門家以外にも原理や本質に関する理解が広まっている。しかし、コンピュータを代表とした情報工学分野は歴史が浅い一方、応用システム・製品は急速に進んだため、日常生活や社会維持に深く関わっているにも関わらず、多くの人々にとってそれらの原理や本質が見えないという状況に陥っている。結果として、利用・活用でトラブルが絶えないだけでなく、開発現場においても利用者の要求と実現可能性が全く一致しない、というシーンがしばしば見られる。

このようなプロジェクト進行を改善するため、筆者らはグループ学生に実験開始冒頭で、次のような体制を進めることを提案し、実施させることにした。

- ・演習全体を 3 段階（要求定義、仕様策定、評価・修正）および報告書作成に分ける。成果物として、報告書の他、書記による議事録も提出する。
- ・各段階開始前に司会と書記を明確に決定すると共に、段階ごとに司会および書記を変更する（したがって、学生のいずれかは司会もしくは書記を経験する）。報告書作成は全員で行う。
- ・上記提案の後に、校内 7 か所の演習・PC 設備を見学する。筆者らによる特徴の解説等も各演習室にて行い、演習室システムへの理解を深める。

上記の体制で進めた結果、完全ではないものの、ほとんどのグループにおいて、学生のほぼ全員が議論や資料作成に自ら関わらなくなった。また、演習結果として策定される仕様等も統一がとれ、システムの意義や目的が見えやすいものとなった。いくつか課題が残っているものの、初期のグループ開発としての諸問題は解決されていると考えている。

#### 4. 演習結果の分析および議論

本章では、演習の実施体制および結果について、ソフトウェア開発方法論の観点で分析を行う。

##### 4. 1 手法・手順の分析・議論

前章で述べた演習の実施体制は、従来のウォーターフォールモデルを踏まえたものである。ウォーターフォールモデルは原則として各段階から前段階に戻ることはなく、いわゆるベルトコンベアを用いた製品の製造過程と同じ形で進められる。このウォーターフォールモデルの利点は、後の段階の担当者が前段階に含まれた不具合を解消する責任をもたないことが前提であるため、結果として各段階の担当者の責任が増し、最終成果物はより厳密なものとなる。欠点は、各段階の成果物に完全性が求められるため、開発全体の時間がかかることである。また、各段階で仕様や設計が確定すると後の段階での変更は一切ないため、開発途中で発見された新技術を積極的に取り入れることが不可能に近い。これらの特徴から、ウォーターフォールモデルの開発体制は、(宇宙開発事業などの)大規模かつ安全性を求められるシステムの分野で採用される傾向がある。

演習室システムは、仕様策定の段階において考慮すべきシステムの・技術的事柄が多く、一般的には大規模なものとなる。したがって、ウォーターフォールモデルに沿った策定を進めることが有用である。しかし、学生としては個々の PC としての利用経験しかないことが多く、演習室システムはその単なる集合体として見てしまいがちである。このままの認識では、ウォーターフォールモデルに沿った開発の必要性が感じられず、個人的な活動としての仕様策定に陥り、具体的な技術や構成のみを提案すると考えられる（その結果の一例として、ハブなどのネットワーク機器の存在に気づかないまま、ファイル共有機能を提案するといったことが見られた）。このことから、事前の設備見学と、各段階の責任分担は、大規模システムの開発に対するウォーターフォールモデルの必要性を認識する大きな助けとなっていると考えられる。

逆に、上記の事柄は、顧客や利用者が要望を反映できない・しにくい背景とも考えられる。学生による開発演習の結果を踏まえた提案として、設備見学や各段階の責任分担に相当する部分も、開発工程の一部として確立する必要があると思われる。具体的には、一般的に個別かつ任意の活動として捉えられている、顧客や利用者などによる既存設備等の事前の視察や研修内容を、分野ごとに整理・体系付けた上で、特定業務のシステム仕様策定にダイレクトに結び付けるモデルおよび事例データの蓄積手法の開発が考えられる。特定業務の既存システムの開放が求められるため、最新技術を用いる業務に対しては実現が難しいが、今回のような演習室システムや、Web サーバを用いたアプリケーションサーバの構築といった事例は広く知られており<sup>1)</sup>、そのような分野からの整理・確立が可能と思われる。

##### 4. 2 演習結果の分析・議論

ここでは、最近の演習結果として、平成 18 年度から平成 21 年度までの 4 年間×3 グループの計 12 の例を基に整理を試み、傾向や性質を概観する。なお、演習結果は、報告書・発表資料

としてプレゼンテーション（スライド）形式のもの（図1）が提出される他、筆者らによって指定した形式によって記載する議事録（図2）が別途存在する。特別実験の評価対象資料としてはこの2つを共に用いており、報告書・発表資料をレポートの内容評価として、議事録を取り組み状況とグループディスカッションでの発言状況の評価の一部として扱っている。ただし、司会を担当したか議事録を担当したかによって学生個別の評価は変えておらず、個別評価は主に、プロジェクトへの参加状況の直接観察によって行っている。

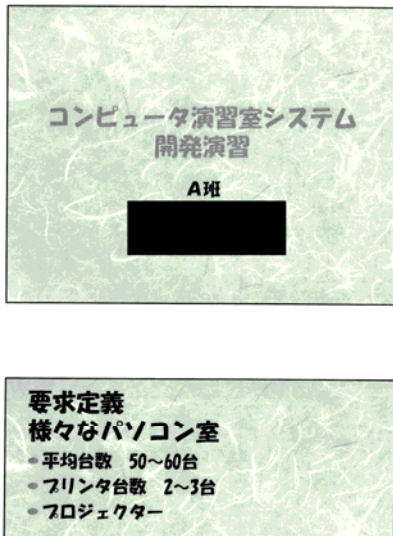


図1 報告書・発表資料の例（学生の氏名は黒塗り）

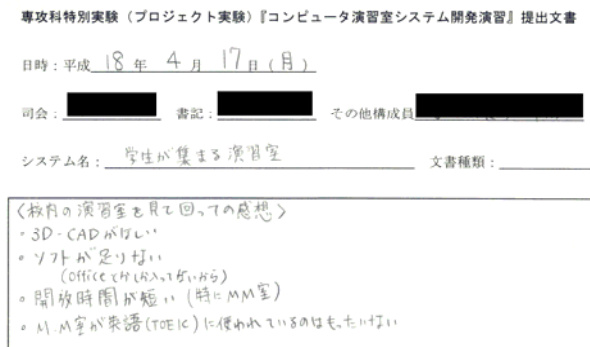


図2 議事録の例（学生の氏名は黒塗り）

議事録については、大まかな形式を指摘していることもあり、どの班も概ね同様の内容・記述量となっている（各段階A4で1～2ページ程度）。この議事録は、最終的な報告書・発表資料の基ともなっており、前節の実施体制を維持するための手法としても効果的であると判断される。

報告書・発表資料については、各班で内容の傾向や記載量に大きな違いが見られた。特に、内容の傾向として『どの段階を特に注目しているか』を整理したところ、初期提案段階は6例（50%）、設計段階は3例（25%）、評価・修正段階は3例（25%）

という結果となった。いかに要望を適切に認識して取り入れたか、という観点では、初期提案段階に重点を置くべきであり、この傾向自体は問題ないと思われる。

報告・発表内容として具体的な設計や評価・修正を強調する場合、最初の設備見学の結果の整理を簡易にまとめすぎており、演習室を自明なものとして捉えている感がある。また、筆者らは必ず『システム名』を付けるようアドバイスしているが、この際にも安易なネーミングを行う様子が見られる。これらは、先入観による設計・開発をもたらすことがあるため、前節の議論も踏まえ、見学結果の整理に時間をかけるよう誘導する必要があると思われる。

評価・修正段階を強調するケースは、費用規模の算出に時間をかけ過ぎている様子が見られる。筆者らは、評価の基準のひとつとして、設計結果に基づいた各種備品の大きな価格調査を行い、費用規模を算出するよう指示している。評価の基準としては、策定システムが初期提案段階の結果にどの程度即しているかも提示しているが、Web等を用いて調査を行う費用規模算出は手間がかかることから、より強く意識してしまう班が出てしまったと考えられる。費用の算出は、現実的な理由で重要な要素ではあるが、費用規模を意識してシステム設計の段階から縮小傾向となり、初期提案を無理に修正するような例も見られた。プロジェクトとして進める上での今後の大きな課題のひとつとなるだろう。

#### 4.3 その他

筆者のひとりが別の高専に在籍している間に、本実験と同様の内容を、週1時間×15週で実施した経験がある。しかしこのケースは、プロジェクトの進捗状況が出席率と大きく連動してしまい、班によっては、プロジェクトそのものが破たんしてしまっている。プロジェクトの規模と、かける時間の分配の問題についても、今後の課題のひとつである。

なお、最近の情報工学分野についても大きな変化があり、その変化に伴う対応も必要と考えられる。これは、たとえば情報工学コースの学生であっても、具体的な技術や原理ではなく、業界の製品トレンドを中心としたコンピュータ観、システム観をもっているケースがある。このような場合、他分野の学生と共に、表面的なシステム提案のみを行うことがあり、開発演習の本質を損なう可能性が高い。現時点では筆者らのアドバイスで『軌道修正』を行っているが、このような状況をカバーする手法も開発しなければならないだろう。

#### 5. まとめ

筆者らのプロジェクト実験の結果を基に、より効果的なシステム開発方法論を考察・見当した。課題がいくつか残されており、更なる分析・議論を進める必要がある。また、今回紹介・提案した方法論を更に整理した上で、別の開発事例に試用する

ことで、実用性の確認等も行わなければならないだろう。

#### 参考文献

- 1) 滝沢, 小飼, 他: 安価な PC を用いたアプライアンス指向サーバの構築と運用, 茨城工業高等専門学校研究彙報第 41 号 (2006).



# ディスクレスによるプログラミング演習室システムの構築

滝沢陽三, 小飼 敬, 山田 真

## Construction of Diskless System for Programming Laboratory

Yozo TAKIZAWA, Kei KOGAI, and Makoto YAMADA

**Abstract:** Authors has constructed a sample diskless system for one of laboratories of the Information Processing Center at 2009. In this paper, they describe about introducing a practical system based on the sample system to the laboratory at 2010, keeping both of maintainability and augmentability. Firstly outlines of the sample system are described with history of the laboratory. Secondly policies and designs of the system are showed. Thirdly they report some problems of the new system and show solutions for them. Finally perspectives of further maintainability are described.

### 1. はじめに

筆者らは平成21年度において、ディスクレスシステムの技術を用いて試作したプログラミング演習室（情報工学演習室）システムについて、試作の経緯やシステム運用に関する諸問題について報告・議論した<sup>23)</sup>。本論文では、この試作結果を基に進めた導入結果を報告する。導入の方針や構成の詳細<sup>1)</sup>をあらためて述べると共に、導入後に行った調整や課題についても併せて報告・議論する。

### 2. 情報工学演習室システムの更新経緯

本校情報処理センター管轄演習室のひとつである情報工学演習室は、導入当初より一貫してプログラミング演習の目的に特化している。基盤ソフトウェアであるオペレーティングシステム（OS）においても、教育・研究用として長らく利用されているUNIX系OSを用いている。平成9年頃より、カーネルや主要アプリケーションプログラムの多くがフリーソフトウェアとして提供されているLinux系OSを導入しており、予算削減につながると同時に、演習や実験に即したカスタマイズも適宜行ってきた。

平成15年度より、クライアントマシンがOSの全てをネットワーク共有するディスクレスシステムを採用している。これは、個々のクライアントマシンがハードディスクにインストールされたソフトウェアに依存させないようにすることで、ディスク障害や利用者による操作ミスによる不具合のほとんどを解消する仕組みである。これにより、アプリケーションソフトウェアの追加も容易となった。

ディスクレスシステムの問題点としては、メモリ上に仮想ディスクを用意する必要があるため、各クライアントマシンは相応のメモリ容量が必要とされていることである。また、当然な

がら、ソフトウェア機能のほとんどをネットワーク共有するため、クライアント・サーバマシンはもちろん、それらをつなぐハブなどのネットワーク機器も、十分なネットワーク容量と機能を有していなければならない。なお、ソフトウェアは全てネットワーク共有可能なライセンスでなければならないが、全てフリーソフトウェア（オープンソースソフトウェア）であることを確認しており、この問題は発生していない。

平成15年度に導入されたシステムは、業者によって製作・販売されたシン・クライアントを用いていた（図1）。シン・クライアントは通常、必要最低限の機能のみを処理するものとして提供されているが、このシステムにおいては、一般的なPCハードウェアにハードディスクが備わっていない、ネットブート機能を有したものとして利用していた。Windowsをベースとしたディスクレスシステムにおける利用も想定していたものだったため、Windowsに比べて軽量である当時のUNIX系OS（VineLinux）は極めて快適に稼働していた。



図1 業者製シン・クライアント（旧システム）

上記システムには機能面・性能面の問題はなかったが、クライアント側のシステム機能（カーネルなど）を含めて業者による一括導入だったため、5年のリース期間においてOSのバージョンアップ等が難しく、特に、変化の激しいネットワーク分野への対応（Webブラウザなどのメジャーバージョンアップなど）が問題となっていた。そこで、次期システムは安価な汎用PCハードウェアを導入し、ソフトウェア部分は本校の教職員で独自に構築することにした。これにより、更なる予算の削減も期待された。



図2 新システムのクライアントマシン(上)およびサーバマシン(下)の外観

### 3. 試作システムの概要

旧システムのリース終了に合わせ、新システムのハードウェアは平成20年度中に行われた。導入したクライアントおよびサーバマシンの外観およびスペック概要をそれぞれ図2、表1に示す。

上記システムにより、平成21年度中に試作を行った。試作の方針・概要は次の通りである。

表1 新システムのハードウェアスペック概要

| サーバマシン（ブートサーバ、ファイルサーバ）         |                      |     |            |
|--------------------------------|----------------------|-----|------------|
| FUJITSU PRIMERGY ECONEL 100 S2 |                      |     |            |
| CPU                            | Intel Xeon 3GHz      | その他 | 100BASE-TX |
| メモリ                            | 2GB                  |     | 1000BASE-T |
| HDD                            | 500GB                |     | Ethernet   |
| クライアントマシン（47台、予備機除く）           |                      |     |            |
| FUJITSU FMV ESPRIMO D5270      |                      |     |            |
| CPU                            | Intel Celeron 1.8GHz | その他 | 100BASE-TX |
| メモリ                            | 1GB                  |     | Ethernet   |
| HDD                            |                      |     | (PXE 対応)   |

まず、クライアント用OSとしてLinux系OSのUbuntu 9.10 Desktopを用いた。これは、LiveCDと呼ばれる、CDからのOS起動が可能なシステムが、ネットワーク経由のブートにも比較的容易に対応できるためである。この試作システムでは、クライアントマシン全台数がネットワーク経由でLiveCDイメージを起動・稼働させることができるかの検証を主目的とした。

次にサーバ側は、通常のネットワークブートと同様の仕組みを用意した。すなわち、次のような機能である。

- ・DHCP/TFTPサーバ機能：クライアントマシンのネットワークブート機能であるPXEからの要求に従い、IPアドレスの割当て、初期ブートプログラムであるPXELinuxを転送する機能を提供する。PXELinuxは、読み込まれた後にあらためてDHCPによりIPアドレスを取得し、TFTPによってLinuxカーネルと初期メモリディスクイメージ（initrd）を読み込み、Linuxカーネルに制御を移す。

- ・NFS機能：制御を移されたLinuxカーネルは、あらためてDHCPサーバを参照してIPアドレスを取得し、PXELinux起動時に指定された情報に従い、ファイルシステム全体を参照する。ここでは、ファイルシステムのネットワーク機能であるNFSによって、LiveCDイメージ全体をファイルシステムとして共有する。なお、LiveCDイメージはSquashFSと呼ばれる読込専用の圧縮ファイルシステムで提供されており、これをシステムファイルとして参照する。

ここまでの構築および設定を行って稼働させたところ、デスクトップ環境が利用できるまでの起動時間や、起動後の操作に関しては問題ないことが確認できた。一方、この時のネットワーク機能は、従来の100MbpsのEthernetおよびスイッチングハブをそのまま使用した。

### 4. 新システムの構築

#### 4.1 初期の構築システム

試作システムの確認を踏まえ、平成21年度末に新システムの構築を行った。その内容は次の通り。

- ・DHCP/TFTP サーバ機能は、試作システムのブートサーバをそのまま用いた。

- ・ユーザ認証およびファイル共有システムは、旧システムのNIS/NFS サーバをそのまま用いた。NISは、UNIX系OSで従来から利用されているユーザ認証のネットワーク共有システムである。NFSサーバとしては各ユーザのホームディレクトリや/usr/local/などの共有ファイルディレクトリがあった。したがって、ユーザ固有の情報やデータは、旧システムに特に手を加えず移行することとした。

- ・ファイルシステムイメージは、ブートサーバ上で稼働する仮想マシンVMware PlayerにあらためてUbuntu Desktopをインストールしたものから、モデルマシンとして生成した。LiveCDと異なり、NISによるユーザ認証が必要なため、NISクライアントを組み込むと共に、起動時にはログイン画面を表示させるようにした。

なお、ファイルシステムイメージをVMware上で作成したのは、ブートサーバ上で必要に応じて仮想マシンを起動し、パッケージや諸設定の追加・削除を行った後、SquashFSイメージファイルを作り直してそのまま共有させることが可能なためである。このことも想定し、ブートサーバは試作システムの段階から、クライアントOSと同じUbuntuを用いている。

#### 4.2 システムイメージ共有サーバの再構築

前節のように構築したシステムだったが、デスクトップ環境を中心にOS全体の規模が試作システムや旧システムよりも大きくなったため、ネットワーク負荷が増大し、実用的な利用に耐えられない状況となった。具体的には、一定台数（およそ15台）以上のクライアントマシンを一斉起動すると、ログイン画面が表示されるまで10分以上かかる事態となった。

この問題を解消するため、Ubuntuを用いたNFSサーバを別途用意し、ファイルシステムイメージを共有する専用サーバとした。また、このNFSサーバを、スイッチングハブの1000BASE-Tポートに接続し、各クライアントマシンには同じスイッチングハブの100BASE-TX経由で利用するようにした。これにより、旧システムとはほぼ同じ起動時間を実現した（全台数を同時に起動してもログイン画面が出るまで1分程度）。なお、演習室で使用しているスイッチングハブは、校内情報ネットワーク（校内LAN）の一部として機能するギガビットネットワークのエッジスイッチであり、1000BASE-Tまたは1000BASE-SXのどちらかを利用できるポート4つが備わっている。そのうち2つはセンタースイッチへのアップリンク用として1000BASE-SXで使用しており、今回、残りの2つを演習室と同セグメントに属すようVLANの設定を変更した。

ブートプログラム起動のためのDHCP/TFTPサーバは、カーネルおよび初期メモリディスクイメージ読み込み時の負荷がほとんどかからないことを確認できたため、試作システムのままとしている。

#### 4.3 ファイル共有サーバの新規構築

前節までの調整で、C言語プログラミングの演習を行う程度であれば、特に問題なく利用できるようになった。しかし、WebブラウザやGUIをもつ統合開発環境などを一斉起動すると、各ユーザのホームディレクトリへの設定情報およびキャッシュの読み書きが頻繁に行われることになり、ファイル共有サーバに多大な負荷がかかる現象が見られた。特に、大きな負荷がかかった後のNFSサーバプログラムは使用後もファイル情報のある程度保持しつづけるため、利用が続くにつれて処理が滞るようになった。この場合、初期ブート時にも不具合を起こしてしまう状況となる。旧システムでもWebブラウザ（Mozilla）は利用していたが、Flash Playerにも未対応の6年以上前のシステムであり、ファイルシステムへの負荷は少なかったとみられる。

そこで、ファイル共有サーバも新規に構築すると共に、前節のNFSサーバと同様に、1000BASE-Tポートに接続して利用することにした。なお、OSはNetBSD/i386を使用した。これは、Linux系パッケージに比べてOSの基本パッケージを必要最低限のみインストールすることが比較的楽であり、負荷が集中する単機能サーバには適していると判断したためである。なお、念のため、NFSサーバプログラムは夜間などに自動的に再起動することにより、ファイル情報保持に関して定期的にリセットをかけるようにしている。また、旧システムのファイル共有サーバで稼働させていたNISサーバ機能はブートサーバで稼働・共有させることとした。

新規ファイル共有サーバの外観を図3に、ハードウェアスペックの概要を表2に示す。また、システムの見終構成を図4に示す。なお、図4中の各サーバのjokoXXはホスト名、NISサブドメイン名およびNISドメイン名はjk.ibaraki-ct.ac.jp、IPアドレスは172.16.206.0/24の8ビットセグメント空間を用いている。

#### 4.4 その他の調整

各ユーザによるWebブラウザのキャッシュ機能およびファイルダウンロードの一時保存は、ファイル共有サーバに多大な負荷をかけるため、メモリディスク上に保存するようにし、OSのシャットダウン時に消去されるようにした。具体的には、Ubuntuの/tmp以下が標準でメモリディスク上に割り当てられるようになっているため、Mozilla FirefoxなどのWebブラウザのシステム設定において、キャッシュ等が/tmp以下に保存されるようにした。

なお、軽快な動作で知られるGoogle Chromeも試用した。しかし、ひとつのタブごとにひとつのプロセスを作るなど、CPUおよびメモリを効率良く活用するよう設計されており、結果として、ホームディレクトリに複数の種類のキャッシュ処理等を行うことが確認された。メモリディスク上でキャッシュ処理等を行わせるにはユーザ個々の設定が必要なおも、標準ブラウザとしての採用は見送っている。



図3 新規ファイル共有サーバの概観

表2 新規ファイル共有サーバのハードウェアスペック概要

|                 |                    |     |            |
|-----------------|--------------------|-----|------------|
| DELL Vostro 430 |                    |     |            |
| CPU             | Intel Core 2.66GHz | その他 | 100BASE-TX |
| メモリ             | 3GB                |     | 1000BASE-T |
| HDD             | 320GB              |     | Ethernet   |

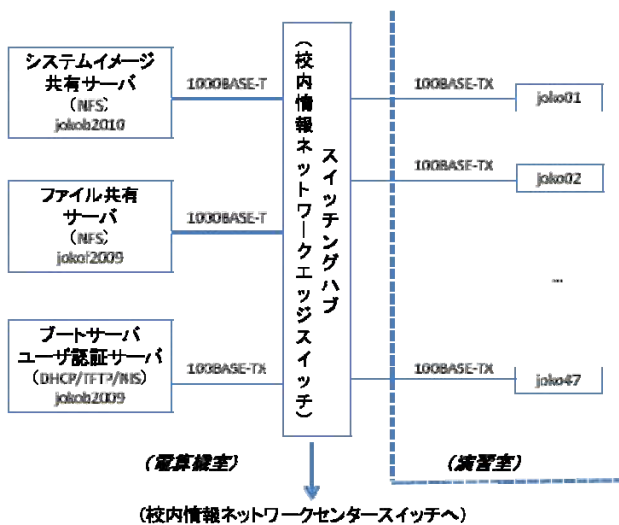


図4 構築システムの構成概観

クライアント OS として利用した Ubuntu は、Windows と同様の高機能なユーザインタフェースと操作環境をもつため、Web ブラウザ同様、各ユーザのホームディレクトリに設定ファイル変更やキャッシュ情報のための読み書きを頻繁に行う。操作環境に関連する様々なツールも自動インストールされるため、結果としてシステムイメージファイルを巨大にしている（執筆時点での SquashFS の大きさが約 1.2GB）。LiveCD 用が 680MB であることから、アプリケーションのインストール内容の大幅な見直しが必要と考えられる。あるいは、ネットワークブートおよび SquashFS によるシステム共有はどの Linux パッケージでも利用できることから、Debian GNU/Linux (Ubuntu の基盤となっている Linux パッケージ) などの、より軽量なパッケージを利用した再構築が挙げられる。

また、今後のパッケージ規模の拡大は避けられないものと捉え、クライアントマシンに対してもギガビットイーサネットの環境を提供することを考えていかなければならないと思われる。この問題は、今後の校内情報ネットワークの更新状況に併せて検討していきたい。

参考文献

- 1) 滝沢, 小飼, 山田: ディスクレスによるプログラミング演習室システムの構築, 第30回高等専門学校情報処理教育研究発表会講演論文集(2010).
- 2) 滝沢, 小飼, 山田: ディスクレスによるプログラミング演習室システムの開発, 茨城工業高等専門学校研究彙報 45 (2010).
- 3) 滝沢, 他: ディスクレスによるプログラミング演習室システムの運用, 第29回高等専門学校情報処理教育研究発表会講演論文集(2009).
- 4) The Syslinux Project, <http://syslinux.zytor.com/>.
- 5) Diskless NetBSD HOW-TO, <http://www.netbsd.org/docs/network/netboot/>

5. 今後の課題



アミン・BF<sub>3</sub>付加物の熱分解をキーステップとしたポルフィンの新規合成法の開拓

蝦名 不二夫、瀬田 敬太、佐藤 稔、小松崎 秀人、金谷 奨武、飯野 晃次、市毛 達郎、渡辺 尚美

The New Approach to Porphine Synthesis Using the Pyrolysis of Amine-BF<sub>3</sub> Adducts as Key StepFujio EBINA, Keita SEDA, Minoru SATOH, Hidehito KOMATSUZAKI, Susumu KANAYA, Koji IINO, Tatsu-roh ICHIGE,  
and Naomi WATANABE

**Abstract:** Three new approaches have been developed for the porphine synthesis. The first one is the modification of Lindsey method, in which 1:1:1 mixture of pyrrole, Schiff's base of formaldehyde, and BF<sub>3</sub> diethyl etherate was refluxed in chloroform under Ar atmosphere for 6 hrs, then the reaction mixture was oxidized by chloranil, and the final purification was carried out with silica gel chromatograph. The porphine yield was 4 ~ 5 %. In the second one, mono-functional Mannich base of pyrrole and the BF<sub>3</sub> etherate were used as the starting materials, and by the same treatment as in the first one, 5 ~ 6 % of porphine yield was obtained after the reaction for 48 hrs. The third one is the reaction among di-functional Mannich base, pyrrole, and the BF<sub>3</sub> etherate, and gave 5 ~ 6 % of porphine yield, the shortening of the reaction time to 24 hrs being observed. These three approaches seem to involve the same pyrolysis process of amine-BF<sub>3</sub> adduct as key step.

## 1. はじめに

## 1-1 ポルフィン及びその合成法の概要

ポルフィンは、生体機能性化合物であるポルフィリン類の基本骨格であるポルフィリン環そのものであり、無置換のポルフィリン、すなわち最も単純なポルフィリンである。しかしながら、その合成は、構造が単純であるにもかかわらず、ポルフィリン合成の中でも最も難しいものの1つに数えられている。恐らく、これは、反応の途中過程で、所望の反応とは別の副反応や重合反応が多くは無置換部を起点に進行しやすいといったことが考えられる。

これまでに報告されているポルフィン合成法をまとめると、ポルフィンの合成に初めて成功したのは、ヘミンとクロフィルの構造に関する研究でノーベル化学賞を受けた Fischer である。彼らは、2-ホルミルピロールをギ酸中で加熱還流して 0.026% の収率でポルフィンを得ている<sup>1)</sup>。同年、Rothenmund は、ピロールとホルムアルデヒドのメタノール溶液を少量のピリジンとともに封管中で加熱して 0.021% の収率でポルフィンを合成している<sup>2)</sup>。その後、Krol や Longo らにより、 $\alpha$  位にヒドロキシメチル基やジメチルアミノメチル基を持ったピロールを原料とする合成法がいくつか報告されているが、収率は数%前後のようである<sup>3,4)</sup>。それから数十年後の 1993 年に根矢らは、ピロールとホルムアルデヒドから収率はわずか 0.9% であるけれども、一度にポルフィン 100 mg 以上合成できる方法を報告している<sup>5)</sup>。また、谷口らは、トリピランと 2,5-ビス(ヒドロキシメ

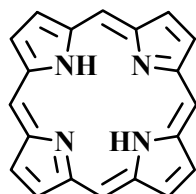


図1 ポルフィンの構造

チル)ピロールから 30% の高収率でポルフィンを得る精巧な合成法を考案している<sup>6)</sup>。しかしながら、出発物質である 2,5-ビス(ヒドロキシメチル)ピロールは非常に不安定な物質であり、取り扱いに高度な技術を要するので、簡便な合成法とは言い難い面がある。さらに近年、根矢らはポルフィリン周縁部の置換基を脱離させることによって、極めて高収率 (64~77%) なポルフィン合成法を立て続けに報告している<sup>7)</sup>。しかし、それらの内容を詳細に検討すると出発物質や中間体に低収率あるいは不安定なものを使用しているため、総収率はやはり低収率になってしまい、やはり実用的な合成法とは言い難い。

このようにポルフィン合成法の歴史を振り返ってみると、いかにポルフィンの合成が難しいかがよくわかる。

## 1-2 ポルフィンを出発とするポルフィリン合成法

芳香族有機化合物の代表であるベンゼンには、Friedel-Crafts 反応などの求電子置換反応を用いてアルキル基、アシル基、ハロゲン基、ニトロ基、スルホン基などの多様な官能基が容易に導入できるように、ポルフィンにも求電子置換反応を用いて様々な官能基を導入できる可能性は大きい<sup>7b)</sup>。

近年、このポルフィンを出発物質とするポルフィリン合成は、従来のピロールとアルデヒドの縮合反応による方法と比べて得られるポルフィリン収率が飛躍的に向上することや、従来法では困難とされていた一置換あるいは二置換体のポルフィリンも高収率で合成可能であることが報告されている。

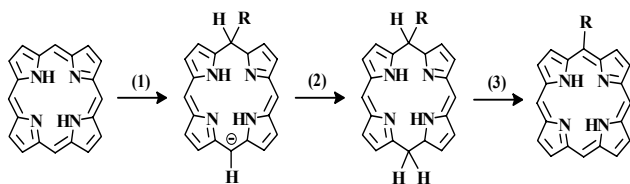
例えば、Wheelhouse らは<sup>8)</sup>、ポルフィンをポルフィンマグネシウム錯体に誘導し、N-ブromoアセトアミドを用いて 5,10,15,20-テトラブromポルフィリンマグネシウム錯体と



した後、パラジウム触媒の存在下で、アリアルボロン酸またはヘテロアリアルボロン酸を用いて鈴木・宮浦クロスカップリング反応<sup>9)</sup>を行うことで、5,10,15,20-テトラアリアル(またはヘテロアリアル)ポルフィリンが高収率で合成可能であることを報告している。

また、Senge らは、 $-78^{\circ}\text{C}$ の条件下でポルフィンに有機リチウム試薬の求核付加、水による加水分解ならびに2,3-ジクロロ-5,6-ジシアノ-*p*-ベンズキノン(DDQ)による酸化というプロセスで5,10-二置換ポルフィリンを高収率で合成可能であることを報告している<sup>10)</sup>。この反応(Scheme 1)では、初めに有機リチウム試薬の求核攻撃により、向かい側の *meso*-位が負電荷に帯電したポルフィリンアニオン中間体が生成する(1)。次いで、水による加水分解で5,15-ジヒドロポルフィリンとなり(2)、最後にDDQにより *meso*-位(5および15-位)が酸化されて、5-置換ポルフィリンを与える(3)。また、同様の反応をもう一度繰り返すと、目的の5,10-二置換ポルフィリンが得られる。

**Scheme 1** ポルフィンを出発とする新規ポルフィリン合成法



**Reaction conditions:** (1) LiR (R = phenyl or *n*-hexyl), THF,  $-78^{\circ}\text{C}$ ; (2)  $\text{H}_2\text{O}$ ; (3) DDQ.

このように、最近ではポルフィンを出発とするポルフィリン合成法も報告され出し、ポルフィリン合成の未開拓分野にも徐々に手が付けられ始めたが、依然として残る問題は出発物質であるポルフィンの簡便な合成法の確立である。

そこで、本研究では、ポルフィリン化学のさらなる発展を目指し、新たなポルフィンの簡便・高効率な合成法の開拓を試みたので、その結果を報告する。

## 2. 実験及び結果と考察

### 2-1 ホルムアルデヒドのSchiff塩基を用いたポルフィン合成(合成系I)

ポルフィンとはピロールとホルムアルデヒドが縮合・環化したものであるため、単純に考えると、テトラフェニルポルフィリン(TPP)合成(Adler-Longo法<sup>11)</sup>)のようにピロールとホルムアルデヒドを酸触媒下で反応させれば得られるはずである。実際、根矢らはこの観点から合成を試みているが、結果は0.9%と低収率であった<sup>5)</sup>。

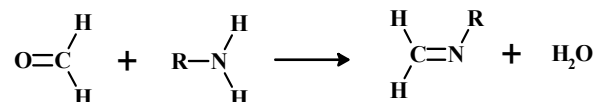
一方、Lindsey らは、1986年より立体障害の大きなフェニル側鎖を有するTPP誘導体の新たな合成法を考案し、報告している<sup>12)</sup>。これは、室温でピロールと芳香族アルデヒドをジクロロメタンに溶かし、これに不活性ガス雰囲気下で酸触媒として三フッ化ホウ素を加えてポルフィリノーグ

ンをつくり、次に *p*-クロラニルのような穏やかな酸化剤を加えてTPP誘導体を得るものである。この方法は、低濃度合成ながら、従来のTPP合成法では無理であった立体障害の大きい置換基を有するTPP誘導体を比較的良好な収率で合成可能にし、Adler-Longo法の欠点を補うものであった。そこで、このLindsey法をポルフィン合成に応用できないか検討することにした。

ポルフィン合成にLindsey法を適用する場合、深刻な問題になるのがアルデヒド源であるホルムアルデヒド自体のことである。ホルムアルデヒドは室温で刺激性の気体であり、通常はホルマリンとして水溶液で市販されている。しかしながら、その水溶液のまま反応に使用すると、水と三フッ化ホウ素が反応して $\text{H}^+$ を放出し、単なるプロトン酸による反応になってしまう。また、ホルムアルデヒドは重合してパラホルムアルデヒドになりやすく、気体のままでの使用にも難がある。残る解決策は、ホルムアルデヒドを脂溶性の等価体に変換することである。それ故、脂溶性の等価体としてホルムアルデヒドのアセタールやSchiff塩基を候補に上げ、Lindsey法の手法により、ポルフィン合成を試みた。しかしながら、この時点では、まったくポルフィンの生成は確認されなかったため、室温ではなく、高温での反応を試みるために反応溶媒をクロロホルムに変え、クロロホルム還流下で再度反応を試みた。その結果、Schiff塩基を用いた場合にポルフィンの生成を確認したので、この反応系を**合成系I**として、本格的に検討することにした。

Schiff塩基を用いたポルフィン合成の手順は次のとおりである。まず、出発物質のSchiff塩基の調製(Scheme 2)は、37%ホルムアルデヒド水溶液(ホルマリン)と各種アミンを直接反応させ、生成したSchiff塩基をクロロホルムで抽出し、精製することにより行った。また、目的物の同定は $^1\text{H}$  NMR (90 MHz,  $\text{CDCl}_3$ )で行った。

**Scheme 2** ホルムアルデヒドのSchiff塩基反応



次にポルフィン合成であるが、主管に流動パラフィンシールとつないだジムロート冷却管を、一方の側管にアルゴンガス導入管を、もう一方の側管にゴムセパタムを装備した三口フラスコに、市販のクロロホルム(含1%エタノール)、攪拌子、先に合成した各種Schiff塩基を入れ、約1時間アルゴン置換した。次に、オイルバスの温度を上げて反応溶液を還流状態にし、 $\text{BF}_3\text{-OEt}_2$ 、ピロールの順にマイクロシリンジでゴムセパタムから注入した。その後、反応の全容を明らかにするために反応の経時変化を追跡した。一定時間毎に、シリンジで反応溶液を一定量採取し、それに *p*-クロラニルを加え、 $70^{\circ}\text{C}$ で約30分間還流し、図2に示したような後処理を行って、吸収スペクトルによりポルフィン収率を見積った。

表1に各種Schiff塩基を用いたポルフィン合成の結果を

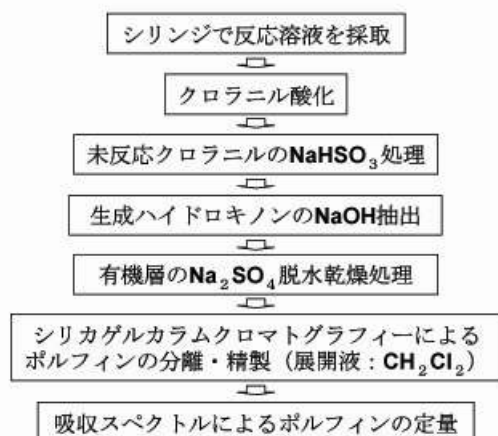


図2 合成系 I の後処理プロセス

示す。表1からわかるように、*N*-ベンジルメタンイミンを用いた合成系が反応完結時間も短く、良好なポルフィン収率を示すのに対し、*N-tert*-ブチルメタンイミンを用いた合成系は、反応中間体がフラスコの内壁に析出してしまふなどの問題が発生した上に、収率も低く、反応完結時間が長いことが判明した。これは Schiff 塩基側鎖にフェニル基のような電子吸引基を有すると、収率も良く、反応完結時間も短いことを示している。また、*N*-ベンズヒドリルメタンイミンは、好結果を示した *N*-ベンジルメタンイミンにフェニル基が1つ多くついた構造をしているので、ポルフィン収率の増加を期待したが、結果は2~3%と低収率であった。これは Schiff 塩基側鎖に電子吸引基であるフェニル基を2つ有するため、窒素原子上の非共有電子対の電子密度が減少し、Lewis 酸である三フッ化ホウ素へと配位しにくくなったためであると考えられる。したがって、合成系 I では *N*-ベンジルメタンイミンを用いた合成系が最も良好なポルフィン合成系であることが判明した。

Scheme 3 Schiff 塩基とピロールを用いたポルフィン合成法の予想反応機構

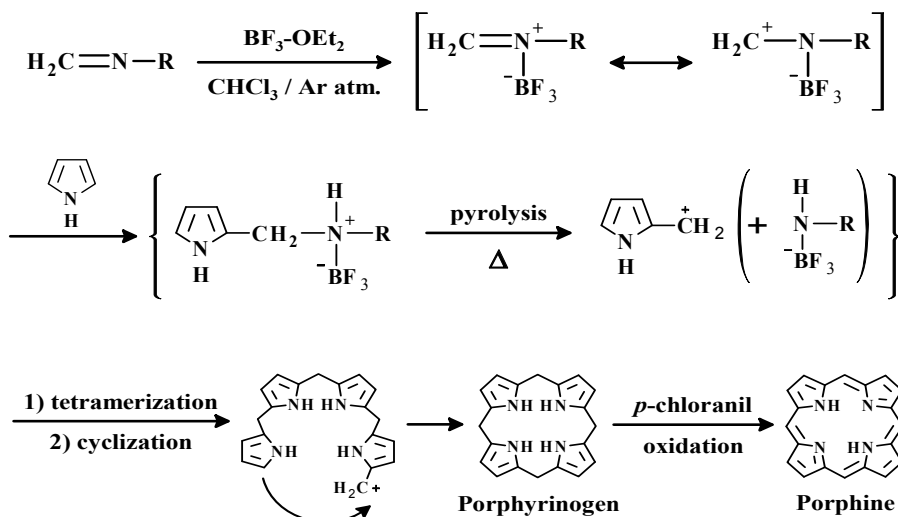


表1 各種 Schiff 塩基を用いたポルフィン合成の結果

| Schiff 塩基<br>[試薬濃度 $1 \times 10^{-2}$ mol/l]   | 反応完結<br>時間 (hr) | ポルフィン<br>収率 (%) |
|--|-----------------|-----------------|
| $\text{H}_2\text{C}=\text{N}-\text{CH}_2-\text{Ph}$<br><i>N</i> -benzylmethanimine                   | 6               | 4~5             |
| $\text{H}_2\text{C}=\text{N}-\text{C}(\text{CH}_3)_2-\text{CH}_3$<br><i>N-tert</i> -butylmethanimine | 6               | 2~3             |
| $\text{H}_2\text{C}=\text{N}-\text{C}(\text{Ph})_2$<br><i>N</i> -benzhydrylmethanimine               | 24              | 3~4             |

次に、推定した合成系 I の反応機構を Scheme 3 に示す。反応の第1段は、Schiff 塩基における窒素原子の非共有電子対と三フッ化ホウ素の酸・塩基中和反応であることは容易に想像される。第2段は、実際にポルフィリノーゲンが生成してポルフィンができることから、ピロイルメチルカチオンの生成は確実であり、その前駆体ができる反応と思われる。恐らく、第1段で生成したイミン・三フッ化ホウ素付加体が両性イオンであり、共鳴混成体としてメチルカチオン誘導体を生じることから、これにピロールの  $\alpha$  位が求核攻撃して、ピロイルメチルアミン・三フッ化ホウ素付加体が生成すると思われる。第3段は、本反応が室温で起こらないことから、何らかの熱分解反応を包含していることが予想され、ピロイルメチルアミン・三フッ化ホウ素付加体が熱分解して、ピロイルメチルカチオンを生成する過程と思われる。そして、第4段では、それらが重合して四量体を形成し、最後に環化してポルフィリノーゲンに至ると思われる。

本反応は、Lindsey 法をポルフィン合成に応用することを念頭に試みてきたが、反応機構から推定すると、これまでに知られていないアミン・三フッ化ホウ素付加体の熱分解によるカルボカチオンの生成を含む新規の有機化学反応であることが確実である。

合成系 I の特徴をまとめると、① 出発物質の Schiff 塩基は調製が容易で、比較的安定で結晶として取り出しやすい、② 反応はアミン・三フッ化ホウ素付加体 (両性イオン) の新規の熱分解反応を経由するらしい、③ *N*-ベンジルメタンイミンを用いた

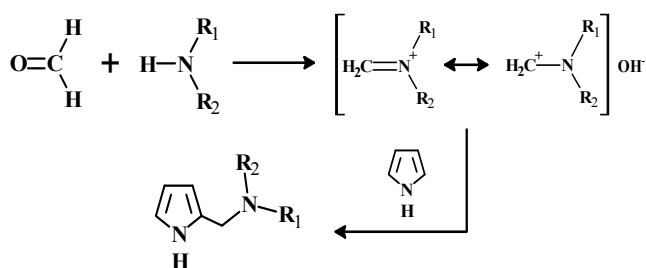
合成系が、Schiff 塩基側鎖のフェニル基の電子吸引性と疎水性により、短い反応完結時間と良好なポルフィン収率を示す、④試薬濃度は  $1 \times 10^{-2}$  mol/l が最適である、⑤反応溶媒は市販の 1%エタノール含有クロロホルムが最適であり、他の溶媒は不適である、などが挙げられる。

## 2-2 ピロールの一官能性 Mannich 塩基を用いたポルフィン合成 (合成系 II)

これまで述べてきた合成系 I の結果から、合成系 I はアミン・三フッ化ホウ素付加体の新規の熱分解反応をキーステップとする反応機構で進行することが予想される。もし、この反応機構が正しいならば、同じ骨格を持つ両性イオンを生成する化合物は全て合成系 I と同様の反応機構を経由してポルフィンを生成するものと考えられる。そこで、次に Herz らの報告<sup>13)</sup>を参考に、Mannich 反応を用いてピロールの一置換誘導体(ピロールの  $\alpha$ -一官能性 Mannich 塩基)を合成し (Scheme 4)、それを用いたポルフィン合成を試みることにした (合成系 II)。合成系 II の予想反応機構を Scheme 5 に示す。

まず、出発物質のピロールの一官能性 Mannich 塩基の調製は、二置換体(ピロールの二官能性 Mannich 塩基)の生成を防ぐため、メタノール溶媒中にピロール:ホルマリン:第二級アミンをモル比 10:1:1 というピロール過剰条件下において 3 日間室温で撹拌を行った。その後、反応溶液をロータリーエバポレーターで濃縮し、真空蒸留あるいはシリカゲルカラムクロマトグラフィー (展開溶媒; ジクロ

Scheme 4 ピロールの一官能性 Mannich 塩基反応



Scheme 5 一官能性 Mannich 塩基を用いたポルフィン合成法の予想反応機構

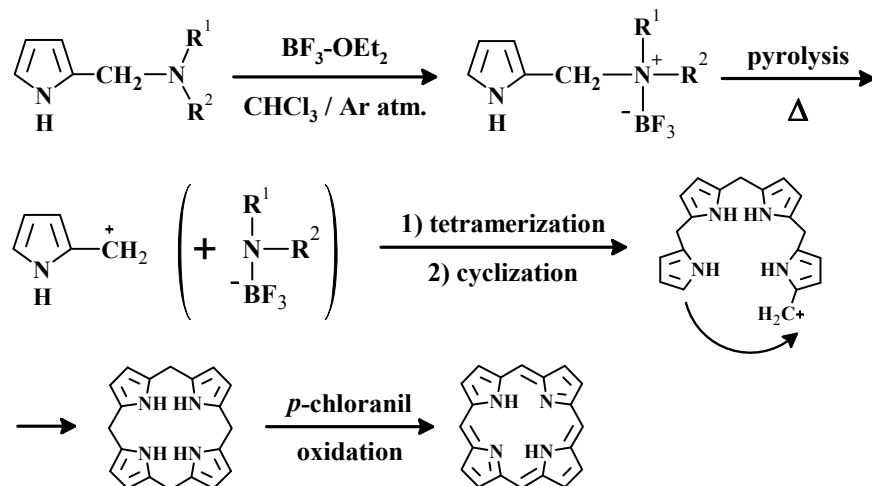
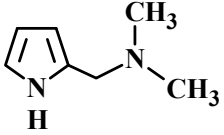
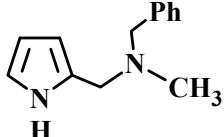
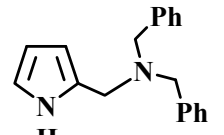


表 2 各種一官能性 Mannich 塩基を用いたポルフィン合成の結果

| 一官能性 Mannich 塩基<br>[試薬濃度 $1 \times 10^{-2}$ mol/l]   | 反応完結<br>時間 (hr) | ポルフィン<br>収率 (%) |
|--|-----------------|-----------------|
| <br>2-dimethylaminomethylpyrrole     | 72              | 5~6             |
| <br>2-benzylmethylaminomethylpyrrole | 48              | 5~6             |
| <br>2-dibenzylaminomethylpyrrole    | 48              | 5~6             |

ロメタン)により分離・精製し、目的物は  $^1\text{H NMR}$  (90 MHz,  $\text{CDCl}_3$ ) で同定した。この合成法は、比較的簡便であること、いずれも目的物が 80%以上の収率で得られること、生成物が安定であることなどが特徴である。なお、問題点を挙げるならば、ピロール過剰雰囲気下で合成を行っても、若干量の二置換体の生成を避けることができず、分離・精製に多少の手間がかかることである。

また、ポルフィン合成は、合成系 I と同様に冷却管等を装備した三口フラスコに、市販のクロロホルム(含 1% エタノール)、撹拌子、先に合成した各種一官能性 Mannich 塩基を入れ、約 1 時間アルゴン置換した。次に、オイルバスの温度を  $70^\circ\text{C}$  以上にして反応溶液を還流状態し、 $\text{BF}_3 \cdot \text{OEt}_2$  をマイクロシリンジでゴムセプタムから注入した。その後、反応の全容を明らかにするために反応の経時変化を合成系 I と同様に追跡した。

表 2 に各種一官能性 Mannich 塩基を用いたポルフィン合成の結果を示す。表 2 からわかるように、いずれの合成系も 5~6%程度のポルフィン収率で得られた。ただし、反応完結時間に着目すると、一官能性 Mannich 塩基側鎖に電子吸引基であるフェニル基を有する合成系の方が、電子供与基であるメチ

ル基を有する合成系と比べて反応完結時間が短縮されるという特徴があり、これは合成系 I にも見られた傾向と同じである。また、合成系 I と同様に、反応中間体がフラスコの内壁に析出する問題が合成系 II にもみられ、これは特に 2-ジメチルアミノメチルピロールを用いた合成系で顕著であり、2-ジベンジルアミノメチルピロールを用いた合成系ではほとんど反応中間体の析出はなかった。これらのことから、合成系 I と同様に、やはりフェニル基の存在は溶媒に対する反応中間体の溶解度を上げ、反応中間体の熱分解速度を増大させる効果があることが判明した。したがって、合成系 II では、フェニル基を 1 つ有する 2-ベンジルメチルアミノメチルピロールやフェニル基を 2 つ有する 2-ジベンジルアミノメチルピロールを用いた合成系が良好な反応完結時間と反応収率を示すポルフィン合成系となることがわかった。

合成系 II の特徴をまとめると、①出発物質の一官能性 Mannich 塩基は調製が容易で、比較的安定かついずれも 80%以上の収率で得られる、②反応は合成系 I と同様にアミン・三フッ化ホウ素付加体の新規の熱分解反応を経由するらしい、③合成系 I と比べ、反応完結時間は長いものの、良好なポルフィン収率を示す、④試薬濃度は  $1 \sim 5 \times 10^{-2}$  mol/l と、合成系 I に比べて 5 倍濃度まで適用できる、⑤最適反応溶媒はやはり市販クロロホルムである、などが挙げられる。

### 2-3 ピロールの二官能性 Mannich 塩基を用いたポルフィン合成 (合成系 III)

合成系 II では、出発物質であるピロールの一官能性 Mannich 塩基の調製の際に、ピロール過剰条件下で行っても二置換体 (ピロールの二官能性 Mannich 塩基) の生成を避けることができず、分離・精製に多少の手間がかかるという問題点があった。しかしながら、ピロールの二官能性 Mannich 塩基もポルフィン合成の出発物質としての潜在力を有しており、無視できない存在である。そこで、さらにピロールの二官能性 Mannich 塩基とピロールを出発物質とするポルフィン合成を試みることにした (合成系 III)。

予想される反応機構は Scheme 6 に示すとおりである。合成系 III も合成系 I、II と同様にアミン・三フッ化ホウ素付加体の新規の熱分解反応を経由してポルフィンを生成することが予想される。

出発物質のピロールの二官能性 Mannich 塩基の調製は、メタノール溶媒中にピロール、

ホルムアルデヒド、第二級アミンを 1 : 2 : 2 のモル比で加え、室温で三日間攪拌して行った。その後、反応溶液をロータリーエバポレーターで濃縮し、真空蒸留あるいはシリカゲルカラムクロマトグラフィー (展開溶媒; ジクロロメタン) により  $\alpha,\beta$ -および  $\alpha,N$ -二置換体と所望の  $\alpha,\alpha$ -二置換体を分離した。 $\alpha,\alpha$ -二置換体の同定は <sup>1</sup>H NMR (90 MHz, CDCl<sub>3</sub>) で行った。また、ポルフィン合成手法ならびに反応の追跡方法は、試薬として合成した各種二官能性 Mannich 塩基とピロールを 1 : 1 で用いる以外は合成系 I、II と同じである。

表 3 に各種二官能性 Mannich 塩基を用いたポルフィン合成の結果を示す。表 3 からわかるように、収率はいずれの合成系も 5~7%程度であり、合成系 II よりも多少改善されていることがわかった。また、反応完結時間に着目すると、合成系 II よりも短縮されるが、傾向はほぼ同じであった。また、反応中間体がフラスコの内壁に析出する問題が合成系 III にもみられ、これは特に 2,5-ビス(ジメチルアミノメチル)ピロールを用いた合成系での析出が顕著であり、2,5-ビス(ジベンジルアミノメチル)ピロールを用いた合成系ではほとんど反応中間体の析出はなかった。これらのことから、やはりフェニル基の存在は溶媒に対する反応中間体の溶解度を上げる効果があり、反応中間体の熱分解速度を増大させ、合成系 I、II と同様にポルフィン収率の改善に寄与していると思われる。したがって、合成系 III でも側鎖にフェニル基を有する二官能性 Mannich 塩基を用いた合成系が良好な反応完結時間と反応収率を示すポルフィン合成系であることがわかった。

合成系 III の特徴をまとめると、①出発物質の二官能性 Mannich 塩基は調製が容易で、比較的安定かついずれも 70%以上の収率で得られる、②反応は合成系 I、II と同様にアミン・三フッ化ホウ素付加体の新規の熱分解反応を経由するらしい、③合成系 II より反応完結時間が短く、良好

Scheme 6 二官能性 Mannich 塩基とピロールを用いたポルフィン合成法の予想反応機構

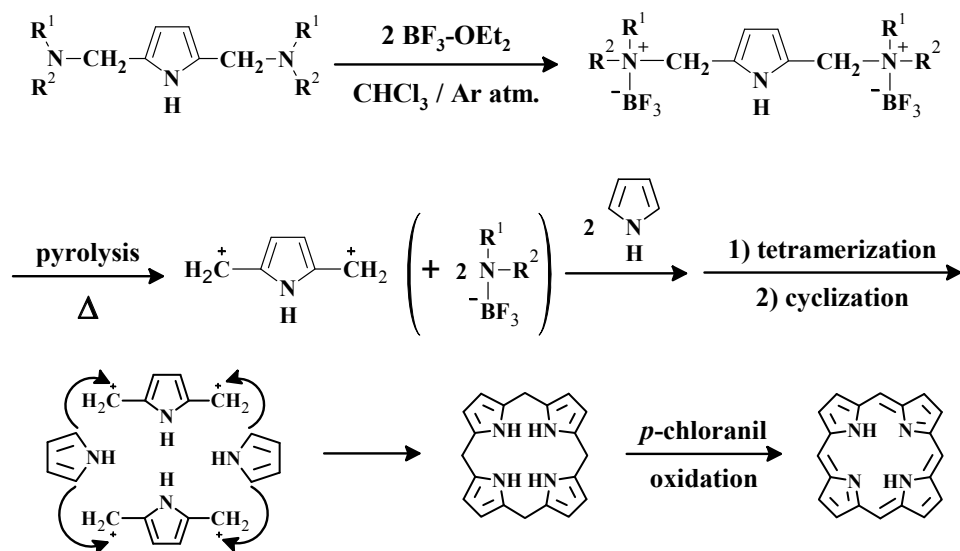
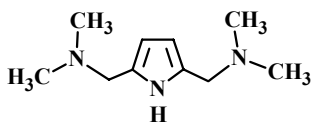
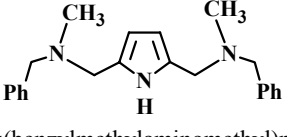
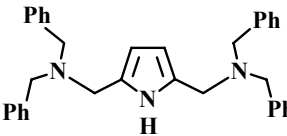




表3 各種二官能性 Mannich 塩基を用いた  
ポルフィン合成の結果

| 二官能性 Mannich 塩基<br>[試薬濃度 $1 \times 10^{-2}$ mol/l]   | 反応<br>完結<br>時間<br>(hr) | ポルフィン<br>収率 (%) |
|--|------------------------|-----------------|
| <br>2,5-bis(dimethylaminomethyl)pyrrole     | 72                     | 5 ~ 6           |
| <br>2,5-bis(benzylmethylaminomethyl)pyrrole | 24                     | 6 ~ 7           |
| <br>2,5-bis(dibenzylaminomethyl)pyrrole    | 24                     | 6 ~ 7           |

なポルフィン収率を示す、④試薬濃度は、 $1 \times 10^{-2}$  mol/l が最適である、⑤反応溶媒は、やはり市販クロロホルムが良好である、などが挙げられる。

#### 2-4 合成系 I、II、IIIの比較と評価

合成系 I、II、IIIに共通した特徴は、中間体であるピロイルメチルアミン・三フッ化ホウ素付加体の熱分解によりピロイルメチルカチオン(親電子試薬)が生じ、これが他のピロールの  $\alpha$  位を求核攻撃している点であろう。親電子試薬は、芳香族有機反応で必須な存在であり、通常は無水  $\text{AlCl}_3$  のような強力なルイス酸を用いて酸性条件下で調製するが、この条件下ではピロールのような電子過剰化合物は重合反応を起こしてしまうので、中性・塩基性条件下で親電子攻撃剤の調製が要求される。しかしながら、このような調製法は、Mannich 反応などの限られたものしか知られておらず、芳香族有機化学の未開拓分野である。今回、見出された熱分解反応は、アミンと三フッ化ホウ素が中和した中性条件下でカルボニウムカチオンを発生する反応であり、合成有機化学的に注目し値するものと思われる。

また、ポルフィン合成という本来の目的からすると、どの合成系も二段階ワンポット合成で 4~5%の収率を示し、これまでに報告された合成法と大差なく、非常に簡便なポルフィン合成法を開拓したという点で評価されよう。ただし、三者を比べると、出発物質の調製の簡便さと反応完結時間の短さで言えば、ホルムアルデヒドの Schiff 塩基を用いる合成系 I が一番優れていた。ポルフィン収率の良さで言えば、ピロールの二官能性 Mannich 塩基を用いる合成系

IIIがやや優れていたが、一度に多くのポルフィンを得る高濃度合成という観点からは、反応完結時間がかかるが、ピロールの一官能性 Mannich 塩基を用いる合成系 II が優れていた。さらに、どの合成系も、反応中間体であるピロイルメチルアミン・三フッ化ホウ素付加体(両性イオン)の析出問題があり、アルコール添加等により極性の強い溶媒系にすれば、三フッ化ホウ素が溶媒に付加しやすくなり、両性イオンそのものの生成が阻害される結果となった。この点において、両性イオンの溶解度がある程度確保されるように、フェニル側鎖を有する出発物質の使用が不可欠であることも判明した。

結局、三者三様であるが、ポルフィン収率を多少犠牲にしても、迅速に大量合成が必要な場合は、上記のように出発物質の調製の簡便さと反応完結時間の短さから、合成系 I が一番優れているように思われる。

#### 参考文献

- H. Fischer and W. Gleim, *Liebigs Ann. Chem.*, **521**, 157(1935).
- P. Rothmund, *J. Am. Chem. Soc.*, **58**, 625(1936).
- S. Krol, *J. Org. Chem.*, **24**, 2065(1959).
- F. R. Longo, E. J. Thorne, A. D. Adler, S. Dym, *J. Heterocyclic Chem.*, **12**, 1305(1975).
- S. Neya, H. Yodo and N. Funasaki, *J. Heterocyclic Chem.*, **30**, 549(1993).
- S. Taniguchi, H. Hasegawa, M. Nishimura and M. Takahashi, *Synlett*, 73(1999).
- (a) S. Neya and N. Funasaki, *Tetrahedron Lett.*, **43**, 1057(2002); (b) S. Neya, J. Quan, T. Hoshino, M. Hata and N. Funasaki, *Tetrahedron Lett.*, **45**, 8629(2004); (c) S. Neya, J. Quan, M. Hata, T. Hoshino and N. Funasaki, *Tetrahedron Lett.*, **47**, 8731(2006).
- R. T. Wheelhouse and D. -F. Shi, *Tetrahedron Lett.*, **43**, 9341(2002).
- 富岡 清, 「人名反応に学ぶ有機合成戦略」, pp.448-449, 化学同人 (2007).
- M. O. Senge and S. Hatscher, *Tetrahedron Lett.*, **44**, 157(2003).
- A. D. Adler, F. R. Longo, J. D. Finarelli, J. Goldmacher, J. Assour and L. Korsakoff, *J. Org. Chem.*, **32**, 476(1967).
- (a) J. S. Lindsey, H. C. Hsu and I. C. Schreiman, *Tetrahedron Lett.*, **27**, 4969(1986); (b) J. S. Lindsey, R. W. Wagner and D. S. Lawrence, *Tetrahedron Lett.*, **28**, 3069(1987); (c) J. S. Lindsey, I. C. Schreiman, H. C. Hsu, P. C. Kearney and A. M. Margueretaz, *J. Org. Chem.*, **52**, 827(1987).
- W. Herz, K. Dittmer and S. J. Cristol, *J. Am. Chem. Soc.*, **69**, 1698(1947).



## 酸化亜鉛及び酸化ジルコニウム繊維の作製とその性質

砂金孝志、藤貴大、黒澤悟史、福田和正

### Preparation and Characterization of Zinc Oxide and Zirconium Oxide Fibers

Takashi ISAGO, Takahiro FUJI, Satoshi KUROSAWA, and Kazumasa FUKUDA

**Abstract:** Fibrous materials of zinc oxide (ZnO) and zirconium oxide (ZrO<sub>2</sub>) were prepared by impregnating sewing threads with Zn and Zr solutions, prepared from alkoxides of zinc and zirconium, respectively, and then heat-treating the threads in the atmosphere or in a nitrogen gas (500~1000°C). With the use of cotton fibers for the sewing threads, ZnO and ZrO<sub>2</sub> fibers having relatively high strengths could be prepared. The crystallinities of the prepared ZnO and ZrO<sub>2</sub> fibers were identified by the determination of their X-ray diffraction patterns. Generally, the fibers heat-treated in the atmosphere and in the surrounding nitrogen gas had white and black colors, respectively. The fibers heat-treated in the surrounding nitrogen gas had higher strengths than those heat-treated in the atmosphere. ZnO or ZrO<sub>2</sub> only was observed in the fibers heat-treated in the atmosphere, while it was observed in the fibers heat-treated in the surrounding nitrogen gas that ZnO or ZrO<sub>2</sub> was evenly dispersed in carbon fibers.

## 1. 緒言

酸化亜鉛 (ZnO) は、ゴムの添加剤、紫外線吸収剤、白色顔料、触媒、蛍光体、電子写真用感光体等に利用され、また、透明電極、光触媒、太陽電池、透明磁性体等としても期待されている。一方、酸化ジルコニウム (ZrO<sub>2</sub>) は、白色顔料、坩堝、包丁やハサミ、宝石、触媒、酸素センサー、燃料電池の固体電解質等にも利用される重要なセラミックス材料である<sup>1)~3)</sup>。この ZnO や ZrO<sub>2</sub> は通常粉末として市販されているが、その結晶形状によっては様々な新たな用途開拓が可能となると考えられる。例えば、これらを光触媒のような触媒として使用する場合には、繊維は、気相、液相どちらの反応に使う場合にも扱いやすく表面積も大きくすることができる。しかし、繊維状の ZnO と ZrO<sub>2</sub> についての研究は非常に少ない。一般に、これまでに報告されている繊維状の金属酸化物は高価な特殊な装置を用いて作製されていた<sup>4)~6)</sup>。

我々は、最近、繊維状の二酸化チタン (TiO<sub>2</sub>) をミシン糸に Ti の溶液を含浸させた後、熱処理することで光触媒能を有する TiO<sub>2</sub> 繊維ができることを報告した<sup>7)</sup>。本研究では、繊維状の ZnO と ZrO<sub>2</sub> をミシン糸に Zn 溶液または Zr 系溶液を含浸させた後、大気中または窒素中で熱処理 (500~1000°C) することで作製することを試みた。そして、得られた繊維状の物質については、X線回折パターンの測定を行うことでその結晶性を評価した。

## 2. 実験

### 2.1 試薬

ジエトキシ亜鉛 (Zn(OC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub>, 99.99%, 高純度化学研究所)、テトライソプロポキシジルコニウム (Zr(O-i-C<sub>3</sub>H<sub>7</sub>)<sub>4</sub>, 99.99%, 高純度化学研究所)、ジエタノールアミン

(HN(CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>OH)<sub>2</sub>, 特級, 関東化学)、硝酸イットリウム六水和物 (Y(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O, 関東化学)、エタノール (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH, 特級, 関東化学) は精製しないでそのまま用いた。

### 2.2 含浸溶液の調製

#### (1) Zn 溶液

Zn(OC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub> 1.94g(0.0125mol)を C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH 25ml(19.75g)に懸濁させ、これに HN(CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>OH)<sub>2</sub> 2.63g(0.0250mol)を加え、室温で 10 時間攪拌することにより、透明な溶液を得た<sup>8)</sup>。

#### (2) Zr 溶液

C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH 25ml(19.75g)に Zr(O-i-C<sub>3</sub>H<sub>7</sub>)<sub>4</sub> 4.10g(0.0125 mol)、HN(CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>OH)<sub>2</sub> 2.63g(0.0250mol)を加え、室温で 5 時間攪拌することにより、透明な溶液を得た。

#### (3) Zr-Y 溶液

上記 Zr 溶液に Y(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O 0.946g(0.00247mol)を加え、24 時間攪拌を続けることにより、均一な懸濁溶液を得た。

### 2.3 用いた糸

Ti 溶液を含浸させるミシン糸として、天然繊維 1 種 (木綿)、化学繊維 1 種 (ポリエステル) を用いた。糸は 15cm の長さに切り、上記溶液に 1 分間浸した。

### 2.4 ZnO、ZrO<sub>2</sub> 系繊維の作製

ミシン糸に各溶液を含浸させ、乾燥した後、電気炉を用いて大気中または窒素中で 500~1000°C まで一定速度で昇温し、その温度で 30 分間焼結することで ZnO と ZrO<sub>2</sub> 系繊維を作製した。

### 2.5 測定

繊維の結晶性は、粉末 X 線回折装置 (理学電機 ;

RINT,2000PV) を用いて評価し、繊維の外観は光学顕微鏡で観察した。

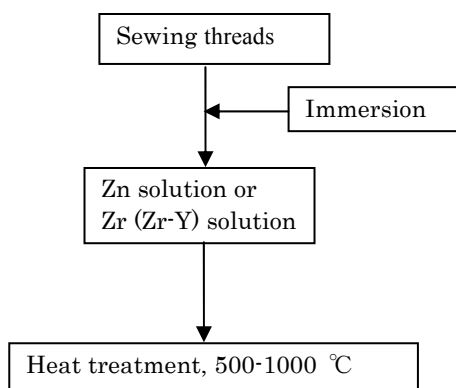


Fig. 1 Methods for preparing ZnO and ZrO<sub>2</sub> fibers.

### 3. 実験結果と考察

#### 3. 1 繊維の様子

天然繊維である木綿のミシン糸を使用して作製した ZnO と ZrO<sub>2</sub> 繊維は、大気中、窒素雰囲気中どちらの場合でも糸の形がはっきりと残っており、ある程度の強度を有した繊維となった。一方、ポリエステル製の化学繊維を使用して作製したものは、どちらも形が崩れて塊となってしまった。これは、ポリエステルは融点を持ち、その温度が低いため ZnO や ZrO<sub>2</sub> の焼結、糸の炭化が起こる前に繊維の形が崩れてしまっ塊になってしまうと考えられる。そのため、糸としては木綿を用いることにした。

Table 1 Colors and strengths of ZnO and ZrO<sub>2</sub> fibers prepared in the atmosphere and in a nitrogen gas.

| Fibers  | Heat treatment temperature(°C) | Color atmosphere(N <sub>2</sub> ) | Strength atmosphere(N <sub>2</sub> ) |
|---|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| ZnO   | 500                            | brown(black)                      | △(○)                                 |
|   | 700                            | white(black)                      | △(○)                                 |
|   | 1000                           | white(black)                      | △(○)                                 |
| ZrO <sub>2</sub>                                | 500                            | white(black)                      | △(○)                                 |
|   | 700                            | white(black)                      | △(○)                                 |
|   | 1000                           | white(black)                      | △(◎)                                 |
| ZrO <sub>2</sub> -Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1000                           | white(black)                      | △(◎)                                 |

Zn 溶液から作製した繊維は、大気中で熱処理した場合には全て白色の繊維となったが、窒素雰囲気中で作製したものは黒色の繊維となった。強度については、大気中の熱処理で得られた繊維はピンセットで摘める程度の強さで、それ程強くはなかった。一方、窒素中の熱処理で得られた繊維は、大気中から得られた繊維よりも柔軟性があり強かった。Zr 溶液から作製した繊維については、大気中 500°C の熱処理では褐色の繊維が、700°C 以上では白色の繊維が得



Fig. 2 Photographs of ZnO and ZrO<sub>2</sub> fibers.

- (a) ZnO fibers (500°C, atmosphere)
- (b) ZnO fibers (1000°C, atmosphere)
- (c) ZrO<sub>2</sub> fibers (500°C, atmosphere)
- (d) ZrO<sub>2</sub> fibers (1000°C, atmosphere)
- (e) ZnO fibers (500°C, N<sub>2</sub>)
- (f) ZnO fibers (700°C, N<sub>2</sub>)
- (g) ZrO<sub>2</sub> fibers (500°C, N<sub>2</sub>)
- (h) ZrO<sub>2</sub> fibers (1000°C, N<sub>2</sub>)

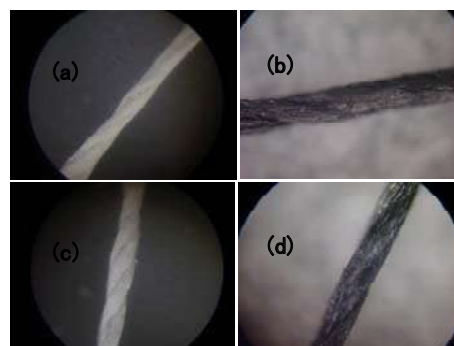


Fig. 3 Photographs (×100) of ZnO and ZrO<sub>2</sub> fibers.

- (a) ZnO fiber (700°C, atmosphere)
- (b) ZnO fiber (700°C, N<sub>2</sub>)
- (c) ZrO<sub>2</sub> fiber (1000°C, atmosphere)
- (d) ZrO<sub>2</sub> fiber (1000°C, N<sub>2</sub>)

られた。有色の原因としては、有機物が完全に焼失しなかったことが考えられる。窒素中の熱処理で得られた繊維はすべて黒色であった。強度については、窒素中の熱処理で得られた繊維は大気中から得られた繊維よりも柔軟性があった。Zr 溶液から得られた繊維は大気中、窒素中どちらから得られた繊維も Zn 溶液から得られた繊維に比べると強度はそれぞれ少し大きかった。Fig.2 と Fig.3 に得られた繊維の写真を示す。

### 3. 2 結晶性

Fig.4 に Zn 溶液から得られた繊維の X 線回折パターンを示す。大気中の熱処理で得られた繊維は、どの熱処理温度でもウルツ鉱型 ZnO 構造のみが観測された。また、温度が高いほど結晶粒の成長が見られ、この繊維が ZnO の多結晶体で出来ていることがわかる。窒素雰囲気中で得られた繊維は、700°C までの熱処理では、ウルツ鉱型 ZnO 構造への成長が見られたが、1000°C の熱処理ではウルツ鉱型 ZnO は見られなくなった。これは 1000°C では析出した炭素によ

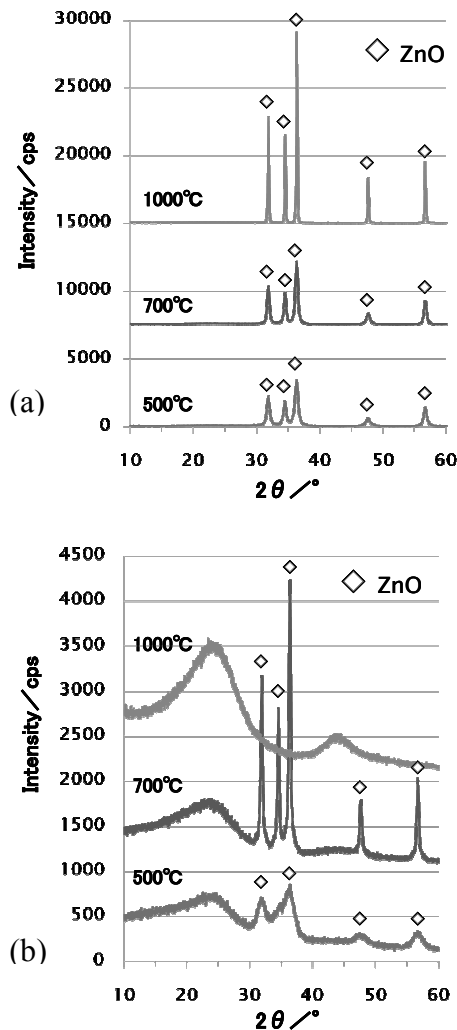


Fig. 4 X-ray diffraction patterns of ZnO fibers prepared in the atmosphere (a) and in a nitrogen gas (b).

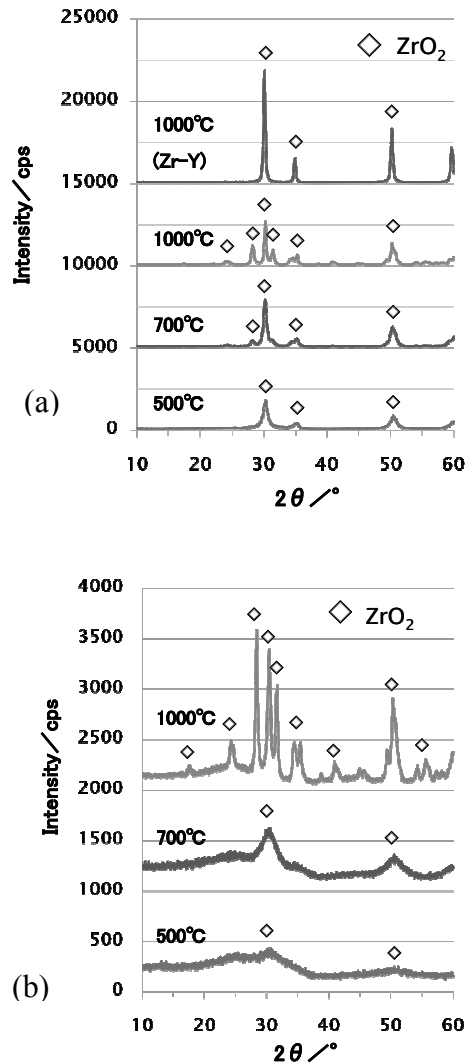


Fig. 5 X-ray diffraction patterns of  $ZrO_2$  fibers prepared in the atmosphere (a) and in a nitrogen gas (b).

り ZnO が還元され Zn 金属になり、それが蒸発しているのではないかと考えられる。黒色の原因は炭素ができていたためと考えられる。

Fig.5 に Zr 溶液と Zr-Y 溶液から得られた繊維の X 線回折パターンを示す。Zr 溶液から大気中の熱処理で得られた繊維は、500°C の温度では主に立方晶系と見られる  $ZrO_2$  が成長し、700°C ではこれに単斜晶系が少し混じり、1000°C では更に単斜晶系  $ZrO_2$  の割合が増加した。Zr-Y 溶液から大気中 1000°C で得られた繊維は、主に立方晶系と見られる安定化  $ZrO_2$  になっていると考えられる。また、これらの繊維が  $ZrO_2$  の多結晶体で出来ていることがわかる。窒素雰囲気中で得られた繊維は、大気中での熱処理と同じように 700°C までの熱処理では、主に立方晶系と見られる  $ZrO_2$  の成長が見られ、1000°C では単斜晶系の  $ZrO_2$  の成長が見られた。黒色の原因は炭素ができていたためと考えられる。窒素雰囲気中から得られた繊維が強い強度を持っていたの

は、炭素の繊維の中に ZnO または ZrO<sub>2</sub> が均一に分散されているためと考えられる。

#### 4. 総括

天然繊維である木綿のミシン糸を Zn のアルコキシドや Zr のアルコキシドから調製した溶液に浸け、大気中または窒素雰囲気中で熱処理することにより、ZnO と ZrO<sub>2</sub> からなる繊維状物質を作製することができた。一般に繊維の色は大気中で熱処理したものは白色で、その強度はあまり大きくはなかったが、窒素雰囲気中で熱処理したものは黒色で、柔軟性もありその強度も大きかった。大気中の熱処理で得られた繊維は、ZnO または ZrO<sub>2</sub> のみからなる多結晶体からなり、窒素雰囲気中で熱処理したものは、炭素の繊維の中に ZnO または ZrO<sub>2</sub> が均一に分散されていることが推測された。

今後は、大気中の熱処理で得られる炭素のない ZnO と ZrO<sub>2</sub> 繊維については、より強い繊維を目指して焼結助剤の添加を含めた焼結条件の検討を行いたい。また、SEM 等によるこれら繊維のより詳細な構造の解析、触媒としての性質、特に ZnO 繊維については光触媒としての性質について検討する予定である。

#### 文 献

- 1) (社)日本セラミックス協会編,「これだけは知っておきたいセラミックスのすべて」,日刊工業新聞社(1996)
- 2) 塩川二郎,「入門無機材料」,化学同人(1997).
- 3) 大谷文章,「光触媒のしくみがわかる本」,技術評論社(2003).
- 4) 長谷川良雄,南条吉保,公開特許公報 特開 2002-204929.
- 5) A.K. Alves, F.A. Berutti, F.J. Clemens, T. Graule, C.P. Bergmann, *Mater. Res. Bull.*, **44**, 312-317 (2009).
- 6) B. Wu, R. Yuan, X. Fu, *J. Solid State Chem.*, **182**, 560-565(2009)
- 7) 砂金孝志,黒澤悟史,茨城工業高等専門学校研究彙報, **45**, 123-126(2010).
- 8) 砂金孝志,園部素直,大川原敏一,砂川英樹,日本セラミックス協会学術論文誌, **104**, 1052-1055(1996).



## チタン化合物によるレジオネラ抗菌効果

小松崎 秀人, 島田 明夫, 鈴木 康司

Antimicrobe effect for *Legionella* strain by the titanium compound

Hidehito KOMATSUZAKI, Akio SIMADA, and Koji SUZUKI

**Abstract:** *Legionella* strains are known as microorganism which causes pneumonia. Especially, when *Legionella* grew in the hot spring facilities, there were some accidents in which infected human died. One of the sterilization methods of *Legionella* in the facilities, chlorine sterilization is shown by the law of Japanese government. However, there is no amenity in the hot spring facilities, because the chlorine has the peculiar smell. On the other hand, the metal bearing material has been used as antimicrobe and sterilization material. For example, we know that the copper has the sterilization effect, but copper oxide is toxic metal for human body. And the silver complex is well known as an antimicrobe material, however, not only the silver is expensive, but also the toxicity is very high. Therefore, the silver complex has to make an attention to be integration to the material. The titanium is a cheap metal, and the application such as photocatalyst and synthetic catalyst are applied in widely. Antibacterial material which contains the titanium has made to combine with the chemical substance, but the effect of the material is not so effective. And, there is no example of applying to the antibacterial of *Legionella* strains, too. Then, we prepared the complexes 1-3 from titanium (IV) ion and alkyl-substituted tris(pyrazolyl)borate ligands ( $\text{Tp}^{\text{R}}$ ) which are constructed by three nitrogen donors, and examined the antibacterial action. *Legionella erythra* JCM 7564 strain was distributed from Japan Collection of Microorganisms RIKEN BioResource Center. The complexes 1-3 were prepared by the reaction of titanium (IV) tetraisopropoxide and  $\text{Tp}^{\text{R}}$  ligands (R=1-3), in which  $\text{Tp}^1$  and  $\text{Tp}^3$  are introduced an electron-donating alkyl substituent such as isopropyl and *tert*-butyl groups into the pyrazoles. On the contrary,  $\text{Tp}^2$  has electron-attracting  $\text{CF}_3$  groups. In Ti complex 3, the sterilization effect was shown even in 0.05mg quantity, and it showed the highest sterilization effect. It was indicated that the complex was very effective as the disinfectant which affected *Legionella* strain. Ti complex 3 was equivalently effective at 1/10 quantities of the chlorine, and it expects that is applied by the industry field in the future.

### 1. はじめに

数年前、温泉でレジオネラ菌に感染した人が死に至るといふ事故が報道された。これは、温泉のお湯を循環させていたために、その装置内でレジオネラ菌が発生し、それに感染したことが原因とされている。レジオネラ菌はごく普通の自然界に存在しているため、例えば公衆浴場などの不特定多数の人が利用する施設などで、それを持ち込ませないようにすることは、まず不可能である。レジオネラ菌の殺菌方法の1つに塩素剤の使用が挙げられるが、風呂・温泉という環境ではその塩素臭のため快適性が失われている。平成14年10月に改訂された公衆浴場法並びに旅館業法では、掛け流しではなく温泉等を循環使用する浴槽では、0.2~0.4ppmの残留塩素量が得られるようにすることが求められたが、それと同等の効果が得られる他の手段を選択することも可能とされている<sup>1)</sup>。したがって、温泉の循環装置など、レジオネラ菌の繁殖が予想されるさまざまな箇所に使用でき、尚且つ、人体に影響の及ぼさない塩素使用以外の実用的な殺菌剤が強く望まれている。

抗菌・殺菌材料として調製を考案する際、その効果を持続させるために、水溶性液体成分よりは、脂溶性液体成分

か、粉末成分の方が利便性は高い。これは、水溶性液体であれば抗菌効果が低下し、さらに誤飲等により体内に取り込まれる可能性が非常に高く、人体を危険に曝すことになる。それを解決できる抗菌、殺菌材料として金属含有物質が用いられてきた。例えば、銅は殺菌効果を有することが知られているが、酸化銅(緑青)などは人体に有害である。また銀を主体とした錯体による抗菌材料もよく知られているが、銀は高価であるだけでなく、その劇物性は極めて高く、材料への組み込みをしっかりと行わなければならない。一方、チタンは安価な金属であり、光触媒や合成触媒等、その用途は多岐に及んでいる。また、チタンを含有する抗菌性材料には、別の化学物質と錯体化させて使用されているものもあるが、その効果は満足のいくものではない上、レジオネラ菌の抗菌性へと展開した例もない。これは、チタン塩自身では、殺菌力が非常に弱く、何らかの手法で殺菌性の高い物質へと変換しなければならないという問題点があった。そこで本論文では、チタン塩を簡単な含窒素配位子と作用させて錯体へと変換し、レジオネラ菌をはじめとする細菌に対して抗菌性を有し、人体に安全で、さらには抗菌剤としての使用に際して形態の自由度が大きい、チ



タン系抗菌剤の調製とその抗菌作用について検討をした。この錯体は、先の問題点を解決できる画期的な材料としての応用が期待され、また、レジオネラ菌だけでなく数種の菌に対しても抗菌性を示したとするならば、お風呂に限らず医療現場、日常品、建築物、多数の人が利用する乗り物などの抗菌材料としての利用価値も大きいと考えられる。

## 2. 実験方法

### 2-1 チタン系錯体 (1~3) の調製法

本研究で調製するチタン系錯体には、含窒素配位子として、種々のアルキル置換基を有するトリスピラゾリルボレート配位子 ( $Tp^R$ ; 図1) を用いることにした。この配位子は、①簡便に合成することができる、②ピラゾールの3、4、5位にさまざまなアルキル基やハロゲンを導入することができる、③種々の金属イオンと錯形成をしやすい、という利点がある。さらに、その置換基を変化させることで、有機溶媒への溶解性も変化させることが可能となる。また、チタン源には、廉価なチタン (IV) テトライソプロポキサイド溶液を用いることにした。

まず、本研究で使用する3種の  $Tp^R$  配位子であるが、 $Tp^1$  配位子と  $Tp^3$  配位子は電子供与性のイソプロピル基 (iPr 基) および *tert*-ブチル基 (tBu 基) を導入し、 $Tp^2$  ではピラゾールの3位 ( $R^3$  の位置) に電子吸引性のトリフルオロメチル ( $CF_3$ ) 基を導入している。また、 $Tp^2$  配位子については歯科材料でフッ素 (F) が特異的な作用を示していることも考慮して  $CF_3$  基を導入することにした。3種の  $Tp^R$  配位子 (図1;  $R=1\sim3$  は配位子上の置換基の違いを示す) は既報<sup>2-7)</sup> に基づき合成を行い、IR および  $^1H$  NMR によりその生成を確認した。また、各錯体の調製はシュレンク管を用い、不活性アルゴンガス下にて行った。

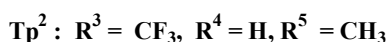
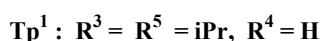
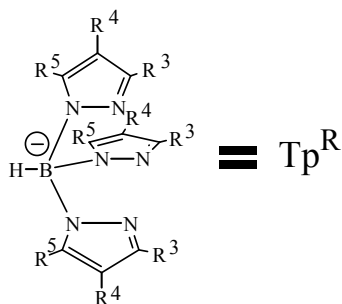


図1  $Tp^R$  配位子

チタン (IV) イソプロポキサイドのテトラヒドロフラン (THF) 溶液に、 $Tp^1$  配位子のカリウム塩 ( $KTp^1$ ) の THF 溶液をゆっくりと滴下し、その反応溶液を10分間撹拌し

た。

THFを留去した後、アセトニトリルを加えて2時間撹拌熟成を行うことで淡黄色を呈するTi錯体1を得た。また、Ti錯体2では、 $Tp^2$ 配位子のナトリウム塩 ( $NaTp^2$ ) を用い、反応溶液の撹拌は10時間行い、アセトニトリルによる熟成にも約18時間を要した。同様に、 $Tp^3$ 配位子を有するTi錯体3も同様の合成操作で行ったが、その際、反応溶液の撹拌時間を10分、そして熟成時間を24時間とした。

### 2-2 使用菌

抗菌活性の検定に用いた菌は、理化学研究所から *Legionella erythra* JCM 7564 を購入し使用した。*Escherichia coli* W3110 株は、国立遺伝学研究所から分与を受けた。なお、レジオネラ属微生物は、レベル2 (微生物、きのこ類及び寄生虫のうち、哺乳動物等に対する病原性が低いものであって、文部科学大臣が定めるもの) 微生物に該当する。よってカルタヘナ法で規定されているバイオハザード対策 (クラス 2a 安全キャビネット使用等) を施し実験した。

### 2-3 培地組成

*L.erythra* の培養は BCYE 培地<sup>8)</sup>を pH7.0 に調製し使用した (表1)。ここで使用する活性炭は、*Legionella* に有毒な代謝産物の過酸化水素を分解し、 $CO_2$  を吸着して培地表面の電位を調製する目的で用いた。*E.coli* の培養は市販の BHI (Brain Heart Infusion: Oxoid 社製) 培地を使用した。接触培養法に用いた N 培地は市販の培地を使用した。寒天培地の場合は、更に寒天を 1.7% 加えた。

表1 BCYE 培地の組成<sup>8)</sup>

|                   |        |
|-------------------|--------|
| 酵母エキス             | 1.0%   |
| L-システイン塩酸塩        | 0.04%  |
| ピロリン酸             | 0.025% |
| ACES 緩衝剤          | 1.0%   |
| 活性炭               | 0.2%   |
| $\alpha$ -ケトグルタル酸 | 0.1%   |

### 2-4 培養方法

殺菌作用を調べる実験は、図2に示した接触培養法で行った。

- ① 液体培地 (2.5ml) に目的の菌を植え、一昼夜、 $37^\circ C$  で撹拌しながら培養して菌を生育させる。
- ② 滅菌した液体 N 培地 (2.5ml) に対して抗菌剤を 0 から 10mg の範囲で適宜添加し、十分撹拌する。そこに、①で生育させた菌数が概ね  $10^7$  から  $10^8$  となるように調製し  $37^\circ C$  で撹拌しながら 24hr 培養する。
- ③ 培養後、0.9% 生理食塩水 (900 $\mu$ l) で適宜希釈する。
- ④ 希釈液より 100 $\mu$ l 採り、寒天培地に塗布して  $37^\circ C$  で *L.erythra* では約3日、*E.coli* では一昼夜培養する。

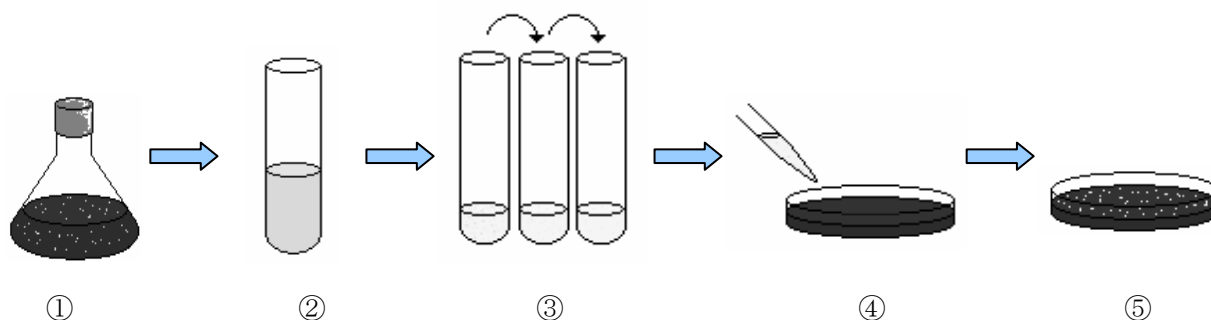
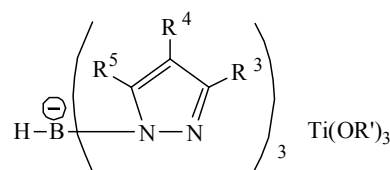


図2 接触培養法

⑤ BCYE 寒天培地あるいは BHI 寒天培地で生育したコロニーを数える。

この接触培養法で、生育したコロニーが少ないほど添加したサンプルの殺菌作用が高いことを意味する。なお、結果は、横軸を抗菌剤の添加量、縦軸を菌の生育コロニー数を対数パーセントに変換した値として図示した。



Ti錯塩1:  $\text{R}^3 = \text{R}^5 = \text{iPr}$ ,  $\text{R}^4 = \text{H}$

Ti錯塩2:  $\text{R}^3 = \text{CF}_3$ ,  $\text{R}^4 = \text{H}$ ,  $\text{R}^5 = \text{CH}_3$

Ti錯塩3:  $\text{R}^3 = \text{tBu}$ ,  $\text{R}^4 = \text{H}$ ,  $\text{R}^5 = \text{iPr}$   
( $\text{R}' = \text{iPr}$ )

図3 Ti錯塩1~3の推定組成

## 2-5 使用した抗菌剤

殺菌作用を調べるために用いた抗菌剤は、2-1 で示した3種の  $\text{Tp}^{\text{R}}$  配位子と3種の Ti 錯体 1~3 である。比較実験のために、Ti 化合物 (チタン源として用いたチタン(IV)テトライソプロポキシド)、Cu 粉末 (75-150 $\mu\text{m}$ )、 $\text{TiO}_2$  (アナターゼ型: 0.1-0.3 $\mu\text{m}$ )、高度さらし粉 ( $\text{Ca}(\text{OCl})_2$ : 有効塩素 60%) についても同様の実験を行った。 $\text{TiO}_2$  は、光触媒として殺菌効果があるので、タングステンランプにて光照射 (距離約 80cm) を行って接触培養を行った。

## 3. 結果及び考察

### 3-1 チタン錯体の調製および収量

各チタン錯体 1~3 については、熟成後に得られた反応物を減圧下で加熱して、余分なピラゾール成分や溶媒成分を除去した。3種の錯体については、主に IR スペクトルによる分析を行い、 $\text{Tp}^{\text{R}}$  配位子を示す B-H 伸縮振動が観測されていることからチタン (IV) との相互作用が示唆された。各錯体調製における  $\text{Tp}^{\text{R}}$  配位子の使用量および Ti 錯体の収量は、次の通りである。

- Ti 錯体 1 では  $\text{Tp}^1$  配位子 (140.8mg)、1 の収量 (205.8mg)。
- Ti 錯体 2 では  $\text{Tp}^2$  配位子 (104.8mg)、2 の収量 (116.6mg)。
- Ti 錯体 3 では  $\text{Tp}^3$  配位子 (111.1mg)、3 の収量 (133.4mg)。

チタン (IV) テトライソプロポキシド溶液の抗菌活性が錯体 1~3 の活性とは異なるため (後述)、錯体 1~3 でチタン (IV) は  $\text{Tp}^{\text{R}}$  配位子と相互作用しているものと考えられる。

この結果から、現時点で、錯体 1~3 は図 3 のような組成であるものと推測している。しかしながら、本錯体の同定については、他の成分の存在 (水、溶媒など)、 $\text{Tp}^{\text{R}}$  配位子が Ti (IV) に二座で結合している可能性 ( $\text{Tp}^{\text{R}}$  配位子の B-H 伸縮振動値より<sup>9,10</sup>)、 $\text{Tp}^{\text{R}}$  配位子分解に伴うピラゾールの存在 (錯体調製や熟成の際に副生)、も考慮する必要がある。

### 3-2 Legionella erythra における配位子と錯体の殺菌効果

接触培養法で調べた3種の  $\text{Tp}^{\text{R}}$  配位子と Ti 錯体 1~3 における *L. erythra* 生育菌数の変化を表 2 に示す。比較実験として Ti、Cu を添加したサンプルも示した。

表 2 で示されたように、サンプル無添加のものにおいて概ね  $10^7 \sim 10^8$  オーダーの菌が生育するように調製して実験を行った。また生育菌数は、殺菌剤の効果によって指数単位で減少していく。よって菌数を log 値で求めた後、無添加のものの log 値を 100% とした値として計算した log% を表の ( ) に示し、その % で図を作成した。比較実験として用いた錯体のチタン源である Ti だけの添加では、殺菌効果は認められず生育菌数の変化はほとんどなかった。 $\text{Tp}^{\text{R}}$  配位子サンプル量における生育菌数の変化グラフを図 4 に、Ti 錯体サンプル量における生育菌数の変化グラフを図 5 に示した。これら図からもわかるように、 $\text{Tp}^{\text{R}}$  配位子のみでも殺菌効果を示し、 $\text{Tp}^1$  配位子で Cu と同等の効果があった。更に  $\text{Tp}^2$  配位子はより殺菌効果が高いことがわかる。 $\text{Tp}^3$  配位子はあまり殺菌効果が見られなかったが、その錯体である Ti 錯体 3 においては、最も高い殺菌効果を示し、1mg 添加で完全に殺菌できることがわかった。この Ti 錯体 3 がどの程度まで殺菌効果があるのかを示したのが図 6 である。このように、0.05mg という量でも 33.2% の殺菌効果を示し、レジオネラ菌における殺菌剤として非常に有効なものであることがわかった。

表2 各配位子と錯体の *L. erythra* 生育菌数の変化

| サンプル量               | 0mg                         | 1mg                          | 4mg                          | 10mg                        |
|---------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| Ti                  | $1.51 \times 10^4$<br>(100) | $1.45 \times 10^4$<br>(99.5) | $1.23 \times 10^4$<br>(97.8) | $1.51 \times 10^4$<br>(100) |
| Cu                  | $3.67 \times 10^8$<br>(100) | $1.31 \times 10^6$<br>(71.4) | 0<br>(0)                     | 0<br>(0)                    |
| Tp <sup>1</sup> 配位子 | $3.10 \times 10^7$<br>(100) | $5.20 \times 10^5$<br>(76.4) | 0<br>(0)                     | 0<br>(0)                    |
| Tp <sup>2</sup> 配位子 | $1.58 \times 10^7$<br>(100) | $1.00 \times 10^0$<br>(13.9) | 0<br>(0)                     | 0<br>(0)                    |
| Tp <sup>3</sup> 配位子 | $3.67 \times 10^8$<br>(100) | $8.00 \times 10^7$<br>(92.3) | 0<br>(0)                     | 0<br>(0)                    |
| Ti 錯体 1             | $3.09 \times 10^7$<br>(100) | $1.20 \times 10^6$<br>(81.2) | 0<br>(0)                     | 0<br>(0)                    |
| Ti 錯体 2             | $1.58 \times 10^7$<br>(100) | $4.17 \times 10^3$<br>(50.3) | 0<br>(0)                     | 0<br>(0)                    |
| Ti 錯体 3             | $1.12 \times 10^8$<br>(100) | 0<br>(0)                     | 0<br>(0)                     | 0<br>(0)                    |

( ) は生育菌数の log%

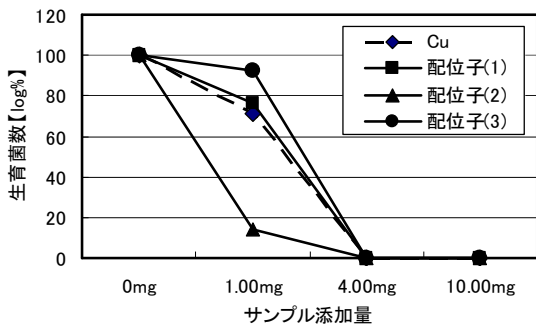


図4 Tp<sup>R</sup>配位子サンプル量における生育菌数の変化

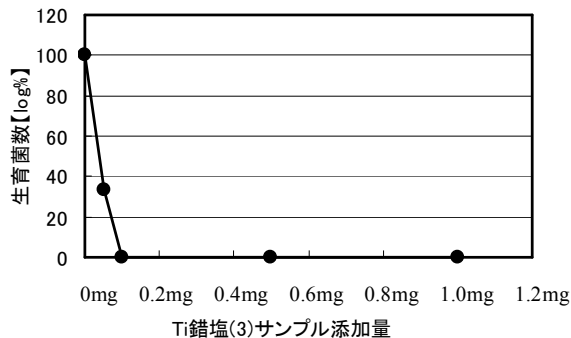


図6 Ti錯体3量における生育菌数の変化

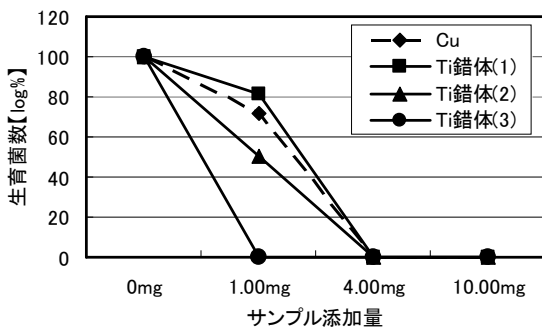


図5 Ti錯体サンプル量における生育菌数の変化

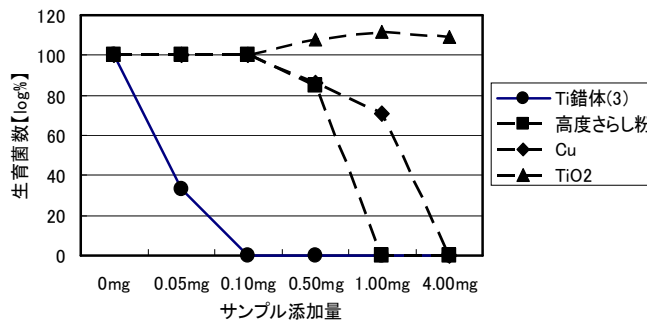


図7 Ti錯体3と既知抗菌剤との比較

### 3-3 *Legionella erythra* における Ti 錯体(3)と既知抗菌剤との比較

3-2において、Cuと各種配位子・錯体との比較をおこなったが、更に抗菌剤として広く使われているさらし粉、酸化チタンとの比較も行った (図7)。

既知抗菌剤の中では高度さらし粉が最も良い効果を示したが、Ti 錯体 3 はその 1/10 の使用量でも同等の殺菌効果を有している。また TiO<sub>2</sub> では、添加量が増加するに従い、逆に菌数が増える傾向が見られた。雑菌混入の可能性も考えられたため殺菌した TiO<sub>2</sub> を使用した実験も行ったが同様に増加した。光照射を行わない TiO<sub>2</sub> の実験を行っ

た場合は、10mg 添加まででは生育菌数の増加も減少もなく、効果が認められなかった。この原因については不明である。

### 3-4 *Escherichia coli* W3110 株における Ti 錯体の効果

このようにレジオネラ菌において、Ti 錯体は高い殺菌作用を示したので、一般的な細菌である大腸菌における効果を調べた(図8)。比較実験として Cu を添加したサンプルを示した。

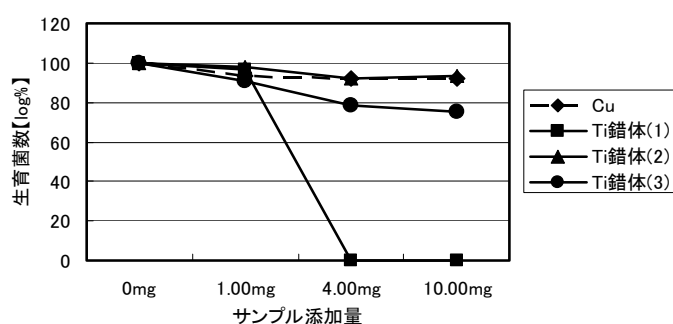


図8 大腸菌における Ti 錯体の効果

このように大腸菌において殺菌効果が知られている銅では、10mg 添加で生育 90%という殺菌効果があった。Ti 錯体 1 においては、4mg 添加で完全殺菌効果が得られた。データは示していないが配位子だけではこの濃度ではあまり効果がない。またレジオネラ菌に非常に効果があった Ti 錯体 3 は、銅以上の効果はあったが顕著なものではなかった。

以上、本研究の目的であったレジオネラ菌に効果的な錯体として、嵩高いアルキル置換基を有する Ti 錯体 3 が最も優れている殺菌剤であることが確かめられた。特にさらし粉の 1/10 量で同等の殺菌効果が得られることが確かめられ、今後多方面での応用が期待される。また Ti 錯体 1 でも大腸菌に多大な効果が確認されこちらも殺菌剤としての応用が可能であると思われる。

次に、錯体 1、2、3 を構造的に比較する。電子供与性のアルキル置換基を導入した  $Tp^1$  および  $Tp^3$  配位子からなる錯体 1、3 の方がレジオネラ菌への抗菌活性が高いことが分かった。一方、電子吸引性の  $CF_3$  置換基を導入した  $Tp^2$  配位子からなる錯体 2 では抗菌活性が落ち、歯科材料と同傾向にないことが伺えた。今後、Ti 錯体による抗菌活性を検討する際には、電子供与性基を有する  $Tp^R$  配位子を設計することが、1つの重要点であると考えられる。また、3-1 にも示したように3種の錯体については、未だ推定組成の段階であるため、各種分光機器を用いて同定を行うことも今後の検討課題として挙げられる。

本成果について、知的財産調査を行ったところ、特許取得が可能であると判断され JST (独立法人科学技術振興機構) の支援のもと特許出願を行った (特願 2003-316577)。

その後審査請求を行い、平成 22 年 1 月 15 日に特許権 (特許第 4438984 号) を取得した。今後は本錯体の有効性をアピールし、企業化を目指していきたい。

### 謝辞

本実験の遂行において、茨城高専物質工学科卒業生の木本憲氏、高橋早樹博士、佐々木香里氏に多大なるご協力を頂きましたことに感謝申し上げます。

### 参考文献

- 1) 公衆浴場法第 3 条第 2 項並びに旅館業法第 4 条第 2 項及び同法施行令第 1 条に基づく条例等にレジオネラ症発生防止対策を追加する際の指針について  
厚生労働省健康局長 健発第 1029004 号 平成 14 年 10 月公示 <http://www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/kenkou/legionella/021029-1.html>
- 2) S. Trofimenko, *Chem. Rev.* **1993**, 93, 943-980.
- 3) N. Kitajima; W. B. Tolmann, *Prog. Inorg Chem.* **1995**, 43,419.
- 4) N. Kitajima; T. Koda; S. Hashimoto; T. Kitagawa; Y. Moro-oka, *J. Am. Chem. Soc.* **1991**, 113, 5664-5671.
- 5) K. Fujisawa; M. Tanaka; Y. Moro-oka; N. Kitajima, *J. Am. Chem. Soc.* **1994**, 116, 12079-12080.
- 6) C. K. Gosh; J. K. Hoyano; R. Krentz; W. A. G. Graham, *J. Am. Chem. Soc.* **1989**, 111, 5480.
- 7) S. M. Gorun; Z. Hu; R. T. Stibrany; G. Carpenter, *Inorg. Chim. Acta.* **2000**, 297, 383-388.
- 8) Vickers, Brown and Garrity. *J. Clin. Microbiol.* **1981**, 13:714-719.
- 9) M. Akita; M. Hashimoto; S. Hikichi; Y. Moro-oka, *Organometallics* **2000**, 19, 3744-3747.
- 10) M. Akita; S. Hikichi, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **2002**, 75, 1657-1679.





## ジュニア走幅跳選手における助走歩数が跳躍距離、助走速度、踏切時間に及ぼす影響

木野村 嘉則\*・森 信二

The influences of run-up steps on jumping distance, approach velocity, and contact time in the junior long jumper

Yoshinori KINOMURA and Shinji MORI

**Abstract:** the purpose of this study was to report the changes of jump distance, approach velocity, and contact time in the long jump as increased the number of approach steps, and to obtain the implications of setting individual training task and individual optimal approach steps. Five specialized vocational high school students were employed as the subject. All subjects belong to track team on the school. They performed the long jump at various the number of approach steps. The long jump was started at 6 strides approach run and finished at from 18 to 24 strides. The jump distance was measured from measure, and the approach velocity and contact time were calculated from VTR images. As approach steps are increased, jump distance and approach velocity are increased and contact time is decreased. And there are significant correlation between approach velocity and jump distance ( $r = 0.884$ ,  $p < 0.01$ ), approach velocity and contact time ( $r = -0.572$ ,  $p < 0.01$ ), and contact time and jump distance ( $r = -0.619$ ,  $p < 0.01$ ). However, in some of individual term, there were not these significant correlations. For example, approach velocity is increased but jump distance is decreased and contact time isn't decreased. In that case, athlete should train for takeoff phase, such as improving takeoff motion or/and dynamic strength. We conclude that it is available for athlete and coach to use not only jump distance but also approach velocity and contact time when they decide their approach length and find their training tasks.

## 1 緒言

陸上競技の走幅跳は助走の後に片脚踏切を行い、そこで獲得される跳躍距離が競われる。走幅跳は助走で獲得した水平速度を踏切局面中に（減速を伴いながら）上向きに方向転換して身体を投射する運動である。そのため、多くの研究で走幅跳には助走速度が大きな影響を及ぼすことが報告されている（Hay and Miler, 1985 ; Hay, 1986 ; Hay et al., 1986 ; Hay, 1993 ; Lee et al., 1994 ; Moura et al., 2005 ; Lisa and Nicholas, 2006 ; 小山, 2009 ; 太田ほか, 2010）。

走幅跳の助走は任意の距離（歩数）を用いることが可能なため、選手は十分な助走速度を獲得できるような助走歩数を選択して競技会に臨んでいる。この際、岡野（1994）は疾走能力以上に長い助走を用いないよう、能力に見合った適切な長さの助走の利用を薦めている。また、Popov（1996）は選手の疾走能力に応じた助走歩数の目安を提示している。また、体育授業においても適切な助走歩数（距離）を見つけることを学習目標とした教材が含まれている（高橋ほか, 2001 ; 大修館書店編集部編, 2008）。

加えて、走幅跳では助走速度の獲得だけでなく、踏切局面中にできる限り少ない水平速度の減速で大きな鉛直速度を獲得しなければならない（Lee et al., 1994 ; Graham-Smith and Lees, 2005）。そのため、走幅跳では助走と踏切を効果的に組み合わせる必要がある。

この助走と踏切を組み合わせるための専門的トレーニングとして、試合よりも少ない助走歩数を用いた走幅跳が

一般的に行われている（村木ほか, 1982 ; 岡野, 1996）。これによって、助走で獲得する水平速度の大きさを調節し、助走と踏切の組み合わせに意識を集中することができる。その際、Popov（1987）はそれぞれの助走歩数における跳躍距離の目安を提示している。

しかし、実践現場では助走歩数を増やして獲得した高い助走速度に見合った跳躍距離の獲得が行われない場合がある（村木, 1982）。

また、走幅跳と同様に助走つきの片脚踏切を用いる走高跳においても、高い助走速度が跳躍高を改善すると信じられている（Dapena et al., 1990）が、実際には個々の選手に最適な助走スピードの存在が示されている（Young, 1995）。そして、助走速度が増加するほど、選手には踏切脚に高い筋力が要求される（Ae et al., 1983）。そのため、過度な助走速度は、踏切脚の関節の過度な屈曲や、踏切局面の前半中に“くずれ”を招き、踏切局面後半の脚の伸展が弱まるだろう（Dapena et al., 1990）。つまり、高い助走速度を利用するには高い動的筋力が要求される。これは走幅跳でも同様で、高い助走速度を獲得できるからと言って踏切を阻害するほど過度な速度の助走を用いるべきではないと考えられる。

高い助走速度の利用には踏切動作や動的筋力が重要となり、短助走から助走歩数を増加させた際の跳躍距離の推移には、これらの要因が影響を及ぼすと考えられる。

また、踏切時間は助走速度が高まるほど短くなり（Lisa and Nicholas, 2006 ; Daniel et al., 2007）、走幅跳の記録と

\* 筑波大学大学院人間総合科学研究科コーチング学専攻

の間に負の相関関係が認められる (Nigg et al., 1974). 助走速度が増加すると踏切時間が短くなり, 短時間でのパリストティックな力発揮が必要となる. 短時間でのパリストティックな力発揮を行う能力が乏しい選手は, 高い助走速度での踏切りに対応できないため, 踏切時間が短縮せず, 跳躍距離の増加が小さくなる可能性がある. そのため, 踏切時間の推移もあわせて考察する.

現在のところ, 助走歩数の決定に関する知見は Popov (1987, 1996) のように, 助走歩数ごとに助走速度や跳躍距離の目安を示しているだけである. また, 中学校および高校の体育においても, 助走歩数を変えた走幅跳を教材として用いるよう教科書に記載されている (高橋ほか 2001, 大修館書店編集部編 2008) が, 「助走距離を徐々に長くして, 最高スピード近くまで加速した地点で踏み切りができるように, スタート地点を決める。」 (高橋ほか, 2001,) や, 「15m くらいから始め, 2 歩ずつ助走を増やしていき適切な距離を見つける」 (大修館書店編集部, 2008) と記載されているのみである. そのため, 助走速度と踏切時間を基にして, 選手や生徒が取り組むべき課題の評価や, 最適な助走歩数を選択する方法に関する示唆を得ることは, 走幅跳のトレーニングや授業において有益であろう.

そこで本研究では走幅跳において助走歩数を増加させていった時の, 跳躍距離, 助走速度, 踏切時間の推移を検討し, 各選手に今後のトレーニング課題を提示し, また助走歩数を設定する際の示唆を提供することを目的とした.

## 2 方法

### (1) 対象者

高専陸上競技部員 5 名 (身長  $1.74 \pm 0.07\text{m}$ , 体重  $61.0 \pm 5.6\text{kg}$ , 年齢  $16.6 \pm 1.7$  歳, 走幅跳の自己最高記録 =  $5.65 \pm 0.75\text{m}$ ) が本研究に参加した. なお, 本研究の目的と実験条件は実験前に選手に説明され, 危険を感じた場合にはいつでも中止できる旨を説明し, 任意参加の同意を得た. なお, 対象者のプロフィールの詳細を表 1 に示した.

表 1 対象者のプロフィール

| 対象者 | 身長 (cm) | 体重 (kg) | 年齢 (歳) | 自己記録 (m) |
|-----|---------|---------|--------|----------|
| A   | 168     | 54      | 15     | 4.80     |
| B   | 170     | 57      | 16     | 5.60     |
| C   | 184     | 66      | 17     | 5.07     |
| D   | 169     | 61      | 17     | 6.56     |
| E   | 178     | 67      | 18     | 6.24     |

### (2) データの収集と分析

実験試技には, セットスタート方式による走幅跳を 6 歩助走から 2 歩ずつ増加させていき, 跳躍距離が低下するまで助走を伸ばしていった. 試技は 18 歩まで行った対象者が 1 名, 20 歩が 1 名, 24 歩までを 3 名の対象者が行った. 各試技に際しては, 疲労の影響のないように試技間に

十分な休息をとらせた. 各助走歩数の試技を 2 本行った後, さらにその助走歩数の試技を行うことを希望した対象者は, 任意の本数 (1, 2 本) を行った. その際, 本研究では踏切位置に関する指定は行わず, 任意の地点からの踏切を許可した.

跳躍距離は (踏切板からではなく) 選手の踏切足のつま先と砂場の着地地点の間の水平距離とし, 各助走歩数における跳躍の中で最も記録の良かった 1 試技を分析対象とした.

助走速度は踏切接地時の身体重心の水平速度とし, 後述する方法で身体重心の 2 次元座標を算出し, 時間微分して求めた.

身体重心の 2 次元座標算出用にデジタルカメラ (EX - FC150, Casio 社製) により毎秒 120 フレームで踏切板側方から踏切動作を撮影した. 得られた画像について, ビデオ動作解析システム (Frame-DIAS II : DHK 社製) を用いて身体 23 点 (両上肢の手中骨・手首・肘・肩峰突起, 両下肢の足先・母指球・踵・外果・腓骨頭・大転子, 頭頂部, 耳珠点および胸骨上縁) と助走路の両側に 2m 間隔で設置した較正マーク (対象者の周囲 4 点) をデジタル化した. その際, 身体 23 点の座標は較正マークをもとに実長換算した後, 残差分析法 (Wells and Winter, 1980) によって最適遮断周波数 7.0~22.5Hz を決定し, Butterworth digital filter を用いて平滑化した. 身体重心の 2 次元座標は, 阿江 (1996) の日本人競技者による身体セグメントパラメータを用いて算出された.

踏切時間を算出するためにデジタルカメラ (EX - F1, Casio 社製) により毎秒 300 フレームで踏切板の側方から踏切足を撮影した. 踏切時間は踏切時に選手が最初に地面と接したコマから最後に地面と接したコマとし, 画像から読み取った.

### (3) 統計

相関分析にピアソンの積率相関係数を用い, 有意水準は 5% 未満とした.

## 3 結果

表 2 に各助走歩数の試技における, 跳躍距離, 助走速度および踏切時間の平均値を示した. さらに表 3 には, 跳躍距離, 助走速度, 踏切時間および助走歩数の相関行列を示した. 助走歩数の増加とともに跳躍距離は増加し ( $r = 0.375$ ,  $p < 0.01$ ), 全対象者が参加した 18 歩助走までの試技では 14 歩, 16 歩助走の試技がピークとなっている. また, 助走速度も同様に増加し ( $r = 0.676$ ,  $p < 0.01$ ), 全対象者が参加した 18 歩助走の試技まで増加し続けている. 踏切時間の平均値は 0.147 から 0.157sec の間で推移し助走歩数との間には有意な関係は認められなかったが ( $r = -0.201$ ,  $p = 0.93$ ), 助走速度 ( $r = -0.572$ ,  $p < 0.01$ ) およ

表 2 各助走歩数の試技における跳躍距離、助走速度、踏切時間

|            | 助走歩数 | 6歩    | 8歩    | 10歩   | 12歩   | 14歩   | 16歩   | 18歩   | 20歩   | 22歩   | 24歩   |
|------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|            | n    | 5     | 5     | 5     | 5     | 5     | 5     | 5     | 4     | 3     | 3     |
| 跳躍距離 (m)   | 平均値  | 5.19  | 5.25  | 5.48  | 5.69  | 5.77  | 5.73  | 5.57  | 5.77  | 6.04  | 5.93  |
|            | SD   | 0.44  | 0.59  | 0.59  | 0.55  | 0.38  | 0.71  | 0.74  | 0.71  | 0.49  | 0.71  |
| 助走速度(m/s)  | 平均値  | 7.24  | 7.94  | 8.28  | 8.42  | 8.70  | 8.71  | 8.73  | 8.73  | 8.97  | 8.95  |
|            | SD   | 0.32  | 0.37  | 0.53  | 0.34  | 0.34  | 0.50  | 0.49  | 0.59  | 0.69  | 0.81  |
| 踏切時間 (sec) | 平均値  | 0.157 | 0.155 | 0.157 | 0.152 | 0.149 | 0.149 | 0.147 | 0.151 | 0.148 | 0.152 |
|            | SD   | 0.009 | 0.017 | 0.018 | 0.020 | 0.009 | 0.011 | 0.014 | 0.013 | 0.017 | 0.017 |

び跳躍距離 ( $r = -0.619, p < 0.01$ ) と有意な負の相関関係が認められた。

距離の獲得のためには、水平速度を獲得し短時間で踏切ることが有効である。そこで、これらの全体傾向での関係を個人内で検討することとした。

#### 4 考察

##### (1) 跳躍距離、助走速度、踏切時間の推移の全体傾向

本研究では 6 歩助走から助走を伸ばしていったときの跳躍距離、助走速度、踏切時間を調査した。助走歩数が増加すると、跳躍距離および助走速度が増加した(表 2, 3)。また、踏切時間は助走歩数が増加しても減少しなかったが、助走速度と有意な負の相関関係 ( $r = -0.572, p < 0.01$ )、跳躍距離と有意な正の相関関係が認められた ( $r = 0.619, p < 0.01$ ) (表 3)。

跳躍距離は 14, 16 歩助走をピークにしており、助走速度も 14 歩あたりからピークを迎えた。このことは、助走歩数の増加によって加速区間が延長することで高い助走速度を獲得できたために、跳躍距離が増加したことを示すが、対象者の疾走能力から 14 歩以上の助走では助走速度の獲得が有効に行われなかったことを示す。なお、20 歩および 22 歩における跳躍距離、助走速度の増加および踏切時間の減少は、競技力の高い対象者のみが行ったためである。

本研究で得られた、助走歩数を増加させた時の跳躍距離、助走速度、踏切時間の推移は先行研究 (例えば Nigg et al., 1974) の結果を支持するものであり、跳躍

##### (2) 個人内の跳躍距離、助走速度、踏切時間の推移

図 1 および 2 に助走速度と跳躍距離および助走速度と踏切時間の関係を示した (回帰直線は全体傾向を示している)。全体傾向として、これらの関係には相関関係が認められた。しかし、個別には、前節で示した関係が適切に現れない対象者 (例えば、高い助走速度の利用が困難な対象者など) がいることが想定された (そして、トレーニング課題を示す可能性がある)。そこで、表 4 に個人内における助走速度と跳躍距離、踏切時間の間の回帰分析を行った際の相関係数を示し、危険率 5%未満の場合には回帰直線式を示した。

助走速度と跳躍距離との間の有意な正の相関関係は全ての対象者に認められたが、回帰係数は全体傾向より小さな値となった (表 4)。これは、対象者間における動的筋力の違い (Lisa and Nicholas, 2006) や踏切動作 (村木, 1982) などに起因すると考えられており、一般的な傾向である。しかし、対象者 C の回帰係数は他の対象者よりもとくに小さな値である。対象者 C は助走速度を他の対象者よりも効果的に利用できていないことが示唆される。

助走速度と踏切時間の間の負の相関関係は対象者 B と E のみに認められ、対象者 A, C, D には認められなかった (表 4)。走幅跳の踏切は、踏切脚の足部支持点と身体重心を結んだ仮想の線分が前方回転 (しながら縮伸) して離地するモデルで表わせる (Jacobs and Schenau, 1992)。モデルから踏切時間を説明すると、踏切局面中に支持点の回りを回転する角度と、その角速度で決定されることになる。つまり、モデルの回転する角度を小さくし、その角速度を高めると踏切時間が短縮される。その中で、身体の角速度は助走速度との関係が強いと考えられる。したがって、助走速度の増加は、踏切時間の短縮を導くはずである。ただし、助走速度が増加しても、接地時の身体を過度に後傾し、踏切局面中の減速が大きくなる (Seyfarth et al., 1999) と、踏切時間が短縮されない可能性があり、太田ほか (2010) は踏切局面中の減速と跳躍距離との間に負の相関

表 3 各パラメータの相関行列

|      |              | 跳躍距離  | 助走速度  | 踏切時間  | 助走歩数  |
|------|--------------|-------|-------|-------|-------|
| 跳躍距離 | Pearsonの相関係数 | 1     | .844  | -.619 | .375  |
|      | 有意確率 (片側)    |       | .000* | .000* | .006* |
| 助走速度 | Pearsonの相関係数 | .844  | 1     | -.572 | .676  |
|      | 有意確率 (片側)    | .000* |       | .000* | .000* |
| 踏切時間 | Pearsonの相関係数 | -.619 | -.572 | 1     | -.201 |
|      | 有意確率 (片側)    | .000* | .000* |       | .093  |
| 助走歩数 | Pearsonの相関係数 | .375  | .676  | -.201 | 1     |
|      | 有意確率 (片側)    | .006* | .000* | .093  |       |

\* :  $p < 0.01$

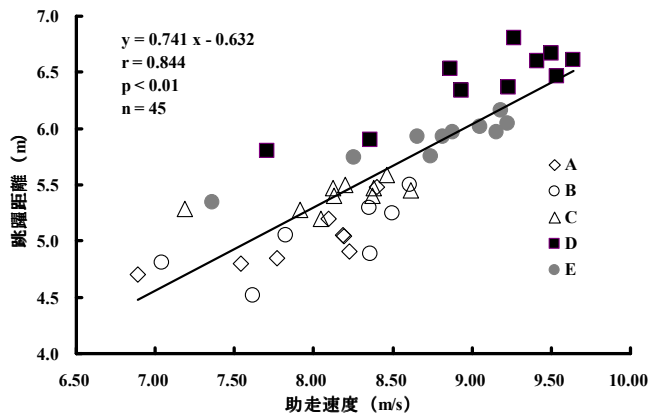


図 1 助走速度と跳躍距離の関係

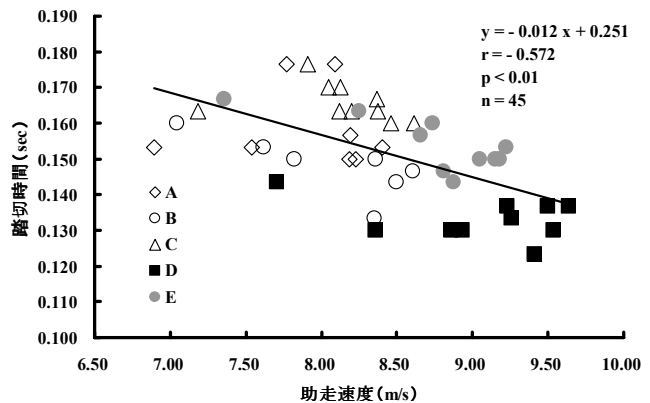


図 2 助走速度と踏切時間の関係

表 4 各対象者における跳躍距離, 助走速度, 踏切時間の関係

| 対象者           | 独立変数 | 従属変数    | r      | p      | 回帰式                    | 対象者            | 独立変数 | 従属変数    | r      | p      | 回帰式                    |
|---------------|------|---------|--------|--------|------------------------|----------------|------|---------|--------|--------|------------------------|
| A<br>(n = 8)  | 助走速度 | vs 跳躍距離 | 0.771  | < 0.05 | $y = 0.387x + 1.944$   | D<br>(n = 10)  | 助走速度 | vs 跳躍距離 | 0.875  | < 0.01 | $y = 0.471x + 2.147$   |
|               | 助走速度 | vs 踏切時間 | 0.040  | n.s.   |                        |                | 助走速度 | vs 踏切時間 | -0.346 | n.s.   |                        |
|               | 踏切時間 | vs 跳躍距離 | 0.650  | n.s.   |                        |                | 踏切時間 | vs 跳躍距離 | -0.308 | n.s.   |                        |
| B<br>(n = 7)  | 助走速度 | vs 跳躍距離 | 0.732  | < 0.05 | $y = 0.428x + 1.600$   | E<br>(n = 10)  | 助走速度 | vs 跳躍距離 | 0.952  | < 0.01 | $y = 0.388x + 2.495$   |
|               | 助走速度 | vs 踏切時間 | -0.740 | < 0.05 | $y = -0.011x + 0.236$  |                | 助走速度 | vs 踏切時間 | -0.773 | < 0.01 | $y = -0.010x + 0.244$  |
|               | 踏切時間 | vs 跳躍距離 | -0.653 | n.s.   |                        |                | 踏切時間 | vs 跳躍距離 | -0.797 | < 0.01 | $y = -24.241x + 9.619$ |
| C<br>(n = 10) | 助走速度 | vs 跳躍距離 | 0.610  | < 0.05 | $y = 0.181x + 3.933$   | 全体<br>(n = 45) | 助走速度 | vs 跳躍距離 | 0.844  | < 0.01 | $y = 0.741x - 0.632$   |
|               | 助走速度 | vs 踏切時間 | -0.281 | n.s.   |                        |                | 助走速度 | vs 踏切時間 | -0.572 | < 0.01 | $y = -0.012x + 0.251$  |
|               | 踏切時間 | vs 跳躍距離 | -0.690 | < 0.05 | $y = -15.092x + 7.904$ |                | 踏切時間 | vs 跳躍距離 | -0.619 | < 0.01 | $y = -26.525x + 9.635$ |

関係を報告している. しかし, 本研究では踏切動作の分析を行っていないため, 今後詳細に検討する必要がある.

跳躍距離と踏切時間の間の負の相関関係は対象者 C, E において認められ, 対象者 A, B, D には認められなかった (表 4). 助走歩数が増加すると助走速度が増加し, 踏切時間が減少する. 踏切時間が減少するため, 踏切局面において短時間の力発揮を行えなければ, 効果的な鉛直速度の獲得が行われず跳躍距離が増加しない可能性がある. Bobbert (2001) と Kurokawa et al. (2001) は助走つきの片脚跳躍の踏切時間は, 助走速度が増加するほど短くなり, さらに弾性エネルギーの再利用の重要性も増していくと述べている. つまり, 走幅跳では地面との短い接地時間中に効果的にパワーを発揮する必要がある. そのため, Daniel et al. (2007) は, 助走速度増加時の短い踏切時間に特異的な専門的力発揮をする必要があると述べている. 図子ほか (1993) は 30cm の台上から落下し, 即座に跳びあがるリバウンドドロップジャンプ (RDJ) を, 田内 (2005) はその場での連続 5 回ジャンプであるリバウンドジャンプ (RJ) を評価し, 跳躍選手が短い接地時間で高く跳ぶことができたことから, 短時間で力発揮能力に優れることを報告し, この能力はプライオメトリックトレーニングのような専門的トレーニングによって向上すると示唆している. さらに, 小学生の走幅跳においては, 大宮ほか (2009) や木越 (2010) は, 短時間で力発揮の指標である RJ-index (その場での RJ の跳躍高を接地時間で割ったもの) (田

内, 2005) と走幅跳の記録との間に正の相関関係を報告している. これらの知見から, 高速の助走に特異的なバリスティックな力発揮の遂行能力を向上させることが短い踏切時間の中で大きな跳躍距離を獲得するのに必須であり, プライオメトリックトレーニングのような専門的トレーニングによってこの能力を高めることの重要性を示唆している.

興味深いことに, 対象者 C の踏切時間は助走速度との間に負の相関関係が認められなかったにもかかわらず, 跳躍距離との間には負の相関関係が認められている. これは, 踏切時間が短いときに, 短時間で効果的なパワー発揮が行うことができたため跳躍距離が獲得できたことを示しそうである. ただし, 助走速度と跳躍距離の回帰係数が小さく助走速度を効果的に利用できなかったと考えられる. これらの結果は, 踏切時間は助走速度からの影響を受けるが, 助走速度と踏切時間が, ある程度独立して跳躍距離に影響を及ぼすことを示唆している.

本研究では, 跳躍距離, 助走速度, 踏切時間の個人内の関係は全体傾向と異なる傾向を示した. 効果的な踏切を行い, 大きな跳躍距離を獲得するための課題がこれらの分析によって検討できる可能性が示された.

**(3) 各選手のトレーニング課題と助走歩数を設定する際の留意点**

トレーニング (や授業) においては, 選手 (や学生) の



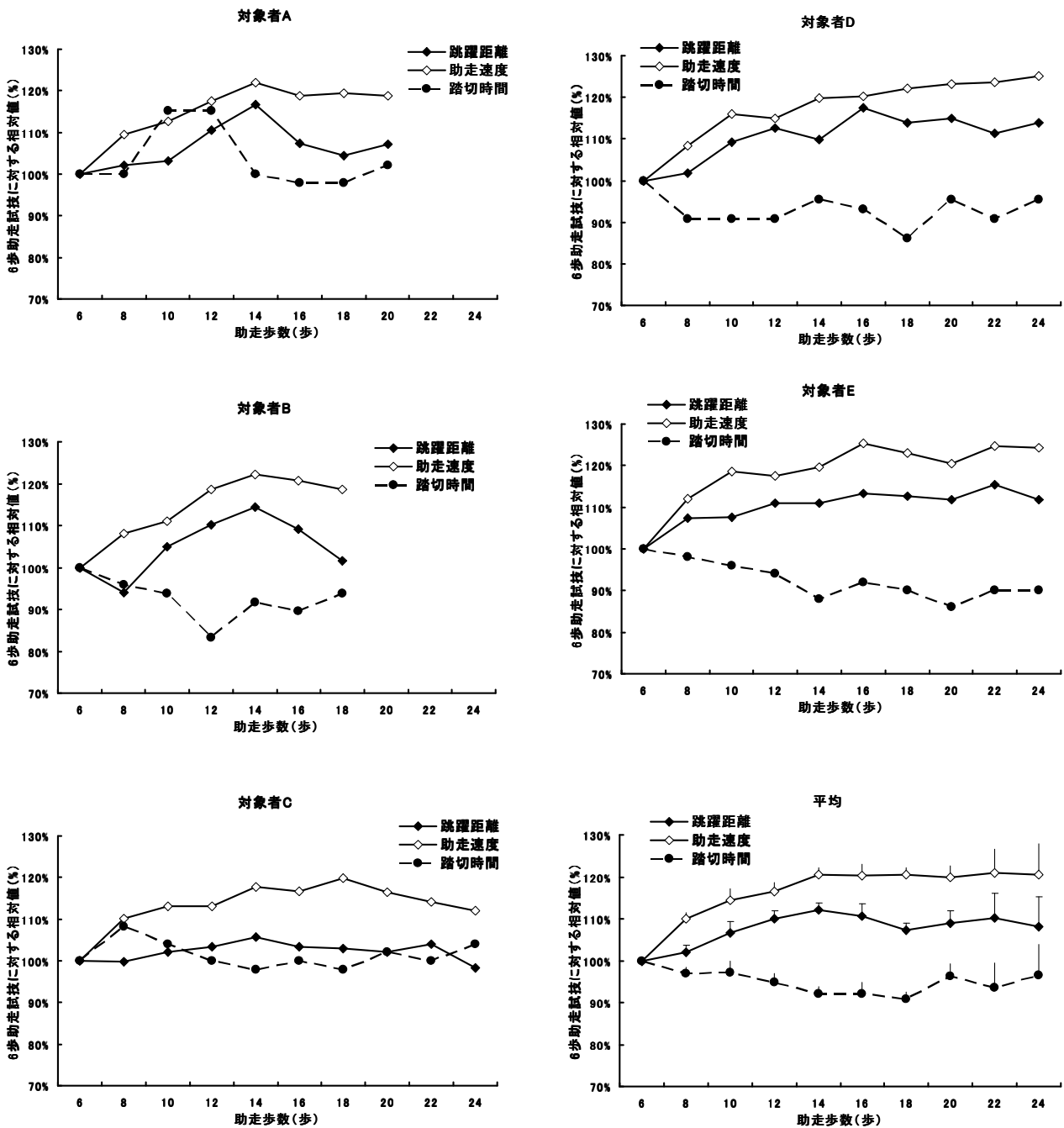


図 3 各助走歩数の跳躍距離、助走速度、踏切時間の相対値 (6歩助走を100%とした)

パフォーマンスを分析する。良いトレーニングにはトレーニング課題の検討が必須となり、最適な助走歩数の設定に関する情報は有益であろう。そのため Popov (1987, 1996) や木越 (2010) は各助走歩数における跳躍距離の目安、疾走速度と助走歩数の目安を提示した。しかし、これらの目安だけでは、選手のパフォーマンスが適切でなかった場合のトレーニング課題の検討が行えない。

そこで、本研究では、対象者の跳躍距離が減少傾向を示すまで助走歩数を増加させ続け、助走歩数ごとのこれらの推移を個人内で検討した。図3に個人ごとに跳躍距離、助走速度および踏切時間の推移を示した。なお、それぞれの

パラメータは6歩助走の値を100%とした相対値で示した。

各対象者の助走速度の推移を見ると、対象者 D 以外は助走速度の頭打ちや低下が起こる歩数が分かる。対象者 A、B は14歩、対象者 C は18歩、対象者 E は16歩助走において最も高い助走速度を達成し、現状の疾走能力ではこれ以上の助走歩数を用いることの利点が少なそうである。対象者 A と B はこの歩数で最も大きな跳躍距離を獲得し、その後停滞した。ただし、対象者 B は14歩助走まで踏切時間が減少しており、助走速度の増加とともに踏切時間を減少させていたが、対象者 A の踏切時間にはほとんど減少が認められない。対象者 B は今後さらに疾走能力を



高め、高い助走速度での跳躍を試みるものが課題となり、対象者 A は疾走能力だけでなく、踏切時間を減少できるような踏切動作の修得や、バリスティックな力発揮の能力の向上も課題とすべきであろう。

また、助走速度が増加しても跳躍距離が増加しない推移のパターンが対象者 C の 14 歩助走以降と対象者 D の 16 歩以降に認められ、対象者 C は踏切時間の減少がほとんど見られなかった。これは助走速度を高めても、その助走速度を利用していきないうことを示し、この二人は助走速度を有効に利用できるような踏切動作の修得や、SSC 遂行能力の向上が跳躍記録向上の課題となり、高い助走速度で踏切る利点は現状では少なそうである。

対象者 E に関しては、16 歩助走以降は 3 つのパラメータが安定している。実験後の内省報告において、16 歩助走以降の試技では、助走前半での加速を緩やかにして、踏切前に踏み切りやすいリズムを作ることを心がけたと述べていた。22 歩助走での跳躍距離は踏切へのリズムが上手く形成されたのかもしれない。今後の課題としては、疾走能力を高めて、16 歩助走以降においても助走速度が高まるようにすべきであろう。

このように、助走歩数ごとの記録と助走速度の推移 (Popov 1987, 1996 ; 木越, 2010) に加えて、踏切時間の推移を評価することで、スプリント能力の改善に取り組むべきか、踏切局面の改善に取り組むべきかの指針となる可能性が提示された。助走歩数ごとの記録だけでなく、助走速度や踏切時間を合わせて考察することが、選手や学生のトレーニングをより合目的にするだろう。

今後の課題として、助走速度に関しては、短距離走における最大速度を測定し助走速度と比較し、踏切に関しては、踏切動作の分析や動的筋力を測定することによって、さらに有用な知見が提供できる可能性がある。

## 5 結論

本研究では、助走歩数を増加させていった時の跳躍距離の推移を評価するために、助走速度および踏切時間を測定した。助走歩数の増加は助走速度を増加させ、助走速度の増加は踏切時間の減少と跳躍距離の増加に影響する。しかし、個人内においては、これらの関係が必ずしも認められるわけではなく、個人内の課題が疾走能力にあるのか、踏切の能力あるのか検討する必要がある。これらのパラメータの評価から、トレーニング課題や最適な助走歩数の設定に有益な情報を得られる可能性がある。

## 参考文献

1) Ae, M. Shibukawa, K. Tada, S. and Hashihara, Y. (1983) Biomechanical analysis of the segmental contribution to the take-off of the one-leg running jump for height. In, Matsui, H., and Kobayashi, K. (eds.),

Biomechanics VIII-A & B : proceedings of the Eighth International Congress of Biomechanics, Nagoya, Japan, Champaign, Ill., Human Kinetics Publishers, pp. 737-745.

2) 阿江通良 (1996) 日本人幼少年およびアスリートの身体部分慣性特性. Japanese journal of sports science. 15 (3) : 155-162.

3) Bobbert, M. F. (2001) Dependence of human squat jump performance on the series elastic compliance of the triceps surae : A simulation study. The journal of experimental Biology, 204, 533-542.

4) Daniel, J. Ham, Wade, L. Knez, and Warren, B. Young (2007) A deterministic model of the vertical jump : Implications for training. Journal of strength and conditioning research. 21 (3) : 967-972.

5) Dapena, J. McDonald, C. and Cappaert, J. (1990) A Regression Analysis of High Jumping Technique. International Journal of Sport Biomechanics, 6 (3) : 246-261.

6) Graham-Smith, G. and Lees, A. (2005) A three-dimensional kinematic analysis of the long jump take-off. Journal of sports sciences, 23 (9) : 891-903.

7) Hay, J. G. and Miller, J. A. (1985) Technique used in transition from approach to takeoff in the long jump. International journal of sport biomechanics, 1: 174-184.

8) Hay, J. G. (1986) The biomechanics of the long jump. Exercise sport science review, 14 : 401-446.

9) Hay, J. G. (1993) Citius, altius, longius (faster, higher, longer) : the biomechanics of jumping for distance. Journal of biomechanics, 26 supply 1 : 7-21.

10) Jacobs, R., and Schenau, G, J, I. (1992) Intermuscular coordination in a sprint push-off. Journal of a biomechanics, 25 (9) : 953-965.

11) 木越清信 (2010) 陸上運動のジュニア (小学生) 指導ガイドライン. 月刊陸上競技 1 月号. 講談社. pp134-136.

12) 小山宏之 (2009) 走幅跳の助走スピードの標準値. 月刊陸上競技 11 月号. 講談社. pp158-160.

13) Kurokawa, S, Fukunaga, T. and Fukashiro, S. (2001) Behavior of fascicles and tendinous structures of human gastrocnemius during vertical jumping. Journal of applied physiology, 90 : 1349-1358.

14) Lee, A., Graham-Smith, P. and Fowler, N. (1994) A biomechanical analysis of the last stride, touchdown, and takeoff characteristics of the men's long jump. Journal of applied biomechanics, 10 : 61-78.

15) Lisa, A, B. and Nicholas, P, L. (2006) Changes in long jump take-off technique with increasing run-up speed. Journal of sports science, 24 (8) : 889-897.

16) Moura, N. A., Paula Moura, T. F., and Borin, J. P.

(2005) Approach speed and performance in the horizontal jump : What do Brazilian athletes do? *New studies in athletics*, 3 : 43-48.

- 17) 村木征人ほか編 (1982) 現代スポーツコーチ実践講座 2 陸上競技 (フィールド). ぎょうせい.
- 18) Nigg, B., P. (1973) *Sprung, Springen, Sprunge*. Zurich : Juris Verlag:pp. 56-74 (in Hay, 1986).
- 19) 岡野進 (1996) 陸上競技ジャンプトレーニング・マニュアル. ベースボール・マガジン社. pp73-75.
- 20) 大宮真一・木越清信・尾縣貢 (2009) リバウンドジャンプ能力が走り幅跳び能力に及ぼす影響 : 小学校6年生を対象として. *体育学研究*, 54 : 55-66.
- 21) 太田洋一・中村力・浦田達也・伊藤章 (2010) 簡易な測定法を用いた走幅跳におけるパフォーマンスと助走・踏切速度の関係. *コーチング学研究*, 24 (1) : 27-34.
- 22) Popov, V (1987) Specific exercises in the long jump. *Modern Athlete and Coach*. 25 (1) : 14-17.
- 23) Popov, V (1996) How to improve run-up speed and precision. *Modern Athlete and Coach*. 34 (2) : 18-21.
- 24) Seyfarth, A. Friedrichs, A. Wank, R. and Blickhan, R. (1999) Dynamics of the long jump. *The journal of biomechanics*, 23 : 1259-1267.
- 25) 大修館書店編集部編 (2008) *アクティブスポーツ 2008* (総合版). 大修館書店. p55.
- 26) 高橋健夫, 佐藤佑, 岡出美則, 宮本政明, 長谷川悦示, 伊藤宏, 池田瀬, 大橋久芳, 熊沢直孝 (2001) *ビジュアル新しい体育実技中学校全*. 東京書籍. p65.
- 27) 田内健二 (2005) 大きなパワーが要求される跳躍運動における動作習熟プロセス. *体育の科学*, 55 : 512-516.
- 28) Wells, R. P. Winter, D. A. (1980) Assessment of signal and noise in the kinematics of normal, pathological and sporting gaits. *Human locomotion I* : 92-93.
- 29) Young, W. (1990) Specificity of strength development for improving the takeoff ability in jumping events. *Modern Athlete and Coach*, 33 (1) : 3-8.
- 30) 関子浩二・高松薫・古藤高良 (1993) 各種スポーツ選手における下肢の筋力およびパワー発揮に関する特性. *体育学研究*, 38 : 265-278.

ていたところ、非常勤講師茂又茂紀先生の助言を得、「推薦図書一覧」を作成することにした。この一覧はA4版に「NO」「書名」「作者」「出版社」「分野」の欄を設け、「分野」には「随筆」「自然科学」「小説」「評論」の分類を行った。この分類は、大雑把ではあるが学生の関心・興味別に分類し、読書に入り易いようにしたものである。

因みに推薦図書には『数学の楽しさ』（矢野健太郎、新潮社）、『青春ロボコン―理数系の甲子園―』（古厩智之、岩波ジュニア新書）、『零の発見』（吉田洋一、岩波新書）、『ブンとフィン』（井上ひさし、新潮文庫）、『モモ』（ミヒヤエル・エンゲ、岩波書店等々の書名を掲載した。中でも『数学の楽しさ』や『零の発見』は学生達に好評であった。

次に学生が行った読書という行為を無駄にさせることなく、何らかの形で残しその努力に対し掲揚すべきであると考えた。読書のもたらす効果は言うまでもないが、更に読書の効果を上げるため、また作品を読み、その作品の意図を明確化するためA4版の「読書ノート」を作成した。この「読書ノート」は、作品1枚に「年組」「番号」「所属科」「氏名」「書名」「著者名」「出版社」「読み始め時期～読み終わり時期」「あらすじ・要旨」「感動した場面や共感できる意見の書写・感想」の欄を設けたものである。特に「あらすじ・要旨」では、作品の全体把握能力の育成を目指したものであり、「感動した場面や共感できる意見の書写・感想」では、作者の表現や描写、主人公の発言等を「読書ノート」上に文字化することによって、学生自身に豊かな表現力を養ってもらいたいと意図したものである。この手法は指導者側にとっては関心分野や得手不得手分野を補完するのに最適であり、また学生側にとっては特別な訓練や勉強を経ずして優れた言葉や表現力を養うのにも、最適な方法であると思われる。

「読書ノート」は年末に国語科教員に提出し、国語科では年間30冊以上を読んだ学生を読書王賞、20冊以上は読書ゴールド賞、15冊以上は読書シルバー賞、10冊以上は読書ブロンズ賞として表彰している。特に平成20年度に94冊、平成21年度には104冊を読了した学生がでるなど、地道ではあるが熱心に読書に取り組んでいる学生の存在を裏付けている。実際、「読書ノート」をつけることは、労力のいる仕事（『読書ノート』を付けるのが大変。読むだけならたくさん読んだ）であり、「読書ノート」を付けずに読書だけで済ませている学生を含めると更に読書人口の底辺は拡大する。実際「読書ノート」への記載作業は大変であるだけに、これを実践した学生達からは「作家の表現力が勉強になる」「（作品の内容をまとめることにより）読んだ作品が明確に頭に残った」という感想が聞かれた。

こうした国語科教員による地道な6年間に及ぶ読書運動及び「読書ノート」の実践が、本校学生の文章力向上に繋がりを、そして文芸表現に関心を抱く学生達を刺激し、ひいては文芸同好会の発足に至ったものと考えられる。

#### 4 文芸同好会の役割と使命

文化・思想の興隆と衰退は千年単位で考えるべきであり、この視点は世界も日本も変わらないであろう。紀元前300年前後には今日の文化・思想の系譜に連なる、人類史の機軸となるべく総ての文化・思想が勃興した。そして第1の千年の興亡を経て、現在は第2の千年の衰退期に入っている。

第3の千年を迎えた現在、人類は人間を手段化しない真の人間主義に裏打ちされた文化・思想の台頭を渴望している。しかし現実的には文化・思想はグローバル化の波を克服できずにおり、文化と文化、思想と思想の衝突の中で次第に閉塞感を募らせているのが実情である。則ち人類に課せられた喫緊の課題とは過去の文化・思想的遺産を検証及び継承し、新たな文化・思想を再構築する必要に迫られているのである。

こうした状況下にあつて、私たち文芸同好会は、通時的には現代における同好会の存在意義と会誌発行の意義を問いながらも、共時的には自己の生命空間から、言葉を磨きながら言葉を以て固有で普遍的な文化現象を創り出す作業に徹しなければならぬであろう。なぜなら言葉こそイマジネーションの根源であり、そして総ての行為の基盤は言葉にあるからであり、人間全体の関係性の保持、つまり人間を保持する文化機能を維持するのが言葉だからである。

本会の主たる活動目的は、同好会誌「地雷」の発行であり、最低年1回の発行を目標としている。

会誌発行の意義に関しては、特に対外的位置における会誌の存在意義について考えてみると、短期的には読書量の低下が著しい本校生に対し、読書の魅力や創作の楽しさ、読書の意義と個人段階における思索の意味、そして活字伝達による文化の重要性を発信していると考えられる。また長期的には「一瞬一瞬、自己が生きた時代を呼吸し、その自己が生きた時代を作品に仮託した学生達の生き様は、本校学生の文芸思想史であり、更には一瞬の風景を捉え、その風景を自己の内面との対話により、自己の言葉に置き換えていく作業、即ち一瞬の中に永遠を見、その永遠との出会いにより自己を高めていこうとする作業と心の歴史、またその成長過程を文芸同好会誌は秘めているのではないだろうか。こうした心の軌跡の積み重ねが文芸同好会誌であり、大げさに言えば時代の一断面を切り裂いた文芸思潮史であり、直近においては本校の文芸史の証明役でもある。

文芸誌であるから、本来は毎回読書会を開催し、何度も何度も討論会を開催し、その討論の中で醸成されたイメージネーション及び創作意欲をもって作品の執筆に取り組むのが最も理想とされるのだが、しかし実際物理的に厳密に行うことは不可能である。そのため本校においては個人段階における思索活動と課外活動室における同好会会員同士による相互研鑽に依って作品及び文芸同好会誌が作成されていく。いわば本校の作品及び同好会誌は個と集団の往復作業により完成されている状態である。

## 2・3 最近の活動状況

平成21年度は創作能力の向上を目的に5月、6月、7月、8月、9月、11月の6回(各回60分間)に亘り、鈴木僚が担当講師として小説の創作実践講座を開催した。特に前半の講義内容は小説を執筆する際に、全体として一体何を指すのか、執筆の方向付け、物語を作る上で何が必要なのか、書き出しの際のルール、構想の組み立てと小説構築の配分(一話題に対し構想3時間・執筆1時間)等々についての講義を行い、後半は、作品に対する実践指導及び添削等の具体的な講座を行った。この講座は、創作に関心はあるが、具体的には執筆作法を知らない初歩段階の学生達に本格的な創作手法を教えようというのが発案であり、瀬尾、桐生、鈴木が協議の上、企画し実行したものである。この講座に参加した学生達からは「大変参考になった」「業し

かった」「全く知らないことを教えてくれて大変勉強になった」「小説を書いてみようという気になった」等々の感想が聞かれた。この講座を実施したことにより、文芸同好会員の間には創作への挑戦意欲と自信、小説展開へのイメージネーションが広がったようである。

## 3 読書運動及び読書ノートとの関連

次に文芸同好会に関する紹介事情とは直接的な関連性は有しないが、しかし本同好会発足の大きな要因になったものであるだけに、この点の記載を欠くことは画竜点睛を欠くことにもなり、本論を羽翼する意味でも、本校の読書運動について触れておくことにする。

学生達が文芸の創作に興味関心を示すことになったのは、6年前から実施している本校の5分間読書運動が根幹にある。この読書運動を3名の国語科教員が、推進することにより、読書の定着化が図られ、読書への関心が地下水脈として流れ、その中でも特に表現に関心の高い学生達が地下水脈を破って地表に表出した。

この運動を発足させる契機となったのは、本校生の読書量の低下による文章力と漢字力の衰退に対し国語科教員達が憂慮したからである。具体的には、提出レポートや記述式問題、更には就職・進学の際の志願理由書に誤字脱字や論旨の乱れが目立ったからである。

但し本校生の読書量が低下したとはいえ、「(高専の)勉強が大変」「(膨大な量の)レポートが大変」という高専生独自の諸事情と個人的な諸条件が存在しており、現代学生の読書量が低下しているといっても、こうした条件を加味しなければならない点もあり、一般的傾向とは軌を一にしない面があるかもしれない。しかし先に指摘した事項の弱体化は紛れもない事実であり、この面での対策及び強化が望まれていた。そこで国語科教員同士が協議し、弱点の補完と強化策を考案したのが、1年生から3年生までに対し5分間の読書運動を実施しようとするものであった。この読書運動は国語科教員が授業開始前の5分間(本校の1時間は60分)に読書をさせるもので、この運動を定着させることにより学生達の読書量の増加と読書習慣の定着化を図ろうというものであった。しかし読書量には個人差があり、本を読む学生と読書をしていない学生との差が甚だしく、この落差を埋めるため、読書を楽しむ推進する方法はないかと思案し



に継続的で熱心な意欲を示している。特に学生達は、自己の内面における創作活動の結果が、機関誌の主力作品として結実することに喜びを感じており、また内面に展開する生命空間が活字として現実的空間に展開されることに充実感を感じている。特に活字の持つ文化性や精神性、情報発信力や主張性、継続性、検証性、文化保持力等々の活字の諸方面に発揮される文化力に魅力を感じているようである。それは「自分の文章が活字になり、(会誌を)友人に読んでもらうのが楽しみ」(2年男子)という発言からも裏付けられる。学生達は、こうした活字の持つ文化的魅力に惹かれながら、最低年1回の会誌発行に情熱を傾注し、またこの発刊日を楽しみながら創作・執筆活動に勤しんでいる。

文芸同好会は発足5年目に入ったが機関誌「地雷」は、平成22年10月に本冊第5号を、別冊第3号を発行した。会誌「地雷」の由来については前章で論じたが、誌名を決定する際、学生達がそれぞれ考えた思いの誌名を持ち寄り討議し、最終的には本誌が「ささやかではあっても、自分たちの主張が(学内や他校の学生達に対し)何らかの刺激(や起爆剤)になってほしい」との願いを込めて、全員総意の上で「地雷」に決定した。発行日は特に決めていないが、本冊の発行は概ね隔年実施される茨香祭(文化祭)前、関東信越地区高等専門学校文化発表会前、3月の卒業前等に編集作業を行っている。

会誌作成のルールとしては学生達から原稿を募る際、毎号「お題」を決め、1万字以内で、テーマに沿いながら各人の手法、作風、趣向、形式、執筆技量等に従い自由に作品を仕上げていく。作品の分量も各人の意志、物理的時間、執筆速度、テーマに対する関心の度合いとその濃淡等により作品を決定していく。またリレー小説の形態で、各人執筆しようとする計画も組まれている。登載作品は第1号から今秋刊行の第5号まで、総て小説に限られているが、これはテーマの関係上、作品の種類が限定されているだけで、本来、本誌の性格上作品の種類を限定するものではない。しかし現段階においては、この手法を好んで取り入れており、この手法により学生達は執筆テーマの明確化と表現方法の多様化による執筆作業を楽しんでいる。なぜなら人生経験の少ない彼らにとつては、語彙数が不足していることは歴然とした事実であり、そうした意味において友人の作品を鑑賞しあうことは、自己に具有しない説得性、語彙力、表現力、直感力、洞察力、作品によっては空間把握力等を育む最良の機会になるからである。実際、韻文が得意な学生が初めての小説に挑み、当初は大変苦痛のようであ

ったが、それでもテーマに従い小説を仕上げてみると、「苦手と思っていた小説が自分でもできるんだ。自信がついた。」(2年男子)と自信を得る切掛けとなったことがあった。つまりテーマ小説という手法は学生達にとつて、会誌作成の手法としては、小説を創作する現在の段階においては、最適な手法であり、最も意味のある仕事となっている。将来、この手法が一巡した段階においては、更に創作しやすい手法、課題等を見いだすことが考えられる。

装幀に関しては、アニメやデザインの得意な学生がその都度担当し、会誌の上梓の作業と並行して行っている。

投稿本数は、毎号10作品ぐらいで、ほぼ毎年一定している。この投稿数の一定化は、見方によれば執筆者数の頭打ち状態と解釈することもできるが、まだ創部5年目の新しい同好会にそうした兆候は見られない。むしろ創部5年の若いクラブであるが故に、若々しい創成の息吹に満ちあふれている。執筆者数10人の意味するものは、投稿者数の定着と共にその固定的な投稿者による作品の質の向上を検証することができる。また同好会員は基礎的な力量アップを図るため各種の文芸コンクールに時折投稿し他流試合を行っているが、その成果は徐々に現れてきている。特に本年8月、土浦市で実施された高等学校文化連盟主催の文芸道場関東大会には本校生2名が出場し、そのうちの1名がグループ毎に1名選出される選者賞に次ぐ、次席の評価を受けた。

この選者による高い評価は、本校文芸同好会の一人一人に「私たちの作品は、他校の生徒達の作品と比べても決して劣っていない」との自信を与えた。また9月の全日本ジュニア短歌大会(日本歌人クラブ主催、文部科学省・毎日新聞社後援)高校・大学の部においても1名が奨励賞を受賞した。本年、文芸同好会員が応募したこれら2コンクールにおいて、応募者に対し高い評価が与えられたのは徐々にではあるが、文芸同好会の実力と創作能力がついてきたことの証であるといえよう。

## 2・2 会誌発行の意義

文芸同好会は毎年会員数約20名、毎週木曜日の放課後、学内の共用部室に集まり、文芸誌発行等の打ち合わせを行っている。本会は5年前に発足したが、初代会長は木村仁亮氏(専攻科2年)、2代会長は田山大輔氏(平成21年度卒業)、3代会長は滑川卓嗣氏(5年機械システム工学科)、4代会長は平野瑛二氏(4年電子情報工学科)、5代会長は石川佳央梨氏(3年電子情報工学科)である。



個人の内面から湧き出るものを、言語によって表出することが文芸であることを述べてきたが、文芸同好会発足の意義も自ずとこの部分にかかってくる。

## 1・2 文芸同好会発足の意義

文芸同好会は、文芸創作を中心に活動している。創作という点でいえば、絵画や写真、音楽などでもよいのかもしれない。それをあえて文芸としたのは、言語が思考の根幹をなすものだと考えるからである。我々が何かの考えを表出する際、あるいは思考をめぐらす際、言語ではない漠然とした像を結ぶこともあるが、如何にそれを他者に伝達するかという点では、圧倒的頻度で言語を媒介することになる。したがって、文芸同好会発足の意義は、その言語に対する感性の醸成の場を提供するという点がある。また、創作という意味では、表出者の個々の想像力（イメージネーション）をいかに発揮するかが重要となる。創作をする上では、単なる模倣や既存のものではない、独自の新鮮さを含む何かを要求される。その上で、個々の内面を、言語を用いて他者へ発信する際には、どのような語を表出するのが最適であるか、つまり、表出しようとする何かと、表出されるべき一語一語を、表出者がどれだけ近接させられるかを考える。このような運動は、まさしく創造性と呼ばれるものだろう。創造性という語の解釈については諸氏が論じており、一義にとらえることは難しい<sup>(注)</sup>が、一言でいえば「新たな何かを生み出し発信するための力」となる。新たな何かを生み出す個々の創造性には、さまざまな要因があり、いくつかの過程を経ることになる。仮に直感的なひらめきや偶発的な発想が生まれたとしても、そこには表出者の個々の経験や環境が大きく関与しているだろう。とすれば、新たな何かを生み出すには、畢竟、経験をより多く重ねることに尽きるのだろう。その意味で、思考をめぐらせる、あるいは想像力を触発させる経験を積み重ねられるような場を提供することも、また、文芸同好会発足の意義である。以上のように考えれば、想像力の触発と言語に対する感性の醸成の場の重要性、必要性に関しては、言を俟たないだろう。

ここで、文芸同好会の立ち上げについて、少々言及しておく。文芸同好会の立ち上げの大きな原動力は、初代会長木村仁亮氏の文芸創作への熱意であった。氏は平成18年度（財）一ツ橋文芸教育振興会主催全国高校生読書体験記コンクールにおいて入選を果たしていた。対外的なコンクールに応募するというそのこと自体、応募者にはかなりの文章力、ならびに意欲を要求されるものであり、集まる作品も自ずと文章レ

ベルが高くなる。そのような中で、入選を果たすというのは、やはり自信に繋がるものである。何より自身の文章を模索する、あるいは自らの思いを表出するための文章とは何かということ、悩み、苦しみながら考え、表出することを経験する。そして、生み出された作品が評価されることで、表出者の意欲は高まっていくこととなる。そのような体験をした木村氏が会の発起人となり、「文芸」の創作活動を行いたいという志を掲げ、同好会の発足に繋がったのである。その志に賛同した同志も加わり、平成19年6月に文芸同好会は立ち上げられ、今日に至っている。主な活動に関する記述は後に譲ることとして、文芸同好会が定期的に刊行している会誌「地雷」の名称についてのみ述べておく。この名称の意味するところは「文芸創作により、思想的な意味での地殻変動を起こす起爆的な存在でありたい」ということである。会員が意見を出し合い、討議した末に決まったこの名称からは、会員諸氏の文芸創作への熱意が伝わってくると同時に、文芸同好会の存在意義、必要性を雄弁に物語っていると判断できよう。

以上、文芸について触れた上で、文芸同好会発足の意義について述べてきた。具体的な活動に関して、次章以降で述べていくこととする。

(注) 林仁忠は「ふつう創造性とは、新しい価値のあるものを作り出すことを意味している。」と指摘し、さらに創造性や獨創性などという語の境界をどう見極めるかの難しさに触れた上で、「創造性という言葉からは、従来までの踏襲とは違った、新奇な価値の出現、そんな新境地への介入、新しい未知なものへの関与、既存の価値を破ろうとする不安、安易に妥協しない姿勢などが連想される。」(岩波講座『精神の科学9 創造性』IV章「あそび・うそ・創造性」一九八四年一月 岩波書店)と述べている。

## 2 文芸同好会の活動について

### 2・1 会誌の位置づけ

会誌発行の位置づけは、創作活動と共に文芸同好会の生命線ともいえるべき主たる活動の場であり、またイメージネーション検証の場であり、創作発表の場であるといえよう。前者が学生達にとつての生命活動そのものと呼ぶなら後者は生命活動の検証の場ともいえるべきもので、そのため学生達はイメージネーション発表の場としての会誌作り

## 高専教育における文化系クラブの役割と使命 —特にイマジネーション触発の場としての「文芸同好会」について—

瀬尾邦雄・桐生貴明・鈴木僚

### 1 文芸同好会発足の意義—イマジネーション触発と言語感覚醸成の場の必要性

#### 1-1 文芸について

文芸という語の意味は、一般には「言語によって表現される芸術」と理解され、時に文学という語と同じ意味でも用いられる。もちろん、文芸学では、文芸と文学は明確に区別されるものであろうが、ここでは、あえて一般に用いられる文芸の意味で話を進めていく。

明治以降、文学論、あるいは文芸論などがさかんに繰り広げられ、文学作品の芸術性を論じることが多くなった。それらの全部を丁寧論じることが望ましいが、紙幅の都合もあるため、あえて北村透谷と森鷗外の言を取り上げておく。透谷は「内部生命論」の中で、

文芸は思想と美術とを抱合したる者にして、思想ありとも美術なくんば既に文芸にあらず、美術ありとも思想なくんば既に文芸にあらず、華文妙辞のみにては文芸の上乗に達し難く、左りとて思想のみにては決して文芸といふこと能はざるなり (以下略)

などと述べ、さらに「文芸(純文学と言ふも宜し)の範囲に於て、根本の生命を伝へんとするは、文芸に従事するものゝ任なり。」や「瞬間の冥契ある者をインスピアドされたる詩人とは云ふなり」と述べている。「瞬間の冥契」は、インスピレーションのことを指し、「宇宙の精神即ち神なるものよりして、人間の精神即ち内部の生命なるものに対する一種の感応に過ぎざるなり」とし、結局のところ、この感応は「人間の内部の生命を再造する者」であり「人間の内部の経験と内部の自覚とを再造する者」としている。また、鷗外は「文芸の主義」(『妄人妄語』所収)の中で、次のように述べる。

芸術が人の内生活を主な対象にする以上は、芸術と云ふものは正しい意義では個人的である。此意義に於ける個人主義は、哲学的に云へば、萬有主義と対している。家族とか、社会とか国家とか云ふものを、此個人主義が破壊するものではない。

さらに、この項を次のように締めくくる。

学問の自由研究と芸術の自由発展とを妨げる国は栄えるはずがない。  
透谷、鷗外の言は、おのおの意味するところが重ならない点もあるが、文芸は個々の内面の表出ということに据えている。

では、近代以前はどうだろうか。言うまでもなく、古典と呼ばれる作品の中に文芸性がないわけではない。もちろん、各々の古典作品の作り手側(口承されたものを筆録するものも含め)に、現代的な意味での文芸性への意識があったか否かという問題はあろうが、作品の受け手にその文芸性が認められる場合、それは文芸性を包含しているものと扱うべきだろう。その意味で、例えば『万葉集』巻十七の伴家持と大伴池主との贈答の中の「一たび玉藻を見るに、稍く鬱結を写き、二たび秀句を吟ふに、已に愁緒を觸きつ。この眺眺に非ずは、孰か能く心を暢べむ。」などという文言からは、家持、池主の詩歌への評価は別として、詩歌が「鬱結を写き」、「愁緒を觸きつ」という働きを担っている点において、まさに芸術、文芸性を有していることがうかがえるし、また家持の絶唱三首と評される巻十九・四三九二番歌の左注の「悽惻の意、歌に非ずしては撥ひ難きのみ。仍りてこの歌を作り、式て縮緒を展べたり。」という文言からは、その個人の鬱屈した気持ちを詠歌によって晴らそうとする姿勢がうかがえる。家持の抱えた「悽惻の意」がいかなるものであったか、現状に満足しない何かを抱え、そこから脱却、もしくは新たな何かへの希求、あるいは逃避など、さまざま考えられるが、現時点では、それを確かめるすべを持たない。だが、内面から湧き出る何かを歌により表出する営為が見られることは確認されよう。

## 文部科学省 科学研究費補助金採択研究（平成22年度）

| 研究種目                  | 学科名            | 職名   | 氏名      | 研究課題   |
|-----------------------|----------------|------|---------|--|
| 【新規】<br>基盤研究(C)<br>一般 | 電子制御工学科        | 准教授  | 金成守康    | 等方加圧による高密度ナノ有機半導体薄膜の創製と圧子押込みによる曲げ強度解析                                  |
| 【新規】<br>基盤研究(C)<br>一般 | 電子制御工学科        | 准教授  | 菊池 誠    | 使用者個別の特性に対応する自律整合機能を有する汎用介助機器の開発                                       |
| 〔継続〕<br>基盤研究(C)<br>一般 | 人文科学科          | 准教授  | 奥山慶洋    | 高専生の英語発信能力向上を目指した英語専門用語データベースの構築に関する研究<br>《研究分担者》<br>電気電子システム工学科 長野 眞康 |
| 〔継続〕<br>基盤研究(C)<br>一般 | 電子制御工学科        | 教授   | 堀 利浩    | 電子回路特性評価効率化のための新周波数解析の提案とその応用  |
| 〔継続〕<br>若手研究(B)       | 機械システム<br>工学科  | 助教   | 澁澤健二    | 近赤外分光を用いたマイクロ波放電低圧窒素プラズマの非平衡放射解析                                       |
| 〔継続〕<br>若手研究(B)       | 物質工学科          | 准教授  | 小松崎 秀人  | トリスピラゾリルボレート配位子を持つマンガンセキノナト錯体の合成と性質の解明                                 |
| 【新規】<br>奨励研究          | 技術教育支援<br>センター | 技術職員 | 山 縣 進 一 | 機械実習における品質管理手法の実践教育教材の開発に関する研究   |
| 【新規】<br>奨励研究          | 技術教育支援<br>センター | 技術職員 | 大橋慶勘    | 魅力的な流体现象を視覚的に体感できる安全な教育用簡易PIV装置の試作開発研究                                 |

## 外部資金受入による共同研究・受託研究（平成21年度）

## 【共同研究】

| 学 科 名                      | 職 名        | 氏 名                  | 研 究 課 題   |
|----------------------------|------------|----------------------|---|
| 機械システム工学科                  | 教 授        | ◎ 根 本 栄 治            | 【継続】ハイエット処理物質の熱物性測定及びその応用に関する研究                 |
| 機械システム工学科                  | 准教授        | 加 藤 文 武              | 光計測に関する環境条件および諸特性計測                             |
| 電子制御工学科<br>機械システム工学科       | 准教授<br>准教授 | ※ 荒 川 臣 司<br>加 藤 文 武 | シール印刷の評価技術開発に関する研究                              |
| 電子制御工学科                    | 准教授        | 荒 川 臣 司              | 【継続】シール印刷技術に関する研究                               |
| 電子制御工学科                    | 准教授        | 岡 本 修                | 【継続】地点設定システムの研究開発                               |
| 電子制御工学科                    | 准教授        | 岡 本 修                | GPS補正信号への地殻変動量の反映                               |
| 電子制御工学科                    | 准教授        | 金 成 守 康              | ナノ領域の力学計測に関する「学学融合」先端研究の実践                      |
| 電子制御工学科                    | 准教授        | 飛 田 敏 光              | 【継続】組込みシステム開発エンジニア養成講座カリキュラムの研究3                |
| 電気電子システム工学科                | 教 授        | 田 辺 隆 也              | 植物の成長促進・制御システムの開発（継続）                           |
| 電気電子システム工学科<br>電気電子システム工学科 | 教 授<br>准教授 | ※ 田 辺 隆 也<br>安 細 勉   | 小規模事業所管理システム「Miruca」の実用化開発                      |
| 電気電子システム工学科<br>電気電子システム工学科 | 准教授<br>助 教 | ※ 若 松 孝 章<br>丸 山 智 章 | 高感度光学的分析法に関する研究                                 |
| 電気電子システム工学科                | 助 教        | 成 慶 珉                | 【継続】インバータ・昇圧回路の電動工具用途への適応研究                     |
| 電気電子システム工学科                | 助 教        | 成 慶 珉                | 【継続】SiC-PiNダイオードとIEGTのハイブリッド素子による高耐圧高速変換器に関する研究 |
| 物 質 工 学 科                  | 教 授        | 砂 金 孝 志              | メタホウ酸ナトリウム等の高効率水素化反応に関する研究                      |

## 【受託研究】

| 学 科 名                                 | 職 名               | 氏 名                             | 研 究 課 題                      |
|---------------------------------------|-------------------|---------------------------------|------------------------------|
| 電子制御工学科                               | 准教授               | 飛 田 敏 光                         | ヒューマンガイドシステムの性能評価、実証実験に関する研究 |
| 電気電子システム工学科<br>電気電子システム工学科<br>電子制御工学科 | 教 授<br>准教授<br>助 教 | ※ 田 辺 隆 也<br>吉 成 偉 久<br>平 澤 順 治 | 送電鉄塔のカワウによるふん害対策に関する研究       |
|                                       | 校 長               | 角 田 幸 紀                         | 将来アンテナ技術の研究                  |

注) ※は研究代表者、◎は研究重点教員

## 教員事績（平成21年10月～平成22年9月）

## 人文科学科

| 氏名  | 論文・著書名   | 発表機関・出版社等<br>巻、号(年、月)                              | 備考   |
|---|--|--|--|
| 桐生 貴明   | 志村有弘、奥山芳広編『社寺縁起伝説辞典』(「長楽寺」、「唐招提寺」、「東福寺」他9項目)   | 戎光祥出版(2009.12)                                     | [項目執筆]   |
| Y.Hatakeyama1)<br>K.Honda<br>K.Tanaka2)             | The so-inversion construction revisited.   | The Linguistic Review, Vol. 27, pp. 25-36(2010. 4) | 1)東京農工大学<br>2)信州大学   |
| K.Konno1)<br>S.Takanami2)<br>Y.Okuyama<br>A.Hirai3) | Examining the Effects of Involvement Load on Japanese EFL Learners' Vocabulary Retention | 日本語テスト学会研究紀要 第12号,pp.46-64(2009.9)                 | 1)筑波大学大学院人文社会科学研究科<br>2)筑波大学大学院人文社会科学研究科<br>3)筑波大学大学院人文社会科学研究科 |
| 奥山 慶洋<br>杉浦 理恵1)<br>長野 眞康                           | 高専生および教員の英語学習・教育に対するニーズ分析  | 全国高等専門学校英語教育学会研究論集第29号,pp.1-8(2010.03)             | 1)東海大学   |
| 奥山 慶洋<br>長野 眞康                                      | 英語で書かれた専門教科書の語彙分析・・・高専生に必要な専門語彙力を高めるために  | 全国高等専門学校英語教育学会 第34回研究大会,(2010.9)                   | [口頭発表]   |
| 矢野倉 伊織1)<br>森脇 滉1)<br>八重樫 拓也1)<br>奥山 慶洋             | 富士山頂対応電気ポットの試作－八光「熱実験コンテスト」始末  | 茨城工業高等専門学校研究彙報 第45号 pp.15-20(2010.3)               | 1)ラジオ部員  |
| 森脇 滉1)<br>田島 圭一郎1)<br>矢野倉 伊織1)<br>奥山 慶洋             | ΔT=1年程度の時間で見た原子炉内の反応<br>－U-235の核分裂エネルギーから見た核燃料廃棄物量の判定量的試算－                               | 茨城工業高等専門学校研究彙報 第45号 pp.33-40(2010.3)               | 1)ラジオ部員  |
| 箱山 健一   | ドイツ南部における産学官連携－ハイテク産業集積に成功したカギは広域連携－   | 日本高専学会第16回大会予稿集pp.57-58(2010.8)                    | [口頭発表]   |
| 三好 章一<br>市坪 誠                                       | 高専機構主催「海外インターンシップ制度」の創設  | 茨城工業高等専門学校研究彙報 第45号 pp.1-3(2010.3)                 |  |



## 教員事績 (平成21年10月～平成22年9月)

## 自然科学科

| 氏名                      | 論文・著書名  | 発表機関・出版社等<br>巻、号 (年、月)  | 備考   |
|-------------------------|---|---|--|
| 松久 隆<br>Pavel Strokan1) | Bayesian Communication Leading to a Nash Equilibrium                        | Petrosjan, Leon (ed.) et al.: Game Theory and Applications. Volume 14. Dedicated to John Forbes Nash jr. New York, NY .pp. 80-87 (2009.11)  | 国際学術論文<br>[共著・査読有]<br>1) State University of Saint-Petersburg (Russia)大学院博士課程3年                    |
| 松久 隆<br>谷川 大洋1)         | Can Acyclic Communication Resolve Moral Hazard in S5n-Logic?2)              | Proceedings of the 6th International Conference on Information Technology and Applications (ICITA 2009) (Takashi Matsuhisa and Taiyo Tanikawa) CD Volume/ISBN 978-981-08-3029-8, pp.302-306 (2009.11) | 国際会議論文<br>[共著・査読有]<br>1)平成21年度電気電子システム工学科5年・国際会議ICITA 2010, Hanoi 口頭発表者<br>2)平成21年度電気電子システム工学科卒業研究 |
| 松久 隆                    | Can Moral Hazard Be Resolved by Common-Knowledge in S4n-Knowledge?          | H. Deng et al. (Eds.): AICI 2009, Lecture Notes in Artificial Intelligence Volume 5855, pp. 78-85, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2009.11)  | 国際会議論文<br>[単著・査読有]   |
| 松久 隆<br>庄司 勝一1)         | Moral Hazard Can Be Resolved in Cyclic Communication Network in S5n-Logic2) | Proceedings 2009 IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems (ICIS 2009) No. 3, pp.378-382 (2009.11)   | 国際会議論文<br>[共著・査読有]<br>1)平成21年度電気電子システム工学科5年・国際会議ICIS 2010 Shanghai口頭発表者<br>2)平成21年度電気電子システム工学科卒業研究 |
| 松久 隆<br>Pavel Strokan1) | Bayesian Communication Leading to a Nash Equilibrium                        | International Journal of Mathematics, Game Theory and Algebra, Volume 18 No.4-5, pp.427--434 (2010.1)   | 国際学術論文<br>[共著・査読有]<br>1)State University of Saint-Petersburg (Russia)大学院博士課程3年                     |
| 松久 隆                    | Moral Hazard Resolved by Common-Knowledge in S5n Logic                      | N.T. Nguyen, M.T. Le, et al (Eds.): ACIIDS 2010, Part II, Lecture Notes in Computer Science, Volume 5991, pp. 85-92, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2010.3)                                       | 国際会議論文<br>[単著・査読有]   |
| 松久 隆                    | A Characterisation of Stable Sets in Game with Transitive Preference        | 1st Joint China-Dutch Seminar on Game Theory and 4th China Meeting on Game Theory and its Applications, August 16-18, 2010 西安 西北工業大学, Program (2010.8)  | 国際会議発表要旨<br>[単著・査読無]   |

## 自然科学科

| 氏名  | 論文・著書名   | 発表機関・出版社等<br>巻、号(年、月)   | 備考                   |
|---|--|---|----------------------|
| 松久 隆  | Communication in Multi-agent System for Multi-modal Logic S5n  | Epistemic Aspects of Many-Valued Logics (EAMVL 2010), Institute of Philosophy, Prague, September 13-16, 2010. Volume of Abstract, pp.21-24 (2010.9) | 国際会議発表要旨<br>[単著・査読有] |
| 木野村 嘉則<br>森 信二  | 技術指導における目標像の設定<br>—走幅跳を対象として—  | 茨城工業高等専門学校研究彙報 第45号<br>pp.57-63(2010.3)   |                      |
| 原 嘉昭<br>中岡 鑑一郎<br>大西 彰正1)<br>佐々木 実1)<br>沈 睿2)<br>松田 康弘2)<br>嶽山 正二郎2)  | Magneto-optical study under pulsed high magnetic fields of $\beta$ -FeSi <sub>2</sub> single crystals grown by a chemical vapor transport method | Physics Procedia, Volume 3, Issue 2, 31 January 2010, Pages 1139-1143.  | 1)山形大学<br>2)東大物性研    |
| A.Mitsuda<br>T.Okuma<br>K.Sato<br>K.Suga<br>Y.Narumi<br>K.Kindo<br>H.Wada   | Pressure and magnetic field dependence of valence and magnetic transitions in EuPtP  | J. Phys.: Condens. Matter 22 (2010) 226003  |                      |
| T.Waki<br>Y.Umemoto<br>S.Terazawa<br>Y.Tabata<br>A.Kondo<br>K.Sato<br>K.Kindo<br>Silvia Alconchel<br>Fernando Sapina<br>Y.Takahashi | Itinerant Electron Metamagnetism in eta-Carbide-Type Compound Co <sub>3</sub> Mo <sub>3</sub> C  | J. Phys. Soc. Jpn., Vol.79, No.9, p.093703  |                      |
| Y.Kobayashi<br>M.Iwata<br>T.Kaneko<br>K.Sato<br>K.Asai<br>H.Ohsumi  | Extraordinary Hall effect in Ba <sub>1-x</sub> Sr <sub>x</sub> RuO <sub>3</sub> films  | Physical Review B.82,174430,(2010)  |                      |
| 佐藤 桂輔   | Co系ペロブスカイト酸化物の強磁場誘起スピン転移   | 日本磁気学会第174回研究会<br>第38回化合物新磁性専門研究会共催<br>日時: 2010年10月8日(金)<br>場所: 中央大学駿河台記念館320号室   | 招待講演                 |

**自然科学科**

| 氏名   | 論文・著書名                        | 発表機関・出版社等<br>巻、号（年、月）                   | 備考   |
|--|-------------------------------|---|--|
| 田島 圭一郎1)<br>皆川 仁志1)<br>森脇 滉1)<br>矢野倉 伊織1)<br>八重樫 拓也1)<br>一戸 香澄1)<br>高橋 雄大1)<br>芦名沢 裕太1)<br>五十嵐 浩 | ピーカーのお湯の冷め方〜〜「物理<br>チャレンジ」に挑む | 茨城工業高等専門学校研究彙報 第45号<br>pp.5-14(2010.3)  | 1)ラジオ部員  |
| 松澤 孝男<br>森脇 滉1)<br>矢野倉 伊織1)<br>八重樫 拓也1)<br>松田 理絵1)<br>関根 恵2)<br>檜木 梨花子3)<br>矢澤 正人4)<br>保田 浩志5)   | 「富士山頂における科学教育」の試行             | 茨城工業高等専門学校研究彙報 第45号<br>pp.21-31(2010.3) | 1)ラジオ部員<br>2)北海道大学<br>3)茨城大学<br>4)(株)数理設計研究所<br>5)放射線医学総合研<br>究所 |
| 松澤 孝男<br>松田 理絵1)<br>川上 悠里1)<br>森脇 滉1)<br>齊藤 慶太1)<br>矢野倉 伊織1)<br>八重樫 拓也1)                         | 学生による原子炉シミュレーターの試作<br>(PWR)   | 茨城工業高等専門学校研究彙報 第45号<br>pp.41-56(2010.3) | 1)ラジオ部員  |

## 教員事績（平成21年10月～平成22年9月）

## 機械システム工学科

| 氏名  | 論文・著書名   | 発表機関・出版社等<br>巻、号（年、月）  | 備考                       |
|---|--|--|--------------------------|
| 石寄 貴大1)<br>根本 栄治                            | 三次元異方性物質の三主軸熱伝導率の分離測定に関する研究（理論及び実験）  | 第30回日本熱物性学会シンポジウム論文集、pp.91-93 (2009.10).   | 1)平成22年度専攻科2年生           |
| 根本 栄治                                       | 遠赤外線を照射した水の粘性係数測定  | 第30回日本熱物性学会シンポジウム論文集、pp.416-418 (2009.10).   |                          |
| 根本 栄治                                       | 分子振動モードに共鳴する遠赤外線を照射した水の蒸発潜熱測定  | 第30回日本熱物性学会シンポジウム論文集、pp.419-421 (2009.10).   |                          |
| 根本 栄治                                       | 細線加熱法による遠赤外線照射水の熱伝導率測定   | 第30回日本熱物性学会シンポジウム論文集、pp.425-427 (2009.10).   |                          |
| 根本 栄治<br>牛久保 佑介1)                           | 大気圧マイクロプラズマのプロセス化に関する研究  | 茨城工業高等専門学校研究彙報 第45号 pp.65-70 (2010.3)  | 1)ジャトコ(株)                |
| E.Nemoto                                    | Measuring Methodology of Boiling Heat Transfer Curve on Metal Surface                    | Fourth International Symposium on Advances in Technology Education 2010, Kagoshima, Japan, pp.37 (2010.9). |                          |
| 相田 勇氣1)<br>押久保 武                            | 銅箔の疲労寿命に及ぼす負荷条件の影響   | 日本機械学会関東支部 第49回学生員卒業研究発表講演会,p.79(2010.3)   | 1)平成21年度専攻科2年生           |
| 田辺 隆也<br>中岡 鑑一郎<br>押久保 武<br>平澤 順治<br>長谷川 勇治 | 高専ロボットコンテストへの取り組み  | 砥粒加工学会誌,5巻,6号,p.343(2010.6)  |                          |
| 石野 雄大1)<br>押久保 武                            | 赤外線応力測定法による金属箔の応力測定  | No.100-2日本機械学会関東支部茨城講演会講演論文集p.171 (2010.8)   | 1)平成22年度専攻科2年生           |
| 押久保 武                                       | 国際的な視点での高等専門学校ブランドの再構築   | 国立高専情報発信フォーラム2010(2010.9)  |                          |
| 鯉淵 弘資                                       | Flat histogram Monte Carlo simulations of triangulated fixed-connectivity surface models | Journal of Statistical Physics, Volume 140, pp.676-687 (2010)  |                          |
| 鯉淵 弘資                                       | Monte Carlo studies of triangulated spherical surfaces in the two-dimensional space      | Nuclear Physics B [FS], Vol. 836, pp.186-203 (2010)  |                          |
| 鯉淵 弘資                                       | Spherical surface models with directors  | Journal of Statistical Physics, Vol. 138, pp.876-889 (2010)  |                          |
| 水野 広樹1)<br>鯉淵 弘資                            | 幾何学的内部自由度を持つ膜モデルの相転移   | 日本機械学会第18回茨城講演会講演論文集, pp.5-6 (2010.8)  | 1)平成22年度機械システム工学科5年生     |
| T.Takamime1)<br>Y.Shibata<br>M.Kawaji2)     | Study on dynamics of liquid slugs in the microchannel                                    | The 5th International Student Conference at Ibaraki University, Ibaraki,Japan,p7-8,(2009,11)               | 1)平成21年度専攻科1年生<br>2)CCNY |

## 機械システム工学科

| 氏名  | 論文・著書名  | 発表機関・出版社等<br>巻、号(年、月)  | 備考  |
|---|---|--|---|
| Y.Shibata<br>T.Takamine1)<br>M.Kawaji2)   | Emission of liquid droplets from an interface of bidrops pulled by a ferrofluid in a microchannel | Int. J. of Thermal Sciences, ELSEVIER online, (2010,7) Invited Paper | 1)平成21年度専攻科1年生<br>2)CCNY  |
| 柴田 裕一<br>高峰 大河1)<br>川路 正裕2)   | マイクロチューブ内を移動する液滴スラッグに関する研究  | 日本混相流学会年会講演会2010(浜松)講演論文集,C324, P318, (2010,7)                       | 1)平成21年度専攻科1年生<br>2)CCNY  |
| 森脇 滉1)<br>田島 圭一郎2)<br>内田 匠平2)<br>富永 学<br>松澤 孝男  | 日本の原子力発電所の設備容量の近未来予測と使用済み核燃料廃棄物量の試算   | 第15回高専シンポジウムinいわき予稿集 p.177 (2010. 1)                                 | 【1)~2)ラジオ部】<br>1)平成21年度電気電子システム工学科3年生<br>2)平成21年度電子制御工学科3年生   |
| 松田 理絵1)<br>川上 悠里2)<br>森脇 滉3)<br>斎藤 慶太4)<br>矢野倉 伊織5)<br>八重樫 拓也6)<br>松沢 孝男<br>富永 学            | 四則演算とExcel・Basicでつくる原子力発電プラントの原子炉諸元推定機  | 第15回高専シンポジウムinいわき予稿集 p.178 (2010. 1)                                 | 【1)~6)ラジオ部】<br>1)平成21年度電子情報工学科5年生<br>2)平成21年度機械システム工学科5年生<br>3)平成21年度電気電子システム工学科3年生<br>4)平成21年度電子情報工学科3年生<br>5)平成21年度機械システム工学科2年生<br>6)平成21年度電子情報工学科2年生 |
| 八重樫 拓也2)<br>森脇 滉3)<br>矢野倉 伊織4)<br>関根 恵1)<br>松沢 孝男<br>富永 学                                   | 富士山頂での「ろうそく」の燃焼実験   | 第15回高専シンポジウムinいわき予稿集 p.235 (2010.1)                                  | 1)北海道大学大学院工学研究科<br>【2)~4)ラジオ部】<br>2)平成21年度電子情報工学科2年生<br>3)平成21年度電気電子システム工学科3年生<br>4)平成21年度機械システム工学科2年生  |
| 松沢 孝男<br>森脇 滉5)<br>八重樫 拓也6)<br>矢野倉 伊織7)<br>富永 学<br>関根 恵1)<br>檜木梨 花子2)<br>矢澤 正人3)<br>保田 浩志4) | 富士山頂における「科学教育」の試行   | 第15回高専シンポジウムinいわき予稿集 p.236 (2010.1)                                  | 1)北海道大学大学院工学研究科<br>2)茨城大学理学部<br>3)株式会社数理設計研究所<br>4)放射線医学総合研究所<br>【5)~7)ラジオ部】<br>5)平成21年度電気電子システム工学科3年生<br>6)平成21年度電子情報工学科2年生<br>7)平成21年度機械システム工学科2年生    |



## 機械システム工学科

| 氏名  | 論文・著書名  | 発表機関・出版社等<br>巻、号(年、月)  | 備考   |
|---|---|--|--|
| 矢野倉 伊織1)<br>森脇 滉2)<br>八重樫 拓也3)<br>松澤 孝男<br>富永 学<br>関根 恵4)<br>檜木 梨花子5)<br>矢澤 正人6)<br>保田 浩志7) | 保温温度を1℃刻みで調節でき、富士山頂でも使える電気ポットの試作                    | 第15回高専シンポジウムinいわき 予稿集 p.246 (2010.1)   | 【1)～3)ラジオ部】<br>1)平成21年度機械システム工学科2年生<br>2)平成21年度電気電子システム工学科3年生<br>3)平成21年度電子情報工学科2年生<br>4)北海道大学大学院工学研究科<br>5)茨城大学理学部<br>6)株式会社数理設計研究所<br>7)放射線医学総合研究所 |
| 郡司 光1)<br>富永 学  | 準安定オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304の特異な変形挙動と力学的性質              | 第15回高専シンポジウムinいわき予稿集 p.310 (2010.1)  | 1)平成21年度専攻科AMコース2年生  |
| 富永 学<br>松澤 孝男<br>池田 耕   | 茨城高専における取組  | 研究会「原子力人材育成における高専-技科大の連携」p.19(2010. 3)   |  |
| 富永 学  | 茨城高専機械システム工学科におけるCAD教育の取り組み                         | 高専教育No.33pp.73-77 (2010.3)   |  |
| 富永 学<br>松澤 孝男<br>池田 耕   | 文部科学原子力人材育成プログラムによる科学技術教育の取り組み                      | 平成22年度全国高専教育フォーラム・教育教員研究集会講演論文集p.45-48(2010.8)                                     |  |
| 富永 学<br>石寄 貴大1)<br>岩井 岳夫2)<br>上坂 充2)  | イオン照射温度測定精度向上のための原子力材料の放射率測定                        | 東京大学大学院工学系研究科原子力専攻共同利用成果報告書平成21年度(UTNL-R-0476) pp.2 (2010.9)                       | 1)平成21年度専攻科AMコース1年生<br>2)東京大学大学院工学系研究科   |
| 加藤 文武<br>澁澤 健二  | 機械工学系学生による、電気・電子工学のPBL実験(導入事例)                      | 論文集「高専教育」第33号, pp.769～774, (2010.3)  |  |
| 澁澤健二<br>船津賢人1)<br>白井紘行2)<br>久保田聖3)  | 低圧空気極小プラズマジェットのスズル出口直後におけるN <sub>2</sub> 2+バンドの放射特性 | 日本航空宇宙学会論文集, Vol.58, No.672, pp.1-7, (2010.1)                                      | 1)群馬大学<br>2)放送大学<br>3)前橋工業高校   |
| 石井 直紀1)<br>澁澤 健二  | ダブルプローブを用いたアフターグロー窒素プラズマの電子温度測定                     | 関東学生会第49回学生会員卒業研究発表講演会講演前刷集, pp.513～514, (2010.3)                                  | 1)平成21年度専攻科2年生   |
| 澁澤 健二<br>宮城 洋平1)<br>船津 賢人2)<br>白井 紘行3)  | 近赤外領域における低圧窒素マイクロ波放電プラズマの放射特性                       | 平成21年度衝撃波シンポジウム講演論文集, pp.263-264, (2010.3)   | 1)平成21年度本科5年生<br>2)群馬大学<br>3)放送大学  |
| 澁澤 健二<br>宮城 洋平1)<br>船津 賢人2)<br>白井 紘行3)  | 低圧窒素マイクロ波放電プラズマにおけるN <sub>2</sub> 1+バンドの放射測定        | 第42回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム2010講演集CD-ROM, JSASS-2010-2060, pp.1-4, (2010.6) | 1)平成21年度本科5年生<br>2)群馬大学<br>3)放送大学  |

## 教員事績 (平成21年10月～平成22年9月)

電子制御工学科

| 氏名  | 論文・著書名  | 発表機関・出版社等<br>巻、号 (年、月)                  | 備考   |
|---|---|---|--|
| 住谷 正夫   | マイコンを用いたゆらぎ信号出力装置                               | 電子情報通信学会2010年総合大会講演論文集, A-1-43 (2010.3) |  |
| 住谷 正夫   | 逆離散フーリエ変換を用いた様々なゆらぎの作成                          | 第12回DSPS教育者会議予稿集, p.43-46 (2010.9)      |  |
| 長谷川 勇治<br>伊藤 伸英1)<br>大森 整2)<br>加藤 照子2)<br>根本 昭彦3)                                 | 植物カーボンを用いた環境調和型ELID研削砥石の開発                      | 砥粒加工学会誌, 53(12), p.735-740 (2009.12)    | 1)茨城大学<br>2)理化学研究所<br>3)日本工業大学                         |
| 伊藤 伸英1)<br>金澤 雄史1)<br>根本 昭彦2)<br>大森 整3)<br>加藤 照子3)<br>長谷川 勇治<br>松澤 隆4)            | 導電性ポーラスラバーボンド砥石によるTi合金のELID研削特性                 | 砥粒加工学会誌, 54(2), p.101-104 (2010.2)      | 1)茨城大学<br>2)日本工業大学<br>3)理化学研究所<br>4)池上金型工業             |
| 加藤 照子1)<br>大森 整1)<br>伊藤 伸英2)<br>長谷川 勇治<br>根本 昭彦3)<br>松澤 隆4)<br>春日 博5)             | 未利用バイオマス由来のメタルレス砥石ボンド材料のトライボロジー特性               | 2010年度精密工学会春季大会, D13 (2010.3)           | 1)理化学研究所<br>2)茨城大学<br>3)日本工業大学<br>4)池上金型工業<br>5)埼玉大    |
| 長田 雄一1)<br>長谷川 勇治<br>伊藤 伸英2)<br>大森 整3)<br>加藤 照子3)<br>根本 昭彦4)                      | ELID研削用ポーラス樹脂砥石の加工特性                            | 2010年度精密工学会春季大会, D14 (2010.3)           | 1)平成21年度専攻科2年生<br>2)茨城大学<br>3)理化学研究所<br>4)日本工業大学       |
| 井川 裕太1)<br>長谷川 勇治<br>伊藤 伸英2)<br>大森 整3)<br>加藤 照子3)<br>根本 昭彦4)                      | ELID研削用ポーラスメタルボンド砥石の開発ー第2報:気孔率による電解ドレッシング特性への影響 | 2010年度精密工学会春季大会, D15 (2010.3)           | 1)平成21年度専攻科2年生<br>2)茨城大学<br>3)理化学研究所<br>4)日本工業大学       |
| 伊藤 伸英1)<br>金澤 雄史1)<br>根本 昭彦2)<br>大森 整3)<br>加藤 照子3)<br>長谷川 勇治<br>松澤 隆4)<br>佐藤 運海5) | 電解還元水を用いたELID研削                                 | 2010年度精密工学会春季大会, D16 (2010.3)           | 1)茨城大学<br>2)日本工業大学<br>3)理化学研究所<br>4)池上金型工業(株)<br>5)信州大 |

## 電子制御工学科

| 氏名  | 論文・著書名  | 発表機関・出版社等<br>巻、号(年、月)                        | 備考   |
|---|---|--|--|
| 西野 彰馬1)<br>長谷川 勇治<br>伊藤 伸英2)<br>大森 整3)<br>加藤 照子3)<br>根本 昭彦4)                      | ラバーボンド砥石の加工特性-第2報:<br>導電性ラバーボンド砥石におけるマイクロバブルの効果 | 2010年度精密工学会春季大会, D17<br>(2010.3)             | 1)平成21年度電子制御工学科5年生<br>2)茨城大学<br>3)理化学研究所<br>4)日本工業大学             |
| 小島 浩樹1)<br>長谷川 勇治<br>伊藤 伸英2)<br>大森 整3)<br>加藤 照子3)<br>水谷 正義3)<br>松澤 隆4)<br>根本 昭彦5) | 電解還元水を用いた導電性ポーラスラバー砥石によるTi合金の加工特性               | 2010年度砥粒加工学会先進テクノフェア卒業研究発表会ポスターセッション(2010.3) | 1)平成21年度電子制御工学科5年生<br>2)茨城大学<br>3)理化学研究所<br>4)池上金型工業<br>5)日本工業大学 |
| 長谷川 勇治<br>伊藤 伸英1)<br>大森 整2)<br>加藤 照子2)<br>根本 昭彦3)                                 | マイクロバブルを用いた導電性ラバー砥石による加工システムの開発                 | 2010年度砥粒加工学会講演会, D09<br>(2010.8)             | 1)茨城大学<br>2)理化学研究所<br>3)日本工業大学                                   |
| 井手上 敬1)<br>伊藤 伸英1)<br>大森 整2)<br>加藤 照子2)<br>根本 昭彦2)<br>松澤 隆3)<br>長谷川 勇治            | 電解還元水を用いたELID研削-第2報:成分を調整した電解還元水の利用             | 2010年度精密工学会秋季大会, F35(2010.9)                 | 1)茨城大学<br>2)理化学研究所<br>3)池上金型工業                                   |
| 伊藤 伸英1)<br>加藤 照子2)<br>根本 昭彦2)<br>大森 整2)<br>長谷川 勇治<br>松澤 隆3)                       | 植物カーボン由来の環境調和型ELID研削加工砥石の開発                     | 2010年度精密工学会秋季大会, F39(2010.9)                 | 1)茨城大学<br>2)理化学研究所<br>3)池上金型工業                                   |
| 長谷川 勇治<br>伊藤 伸英1)<br>大森 整2)<br>加藤 照子2)<br>松澤 隆3)<br>根本 昭彦4)                       | ELID研削用ポーラス樹脂砥石によるELID研削加工特性                    | 2010年度精密工学会秋季大会, F40(2010.9)                 | 1)茨城大学<br>2)理化学研究所<br>3)池上金型工業<br>4)日本工業大学                       |
| 田辺 隆也<br>中岡 鑑一郎<br>押久保 武<br>平澤 順治<br>長谷川 勇治                                       | 高専ロボットコンテストへの取り組み                               | 砥粒加工学会誌, 54(6), p.343-346(2010.6)            |  |

## 教員事績（平成21年10月～平成22年9月）

## 電気電子システム工学科

| 氏名   | 論文・著書名  | 発表機関・出版社等<br>巻、号（年、月）   | 備考  |
|--|---|---|---|
| 鈴木 恵介1)<br>田辺 隆也   | 光ディスク再生信号の歪特性の評価  | 第17回電気学会東京支部茨城支所研究発表会PA13 p.79 (2009.11)  | 1)電気電子システム工学科5年生  |
| T.Tanabe<br>M.Kurosawa1)                                     | A SNR IMPROVEMENT FOR MICROHOLOGRAPHIC STORAGE USING ANNULUS READOUT SYSTEM | IWHM&D2009, pp.17-18(2009.12)   | 1)電気電子システム工学科5年生  |
| 田辺 隆也<br>秋山 裕信1)<br>吉田 将大2)<br>福田 光男3)                       | 高照度なLED発光装置の製作と特性評価   | 第11回高エネ研メカ・ワークショップ CM10-P01 (2010.4)  | 1)専攻科2年生<br>2)H21年度電気電子システム工学科卒業生<br>3)豊橋技科大            |
| 田辺 隆也<br>中岡 鑑一郎<br>押久保 武<br>平澤 順治<br>長谷川 勇治                  | 高専ロボットコンテストへの取り組み   | 砥粒加工学会誌 54、 No.6、 pp343-346 (2010.6)  |   |
| 滝沢 京介1)<br>吉田 将大2)<br>田辺 隆也<br>福田 光男3)                       | 緑光色が植物生長に及ぼす影響の分析と発光装置の改良   | 高専連携教育研究プロジェクト成果報告会 (2010.8)  | 1)電気電子システム工学科5年生<br>2)H21年度電気電子システム工学科卒業生<br>3)豊橋技術科学大学 |
| 大橋 幸一郎1)<br>五位淵 幸大2)<br>滝沢 京介2)<br>宮下 美晴<br>田辺 隆也<br>福田 光男3) | カーネーションの花柱に緑色光が及ぼす影響の分析   | 日本生物環境工学会2010年京都大会 P23 (2010.9)   | 1)専攻科1年生<br>2)電気電子システム工学科5年生<br>3)豊橋技科大                 |
| 田辺 隆也<br>秋山 裕信1)<br>吉田 将大2)<br>福田 光男3)                       | アルミ基板を使用したLED照明の設計と製作   | 日本生物環境工学会2010年京都大会 P46 (2010.9)   | 1)専攻科2年生<br>2)H21年度電気電子システム工学科卒業生<br>3)豊橋技科大            |
| T.Tanabe<br>H.Igawa1)<br>K.Suzuki2)<br>T.Ansai               | Simple Readout Channel Model of Super-RENS Disk System                      | International Symposium on Optical Memory 2010、 Tu-H-19(2010.10)  | 1)専攻科2年生<br>2)H21年度電気電子システム工学科卒業生                       |
| T.Wakamatsu  | Characteristics of Metal Enhanced-Evanescent Wave Microcavities             | Sensors (Open Access Journal), Vol. 10, Special Issue "Optical Resonant Microsensors" (2010.9) pp.8751-8760 |   |
| 安細 勉<br>村田 和英<br>小飼 敬<br>大坪 友信<br>土川 洋史<br>山田 真              | 茨城高専における教育用電子計算機演習室の更新について  | 高等専門学校情報処理教育研究発表会論文集第30号(2010.8)  |   |

## 電気電子システム工学科

| 氏名  | 論文・著書名   | 発表機関・出版社等<br>巻、号(年、月)  | 備考             |
|---|--|--|----------------|
| 菊地 貴允1)<br>関口 直俊  | FIT制度を導入した太陽水素エネルギーシステムの評価   | 平成21年度電気学会東京支部茨城支所研究発表会講演予稿集, PC02 (2009.11)   | 1)平成21年度専攻科1年生 |
| 高安 基大1)<br>成 慶珉   | FPGAによるマトリックスコンバータの転流方式の実現   | 平成22年度電気学会産業応用部門大会, Y-8, (2010年8月)   | 1)平成22年度専攻科1年生 |
| 沼田 諒平1)<br>成 慶珉   | 昇圧一反転形DC-DCコンバータの方式  | 平成22年度電気学会産業応用部門大会, Y-13, (2010年8月)  | 1)平成22年度専攻科1年生 |
| 野口 裕太1)<br>成 慶珉   | 絶縁形と非絶縁形昇圧DC-DCコンバータの比較検討  | 平成22年度電気学会産業応用部門大会, Y-14, (2010年8月)  | 1)平成22年度専攻科1年生 |
| K.Sung<br>H.Akiyama<br>K.Takao<br>T.Kanai<br>Y.Tanaka<br>H.Ohashi                                       | Switching Characteristic of Si-IEGTs and SiC-PiN Diodes Pair Connected in Series   | The 2010 International Power Electronics Conference -ECCE ASIA- June 21-24, 2010, 22P2-22  |                |
| T.Kanai<br>K.Takao<br>T.Shinohe<br>Y.Tanaka<br>H.Yamaguchi<br>H.Ohashi<br>H.Akiyama<br>K.Sung<br>K.Wada | 3-Level Power Converter with High-Voltage Hybrid Pairs of SiC-PiN diode and IEGT   | The 2010 International Power Electronics Conference -ECCE ASIA- June 21-24, 2010, 24H3-4   |                |
| K.Takao<br>T.Shinohe<br>Y.Tanaka<br>H.Ohashi<br>K.Sung<br>K.Wada<br>T.Kanai                             | High-frequency switching high-power converter with SiC-PiN diodes and Si-IEGTs   | Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE<br>Publication Year: 2010 , Page(s): 4558 - 4563   |                |
| Y.Tanaka<br>H.Ohashi<br>K.Sung<br>K.Takao<br>K.Wada<br>T.Kanai  | Development of 6kV-class SiC-PiN diodes for high-voltage power inverter  | Power Semiconductor Devices & IC's (ISPSD), 2010 22nd International Symposium on<br>Publication Year: 2010 , Page(s): 213 - 216<br><br>IEEE Conferences                |                |
| K.Takao<br>Y.Tanaka<br>K.Sung<br>K.Wada<br>T.Shinohe<br>T.Kanai<br>H.Ohashi                             | 3-Level power converter with high-voltage SiC-PiN diode and hard-gate-driving of IEGT for future high-voltage power conversion systems | Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE<br><br>Publication Year: 2010 , Page(s): 1101 - 1107<br><br>IEEE Conferences |                |



## 電気電子システム工学科

| 氏名                                   | 論文・著書名                                 | 発表機関・出版社等<br>巻、号（年、月）                              | 備考   |
|--------------------------------------|--|--|--|
| 釜我 昌武<br>成 慶珉<br>佐藤 之彦<br>大橋 弘通      | フライングキャパシタマルチレベル電力変換器のゲートフローティング電源供給方式 | 電気学会論文誌D(産業応用部門誌), Vol. 130(2010) No. 7 pp.933-934 |  |
| 丸山 智章<br>林 豊彦1)<br>加藤 一誠2)           | 咬合器シミュレータの機能印象を用いた自動調整                 | 顎機能誌, 16(2), pp.93-101 (2010.3)                    | 1)新潟大学<br>2)日本補綴歯科学会                           |
| 丸山 智章                                | 顎運動の測定と解析                              | 顎口腔機能の評価, 顎口腔機能学会, pp.1-8 (2010.3)                 |  |
| 高安 基大1)<br>丸山 智章<br>若松 孝             | 水晶振動子発振法によるアルコールのセンシング                 | 第17回電気学会東京支部茨城支所研究発表会講演予稿集, p.81 (2009.11)         | 1)平成21年度電気電子システム工学科5年生                         |
| 前田 望1)<br>坂口 究1)<br>丸山 智章<br>横山 敦郎1) | 全身姿勢の変化が身体重心動揺, 頭位, 頭頸部筋筋活動, 咬合に及ぼす影響  | 日本顎口腔機能学会第43回学術大会プログラム・事前抄録集, pp.35-36 (2009.11)   | 1)北海道大学  |
| 高安 基大1)<br>青木 克仁2)<br>丸山 智章<br>若松 孝  | QCM法によるアルコールセンシング                      | 第15回高専シンポジウムinいわき 講演要旨集, p.103 (2010.1)            | 1)平成21年度電気電子システム工学科5年生<br>2)平成21年度専攻科2年生       |
| 丸山 智章<br>佐藤 匠1)<br>林 豊彦2)<br>加藤 一誠3) | 歯科CADにおける歯牙滑走運動シミュレータのPSOを用いた最適化法      | 信学技報, 109(460), MBE2009-127, pp.145-148 (2010.3)   | 1)平成21年度電気電子システム工学科5年生<br>2)新潟大学<br>3)日本補綴歯科学会 |

## 教員事績（平成21年10月～平成22年9月）

## 電子情報工学科

| 氏名   | 論文・著書名                                      | 発表機関・出版社等<br>巻、号（年、月）   | 備考                          |
|--|---|---|-----------------------------|
| 高橋 舟平1)<br>村田 和英   | MPIを用いた並列分散処理型システムの開発                       | 第17回電気学会東京支部茨城支所研究発表会講演予稿集 p.35 (2009.11)                           | 1)平成21年度専攻科2年生              |
| 八島 亮平1)<br>村田 和英   | アレイコンピュータに用いられるプロセスサ間接続ネットワークの性能評価シミュレータの開発 | 第17回電気学会東京支部茨城支所研究発表会講演予稿集 p.36 (2009.11)                           | 1)平成21年度専攻科2年生              |
| 安細 勉<br>小飼 敬<br>大坪 友信<br>山田 真<br>土川 洋史<br>村田 和英            | 茨城高専における教育用電子計算機演習室の更新について                  | 高等専門学校 情報処理教育研究発表会講演論文集 第30号 p.291 (2010.8)                         |                             |
| 山口 一弘<br>林 永子1)<br>弥生 宗男<br>井上 光輝2)                        | コバルトを添加した酸化チタン薄膜の作製とその磁気特性                  | 茨城工業高等専門学校研究彙報 第45号 pp.71-74 (2010.3)                               | 1)専攻科修了生<br>2)豊橋技術科学大学      |
| 滝沢 陽三<br>小飼 敬<br>山田 真                                      | ディスクレスによるプログラミング演習室システムの構築                  | 高等専門学校情報処理教育研究発表会講演論文集,第30号(2010.8).                                |                             |
| 菊池 大輔1)<br>小飼 敬<br>滝沢 陽三                                   | YAMLを用いたJavaプログラムコードのリファクタリングの提案            | 第9回情報科学技術フォーラム(FIT2010), B-013, pp.291 - 292 (2010.9)               | 1)平成22年度専攻科情報工学コース2年生       |
| 滝沢 陽三<br>小飼 敬<br>山田 真                                      | ディスクレスによるプログラミング演習室システムの開発                  | 茨城工業高等専門学校研究彙報 第45号 pp.75-78 (2010.3)                               |                             |
| 小飼 敬<br>上田 賀一1)<br>大久保 訓2)<br>高橋 勇喜2)<br>中野 利彦2)           | Alloyを利用した情報制御システム記述言語の仕様検証の実用化             | ソフトウェア工学の基礎 XVI 日本ソフトウェア科学会FOSE 2009, 近代科学社, pp.259 - 266 (2009.11) | 1)茨城大学<br>2)株式会社日立製作所       |
| 村上 祥平1)<br>小飼 敬<br>上田 賀一2)                                 | 図式モデルのための形式仕様記述への変換方法と支援ツールの開発              | ソフトウェアエンジニアリング最前線2010, 近代科学社, p.143 - 148 (2010.9)                  | 1)株式会社日立アドバンステジタル<br>2)茨城大学 |
| 柳 翔太1)<br>小飼 敬<br>上田 賀一1)<br>大久保 訓2)<br>高橋 勇喜2)<br>中野 利彦2) | 情報制御システム記述モデルの検証用記述への変換と効率的検証               | 日本ソフトウェア科学会第27回大会, 7C-1 (2010.9)                                    | 1)茨城大学<br>2)株式会社日立製作所       |

**電子情報工学科**

| 氏名  | 論文・著書名   | 発表機関・出版社等<br>巻、号(年、月)                                  | 備考         |
|---|--|--|------------|
| K.Yayoi<br>K.Tobinaga1)<br>Y.Kaneko1)<br>J.Kim1)<br>A.Baryshev1)<br>M.Inoue1) | Fabrication of magneto-optical waveguide integrated into anodized porous alumina                 | 2009 MRS Fall Meeting, KK 11.51 (2009.12)              | 1)豊橋技術科学大学 |
| K.Yayoi<br>K.Tobinaga1)<br>Y.Kaneko1)<br>J.Kim1)<br>A.Baryshev1)<br>M.Inoue1) | Fabrication of two-dimensional magneto-optical waveguide integrated into anodized porous alumina | The 11th JOINT MMM-INTERMAG CONFERENCE, BU-05 (2010.1) | 1)豊橋技術科学大学 |
| 弥生 宗男<br>飛永 和真1)<br>金子 裕介1)<br>A.V.Baryshev1)<br>井上 光輝1)                      | 有限要素法を用いた2次元磁性フォトニック結晶ベース光導波路サーキュレータの特性解析と構造設計   | 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-10-080 (2010.8)                 | 1)豊橋技術科学大学 |
| 弥生 宗男<br>飛永 和真1)<br>金子 裕介1)<br>A.V.Baryshev1)<br>井上 光輝1)                      | 2次元磁性フォトニック結晶を用いた光導波路サーキュレータの基礎特性シミュレーション  | 第34回日本磁気学会学術講演会概要集, p.309 (2010.9)                     | 1)豊橋技術科学大学 |

## 教員事績（平成21年10月～平成22年9月）

## 物質工学科

| 氏名   | 論文・著書名                                | 発表機関・出版社等<br>巻、号（年、月）                          | 備考                     |
|--|---------------------------------------|--|------------------------|
| 小澤 和幸<br>貴志 礼文<br>小松崎 秀人<br>引地 史郎1)<br>穂田 宗隆2)           | コバルト(II)酸素錯体の合成と反応性                   | 第20回日本化学会関東支部茨城地区研究<br>交流会予稿集, p.73 (2009. 11) | 1)神奈川大学工学部<br>2)東工大資源研 |
| 小澤 和幸<br>貴志 礼文<br>小松崎 秀人<br>引地 史郎1)<br>穂田 宗隆2)           | ニッケル(II)チオフェノラト錯体の合成と<br>分子状酸素との反応    | 第20回日本化学会関東支部茨城地区研究<br>交流会予稿集, p.74 (2009. 11) | 1)神奈川大学工学部<br>2)東工大資源研 |
| 小松崎 佑介<br>千葉 洋祐<br>小松崎 秀人<br>引地 史郎1)<br>穂田 宗隆2)          | マンガン(II)チオアセタト錯体の合成と酸<br>素活性化反応       | 第20回日本化学会関東支部茨城地区研究<br>交流会予稿集, p.75(2009. 11)  | 1)神奈川大学工学部<br>2)東工大資源研 |
| 小松崎 佑介<br>千葉 洋祐<br>小松崎 秀人<br>引地 史郎1)<br>穂田 宗隆2)          | マンガン(II)チオフェノラト錯体の合成と<br>酸素分子との反応     | 第20回日本化学会関東支部茨城地区研究<br>交流会予稿集, p.76(2009. 11)  | 1)神奈川大学工学部<br>2)東工大資源研 |
| 江口 裕<br>市塚 知宏<br>大久保 俊克<br>小松崎 秀人<br>引地 史郎1)<br>穂田 宗隆2)  | セミキノナト構造を有するコバルト錯体<br>の合成と性質          | 第20回日本化学会関東支部茨城地区研究<br>交流会予稿集, p.77(2009. 11)  | 1)神奈川大学工学部<br>2)東工大資源研 |
| 安部 慎一郎<br>小松崎 秀人<br>蝦名 不二夫                               | バナジル(IV)ポルフィリン錯体の簡便・<br>高収率な合成法の確立(2) | 第20回日本化学会関東支部茨城地区研究<br>交流会予稿集, p.85(2009. 11)  |                        |
| 小松崎 秀人<br>三木 奈保美<br>塩田 明彦<br>高野 与一<br>引地 史郎1)<br>穂田 宗隆2) | マンガンセミキノナト錯体を用いた酸素<br>錯体の合成           | 第20回日本化学会関東支部茨城地区研究<br>交流会予稿集, p.87(2009. 11)  | 1)神奈川大学工学部<br>2)東工大資源研 |
| 高野 与一<br>三木 奈保美<br>小松崎 秀人<br>引地 史郎1)<br>穂田 宗隆2)          | マンガンカテコラト錯体の合成と有機基<br>質への酸化触媒能        | 第20回日本化学会関東支部茨城地区研究<br>交流会予稿集, p.6(2009. 11)   | 1)神奈川大学工学部<br>2)東工大資源研 |

## 物質工学科

| 氏名   | 論文・著書名                                      | 発表機関・出版社等<br>巻、号(年、月)                    | 備考                     |
|--|---|--|------------------------|
| 高野 与一<br>西連地 雅樹<br>小松崎 秀人<br>引地 史郎1)<br>亀田 宗隆2)                          | マグネシウム(II)、亜鉛(II)セスキノナト錯体による酸素活性化と有機基質の酸化反応 | 第20回日本化学会関東支部茨城地区研究交流会予稿集, p.7(2009. 11) | 1)神奈川大学工学部<br>2)東工大資源研 |
| 小澤 和幸<br>小松崎 秀人<br>引地 史郎1)<br>亀田 宗隆2)                                    | ニッケル(II)チオラト錯体と酸素分子との反応における分光学的解析           | 第6回茨城地区分析技術交流会要旨集, p.44 (2009. 12)       | 1)神奈川大学工学部<br>2)東工大資源研 |
| 高野 与一<br>小松崎 秀人<br>引地 史郎1)<br>亀田 宗隆2)                                    | マンガンカテコラト錯体の分光学的性質                          | 第6回茨城地区分析技術交流会要旨集, p.445(2009. 12)       | 1)神奈川大学工学部<br>2)東工大資源研 |
| 小松崎 佑介<br>千葉 洋祐<br>小松崎 秀人<br>引地 史郎1)<br>亀田 宗隆2)                          | マンガン(II)チオアセタト錯体の分光学的性質                     | 第6回茨城地区分析技術交流会要旨集, p.46 (2009. 12)       | 1)神奈川大学工学部<br>2)東工大資源研 |
| 小松崎 秀人<br>塩田 明彦<br>三木 奈保美<br>高野 与一<br>蝦名 不二夫<br>引地 史郎1)<br>亀田 宗隆2)       | トリスピラゾリルポレート配位子を有するマンガンセスキノナト錯体の合成と反応性      | 第15回高専シンポジウム講演要旨集(いわき大会), p.66 (2010. 1) | 1)神奈川大学工学部<br>2)東工大資源研 |
| 蝦名 不二夫<br>安部 慎一郎<br>小松崎 秀人<br>佐藤 稔<br>滑川 真人<br>石田 明寛                     | テトラフェニルポルフィリン誘導体のバナジウム(IV)錯体の簡便・高収率な合成法の開拓  | 茨城工業高等専門学校研究彙報 第45号 pp.79-88(2010.3)     |                        |
| 高野 与一<br>三木 奈保美<br>小松崎 秀人<br>佐藤 稔<br>亀田 宗隆1)<br>引地 史郎2)                  | マンガンカテコラト類縁錯体の合成と酸素分子活性化                    | 日本化学会第4回関東支部大会講演予稿集, p.145 (2010. 9)     | 1)東工大資源研<br>2)神奈川大学工学部 |
| 江口 裕<br>貴志 礼文<br>小澤 和幸<br>小松崎 秀人<br>佐藤 稔<br>蝦名 不二夫<br>亀田 宗隆1)<br>引地 史郎2) | コバルト(II)酸素錯体の合成と反応性                         | 日本化学会第4回関東支部大会講演予稿集, p.145 (2010. 9)     | 1)東工大資源研<br>2)神奈川大学工学部 |



## 物質工学科

| 氏名  | 論文・著書名   | 発表機関・出版社等<br>巻、号(年、月)   | 備考  |
|---|--|---|---|
| 小澤 和幸<br>貴志 礼文<br>江口 裕<br>小松崎 秀人<br>佐藤 稔<br>梶田 宗隆1)<br>引地 史郎2)    | ジヒドロキシベンゼンを配位子としたコバルト(II)、ニッケル(II)錯体の合成と性質   | 日本化学会第4回関東支部大会講演予稿集, p.145 (2010. 9)  | 1)東工大資源研<br>2)神奈川大学工学部  |
| 蝦名 不二夫<br>小松崎 秀人<br>佐藤 稔<br>宮下 美晴<br>奥村 晴美                        | テトラフェニルポルフィリン誘導体のバナジウム(IV)錯体の簡便・高収率な合成法の開拓   | 第20回日本化学会関東支部大会講演予稿集, p.151 (2010. 9)   |   |
| 和田 由加子<br>鈴木 康司   | <i>Pseudomonas putida</i> 由来オキサロ酢酸デカルボキシラーゼ遺伝子のクローニング  | 第20回日本化学会関東支部茨城地区研究交流会予稿集, p30 (2010. 11)   |   |
| 鈴木 康司<br>小堀 奈々  | <i>Pseudomonas putida</i> KT2440株由来リパーゼ遺伝子のクローニングと大腸菌での発現  | 茨城工業高等専門学校研究彙報 第45号 pp.91-96 (2010.3)   |   |
| 松原 智之1)<br>宮下 美晴<br>西尾 嘉之2)                                       | フェニルカルバメート化キチン・キトサンの合成と構造および置換度解析  | 高分子論文集, 67巻, pp.135-142 (2010. 2)   | 1)農工大工<br>2)京大院農  |
| N.Tan1)<br>H.Furukawa2)<br>Y.Miyashita<br>K.Horie1)<br>R.Yokota3) | High-Strength Gels: Network Structure of Jungle-Gym Type Polyimide Gels Studied with Scanning Microscopic Light Scattering | Asian Pacific Conference for Materials and Mechanics 2009 at Yokohama, Japan (2009. 11) | 1)Tokyo University of Agriculture and Technology<br>2)Yamagata University<br>3)Institute of Space and Astronautical Science |
| 小泉 雅子1)<br>本木 遥奈2)<br>宮下 美晴<br>山崎 理絵3)<br>西尾 嘉之4)                 | コハク酸水素コレステロール／脂肪族アミン系コンプレックスの液晶形成挙動  | 第20回日本化学会関東支部茨城地区研究交流会予稿集, P.14 (2009. 11)  | 1)平成21年度専攻科1年生<br>2)平成20年度卒業生<br>3)長岡技科大工<br>4)京大院農   |
| 木村 仁亮1)<br>谷口 昭三  | 内脂中に主成分として含まれるオレイン酸酸化の検討   | 第20回日本化学会関東支部茨城地区研究交流会予稿集, P.64 (2009. 11)  | 1)平成21年度専攻科1年生  |
| 齊藤 洵也1)<br>谷口 昭三  | 精油による有害物質除去作用の検討   | 第20回日本化学会関東支部茨城地区研究交流会予稿集, P.63 (2009. 11)  | 1)平成21年度専攻科2年生  |
| 谷口 昭三<br>須田 猛   | 香りと化学を結びつけた公開講座の取り組み   | 日本化学会第89春季年会講演予稿集,3-PB-22 (2010.3)  |   |
| 砂金 孝志<br>中村 隼人1)<br>大山 美香2)<br>村山 亨3)                             | 酸化亜鉛及び酸化ジルコニウム針状結晶の作製  | 第20回日本化学会関東支部茨城地区研究交流会予稿集, P.80 (2009. 11)  | 1)平成20年度卒業生<br>2)平成19年度卒業生<br>3)平成21年度卒業生   |

## 物質工学科

| 氏名   | 論文・著書名   | 発表機関・出版社等<br>巻、号(年、月)  | 備考  |
|--|--|--|---|
| 黒澤 悟史1)<br>砂金 孝志   | 二酸化チタン光触媒繊維の作製とその性質                                | 第20回日本化学会関東支部茨城地区研究交流会予稿集, P.81 (2009. 11)                             | 1)平成21年度専攻科2年生                                  |
| 砂金 孝志<br>黒澤 悟史1)<br>藤 貴大2)<br>福田 和正2)<br>齋藤 有人2)               | 二酸化チタン光触媒繊維の作製とその性質                                | 第15回高専シンポジウム in いわき講演要旨集, P.309 (2010.1)                               | 1)平成21年度専攻科2年生<br>2)平成21年度卒業生                   |
| 砂金 孝志<br>黒澤 悟史1)   | 二酸化チタン光触媒繊維の作製とその性質                                | 茨城工業高等専門学校研究彙報 第45号 pp.87-90(2010.3)<br>(光触媒技術情報No65p.349-352(2010.6)) | 1)平成21年度専攻科2年生                                  |
| グスマン ルイス<br>酒寄 貴文1)  | 大型単結晶の高速成長の検討                                      | 第20回日本化学会関東支部茨城地区研究交流会予稿集, P.26 (2009. 11)                             | 1)平成21年度卒業生                                     |
| 川上 優1)<br>名越 敏昭2)<br>山形 信嗣                                     | H-ZSM-5触媒によるブタノール-エタノール系からのプロピレン合成                 | 第20回日本化学会関東支部茨城地区研究交流会予稿集, P.88 (2009. 11)                             | 1)平成21年度専攻科1年生<br>2)平成20年度卒業生                   |
| 川上 優1)<br>高橋 祐紀2)<br>山形 信嗣                                     | H-ZSM-5触媒によるブタノールからのプロピレン生成に対する金属イオンの添加効果          | 第105回触媒討論会講演予稿集, 1P63 (2010.3)   | 1)平成21年度専攻科1年生<br>2)平成21年度卒業生                   |
| 田口 のり子1)<br>佐藤 稔   | ジアザ化合物で架橋されたフタロシアニン類のコバルト(II)錯体の磁気的性質              | 第20回日本化学会関東支部茨城地区研究交流会予稿集, P.79 (2009. 11)                             | 1)平成21年度専攻科2年生                                  |
| 竹本 史織1)<br>佐藤 稔  | ファイトレメディエーションの研究 ～シダ植物中におけるCu <sup>2+</sup> の存在形態～ | 第20回日本化学会関東支部茨城地区研究交流会予稿集, P.89 (2009. 11)                             | 1)平成21年度専攻科2年生                                  |
| 佐藤 稔<br>大和田 創1)  | VBAを用いた紫外・可視吸収スペクトルの自動表示プログラムの開発                   | 茨城工業高等専門学校研究彙報 第45号 pp.97-101(2010.3)                                  | 1)平成20年度物質工学科卒業生                                |
| 小林 孝行<br>辰巳 憲司1)<br>飯村 洋介1)                                    | 堆肥の水抽出有機物がPAHの微生物分解に及ぼす影響                          | 第25回日本腐植物質学会講演要旨集.p53-54 (2009.11)                                     | 1)産総研環境管理                                       |
| 藪田 ひかる1)<br>福嶋 正巳2)<br>川崎 幹生3)<br>田中 ふみ子4)<br>小林 孝行<br>辰巳 憲司4) | 腐植化初期の腐植物質のフリーラジカル濃度に関与する多様な極性基                    | 第25回日本腐植物質学会講演要旨集.p57-58 (2009.11)                                     | 1)阪大院理<br>2)北大工<br>3)埼玉県環境科学国際センター<br>4)産総研環境管理 |
| 小林 孝行<br>神永 浩久1)<br>鈴木 康司                                      | 界面活性剤を用いたPAH汚染土壌のバイオレメディエーション手法の開発                 | 第8回全国高専テクノフォーラム予稿集. p34 (2010.8)                                       | 1)平成21年度卒業生                                     |

## 専攻科特別研究題目一覧表（平成21年度）

| 特別研究題目  | 学生名    | 指導教員          |
|---|--------|---------------|
| <b>産業技術システムデザイン工学専攻</b>                               |        |               |
| <b>機械工学コース</b>  |        |               |
| 銅箔の疲労寿命に及ぼす負荷条件の影響                                    | 相田 勇氣  | 押久保 武         |
| SPS法を用いたELID研削用ポーラスメタルボンド砥石の開発                        | 井川 裕太  | 長谷川 勇治        |
| ダブルプローブを用いたアフターグロー窒素プラズマの電子温度および電子密度測定                | 石井 直紀  | 澁澤 健二         |
| 6脚歩行ロボットの歩行安定化の研究                                     | 加藤 義隆  | 寶角 敬一         |
| ベビーカーにおける階段昇降機構の開発                                    | 川又 基木  | 平澤 順治         |
| 準安定オーステナイト系ステンレス鋼における変態誘起塑性の変形挙動と力学的性質                | 郡司 光   | 富永 学          |
| 脚部障害発生時の6脚歩行ロボットの歩行アルゴリズムの研究                          | 田山 宗徳  | 寶角 敬一         |
| ELID研削用ポーラス樹脂砥石の開発                                    | 長田 雄一  | 長谷川 勇治        |
| 色素増感型太陽電池の製作および電極膜の熱物性測定                              | 額賀 晴樹  | 根本 栄治         |
| 水平液滴接触法による界面張力の測定に関する研究                               | 箭内 健彦  | 柴田 裕一         |
| 固体高分子形燃料電池の触媒分布最適化による発電性能向上に関する研究                     | 山下 恭平  | 根本 栄治         |
| <b>電気電子工学コース</b>                                      |        |               |
| 可視ATR法による銅フタロシアニン薄膜の光学特性評価                            | 青木 克仁  | 若松 孝          |
| ピンパッキング問題の公開鍵暗号への応用                                   | 金澤 優   | 安細 勉          |
| 太陽電池アレイのI-Vカーブの補正および最大出力点の算出                          | 砂川 祐人  | 関口 直俊         |
| 簡単な光学系による低周波微小振動の計測                                   | 林 明宏   | 若松 孝          |
| <b>情報工学コース</b>  |        |               |
| シラバス情報を活用した携帯情報端末による学習支援システムの開発                       | 安西 孝仁  | 滝沢 陽三         |
| 学生支援を目的としたSNSの構築とユーザ間の交流の広がりに関する研究                    | 井上 賢治  | 滝沢 陽三         |
| 最大クリーク問題を使用した公開鍵暗号系の開発                                | 上野 利浩  | 安細 勉          |
| 教育のための管理機能およびCMSと連携したマルチメディア機能を組み込んだSNSの開発            | 後藤 悠   | 滝沢 陽三         |
| MPIを用いた分散処理型データ収集システムの開発と評価                           | 高橋 舟平  | 村田 和英         |
| SPINによる検証支援ツールの開発                                     | 野口 拓也  | 滝沢 陽三<br>小飼 敬 |
| VDMによる検証支援ツールの開発                                      | 藤澤 一博  | 滝沢 陽三<br>小飼 敬 |
| アレイコンピュータに用いられるプロセス間接続ネットワークシミュレータの開発                 | 八島 亮平  | 村田 和英         |
| <b>応用化学コース</b>  |        |               |
| テトラフェニルポルフィリン誘導体のバナジル(IV)錯体の簡便・高収率な合成法の開拓             | 安部 慎一郎 | 蝦名 不二夫        |
| 光触媒繊維の作製とその性質   | 黒澤 悟史  | 砂金 孝志         |
| トリスピラゾリルボレート配位子を有するマンガン(II)チオアセト錯体、チオラト錯体の反応性         | 小松崎 佑介 | 小松崎 秀人        |
| 精油の有害物質除去作用による室内環境の改善                                 | 齋藤 洵也  | 谷口 昭三         |
| ジアザ化合物で架橋されたフタロシアニン類のCo(II)錯体の磁氣的性質                   | 田口 のり子 | 佐藤 稔          |
| ファイトレメディエーションの研究<br>～シダ植物中におけるCu <sup>2+</sup> の存在形態～ | 竹本 史織  | 佐藤 稔          |

## 卒業研究題目一覧表（平成21年度）

## 機械システム工学科

| 卒業研究題目  | 学生名    | 指導教員  |
|---|--------|-------|
| 色素増感太陽電池における電解質溶液の研究                                  | 加藤 大樹  | 根本 栄治 |
| 高温酸化物超伝導体の合成・開発に関する研究<br>(多点温度プローブ法による主軸熱物性測定)        | 田口 千宏  | 根本 栄治 |
| 無重力場における金属の沸騰熱伝達に関する研究                                | 斉藤 智大  | 根本 栄治 |
| 光学顕微鏡による植物の原形質流動の観察                                   | 根本 祐哉  | 富永 学  |
|   | 森 敬祐   |       |
| くびれの伝播によって塑性変形したステンレス鋼の形状評価                           | 森 翔平   | 富永 学  |
| オーステナイト系ステンレス鋼に生じたマルテンサイト変態の分析                        | 佐々木 直人 | 富永 学  |
| 蒸気タービン制御系の動特性解明に関する研究                                 | 川上 悠里  | 小堀 繁治 |
| 燃焼実験装置のリンク機構を用いた改良                                    | 武藤 禅   | 小堀 繁治 |
| 内燃機関の燃焼室における境界層温度分布の測定                                | 青木 翔   | 小堀 繁治 |
| 3D画像に関する装置開発/検討                                       | 田山 大輔  | 加藤 文武 |
| 光触媒材料の薄膜化に関する研究                                       | 木村 太一  | 加藤 文武 |
| 水陸両用ミニチュアホバークラフトの製作                                   | 野口 大樹  | 小室 孝文 |
| 熱気球の模型の製作   | 橋本 卓哉  | 小室 孝文 |
| 構造物の最適構造設計のための有限要素解析                                  | 青野 勇輝  | 小室 孝文 |
|   | 河野 厚徳  |       |
| 過共析鋼の三相焼入れ  | 山本 航平  | 谷山 久法 |
| 亜共析鋼の三相焼入れ  | 小倉 崇晃  | 谷山 久法 |
| 鋼の結晶粒に及ぼす熱処理温度の影響に関する基礎研究<br>ー顕微鏡組織を利用したマイクロデバイスについてー | 櫻井 駿   | 谷山 久法 |
| ステンレス鋼の高温腐食   | 江口 祥平  | 谷山 久法 |
| 環境調和型農作物洗浄装置の開発                                       | 今川 貴恵  | 押久保 武 |
|   | 後藤 真奈美 |       |
| 携帯用マグネシウムスロープの荷重試験及び開発                                | 友部 可奈  | 押久保 武 |
| 赤外線応力測定法に関する研究  | 平山 裕修  | 押久保 武 |
| 教育用PIVシステムの開発   | 塚田 太郎  | 池田 耕  |
| 動画像による3次元形状計測手法の検討                                    | 山田 和也  | 池田 耕  |
| 偏向位相シフト法を用いた高精度PIVの開発                                 | 櫻井 大地  | 池田 耕  |
| ステレオ位相シフトデジタルHPIVの開発                                  | 安 正博   | 池田 耕  |
| マイクロ波放電窒素プラズマにおけるNO $\gamma$ バンドの放射特性                 | 長谷川 直幹 | 澁澤 健二 |
| アフターグロー窒素プラズマの放射測定                                    | 小泉 敦裕  | 澁澤 健二 |
| トリプルプローブによるアフターグロー窒素プラズマの電子温度測定                       | 長澤 康裕  | 澁澤 健二 |
| 近赤外線領域におけるマイクロ波放電窒素プラズマの放射測定                          | 宮城 洋平  | 澁澤 健二 |
| ジェット洗浄に関する応用研究  | 富田 真裕  | 柴田 裕一 |
| 過熱水蒸気を応用した食品加工の研究                                     | 高野 潤一  | 柴田 裕一 |
| 磁性流体の運動に関する研究   | 中川 直紀  | 柴田 裕一 |
| マイクロカプセルの製造技術に関する研究                                   | 中林 洋輔  | 柴田 裕一 |
| 自己回避性を取り入れた膜モデルによる形態変化相転移の研究                          | 畑岡 進也  | 鯉 渕弘資 |

## 卒業研究題目一覧表（平成21年度）

## 電子制御工学科

| 卒業研究題目  | 学生名   | 指導教員  |
|---|-------|-------|
| ハーモニックバランス法に使用するフーリエ変換の効率化                          | 梶山賢吾  | 堀利浩   |
|   | 嶋田智昭  |       |
| テラヘルツ波帯ジャイロトロン <small>の</small> PLL安定化のための制御用電子回路設計 | 相田真   | 堀利浩   |
|   | 山本翔太郎 |       |
| Webを利用した工学教育コンテンツの開発                                | 千ヶ崎卓巳 | 菊池誠   |
| 感性に基づくギターサウンドの評価・設計に関する研究                           | 山崎将仁  | 菊池誠   |
| 倒立振子における手動－自動制御系間の状態遷移に関する研究                        | 三原翔大  | 菊池誠   |
|   | 野村夏樹  |       |
| 小型2重反転回転翼機の自律飛行                                     | 岩上裕樹  | 菊池誠   |
|   | 大場隆宏  |       |
| テザー衛星のダイナミックモデルに関する一考察                              | 木村康裕  | 菊池誠   |
| 飛行機の着陸時における経路角制御に関する研究                              | 落合翔太  | 菊池誠   |
| キープレフト走行するライトレースロボットの研究<br>－NXTを用いた試作車の開発－          | 宮田樹   | 平澤順治  |
|   | 高橋将太  |       |
| 自律移動ロボットの研究<br>－小型多脚式ロボットにおける適用－                    | 板橋幸久  | 平澤順治  |
| 全方向移動ロボットのインターフェイスに関する研究<br>－実験用移動台車の設計・製作－         | 山越好太  | 平澤順治  |
| CIP処理機の作製とナノ有機半導体薄膜改質への応用                           | 爪木澤亮  | 金成守康  |
| CIP処理されたナノ有機半導体薄膜の曲げ強度                              | 小嶋司   | 金成守康  |
|   | 野村亮太  |       |
| 6脚歩行ロボットの歩容検討                                       | 大坪祐季  | 寶角敬一  |
| 自動車用給油自動化の検討  | 林勇貴   | 寶角敬一  |
| 多関節指の試作研究   | 作間裕樹  | 寶角敬一  |
|   | 野上裕也  |       |
| マイクロバブル法を用いた精密研削システムの構築                             | 小林克広  | 長谷川勇治 |
|   | 西野彰馬  |       |
| 電解還元水を用いた精密研削システムの構築                                | 小島浩樹  | 長谷川勇治 |
| 小径管内探査ロボットの開発                                       | 佐藤風毅  | 長谷川勇治 |
| 倒立振子のゆらぎの解析   | 猿田祐平  | 住谷正夫  |
| モーションキャプチャを用いた歩行姿勢変化の解析                             | 塩野圭太  | 住谷正夫  |
| 嘘による脳波変化の抽出   | 飯塚雅明  | 住谷正夫  |
| マイコンを用いたゆらぎ発生装置の開発                                  | 近藤理絵  | 住谷正夫  |
| ゆらぎ画像の作成  | 鈴木慎也  | 住谷正夫  |
| ネットワーク応用画像認識ロボットの開発                                 | 能登拓也  | 飛田敏光  |
| 免疫応用学習システムの検討                                       | 塩谷淳史  | 飛田敏光  |
| アクチュエータのマイコン協調制御                                    | 阿久津行裕 | 飛田敏光  |
| 地震管制用センサの開発   | 吉村広夢  | 飛田敏光  |
| 太陽電池・LED活用情報案内システムの検討                               | 男庭正規  | 飛田敏光  |
| 振幅スペクトル差分法を用いた欠陥検出法の性能向上に関する検討                      | 関根浩史  | 荒川臣司  |
| 位相スペクトル画像の特徴分析                                      | 古谷謙尚  | 荒川臣司  |
| カラー印刷物の定量評価のための色抽出に関する検討                            | 岡田悠太郎 | 荒川臣司  |



## 卒業研究題目一覧表（平成21年度）

## 電気電子システム工学科

| 卒業研究題目   | 学生名     | 指導教員    |
|--|---------|---------|
| 頂点被覆問題を用いた公開鍵基盤の検討   | 中根 裕介   | 安 細 勉   |
|  | 鈴木 康太   |         |
| 平面拡張型ナップサック暗号に対する安全性に関する研究                                       | 間宮 裕貴   | 安 細 勉   |
|  | 松本 恭明   |         |
| 無線LANを用いた人物位置探索システム  | 菊池 陽平   | 吉 成 偉 久 |
|  | 川又 千博   |         |
|  | 渡部 裕大   |         |
| 増容量電線とLC線材の併用による融雪効果と経済性   | 小平 航大   | 長 野 眞 康 |
|  | 草薨 朗飛   |         |
| 遺伝的アルゴリズムによる伝送線路フィルタの最適化設計                                       | 菊地 祐太   | 遠 藤 勲   |
| RC結合線路のモード分解による解析  | 二瓶 孝章   | 遠 藤 勲   |
| LED発光色が植物の生長特性に及ぼす影響の研究  | 吉田 将大   | 田 辺 隆 也 |
| 円形開口を用いたマイクロホログラム再生方法の特性解析                                       | 黒澤 昌弘   | 田 辺 隆 也 |
| M系列符号を用いた光ディスク再生信号の評価  | 鈴木 恵介   | 田 辺 隆 也 |
| 歯のかみ合わせシミュレーションに用いる最適化法の検討                                       | 佐藤 匠    | 丸 山 智 章 |
| モーションキャプチャシステムを用いた身体に対する頭位の重心動揺測定                                | 根本 良    | 丸 山 智 章 |
| 動的光散乱法を用いた微粒子解析プログラムの作成  | 山越 康平   | 若 松 孝   |
| 水晶振動子発振法によるアルコールの測定  | 高安 基大   | 若 松 孝   |
|  | 渡邊 克利   |         |
| ニワトリ卵白リゾチームの結晶化  | 柳田 賢治   | 若 松 孝   |
|  | 鈴木 孝    |         |
| Cds-酸化物半導体二層構造を持つ微粒子の作製  | イサムッディン | 森 龍 男   |
|  | 後藤 圭    |         |
| 酸化物ナノ微粒子の作製と物性   | 三浦 一喜   | 森 龍 男   |
|  | 沼田 諒平   |         |
| SiC-SiCを用いたACスイッチに関する研究  | 長谷川 泰俊  | 成 慶 珉   |
|  | 野口 裕太   |         |
| 非絶縁形昇圧電力変換回路の試作と検討   | 米田 修平   | 成 慶 珉   |
|  | 相澤 優太   |         |
| 直流リンクコンデンサ容量による出力電圧高調波に関する研究                                     | 湯田 基樹   | 関 口 直 俊 |
| 小型太陽電池I-V特性の分析   | 野内 雅彦   | 関 口 直 俊 |
| 触媒量の変化による固体高分子型燃料電池の出力評価2  | 塚原 淳    | 関 口 直 俊 |
| 循環型コミュニケーションによる意見の相違の解消について                                      | 庄司 勝一   | 松 久 隆   |
| Communication Resolves Moral Hazard between Principal and Agents | 谷川 大洋   | 松 久 隆   |

## 卒業研究題目一覧表（平成21年度）

## 電子情報工学科

| 卒業研究題目                              | 学生名        | 指導教員  |
|-------------------------------------|------------|-------|
| WebShellを活用したプログラミング学習システムの開発       | 橋本和樹       | 滝沢陽三  |
| モチベーション向上を目的としたTODOリスト管理支援ツールの開発    | 柳岡新一郎      | 滝沢陽三  |
| メタ言語の考案とその実装                        | 横山直人       | 滝沢陽三  |
| バージョン管理におけるクラス差分閲覧システムの開発           | 石垣達也       | 小飼敬   |
|                                     | 小橋正実       |       |
|                                     | 田代信介       |       |
| Wikiを利用したクラス記述支援システムの開発             | 唐沢駿平       | 小飼敬   |
|                                     | 松本恭平       |       |
| メールソフトを活用した発信的英語力向上のための学習法          | 芥俊枝        | 奥山慶洋  |
| eラーニング学習画面における選択肢スタイルが学習者に与える影響     | 篠原尚人       | 奥山慶洋  |
| シェル回転競技のための最適推定手法の検討                | 遠藤勇真       | 杉村康   |
|                                     | 久保田剛史      |       |
|                                     | 清水亨        |       |
| シェル回転競技用擬似システムの検討                   | 菊池啓太       | 杉村康   |
|                                     | 吉井一清       |       |
| ラジオの設計・製作                           | 馬目江里子      | 村田和英  |
|                                     | 水谷有里       |       |
| 増幅器の製作とその評価                         | 岡里貴大       | 村田和英  |
|                                     | 藤枝涼        |       |
| 作曲支援ソフトの開発                          | 吉田広大       | 村田和英  |
| 学生サポートツールの製作                        | 小倉将揮       | 村田和英  |
| 遺伝的アルゴリズムを用いた最短経路問題に関する研究           | 古徳真美       | 弘畑和秀  |
| ダイクストラ法を用いた最短経路問題に関する研究             | 大高美香       | 弘畑和秀  |
| 魔方陣の作成に関する研究                        | 秋山幸雄       | 弘畑和秀  |
| 数独解を求めるプログラムの研究                     | 菌部史彦       | 弘畑和秀  |
| 川渡り問題に関する研究                         | 久保匠        | 弘畑和秀  |
| 領域分割による画像解析プログラムの作成と評価              | 櫻井勇人       | 弘畑和秀  |
| タッチセンシング技術に関する研究                    | 岡田海渡       | 市毛勝正  |
| 音声合成における韻律情報についての検討                 | 菅原透仁       | 市毛勝正  |
|                                     | 柳林直人       |       |
| 骨伝導イヤホンの特性についての検討                   | 高野夏樹       | 市毛勝正  |
| 画像データからのテキスト音声合成についての検討             | 立花俊之       | 市毛勝正  |
| 原子炉シミュレータの試作                        | 松田理絵       | 松澤孝男  |
| 透明電極ITOを用いたTi-Fe-Pb-Bi-O系薄膜キャパシタの形成 | ショー シュク イー | 山口一弘  |
| ELF磁界による生体モデル内の誘導電界の解析              | 水嶋千遥       | 柴田尚志  |
| 電磁波における電磁シールド効果の解析                  | 藤枝正樹       | 柴田尚志  |
| 電磁界にある球状媒質内の誘導電流の解析                 | 高橋康之       | 柴田尚志  |
| 1GeVの電子ストレージリングの設計について              | 大橋幸一郎      | 四王天正臣 |
|                                     | 坂本光太郎      |       |
|                                     | 寺門鑑        |       |
| 一般家庭の電気使用におけるCO2排出量の削減に関する検討        | 佐藤怜        | 四王天正臣 |
|                                     | 立原亘        |       |
|                                     | 武藤弘晃       |       |

## 卒業研究題目一覧表 (平成21年度)

## 物質工学科

| 卒業研究題目  | 学生名    | 指導教員   |
|---|--------|--------|
| ZnO及びZrO <sub>2</sub> ウィスカーの作製とTi錯体の合成                          | 村山 亨   | 砂金孝志   |
| Ti錯体を用いたTiO <sub>2</sub> 光触媒薄膜の低温作製                             | 福田和正   | 砂金孝志   |
| TiO <sub>2</sub> 系光触媒繊維によるトルエンの気相分解                             | 齋藤 有人  | 砂金孝志   |
| 新規な可視光応答型光触媒作製の試み   | 藤 貴大   | 砂金孝志   |
| 多孔質な金属酸化物薄膜を使った色素増感太陽電池の研究                                      | 三井雅治   | 砂金孝志   |
| 鉄系超伝導体FeSe単結晶の液相成長  | 西野 聡美  | 原 嘉昭   |
| 化学気相輸送法による鉄系超伝導体PbO型FeSeの結晶成長                                   | 和田 紗紀  | 原 嘉昭   |
| フタロイル化キトサンへのラクチドの開環グラフト化  | 横井 友美  | 宮下美晴   |
| 界面活性剤との錯形成を利用したキトサン誘導体合成の試み                                     | 掛札 さくら | 宮下美晴   |
| キチン/ポリエチレングリコール系ゲルの作製   | 小林 愛   | 宮下美晴   |
| セルロースプロピオネート/ビニルポリマー系ブレンドの相溶性                                   | 細井 佳香  | 宮下美晴   |
| N, N'-3-ピリジレンビス(サリチリデンイミン)バナジル(IV)錯体のコバルト(II)ポルフィリンへの配位とその磁気的性質 | 鈴木 理恵  | 佐藤 稔   |
| ホスフィン類を軸配位子として持つコバルト(II)ポルフィリンへの酸素付加反応                          | 吉澤 恵理  | 佐藤 稔   |
| ホスフィン類を軸配位子として持つピケットフェンス型ポルフィリンコバルト(II)錯体への酸素付加反応               | 関澤 慎吾  | 佐藤 稔   |
| ビス(2-ピリジンメタノーラト)銅(II)錯体のシクロデキストリンへの包摂挙動                         | 平山 雄祥  | 佐藤 稔   |
| コバルト(II)セミキノナート錯体の酸素付加反応  | 田山 智史  | 佐藤 稔   |
| 土壌に含まれる重金属イオンの定量<br>～家庭用電子レンジでの土壌分解法の検討・その4                     | 桐生 真奈美 | 須田 猛   |
| 技能検定試験(化学分析)のためのバーチャラボラトリーの構築・その1                               | 菅谷 大智  | 須田 猛   |
| トリスピラゾリルボレート配位子を有するニッケル(I)およびコバルト(I)錯体の合成と反応性                   | 長尾 遼介  | 小松崎 秀人 |
| ニッケル依存型アシリダクトンジオキシゲナーゼモデル錯体の合成と反応性                              | 入野 将昂  | 小松崎 秀人 |
| カルシウム(II)カテコラトおよびセミキノナート錯体の合成と性質                                | 芳賀 健士郎 | 小松崎 秀人 |
| コバルト(II)酸素錯体の合成と反応性   | 江口 裕   | 小松崎 秀人 |
| ゲンチサトジオキシゲナーゼのマンガン置換モデル錯体の合成と性質                                 | 松崎 弘平  | 小松崎 秀人 |
| マイクロ波反応による有機合成(6). クラウンエーテル並びに環状トリアザ化合物の合成への展開                  | 木村 麻衣  | 蝦名 不二夫 |
| 3, 4-ジメチルピロールの新規合成法の開拓(2)                                       | 奥村 晴美  | 蝦名 不二夫 |
| 過酸化水素を酸素源とするチトクロムP-450モデル研究(6).<br>陰イオン性金属ポルフィリン触媒を用いたモデル系の再検討  | 藤田 一磨  | 蝦名 不二夫 |
| 次亜塩素酸イオン-水溶性金属ポルフィリン系を用いたハロペルオキシンダーゼモデルの検討                      | 菊地 健太  | 蝦名 不二夫 |
| 1-ブタノールからのプロピレン生成に対する種々金属イオン交換ZSM-5の触媒作用                        | 高橋 祐紀  | 山形 信嗣  |
| バイオアルコールの接触転換等を目的とする多目的活性試験装置の製作                                | 佐藤 大地  | 山形 信嗣  |
| ゼオライト触媒へのイオン対の導入とその触媒作用   | 小森谷 栄太 | 山形 信嗣  |
| Pseudomonas細菌へのpINC1形質転換技術の検討                                   | 山崎 詩織  | 鈴木 康司  |
| Pseudomonas putida KT2440株へのpINC1形質転換技術の確立                      | 打越 美希  | 鈴木 康司  |
| Pseudomonas putida KT2440株由来マルチシャペロン遺伝子のクローニング(2)               | 熊井 美咲  | 鈴木 康司  |
| 特殊環境における有用微生物の探索<br>～常磐湯本温泉由来有用微生物の単離と同定～                       | 三村 真琴  | 鈴木 康司  |
| Basillus由来ジアホラーゼ遺伝子のクローニング(4)<br>～Mbol部分切断断片の解析～                | 藤代 華歌  | 鈴木 康司  |
| 物質工学科棟改修後の学生実験室3における作業環境測定と換気改善<br>対策の提案                        | 二川 康平  | 谷口 昭三  |

## 物質工学科

| 卒業研究題目  | 学生名      | 指導教員          |
|---|----------|---------------|
| コーヒー豆由来バイオディーゼル燃料についての調査および実用化の検討             | 小室 さゆみ   | 谷口 昭三         |
| 考案された水蒸気蒸留器内ブタにおける形状の検討                       | 飛田 良憲    | 谷口 昭三         |
| 2-(トリメチルシロキシメチル)ピロールを用いたジピラン合成およびジピラン誘導体合成の検討 | 高橋 吉騎    | 谷口 昭三         |
| 塩基性触媒下におけるピロールとホルムアルデヒドとの1ポット反応について           | 山本 裕     | 谷口 昭三         |
| 周辺土壌における石油成分の分布解明および汚染土壌からの油分解菌の単離            | ヴォレニユ フエ | 小林 孝行         |
| ピレンの微生物分解に及ぼす腐植物質の構造特性の影響ー由来と調製法の異なる腐植物質を例として | 磯崎 里奈    | 小林 孝行         |
| 界面活性剤を用いたピレン模擬汚染土壌のバイオレメディエーション手法の検討          | 神永 浩久    | 小林 孝行         |
| グリシン結晶成長に対するエタノールの影響                          | 山本 良明    | グスマン・ルイス・アメリコ |
| ビスマルクブラ染料存在下におけるリン酸二水素カリウム結晶の成長速度             | 菊地 章雄    | グスマン・ルイス・アメリコ |
| 微量添加物による大型光学単結晶育成のための検討                       | 酒寄 貴文    | グスマン・ルイス・アメリコ |





平成 23 年 3 月 発行

編集・発行 茨城工業高等専門学校

〒312-8508 茨城県ひたちなか市中根 866  
TEL. 029 (272) 5201

印刷所 いばらき印刷 (株)

## CONTENTS

- 1 How to make Ibaraki inbound tourism  
..... Kenichi HAKOYAMA, Tomonori ISAKA and Toshihiko KUMASAKA (1)
- 2 On the working hypothesis of LSC (Language-specific cognitive)-system ..... Mineo IKEMATSU (11)
- 3 Research on students with higher score in listening than reading on English comprehension tests(1)  
..... Mineo IKEMATSU (17)
- 4 Construction of finite element used to search for minute cracks in composite materials  
..... Nagaaki KAWAHARA, Hiroshi IGARASHI, Hidenori NAKAGAWA and Shigeki YAMAMOTO (23)
- 5 An Analysis of Achievement Test of Mathematics for The First and Second Year Students of Ibaraki  
National College of Technology  
..... Nagaaki KAWAHARA, Shigeki YAMAMOTO, Yoshio OSAMOTO, Hiroshi IGARASHI and Hidenori NAKAGAWA (31)
- 6 Simultaneous Separation Measurement of Principal Electrical Conductivities and Principal Axis  
Angle of Two-Dimensional Anisotropic Material Using Multi-Probe Measuring Method  
..... Eiji NEMOTO and Aomi ONUMA (37)
- 7 Sensing of alcohol molecules using Quartz Crystal Microbalance method  
..... Motohiro TAKAYASU, Katsuyoshi AOKI, Tomoaki MARUYAMA and Takashi WAKAMATSU (45)
- 8 On Reality and The Free Will Theorem in Quantum Theory ..... Masaomi SHIODEN (51)
- 9 On the paper by EPR and its significance today(I) ..... Masaomi SHIODEN (57)
- 10 Development and Evaluation of Distributed Processing System for Collecting Data with MPI  
..... Kazuhide MURATA, Shuhei TAKAHASHI and Noriaki ANZAI (63)
- 11 Examination of Source Separation by Independent Component Analysis  
..... Yasuaki SHIBANO and Katsumasa ICHIGE (67)
- 12 A Study of the Solution of Traveling Salesman Problem by the Ant Colony Optimization  
..... Takaya ASANO and Kazuhide HIROHATA (71)
- 13 On the Existence of Vertex Disjoint Cycles in Graphs  
..... Ronald J. GOULD, Paul HORN and Kazuhide HIROHATA (77)
- 14 Study to Methodology for Software Development by a Group Composed of Experts in Various Fields  
..... Yozo TAKIZAWA and Kei KOGAI (81)
- 15 Construction of Diskless System for Programming Laboratory  
..... Yozo TAKIZAWA, Kei KOGAI and Makoto YAMADA (85)
- 16 The New Approach to Porphine Synthesis Using the Pyrolysis of Amine-BF<sub>3</sub> Adducts as Key Step  
..... Fujio EBINA, Keita SEDA, Minoru SATOH, Hidehito KOMATSUZAKI, Susumu KANAYA, Koji IINO,  
Tatsu-roh ICHIGE and Naomi WATANABE (89)
- 17 Preparation and Characterization of Zinc Oxide and Zirconium Oxide Fibers  
..... Takashi ISAGO, Takahiro FUJI, Satoshi KUROSAWA and Kazumasa FUKUDA (95)
- 18 Antimicrobe effect for *Legionella* strain by the titanium compound  
..... Hidehito KOMATSUZAKI, Akio SIMADA, and Koji SUZUKI (99)
- 19 The influences of run-up steps on jumping distance, approach velocity, and contact time in the  
junior long jumper ..... Yoshinori KINOMURA and Shinji MORI (105)
- 20 The Roles and Missions of Culture Clubs in National College of Technologies.  
:Focusing on "Literary Arts Clubs" as the Place for Stimulating and Enriching Students' Imagination.  
..... Kunio SEO, Takaaki KIRYU and Ryo SUZUKI (116)