ISSN 0286－0503

Research Reports of Tokyo National College of Technology

東京工業高等専門学校

研　究　報　告　書

第 41(1) 号

2010.1

東京工業高等専門学校研究報告書　第41（1）号　目次

教養の概念と教養教育の目的 ……川　北　晃　司…… 1

課外物理実験教室の試行について
——低学年の学生に物理への興味を引き起こす試み—— ……潮　　秀　樹…… 21
大　野　秀　樹

波型接合部形状を有する突き合わせ接着継手の引張強度特性 ……秋　山　和　徹…… 23
志　村　　穣
黒　崎　　茂

構造用接着剤の弾性定数測定 ……松　井　真　一…… 29
志　村　　穣

歯付き鉄筋締結要素軸の強度解析 ……黒　崎　　茂…… 35
深　澤　正　寿
峯　尾　一　幸
志　村　　穣

圧電高分子フィルムを用いた疾患診断用足裏荷重測定具の試作 ……中　村　源一郎…… 41
黒　崎　　茂

家庭におけるエネルギー消費の実態調査と地球温暖化対策の検討 ……土　井　　淳…… 47
佐　藤　祐　亮

白色干渉分光フーリエ変換を使用した膜厚測定 ……山　内　峯　生…… 53
伊　藤　　浩
大　貫　繁　雄

アモルファスシリコンを用いて試作したダイオードの順方向電流の解析 ……柚　賀　正　光…… 59

半導体物性に親しむための実験授業 ……永　吉　　浩…… 65
小　池　清　之

エージェント間における学習能力格差の解消を実現する ……北　越　大　輔…… 71
階層型マルチエージェント強化学習システム　宮　内　龍之介
鈴　木　雅　人

プログラミング添削指導支援のためのプログラム意味解析ツールの開発 ……鈴　木　雅　人…… 77
北　越　大　輔

ユウロピウム（Ⅲ）とジエチレントリアミン五酢酸の ……工　藤　節　子…… 81
モル比５：３金属錯体の生成　佐々木　　慧
工　藤　翔　慈

理科教育のための CO_2/O_2 計測システム ……高　橋　三　男…… 83
山　内　峯　生
羽　鳥　広　範
松　岡　　敏
松　原　静　郎

トウモロコシにおける銅の分配と毒性 ……庄　司　　良…… 91
長　田　拓　哉
田　中　優　也

『新撰万葉集』注釈稿（上巻　冬部　八八～八九） ……津　田　　潔……（1）
半　澤　幹　一

Research Reports of Tokyo National College of Technology No. 41 (1)

CONTENTS

Koji KAWAKITA ····· The Conceptions of Kyoyo (Cultivation, Bildung) and the Objectives of the Liberal Arts Education ····· 1

Hideki USHIO ····· Implementing the classes of physics which have scientific experiments
Hideki OHNO after school ····· 21

Katsuyuki AKIYAMA ····· Tensile Strength Characteristic for Adhesive Butt Joint with Bonded
Jyo SHIMURA Surface of Waved Shape ····· 23
Shigeru KUROSAKI

Shin-ichi MATSUI ····· Measurements of Elastic Constants for Structural Adhesives ····· 29
Jyo SHIMURA

Shigeru KUROSAKI ····· Strength Analysis for Reinforced Connecting Shaft with Teeth ····· 35
Masatoshi FUKASAWA
Kazuyuki MINEO
Jyo SHIMURA

Genichiro NAKAMURA ····· The Developments of the Measuring Tool for the Applied Load
Shigeru KUROSAKI to the Sole of Foot Using Piezoelectric Polymer Film····· 41

Atsushi DOI ····· Investigation of Energy Consumption in Home and Examination
Yusuke SATO of Global Warming Countermeasure ····· 47

Mineo YAMAUCHI ····· Thin Film Thickness Measurement by Fourier Transform White-Light
Hiroshi ITO Interference Spectroscope····· 53
Shigeo OHNUKI

Masamitsu YUGA ····· Analysis of forward current by amorphous Si diode built as a trial ··· 59

Hiroshi NAGAYOSHI ····· Introduce a New Style Experiment to be Familiar with Semiconductor
Kiyoyuki KOIKE Properties ····· 65

Daisuke KITAKOSHI ····· Interactive Hierarchical Multi- Agent Reinforcement Learning System
Ryunosuke MIYAUCHI for Reducing the Gap Between Learning Performance of the Agents ··· 71
Masato SUZUKI

Masato SUZUKI ····· A Development of Program Semantic Analysis Tool for Assisting
Daisuke KITAKOSHI Program Correction ····· 77

Setsuko KUDO ····· Formation of a Metal Complex with a 5 : 3 Molar Ratio of
Satoshi SASAKI Europium (Ⅲ) and Diethylenetriaminepentaacetic Acid····· 81
Shoji KUDO

Mitsuo TAKAHASHI ····· CO_2/O_2 Measurement System for Science Education ····· 83
Mineo YAMAUCHI
Hironori HATORI
Satoshi MATSUOKA
Shizuo MATSUBARA

Ryo SHOJI ····· Evaluation of copper distribution in vegetable body and copper toxicity
Takuya OSADA on vegetable····· 91
Yuya TANAKA

Kiyoshi TSUDA ····· The Annotation of the Shinsen-man'yōshū (16) ····· (1)
Kan'ichi HANZAWA

教養の概念と教養教育の目的

川　北　晃　司*

The Conceptions of Kyoyo (Cultivation, Bildung) and the Objectives of the Liberal Arts Education

Koji KAWAKITA

Currently, the social needs of Kyoyo are witnessing a steady increase. Kyoyo is an amalgam of the capabilities that we must possess if we want to be human beings who follow social norms. We can roughly enumerate the new Kyoyo such as the power to position and control the self in relation to society, an understanding of others, communication skills, media literacy, technology literacy, bio/environmental/information/engineering ethics, and so on. However, uncertainty still exists with regard to what kyoyo stands for and the kind of liberal arts education that colleges should aspire to proffer. In this regard we will still be able to learn much from Isocrates (an ancient Greek rhetorican), P. Langevin (a French physicist) and M. Horkheimer (a Jewish-German philosopher) as well as from many Japanese writings on the conceptions of Kyoyo and the liberal arts education.

(Keywords: Bildung, Langevin, Horkheimer)

1．はじめに

教養の再生と復権を求める多くの議論が生みだされている[1)]。ここでいう「教養」とは、社会的規範のもとで人間らしく生きるために所有すべき、あるいは所有した方がよいと思われる類の「諸能力のアマルガム」[2)]である。高専や大学での教養教育は、専門基礎としての教養に加えて、そうした人間としての教養力形成に端緒として貢献するのが目的となるだろう。専門分野に進むために必要な基礎知識や語学力、国語力の他に、体力、人文社会自然系の一般知識、自己理解と他者理解、自文化理解と他文化理解、コミュニケーションスキル、メディアリテラシー、技術リテラシー、生命・環境・情報・企業・技術者倫理、等々の涵養が教養教育には含まれている。

こうして、「専門分化した学習や研究に伴われがちな視野狭隘と倫理性忘却への緩和剤」として語られることの多い「教養」ではあるが、そうした教養を語る自らの「資格」について、また、教養を強要したり公称したりすること自体の逆説性についても、自問せざるをえない。つまり教養は本来、道徳や倫理と同様、語るよりも示すべき属性なのであるが、あらためて問うことで初めて学べ、学ぶことで新たな問いが生まれることも多い。教養とは何であり、教養教育とはいかにあるべきか。本稿は、イソクラテス、ランジュバン、ホルクハイマーらの所説に学び、諸外国の教養教育例および戦前と最近の教養論・教養教育論を広く文献調査した記録であり、それにもとづく若干の主張である。

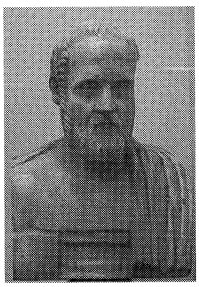
2．二つの源流

古代ギリシャ人は、人間であることの自負をなによりも、教育・教養に対するそれに結びつけた民族として知られる。彼らが課した教育は、人間としての完成を目的とする教育として、パイデイアと呼ばれた。ギリシャ人が教育を生産的技術の訓練や、日常道徳のしつけとは異なる、人間の形

＊一般教育科（人文社会）

成として自覚的にとらえ、人間に求められる内的価値全体をパイデイアと呼んだところに、西洋における、最初の教養教育は成立した。しかし、古代ギリシャは専門技術(テクネー)を軽視した。古代ギリシャは非人道的な特権階級社会、奴隷制社会でもあり、自由人階級が所有するにふさわしいとされたのは、教養（パイデイア）であった。

じつのところ、ギリシャ人が考えた理想的人間形成のために与えられるべき教養の内実は、必ずしも一様ではない。そこには、対立・競合する、二つの型の教育・教養理念があった。プラトン(BC427-BC347)が創設した学校、アカデメイアの門戸には、ある有名な文言が掲げられていた。「幾何学を学ばざる者は入門を許さず」。その逸話からも察せられるように、一つはプラトンの数学的哲学的な教養理念であり、もう一つは、ソクラテス（BC470 頃-BC399）のかげで知名度こそ低いが、イソクラテス(BC436-BC338)の文学的修辞学的教養理念であった。そして「結局イソクラテスがプラトンに勝った。古典古代の教養・教育は、本質的に美と芸術と文学の教育であって、科学教育ではなかった」(H.I.マルー)[3]



(イソクラテス)

プラトンは、理想的人間像としての哲人統治者、真の教養人は数理的学問によるきわめて長い陶冶の道を歩まなければならないと考えたが、プラトンと同時代の、弁論・修辞家イソクラテスの意見は異なっていた[4]。われわれには相互に説得しあい、われわれの求めるものを明らかにする能力が生来備わっている。そのおかげでわれわれは野獣の状態を脱しえたのみならず、都市を建て、法を創り、もろもろの技芸を起こした。そうイソクラテスは述べ、人間の全文化が弁舌と説得の力から生じたと説く。人間が他の動物と異なるのは、言葉（ロゴス）の点においてである。したがって、この言葉を練磨し育成することこそ人間が最も人間らしくなる方途である。イソクラテスがアテナイ人に勧めるのは、このような、言論を人間形成の中核とする教養理念であった。

イソクラテス的教養がローマ世界に及ぼした影響は、プラトンのそれにくらべてはるかに広汎で深刻であった。プラトン的・数学的教養理念も、たとえ形の上だけであったとはいえ、いわゆる自由七科における「四学科」（後述）として、あるいはスコラ学のうちに、存続した。しかし、中世初期の数世紀において文化的・歴史的ヨーロッパの基礎が形成されたとき、ヨーロッパが受け継いだ古典文化あるいは端的に教養理念は、基本的に、イソクラテス的・修辞学的なそれであった。

イソクラテスは言論の練磨を中心とする教養理念をピロソピアー（愛知）と呼んで重視したが、彼の考える真の教養とは、人間的生のたんに一部にかかわるものではない。弁論の上達によってたんに交際の、経済の、政治の上での成功を収めるというのではなく、人間的生に全面的なかかわりをもつものであった。「より善き者、より価値ある者」となるための教養が彼によって主張された。そこには「思慮を伴うことなく弁論の力を備えたなら、かえって不正を増し悪事を行う力を加える」と正当に危惧したソクラテスの影響があった。一方で、プラトンにおけるピロソピアーとは、知を全面的に愛する精神であり、たんに人間的生にかかわるだけではない、人間的生を含むものとしての宇宙全体にかかわり向かうものであった。しかし、弁論教師や、法廷や議会で実際に雄弁をふるう弁論家たち、さらには数学や天文学など厳密な学知（エピステーメー）にたずさわる学者たちのいずれをも、それだけでは真に教養ある人たちとはイソクラテスはみなさない。

すなわち、イソクラテスは最晩年の論説『パンアテナイア祭演説』で、「いかなる人をもって教養ある人（ペパイデウメノウス）とよぶべきであろうか」と問い、それにつぎのように答えている。

1）日々に出会う物事を立派に処理し、物事の好機（カイロス）をとらえ、そして多くの場合に有益な策を得ることのできる判断（ドクサ）を持つ人びと

2）つねに仲間として交わる者たちとふさわしくまた正しく交際し、他の人びとの与える不快も無礼も静かにそして容易に耐えることができ、仲間たちに対して自分自身をできるかぎり爽やかに、

節度あるものとしうる人びと

3）快楽をつねに支配することができ、不幸によっても過度に圧倒されず、それらの不幸のもとにあって勇敢に、そしてわれわれがひとしく授かっている人間の本性にふさわしい仕方で、耐えることのできる人びと

4）そしてこれが最大のものであるが、成功によって身を滅ぼすことも、自己を見失うことも、驕慢となることもなく、思慮に富む人びとの列に留まり、自分自身の本性と思慮とによって生じたものよりも、偶運によって自分のもとに生じ来たものを喜ぶようなことはけっしてない人びとがそれである[5]。

その後ヘレニズム期には、ギリシャ語文化圏で、「全面的な教養」(エンキュクリオス・パイデイア)という概念が広く成立した。将来どんな職業につこうと職業的な縛りからは自由に人間として備えなければならない、それは「一般教養」であった。この一般教養は、やがてローマにおいて「七自由学科(セプテム・アルテス・リベラレス)」と称され、その内容が定まることになる。すなわちそれは、文法学、論理学、修辞学の三科と、幾何学、数論、天文学、音楽論の四科からなるものであった。

3．人文主義・啓蒙思想・新人文主義

パイデイアは、ローマのキケロ(BC106-BC43)によって人間性（フマニタス）も訳された。フマニタスは、人間を人間たらしめるもののことである。キケロが受け継いだのはイソクラテスの理念の方であり、さらにこの理念は、ペトラルカをへてイタリア・ルネサンスの人文主義(フマニスム)において開花することになる。人文主義とは、「古典」による人間形成すなわち教養を目ざすものと一般的に定義される。「教養とは、人間形成である。そして人間形成は、先人の深い模範的体験を手引きに我々自身の人間性を再発見することを通じてなされる」(E.ガレン)[6]。

ここで注目すべきことは、ルネサンスにおけるヒューマニズム教育でいう「人間」とは、理念としては、男女、国籍を問わない普遍的なものとしての人間だったことである。「この教育が目ざす人々とは、(中略) あらゆる差別を超えて普遍的な人間的基盤に立ち、共通の対話を交わすことのできる人々である」(ガレン 85 頁)。ここに、古代ギリシャにおける教養・教育との違いを見て取るべきである。

さらにルネサンスにおいては「全面的な人間」(ヲモ・ウニヴェルサーレ)が教養の理想とされた。それをうけて、エンキュクリオス・パイデイアに語源をもつ百科事典を編集したフランスの啓蒙思想家（エンシクロペディスト）たちは、「人間的解放を合理的知識の全面的学習」に求め、「完結した知識をすべての人間に普及し、その共通な所有にすることによって、社会の改革を期待」した。むろん彼らが考えた「全面的な発達」とは、知的諸能力の多面的な発達というばかりでなく、同時に人間的感情、道徳性の発達、そして何よりも身体的な発達の統一であった[7]。こうした啓蒙思想の伝統は、後述するランジュバンの思想にも継承されているだろう。

プラトン的・数学的教養の理念も引き継がれた。16 世紀後半から 17 世紀のヨーロッパにおいては、ケプラー、ガリレイ、コペルニクスあるいはベーコンやデカルトによってふたたび強力に推し進められもした。しかし、19 世紀に入るとドイツでもめざましい商工業の発展があり、より職業生活に直結した専門教育が求められ出した。すでに 18 世紀以来、実科学校(レアールシューレ)や専門職業学校（ファッハシューレ）の設立も相次ぎ、工学・農学・商学といった新興分野を取り込んで、産業社会は実務に向けた教育をめざしていたのである。

その当時提出されたヴィルヘルム・フォン・フンボルト(1767-1835)の大学理念は、大学の新たな専門職業学校化に対抗して、古典古代風の教養教育を復興しようとするものであった。それはのちに「新人文主義」と呼ばれるに至る[8]。フンボルトらは、純粋な「教養」の場を分離するために、ギムナジウムから大学へと至る教育課程を確立しようとしたが、近代ドイツの「教養」は、すでにその登場のときから、「本など読んで何になるのか、という実社会と実学の側からの挑戦にさらされ、それと戦い続けていた」[9]のである。フンボルトにとって、大学が養成すべき「教養人」(デァ・ゲビルデテ)とは、「世界をできるだけ広く把握し、自分をできるだけ狭く縛る」[10]志のある人物のことだった。

しかしフンボルトら「新人文主義」の独善性も指摘しなければならない。すなわち、科学技術に代表される実用的な知識を「外的」で価値の低いものと見なして「文明」と呼び、「内面」を陶冶する哲学や宗教や藝術のみを「文化」として持ち上げる用語法が、フンボルトののち、19 世紀のドイツで広まることになった。その影響は、日本や英国にも及び、マシュー・アーノルドは、その著書『教養と無秩序』(1869 年)において工業社会の「文明」を批判し、古典の学習を通じ人間性を完成させる「教養」を中等教育の主眼においたのである[11)]。

しかし結局、ドイツのいわゆる教養小説(ビルドゥングス・ロマン)は、地道な職業・実業の軽視を勧めなかった。むしろその逆である。ゲーテ(1749-1832)の長編小説『ヴィルヘルム・マイスターの修業時代』(1795/96 年) の主人公は、はじめ父を継いで実業家になる道を避け、演劇活動に没頭するが、さまざまな苦難をへたのち、市民としての職業生活に戻ってゆく。この「教養」の経験は、いずれ「高貴な精神性を備えた職業人」として、実社会で能力をふるうための基礎となるとされていたのである[12)]。

自己形成（教養 Bildung）が行為によって成就され、個人の努力が公共の事業のなかではじめて意味を獲得するというこの理念こそは、ヴィルヘルム・マイスターとファウストの長い歩みが提示しているもっとも明確な思想であった。しかもゲーテは、各人が自己の個性を十全に展開することによって、多様な個性的人格の集合体たる全面的・調和的な共同社会が構成されると考えた。この人間観・社会観は、ひとりの天才があらゆる人間的能力を一身に体現するというルネサンス的人間のイメージにかわるものであった[13)]。

しかし「個性」概念の強調は最近の教養論では見られない。現代ではむしろ、個人の個性伸長というよりは自国文化と文化的な「多様性」への理解、個人間の調和というよりは、自然環境との「共生」などが眼目となりつつある。最近の教養論を検討する前に、教養に関するポール・ランジュバンの所説を取り上げよう。彼は教育における教養概念を展開した、20 世紀半ばの代表的科学者にして教育論者だからである。

4．現実・科学・連帯

ランジュバン(1872-1946)はフランスの高名な物理学者であるが、第二次大戦後のフランスの教育改革案を起草し、その影響は現代に及んでいる。第二次大戦直後に表明された彼の一連の教養論は以下のようにまとめられるだろう[14)]。

（ランジュバン）

一般教養とは、職業的専門化とは独立に、子どもを現実との接触に準備させる一切のものである。この場合、現実というのは、事物の物質的現実も、人間の心理的ならびに道徳的現実も、ともに含んでいる。そしてまた、一般教養とは、空間的にも時間的にも、個人に他の人間との連帯性を、同じ世代の人間ばかりでなく、過去の世代や未来の世代の人間との連帯性を、十分に感じさせるもの、ということもできる。教養があるということは、したがって、職業に対応する活動とは別個に、他の人間との幅の広い接触や融合をおこなえるようにすることである。しかし実際のところ、教育が与えうるのは、教養の端緒だけである。個人に教養への欲望と趣味をもたせることだけである。個人は、「学校」で準備された接触を自分自身の手で、また、終生、維持しなければならないし、それに必要な時間をぜひとも見つけなければならない。

科学の研究が少なくとも文学の研究と同様に、人間との接触への有効な準備であるのは明らかである。「科学」がわれわれを技術による「世界」の支配に導くのは、おまけにすぎない。科学の最高目的は、むしろ精神的、人間的面にある。すでにデモクリトスやエピクロスのようなギリシャ人はそのように科学を理解していた。彼らにとって科学の目的は、実利的というより道徳的なものであった。自然法則を解明することで彼らが提唱したのは、気まぐれな「神々」と「死」に対する恐怖から、人類を解放することだったのである。

職業は人間を、その専門の枠の狭い内部だけに、とじこめるべきではない。教養はこのような傾向を是正するものである。職業が人間を孤立化させるものならば、教養は互いに接近させるものであ

る。もともと教養は、人間全体に関係するという意味で、つまり、人間のさまざまな能力の間に均衡を実現しようとする意味で、ヒューマニスト的である。教養は個人にとっては、生業の機械的行動や社会的拘束に対して、人間味を失わないための手段である。生業へのどんな準備よりも大切なのは、それぞれの子どもが教養を身につけることができるようにしてやることである。人民に必要なのは、まず教養を一般化すること、科学の最高度の研究が与える利益に浴するという可能性をあらゆる知性に一般化することである。この可能性は今日まではきわめて多くの場合、少数者の特権にすぎなかった。

もしも教養というものが、多くの場合そうだったように、生活と無縁なものとしてとどまっているならば、教養について云々することはできない。学校での課業の空転によって、知識欲と人間形成への欲求が決定的に死滅させられなかった者は、幸いである。学校と生活、現実と思考、物質と観念、一般教養と職業教育、これらをそれぞれ統一すべきである。学校は外部世界と常に連帯関係にあると感じなければならず、外部世界への接近を準備するのが学校である。

このようにして、子どもの視野、周囲の宇宙の発見がつぎつぎに拡大されて、子どもは自分自身とだんだん直接的なものでなくなってゆく自分の環境との範囲がますます拡がってゆくものであることを感ずるようになるだろう。そのようにして子どもは教養の真の道を歩むもので、この道は近くから遠くへ、特殊から一般へ、具体から抽象へ、個別性から一般性へ、自我中心的な関心から利他的な関心へと進む。人間の心を自分自身以外のあらゆるものに、その専門の狭い枠を越えたすべてのものに、開かせるもの、それが真の一般教養なのである。

要するに教養に関してわれわれはランジュバンから何を学べるか。教養が少数者の特権のままであってはならず、科学の精神と成果が万人に学ばれるべきこと、真の教養は人々を時間・空間・職業を超えて連帯させることが可能なこと、教養は人間味を意味し、現実、生活と切り離されず、利他的な関心へと進むべきものであること、など数多いだろう。以下で、ランジュバンの一世代あとのマックス・ホルクハイマーを取り上げるのも、彼が基本的にその方向で、しかしより哲学的に、より教訓豊かに、教養について論じているからである。

5．真理・自由・勇気

ホルクハイマー（1895-1973）は、知識による人間の解放をめざしたはずの啓蒙や近代的理性が抑圧的な「道具的理性」へと暗転していくのはなぜか、を考察したユダヤ系哲学者として有名である[15]。亡命先の米国から戦後ドイツに帰国し、1952年にフランクフルト大学の入学式で、学長として行った講演が「教養の概念」と題して伝えられている[16]。

そこで彼はまず、教養概念の「定義」を期待してはいけないと警告している。定義には「矛盾」があってはならないが、教養概念は本来、生成変化する複合概念であり、それが適用される現実世界もまた、むしろ「矛盾」が常態だからであろう。その中にあって実質的な教養概念が定義すなわち必要十分条件として固定可能とは考え難い。とはいえ、本質論的考察の放棄は非哲学的である。一義的な答えのない本質的な問いをあえて問い、懐疑の末、そのなかでよりよい修辞的(説得的)な答えを見出そうとする努力のなかに、科学に入りきらない学問、哲学、教養のひとつの徴を見ることができるだろう。

（ホルクハイマー）

ホルクハイマーによれば、文化と文明を対立させて、前者は精神(ガイスト)、したがって本物の教養だが、後者はたんなる計算(ラチオ)、ゆえに偽物の教養だとみなすようなドイツ的伝統は、乗りこえるべきである。「教養」という言葉で若者はふつう、自己を多少とも芸術作品のように形成することを想像するが、自己の力を世界の形成に向けて使用して、外的、社会的プロセスに介入することも教養だとはなかなか気づけない。そして審美的な形をとるものを文化と見なす一方で、影響・効果については卑俗な文明に関することとし

か見なさないかもしれない。しかしそのような態度は克服すべきである。教養に関する、そのような無批判な観念論的伝統や態度やステレオタイプ化を慎むことこそ、真の教養の一部だからである[17]。

「文化」対「文明」を一例とする、そのような手軽な対立（アンチテーゼ）思考を卒業すること、そして、最も重要な物事の類はすでに、理性的な人々のあいだでとうの昔に決着済みだなどと考えないこと、まさにそれこそが、大学で学生が獲得すべき類の、教養に属している。誰かが諸現象を善玉と悪玉(シャーフェ・ウント・ベッケ)に分けたがっているときには、不信の念を抱くべきである。明らかに悪しき文明に対してわれわれが非難するのと同じものが、われわれの先祖の、一見古き良き文化にすでに含まれており、そこからそれは必然的に発展してきたということもありうるのである。いわゆる人格陶冶にしても、その功績がいかに大であったにせよ、個人の冷徹、高慢、特権意識、そして世界の暗転にも貢献しえたことは疑いない。

ゲーテとヘーゲルは、教養の道は諦念の道だと知っていた。それは経験の道だと言ってもよい。人が教養を身につけるのは、人が「自分から喜んで為す」ところのものによるのではなく、広い意味での仕事(ザッヘ)に傾倒するなかでしかない。他ならぬ仕事としての労働に深くかかわることで、ひとは自分の単なる実存という偶然性の外に脱出可能となる。しかし古い教養信仰は自己の実存にとらわれており、そしてさきの諦念を欠く実存においては、狭い自己利益と劣った公共性とが支配的である。

これをうけてホルクハイマーは、次のようさえ言う。すなわち、自分の外に出て、何らかの他なるもの、客体的なものと関係することでわれを忘れ、そして労苦を味わいつつ、その中で自分を養い保つことのできない人は、教養人とは言えない。たとえ世間的には教養人と言われている人物でも、それらが不能な人物は、ある種の内面的偏りと狭さのしるしゆえに、似非教養人にすぎない。 自分の受け持つ仕事(ザッヘ)に打ち込みつつ、それが外部社会、全体社会のなかでどういう意味連関をもつのかについて認識していること。そして、かりにも学問に従事する者であれば自分の学問において、スローガン、決まり文句、偏見の類から自由であるべきなのと同様、それと同一の自由を、時代精神に流されずに、たとえ公的な事がらにおいても、行動において発揮すること。これらのことがない人は、誰も教養人(ゲビルデット)ではない[18]。

こうしてホルクハイマーは、われわれは次のような洞察に達すると言う。個人が教養を本当に身に付けたと言えるためには以下が必要である。

1) 内面的自由（学問に携わる者が身につけるべき類と同様の）
2) 勇気
3) 全体的なもの(ダス・ガンツェ)への恒常的傾倒

これに不安を覚える新入生もいるだろうが、大丈夫。なぜなら大学というところは、まさに、すでに、「教養」のために、それに付随して「真理、自由、ヒューマニティ」のために結束している共同体なのである。

以上のような入学式祝辞（紹介したのは途中のほんの一部分だが）で迎えられた、当時のフランクフルト大学新入生らは幸運だったと思われるが、ホルクハイマーの話には難解な点もやはり存在したと思われる。全体的なもの（ダス・ガンツェ）への恒常的傾倒とは具体的に何か。想像してみると、「全体的なものへの恒常的傾倒(ウンベイールバーレ・ヒンガーベ)」について彼が語るとき、意識されていたのは、「真なるものは全体的なものである」(ヘーゲル『精神現象学』) という有名な命題だったと思われる。単なる「事実」とはちがい、非演繹的「真理」は、厳密には諸事実の全体を時空的に総覧してはじめて語りうる、したがって厳密には語りえない、としても、せめて傾倒・帰依という形で、めざせるだろう。全体的・完全的なもの、いわばイデアは、真理だけではない。善悪や、美醜や、聖俗や、快苦などもそうであっておかしくない。だから、単なる真理ではなく、「全体的なものへの恒常的傾倒」なのである[19]。

ホルクハイマーの「教養の概念」演説は1952年になされたが、それから半世紀以上を経た各国は今、教養教育に関してどのような状況にあるか、以下に瞥見しておきたい。

6．諸国における教養教育例

1990 年代後半以降、中国政府は近い将来におい

て世界のトップレベルの大学を作り上げる計画を立て、理工系教育についてもさまざまな改革の試みが実施されている。たとえば、多くの理工系大学は、「厚基礎」（しっかりした基礎教育）と「寛口径」（幅広い専門教育）という基本的な改革理念にもとづいて、「基礎＋モジュール（特定の専門に関する一定の独立性を備えた授業科目群）」や「通才(幅広い知識を身に付けた人材)＋専才（特定の専門知識をもった人材)」などのカリキュラム構造を採用してきた。具体的には、第 1・2 学年で集中的に「素質教育」（学生の素質を向上させるための科目）や「通識才教育」(アメリカの一般教育から訳されたもの)と呼ばれる全学共通あるいは学部レベルにおける基礎教育を行い、第 3・4 学年において、各専門学部あるいは系レベルで専門教育を実施するという形をとっている。「素質教育」や「通才教育」については、外国語やコンピュータ、政治時事などの伝統的な全学共通科目の他に、とくに理工系大学生の教養を高めさせる一環としての人文社会科学基礎科目(哲学と社会、歴史と文化、経済と法制および芸術）も導入している。多くの大学では、このような科目の総単位数は卒業単位数の 3 分の 1 以上を占める。しかし、学士レベルにおける理工系教育では、科目の区分や単位数の配分をめぐって、教養ある人材、専門性の高い人材、そして学術研究における高いレベルの人材養成の間で、いかにしてよいバランスをとれるかが、依然として残されている課題とのことである[20]。

ヨーロッパ大陸の大学は 19 世紀にかなり大きな制度改革があり、教養教育に対してはあまり強い方向性は持たなかった。ヨーロッパの場合、大学に入るためには必ず大学予備門を出なければならない。ドイツ語圏だと「ギムナジウム」、フランス語圏だと「リセ」がそれに当たる。このリセとギムナジウムがまず人間的成熟と知識人としての基礎的な教養を身につける場所ということになっている。それがアメリカのリベラル・アーツ・カレッジに相当しているので、大学では一般教養に対してはそれほど重きをおかない。日本でも戦前はそうであった。

フランスでの工学教育については、大学入学資格試験にパスした後は 2 年間、予備校で物理、化学、数学を学び、試験を経て理工大学に入学する。理工大学では 3 年の課程で週 40 時間以上のハードな教育を受ける。このとき学ぶ教養の中心科目は次の通りである。

- 経営学、会計学（技術者は経営と会計管理を知るべきであるという考えから）
- 英語および第 2 外国語(技術と生産物を販売する能力を育成するため)
- 体育（主にサッカーやテニス。多くの授業をこなすための体力訓練、さらに人々との円滑な交流のための話題作りが目的)

このような教養教育は、生産管理や人事管理などの各種マネジメント活動に必要な能力や技術販売能力はもちろん、政治家や公務員に必要な資質を養うことにも貢献しており、フランスの官僚や政治家はその多くが理工大学の出身である。

イギリスでの工学教育については、高校 4 年間で数学、微積分を履修し、工科大学は 3 年制である。大学では教養科目はほとんどなく、教養教育としては共通科目の工業数学があげられる。また、学校や時期によって労働法などはあるが、国語、作文、文化史、一般数学などはなく、この点はフランスと類似している[21]。

専門家になる前に、広い知識を身につけることを目的とした「教養」という概念を高等教育の中で今でも一番しっかり残しているのは、ヨーロッパではなくてアメリカ、それも、アメリカの「アイヴィ・リーグ」と呼ばれる諸大学である[22]。1960 年代から 70 年代にかけて、米国におけるハーバード大学文理学部をはじめとするリベラル・アーツ系大学では、「教養ある人」とはいかなる人間であるべきか、その人の具えるべき資質は具体的にどうなのかを研究し、定義付けを試みている。リベラル・アーツ教育とは、職業教育でない教養教育・全人教育の実施に主眼を置いた教育のことである。P.L.ドレッセルが 1968 年に掲げた教養人の具えるべき資質（コンピテンシー）を紹介しよう。

1）教養人は、知識の獲得方法とその使用方法を知っている。知識の獲得はデータの利用、自己評価、データ分析と解釈、実験、観察、インタビュー、ディスカッションなどを通して行われる。知識の使用とは、証拠の正確性、有意性の評価、問題の解決、事象の説明、可能的行動経路の分析および予測を含む。これらの能力は個人の生活、仕事または職業、社会の各分野で起こってくる問

題に対する解決能力を指す。

2）教養人は、コミュニケーション技術を十分にマスターしていなければならない。コミュニケーションとは、学術的・非学術的な内容の記述に対して適切かつ批判的に読みとる能力、公式・非公式の場での聴き取る能力、大小の聴衆の面前で話す能力、正式な研究論文や批判的な随筆を書く能力、ディスカッションや対話に参加する能力などを包括する。これらの能力は、生活の全領域におけるコミュニケーションに適用されるべきである。

3）教養人は、自分自身の価値体系と価値判断力とを自覚しているべきである。さらに、個人の価値観はその社会に受け容れられるものであること、絶対的価値観は存在し得ないこと、また、人々の中には、自分とは全く対照的な価値観を持っている場合も少なくないことを承知の上で、自国の人々はもとより、異国の人々をも理解し、受容するとともに、他人からも理解され、彼らと満足な相互交流が行われなければならない。

4）教養人は、他人と共同して問題や問題解決に当たることができねばならない。これは、社会が我々に他人と協働しながら、個人のもつ能力を最大に発揮するよう要求しているからである。こうすることにより、個人は自己表現力を培い、自己実現を可能ならしめるのである。

5）教養人は、現代に起こっている出来事に関する問題意識に目覚め、これに関心を抱き、問題解決に対する責任感を持たねばならない。そのためには、大学も象牙の塔としての学問の世界に閉じこもることがあってはならない。

6）教養人は、広範囲にわたる個人的能力の開発が民主社会における責任と義務遂行に不可欠であるとの認識に立って、大学で経験するすべてのことが一貫して関連をもち、統合されたものであることがわかっていなければならない[23]。

リベラル・アーツ系大学以外の参考例として、MITの教養教育課程も記しておこう。それは中核教育課程（core curriculum）と配分履修制(distribution requirement)に分かれ、前者は、微積分、物理学、化学、生物学である。後者としては、人文社会科学8科目9単位以上、コミュニケーション4科目以上、実験6単位又は12単位以上、科学技術領域2科目9単位以上、体育4科目8単位以上プラス水泳が要求されている[24]。

7．戦前日本における教養論

日本において「教養」概念はどのように語られてきたのか、振り返っておこう。「教養」という漢語それじたいは、「教育」と同じく“教え育てること”という意味で、古くは『後漢書』や『日本書紀』に用例が見えるという。明治期にはおもにeducationの翻訳語として流布していた。大正期に、安部能成、阿部次郎、和辻哲郎、倉田百三といった知識人たちが、人格の向上を個人の生活と社会活動の最上の目的とする、人格主義の立場を打ち出した際、その陶冶の手段として「教養」を力説したことで、この語は特別の意味を帯びるようになる[25]。

筒井清忠が調べたところによれば、こうした意味で「教養」の語を用いた最も早い例は、和辻哲郎の随筆「総ての芽を培へ」（1917年4月）である。「青春の時期に最も努むべきことは、日常生活に自然に存在してゐるのでないいろいろな刺戟を自分に与へて、内に萌え出でた精神的な芽を培養しなくてはいけない、と云ふ所に集まつてくるのです。／これがいわゆる「一般教養」の意味です。数千年来人類が築いてきた多くの精神的な宝――藝術、哲学、宗教、歴史――によって、自らを教養する、そこに一切の芽の培養があります、「貴い心情」はかくして得られるのです」。

苅部直が指摘するように、たんなる国民をこえた「人類」がこれまで生んできたすぐれた哲学や藝術がみな「教養」の糧になる、ということがポイントである。この主張は、小中学校の教育を通じて教えこまれた、明治時代の「国民道徳」に対する、彼ら人格主義の論者たちの反発と結びついていた。同じ年に発表した「近時二、三」で和辻は、政府が修身教育と言論統制を通じ、忠孝の道徳や日本の「國體」への崇敬を国民に浸透させようと図るのを批判して、こう述べる。「必要なのは伝統主義ではない。むしろ伝統主義の打破である。そうして高貴な人類の文化を、もっと深く、もっと根本的に吸い取ることにある」。

しかしたとえば谷川徹三が1936年に「教養ということ」の中で述べているように、「信仰にのみ生きるものや、階級戦の闘志にとっては、教養は問

題ではない。即ち宗教的信仰至上にしばしばオブスキュランティズムが結びつき、革命にしばしば文化の否定が伴った」。そして「もし現代に教養が蔑視せられているとすれば、(中略)教養は有閑的な社交的装飾的なものと考えられるのである。それは生活の必需品ではない。食べられない人が澤山ゐる時そんなことは問題ではない」と見なされていたからである[26]。

教養をめぐる議論は、教養に関する各種の叢書の創刊等と相俟って、1939年から1941年に絶頂に達した。当時の知識人は、「大正教養主義」を非政治的・非実践的・エリート主義的な教養主義だとして批判し、政治的、実践的、科学的教養の重視、良識や常識と連関した文化の基盤整備としての教養の意義を説いた。教養論者は「知育偏重」という批判に対し、むしろ学問や広い知見の人間形成における重要性を説いた。この点に、知識の過剰を戒め、善行による人格形成と保守的社会改革を目指した「修養」との根本的な違いがある。桑木厳翼は、人格向上を直接目的とする修養はそのための資料選択が行われるのに対し、教養は「清濁併せ飲む概」があるとした。修養が当時主として狭い道徳的意味に用いられ、道徳上の研磨や工夫を意味するのに対して、教養はより広い人間的な意味を有する点で異なるとされたからである。しかしながらこのような修養と教養との違いは、単純に対立するものではなく、むしろ相補的なもので、例えば鬼頭栄一は、両者は精神活動の養分として「修養なき教養は無力であり、教養なき修養は盲目である」と論じた。

教養論者は、固陋な常識や偏見の是正のための学問研究と科学精神の必要性を強調し、知識が時間的にも空間的にも広く深く探求され、「迷信」や「ファナチシズム」に対する防塞となるべきことも主張した。当時の教養論者は、教養と学問の関連を二つの局面から論じていた。それらは学問の専門分化が人間形成や社会にもたらす弊害を緩和する教養と、もう一つは専門分化した学問研究そのものから学ばれる教養（＝学問による教養）である。公平無私な没我的態度を要求する学問研究はそれに従事する学生や科学者の道徳性を発展させることが力説されていた。例えば森戸辰夫は神秘への挑戦者として対象と戦わねばならぬ科学者は、自己の心中においても同様に道徳的闘争を戦わねばならないとし、そのためには克己、精励、忍耐、勇気、献身、誠実、細心を以て研学に精進しなければならないとした。また石原純も科学の普遍的真理は、最も公平厳正なものであり、それを真理として愛することは、人間の心を最も清浄に導き、思考を緻密かつ慎重ならしめる習慣を与えるとした[27]。

玉虫文一も、事実に対する正確な観察に基づいて組織的に思考することを特徴とする「科学的に訓練された精神は皮相の見解や盲目や熱情を排する。それは単なる思い付や想像に基づく漠然たる要求に満足することなく、事実に対する全面的の考察に基づく明確な判断を要求する。かくして偏見は除外され公平無私の態度が育成される。この云わば理性的の態度こそは、正義を尊ぶ吾人の徳義心と共に健全な社会の建設に対して欠くべからざるものなのである」と述べている[28]。

8．最近の教養論

米国との戦争における日本の敗北は、科学と技術における敗北であるとともに、思想と民度での敗北として多くの戦後国民に受け止められたと思われる。次のような記述を読むと、戦後まもない時期の大学教員たちが米国流の教養教育に大きな期待と、すでに厳しい緊張感、問題意識を抱いていたことがわかるだろう。これは『学問と教養――何をいかに読むべきか』と題する、新入生のためのブックガイドの序文で、初版は1950年のものである。いわく「新制大学の特色は、その一般教養にある、ということができる。すなわち、旧制の大学においては入学と同時に専門のコースに分かれたのに反して、新制大学においては専門科目を修める前に、あるいは専門科目と平行して、最小限36単位ないし40単位の一般教育科目を学修し、かくすることによって視野の広い・考え方の豊かな・教養ある人士を育成することが、その究極の目標である。従って、新制大学の教育が果して成功するかどうかは、一にかかって、一般教育科目の学習がその所期の効果をおさめることができるかどうかによって定まる、といっても決して過言ではない。というのは、万一不幸にして一般教育科目の学修がほとんど何の効果も挙げることができないというようなことになれば、一般教育のためにさかれた時間数だけ専門科目学修の時

間が減ったことが、はっきりマイナスになって現れるからである。」[29)]

それでは、一般教養には具体的にはどのような効果が期待され、いかなる方法が有効か。同書のなかで、矢内原忠雄が以下のように記している。すなわち、教養が学問に役立つ第一のことは、学問的視野を広くし、学問の根底を培養する点にある。今日の学問は、一方においてはますます専門的に分岐して行くとともに、他方においては諸種の専門が相関連しあって、境界線上における新研究の分野が開拓されてきたのであり、そのためには関係諸学の綜合的知識を必要とするに至っている。一般教養によって培養せられた「綜合的頭脳」によるのでなければ、深い学問的研究はできなくなってきており、日本の学問の発達のために一般教養の普及は重要な前提をなしているのである。つづけて矢内原は言う。教養が学問に役立つ第二のことは、人間性を陶冶して、いわば「人間」を作ることである。教養のなき人間は野卑である。野卑というのは、人間としての気品を具備しないことである。この人間としての気品が真理探求の思慕と善の目的観念を養うものであって、それなくしては深い学問は到底発達し得ないのである。われわれは知的教養によって真理探求の思慕を養われ、道徳的教養によって善への憧憬を養われる。研究の過程そのものは客観的でなければならないが、研究の着想と目標設定には研究者自身の「人間」が大なる関係をもつ。芸術もしくは宗教によって「人間」を広くかつ深く養うことが、その人の学問をうるおすのであって、学者の世界観を離れてその人の学問はありえない。すなわち学問に関連する限りにおいても、芸術と宗教は教養の重要な内容をなすものというべきである、と彼は説く[30)]。

けっきょく残念ながら、当初の教養教育は、期待ほどの「効果」を上げえているとは認知されなかった模様である。なぜなら、1991 年の「大学設置基準の大綱化」以後、義務化もされていないのに、一部を除いて各大学はなだれをうち、教養部の解体と四年一貫教育による専門教育の強化という「大学改革」に、あえて踏み切る決断を下しているからである。

ところが興味深いことに、21 世紀を迎えるころから、教養に関する風向きがまた変化し始めた。それはおもに産業界および官界、政界の意向を受けてのようである。その象徴的な出来事が 2002 年、中央教育審議会が文部科学大臣あてに出した答申であろう。「新しい時代における教養教育の在り方について」と題したそれは、「個人が社会とかかわり、経験を積み、体系的な知識や知恵を獲得する過程で身に付ける、ものの見方、考え方、価値観の総体」として「教養」を形式的に定義した上で、幼少年期、青年期、成人期の三つの段階で、それぞれ求められる課題をとりあげている。内容としては、家庭でのしつけ、小学校での「読み、書き、計算」の指導の徹底、高校での「論理的に粘り強く考える訓練」やボランティア活動への参加、大学における「古典」のリスト提示と読破、等である。また 2007 年には、教育再生会議は第三次報告「社会総がかりで教育再生を」を公表し、そのなかで、大学は教養教育を重視して、産業界などとの連携を深め社会人としての基礎的能力を備えた卒業生を送り出す、等々と述べている[31)]。

この答申にも参与していた寺島実郎（三井物産戦略研究所）は、教養教育について、「自分を客観視できる力」を身につけさせるのが教養教育の基本だと述べている。歴史の中で自分たちはどういうところに立っているかという相対認識と、世界を見渡して、空間軸の中で自分たちが置かれている状況を理解させることが教養教育として必要だと 2002 年に記している[32)]。

そこでさっそく目を海外に転じれば、同じ 2002 年にはズールカンプ社（フランクフルト）から『教養の未来』と題する論文集が出ている。論点は多岐にわたっているのでここで多くは紹介できないが、以下の主張だけはとりあげておこう。すなわち、教養は世界との理性的な付き合い方を教えるゆえに、教養はわれわれの社会の中心的な課題となる。我々の社会が抱えるパラドクスの一つは、われわれの有する情報と知識が豊かになればなるほど、われわれの知識を使いこなす知恵・判断力はかえって貧しくなるように見えることである。しかしこうした知恵・判断力を担うもの、それがかつての教養という概念であった。われわれを導く知とは、正当化された目的と目標に関する知のことである。それは、人生の「なかで」導きを与える洞察（たとえばゲレンデのなかで、ある専門のなかで、ある個人的関係のなかで）の場合もあ

れば、人生「を」導く（そして自分の人生の「意味」を形成する）洞察の場合もある。現代の世界は手段と目的、悟性と理性の各領域での判断力を必要としており、これら両方の判断力を結びつけ（フェアミッテルン）、教えるところの、ひとつの教養を必要としている。

当書の巻末には著者たちが連名で「マニフェスト」と題して、具体的な教養教育方策を提出している。その一部分を以下に取り上げると、学校での教養教育の中心点として、読解力の養成に努めるべきであると言われる。それが全てのキー的な前提になるからである。各授業方法の評価検討が義務化され、教職というものが全ての水準でプロフェッショナル化されるべきである。こうして教職に対する社会的評価を高めることが、さらに授業の質向上につながるからである。しかし、そもそも教員が授業改善に傾倒できるような体制になっていないと始まらない。そのような体制づくりに向けて、学校にはいっそうの自律(アウトノミー)があるべきである等と宣言されている[33]。

日本では、2003年に雑誌『思想』(岩波書店)が「教養」について特集を組み、評論家の加藤周一とノーマ・フィールド（シカゴ大学）が見解をよせた。加藤による強調点を以下に概説してみよう。彼もやはり、いわば目的形成能力としての教養という面から説き起こしている。テクノロジーは、たとえば旅をするときの手段に関係している。自動車や飛行機や高速鉄道などがそうである。教養は、どこへ行くか、何を見るのか、旅の目的は何かということで目的に関係している。テクノロジーはものを作り出し、経済的繁栄をつくり出すことはできるが、それは手段であって、社会全体としてはどこへいくのか、いくべきかを、決めることはできない。最も劇的な選択は平和か戦争かということだが、それもテクノロジーそのものからは出てこない。教養の再生はなぜ必要なのか。それは、社会にとっても、個人にとっても、究極の目的は何か、が大事だからである。つまり、どういう価値を優先するか、その根拠はなぜかということを考えるために、教養が必要だからである。それがないと、目的のない、能率だけの社会になってしまう。教養のなかからは、常にではないが、次のようなことを引き出すこともできる。まず自由ということである。精神は、文学のなかで、あるいは芸術のなかで、自由に動くことができる。そしてその自由、想像的な世界のなかでの自由は、社会のなかにおける自由につながっていく、あるいはつながり得るものである。社会のなかでの個人の自由、それが人権である。想像力も大事だ。小説では、読者は他人の心のなかに入っていく。他人の心のなかに感情移入する能力は、たぶん小説や詩を読まないと発達しない。自分ではなく、他の人の苦しみに関心をもつ、そういう想像力は物質的な科学からは育たない。物質をいくら測っても、そこからは心のなかの能力は育たない。文学、芸術の世界には差別を乗り越える可能性がある。文学的教養が必ず差別を廃止するとはいえない。ただ、詩人や芸術家のなかには文学・芸術をテコとして差別を乗り越えている人がたくさんいる。だからそういう可能性があるとは言える[34]。

ノーマ・フィールドは教養をいっそうテーマ的に絞って論じている。すなわち彼女によれば、われわれ一人一人が有意義な生涯を送ることができるような社会を目指すことが教養本来の意味であるが、その前提としてまずは戦争、それから貧困をなくさなければならない。それを全うできるとは誰も思わないだろうが、そういう理想に対する執念を作り出すことがそもそも教養の役割でもある。日本の豊かさが生み出したもので尊いものがいくつもある。たとえば、一応誰でも利用できる医療制度などは、アメリカと比べたらうらやましい限りだ。国民全員が福祉を恩恵ではなく権利として認識し、守りぬく用意、教養が必要なのだと彼女は結論づけている[35]。

2004年には村上陽一郎(国際基督教大学)が『あらためて教養とは』と題する著書を公にし、「慎み」、「規矩」、「STS」などをキーワードとして教養論を展開している。すなわち彼によれば、いかに幅広い知識があっても、自らを律する「慎み」に欠けた人間は、教養人とは呼べない。つまり、知識の幅の他に教養にはもう一つ、決定的に大きな要素が含まれているのであり、それは自分に対して則を課し、その則の下で行動できるだけの力をつけることである。このことは身につけた知識の量とは関係がない。しかもその則としての「規矩」は、自分独りに課したものでありながら、やはり自分の生きる社会との関係の中で、世代を継いで受け渡され、変化し、展開していく。「慎み」とは、

英語で言えば「ディーセンシー」であり、その意味は、人間が自然に持っている欲望について、それを放恣に他人の前に解放することに対する規制である。その意味で、教養の原点はモラルである。特別の教育を受けたわけでもない人たちでも、自分の中にきちんとした規矩を持っていて、そこからはみ出したことはしないぞという生き方のできる人こそが、最も原理的な意味での教養のある人と言いたい。その上に、一般的な意味での教養、つまり、何がしかの知識、経験、そして専門家としてではなく、人間一般としての「広さ」、そうしたものが相俟って教養が論じられるようになる。日本のかつての旧制高校は、まさに大学予備門であり、かつ人間的、知的成熟を得させるという役割を果たしていた。いまの日本の高等学校はそういう役割をほとんど果たしていない。そうすると、それを担わなければならないのは、大学の教養教育である。家庭における規矩の習得、そして大学（リベラル・アーツ・カレッジ）における知的成熟、この二つが、教養という点での柱になる。

村上は理科の教育方法についても提言する。理科教育は理科教科の中だけで終わると考える必要はない。国語の中でも、社会の中でも、取り上げることはできる。これは逆も真である。イギリスで始まったそういう科学技術と社会との連関にスポットを当てた教育（STS）は、高等学校から大学初年時レベルという辺りを目指した。STS 的な発想で理科系の教育を組み替えていくという努力をすべきである。自然と接する理科と、社会と接する理科と、その双方から考えられた教育を、今日の教養教育として考えていくべきである[36]。

そして村上は実学と虚学という分類を拒否する。自分を造り上げるために必要である、「役に立つ」という意味であらゆる知識活動、学問は「実学」である。ましてや文学は文字通りの実学の一つである。人間が一生に体験できる世界などたかが知れている。しかし、文学が開く世界というのは、実体験を何層倍も広げてくれる。それらがわれわれに語りかけることは、自分を造り上げる作業にとって、どれほど「役に立つ」ことか。つまりは「実学」であることか。「自分を造り上げる」と言ってもセメントでがちがちに固めてしまうようなことではなく、それは「開かれた」状態で、死ぬまで続く動的な過程としてある。とりあえずは何かを選択しながら、しかしそれに捉われずに自由に生きていく。そのためにはやはり間口をできるだけ広げて、いろんなことを知り、学び、良さと悪さを識別できるような目を養うために、何にでもぶつかっていけばよい。ただし、教養を揶揄するときの決まり文句、「理性と教養が邪魔をして」というフレーズは、じつは正しい。まさに欲望の限りない追求の「邪魔」をしてくれるのも教養だからである[37]。

異色論文というべき「教養が医療の危機を救う」（小松秀樹）そして「高等教育における本当の教養教育について」（丹羽健夫）が発表されたのは 2005 年であった。虎ノ門病院泌尿器科部長である小松は、「大げさを承知で書く」と前置きして、以下のような論を展開している。すなわち、教養はエリートにとくに必要である。歴史の転換点に遭遇したとき、正しい方向に導くことがエリートの責任である。エリートは常にそのときに備えていなければならない。歴史を無意味に停滞させたり、間違った方向に導いたりしてはならない。外からの批判は変革のチャンスである。歴史の流れは危うく、未来に向かっていかようにも動く。歴史を適切に動かすためには、「法学専門学校」や「医学専門学校」の教育は役に立たない。危機に際し、関与可能な人間が、過去を踏襲してそのままにするのか、歴史的責任を意識して未来に向かって行動するか、問われる局面はどこにもある。大半の学生にとって無駄でもよい。せめて 2～3%の学生は、自力で本格的にものを考えられるようになってほしい。教養教育は百年後の日本のありようを大きく左右する[38]。

丹羽健夫は 1968 年より予備校に勤務し、現在は立命館大学経営学部客員教授である。彼が畳みかけるように説く教養教育理念は、刺戟的である。彼によれば、大人が若者の魂をゆさぶる仕掛け、あるいはひとりの人間としての大人が、自分の専門領域に関して、興味関心のある領域に関して、単に知識やノウハウの伝達という無機質な営為でなく、人生の先達として、その領域と関わりあることから体得した、人間としての驚きや、陶酔や、疑問符や、掴み取った問題点なども同時に、話の見える距離で、学生たちに引き渡し、伝授する仕掛け。それが教養教育であろう。教養教育がなぜ必要かといえばそれが、人生の先達である教員が、

学生たちに「この世はそんなに捨てたじゃないぞ」「この世にはいろいろ、自分の知らなかった奥の深いものや、わくわくするものがあるぞ」に気づかせ、好奇心を揺さぶり「ならばひとつやってみようか」と知的なやる気を喚起させることだからである。だから教養教育は一般教育科目、専門科目を含んだすべての科目で意識して行われなければならない。「俺が（あるいはわたしが）、なんでこの分野に嵌ったのか、好きになったのか。ほら、こんなに美しいじゃないか。ほら、こんなに奥が深いじゃないか」を学生の胸にぶつけ、動かすこと、それが教養教育である[39]。

2006年には「理工的教養はどうあるべきか」と題して、伊藤憲二（政策研究大学院大学）から、とくに理工系教養教育のための重要論文が出た。現代において、なぜ専門的な知識・技能に対して、非専門的な教養が必要なのか。彼によれば、それは専門的でしかない能力は個人を限定するものだからである。それは、個人を社会という巨大な機械の歯車の一つにするものである。それは社会にとって有用であることも、他人にとって有用であることもありうる。しかし、社会と自らの専門能力との関係を理解する素養がなければ、その役割を自覚することができず、社会のなかで盲目的に働く存在にしか過ぎない。教養が期待されるのは、個人をそのような状況から回復することである。その意味で、個人を自由にするものとしてのリベラル・アーツ教育の意義は現代においても依然として存在する。学部学生の間にこのように鍛えられた医師・科学者・技術者の多くは、専門バカにはならない。専門分野に囚われないので、研究分野が時代遅れになれば、比較的容易に他の分野に移ることができる。新しい知識や考え方に早く適応することができる。彼らの多くは分野の違う科学者や技術者とコミュニケートすることができ、そして自らの仕事の社会における位置づけを理解し、それを社会に向けてアピールしたり、あるいは科学技術に対する社会の要請を理解したり、科学技術についての倫理的問題を考察することができるようになる。そうしたとき、科学者や技術者は文科系出身者に利用される人間ではなく、社会に対する洞察力を備え、自ら社会に関与する能力と意志を持つ能動的な市民となるのである[40]。

この年（2006年）にはまた、森永卓郎(獨協大学)が教養の意義と経済性の巧みな論述に成功している。彼は言う。お金がなくても楽しく生きるために必要なのは「教養」である。教養のレベルが高ければ、お金で得られる楽しみ以外のものがたくさん獲得できる。お金のかかるディズニーランドに行けば、誰でも楽しめる。しかしお金がなくても、植物の知識が豊富ならば、野山に出れば楽しい。名前がわかるし、草笛もつくれるし、何が食べられるのかということもわかるし、人に教えることもできるのである[41]。

翌2007年は苅部直（東京大学）の手になる、教養に関する大著『移りゆく「教養」』が出版された年である。彼は賢慮（フロネーシス）という概念に注目する。それは、既に設定された目的のために手段にのみ関わるものではなく、個別の状況から全体としての目的へ至る経路を見通す認知的能力である。そして世間で常識とみなしているような固定観念や、出世街道への執心をひとまずは離れて、実利とは無縁な読書に、心を遊ばせることの効用を説く。その一つは「真実の多様性、相対性」を見ぬく目の育成である。もはや「教養」など不要なのだと放り出すわけにはいかない。人間が身につける知が、読み書き・計算をざっと身につけただけで、あとはマニュアル化された実用知識か、あるいは高度に専門化した学問だけになってしまえば、学問でもジャーナリズムでも、専門の境界をこえるような、豊かで斬新な発想は、まず生まれなくなる。さらに、異なる価値観や世界観を抱いた人間どうしの対話が、日常生活の次元でも、ずっと困難になってゆく。人と人とが生き生きとした交流を保ち、社会を円滑に動かしてゆくためには、「教養」がやはり必要なのである[42]。

2008年には日本工学教育協会機関誌『工学教育』が、「広く活躍するこれからの技術者に求められる教養とその涵養」をテーマに特集を組んだ。「特集号趣旨」に見える「教養」論は以下のごとくである。すなわち、生存競争に生き残っていくための必須栄養素とでも呼ぶべき教養が存在する。今後の技術者が備えるべき素養について議論すると、多くの場合、基礎学力(常識)＋専門知識を備え、人間力(コミュニケーション力、問題発見能力、リーダーシップ)を有することが理想的技術者像となる。マジョリティの技術者にこれらの全てを期待するのはいささか酷ではあるが、ますます厳し

さを増す国際競争で生き残っていくためにはそれらの力をつける努力がより一層強く求められるようになることは確実である。「教養」とは（1）文理の壁を越えて身に付けるべき基礎学力としての政治、経済、歴史、文化に関する知および関心をもつ力や、最近求められている技術者倫理、(2)英語力や国語力等のコミュニケーション能力、および（3）人間力に大別することができる[43]。

この特集号の中から以下に、注目すべき若干の主張をとりあげてみよう。まず、瀬沼武秀(岡山大学)は二十年以上に及んだ企業研究者時代を回顧しつつ、「グローバル化時代の技術者に期待される素養」と題して以下のように証言している。すなわち、コミュニケーション力の重要な要素の一つに相手の考えを事前に察知する能力が挙げられるが、その観点で教養は大きな助けになる。教養を深めることで相手の立場や考え方をより深く理解できるのである。たとえば海外との共同研究において、相手側の国情に精通していた人は上手にコミュニケーションを図っていた。企業研究者時代に外国との共同研究を推進するに当たって実感した技術者に必要な素養を彼は表1のようにまとめている[44]。

表1　国際的に通用する技術者の主な素養

1. 信頼される誠実な人柄
2. 主体性
3. 基礎・専門能力
4. 創造力
5. 語学力だけでない、論理展開ができるコミュニケーション能力
6. 豊かな教養

稲葉武司（日本建築学会建築教育委員会委員長）によると、工学教育では、その必要性が漠然と信じられているだけの教養は、役に立つ科目の主張に対して反論するすべもなくその場所を明け渡し続けてきた。「その結果、工学は数学や自然科学ばかりになりなってしまい、肝心の人間のために有用な人工物をつくるときの核となる安全、健康、福祉、歓び、安らぎといった重要な概念を身につける時間、即ち教養は姿を消した。／工学全体の有用性にはゆとりのない硬直性が際だつようになり、工学教育の生み出す人的資本はかえって評価を低めることになった。すなわち社会がそれを卒業生の専門的な資質の低下とみなすまでになった」(前掲誌 p.13)。ここでは「教養」が「安全、健康、福祉、歓び、安らぎ」を与えうるものとして記述された。ただし、昔は「教養教育科目」のおかげでそれらが獲得できていたのかは、即断できないであろう。また、最近の卒業生の専門的な「資質低下」がもし本当だとしても、その主たる原因は、少子化および工学部離れ等による、すでに入学時の平均的学力低下にあるとも考えられるだろう。

同じく2008年には、田村恭一（上武大学）が「教養の概念とその論理」と題した上武大学経営情報学部紀要論文のなかで、アリストテレスらを引いて教養とそのための閑暇(スコレー)の大切さを強調した。生命を維持することは、人間に固有なことではなく、動物にも共通したことである。しかしアリストテレスの言うように、人間は「ただたんに生きることのためにではなく、よく生きることのために」ポリスを構成する。よく生きるということは、ヒトにではなく、人間に固有の可能性が十分に実現されていること、あるいは人間性が十全に実現された状態を意味する。そして教養のもつ一側面は、このよく生きることに関係する。よき生活という点からみれば、教養と徳とが最も正当な要求権をもつであろう。「息子たちに［たんに生きるために］有用なものとしてではなく、また必要なものとしてでもなく、むしろ自由人的なもの、立派なものとして教えなければならない教育のあることは、明らかである。‥‥あらゆるところに有用さを求めるのは、自由人には最も似合わしからぬことである」(アリストテレス『政治学』1338a30ff)。自由人に必要なのは、「学習指導要綱」等で言われる「生きる力」ではなく、「よく生きる」知恵である。教養は、また学問そのものが閑暇において始まる。閑暇の精神が大学からなくなる時は、大学が死滅する時である。教養の自己目的化という側面も生ずるが、このこと自体は何も声高に非難することではない。「すべては産業によって、すべては産業のために」の標語ではないが、何事も「たんに生きることのために」という有用性の前で弁解しなければならないわけではなかろう。教養に関して「なんのために」を問うのは、「有用性と有意味性」とを混同することでもある、と田村は言う[45]。

2009年には朝日新聞が教養教育について特集を組んだ（1月26日）。それによるとリベラルア

ーツ教育は近代以降、欧州では中等教育の段階にゆだねられたが、大学に残った米国では「リベラルアーツ・カレッジ」と呼ばれる大学が存在感を示してきた。4年制で数千人程度の小規模校が典型で、多くは学生と教員が寝食を共にして生活する。卒業生数は全米の全大学の卒業生数の3%だが、全米の最高経営責任者（CEO）の8%、大統領の19%を出身者が占めたという調査もある。ワシントンにある全米大学協会では、教養教育（リベラル・エデュケーション）の見直しを積極的に提唱している。「幸運な少数に限られていた教養教育を、多くの学生に提供できる好機を迎えている」（キャロル・シュナイダー会長）。日本より一足早く大学全入時代を迎えた米国では、エリート育成だけでなく、社会を担う市民の養成も大学の大きな役割となってきた。「教養教育は、21 世紀にはすべての学生に必要で、全大学で実施されるべきだ」というのが、1200 の大学が加盟する協会の主張である。教養軽視を改めさせようと、政治家らへのロビー活動も展開する。伝統的なリベラルアーツに限らず、（1）人文科学、自然科学などの幅広い知識（2）分析力、批判的思考力、記述力、チームワーク（3）個人的、社会的責任感などを養う教養教育を掲げている。協会などの調査では、協会が目指す教育の成果と、雇用主が学生に求めるものは重なっている。教養教育は実社会にも有効である。「21 世紀は、処方箋がまだない問題が次から次へと起こる。狭い範囲で専門教育だけを学ぶ学生は、袋小路に陥りやすい」（シュナイダー）からである。また、なぜ学ぶのか、何のために教えるのかとの記者の質問に、ある教員はよき市民になってもらうため、そして、地域社会や世界に貢献するために教えている、と答えている。

9．まとめと考察

これまでの話の大きな流れを確認しておく。現代の高等教育における教養教育は、プラトンとイソクラテスの各学校に代表される、古代ギリシャでの教育内容にその源流が求められる。古代ギリシャにあってパイデイアと呼ばれた教養の教育とは、自由人としての人間の完成を目的とする教育であり、その一つの軸は数学的哲学的な教養、もう一つの軸は文学的芸術的な教養であった。このふたつは、身体的鍛錬の教育とともに、その後の教養教育の伝統的枠組みを与えた。

ローマ時代には、職業的な限定からは自由に人間として持つべき「一般教養」として、「七自由学科」の内容が定まった。すなわちそれは、文法学、論理学、修辞学の三科と、幾何学、数論、天文学、音楽論の四科である。とはいえ、後者よりも前者が比較的有力であり、この理念は、イタリア・ルネサンスの「人文主義」において強化されることになる。「人文主義」とは、「古典」による人間形成を目ざすものであった。

18･19 世紀に入ると西欧でめざましい商工業の発展があり、より職業生活に直結した専門教育が求められ出した。しかしフンボルトらは、大学の新たな専門職業学校化に対抗して、教養教育を復興しようとした。それはのちに「新人文主義」と呼ばれ、フンボルトらの創設したベルリン大学は、世界各地の大学のモデルになった。フンボルトらにとって、大学が養成すべき教養人とは、世界をできるだけ広く把握し、自分をできるだけ狭く縛る志のある人物であった。

20 世紀半ばになると、フランスのランジュバンらによって、教養教育における科学教育の重要性、そしてそうした教養が少数者の特権にとどまることなく、まさに一般化される必要性が強調されるに至った。学校教育は、教養の端緒を与えうるに過ぎず、一般教養と職業教育は反目し合うべきではない。なぜなら、学校は外部世界と常に連帯関係にあると感じなければならず、外部世界への接近を準備するのが学校だからである。

戦争の記憶もまだ生々しい頃のドイツで、その苦い歴史的教訓も踏まえてホルクハイマーが語ったように、教養とは、最も重要な物事は理性的な人々のあいだでとうの昔に決着済みだなどと考えないこと、諸現象を単純な善悪二元論によって片づけないことでもある。人格陶冶それ自体にしても、それは冷徹、高慢、特権意識、そして世界の暗転にも貢献しえたのであった。それでも、大学は教養のために、真理、自由、ヒューマニティのために結束している共同体なのであり、個人が本当に教養があると言えるためには、内面的自由、勇気、そして真理や人類など何らか全体的なものへの恒常的傾倒が必要である。

現在さまざまな「教養教育」が世界各国で採用されている。1990 年代後半以降、中国の理工系大

学の多くは、第 1・2 学年で集中的に「素質教育」や「通（識）才教育」と呼ばれる基礎教育を行っている。またフランスの理工大学で学ぶ教養の中心科目は、経営学、会計学、英語および第 2 外国語、体育である。

ひるがえって日本では、教養をめぐる議論は戦前からすでに盛んであった。日本は敗戦を契機に米国流の教養教育（一般教育）を大学に導入したが、すでに当初から危機意識を一般教育教員たちみずからが抱いていた例が判明した。1991 年以後、多くの大学は教養部の解体に踏み切る。ところが 21 世紀を迎えるころから、教養に関する風向きがまた変化し始めた。教養教育はやはり大事だというのである。

教養教育について日本が再修正し始めたちょうどそのころ、2002 年に『教養の未来』と題する論文集がドイツで出たのは無視できない。われわれの有する情報と知識は豊かになったが、知識を使いこなす知恵・判断力はかえって貧しくなったと指摘される。だから、こうした知恵・判断力を担うものとしての教養を強化していく必要がある。教養のもたらす知とは、我々を方向付ける知、正当化された目的と目標に関する知のことである。現代世界は手段と目的の各領域での判断力を必要としており、これら両方の判断力を結びつけ、教えるところの、ひとつの教養を必要としている。学校での教養教育の中心点は、読解力の養成である。各授業方法の評価検討が義務化され、教職が全ての水準でプロフェッショナル化されるべきである。教員が授業改善に大いに取り組めるような体制づくりが、まず前提になるだろう。そして本稿では翌 2003 年から 2009 年 1 月までの各年で、教養に関して出色または異色と思われた日本の著書、論考、または記事を、毎年分取り上げて論じてきた次第である。

以上で、教養および教養教育とは何か、その全体像に迫るための文献調査をひとまず終了する。教養および教養教育の意義理解のために、本稿が貢献できれば幸いである。実質的な教養概念は、それが単純に定義可能な概念ではないこと、教養はモラルとも深い関係があるものの、歴史上、誰かの「教養」(パイデイア・ビルドゥング)は誰かの犠牲の上で成立したり、誰かを不幸に陥れたりしたことがあるらしいことも学んだ。それでも、教養の大切さはさまざまな観点から説得的に論証されたことと思われる。本稿では取り上げなかったが、『論語』の中には「君子不器」の言葉も見える（為政篇）。

ある種の教養の趣味性や高踏性や不急性などを非難するのは、時代的に容易かもしれないが、教養一般の不要性を論証するのは、原理的に不可能である。論証という知的行為自体が、ある種の言語的教養を必要とするからである。教養一般の不要性は語りえない[46]。

しかし「教養」と「教養教育」は、また別問題である。したがって、教養の枢要性の社会的認知を、これまでのような教養教育の社会的容認として安易に理解してはならない。授業時間も有限のリソースの一つである。専門家志向の強い学生と、専門教育をいっそう施したい専門教育担当教員から、授業時間を教養教育担当教員はいわばリースされていると考えた方がよいかもしれない。貴重なリソースのリース料として学生と学校に提供するものとして「教養」がある。提供を受ける側にとっては、大きなお世話かもしれない。教養は、学生にとって楽しいとは限らないからである。

それでも学生にはそれなりの教養がすでにあるので、教養教育の存在に表立って反対するとは限らないが、それに甘えていては、教養教育に明るい未来は期しがたいと思われる。草原克豪（拓殖大学）が言うように、教養教育が学習者にどれだけの動機づけを与えることができるかは結局、教師にどれだけの情熱があるか、学習者をひきつける魅力をどれだけ備えているかという点にかかってくる。言い換えれば、教師自身の人間性と教養が問われることになる[47]。そして学校経営者側には、教育の環境条件整備という、待ったなしの本務が待っている。

たしかに高専は総合大学とはちがう。日本の高等専門学校（高専）は、産業の未来を担う有為な人材としての堅実な技術者を早期教育で世に送り出す、半世紀近い伝統のある、まさに実学のための学校である。OECD 調査団からもユニークな教育機関として高く評価され(2006 年 5 月松江高専訪問)、その社会的存在意義はまことに大きい。そして卒業生の社会的評価も非常に高い。しかし、「たんなる人材」を産業界に提供するには、多感な時期の在学 5 年間はいかにも長すぎるだろう。

つまり、人材以前の人間、人材としての人間、人材をこえた人間が、５年もあれば大きく形成されざるをえないだろう。

ではどのような人間を東京高専は育成しようとしてきたか。毎年学生に配布される『学生便覧』の目次の前頁には「本校の教育方針」と題して、鮮やかに毛筆体で宣言されている。「どのような局面にも対処できる柔軟な心と／いかなる困難も乗り切りうる強固な意志と／あらゆる試練に耐えうる健全な身体とを持ち／しかも人間として好ましい味と深みとのある人柄であり／必要な学問と技術との基礎を充分身につけていて／いつでもどこでも自由に応用できる能力があり／長い一生を通じて限りなく伸び続けて行くことのできる／潜在力のある人物を育成する」。そしてそれにはつぎのような解説が付されている。「この教育方針は、本校初代校長岡俊平先生が、技術者に教養が重要であるとして、掲げられたものです。本校では、その先駆的な教えを現在でも大切にしています」。

このように、他ならぬ高専内部において「教養」の好解釈例を発見しえたわけであるが、「教養教育」に対する、学生やOBの期待度や満足度は、高いとは限らないのが実情だろう。これをどう考えればよいか。それは、教養教育の成果・意義に関する評価はいかに可能かという問題でもある。一つの考え方は、学生やOBによる評価が低いのだから、そのような教育は無駄だったし、その評価を外挿して、今後も無駄だろうと予測することである。そしてもう一つの考え方は、「学生による授業評価」類自体の意義を限定的に評価することである。「学生による授業評価」は個々の授業（内容）に対する学生の満足度調査の域を出ない。これに対して、「教育の効果」で期待されているのは、シラバスに記された目的目標との関係における個々の授業の貢献度であり、さらには目的目標と教育課程全体の適合性である。したがって、授業評価で学生の満足度が高い（低い）ことは、必ずしも目的目標という観点から見て、その授業科目の貢献度が大きい（小さい）ということにはならない[48]。そして一般教育・教養のあり方に疑いをもちこれを否定する人びとも、おそらくは、現行の一般教育・教養についてこのような意見を抱くのであって、理念としての一般教育・教養そのものを否定するのではない[49]と見る考え方である。

いずれにせよ、教養教育教員としては「理念としての一般教育・教養」を、そして個々の授業における目的目標の達成を、あらためて念頭におき、授業（準備）する他ないとの結論に達するだろう。学校での課業の空転によって知識欲と人間形成への欲求が決定的に死滅させられなかった者は幸いである、とさきにランジュバンが述べていたように、生徒・学生には、すでにそれなりの教養がある。教養とは、これまで見てきたように、知識だけで評価されるのではなく、態度なり欲求なり、その他もろもろだからである。年若い生徒・学生の方が、大人・教員よりも純粋で気高く、その点で教養がある傾向すら観察可能かもしれない。したがって教員は、自分の施す教育で子どもの教養をこれ以上傷つけない、傷つけたままにしないという原則を採用すべきだろう。その上で、必要に応じて付加的な、あるいは代替的な教養なり知識なりを提供すべきだろう。なかでもすばらしいのは、知的好奇心を喚起する授業である。つまり、さきに見た丹羽健夫が提案していたような、この世（自分の専門分野）に対する先達的驚き・陶酔・疑問の伝授に、教養教育のひとつの醍醐味があると思われる。それは学生に「生きる力」と「考える力」の両方を、したがって教養の主要部分を、与えようとしているからである。

注および文献

1) 筆者もかつて、下記論考において一般教養教育の意味と課題に一部言及した。「増進遺伝子技術利用に関する倫理的考察」『工学教育』54-5(2006)pp.20-24

2) Kazuyuki Sunaga,"General Education and Morality in Japanese Universities," *Applied Ethics: Perspectives from Asia and Beyond*, ed.by K.Ishihara and S.Majima,Hokkaido Univ.(2008)p.7

3) H.I.マルー『古代教育文化史』(1948)横尾他訳、岩波書店（1985）p.272。ただし、西尾幹二によれば教養（パイデイア）とは元来、行為、もしくは身体的鍛錬を基本に置く言葉である。プラトンはその『国家』篇の中で、指導者階級が受けなければならない教養の必須の科目として、musikeのほかに、gymnastikeを置いている。gymnastikeは肉体鍛錬の一形式で、時代がすすむにつれ、体育の技術、ないし知識の総称となった。同時にそれは規律、節制、忍

耐等の諸徳を養成する訓練でもあった。「教養」という概念は、ギリシャでは単に読書、学習に限らず、広い意味での修養、克己を指していたのである。西尾幹二「ニーチェにおける「教養」批判の背景」『教養小説の展望と諸相』しんせい会編集、三修社(1980)p.263

4) 以下しばらく、廣川洋一の著作『イソクラテスの修辞学校　西欧的教養の源泉』(1984 初出)講談社(2005) に準拠して述べる。pp.13-14、15、18-19、112-113、114 参照

5) より流麗な邦訳ではこうである。「では、技術と知識と特殊能力からその資格を剥奪してわたしは、いかなる人を教養人と呼ぶのか。第一に、それは日ごとに生起する問題をてぎわよく処理し、時機を的確に判断し、ほとんどの場合において有益な結果を過たずに推測することのできる人である。第二に、周囲の人々に礼儀正しく信義にもとることなく交際し、他人の不躾や無礼は穏やかに機嫌よく迎え、自分自身はできるだけ柔和に節度を保って相手に接する人である。さらに第三に、つねに快楽に克ち不運にひしがれることなく、逆境にあっても雄々しく人間性にふさわしく振る舞う人である。そして第四に最も大事な点であるが、成功に溺れて有頂天になったり傲岸に走ったりすることもなく、思慮にすぐれた人の隊列に踏みとどまり、生来のおのれの素質と知慮が生みだす成果を喜ぶ以上に、僥倖を歓迎することのない人である。」イソクラテス『イソクラテス弁論集＜2＞』小池澄夫訳、京都大学学術出版会(2002)p.73

6) E.ガレン『ヨーロッパの教育』(1957)近藤恒一訳、サイマル出版会(1974)p.81。日本では「古典」と訳される「クラシック」であるが、「古い」という意味は本来ない。この語はローマの軍事的危機を救った一般名詞「艦隊」が語源であり、それがのちに人間の精神の危機を乗り越えるに足る精神力（知情意）を人間に与えうる秀でた書物を呼称する名詞になり、やがて書物に限らず、すべての種類の秀でた作品にあてられる呼称となっていった。今道友信「カトリックの教養教育」『カトリック教育研究』25(2008)p.59

7) 北川邦一「教養論の今日的意義と教養の概念――教養と共通内容教育のあり方、その 1――」大手前大学社会文化学部論集、創刊記念合併号（2001）p.8

8)「新人文主義(ネオヒューマニズム)は幸福主義と功利主義を退け、そのかわりに古典ギリシャ的生活様式に由来する観念を採用する。新人文主義を理解するには、したがって、ギリシャの教養論をも理解しなければならない」Sven Erik Nordenbo "*Bildung* and the thinking of *Bildung*" *Educating Humanity: Bildung in Postmodernity*,Mortensen et al. Blackwell(2003)p.29

9) 苅部直『移りゆく「教養」』NTT 出版（2007）p.84

10) Jürgen Mittelstraß, "Bildung und ethische Maße" *Die Zukunft der Bildung*, Killius et al..Suhrkamp(2002) p.156

11) 苅部直、前掲書 pp.81-82

12) 苅部直、前掲書 pp. 82-83。また、齋藤孝は書いている。「ゲーテの『ヴィルヘルム・マイスター』における課題は、（中略）私的な欲望にとらわれた状態から公共的な仕事に関わる成熟した人格へという発展である。公共的な世界とのつながりの中で自分の生き方を実際の生活経験を経てつかんでいくプロセスは、私的な世界に閉じていると批判された教養主義にはないものである。／（中略）うまく外部に適応するだけの冷えた身体ではなく、マグマがつきあげるように他者に向かって動く「からだ」の熱さが、ビルドゥングの基本でもある。／ビルドゥングは「生身の動ける身体」を軸としているだけでなく、身体の修練を通して技を身につけることを重要な要素として含んでいる。マイステルが親方を意味するように、技術を身につけることが自己形成の王道であることは、むしろゲーテ的ビルドゥングの前提でさえある。三木清は、技術の人間形成的意義についてこう書いている。「技術の本質は物を作ることである。技術は物を作ることによって人間を作る。我々は物を作ることによって自己を作ってゆくのである。技術は人間形成的意義をもってゐる。ゲーテが技術を重んじたのも、技術が人間形成的であるといふこと、技術の修得が人間修業になるといふことのためであった。」」齋藤孝「身体知としての教養」『教育学研究』66-3（1999）。しかし遺憾なのは、この「技術の人間形成的意義」仮説の十分な「検証」の試みが不在、不明に見えることである。もしその検証が可能ならば、「教養教育の人間形成的意義」仮説についての実証的検討も、同様に可能になるのだが。

13) 池田浩士『教養小説の崩壊』現代書館(1979)pp.55、100

14) ランジュバン『科学教育論』竹内良知・新村猛訳、明治図書(1969)pp.133-134、135-136、158-159、161-163

15) ホルクハイマーについては以下の共著論文で言及したことがある。川北晃司・河村豊・浅野敬一・木村南・庄司良「技術者倫理教育に関する調査と考察――アンケート諸意見への回答――」論文集『高専教育』32(2009)pp.231-236

16) Max Horkheimer,*Begriff der Bildung*,三修社(1991)

17) 長野剛（九州大学）も教養概念について次のよう

に述べている。すなわち、「教養」はどれだけ問いを立てることができるかにかかっている。だから、あるエピソードを、分かりきったことだとかあたりまえのことだとか、そこに句読点を打った途端に、「教養」から離れてしまう。「教養」は内容ではなく学び方を指し示している。教養教育科目は「教養」の授業ではなく、動詞にして、「教養する」授業と言ったほうが適切だろう、と。長野剛「価値づけをカッコに入れる「教養」教育」『大学教育』13 九州大学教育研究センター(2007) pp.26,29

[18] 日本でも阿部謹也が 1997 年に書いている。すなわち、自分が社会の中でどのような位置にあり、社会のためになにができるかを知っている状態、あるいはそれを知ろうと努力している状態を教養があるという。教養があるということは、最終的には、「世間」の中で「世間」を変えてゆく位置にたち、何らかの制度や権威によることなく、自らの生き方を通じて周囲の人に自然に働きかけてゆくことができる人のことをいう。阿部謹也『「教養」とは何か』講談社(1997) pp.56、180

[19] 沼田裕之らの所見はこうであった。「「教養」は基本的に、高いものを求め、可能なかぎり全体的な知を求め続ける人間の営みそのものである。しかもこの場合強調されるべき点は、教養が[･･･]固定的、形式的な知識の体系のようなものではなく、絶えず何かしら高いものを「求め続ける」営みの中で実現される[･･･ことであり、]絶えずより高いものを求め続ける点に教養の基本的特徴がある。」沼田裕之他『教養の復権』東信堂(1996)p.168

[20] 黄福涛「中国の大学の変化」『科学』77-5 岩波書店(2007)p.487

[21] 朴泰源「科学技術教育における教養教育の意義と現状」『日本學士院紀要』62-3(2008)

[22] 村上陽一郎『あらためて教養とは』新潮文庫(2009) p.91（NTT 出版 2004 年初出）

[23] 沼本和子「期待される教養人像――リベラル・アーツ教育の視点より――」ノートルダム聖心女子大学紀要文化学編 13-1（1989） pp.36-37。ただし、ここで「教養人」と訳出された個所は、原書では単純に students であった。Paul L.Dressel"The meaning of a College Education" *Journal of Higher Education,* 39-9(1968)pp.481-489

[24] 朴泰源、前掲論文

[25] 苅部直、前掲書 pp. 50-51

[26] 谷川徹三『文化と教養』谷川徹三選集Ⅱ齋藤書店(1946)p.48

[27] しかし別の観察もある。物理学者にして随筆家の寺田寅彦は、大正 5 年に「科学と文芸」と題して以下のように述べている。「芸術家科学者は其芸術科学に対する愛着の余りに深い結果として屡〻互に共有な弱点を有つて居る。其の一つは即ち偏狭といふ事である。（中略）科学者芸術家に多い病は、他を容れる度量に乏しくて互に苦々しく相排することである。此れも両者の心理に共通なもののあることを示す一例と看做される。畢竟偏狭娼嫉は執着の半面であるとすれば、此れは芸術と科学の愛が如何に人の心の奥底に深く喰ひ入る性質のものであるかを示すかも知れない。一寸考へると、少くも科学者の方は、学問の性質上極めて博愛的で公平なものでありさうなのに事実は必ずしもさうでないのは謎理的（パラドキシカル）の様である。しかしよく考へてみると、科学者芸術家共に他の一面に於て本来一種の自己主義者たるべき素質を備へて居るべきものゝ様にも思はれる。此は惜しむべきことであるかも知れないが、或は止み難い自然の現象であるかも知れない。（中略）此の二つの世界を離れた第三者の立場から見れば、此の二つの階級は存外に近い肉親の間柄であるやうに思はれて来るのである。」(大正5年1月　科学と文芸) 寺田寅彦『科学と文学』角川書店(1949)pp. 181-183。なお、「二つの階級」の親近性の指摘は貴重だが、その原因については、「芸術と科学の愛」および「自己主義」という分析・表現レベルにとどめられているのが惜しまれる。

[28] 当時の知識人の言説については、おもに次の文献による。渡辺かよ子「「修養」と「教養」の分離と連関に関する考察――1930 年代の教養論の分析を中心に――」『教育学研究』66-3(1999)

[29] 麻生磯次・木村健康・玉虫文一・淡野安太郎編『改訂　学問と教養――何をいかに読むべきか』勁草書房(1969)第 11 刷 p.1

[30] 矢内原忠雄「学問と教養」麻生磯次・木村健康・玉虫文一・淡野安太郎編『改訂　学問と教養――何をいかに読むべきか』勁草書房(1969)pp.7-8、10。ただし「人間としての気品（･･･）なくしては深い学問は到底発達し得ない」という矢内原の仮説的命題は、その検証も反証も不可能に近いだろう。「気品」および「深い学問」とは何か、曖昧すぎるからである。そうとはいえ、研究の着想と目標設定には研究者自身の「人間」が大なる関係をもつ、というのはまさに重要な指摘であった。研究の原点は人間であり、もし「教養」が人間をつくるとすれば、「教養」は研究のいっそうの原点である。それは、研究のベクトルの向きと大きさを左右する機能をもっている。

[31] 村上陽一郎によれば、政治家や霞ケ関が教養教育をもう一回見直さなければならないと言い始めたきっかけは、オウム真理教事件であった。「これは大学卒業者と

して常識がないし、まともな判断力を養っていないことの証拠じゃないか、ということが本当に議論された。官僚や政治家の間で。それで霞ケ関は一般教養をもういちど見直さなければということになったと聞いている。」村上陽一郎『あらためて教養とは』新潮文庫 pp.105-106

[32] 寺島実郎「中央教育審議会答申「新しい時代における教養教育の在り方について」審議会でのヒアリング抄録『文部科学時報』No.1512(2002)p.34

[33] *Die Zukunft der Bildung*,Killius et al. Suhrkamp (2002)pp.154、164-165、171、204、205。この文献については筆者は次の論文からその存在を教えられた。Josef Furunkas, 'Die Zukunft der Bildung?'『慶應義塾大学独文学研究室研究年報』20（2003)。

[34] 加藤周一「教養とは何か」『世界』岩波書店(2003年10月）pp. 156-159

[35] ノーマ・フィールド「戦争と教養」『世界』岩波書店（2003年10月）pp.162-168。これは世界人権宣言(1948年)にも沿う見解であるが、しかし（たとえばシモーヌ・ヴェイユ風の）反世俗的とも言える思想にあっては、福祉は、与えるにあたって義務であり、受けるにあたって権利ではない、という主張も成り立つ。

[36] 研究者になる場合にも、今日では、自分の専門領域のことさえ深めれば、それで充分とは言えない状況が生まれている。理工系ならば「社会リテラシー」、非理工系ならば「科学・技術リテラシー」が、強く求められている、と2007年にも村上氏は述べている。村上陽一郎「知識人としての「常識」と「賢慮」を磨くために」岩波書店『科学』.77－5（2007）p.453

[37] 村上陽一郎『あらためて教養とは』新潮文庫（2009）（NTT出版2004年初出)。氏は著作の中で自分自身の教養程度について言及している例外的存在である。「お前は教養があるか、という問いは大変厳しい問いです。答えは、こうです。何とか、教養ある人間と言えるように、努力をしてきた。それがどこまで実現しているか、自分では何とも言えない。」（同書p.15）他には養老孟司が、自らの「教養」についての自覚を読者に伝えている。彼は2002年にこう記している。「私は他人の気持ちがよく理解できるほうではない。若いときからそう思ってきた。（中略)教養はものを識ることとは関係がない。やっぱり人の心がわかる心というしかないのである。それがいわば日本風の教養の定義であろう。」「多頭の怪物の心がわかるか」養老孟司『まともな人』中公新書(2007)pp.135-136（2002年初出)。ただ、「人の心がわかる心」（したがって「教養」）の一般的可能性を、当時の養老氏がどのレベルで理解していたかはわからない。

[38] 小松秀樹「教養が医療の危機を救う」『学術の動向』10-7(2005)p.46

[39] 丹羽健夫「高等教育における本当の教養教育について」『工学教育』日本工学教育協会53-3(2005)pp.97-99

[40] 伊藤憲二「理系的教養はどうあるべきか」『科学』76-1岩波書店(2006)pp.77－78

[41] 森永卓郎「貧乏を楽しむ“教養”のすすめ」『望星』37-10(2006)p.16

[42] 苅部直『移りゆく「教養」』NTT出版（2007）pp.65-66、195-196

[43] 『工学教育』56-1(2008)特集「広く活躍するこれからの技術者に求められる教養とその涵養」(p.4）しかし「人間力」という概念は、「教養」以上に曖昧であり、使用は勧められないだろう。

[44] 瀬沼武秀「グローバル化時代の技術者に期待される素養」『工学教育』56-1(2008)p.6

[45] 田村恭一「教養の概念とその論理」『上武大学経営情報学部紀要』32（2008）pp.26-27

[46] あるいは個々人が身体的行為で端的に示す（態度で「物語る」）ことができるだけである。教養一般ではなく「個々の教養（知識)」の不要性を語る（論証する）ことはむろん可能である。それどころか、知る必要のないことや、「知ってはならないことは何かについて知ることもまた、教養に属している」(Dietrich Schwanitz,*Bildung Alles,was man wissen muss*,Eichborn(2002)p.657)のである。

[47] 草原克豪「現代の教養と大学教育」『学術の動向』10-7(2005)p.11

[48] 坂井昭宏「教育評価の方法――教養教育の「目的目標」と「教育の効果」」『社会哲学研究資料集Ⅲ』(2004)p.163

[49] 廣川洋一『ギリシャ人の教育――教養とはなにか――』岩波新書(1990)p.2

（平成21年9月25日　受理）

課外物理実験教室の試行について

――低学年の学生に物理への興味を引き起こす試み――

潮　秀樹*，大野秀樹*

Implementing the classes of physics which have scientific experiments after school

Hideki USHIO and Hideki OHNO

The physics classes which have scientific experiments were hold after school for first and second grade students. The aims of these classes were to interest the students in physics and to improve the scientific education. In this time, each experiments of making a rainbow and a mirage were practiced in two classes. It was found that the attending students to these classes tried to devise the experiments by themselves. These classes can give them a good motivation to have interest in physics.

(Keywords: physics classes, scientific experiments)

１．企画の内容と目的

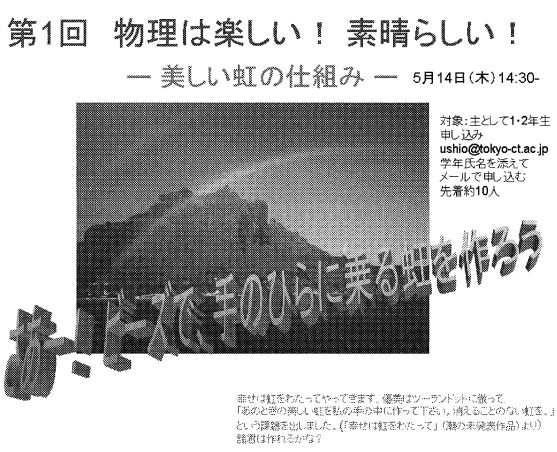
物理の講義において、我々は実験を多く取り入れている。その意図は、実験により物理の法則を体験してもらい、それを座学で肉付けして物理を理解してもらうということである。この意図は成果を挙げてきているが、物理に興味を持ち、物理が好きになるという点ではあまり効果が見えないようである。

その理由は当然であると思われる。物理の原理を理解するための実験は学生にとって、労力を要求されるわりには、さほど面白い内容ではないからである。地味な実験を面白くないと感じる学生が多いのはやむを得ないことである。

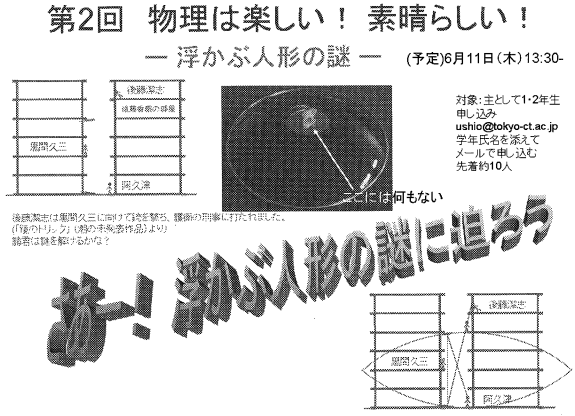
理科好きの学生が入学していた頃は、それでも問題がなかった。しかし、昨今のゆとり教育により、中学時代での実験経験が少なくなって、理科（特に物理分野）に興味を持てなくなった学生が入学してきている今、これからは物理を好きになってもらう努力も必要ではないかと考え、「低学年の学生に物理への興味を引き起こす試み」を実施した。具体的には１～２年を対象に希望者を募り、木曜日の放課後に学生の興味を引きそうなテーマで実験教室を実施した。本年は初めての試みということで前期に２つのテーマを実施した。

（１）　虹の実験(室内で虹を再現)

はじめに幾何光学により虹の原理を説明する。その際、本来は微積分が必要であるが、パソコンによるシミュレーション実験の結果を見せることにより、微積分を使わず虹の原理を説明する。赤いアーチが外側になる虹（主虹）と青いアーチが外側になる虹（副虹）があることも解説する。その後、実験を室内で、水滴の代わりに細かいガラ



資料１　第１回・課外物理実験教室の案内



資料２　第２回・課外物理実験教室の案内

＊一般教育科（物理学教室）

写真１　参加した学生が作成した虹の写真の例

ス球の粉末と白色光を使って虹を発生させた。

（２）ミラージュの実験

凹面鏡を２枚用いて、浮かぶ豚フィギュアの実験を行った。あたかも豚フィギュアがそこにあるように見えても触ることが出来ないという不思議な体験をしてもらった。はじめに「像の位置、像とは、幾何光学」などについて実験を交えながら簡単な説明をした後に本実験を行った。

資料１、２は、参加学生募集のポスターであり、各回とも、２年生から約 10 人の参加者があった。残念ながら１年生からの参加がなかった。前期の早い時期（５～６月）に実施したため、１年生には参加する余裕がなかったかもしれない。実施時期については後期も含めて検討する事にした。

２．企画の実施結果

実際にこの教室を実施してみると、授業の実験雰囲気とは異なり、学生は色々なことを考え、思いついたことをやってみようとする。

その例として、虹の実験の場合に学生が自主的に試みた事について報告する。実験教室では、各学生が実験できるように材料等を配布して実験や観察を行う。この時は、学生が各々で作った虹よりも、もっと大きい虹を作成したいと自ら提案、準備して、それを試みた。試行錯誤の結果、ガラスビーズの台紙を大きくし、携帯電話からの光を照射すると大きなきれいな虹が浮かびあがった。その時、誰からともなく歓声が上がった。続いて彼らは、その虹を携帯電話のカメラで写真に取ろうと言い出した。一人の携帯電話で光を照射し、もう一人の携帯電話で写真を撮った。始めはなかなか上手く撮れなかったが、最後には上手な写真が取れるようになり、各自の取った写真をメールに添付して送ってくれた。写真１はその中の１枚である。この撮影を行う事により、虹の見える（撮れる）条件などを再確認したと共に前半の虹のできる説明がより明確になったと思われる。

３．終わりに

放課後に行われる自由参加での実験教室では、参加学生自身に興味があることに加え、自分で考えたことを実験できる（試せる）環境があることもあり、非常に良い雰囲気の中で進められた。さらに、学生の自主性を見ることが出来たとともに、物理学習の動機付けにもなったと思われる。今後も低学年の物理教育の一つとして今回のテーマも含めて、以下のようなテーマの中から実験を実施してみたいと考えている。

（１）風船で空気浮上させる円板の作成（慣性の実験）
（２）真空落下実験（質量が異なる物体が同時に落下することを示す実験）
（３）10 円玉の衝突実験（運動量）
（４）表面張力の実験（コップ一杯の氷水で、氷が溶けてもこぼれない理由）
（５）ニュートンの分光実験
（６）半円形容器とレーザーを使用した、溶液の屈折率の測定
（７）気体温度計の実験
（８）最大出力の実験（相乗平均と相加平均）
（９）ウエーブマシーン（グラフの平行移動）とシャボン玉の実験
（１０）回折格子の作成（等比級数）
（１１）うねり（加法定理）
（１２）ドップラー効果

最後に、今回の実験教室の企画と試みは重点配分経費によって実施することができた。ここに、感謝の意を表する。

（平成 21 年９月 25 日　受理）

波型接合部形状を有する突き合わせ接着継手の引張強度特性

秋山和徹*，志村　穣**，黒崎　茂**

Tensile Strength Characteristic for Adhesive Butt Joint with Bonded Surface of Waved Shape

Katsuyuki AKIYAMA, Jyo SHIMURA, Shigeru KUROSAKI

In this study, we have suggested the new joint configuration, which has a curved surface at a bonded part, and we have named it an "adhesively waved butt joint". Static tensile experiments to clarify the joint strength were carried out, using epoxy structural adhesive. While the adhesive layer in the longitudinal direction was examined on a basis of 0. 1 mm in thickness, effects of adhesive thickness and adherend material on joint strength were examined in the experiments, where the adhesive thickness was changed from 0.1 to 0.05, 0.2 and 0.5 mm, with the three kinds of adherend materials-aluminum alloy, mild steel and brass. As a result, load bearing property of "adhesively waved butt joint" proved to rise higher than the conventional butt joint. Furthermore, the joint strength increased as the adhesive thickness decreased. However, no regularity was recognized between the joint strength and rigidity by the adherend material.

(Keywords: Adhesively waved butt joint, Tensile strength, Joint configuration, Epoxy structural adhesive)

1. 緒言

部品や構造物を接合する方法はいろいろあるが，なかでも接着接合は多様な被着体材料対応，使い勝手，コストなど多くの利点を有している。また，かつては問題視されていた光学特性，電気・電磁特性，対音波・振動特性といった機能も大幅に向上し，接着接合はものづくりを支える基盤技術と位置づけられており，航空宇宙構造物や陸上輸送機械，さらにはICに代表される小さな電子部品など様々な分野で必要不可欠な接合技術となっている。実用上，単純重ね合わせ接着継手および突き合わせ接着継手が最も一般的な継手形態であり，それらの応力解析や強度に関して数多くの研究がなされてきた。Goland ら[1]は，単純重ね合わせ接着継手に引張負荷が作用する場合の支配方程式として，被着体の曲げおよび接着剤の引張応力を考慮した4階の微分方程式を解き，解析を行っている。服部ら[2]は，単純重ね合わせ接着継手の重ね合わせ長さ，接着層厚さ，被着体厚さおよび接着端角度が接着強度に及ぼす影響について検討を行い，接着端角度を30°以下にすることで継手強度をより大きくできるという知見を示している。永弘ら[3]は，2種類のエポキシ系接着剤について，引張または圧縮とねじり荷重を丸棒突き合わせ接着継手に加えることにより，組み合わせ負荷状態での継手強度について実験および検討を行っている。組み合わせ負荷での破壊条件は最大主応力説が比較的良く一致すること，単純引張の場合を除き，接着層厚さによる強度の差は少ないことが示されている。

また，所定寸法のもとで，継手強度向上を目的に被着体に任意の傾斜角を与え，接着接合面積を増加させるスカーフ継手についても多くの研究者が従事してきた。Lubkin ら[4]は，引張荷重下のスカーフ接着継手の応力解析を理論的に行っている。被着体は一様な単軸応力状態であり，接着層は二次元応力状態で接着層の厚さ方向に対しては応力が変化しないものと仮定し，平面応力状態および平面ひずみ状態において，継手全域で一様応力状態となるスカーフ角が存在することを明らかにしている。鈴木ら[5]は，引張および曲げを受けるスカーフ接着継手について，接着層収縮応力や接着層表面の境界層を考慮した有限要素解析を行い，スカーフ角度および接着層厚さと接着強度との理論的関係を導くことで継手の破壊条件を明らかにしている。

さらに，池上[6]は，1969～1984年のおよそ15年の間に行われた接着継手の研究を展望し，代表的な突き合わせ接着継手，単純重ね合わせ接着継手およびスカーフ接着継手の応力解析に関する研究結果を紹介している。その中で接着強度則について触れ，応力解析に基づく単純負荷およびそれらの組み合わせ負荷に対する接着強度を接着界面に適用して，継手の強度設計を行う方法を述べている。

以上のように，静的負荷を受ける様々な接着継手形態に関して，実験的研究や理論解析あるいは有限要素法等により数多くの研究報告がなされており，接着継手の力学特性はかなり解明されつつある。しかしながら，その後，新たな継手形態が提示され，その有用性が示された報告は見当たらない。そこで本研究では，接着面積の増加に伴う継手強度向上に主眼をおき，接合部分が曲面形状となる波型突き合わせ接着継手を提案し，一般的な形態である突き合わせ接着継手との差異を明らかにした。さらに，接着層厚さおよび被着体材料が継手強度に及ぼす影響についても検討を行った。

＊専攻科　機械情報システム工学専攻　＊＊機械工学科

2. 接着剤と継手試験片

2.1 接着剤

本研究では住友 3M 製エポキシ系構造用接着剤 Scotch-Weld 1838 B/A を使用した。この接着剤はエポキシ樹脂を主成分とし，主剤(A 剤)と硬化剤(B 剤)からなる二液室温硬化型接着剤である。特長として，常温で硬化し 120℃程度まで耐えられ，さらに硬化時に生じる体積収縮が少ない点が挙げられる。エポキシ系の接着剤は日常生活においても金属，陶磁器，プラスチックおよびガラスなど様々な被着体に対して広く用いられている。Table 1 にこのエポキシ系構造用接着剤の機械的性質を示す。

2.2 継手試験片の準備

使用した接着継手試験片の寸法および形状を Fig.1 に示す。Fig.1(a)が本研究で提案した波型突き合わせ接着継手の試験片であり，端部の曲線部分が接着接合箇所となる。Fig.1(b)は一般的によく用いられている突き合わせ継手の試験片である。互いの試験片の軸心がずれないように，特別に製作した治具(Fig.2)を用いて接着接合した。この治具の端部にはマイクロメータヘッドが取り付けられ，接着層の厚さを調整することができる。本研究における接着層厚さは，継手の長手方向に関して 0.1mm を基本とした。なお，接着層の厚さが継手強度に及ぼす影響を調べるため，接着層厚さ 0.05mm, 0.2mm および 0.5mm の試験片も製作した。被着体材料はアルミニウム合金 A5052 を基本とし，継手強度と被着体材料の関係を調べるため，軟鋼 SS400 および黄銅 C3604 についても継手試験片を製作した。各材料の機械的性質を Table 1 に示す。これらの材料を Fig.1 に示すようにワイヤーカットで加工したのち，80 および 240 番のサンドペーパーで接着面を研磨した。波型突き合わせ接着試験片は接着面が曲面となっており，表面粗さ測定が容易ではない。したがって，本研究では，接着面の曲面上任意三点における算術平均粗さ Ra を測定し，各点の値が 2μm 程度となるように調整した。粗さ測定にはミツトヨ製小型表面粗さ測定器サーフテスト SJ-201 を使用した。次いで，デジタル秤により接着剤の主剤と硬化剤の重量比を 1:1 とし，十分に混ぜ合わせ，接着面をアセトンで脱脂，洗浄し，十分乾燥させたのち，接着剤を塗布し接合した。その際，接着接合された試験片がずれないように万力で固定している。その後，常温で 24 時間放置し硬化させ，ヤマト科学製定温乾燥機 DVS402 により，80℃で 2 時間加熱し乾燥させた。

Table 1 Material properties of adhesive and adherends.

	Adhesive Scotch-Weld 1838 B/A	Adherend A5052	Adherend SS400	Adherend C3604
Young's modulus (GPa)	3.4	70	206	100
Poisson's ratio	0.39	0.314	0.3	0.35
Density (kg/m^3)	1.13×10^3	2.7×10^3	7.86×10^3	8.46×10^3
Yield stress or Proof stress (MPa)	20	79	245	—
Tensile strength (MPa)	43.9	195	400	335
Tensile shear strength (MPa)	21	—	—	—
Peel strength (kN/m)	0.8	—	—	—

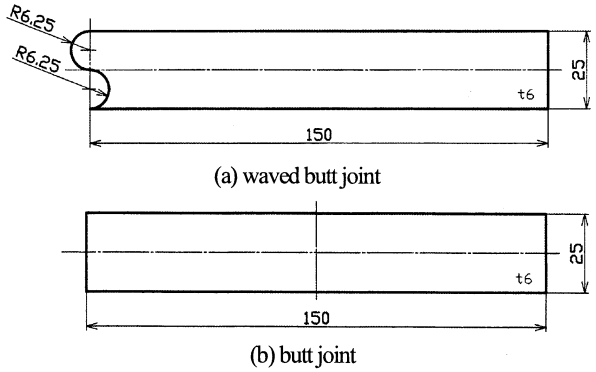


Fig.1 Geometry and dimensions of joint specimen used in experiment.

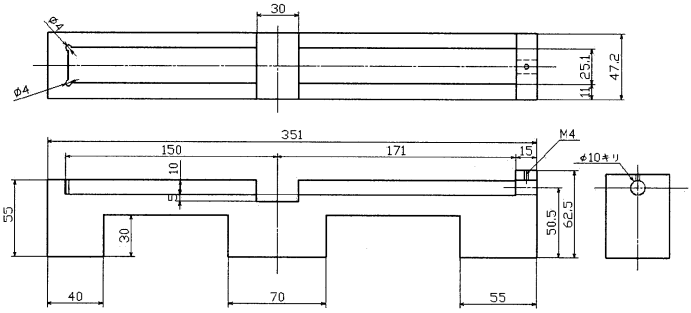


Fig.2 Configuration of jig for making joint specimen.

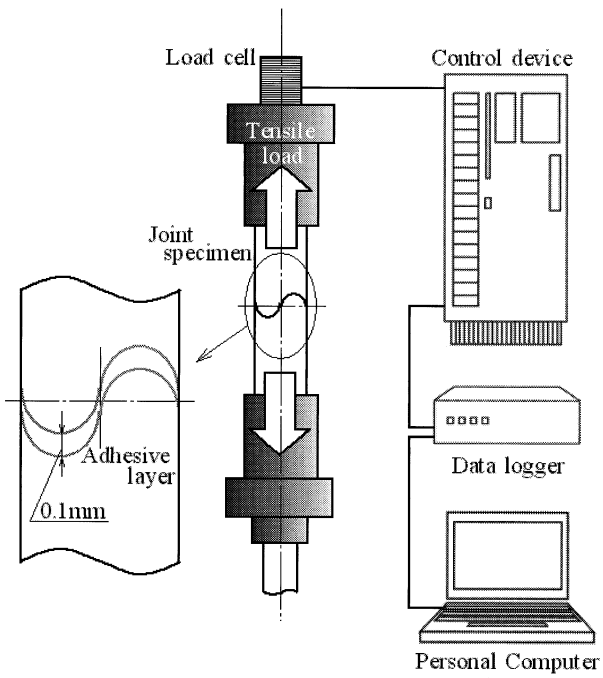


Fig.3 Experimental apparatus and associated recording system.

3. 実験方法

Fig.3 に実験装置の概略を示す。実験装置の構成は，サギノミヤ製容量 100kN の電気油圧サーボ式疲労試験機，共和電業製センサインターフェース PCD-320A およびパーソナルコンピュータである。接着作業の終えた継手試験片を疲労試験機に取り付け，静的引張荷重を作用させる。その際の破断に至るまでの荷重および変位をセンサインターフェースを介してパーソナルコンピュータに記録させた。実験は各試験片について 7 回以上行い，変位制御および引張速度 0.3mm/min で実施した。

4. 実験結果および考察

4.1 継手形態と強度特性

Fig.4 に突き合わせ接着継手および波型突き合わせ接着継手の荷重 - 伸び線図を示す。縦軸は作用荷重(N)，横軸は伸び(mm)である。両継手ともに，被着体材料はアルミニウム合金 A5052, 接着層厚さは 0.1mm であり，突き合わせ接着継手は 12 回，波型突き合わせ接着継手は 14 回の測定を実施した。本研究における伸びは全てクロスヘッド間の変位であり，接着層と被着体の両方の変位を含んでいる。なお，Fig.4 は両継手における全ての試験片の任意荷重に対する伸びの平均値をプロットしたものである。この図より，両継手が破断に至るまでの挙動に大差は見られないが，破断荷重の大小で見ると，波型突き合わせ接着継手の方が高い値となっている。このことは，両継手を同一の寸法・形状の構造部材として評価した場合，より大きな荷重に耐えられる波型突き合わせ接着継手の方が耐荷重特性に優れることを示す。

Fig.5 は突き合わせ接着継手および波型突き合わせ接着継手と破断荷重の関係を示す。縦軸は破断荷重(N)，横軸は試験片の番号である。被着体材料および接着層厚さは Fig.4 と同様である。波型突き合わせ接着継手の破断荷重は突き合わせ接着継手に比べ，ばらつきがやや大きくなっており，それらの標準偏差は前者が 560N，後者は 338N である。

Fig.6 は突き合わせ接着継手および波型突き合わせ接着継手と継手強度の関係を示す。縦軸は Fig.5 における破断荷重を各継手の接着面積で除した値，つまり，継手強度(MPa)であり，横軸は試験片の番号を示す。ちなみに，接着面積は波型突き合わせ接着継手の場合が 236mm^2，突き合わせ接着継手が 150mm^2 である。ふたつの継手を継手強度から比較すると，突き合わせ接着継手が優位性を示す結果となった。また，標準偏差は波型突き合わせ接着継手では 2.37MPa，突き合わせ接

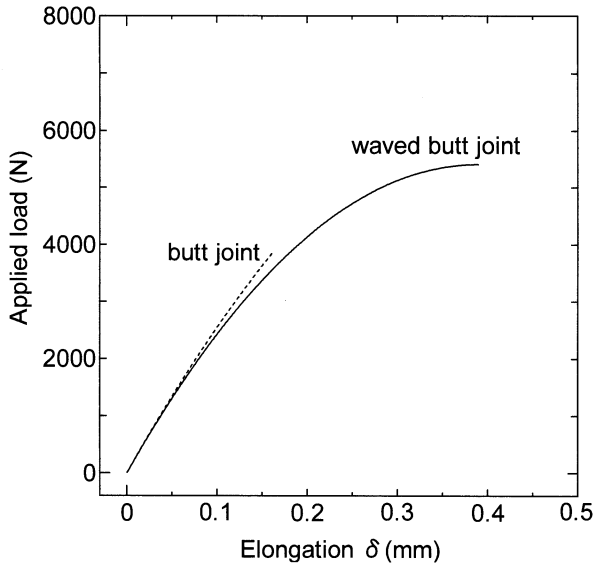


Fig.4 Relation between applied load and elongation by difference of joint configuration.

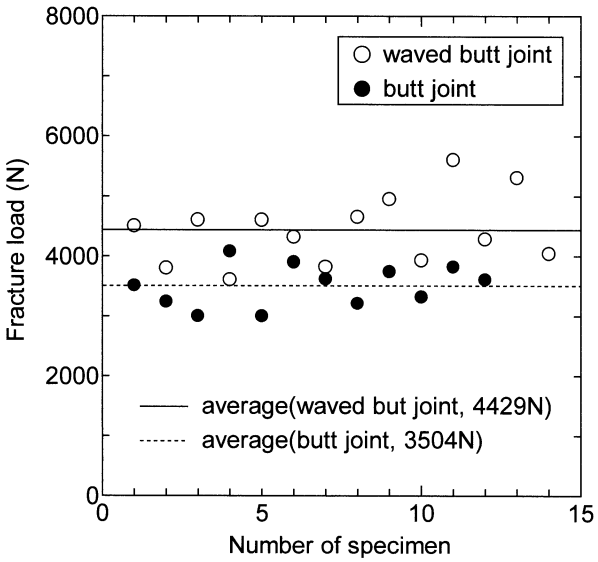


Fig.5 Comparison of fracture load between waved butt joint and butt one.

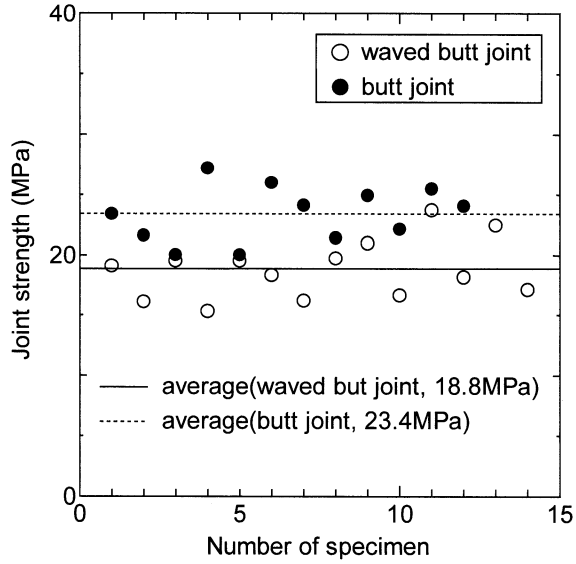
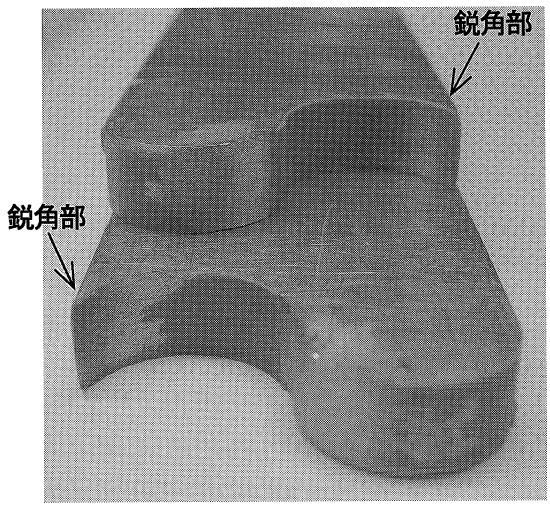
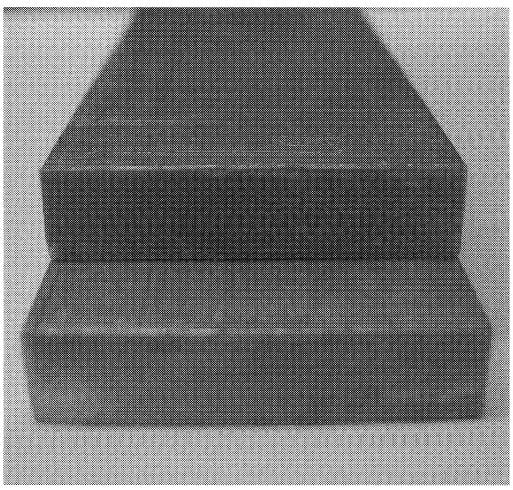


Fig.6 Comparison of joint strength between waved butt joint and butt one.

着継手では 2.25MPa である。突き合わせ接着継手は単軸応力状態下，すなわち，接着層に一様の応力が作用することから，試験片に依らず比較的安定した強度が得られると考えられる。一方，波型突き合わせ接着継手はその接合部分の形状ゆえに複合応力状態となることや，接着接合作業および実験遂行時の人為的ミスと相まって強度のばらつきが大きくなると推測される。実際の継手試験片の破断の様子を Fig.7 示す。突き合わせ接着継手の場合，接着層と被着体との界面破壊領域，接着層内での凝集破壊領域の 2 種類の破壊形態となっているが，波型突き合わせ接着継手では接合面全体において界面破壊が支配的であり，とくに，被着体鋭角部付近の接合面で接着剤が剥離する傾向が見られた。本研究における突き合わせ接着継手の引張強度が 23.4MPa, Table 1 より接着剤の引張せん断強さが 21MPa であることを踏まえると，波型突き合わせ接着継手の破壊起点は被着体鋭角部付近の接合面であると思われる。Table 2 に両継手の破断荷重および継手強度に関する最大値，最小値および平均値を記す。



(a) waved butt joint



(b) butt joint

Fig.7 Fractured surface of specimen.

Table 2 Fracture load and joint strength of both joints.

		Joint configuration	
		Butt joint	Waved butt joint
Fracture load (N)	Maximum	4080	5600
	Minimum	3000	3610
	Average	3504	4429
Joint strength (MPa)	Maximum	27.0	23.5
	Minimum	20.0	16.1
	Average	23.4	18.8

4.2 接着層厚さの影響

波型突き合わせ接着継手の被着体材料をアルミニウム合金 A5052 とし，接着層厚さを 0.05，0.1，0.2 および 0.5mm に変化させた場合における，継手が破断に至るまでの挙動を Fig.8 に示す。測定回数は接着層厚さ 0.05mm が 7 回，0.1mm が 14 回，0.2mm および 0.5mm は 9 回である。なお，Fig.8 はこれらの測定結果をもとに近似曲線で補正したものである。縦軸は作用荷重(N)，横軸は伸び(mm)である。Fig.8 より，接着層厚さが大きくなるほど，破断荷重および伸びが小さくなる傾向が見られる。

また，Fig.9 に波型突き合わせ接着継手の接着層厚さと継手強度の関係を示す。縦軸は継手強度(MPa)，横軸は接着層厚さ(mm)である。Table 3 に各接着層厚さに対する継手強度の最大値，最小値および平均値を示す。Fig.9 および Table 3 から，本研究の場合では，接着層厚さを小さくするほど継手強度が増加することがわかる。この接着層厚さに関する強度特性は，過去の研究成果[5,7,8,9]より継手形態に依存しないと考えられる。接着層厚さが大きくなると継手強度が低下する理由として，気泡や欠陥などの存在する確立が高まることや，それらの寸法そのものも大きくなることが挙げられるが，今のところ原因の特定には至っていない。さらに，実験結果のばらつきに着目すると，接着層厚さを小さくするほど大きくなっている。それぞれの標準偏差は 0.05mm で 2.7MPa, 0.1mm で 2.4MPa, 0.2mm で 2.3MPa および 0.5mm では 1.8MPa であり，逆に，一定の強度を確保したい場合は接着層厚さを大きくした方が良いといえる。

4.3 被着体材料の影響

波型突き合わせ接着継手の接着層厚さを 0.1mm に固定し，被着体の材質としてアルミニウム合金 A5052，軟鋼 SS400 および黄銅 C3604 の三種類を対象とし，継手が破断に至るまでの挙動を各材料で 13 回の測定を実施

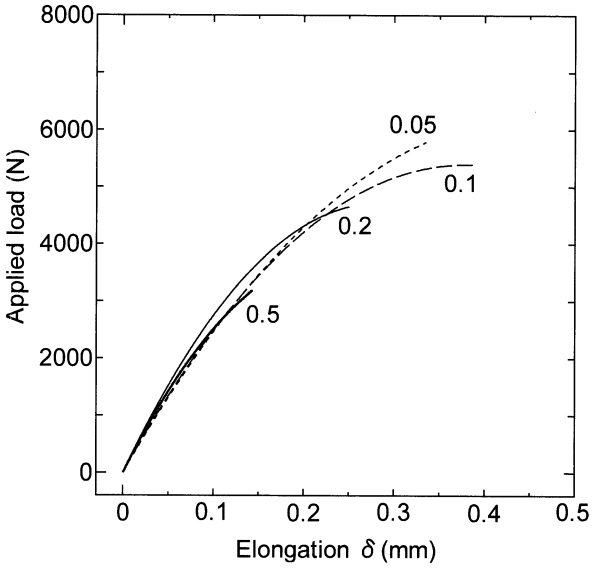


Fig.8 Relation between applied load and elongation when the adhesive thickness changed from 0.05 to 0.5mm.

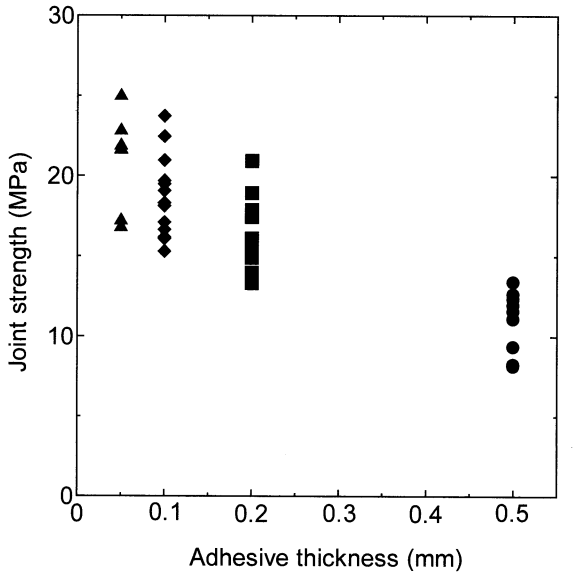


Fig.9 Effect of adhesive thickness on joint strength.

Table 3 Each values of joint strength concerning adhesive thickness.

		Adhesive thickness (mm)			
		0.05	0.1	0.2	0.5
Joint strength (MPa)	Maximum	25.0	23.5	21.0	13.4
	Minimum	16.8	16.1	13.4	8.2
	Average	21.0	18.8	16.6	11.0

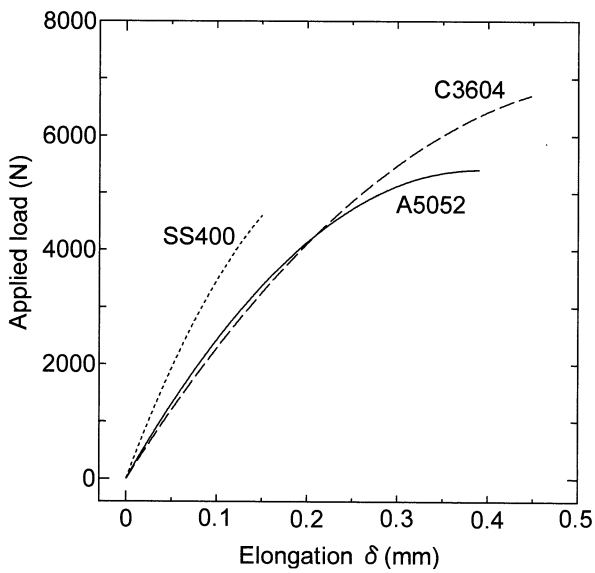


Fig.10 Relation between applied load and elongation

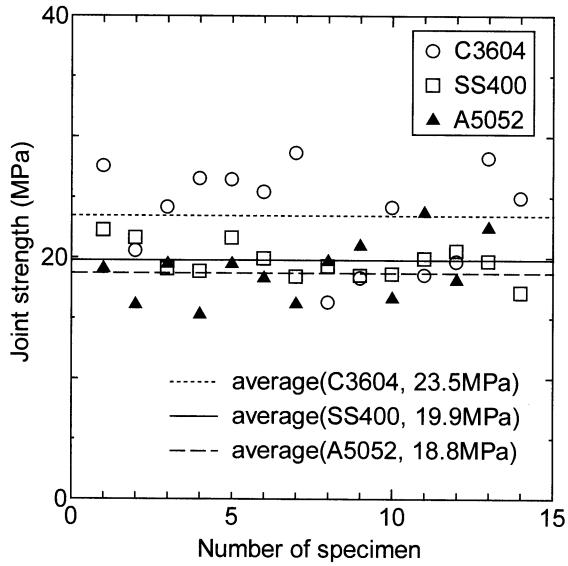


Fig.11 Effect of adherend material on joint strength.

Table 4 Each values of joint strength concerning adherend material.

		Adherend material		
		A5052	C3604	SS400
Joint strength (MPa)	Maximum	23.5	28.7	22.3
	Minimum	16.1	16.3	18.6
	Average	18.8	23.5	19.9

した。その測定結果を近似曲線で表したものが Fig.10 である。縦軸は作用荷重(N)，横軸は伸び(mm)である。Table 2 より，アルミニウム合金 A5052 と黄銅 C3604 の縦弾性係数はそれぞれ 70GPa，100GPa であり，軟鋼 SS400 の 206GPa に比べれば両者は近い値である。このことは Fig.10 において，アルミニウム合金 A5052 および黄銅 C3604 の曲線勾配が，伸び 0.2mm 付近までほぼ一致していることからも見受けられる。その後の破断に至るまでの曲線勾配は異なるが，同じような特性を示す継手といえる。三種類の中で最も剛性の高い軟鋼 SS400 においては曲線勾配が一番大きく，また，破断荷重も最も小さい値となっている。これは，作用荷重による被着体の変形が小さいと，その分，接着層に蓄えられるエネルギの割合が増すことを示し，結果として接着層に応力が集中し，被着体が伸びる以前に継手が破壊に至るものと考えられる。

Fig.11 は波型突き合わせ接着継手の被着体材料と継手強度の関係を示す。縦軸は継手強度(MPa)，横軸は試

験片の番号である。また，Table 4 に各被着体材料に対する継手強度の最大値，最小値および平均値を示す。Fig.11 より，軟鋼 SS400，アルミニウム合金 A5052，黄銅 C3604 の順に測定結果のばらつきが大きくなっており，それらの標準偏差は軟鋼 SS400 で 1.2MPa，アルミニウム合金 A5052 で 2.4MPa，黄銅 C3604 では 3.9MPa である。継手強度の平均値は軟鋼 SS400 で 19.9MPa，アルミニウム合金 A5052 で 18.8MPa，黄銅 C3604 で 23.5MPa であり，黄銅 C3604 が最も継手強度が高い。しかしながら，被着体材料を黄銅 C3604 とした場合，測定結果のばらつきや標準偏差が大きいことから安定した継手強度が得られているとは考えにくい。一方，被着体の剛性を高くすると継手強度が低下する反面，一定の継手強度が得られることがわかる。

5. 結言

本研究では，新しい継手形態である波型突き合わせ接着継手を提案し，一般的な突き合わせ接着継手との強度特性の差異，接着層厚さおよび被着体材料が継手強度に及ぼす影響について，引張強度測定実験により明らかにした。以下に得られた知見を記す。

(1) 波型突き合わせ接着継手および突き合わせ接着継手の双方を同一寸法・形状の構造部材として評価した場合，波型突き合わせ接着継手の方が耐荷重特性に優れる。

(2) 接着層厚さが 0.05mm から 0.5mm の範囲では，接着層を小さくするほど継手強度が増加する。

(3) 展延性のある黄銅 C3604 のような材料を被着体に用いると，継手強度が向上する傾向が見られる。また，剛性の高い材料を用いた場合，継手強度は低下するが，安定した継手強度が得られる。

参考文献

1. M. Goland, et al., The Stresses in Cemented Joints, *ADME Journal of Applied Mechanics,* Vol.11 (1944), pp.A17-A22.
2. Hattori, T., A Stress-Singularity-Parameter Approach for Evaluating Adhesive Strength of Single-Lap Joints, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, *Series A*, Vol. 56, No.523 (1990), pp.618-623.
3. Nagahiro, T., et al., Strength of Adhesive Butt Joints under Mixed Load, *Journal of the Adhesion Society of Japan,* Vol. 20, No.5 (1984), pp.195-203.
4. J. L. Lubkin, et al., A Theory of Adhesive Scarf Joints, *Journal of Applied Mechanics,* 24 (1957), pp.255-260.
5. Suzuki, Y., Adhesive Tensile Strength of Scarf and Butt Joints of Steel Plate (1st Report, A Case of Brittle Adhesive), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, *Series A*, Vol. 50, No.451 (1984), pp.526-553.
6. Ikegami, K., Strength Design and Stress Analysis of Adhesive Bonded Joints, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, *Series A*, Vol. 50, No.457 (1984), pp.1557-1563.
7. Kyogoku, H., et al., Strength Evaluation of Scarf Joint Bonded with Adhesive Resin (1st Report, Adherends of the Same Metals), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, *Series A*, Vol. 53, No.487 (1987), pp.499-505.
8. Nono, K., et al., A Comparison of Predicted Strength and Experimental Result of Adhesive Joints, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, *Series A*, Vol. 52, No.479 (1986), pp.1698-1707.
9. Mori, K., Testing Methods for Adhesive Bonds (Part1: Strength of Adhesive Bonds under Static Loading), *Bulletin of Science and Engineering, Takushoku University,* Vol. 5, No.4 (1996), pp.360-366.

（平成 21 年 9 月 25 日　受理）

構造用接着剤の弾性定数測定

松井真一*，志村　穣**

Measurements of Elastic Constants for Structural Adhesives

Shin-ichi MATSUI and Jyo SHIMURA

This paper describes Young's modulus, Poisson's ratio, that is, elastic constants of structural adhesives. It is important values to analyze for adhesive bonded body in FEM. Thus, axial tensile experiments were carried out to obtain stress-strain curve of adhesive bulk specimen. Adhesives employed are three types–3M Scotch-Weld 1838 B/A epoxy adhesive, 3M MetalGrip acrylic one, PLEXUS MA310 acrylic one. In the experiments, adhesive bulk specimen is glued strain gauge, and subjected to static tensile load. The effect of hardening temperature of adhesive on mechanical behavior was also clarified. As a result, it was found that 1838 B/A, MA310 shows brittle behavior, and MetalGrip indicates ductile one. Furthermore, tensile strength, Young's and tangential modulus of 1838 B/A are the greatest in all of adhesives. In the case of MetalGrip, it was recognized that heating temperature when adhesive hardened affects the stress-strain behavior.

(Keywords: Elastic constants, Structural adhesive, hardening temperature)

1. 緒言

接着剤を使用した接合は古くから用いてきた結合法の一つであり，近年では研究開発も進められ機械構造部材の接合にも使われている。接着接合は点接合と異なり面接合であるため応力分散性があり，優れた疲労抵抗性も期待できる。また，溶接のように接合する際に熱を伴わないので，材料の材質変化や残留応力などの問題もないといった利点を有している。このような優れた利点や可能性が認識されながらも現状では接着継手設計のための資料が不足しているため，経験的，試行的な運用にとどまっている。そこで本研究では，エポキシ系およびアクリル系構造用接着剤のダンベル型試験片を製作し，引張試験を行うことで基本的材料特性を明らかにする。また，接着接合体の構造解析を行う上で必要となる縦弾性係数およびポアソン比などの弾性定数を，測定データより作成された応力 - ひずみ曲線から算出する。さらに，接着剤が硬化する際の温度影響の検討も行う。

2. 使用接着剤

2.1 アクリル系構造用接着剤

本研究では，住友 3M 製メタルグリップおよび PLEXUS 製 MA310 の二種類の二液混合型アクリル系構造用接着剤を使用した。メタルグリップの標準硬化時間は気温 25℃の条件下で 24 時間であり，主成分は変性アクリル樹脂である。また，MA310 の標準硬化時間は気温 25℃の条件下で 30～35 分であり，主成分はアクリル樹脂である。Table 1 に両者の物性値を示す。この二種類の接着剤は硬化剤および主剤ともにカートリッジに封入されており，専用のアプリケーターに取り付けられた専用ノズルから吐出させて使用する。ノズルの中には螺旋状の部品が入っており，二液がノズル内で定量混合する構造となっている。

2.2 エポキシ系構造用接着剤

住友 3M 製二液混合型エポキシ系構造用接着剤(1838B/A)を使用した。この構造用接着剤の標準硬化時間は気温 25℃の条件下で 24 時間であり，主成分はエポキシ樹脂である。Table 1 に物性値を示す。この接着剤は主剤と硬化剤がそれぞれの缶に封入されており，重量比 1:1 の割合で混ぜることにより硬化する。そのため，デジタルはかり(HL-I, A&D 製)で接着剤の重量を測定し，気泡が混入しないように十分に留意して混合させることが必要である。

3. 実験方法

3.1 試験片

引張試験を行うにあたり，まず，接着剤単体のダンベル型引張試験片(JIS K7113-1995 1 号試験片)[1), 2)]を製作

Table 1 Material properties of structural adhesives.

	1838 B/A	メタルグリップ	MA310
色	ライトグリーン	灰色	淡黄色
主成分	エポキシ樹脂	変性アクリル樹脂	アクリル樹脂
粘度 (Pa･S)	350	30	40~60
可使時間 (25℃)	—	3 分	15~18 分
標準硬化時間 (25℃)	24 時間	24 時間	30~35 分
混合比率	1 : 1	1 : 1	1 : 1
引張せん断接着強さ (MPa)	20.6	15.7	20.7~24.1

＊機械工学科卒業生（現　シチズンセイミツ株式会社）　＊＊機械工学科

した。Fig.1 に引張試験片の寸法および形状を示す。試験片の全長，平行部長さ，平行部幅および試験片の厚さはそれぞれ 175mm，60mm，10mm および 9mm とした。これらの寸法および形状は JIS 規格の K7113 を参考に決定した。

3.2 試験片製作用治具

ダンベル型試験片を製作する際に治具が必要となる。治具は上板，中板二枚および下板の計四枚で構成され，上板と下板の材質はアルミニウム合金，中板は SC 材とした。四ヶ所をネジ止めし，四枚全ての板を締結することで型枠として機能させる。治具詳細を Fig.2 に示す。

3.3 試験片製作

試験片製作用治具に接着剤をそのまま流し込むと治具同士が固着してしまうため，治具と接着剤の界面に分離材を貼り付ける。分離材を貼り付けた状態で治具

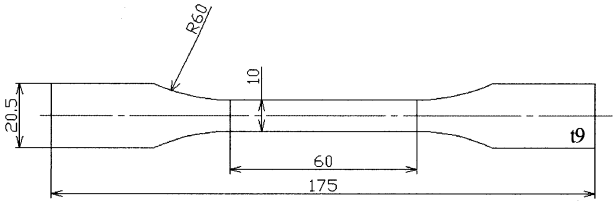
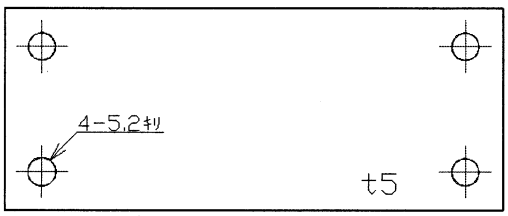
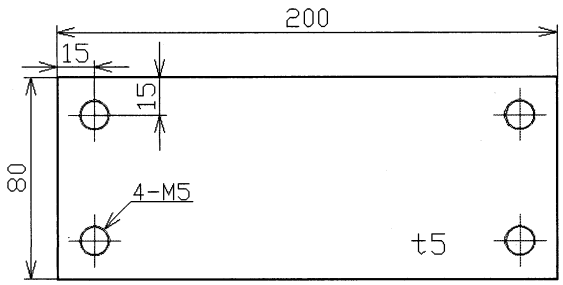


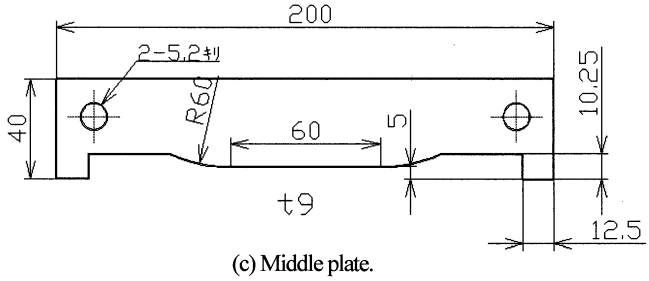
Fig.1 Dimension and geometry of tensile specimen.



(a) Upper plate.



(b) Lower plate.



(c) Middle plate.

Fig.2 Jig for manufacturing specimen.

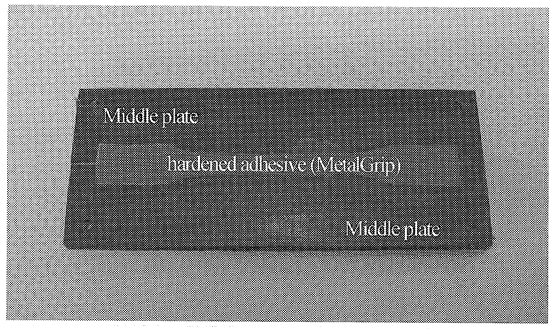


Fig.3 Dumbbell type specimen with jig.

に接着剤を流し込み，接着剤が固まるまで常温で放置し，接着剤が硬化後，試験片を治具から取り出す。その様子を Fig.3 に示す。エポキシ系接着剤である 1838B/A のみ，80℃に保った定温乾燥機の中で三時間キュアリングを行った。

3.4 ひずみ測定

鷺宮製作所製の容量 100kN 油圧サーボ疲労試験機に 2 軸のひずみゲージ(共和電業製, KFEL-2-120-D34)の貼付された試験片を取り付け，静的引張荷重を作用させることにより縦ひずみと横ひずみを検出する。ひずみの測定には東京測器製作所のデータロガーTDS-530 を，荷重検出には共和電業製のセンサインタフェース PCD-320A を使用した。これらの測定機器から得られた実験データから応力 - ひずみ曲線を作成し，接着剤の材料特性を明らかにする。なお，メタルグリップは伸びが大きいため，大ひずみにも対応できるひずみゲージ(共和電業製，KFEM-2-120-D34LIM2S)を長手方向および横断方向に貼付した。

4. 実験結果および考察

4.1 エポキシ系構造用接着剤(1838B/A)の場合

引張試験によるデータ採取は信頼性を高めるために，それぞれの構造用接着剤につき 5 回以上行い，それらの測定結果から応力 - ひずみ線図の作成および弾性定数の算出を行った。

エポキシ系構造用接着剤(1838B/A)の硬化条件に合わせ，試験片は室温で 24 時間硬化させたものを使用した。また，加熱装置で治具を 80℃に加熱し，硬化促進させた試験片も用意した。どちらの試験片も硬化後，80℃で保持した定温乾燥器の中で 3 時間キュアリングを行った。エポキシ樹脂のような熱硬化性樹脂は加熱すると硬化促進することから，硬化促進なしとありの場合で材料特性の比較を行った。試験片製作時，保存時および引張試験時の気温は20±5℃, 湿度は20±15%である。また，引張速度は 0.5mm/min とした。

硬化促進なし(室温)の場合の応力 - ひずみ線図を

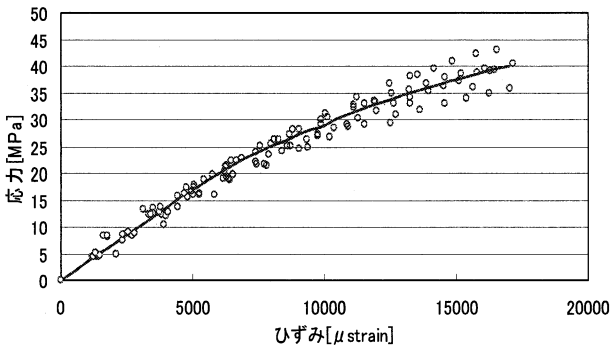
Fig.4(a)に，硬化促進あり(80℃)の場合のそれをFig.4(b)に示す。いずれの図も実験結果をもとに近似曲線で補正している。

室温で硬化させた場合の接着剤(1838B/A)の縦弾性係数，接線弾性係数，最終破断ひずみおよび最大引張強さはそれぞれ3.4(GPa)，1.27(GPa)，17000(μstrain)および40.6(MPa)である。また，試験片には2軸のひずみゲージを貼付してあり，このひずみゲージの縦ひずみと横ひずみの測定結果からポアソン比を算出したところ0.39であることがわかった。

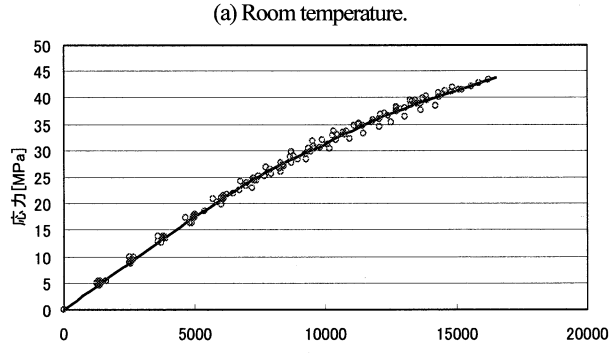
80℃で硬化させた場合の接着剤(1838B/A)の縦弾性係数，接線弾性係数，最終破断ひずみおよび最大引張強さはそれぞれ3.5(GPa)，1.62(GPa)，16200(μstrain)および43.3(MPa)である。また，ポアソン比は0.39となっている。

硬化促進ありとなしで強度的に大差は見られないが，接線弾性係数と最終破断ひずみには多少の差が生じている。また，Fig.4(a)および(b)から，硬化促進なしの場合は塑性域において測定データのばらつきが見られるが，硬化促進ありの場合はばらつきが少ない。

破断後の試験片の状態を見ると，試験片には大きな伸びが見られず，Fig.5(b)のように脆性材料特有の破断面形状を示した。また，破断面には微小の気泡がいくつか確認された。これらの気泡は試験片の強度に少なからず影響しているものと考えられる。Fig.5(a)を見ると試験片が欠けていることがわかる。これは破断時の衝撃により，試験片の一部が飛び散ったためである。



(a) Room temperature.



(b) 80℃.

Fig.4 Stress-strain curve of epoxy adhesive 1838 B/A.

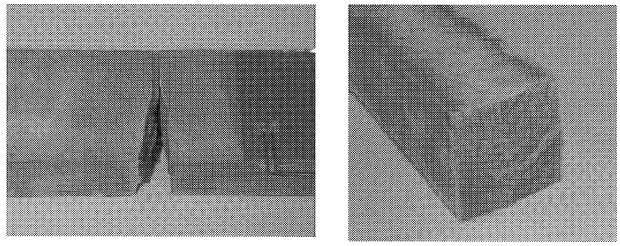

(a) Specimen where a part loosed.　(b) Fractured section.

Fig.5 Ruptured Specimen (1838 B/A).

本研究では硬化促進の有無によって試験片の力学的挙動に大差は見られなかったが，硬化促進させた方が安定した結果が得られた。このことから，硬化時に熱を加えて硬化促進させることはエポキシ系接着剤を用いる接着接合において有効な手段であると考えられる。

4.2 アクリル系構造用接着剤(メタルグリップ)の場合

アクリル樹脂は約80℃で軟化変形するという特性を有している。本研究ではこの点に着目した。アクリル系構造用接着剤であるメタルグリップについて，室温で硬化させたもの，50℃で2時間加熱後に硬化させたもの，80℃で2時間加熱後に硬化させたものの三種類の試験片を製作した。成形時に熱を加えることで，成形後の強度特性に及ぼす影響について検討を行った。

硬化条件が室温の場合の応力 - ひずみ線図をFig.6(a)に，50℃の場合のそれをFig.6(b)に，80℃の場合のそれをFig.6(C)に示す。いずれも実験結果をもとに近似曲線で補正した応力 - ひずみ線図である。試験片の破断面の様子をFig.7およびFig.8示す。

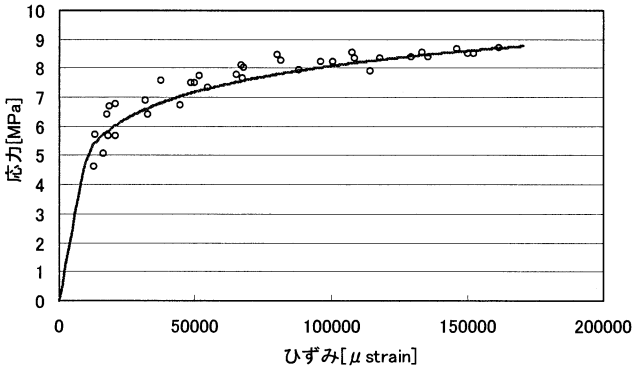
室温で硬化させた場合の接着剤(メタルグリップ)の縦弾性係数，接線弾性係数，最終破断ひずみおよび最大引張強さはそれぞれ0.5(GPa)，0.0077(GPa)，170000(μstrain)および8.8(MPa)である。塑性域の伸び方から延性挙動を示す延性接着剤であることもわかった。また，試験片平行部の中央に縦軸方向と横軸方向に貼付したひずみゲージの測定結果から，ポアソン比は0.41と算出された。

試験片硬化時に熱を加えた試験片は，室温のみで硬化させた試験片と比べると柔かく，手で曲げられるほど軟化していた。また，硬化時に熱を加えた試験片は著しい強度の低下および最終破断ひずみの減少が生じている。これらの傾向は加熱温度50℃および80℃の両方の場合で見られた。

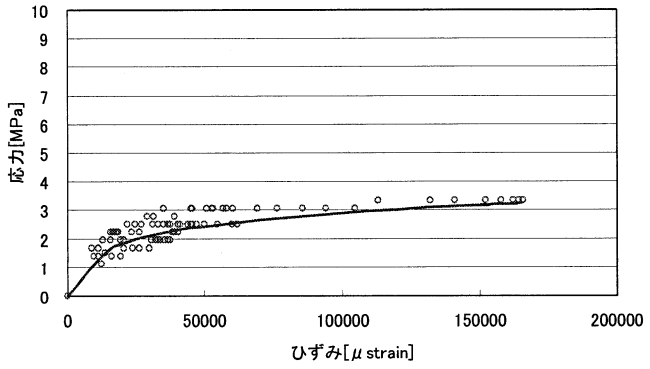
硬化時に熱を加えた試験片の破断箇所を観察すると数本の試験片が標線間距離外で破断していた。これは室温で硬化させた試験片にはない傾向である。また，試験片の伸びが大きいにも関わらず，それに伴った最

終破断ひずみの増加が見られない。このことから，試験片は軟化することにより，中央部つまりは標線間距離内での伸びだけでなく，標線間距離外も含め，試験片全体で伸びているものと考えられる。加熱後に硬化させた試験片は室温で硬化させた試験片と比べて，中央部のみならず試験片全体で伸びている。くわえて，ひずみゲージは試験片の中央部に貼付していることから最終破断ひずみが小さくなったと言える。

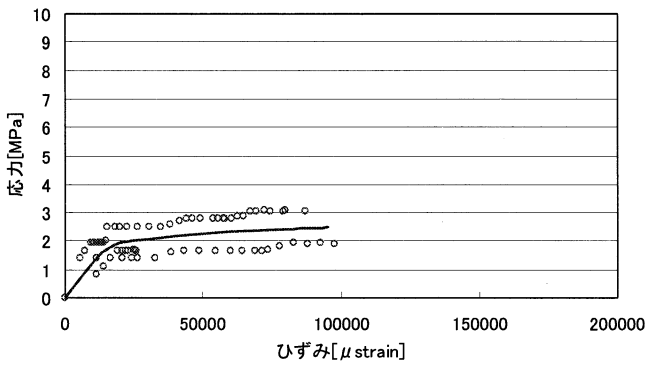
試験片の破断後の状態に関していえば，試験片は大きく伸びてから破断し，Fig.7 のような形状となった。Fig.7(a)より，室温で硬化させた試験片は軸線に対して直交した状態で破断した。Fig.7(b)の試験片の断面は正常な四角形になっていないが，これは硬化時の収縮が原因と考えられ，引張試験を行ったためにこのような形状になったわけではない。また，50℃で加熱し



(a) Room temperature.

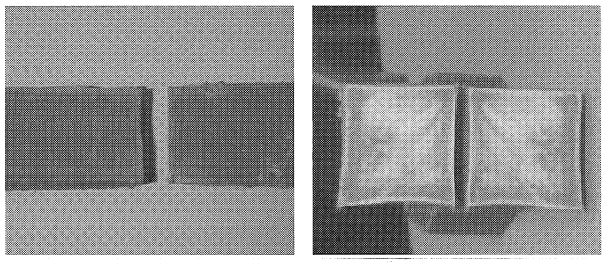


(b) 50℃.



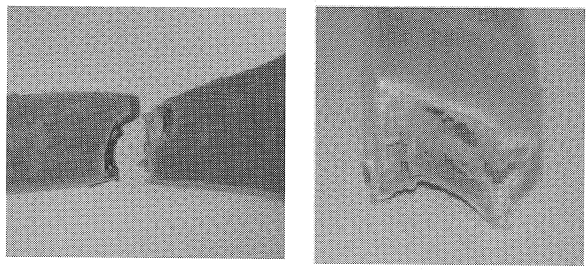
(c) 80℃.

Fig.6 Stress-strain curve of acrylic adhesive MetalGrip.



(a) Side view of divided specimen. (b) Fractured section.

Fig.7 Ruptured Specimen in the case of hardening at R.T. (MetalGrip).



(a) Side view of divided specimen. (b) Fractured section.

Fig.8 Ruptured Specimen in the case of hardening at 50℃ (MetalGrip).

た後に硬化させた試験片の破断後の様子を Fig.8(a)および(b)に示す。この試験片では，ちぎれるように破断し，破断面は複雑な形状になっている。80℃で加熱した後に硬化させた試験片も同じ形状が見られた。

4.3 アクリル系構造用接着剤(MA310)の場合

アクリル系構造用接着剤である MA310 は室温で硬化させたもののみを使用した。試験片製作時，保存時および引張試験時の気温は 20±5℃，湿度は 20±15%である。また，引張速度は 0.5mm/min とした。

Fig.9 に近似曲線で補正した応力 - ひずみ線図を示す。アクリル系構造用接着剤(MA310)の縦弾性係数，接線弾性係数，最終破断ひずみおよび最大引張強さはそれぞれ 2.2(GPa), 0.4(GPa), 22000(μstrain)および 29.9(MPa)である。また，試験片中央部には 2 軸のひずみゲージを貼付してあり，このひずみゲージの縦ひずみと横ひずみの測定結果からポアソン比を計算したところ 0.37 となった。

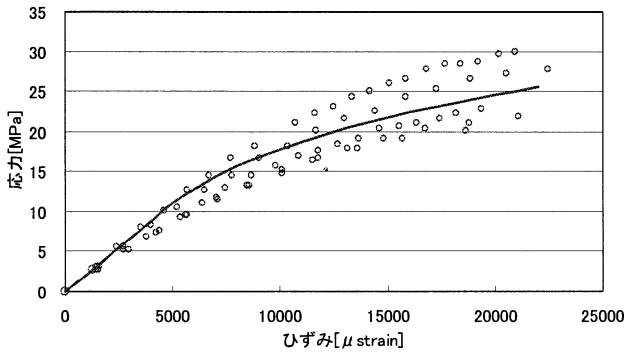
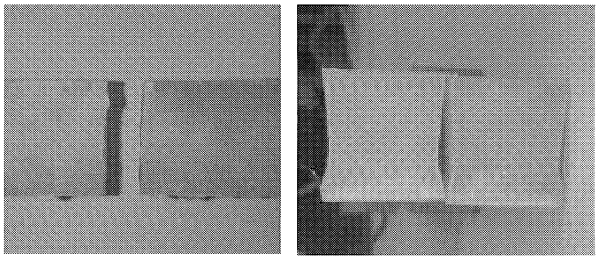


Fig.9 Stress-strain curve of acrylic adhesive MA310.



(a) Side view of divided specimen.　(b) Fractured section.

Fig.10 Ruptured Specimen (MA310).

試験片の破断面の様子を Fig.10 に示す。試験片は荷重方向に対して直交した面で破断している。また，メタルグリップ同様，試験片の断面はきれいな四角形形状ではなく，少し窪みが見られる。この試験片断面の変形がメタルグリップより大きいため，硬化時の収縮性はメタルグリップより高いと考えられる。

4.4 各構造用接着剤の材料特性の比較

最後に，室温硬化における各構造用接着剤の材料特性の比較を行う。比較のため，各接着剤の応力 - ひずみ線図をひとつにまとめたものを Fig.11 に，三種類の接着剤の材料特性値を Table 2 に示す。

Fig.11 より 1838B/A と MA310 は脆性的な挙動を示しているのに対し，メタルグリップは明らかに延性挙動を示していることがわかる。また，伸びの大きいメタルグリップは引張強度が低く，伸びの小さい 1838B/A は引張強度が最も高くなっている。1838B/A，メタルグリップおよび MA310 における非線形挙動はそれぞれのひずみ値が 5000(μstrain)，100000(μstrain) および 3000(μstrain)付近から見受けられる。

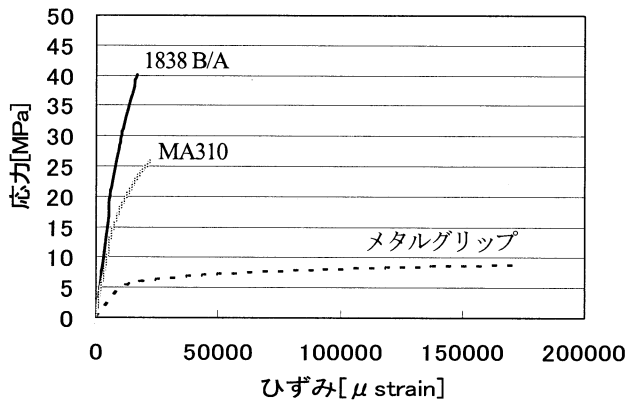


Fig.11 Stress-strain curves of three adhesives.

Table 2 Material properties of three adhesives.

	1838 B/A エポキシ系	メタルグリップ アクリル系	MA310 アクリル系
最大引張強さ (MPa)	40.6	8.8	29.9
縦弾性係数 (GPa)	3.4	0.5	2.2
接線弾性係数 (GPa)	1.27	0.0077	0.4
最終破断ひずみ (μstrain)	17000	170000	22000
ポアソン比	0.39	0.41	0.37

5. 結言

本研究では三種類の構造用接着剤のダンベル型引張試験片を作製し，引張試験を実施した。得られた実験結果をもとに応力 - ひずみ線図を作成し，縦弾性係数やポアソン比などの弾性定数の算出を行った。得られた知見を以下に記す。

(1) 応力 - ひずみ線図から 1838B/A および MA310 は脆性接着剤であることがわかり，メタルグリップは延性接着剤であることがわかった。また，引張強度が大きい接着剤は伸びが小さく，引張強度が小さい接着剤は伸びが大きいという関係性が得られた。

(2) 熱硬化性樹脂であるエポキシ樹脂を主成分とする構造用接着剤(1838B/A)は熱を加えて硬化促進させることにより安定した測定データが得られる。この接着剤は二液を混合させることによる化学反応で硬化するタイプであり，熱を加えることにより架橋反応が高まったためと考えられる。

(3) 熱可塑性樹脂である変性アクリル樹脂を主成分とする構造用接着剤(メタルグリップ)は硬化時に熱を加えることにより著しい引張強度の低下が見られた。原因のひとつは加熱による試験片の軟化変形であると考えられる。軟化変形が始まるのは 80℃であると言われているが，50℃の加熱でも引張強度の低下が確認された。加熱後に硬化させた試験片の中央部に貼付したひずみゲージの測定結果からは大きなひずみが検出されなかった。これは試験片全体の伸びに対して，試験片中央部の伸びが少ないことを意味している。このことから，軟化した場合は試験片全体で伸びていると推測される。

(4) 各構造用接着剤の弾性定数を算出した。これにより，接着構造物の理論解析および有限要素解析において高確度の解析結果を得ることができる。

参考文献

(1) 川脇賢剛，中空軸重ね合わせ接着継手の応力解析と強度評価に関する研究，(1999), pp.18-22.

(2) 日本工業標準調査会，プラスチックの引張試験方法 K7113, (1995), pp.4.

(平成 21 年 9 月 25 日　受理)

歯付き鉄筋締結要素軸の強度解析

黒崎　茂*，深澤正寿**，峯尾一幸***，志村　穣*

Strength Analysis for Reinforced Connecting Shaft with Teeth

Shigeru KUROSAKI, Masatoshi FUKASAWA, Kazuyuki MINEO, Jyo SHIMURA

It was proposed for the authors that the new shape model of fastening part of the reinforcing steel which is used in reinforced concrete. The proposed models have the system that the spline tooth for the fastening part is attached. The purpose of this study is to search the optimum shape of fastening part of this reinforcing steel as the strength analysis and experiment. Next, new improved model was proposed at the fixed angle in respect of the part in which the spline tooth it improves the proposed model, and it increases the strength had been added. As the result, the largest tension stress increased about 50% in comparison with the model on the improved models.

(Keywords: Reinforced Concrete Shaft, Reinforcing Steel Joint of Shaft, Experimental Stress Analysis)

1．緒　論

鉄筋コンクリート中に使われている鉄筋は、生産、運搬などの都合から一定の長さに切断され供給されている．したがって、鉄筋コンクリート構造物の建築現場では、鉄筋の継手が必要となってくる。そのために重ね継手、機械式ボルト締結継手など各種継手形式が設計施工条件に応じて使用されている。特に機械式継手は、施工性の向上が求められており、現場で簡単に締結でき、強度も保証される継ぎ手が望まれている。

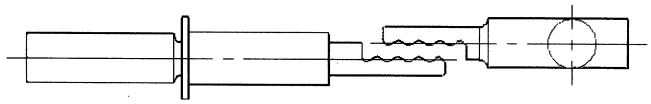
本研究は、簡単に締結できる鉄筋継手としてスプライン形状の歯を有する新たな継手を、筆者等の一人が考案した。新たに考案試作した継手の破断までのプロセスを、応力・ひずみ解析および引張破断試験により明らかにした．これをもとにさらに形状の改良を行い、破断試験により破断強度の改善をした新たな継手形状を提案したので報告する。

本研究で提案した方法は、締結方法の簡易化を最優先に締結部分の形状を考えたものである。従って研究対象部分は、Fig1 に示すスプライン歯の噛合い部分を対象にしている。そのため素材丸棒よりも断面が小さくなり、実際の締結強度は素材丸棒よりも小さくなる。素材丸棒以上の断面積を有した本研究で提案した継手形状を、その次の課題として考えればよい。本報では締結部分の形状のみに着眼して、素材丸棒の強度以上の継ぎ手形状は別報に譲る。

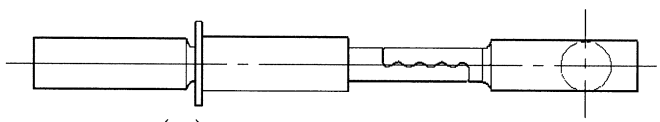
2．歯付き鉄筋締結要素軸（初期提案モデル）

2．1　締結方法

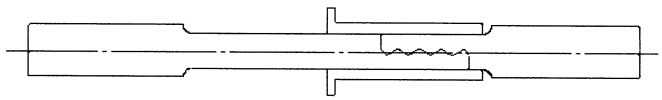
本研究で扱う継手の締結の仕組みを Fig.1 に示す。丸棒部材端に、スプライン形状をした噛み合い歯を加工する。これらの二つの軸要素を製作する。(Fig.1(a)参照)　軸要素に加工した噛み合い歯を



(a) Elements of connecting shaft and socket



(b)　Connecting position



(c)　Cross section of connecting condition

Fig.1 System of Joint for connecting shaft and socket

＊機械工学科　＊＊エリオニクス（株）　＊＊＊（有）アミネックス

重ね合わせ一体化する。(Fig.1(b)参照)　要素軸に挿入してあるソケット（カプラー）を、スライドさせると歯が噛み合い締結する。(Fig.1(C)参照) この締結要素は、締結する際、両軸要素を重ね合わせ、ソケットをスライドさせるだけで簡単に締結できる長所をもっている。

2．2　初期モデル形状

初期モデル（以下、Type1 と称す。）の形状を Fig.2 に示す。試験機取り付け時のためにM14 のねじを、取り付け部分に加工した。噛合わせ歯は、スプライン形状の 4 山を加工した。素材試験片は、SS400 相当材である。継手締結の簡易化を考えた形状が、初期モデルである。継手歯の噛合い部分の締結強度については、28mm 部分に解析を行っている。

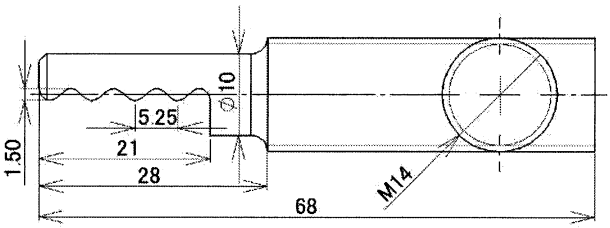


Fig.2　　Prototype model (Type1)

2．3．有限要素解析

2．3．1　解析コードと解析モデルへの負荷

有限要素法 (FEM)(1)解析ソフト ALGOR を用いて解析を行った。なお、解析ソフトの信頼性は梁の引張および曲げ、円孔平板の解析により確認済みである。各モデルを二次元化しスケールを 2 倍、厚さを 3mm として解析した。

複数山の場合、荷重分布が一様ではない。そこで各山のピッチ点の反力より荷重分布を求めた。対となる山に、それぞれ求めた分布荷重をかけて解析を行った。付け根の山から先端の山にかけて第 1～4 山とおくと、半分近い荷重を第 1 山が負担し、第 2、3 山と徐々に荷重は小さくなっていく傾向がある。したがって、解析では対となる第 4 山に最も大きな荷重をかけて行うことになる。

2．3．2　初期モデルの解析結果

解析した Type1 の応力分布を Fig.3 に示す。荷重が一番小さいにもかかわらず、第 1 山の谷底に最大の応力が生じた。次に応力の大きな第 4 山は谷底から離れるとすぐ小さくなっている。中間の第 2、

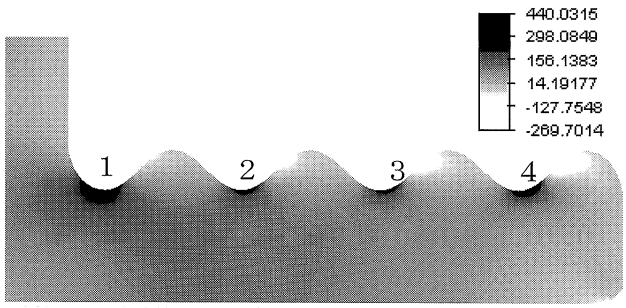
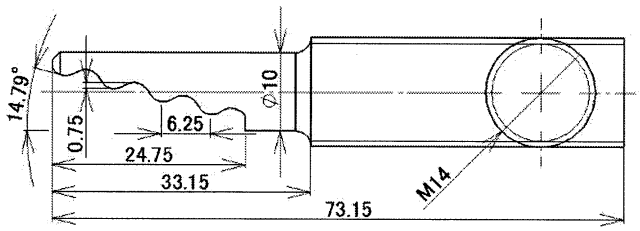


Fig3. Distribution 2 of Stress by F.E.M. (Type1)

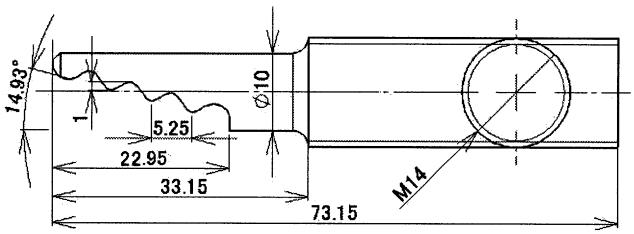
3 山の谷底は、1，2 山の谷底の応力に比較してより低い応力であることがわかった。

3．改良型歯付き鉄筋締結要素軸（改良モデル）

初期モデルと歯形は、同じスプライン加工だが、山の歯のピッチ線を傾けた形状の改良型モデル（以下、Type2 と称す）を、提案した。改良型モデルを Fig.3 に示す。改良型モデルは、2 種類設定した。Ver.2 は Ver.1 と比べ、山の高さ形状およびピッチに変更点がある。



(a) Ver.1



(b) Ver.2

Fig.4　Improved model (Type2)

3．1　最適傾け角度の探索解析

傾斜角度 0～20° まで山のピッチ線の角度を傾けた時の最大応力の解析結果を、Fig.5 に示す。角度 θ =5～10° において最大応力は、第 1 山から第 4 山へと移行し、値は小さくなっている。さらに第 1 山の断面積を大きくするため、第 4 山の応力分布の傾向を考慮し、15° 程度が最適と考えた。最適な角度は、山と山の間隔などにより異なるため、その都度の解析が必要である。

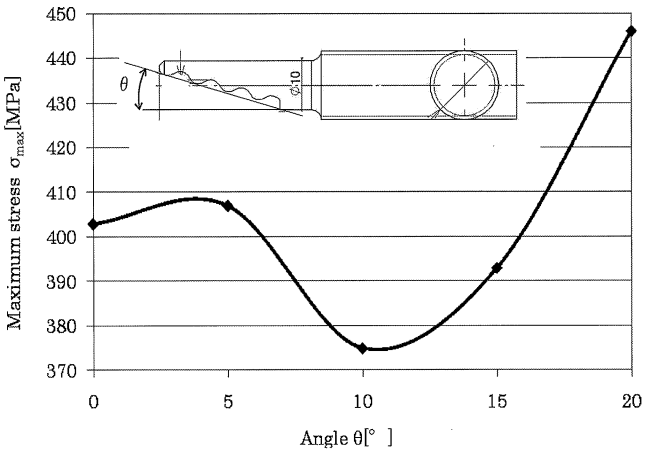


Fig.5　Maximum stress affected slant angle θ for a line of teeth

3．2　改良型モデルの有限要素解析

前項で述べたように、第1山の断面積は最適形状を模索する上で、最も重要な項目の一つである。そこで斜めにスプライン加工し、第1山の断面積を大きくした形状をベースとして、最適形状を模索した。強度を大きく左右する重要な項目として、山の数、山の高さ、山の曲率、山の間隔などが挙げられる。それらを一定にして山を傾け、それぞれの荷重分布を求めて解析を行った。Type2(Ver.1)の F.E.M 解析による応力分布を Fig.6 に示す。最大応力は、第4山の谷底に生じていることがわかる。引張応力は、小さくなったが、圧縮応力は大きくなった。

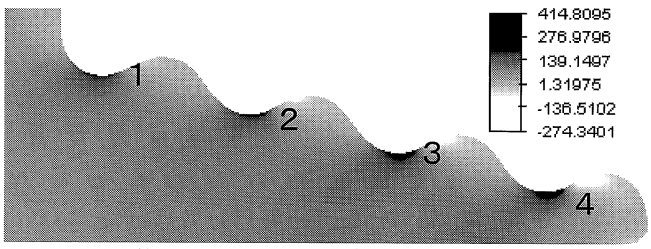


Fig.6　Distribution of Stress by F.E.M.

4．実験方法

4．1　二次元平面モデルの引張試験

応力集中により、実際にどの部分に最大のひずみが生ずるか実験により確認をするために、初期モデル形状の二次元平面モデルを製作した。平板モデルは、噛み合いができる状態にして製作した。平板試験片モデルを Fig.7 に示す。どの谷底が最大ひずみを生ずるか、谷底部分にひずみゲージを貼り付けた。ひずみゲージの貼り付け写真を Fig.8 に示す。ひずみゲージを貼り付けるために Fig.7 に示す特殊なソケットを作製した。ひずみゲージは東京測器研究所製のゲージ長 0.6mm，5 連式ひずみゲージ FBYV-06-11-005LE を切り離し、高さ 7mm のところに貼り付けた。

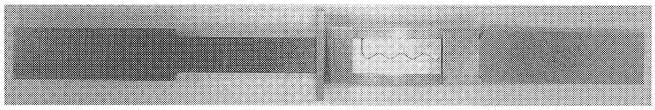


Fig.7　Test specimen of plane model

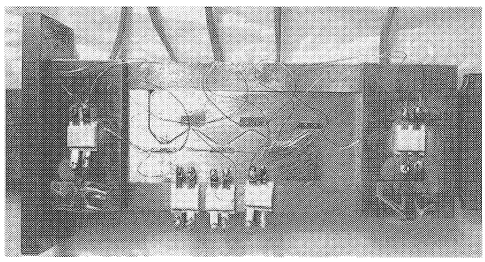


Fig.8　Strain gauges on the test specimen

4．2　初期モデルと改良型モデルの引張破断試験

Fig.2 と Fig.4 に示す初期モデルと改良型モデルの引張破断試験を行った。使用した引張試験機は、(株)鷺宮製作所製・容量 100kN 電気油圧サーボ式疲労試験機(Fig.9)である。継手試験片の伸び量は、試験片取付け治具間の変位を、ダイヤルゲージを用いて計測した。試験は荷重制御により、破断するまで荷重を徐々に上げて行い、同時に伸び量を測定した。使

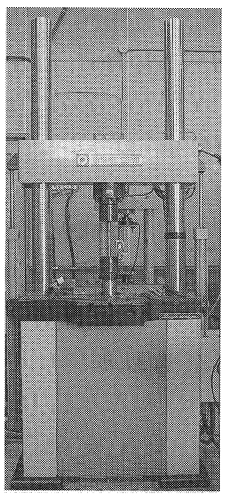


Fig.9 Tensile testing machine(Capacity 100kN)

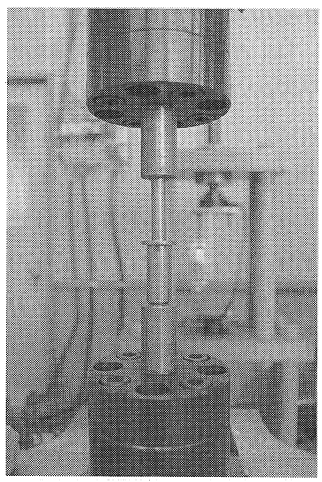


Fig.10 Test specimen attached testing machine

用試験機と試験片取付け写真を Fig.9 と Fig.10 に示す。

5．実験結果および考察

5．1　二次元平面モデルの引張試験結果

実験結果を Fig.11 に示す。ゲージを貼り付けた部分で最大ひずみは、No1 の第 1 山に生じ有限要素法による解析結果と同じ傾向が得られた。また No2,No3 の内側部分の二つのデータは、ひずみの大きさに違いがあるものの有限要素法の解析と同じ傾向を示している。

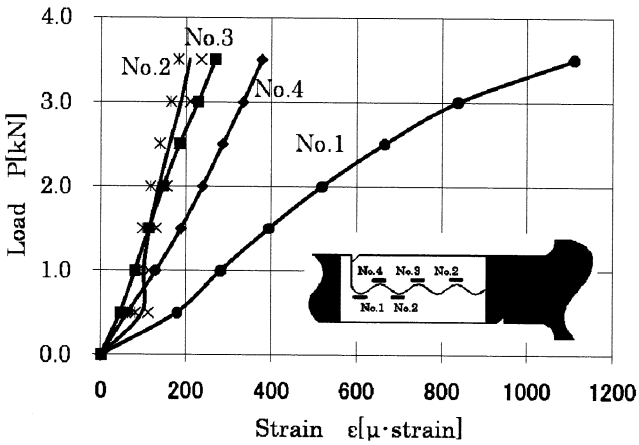


Fig.11　Stress-strain curve of plane

5．2　引張破断試験結果

初期モデルの Type1 の試験結果を、Fig.12 に示す。同時に試験片の破断状態を Fig.13 に示す。引張試験や解析からも予測できたように、第 1 山で破断しているのがわかる。この時の耐力は 180MPa 程度であった。

改良モデル Type2 の 2 種類(Ver1,と Ver2)の応力ひずみ線図を Fig.14 に示す。同時に試験片破断の状態図を Fig.15,16 に示す。Type1 より引張強度は上がり、山が変形して破断しているのがわかる。この時の耐力は 270MPa 程度であった。Type2 では、山の高さの大きい Ver.2 が高い強度となった。

それらすべてを比較した応力-ひずみ線図を Fig.17 に示す。明らかに、歯のピッチ線の傾け角度を付けることにより、強度が向上することがわかった。

破断した時の歯の状態を見ると、各歯の先端部側がつぶれるように破壊しているのがわかる。このことから、歯の形状も今後改良していくことも必要である。

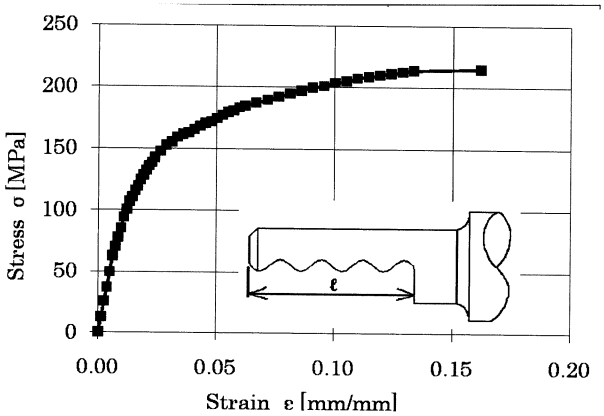


Fig.12　Stress-strain curve (Type1)

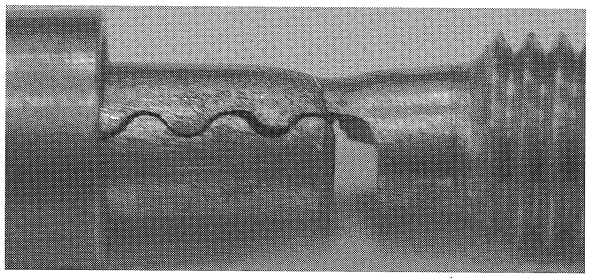


Fig.13　Fracture pattern (Type1)

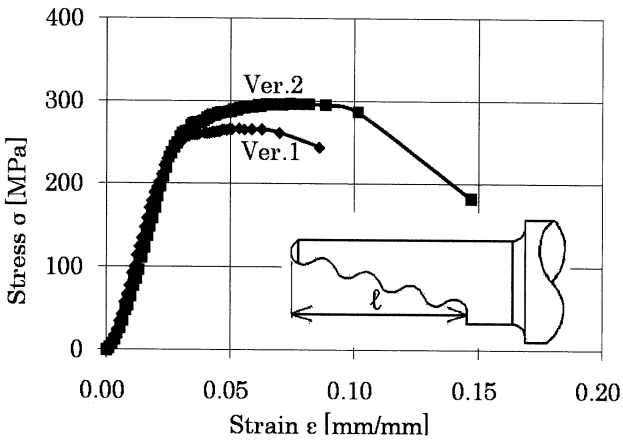


Fig.14　Stress-strain curve (Type2)

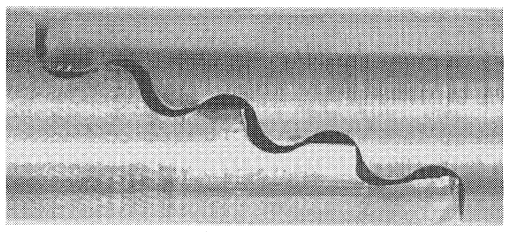


Fig.15 Fracture pattern (Type2.)

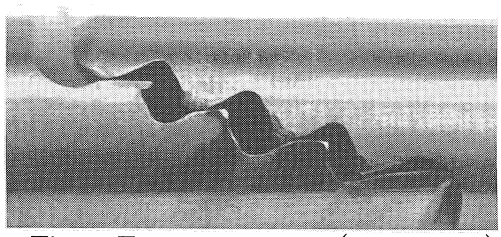


Fig.16 Fracture pattern (Type2.ver2)

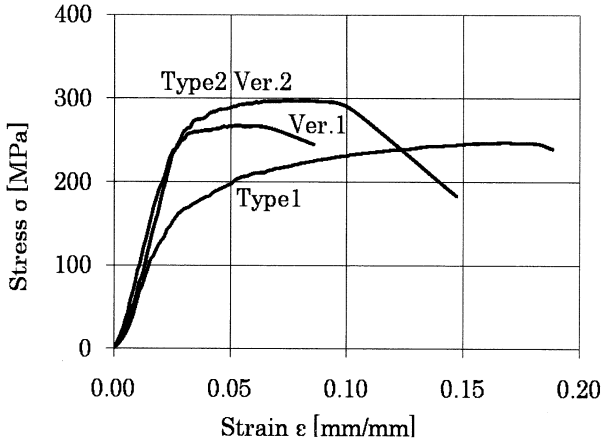


Fig.17.　Stress-strain curve Type1,Type2

6．結　言

鉄筋コンクリート中に挿入する鉄筋について、新たに鉄筋の締結部分に相当する歯付き鉄筋締結要素軸を提案した。

最初に締結部分の歯付き鉄筋締結要素軸の初期モデルを提案した。初期モデルの有限要素解析および引張試験を行った。その結果より、第１山の谷底に最大応力が生じることが明らかになった。

初期モデルを改良して第１山を強化するために山のピッチ線に角度をつけた改良型モデルを考案し提案した。有限要素解析および破断試験の結果、改良型モデルの耐力は初期モデルに比べ、50%の上昇を得ることができた。

改良型モデル２種類では、耐力および引張強さは上昇したが、歯が破壊してしまい耐えられないことが判明した。今後は、歯の大きさおよび歯数等を考え最適形状をさらに考える必要がある。

謝　辞

本研究を実施するにあたり、アミネックス株式会社・峯尾一眞社長および同社生産技術部門の諸氏には試験片製作において多大な支援を承りました。ここに記して御礼申し上げます。

参 考 文 献

1）中原一郎他，弾性学ハンドブック，朝倉書店，pp144-147,(2001)

2）西田正孝，応力集中，森北出版，pp666-741,(1900)

3）高橋賞、河井正安，ひずみ測定入門，大成社，pp41-54,（1993）

（平成21年9月25日　受理）

圧電高分子フィルムを用いた疾患診断用足裏荷重測定具の試作

中村源一郎*，黒崎　茂**

The Developments of the Measuring Tool for the Applied Load to the Sole of Foot Using Piezoelectric Polymer Film

Genichiro NAKAMURA and Shigeru KUROSAKI

The gait disorder caused by the disease of the spinal cord such as congenital brain injuries and accidents etc. was not able to be diagnosed quantitatively. Their diseases can be diagnosed by measuring the load of the back of their feet. In this research, the load of the back of the foot was measured by using the piezoelectric of PVDF film, and the device to diagnose the disease was made for trial purposes.

(Keywords: Piezoelectric polymer film, Load of the sole, Spinal Cord, Sensor of Load)

1. 緒　言

先天性の脳障害、事故等による脳障害や脊髄疾患による歩行障害の診断は医師の判断によるところが多く、リハビリの成果を定量的に示せないため、適切な診断ができない場合がある。[1] これまで、スポーツ用やロボット制御の安定化のための足裏荷重測定は多く行われてきたが、疾患診断用の測定具は開発、市販されてこなかった。そこで本研究では、動作の遅い障害者の歩行にあわせて、足裏荷重の変化を測定できる機器の試作を行った。足裏荷重を検出するセンサとして、本研究では、圧電高分子フィルム・ポリフッ化ビニリデン（以下略称PVDFフィルム)を用いた。圧電高分子フィルムの圧電性を利用することにより、定量的評価ができることに本研究は、着目した。そして測定機器を試作し、その性能評価を試みることを目的とした。

2. 圧電高分子フィルム（PVDF）

本研究で使用した圧電高分子フィルムは、Fig.1に示すように、通常靴底に挿入してある靴中敷きシートに貼り付けた。Fig.1に示すように、10枚の圧電フィルムを設置した。

圧電フィルムは、Fig.1に示すような方向に動的な力を加えると、力の大きさと速度に比例して電圧が生じる。静的負荷の場合、初期状態では動的負荷と同様の電圧出力を得るが、時間の経過とともに電圧降下を起こしてしまう。

圧電高分子フィルムは、圧電性の性質を有することから動的負荷の場合に有効な出力電圧を得ることができる。通常、Fig.2のように全方向において電圧出力を得るが、特に図中2・3の方向に引張り力を加えた場合に大きな電圧出力を得ることが出来る。[2] 本研究では、足でフィルムを踏むので、

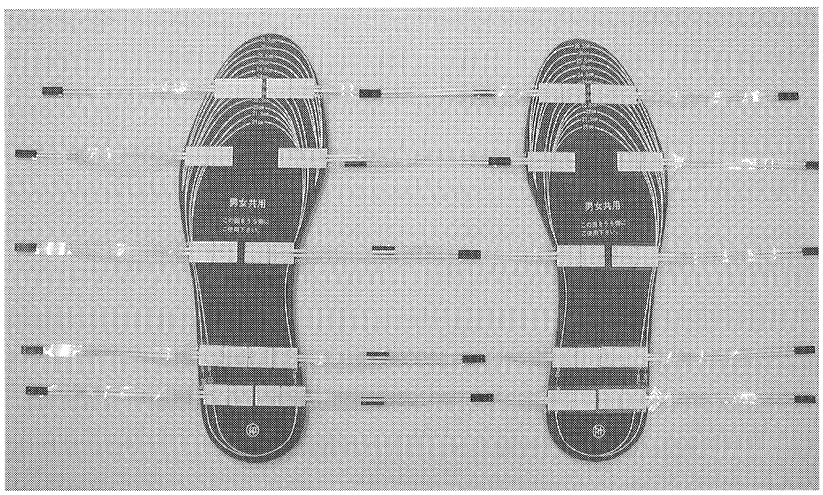


Fig.1 Photography of piezo film putting on foot sheet

＊教育研究技術支援センター　＊＊機械工学科

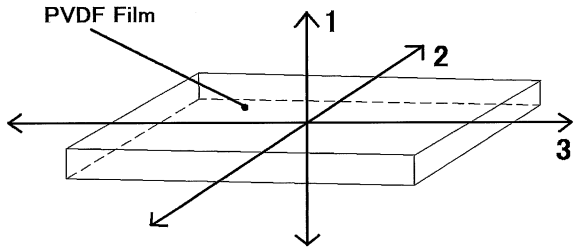


Fig.2 Directionality of PVDF Film

Fig.2 のフィルムの厚さ方向「1」の方向の出力電圧を取り出すことになる。使用した圧電フィルムは、Fig.3 に示す東京センサー製ピエゾフィルム（FLDT1-028K）を使用した。圧電フィルムの厚さは、28μm であり、静電容量は 1.3nF(1)である。[2]

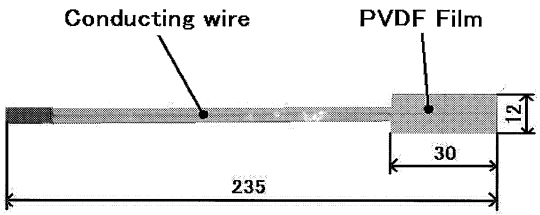


Fig.3 PVDF Film

3．試作足裏荷重測定具

3．1 圧電フィルム取付位置と測定靴

前章に述べた圧電性フィルムの特性を考慮して、本実験では Fig.4 に示すように、サンエッチ株式会社製発泡ゴム製靴中敷きに、圧電フィルムを接着した。接着には、圧電フィルムに塗布されている接着剤を使用した。

靴中敷きの変形にフィルムが追従するように、圧電フィルムを配置した。足裏荷重による靴中敷きの変形によって圧電フィルムに引張・圧縮応力を生じさせるような配置とした。圧電フィルムの貼り付け位置を及びその写真を Fig.1、Fig.4 に示す。

圧電フィルム貼り付け位置は、荷重の集中するつま先、かかとに重点的に配置し、片足あたり 10 箇所とした。

測定靴の靴底は、圧電フィルムが不要な変形を生じないよう平面である必要がある。床面の凹凸の影響を少なくするため靴底は十分に厚い市販製の靴を採用した。

3．2 試作具の電圧測定方法

本研究では圧電フィルムから出力された電圧をデータロガー（グラフテック（株）midi LOGGER GL800）を用いて測定した。本記録装置はバッテリー駆動により動力配線の制約を受けずに歩行実験が可能であり、片足 20ch の電圧出力を同時に記録出来る。

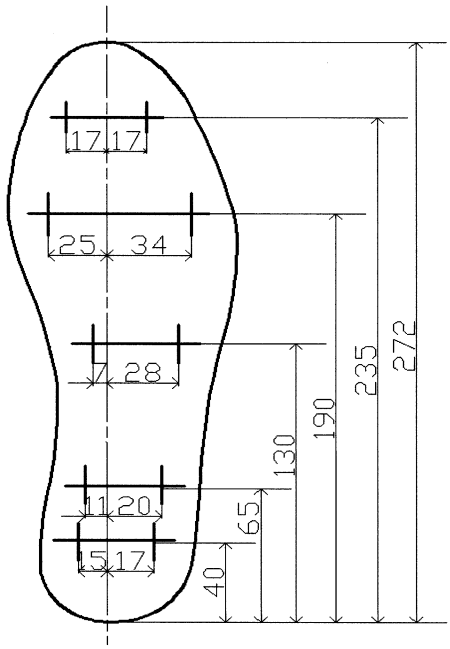


Fig.4 Arrangement chart of film

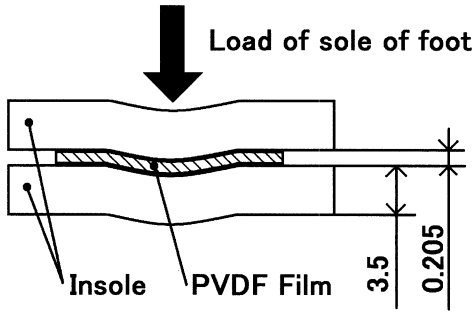


Fig.5 Insole and joint of films

Fig.5 に示すように靴の中敷き間に圧電フィルムを挟み、上からの体重を圧電フィルムが受け止める。そして圧縮力が作用したときに圧電フィルムは、圧縮力に比例した大きさの出力電圧波形を示す。その時の出力電圧を測定する。

3．3 試作具と人間への装着方法

試作した測定具を Fig.6 に示す。上記で説明したように圧電フィルムを貼付けた靴中敷きを挿入した靴と、その信号を処理するデータロガーとからなっている。自由な歩行を可能とするため、データロガーを被験者背面のリュックサックに搭載し、配線はひざ部を経由して圧電フィルムに接続する。（Fig.7 参照）

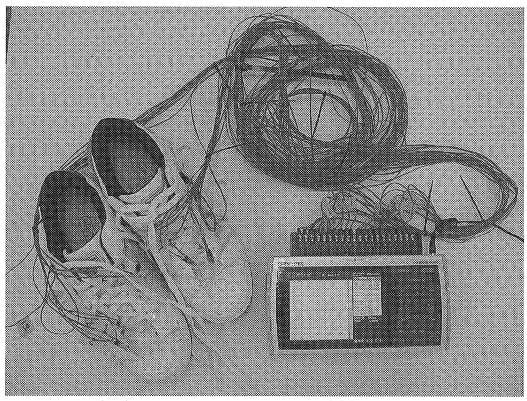


Fig.6 Measuring tool to be developed

4．実験方法

4．1　有視界直進歩行

著者の一人は、Fig.1 に示す圧電フィルムを貼付けた靴を履き、データロガーを装着したリュックサックを背負い、実際に以下の Fig.7 の状態で実験を行った。歩行実験には体育館を使用した。体育館床面の競技用直線に沿って歩行する歩行レーンを設置し歩行距離は 15m とした。

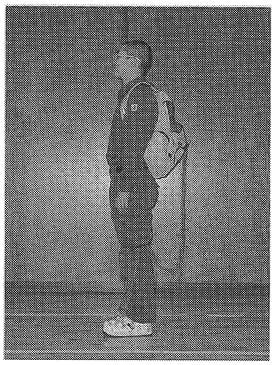
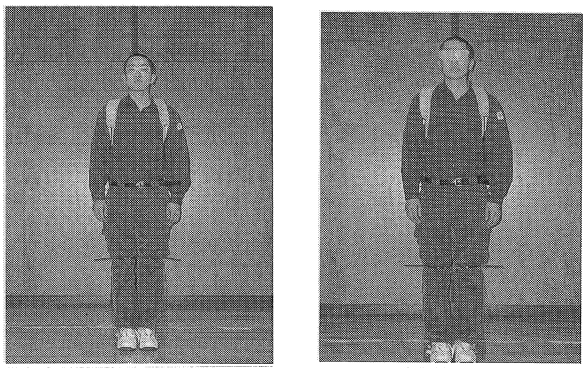


Fig.7　Measuring condition putting on developed tool

4．2アイマスク着用による無視界歩行

通常、疾患による身体的なバランスの崩れがある被験者の場合、視覚情報から直進性を維持するために何らかの補正を加えている。このことから、通常の歩行実験と併せて、アイマスク着用による無視界状態での歩行実験も行った。



(a) visual condition　(b) Non visual condition

Fig.8 Compare of imaginary condition with handicap

5．実験結果および考察

5．1　有視界直進歩行

（1）踏み込みと踏み抜きの電圧出力

被験者 A の有視界歩行実験の 1 ステップあたりの踏込んだ場合と踏抜いた場合の出力電圧結果を Fig.9(時間-電圧のグラフ)に示す。図より、発生電圧は踏み下ろす場合に＋の極性となり、荷重が抜け、変形分が元に戻る場合は－の極性となる。そして＋側の踏込んだ出力電圧が大きくなっているのが特徴である。

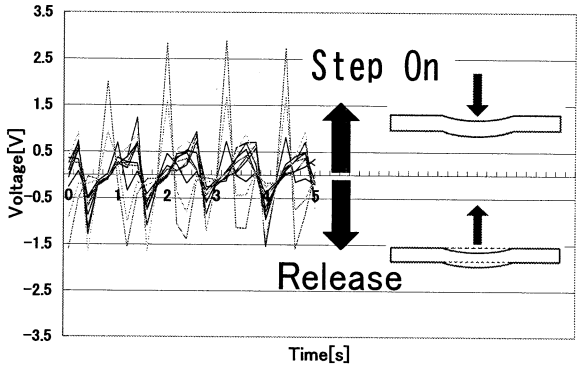
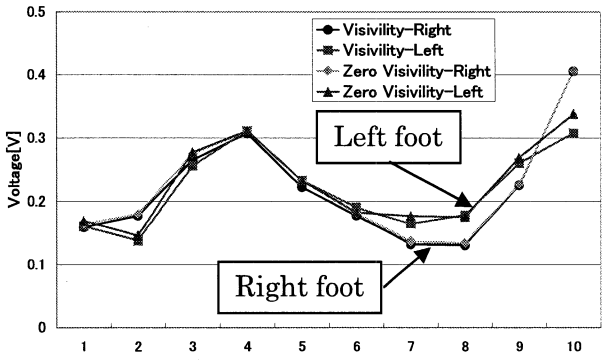


Fig.9 Output voltage of the condition to be step on and release

（2）圧電フィルム設置の足の部位別の電圧変化

疾患により足裏にかかる荷重が偏る場合や、荷重が分散する場合等を考慮して各チャンネル別の電圧の大小を比較したグラフを被験者 A について Fig.10 に示す。



Channel Number of PVDF film

Fig.10 Output Voltages of piezo film

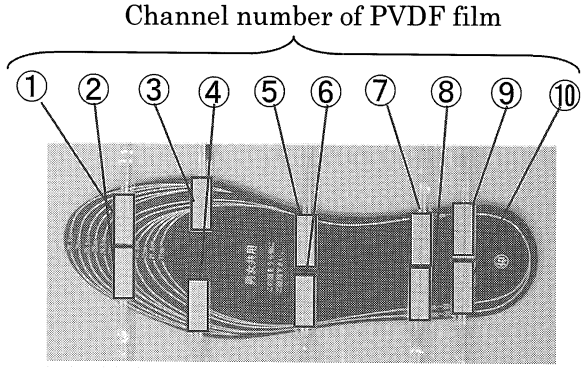


Fig.11 Channel number of the position put on the piezo film

Fig.11 に示すように 10 枚の PVDF フィルムがはりつけてあり、それぞれ①から⑩までのチャンネル番号が付与してある。数字の若い方からつま先、土踏まず、かかとにおける発生電圧を示している。同時に左足と右足の出力電圧を示している。

図より踏み下ろし時の衝撃の大きいかかと部分と、地面を蹴るつま先部分は電圧が高くなっていることが分かる。

（３）足の部位別の電圧発生時刻の差

被験者 A について、(a)かかと付近、（ｂ）土踏まず、(c)つま先付近のチャンネルに着目し、踏み込みを示す＋電圧のみを抽出した。その場合の時間-電圧のグラフを Fig.12 に示す。

足裏が、かかと、土踏まず、つま先の順に踏み下ろされている場合、10 チャンネルから順に 1 チャンネルまで電圧が立ち上がることが予想される。Fig.14(a)～(c)で、この現象が、データから読みとることができた。逆に各チャンネルの時間差が小さい場合、足の裏全面が同時着地していることになる。このような例は、他の被験者で読みとることができた。

５．２ アイマスク着用の有無の違い

被験者 B について、アイマスク着用時と無着用時の右足の時間-電圧のグラフを Fig.13 に示す。

Fig.13 の左側のアイマスク無しに比較して、右側のアイマスク有りの最大出力電圧（9、 10ch）は、凹凸が大きい。これは、目隠しをすることにより、体重のバランスが崩れ、足にかかる荷重のバランスも崩れ、圧電フィルムセンサーがこの状態を検出したものと考えられる。このことから、リハビリ等の回復状況を、正常な状態と比較することにより、定量的な回復状況が把握できると考えられる。

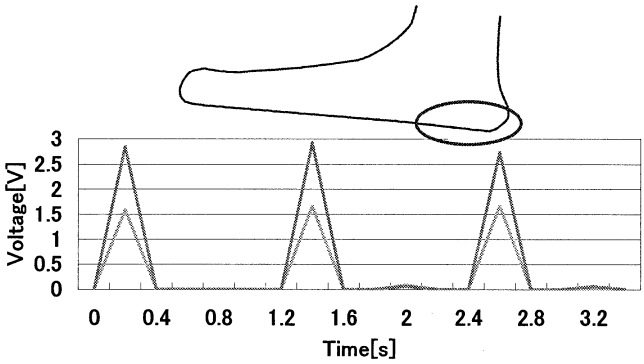
６．結　論

高分子圧電フィルムを利用して、人間が歩行しながら足の裏に作用する荷重を検出できる装置を試作した。試作した開発器を用いて、各種実験を行った。本実験の範囲内で以下の結論が得られた。

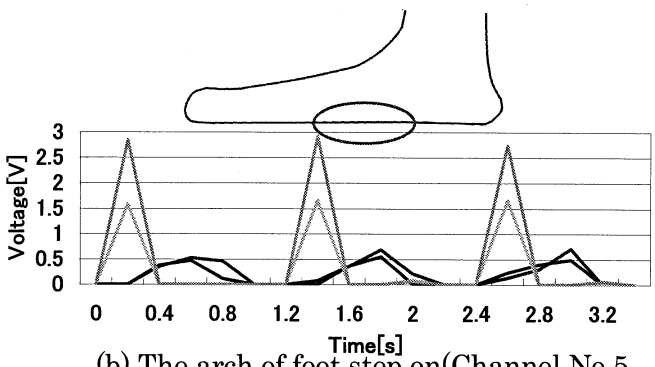
(1) 試作器は、足裏に複数点貼付けた圧電フィルムから出力電圧を読みとり、足の踏み込みと抜き出し状態を、検出することができる。

(2) 歩行時における(a)かかと、(b)土踏まず、(c)つま先の３箇所について、荷重の大小、時間的関係を試作器で測定することが出来た。

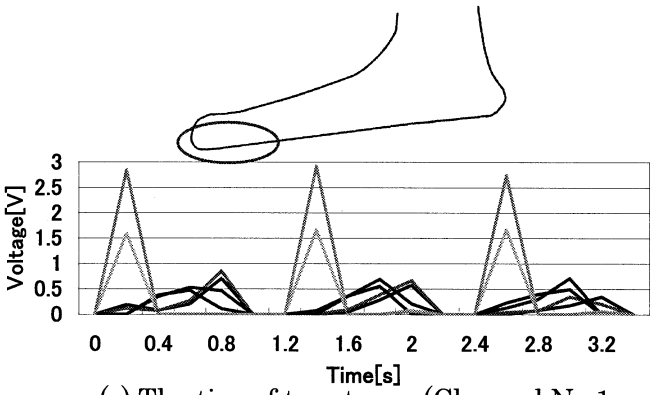
(3) アイマスク着用時と無着用時の差異が、試作器



(a) The heel step on (Channel No.9 and 10)



(b) The arch of foot step on(Channel No.5 and 6) added(No.9and10)



(c) The tips of toe step on(Channel No.1 and 2) added(No.9 ,10, 5, 6)

Fig.12 output voltage v.s time of stepping on the film at three condition of foot step

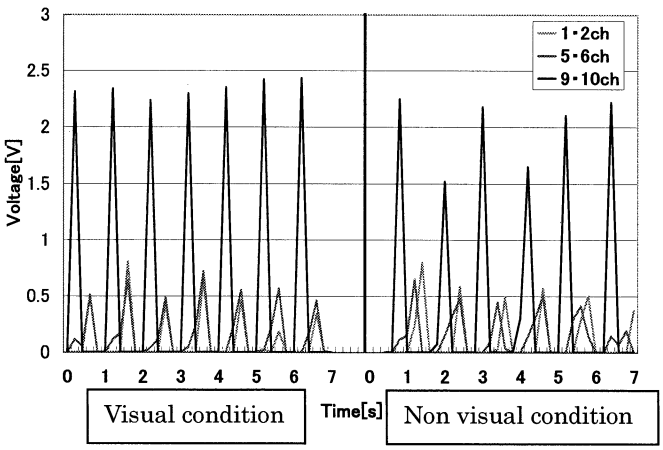


Fig.13 Compare of output voltage between visual and non visual condition

を使うことにより明らかになった。このことは、歩行障害の診察に、本開発した試作器を利用することができる。

今後、測定した電圧を速度、加速度へ変換し、定量的な評価を行う必要がある。特に一例としてのアイマスク着用時と無しの場合の本試作器の適用方法を、さらに他障害に当てはめ、障害の回復度を定量的に計れるよう研究を進める必要がある。

謝　辞

本研究は、平成 19, 20 年度・科研費（代表、中村源一郎 ）援助により行われた。関係各位に記して謝意を表します。

参考文献

(1)岡村英明, 荒井政大, 日本機械学会・M&M2007, 材力部門講演論文集[No.07-3], pp99～100, (2007)

(2)東京センサカタログ：PIEZO FILM product Information, p18,（2001）

（平成 21 年 9 月 25 日　受理）

家庭におけるエネルギー消費の実態調査と地球温暖化対策の検討

土井　淳*，佐藤祐亮**

Investigation of Energy Consumption in Home and Examination of Global Warming Countermeasure

Atsushi DOI and Yusuke SATO

CO_2 emission in the household shall be reduced by 33～36 million ton-CO_2 from 2005 level until 2010 in Japan. The energy consumption for each household differs vastly according to the size of household, the housing category, the dwelling house scale, the variety, number and efficiency of domestic equipments, etc. For this reason, it is difficult to evaluate quantitatively the effect of each global warming countermeasure in the individual household.

This paper discusses how to estimate the energy consumption for each household. The model which simulates the electric power consumption of the individual household is developed. This model can evaluate various kinds of energy saving policies.

(Keywords: electric power consumption, individual household, energy saving policy, global warming)

1．はじめに

地球温暖化とは、人間活動によって発生する温室効果ガスが，大気中の温室効果ガスの濃度を増加させることにより，地球全体の地表および大気の温度が上昇し，それによって自然生態系および人間社会に深刻な影響を及ぼす現象である。実際に異常気象など環境の変化を身近に感じるようになり，国民にも地球温暖化問題に対する意識が芽生え始めている。2005 年 2 月発効の京都議定書では，我が国について温室効果ガスの 6%削減が法的拘束力のある約束として定められている。これを受けて，2005 年 4 月に定められた「京都議定書目標達成計画」において，エネルギー起源 CO_2 については，1990 年度の水準から基準年総排出量比で＋0.6%の水準にすることを目標とした。しかしながら，オフィスや家庭におけるエネルギー消費の増大等を背景に，CO_2 排出量の約 2 割を占める業務その他部門，約 1 割を占める家庭部門からの排出量が大幅に増大し，京都議定書目標達成計画も 2006 年 7 月に一部改定，2008 年 3 月に全面改定が行われた[1]。表 1 に各部門の排出量の実績と目安としての目標を示す。

表1　エネルギー起源二酸化炭素の各部門の排出量〔百万 t-CO_2〕の目安

	基準年（1990 年度）	2005 年度実績	2010 年度の目安	
			排出量	基準年比増減率
産業部門	482	452	424～428	−12.1%～−11.3%
業務その他部門	164	239	208～210	+26.5%～+27.9%
家庭部門	127	174	138～141	+8.5%～+10.9%
運輸部門	217	257	240～243	+10.3%～+11.9%
エネルギー転換部門	68	79	66	+2.3%
合計	1，059	1，201	1，076～1，089	–

環境庁「京都議定書目標達成計画」(平成 20 年 3 月 28 日　全面改定)p.13 による

＊電気工学科　＊＊日陽エンジニアリング株式会社

家庭部門では，2010 年度の排出量の目安が基準年比増減率+8.5～+11.9%に設定されているが，2005 年度実績において既に基準年比+36.4%増に達し，少なくとも 3,300 万 t-CO_2 の削減が必要となっている。家庭部門のエネルギー消費は，一般的に一世帯当たりにより評価されているが，各世帯のエネルギー消費は，世帯人員，住宅形式（戸建てか集合住宅か），住宅規模，使用機器の種類・個数・効率などにより大きく違い，さらに，それらの機器の使われ方も世帯ごとで大きく異なる。このため，個々の対策・施策が，各家庭におけるエネルギー消費および温室効果ガス排出の削減にどのように影響するか定量的に試算することは難しい。

本論文では，各家庭におけるエネルギー消費の実態を把握する方法を明らかにする。そこで作成されたエネルギー消費モデルを用いて，省エネルギー・温室効果化ガス排出削減の対策・施策が，実際に個々の家庭に及ぼす効果を試算する。

2．エネルギー消費の実態調査

家庭におけるエネルギー源は，1975 年頃には灯油，電力，ガスがそれぞれ約 3 分の 1 のシェアであったが，その後，家電機器の普及，大型化・多機能化等により電気のシェアは大幅に増加し，2007 年度の電気のシェアは約 45%に達し，電気が家庭で最も多く，広く使われるエネルギーとなっている[(2)]。このような背景から電気に注目し，その消費の実態を明らかにする。

2.1 家電機器の調査

個々の家庭における電気の消費量（ある期間の消費電力量 W〔kWh〕）は，対象住宅にある家電機器の消費電力 P_i〔kW〕とその使用時間 T_i〔h〕により決まる。

$$W=\sum P_i \cdot T_i \text{〔kWh〕} \quad (1)$$
（$i=1, 2, \cdots, n$:家電機器）

家電機器の調査は，その消費電力を知ることを目的に行うもので，各機器に記載されているメーカー名，品名等，定格消費電力，定格年間消費電力量などを調査し，それらを AV，情報通信，家事・調理，空調，暖房，給湯，照明，その他の 8 つに分類，整理する。

各機器は，必ずしも定格で稼動しているわけではなく，定格消費電力から消費電力量を見積もることができない機器があることに注意が必要である。特に，冷蔵庫は季節による外部気温の変化や設置条件，ドア開閉回数などによって，その消費電力が大きく変化し，ある期間の使用時間からの消費電力量の推定が難しい[(3)]。同様に消費電力量の推定が困難な機器に，

- AV：ビデオデッキ，CATV チューナー
- 情報通信：パソコン及びその周辺機器
- 家事・調理：冷蔵庫，電子レンジ，炊飯器
- 給湯：ガス給湯器

が挙げられ，これらの機器については，機器とコンセントの間に接続する「ワットアワーメーター」によって，その機器の消費電力量を測定し，表 2 に示すような方法で消費電力（量）を推定する。

2.2 使用状況の調査

各機器の使用時間が分かれば，2.1 節で求められた定格消費電力または季節別消費電力から，各機器の消費電力量が算出できる。

ここでは、対象住宅での各機器の使用状況から，(a)季節別，平・土・休日別の 1 日当たりの消費電力量と，(b)季節別の 1 週間当たりの消費電力量を算出したエネルギー消費モデルを作成する。季節の変化により，その消費電力や使用時間が大きく変動する機器があることから，次の 6 つの季節に分ける。

（1）〈春・秋〉　（2）〈春～夏・夏～秋〉
（3）〈夏〉　（4）〈夏休み〉
（5）〈秋～冬・冬～春〉（6）〈冬〉

表2 各機器の消費電力(量)の推定方法

機器	消費電力(量)の推定方法
冷蔵庫	季節別に一ヶ月間の消費電力量測定値を平均
ガス給湯器	季節別に二週間の消費電力量測定値を平均
パソコン	OS を起動させアイドル状態での消費電力量測定値から消費電力を算出
ﾋﾞﾃﾞｵﾃﾞｯｷ CATV ﾁｭｰﾅｰ PC 周辺機器	定格消費電力の記載がないため、消費電力量測定値から消費電力を算出

表3　1週間当たりの季節別消費電力量〔Wh〕を表す機器別エネルギー消費モデル

家電機器	春・秋	春～夏・夏～秋	夏	夏休み	秋～冬・冬～秋	冬
AV(テレビを除く)	2, 906	2, 906	2, 906	2, 906	2, 906	2, 906
テレビ	5, 248	5, 248	5, 248	5, 888	5, 248	5, 248
情報通信(パソコンを除く)	6, 342	6, 342	6, 342	7, 182	6, 342	6, 342
パソコン	3, 424	3, 424	3, 424	3, 760	3, 424	3, 424
家事・調理(冷蔵庫を除く)	10, 929	10, 929	10, 929	9, 616	10, 929	12, 118
冷蔵庫	17, 500	21, 000	24, 500	28, 000	14, 000	11, 900
空調	1, 820	1, 820	4, 887	7, 437	1, 820	13, 020
暖房	0	0	0	0	0	20, 258
給湯	1, 190	1, 050	910	910	1, 260	1, 400
照明	9, 655	9, 424	8, 479	8, 481	10, 295	10, 981
その他	705	705	705	705	705	705
合計	59, 719	62, 848	68, 330	74, 885	56, 929	88, 302

各機器の使用時間の推定は，NHK の生活時間調査[4]や対象住宅の継続的観察を基に推定している。また，一回の使用時間が一定と見なされる洗濯機や炊飯器等の一部機器は，使用時間の推定は行わず，一回の使用時における消費電力量を測定し，1 週間の使用回数から，1 週間単位の消費電力量が算出できる。

各機器について1週間当たりの季節別消費電力量の算出結果を表 3 に示す。

2.3　電力消費モデルの検証

各機器について，月別消費電力量 $W_{Mi}(m)$（m＝4～12，1～3 月）〔kWh〕は，次の（2）式により算出できる。右辺の第 1 項は，各月について 1 週間を単位とした季節の組み合わせにより決定される消費電力量を表している。対象住宅の住居地における月別の季節割り当て係数 $k_s(m)$ を表 4 に示す。右辺の第 2 項は，各月について 4 週間 28 日を越える日数を，1 日当たりの季節別消費電力量により補正した消費電力量を表している。

$$W_{Mi}(m) = \sum_{s=1}^{6} k_s(m) \cdot W_{Wis} + \sigma(W_{Dis}) \text{〔kWh〕} \quad (2)$$

（$i=1, 2, \cdots, n$:家電機器）

W_{Wis}：各機器の 1 週間当たりの季節別消費電力量〔kW〕

W_{Dis}：各機器の 1 日当たりの季節別消費電力量〔kW〕

表4　月別の季節割り当て係数

月	季節別の1週間単位の電力消費モデル					
	春・秋	春～夏 夏～秋	夏	夏休み	秋～冬 冬～春	冬
4	3週	1週				
5		4週				
6		2週	2週			
7			2週	2週		
8				4週		
9		2週	2週			
10	2週	2週				
11	2週				2週	
12					1週	3週
1						4週
2						4週
3	2週				1週	1週

（1）　**検証事例 1：2008 年 8 月**

対象住宅の 2008 年 8 月分の「電気使用量のお知らせ」によると，

・ 期　間：7 月 17 日～8 月 19 日（34 日間）
・ 使用量：351kWh

であった。この期間における季節を「夏休み」として，表 3 より W_{Wis}＝74.885kWh, k_s＝5 とする。

表5 省エネルギー対策適用と対象住宅における年間消費電力量〔kWh〕の変化

家電機器	対策前 消費電力量	トップランナー導入 削減電力量	トップランナー導入 消費電力量	待機電力削減 削減電力量	使用時間削減 削減電力量	対策後 消費電力量
	A	B	C=A−B	D	E	C−D−E
AV(テレビを除く)	151.1	−	151.1	97.7	13.9	39.5
テレビ	274.9	83.8	191.1	−	32.5	158.6
情報通信(パソコンを除く)	335.8	76.1	259.7	169.3	−	90.4
パソコン	178.6	120.8	57.8	−	10.5	47.3
家事・調理(冷蔵庫を除く)	574.6	239.9	334.7	−	−	334.7
冷蔵庫	981.7	536.9	444.8	−	−	444.8
空調	295.2	96.7	198.5	26.3	−	172.2
暖房	259.0	−	259.0	−	26.9	232.1
給湯	59.7	−	59.7	16.6	−	43.1
照明	504.5	59.8	444.7	−	1.3	443.4
その他	36.6	−	36.4	−	−	36.6
合計	3, 651.7	1, 214.0	2, 437.5	309.9	85.1	2, 042.7

また，W_{Dis}＝10.466kWh（平日）(，11.278（休日））であることから，(2) 式よりこの期間の消費電力量は次式から算出される。

$$W_M = 5 \times 74.885 - 10.466 = 364 \text{〔kWh〕}$$

これと実際の使用量と比較すると，誤差率 3.70%となる。

(2) 検証事例 2：2007 年度

対象住宅の 2007 年度 1 年間の消費電力量は，各月の「電気使用量のお知らせ」を合計すると約 3900kWh であった。次の (3) 式から，各機器について 1 年間の消費電力量 W_{Yi}〔kWh〕が算出される。その結果を表 5 の「対策前 (A)」の項に示す。表 5 より年間消費電力量 W_Y＝3652kWh となり，実際の使用量と比較すると，誤差率 6.36%となる。

$$W_{Yi} = \sum_{m=4\text{月}}^{3\text{月}} W_{Mi}(m) \text{〔kWh〕} \qquad (3)$$

（$i=1, 2, \cdots, n$:家電機器）

3．地球温暖化対策の検討

地球温暖化対策の検討に当たり，現在の生活水準を維持しつつ，消費電力量を減らす（省エネルギー）にはどうするかが重要である。省エネルギーへ向けての家庭部門における技術的・社会的対策が分類・整理されたもの[5]を表 6 に示す。「省電力家電」については，1999 年 4 月に施行された「改正省エネ法」に導入されたトップランナー方式により，家庭で使用される家電機器を対象にした対策が講じられている。「省エネ行動」とは，照明やテレビなどのスイッチはこまめに切る，長時間使用しない機器はコンセントを抜いておく，エアコンの設定温度を適正にするなど，エネルギー消費の無駄を少なくすることにつながる消費者の行動を指している。

本章では，対象住宅の省エネルギーに向けて，下記の対策の効果について検討する。

(1) トップランナー製品への買い替え
(2) 待機電力の削減（省エネ行動）
(3) 使用時間の短縮

表6 家庭部門における省エネルギー対策[5]

分類	省エネルギー対策
個別技術	個別機器の高効率化 ・ インバータエアコン，高周波点灯 ・ 省電力家電 ・ 待機時消費電力削減
社会システム	ライフスタイルの転換 ・ 省エネ行動 ・ 環境家計簿（自己評価システム）

3.1　トップランナー製品への買い替え

トップランナー基準が設けられた 21 の特定機器から，エアコン，電気冷蔵庫，ジャー炊飯器，電子レンジ，蛍光灯器具，テレビジョン受信機，電子計算機の 7 品目について，対象住宅において買い替えが行われた場合を想定し，その効果を試算する。

トップランナー製品への買い替え機種は，現在使用中の機器と同等性能で，年間消費電力量や定格消費電力の小さいものを，省エネ性能カタログ[6]から選択する。

トップランナー製品への買い替えにより，1 年間の削減電力量を表 5 の（B）項に，買い替え後の消費電力量を（C）項に示す。この結果，約 2／3 までに削減することができる。

（1）　最も多く電力量を削減できる機器は冷蔵庫で，全体の削減量の約 45%を占める。

（2）　対象住宅ではエアコンをあまり使用しないため削減量は少ないが，一般家庭においては買い替え効果が大きい機器の 1 つである。

（3）　ジャー炊飯器，テレビ，パソコンも買え替え効果が大きい。電子レンジについて，レンジ使用時の消費電力量は現在所有しているもののほうが少ないが，待機電力が 5.2W から 0 に削減されることから，買い替えの効果が得られる。以上の機器の買え替えによる削減は，全体の削減量の約 40%を占める。

（4）　照明は白熱電球を蛍光灯に替えることで消費電力の削減ができるが、白熱電球が設置されている場所は、蛍光灯が設置されている場所に比べると使用頻度が低く，使用時間も短いため、削減量は少ない。

3.2　待機電力の削減

省エネルギーセンター発行の省エネ性能カタログ[6]の調査や待機時における消費電力の測定により，待機電力の大きい AV（ビデオデッキ，CATV チューナー），情報通信（ルーター，プリンタ），空調（エアコン），給湯（ガス給湯器）の機器について，機器を使用しない時間帯（例えば夜間など）は主電電源を切る（またはプラグをコンセントから抜く）といった省エネ行動が行われた場合を想定し，その効果を試算する。

省エネ行動により，1 年間に削減できる待機電力量を試算した結果を，表 5 の（D）項に示す。夜間に主電源を切るなど省エネ行動を行いやすい機器を対象にした結果，現在の消費電力量の 8.5%の削減が期待できる。

3.3　使用時間の短縮

必要もないのに使用していることがある次の機器の使用時間を 1 時間短縮することを想定し，その効果を試算する。テレビの「ながら」視聴について，「国民全体の 1 日のテレビ視聴時間うち，3 分の 1 強が「ながら」視聴である」[4]との報告により想定している。

- AV（CATV チューナー）・テレビ：「ながら」視聴
- パソコン：つけっぱなし
- 暖房（石油ストーブ，電気カーペット）：つけっぱなし

この試算結果を，表 5 の（E）項に示す。現在の消費電力量の 2.3%の削減が期待できる。

4．考察

本論文では，対象住宅における電気エネルギーの消費実態の詳細を明らかにし，省エネ対策の効果を試算し，約 45%の電力消費量削減が達成できる可能性を示した。表 1 に示すエネルギー起源 CO_2 の排出量の削減目標は，2005 年度実績から約 20%の削減となることから，トップランナー製品への買い替え等により，対象住宅における電気エネルギー消費量に見合う十分な削減が達成可能であることが分かった。以下では，もう少し詳細な考察を行う。

（1）　他人から供給された電気の使用に伴う二酸化炭素の排出係数 0.555kg-CO_2/kWh[7]から，トップランナー製品への買い替えにより，対象住宅では，年間 673.8kg- CO_2 の排出量を削減できる。その他の対策を合算すると 893.0 kg- CO_2 の削減となる。

（2）　家庭部門の年間の排出量削減目標は，表 1 より，2005 年度実績から 33～36 百万 t- CO_2 の削減となる。2005 年度の 1 世帯・1 ヶ月当たりの電力消費量 304.7kWh[9]（9 電力会社平均）より年間 3656.4kWh となり，対象住宅の消費電力量がほぼ同量であること，同年世帯総数 49 百万世帯[8]より 1 世帯当たり平均 673.5～734.7 kg- CO_2 が排出量削減目標となることから，対象住宅においては，消

費電力量の削減のみで，この目標を達成できることが分かる。

(3) 2005年の1世帯当たり平均人員は2.55人であり[8]，対象住宅の世帯人員は5人であることから，電気以外の石油，ガスの消費量を削減し，更なる排出量削減に努める必要があるともいえる。しかしながら，対象住宅ではエアコンは冬以外に使用しないなど各世帯によりライフスタイルが大きく異なることから，各世帯の削減量は，世帯人員ではなくエネルギー消費量によって評価すべきと考える。

(4) 対象住宅におけるAV（テレビを含む）と情報通信（パソコンを含む）の電力消費量は，年間940.4kWhで全体の約25%を占め，冷蔵庫に匹敵する量となっている。この消費電力量は，テレビやパソコンなどのトップランナー製品への買い替えにより280.7kWh（約30%），待機電力の削減により323.9kWh（約35%）の削減が期待でき，この結果は家族の省エネ行動の効果的な対象を明示している。

参考文献

(1) 環境省，"京都議定書目標達成計画"，http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=9547，2008.3

(2) 経済産業省，“エネルギー白書2009年版”，http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/2009/index.htm，2009.5，p.107

(3) 日本工業標準調査会，"冷蔵庫消費電力量変更について"，http://www.jisc.go.jp/jisc/data/soukai/soukai_11/sokai_11-sankou1.pdf，2006.5

(4) NHK放送文化研究所，"2005年国民生活時　間調査報告書"，http://www.nhk.or.jp/bunken/research/life/life_20060210.pdf，2006.2

(5) 濱川圭弘ら，"エネルギー環境学"，オーム社，2001.9，pp.67～88

(6) 省エネルギーセンター，"省エネ性能カタログ2008年冬版"，http://www.eccj.or.jp/catalog/2008w-h/index.html，2008.12

(7) 環境省，"地球温暖化対策の推進に関する法律施行令で定める排出係数一覧"，http://www.env.go.jp/earth/ondanka/santei_keisuu/keisuu.pdf，2006.3

(8) 総務省，"日本の統計 2-14 都道府県，世帯の種類別世帯数と世帯人員"，http://www.stat.go.jp/data/nihon/zuhyou/n0201400.xls，2009

(9) 電気事業連合会，"「原子力・エネルギー」図面集 1－25 一世帯当たりの電力消費の推移"，http://www.fepc.or.jp/present/jigyou/japan/sw_index_04/index.html，2006.2，p.33

（平成21年8月20日　受理）

白色干渉分光フーリエ変換を使用した膜厚測定

山内峯生*，伊藤　浩**，大貫繁雄**

Thin Film Thickness Measurement by Fourier Transform White-Light Interference Spectroscope

Mineo YAMAUCHI, Hiroshi ITO, Shigeo OHNUKI

The white light interference spectroscope is an instrument that measures interference strength of the reflected light from surface of thin film and the reflected light from boundary of the thin film and substrate. This interference data have information of film thickness and refractive index. We have developed a software that calculates the film thickness from the interference data. This software uses Fourier transform technology and has features such as high speed re-sampling, high-resolution thickness calculation, and refractive index calibration.

(Keywords: thin film, film thickness, interference spectroscope, Fourier Transform, FFT, re-sampling)

1.　はじめに

白色干渉分光計は、透明薄膜に白色光を当てて薄膜表面からの反射光と薄膜・基板の境界からの反射光との干渉強度を測定する分光計である。図１に白色干渉分光データの一例を示す。

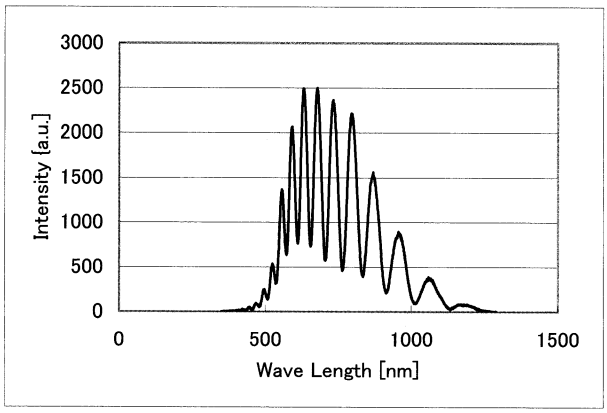


図１　白色干渉分光データの一例

干渉分光データの横軸は波長、縦軸は干渉強度である。この干渉分光データは周期が漸増する振動波形になっている。振動波形の周期は薄膜の屈折率 n と膜厚 d の積である光学膜厚 nd で決まる。光学膜厚が大きいと山の数は多くなり光学膜厚が小さいと山の数は少なくなる。この干渉分光データを解析することにより薄膜の光学膜厚を算出することができる。薄膜の屈折率が分かっているとき、光学膜厚を屈折率で割り算することにより膜厚を算出できる。干渉分光データを解析して膜厚を算出する理論と技術については教科書[1]-[3]や公開特許公報 [4]-[8] に記述されている。また膜厚を測定する製品 [9]-[12] も市販されている。

しかし教科書では最新技術であるフーリエ変換法を使用した膜厚測定法については詳しく記述されていない。特許公報では多層膜の測定法、屈折率が波長で変化するときの測定法などに対する提案が多くフーリエ変換法の基礎的な部分の記述が省略されている。市販製品のカタログでは使用されている技術の詳細内容は公表されていない。

今回、オーシャンオプテックス[13]社製白色干渉分光計のデータを用い、フーリエ変換を使用して薄膜の膜厚を算出するソフトウエアを新たに作成した。この報告は膜厚測定の調査結果とソフトウエアの内容及び作成過程で分かった問題点とその対策を整理し、まとめたものである。

2．白色干渉分光計データからの膜厚の算出

図１の白色干渉分光データを解析して膜厚を算出する方法には、山谷法、カーブフィッテイング法、フーリエ変換法の３種類がある。

＊元東京工業高等専門学校　＊＊電気工学科

２．１　山谷法

教科書[1]-[3]に記述されている方法である。干渉分光データの山（極大）の位置の波長、谷（極小）の位置の波長を読み取り、演算で膜厚を算出する。極大での波長を λ_{2m}、隣りの極小での波長を λ_{2m+1}、屈折率を n、膜厚を d とする。光学膜厚 nd は、次式で与えられる。

$$nd = \frac{\lambda_{2m} \cdot \lambda_{2m+1}}{4(\lambda_{2m} - \lambda_{2m+1})}$$

膜厚 d を求めるには、屈折率 n の値を別途測定し、これで割り算する必要がある。

膜膜の屈折率 n が 1.5 であるとき、図１の干渉分光データから山谷法で膜厚を算出した結果を表１に示す。

表１　山谷法での膜厚算出

極値波長 [nm]	光学膜厚 nd [nm]	膜厚 d [nm]
(谷) 535.66	3581	2387
(山) 556.47	4999	3333
(谷) 572.4	4509	3006
(山) 591.16	4820	3213
(谷) 609.86	4383	2922
(山) 631.84	4526	3017
(谷) 654.69	4597	3065
(山) 678.86	4381	2920
(谷) 706.22	4917	3278
(山) 732.52	4534	3023
(谷) 763.35	3973	2648
(山) 801.87	5254	3503
(谷) 833.68	5071	3381
(山) 869.41	4459	2973
(谷) 913.96	5263	3509
(山) 955.44	4202	2802
(谷) 1013.02	5892	3928
(山) 1058.52	3934	2623
(谷) 1134.85		
平均値	4689	3126
標準偏差	504	336

山谷法では波長ごとの膜厚のバラツキが大きい。山と谷の波長位置を正確に読み取っても分解能を向上させることは困難である。

２．２　カーブフィッテイング法

薄膜の屈折率、膜厚、反射率などの光学パラメータを与えると、干渉分光データの理論曲線を導くことができる。カーブフィッテング法は、光学パラメータを変化させて、理論曲線と測定曲線とが一致するような光学パラメータの値を求める方法である。図１の干渉分光データで山と谷の数が少ないとき、すなわち膜厚が小さいときに使用される方法である。

２．３　フーリエ変換法

図１の干渉分光データをフーリエ変換し、解析して膜厚を算出する方法である。最初に図１の横軸を波長とした波長空間データを、横軸を波数とした波数空間データに変換する。このとき波数 k と波長 λ は $k = 2\pi / \lambda$ の関係にある。次にこのデータを等間隔な波数で再標本化する。再標本化されたデータをフーリエ変換してパワースペクトルを求める。このパワースペクトルのピーク位置を検出する。このピーク位置が膜厚に対応している。

図１の干渉分光データからフーリエ変換法で膜厚を算出したときの例を図２に示す。

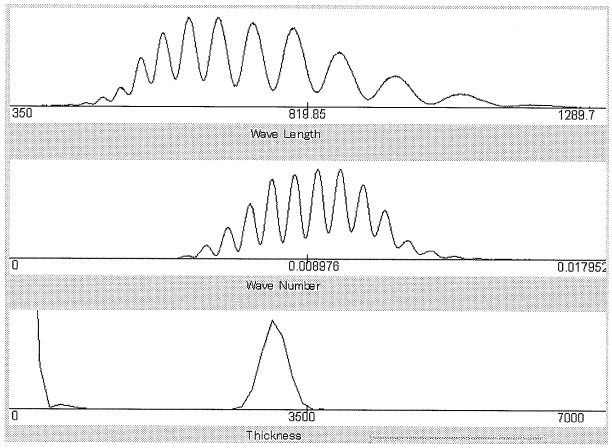


図２　フーリエ変換法での膜厚算出

図２の上段グラフは入力干渉分光データであり、図１と同じ内容である。中段グラフは横軸を等間隔な波数で再標本化した波数空間データである。下段グラフは中段の波数空間データをフーリエ変換したパワースペクトルである。この信号のピーク位置が膜厚に対応している。ピーク位置を求めると膜厚 3033nm が得られる。

3．　フーリエ変換膜厚算出法での改良

フーリエ変換法をソフトウエアに実装する過程で見つかった問題点とその対策について述べる。

3．1　高速再標本化

再標本化は、横軸が波長である図１のデータを横軸が波数であるデータに変換し、更にこのデータを等間隔な波数で標本化することである。これまでの再標本化は、測定点データから補間曲線を導きこれを等間隔な波数点で標本化する方式であった。最も簡単な１次式で補間するときでも演算時間がかかっていた。

今回補間を経由しないで直接に再標本化データを得る方式を導入した。この方式では、最初に全再標本化点のデータをゼロとする。次に再標本化点と測定点を同時に走査する。再標本化点に公差以内で一致する測定点があるとき（公差は再標本化点の間隔の１/２）、そのときの測定点データを再標本化点のデータとする。一致する測定点が無いとき再標本化点データはそのままのゼロとする。得られる再標本化データは測定データとゼロとが混在したデータになる。再標本化点の数が多いとき（再標本化点の間隔が小さいとき）、測定データの殆どが再標本化データに取り込まれる。この結果、測定データの情報は失われないで再標本化データに移行される。この方式はデータを一回走査するだけで再標本化データが得られるため高速である。

3．2　高分解能化

フーリエ変換として離散フーリエ変換を使用し、その演算には高速フーリエ変換（FFT）を使用する。離散フーリエ変換で算出される光学膜厚分解能は、パワースペクトルの周波数分解能に等しく、また使用される干渉分光データの最小波長の１/２であること、が理論で示されている。図１の干渉分光データの場合、最小波長が 350nm であるから算出光学膜厚分解能は 175nm である。膜厚分解能は光学膜厚分解能を屈折率 1.5 で割り算した値 117 nm になる。この分解能はまだ粗い値である。

今回、分解能を向上させる手法として、実測データ以外に分解能を向上させるための最小波長データを一点だけ追加する、という手法を導入した。追加するデータは実測データではなく干渉強度がゼロである仮想データである。この手法を導入することにより分解能は追加点データ波長の１/２にまで改善できるようになった。この手法は参考文献[14]で紹介されているように、実測データの後ろにゼロを追加することによって周波数分解能を向上する方法(ゼロパデング法)と同等である。

ゼロを元データの間に挿入しても分解能は向上せず、ゼロを波長の小さい方（波数の大きい方）に挿入することで分解能が向上する。このことを図３と図４で説明する。図３は最小波長を 350nm と一定にした状態で再標本化点数を 4096、32768、1048576 と変化させたときのパワースペクトルの変化を示す。全てのスペクトルの形状は同じであり、膜厚も全て同一で 3033 nm であった。すなわち再標本化点数を大きくしても分解能の向上は無い。再標本化点数を大きくすることはサンプリング周波数を大きくすることでありエイリアジングを防止する効果がある。

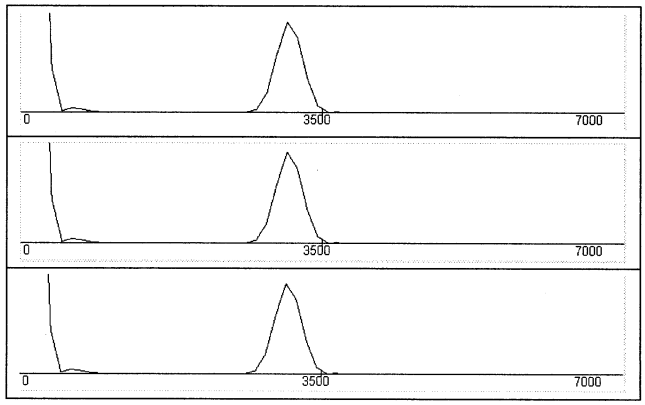


図３再標本化点数変化でのパワースペクトル

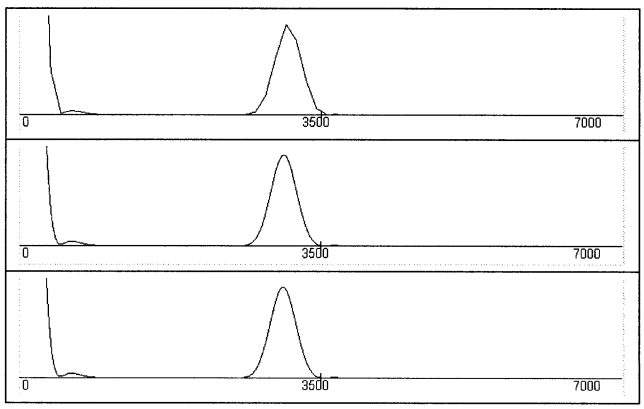


図４　最小波長点変化でのパワースペクトル

図４は再標本化点数を 1048576 と一定にした状態で、最小波長点の波長を、350、50、2 nm と小さい方に変化させたときのパワースペクトルの変化を示す。

最小波長点の波長が小さくなると理論上分解能は向上する。膜厚は、3033、 3050、 3054 nm と次第に高分解能な値になった。ピーク形状も滑らかな形状に変った。このピーク形状が滑らかになったのは、ゼロパデイング部分が大部分を占めるようになり、信号部分が小さくなったことによる。すなわち信号部分が窓関数で制約され、フーリエ解析対象の信号がデルタ関数に近づいたことによる。

３．３　再標本化点数の自動設定

最小波長点を追加すると最大波数が大きくなる。再標本化点数が同じままであると、波数間隔が大きくなり、信号最大周波数の２倍以上の周波数で標本化しなければならない、という標本化定理条件を満たさなくなりエイリアジングが発生するようになる。最小波長点を追加したときは標本化定理条件を満たすように再標本化点数を最適な値に自動設定するようにした。

３．４　屈折率算出機能

白色干渉分光計の光学膜圧のデータから膜厚を算出するためには正確な屈折率の値が必要である。また、逆に５章のソフトウエアの紹介で述べるように、膜厚が分かっている薄膜（標準薄膜）を使用して薄膜の屈折率を算出することができる。

４．フーリエ変換膜厚測定ソフトウエアの紹介

この４章では屈折率が分かっているときの膜厚測定について述べる。また、次の５章では膜厚が分かっているときの屈折率測定について述べる。

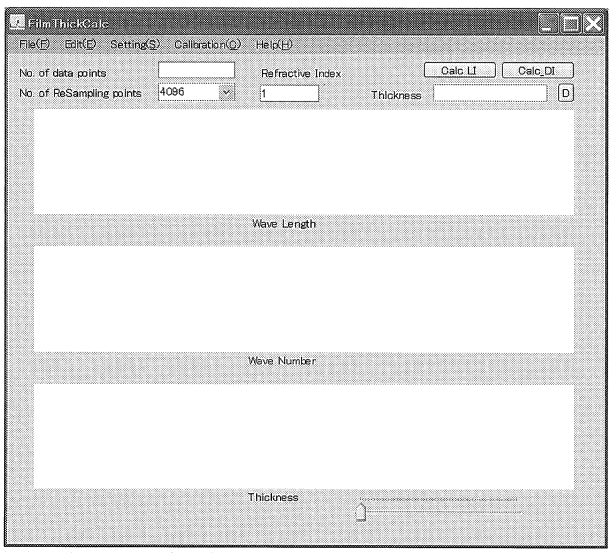


図５　膜圧測定ソフトの主画面

４．１　主画面

ソフトウエアを起動すると図５の主画面が表示される。

４．２　干渉分光データ読み込み

ファイルメニューからオーシャンオプテックス分光計からの干渉分光データを読み込む。図６に読み込み終了画面を示す。上段グラフに干渉分光データが表示される。読み込む干渉分光データファイルのフォーマットは４．５節で述べる。

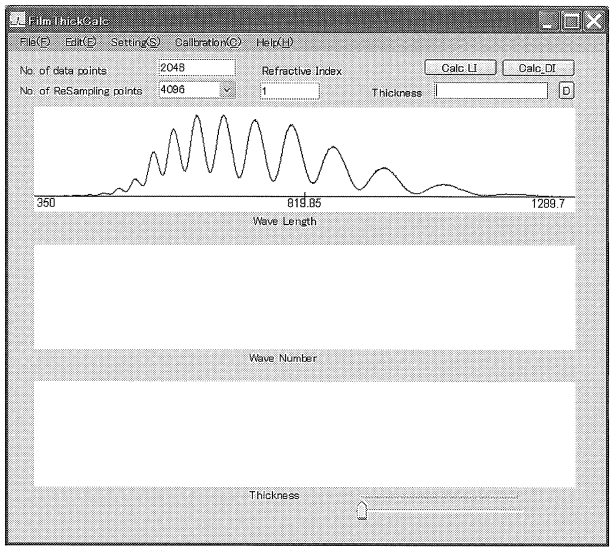


図６　データ読み込み終了画面

４．３　計算

再標本化点数と薄膜の屈折率（今回 1.5）を指定して計算ボタンをクリックする。再標本化点数は推奨値が表示されるようになっているから通常はこれを選択する。計算ボタンには２種類ある。

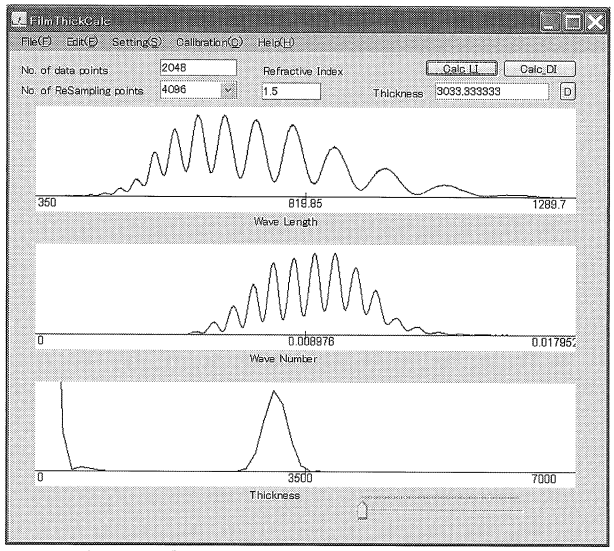


図７　一次補間再標本化計算結果

Calc_LI ボタンは、元データを１次補間して再標本化して計算する。Calc_DI ボタンは、３．１節で述べた高速再標本化手法を使用して計算する。

図７に、Calc_LI による結果を示す。膜厚は 3033nm である。

図８に、Calc_DI による結果を示す。膜厚は図７と同じく 3033nm である。高速再標本化では、波数の大きい方の再標本化データ部分では測定データとゼロが混在しているからグラフ上では縦線が多くなっている。しかし情報は再標本化データに移行しているからパワースペクトルの形状と膜厚は図７と同じである。

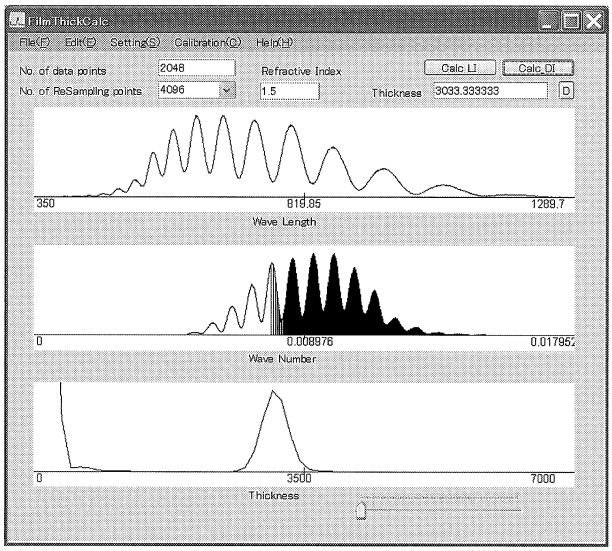


図８　高速再標本化計算結果

４．４　データ編集

図９に入力データの編集画面を示す。図９は最小波長として 2nm の仮想データ点（最小波長点データ）を追加したときの画面である。

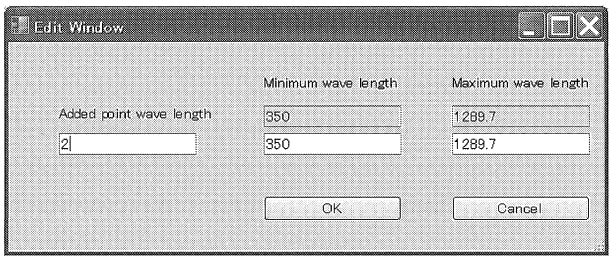


図９　データ編集画面

OK ボタンをクリックすると最小波長点データが追加される。図１０に示すように上段グラフには、入力データの最小波長は 2nm のデータであるとして表示される。また推奨再標本化点数が再計算され表示される。

計算ボタンをクリックすると、図１１に示すように計算結果後の画面が表示される。中段グラフには再標本化された波数空間データが表示される。表示される波数範囲は、最小波長点の波長を λ_{min} としたとき、0 から $2\pi/\lambda_{min}$ である。最小波長点データ追加により波数範囲が拡大される。測定データは左の方の一部だけであり、残りはすべてゼロのデータである。

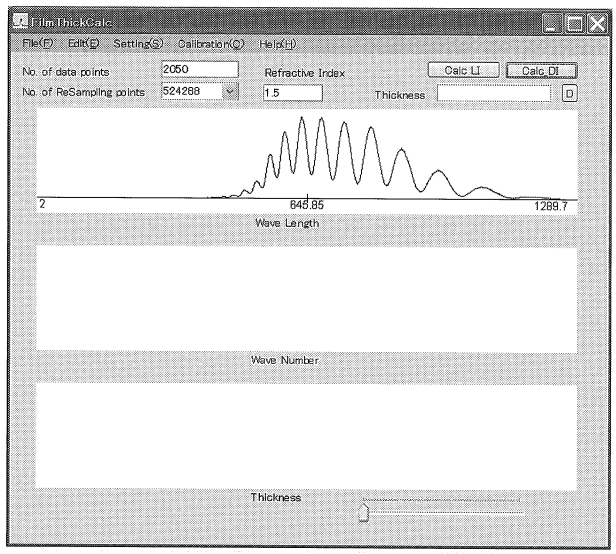


図１０　データ編集直後の画面

下段グラフにはフーリエ変換されたパワースペクトルが表示される。３．２節で述べたように信号ピーク形状はゼロパデイングにより滑らかになっている。最小波長が 2nm、屈折率が 1.5 であるから膜厚分解能は 2/1.5=1.3nm である。算出された膜厚 3054nm は、図７、図８での膜厚 3033nm よりも高分解能で真の値に近いと考えられる。

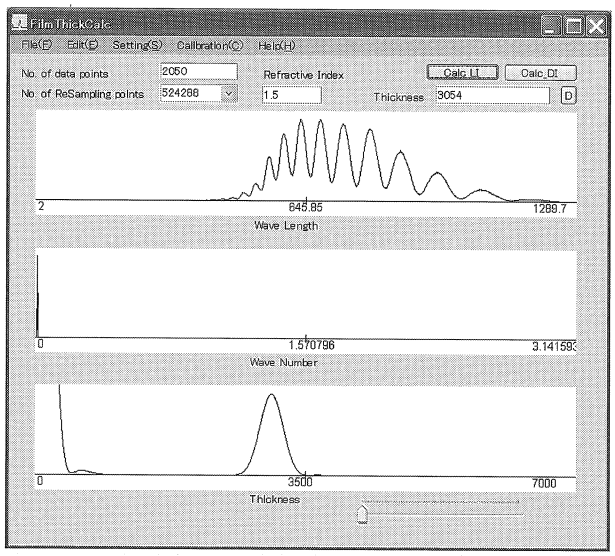


図１１　最小波長点追加後の計算結果画面

４．５　入力干渉分光データフォーマット

図１２に入力干渉分光データの例を示す。このデータは、コンマ区切りの ASCII データファイル（＝csv 形式ファイル）である。データの開始と終了はキーワードで識別される。このキーワードの間に、波長と干渉強度がコンマで区切られたデータとして配置されている。

```
>>>>>Begin Spectral Data<<<<<,
350,0
350.5,-3
（中略）
1289.28,-4
1289.7,-3
>>>>>End Spectral Data<<<<<,
```

図１２　入力となる干渉分光データの例

５．屈折率の算出

測定薄膜と同一材料で成膜され、その膜厚が別の手段（エリプソメータなど）で正確に測定された薄膜（標準薄膜）を使用する。

最初に標準薄膜の膜厚を算出する。Calibration メニューをクリックすると図１３の屈折率の計算画面が表示される。この画面には、測定された標準薄膜の光学膜厚が膜厚（Measured thickness）と屈折率（Refractive index）とに分解されて表示される。

Proofread thickness に標準薄膜の膜厚を入力し Calculate ボタンをクリックする。光学膜厚が同一であることから、標準薄膜の屈折率が計算される。測定薄膜と標準薄膜は同じ材料であるから両者の屈折率は同じである。以降の膜厚測定ではこの屈折率を使用して膜厚を算出する。

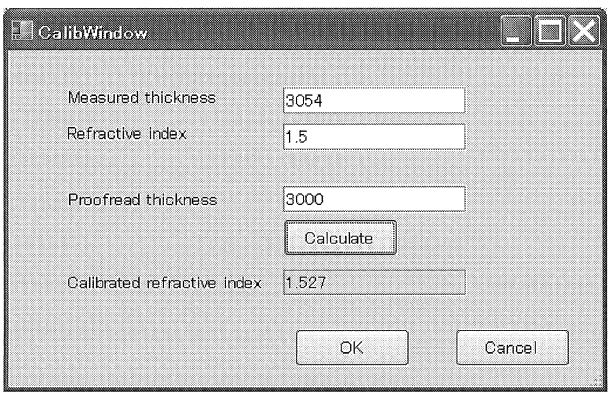


図１３　屈折率計算画面

６．　まとめ

オーシャンオプテックス社の白色干渉分光計データを読み込みフーリエ変換を使用して膜厚を算出するソフトウエアを作成した。このソフトウエアでは以下の改良が含まれている。（１）高速再標本化方式を導入し処理時間を短縮した。（２）測定点以外に最小波長点データを追加することにより分解能を向上した。（３）校正機能を追加することにより測定薄膜の屈折率を校正できるようにした。

参考文献

[1] 吉田貞史著，薄膜，培風館,1990.
[2] 吉田貞史 矢嶋弘義著，薄膜・光デバイス，東京大学出版会,1994.
[3] 金原粲著，薄膜の基本技術，東京大学出版会，2008.
[4] 特開 2003-130614，膜厚測定方および膜厚測定装置.
[5] 特開 2003-240515，膜厚測定方およびシートの製造方法.
[6] 特開 2005-37315，多層膜の膜厚測定方法及び測定装置.
[7] 特開 2006-242798，膜厚および光学定数の算出方法.
[8] 特開 2008-39789，光デイスクの厚さ測定方法.
[9] 浜松ホトニクス株式会社,光干渉式膜厚測定装置 Optical NanoGauge，http://jp. hamamatsu.com/resources/ products/sys/pdf/jpn/c10178.pdf
[10] KS オリンパス株式会社,薄膜計測ソフトウエア TFlab,，http://www.ksolympus. co.jp/product/ industrial/itd_c05-2.html
[11] 株式会社マミヤ，薄膜膜厚測定器，Quore MSPA1000, http://www.mamiya- op. co.jp/home/ company/news2003_02_24.htm
[12] Filmetics,inc，F20-series, http://www.filmetrics.com/
[13] オーシャンオプテックス ホームページ，http://www.oceanoptics.jp/
[14] 斉藤洋一著，信号とシステム，コロナ社，2003.

（平成 21 年 9 月 25 日　受理）

アモルファスシリコンを用いて試作したダイオードの順方向電流の解析

柚賀正光*

Analysis of forward current by amorphous Si diode built as a trial

Masamitsu YUGA

An amorphous Si (a-Si) was made as an experiment using the equipment plasma CVD in this school with high frequency electric discharge. The n-type a-Si was made to deposit on the glass board, and the Schottky barrier diode (SBD) was formed with vapor-deposited aluminum. By measuring the forward current of this diode, the characteristic of material is analyzable. This diode showed that the forward current was a value of ten times or more of the reverse current.

In the theoretical formula of pn junction diode, when the simulation was carried out in consideration of the diode coefficient n from measurement of commercial pn junction diode, it became clear that n was about 2. Therefore, when the simulation of the forward current of SBD was carried out, the diode coefficient n=2 was introduced into the theoretical formula of SBD.

As a result, when the flux of PH_3 used in order to use n-type was 50 cc/min., the height of the energy barrier was in agreement with a single crystal Si band gap. However, when the flux of PH_3 was 10～30 cc/min, the energy barrier became a value higher than it. Moreover, the built up of forward current also became blunt. It is considered that since a-Si carries out the trap of the electron unlike the single crystal Si, a measurement result was not completely in agreement with the simulation.

(Keywords: amorphous Si Schottky barrier diode, plasma CVD apparatus, the flux of PH_3)

1. はじめに

アモルファスシリコン（以下 a-Si と表記）は、プラズマ CVD 法 [1] により簡単に作製でき、自由な形に成型できるので、太陽電池などに広く使われている。そのため、近年その性質について、いろいろな方法で調べられてきた。[2]

本報告では、a-Si と金属界面の性質を調べるため、プラズマ CVD 法により成長させた a-Si 薄膜上に金属を真空蒸着してショットキー障壁を作製した。こうした構造は、ショットキーバリアダイオード（以下 SBD と表記）として機能し整流特性を示す。この場合の順方向における金属と a-Si 間の電流－電圧特性を調べることにより、a-Si 自体の性質を解析することができる。

2. 試料の構造と作製方法

作製した試料の構造を Fig.1 に示す。

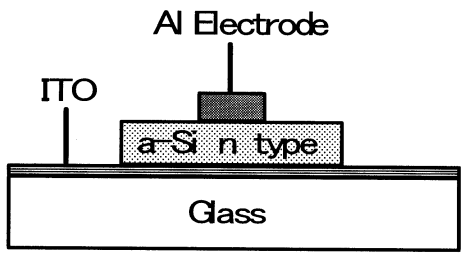


Fig.1 The structure of a-Si Schottky barrier diode (SBD) built as a trial.

＊電子工学科

まず、導電性の ITO 膜を塗布したガラス基板上に、プラズマ CVD 法により n 型の a-Si を堆積させる。Fig.2 は、プラズマ CVD 装置（PED-301 ｱﾈﾙﾊﾞ）の概略図である。また、図中に a-Si 薄膜の形成条件も示した。今回の実験では、PH_3 ガスの流量を変化させて、薄膜を成長させた。

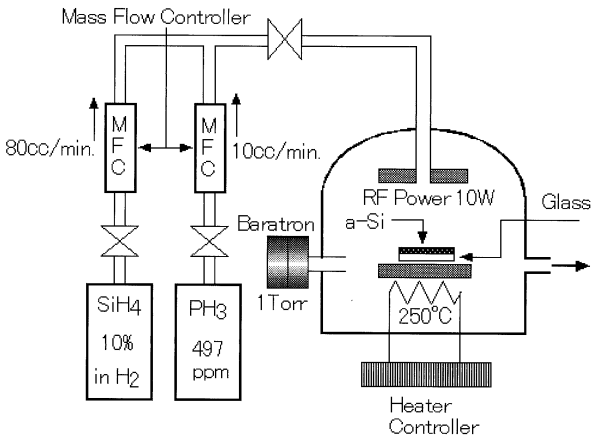


Fig.2 Block diagram of plasma CVD apparatus and discharge condition.

薄膜の形成条件としての基板温度や RF-Power などは、膜形成後の膜厚や比抵抗の値を考慮して決定した。[3]

つぎに、SBD 作製の最後の工程として、a-Si 薄膜の上に、金属電極としてアルミ Al を真空蒸着して完成させた。基板に対して金属に電圧を印加すると整流特性を示した。本報告では示していないが、この他に、金属としてニッケル Ni と金 Au を蒸着したが、同じ電圧では、Au＞Ni＞Al の順に電流が増加した。

3. SBD の順方向電流

Fig.3 に PH_3 ガスの流量 50[cc/min.]の場合の電流－電圧特性を示す。

Fig.3 で示すように、順方向と逆方向で、整流特性が観測された。Al 電極の場合、順方向の立ち上がり電圧は、0.4[V]付近であるが、ほぼその付近で電流は上昇した。本報告では、順方向特性のみシミュレーションするが、逆方向電流も小さく、理論的な値に一致した。

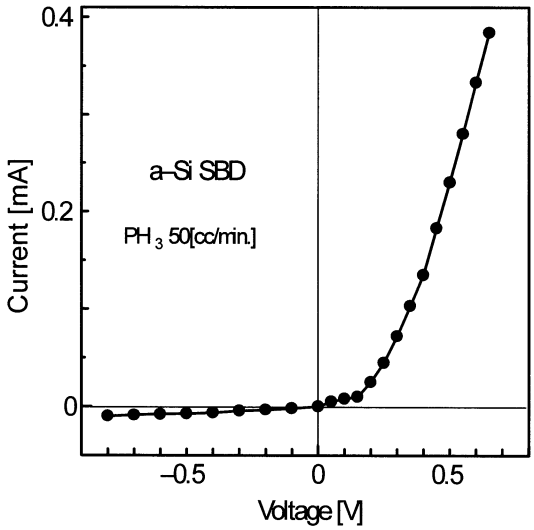


Fig.3 The current-voltage characteristics of a-Si SBD built as a trial. (Forward and reverse current.)

一般に SBD の順方向電流密度の式は、ショットキー障壁の理論を元にして、式(1)のように書くことができる。

$$J_F = AT^2 \exp(-\frac{\phi_n}{kT})\{\exp(\frac{eV}{kT}) - 1\} \qquad (1)$$

ここに

J_F 順方向電流密度
Φ_n Schottky 障壁
A Richardson 定数
T 絶対温度
k Boltzmann 定数
e 電子の電荷
V 印加電圧

また、

$$A = \frac{4\pi emk^2}{h^3} = 1.2\times10^6 [Am^{-2}K^{-2}]$$

m 電子の質量
h Planck 定数

になる。

4. 順方向電流の解析

Fig.4 は、PH_3 ガスの流量 10,30,50[cc/min.]の場合の順方向特性である。今回試作した試料において、PH_3 ガスの流量が小さいほど電流の値は小さくなった。この結果を(1)の式を用いてシミュレーションすると、理論的な電流はかなり大きくなり、一般に、ほとんど一致しない。

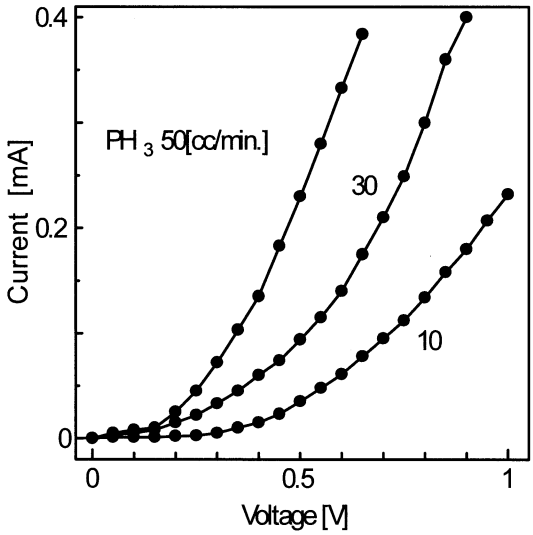


Fig.4 Measurements of forward current by a-Si SBD for various choices of PH_3 flux.

この一致しない原因は、試料表面がきれいでないと表面準位ができ電子がトラップされることや、トンネル効果により電子が動くことなどによるものと推論されるが、本当の原因は明確でない。そこで、式(1)に PN 接合ダイオードに使うダイオード係数 n を導入し、式(2)のようにした。[4]

$$J_F = AT^2 \exp(-\frac{\phi_n}{kT})\{\exp(\frac{eV}{nkT}) - 1\} \qquad (2)$$

n の値を決定するため、よく知られた PN 接合ダイオード（1S1588）を用いて、その順方向特性を調べた。このダイオードは、本校電子工学科の 3 年生の実験において使用されるもので、順方向電流は、そのときの測定値を用いた。

PN 接合ダイオードの順方向電流密度の式は、電子とホールの平衡状態に達する考え方から、式(3)のようになる。

$$J_F = J_R\{\exp(\frac{eV}{kT}) - 1\} \qquad (3)$$

ここに J_R は、PN 接合の逆方向電流である。この値は逆電圧の増加により僅かに増加するが、温度が変わらなければ、ほぼ一定としてよく、室温では、約 10[nA]程度になる。実際には、電子とホールの拡散定数や拡散長に影響を受けるが、本筋ではないので一定とする。しかし、式(3)の場合も実際の測定値に一致しないのはよく知られていて、PN 接合ダイオードを温度計としてセンサーに使用する場合などは、ダイオード係数 n を導入して、式(4)のように扱う。[5]

$$J_F = J_R\{\exp(\frac{eV}{nkT}) - 1\} \qquad (4)$$

Fig.5 は、PN 接合ダイオードの順方向電流に対し、式(4)におけるダイオード係数 n の値を n=1 の場合と n=2 の場合でシミュレーションした結果である。

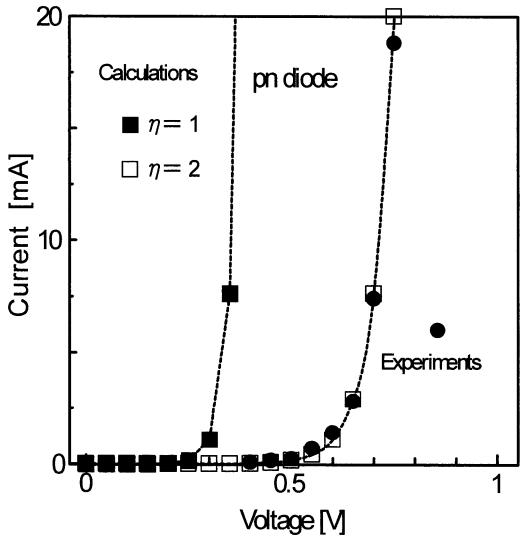


Fig.5 The simulation in consideration of the diode coefficient on the theoretical formula for pn junction diode measurement data.

黒丸の測定値に対して、黒い四角の n＝1 の場合は早く立ち上がりすぎているのが分かる。しかし、白い四角の n＝2 の場合は、測定値と完全に一致している。

通常 n＝2～3 という結果となるが、n＝2 がよく一致するようである。

そこで、本報告で実際に作製した a-Si：SBD の順方向特性を、式(2)で解析する際、n＝2 としてシミュレーションしてみた。

Fig.6 は、PH_3 ガスの流量 50[cc/min.]の場合の順方向電流を、n＝2 でシミュレーションした図である。

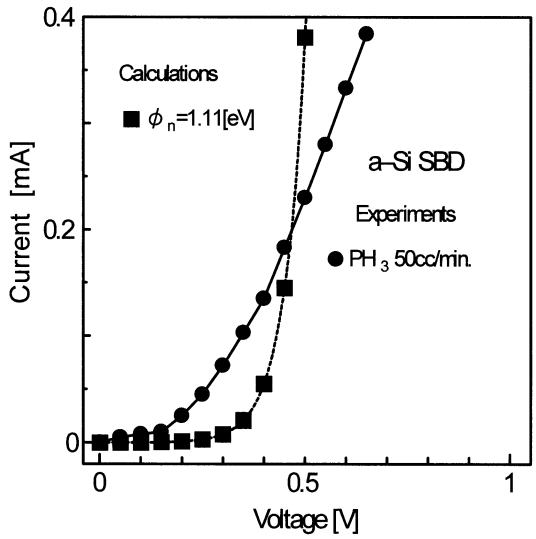


Fig.6 The simulation in the case of being the same barrier as the band gap of c-Si by theoretical formula of SBD on a-Si SBD.

式(2)において、Schottky 障壁 Φ_n の値は、単結晶 Si(c-Si)のバンドギャップと同じ 1.11[eV]を用いた。

単結晶と異なり、非結晶で、電子がトラップされやすいことを考慮すれば、電流の立ち上がりを含めて、かなり良く一致している。

つぎに、PH_3 ガスの流量 10～30[cc/min.]のように少ない場合の測定値を検討した。PH_3 ガスは毒性が強いのが難点であるが、Si を n 型にするのに必要で、この流量が少ないと、当然特性は悪くなる恐れがある。

Fig.7 は、その場合のシミュレーション結果であり、n の値は 2 である。ただし、Schottky 障壁 Φ_n の値は、上記のような配慮から、流量が多い場合より若干大きめの値を用いた。

具体的には、PH_3 ガスの流量 30[cc/min.]の場合、Φ_n＝1.2[eV]とし、PH_3 ガスの流量 10[cc/min.]の場合、Φ_n＝1.3[eV]としてシミュレーションした。

この場合も、電極が Al であることや、PH_3 ガスの流量が少なく特性が悪いことを考慮すれば、ほぼ一致している結果となった。したがって、PN 接合のダイオード係数 n を導入して、かなり良いシミュレーションができ、n＝2 として良いことが判明した。

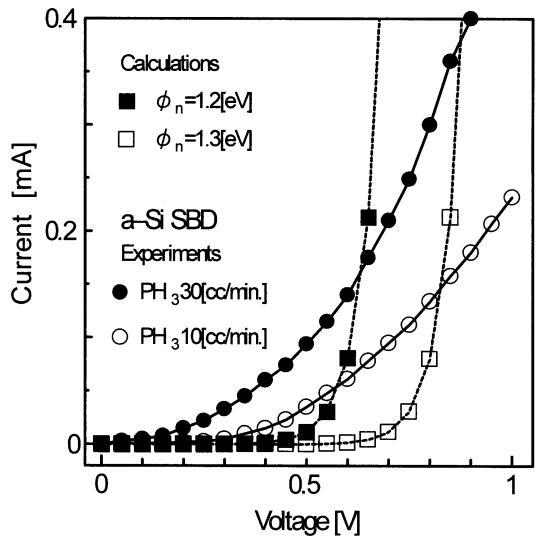


Fig.7 An experimental measurement a-Si SBD when there is little flux of PH_3, and comparison of a simulation to which energy barrier was changed.

5. 結論

プラズマ CVD 法により成長させた a-Si と金属界面の性質を調べるため、Schottky 障壁を作製した。こうした構造を SBD と呼ぶ。n 型の a-Si に対して金属側に電圧を印加すると、電流に整流特性が観測され順方向特性を示した。

n 型の a-Si 作製時に導入する PH_3 ガスの流量を変化させて薄膜を形成し、SBD の順方向電流をシミュレーションした。

通常のショットキー理論から得られる電流の理論式では、ほとんど一致しないため、PN 接合

ダイオードの理論式に導入される、ダイオード係n数を使うことにした。PN接合をセンサー（温度計）に使う際には、経験的に使われる。

そこで、整流によく使用されるPNダイオードの順方向特性を測定した。実際の測定値を理論式を用いてシミュレーションし、nの値が2程度の場合が最適だったので、SBDに対しても、この値を用いた。

その結果、単結晶ではないので、完全にシミュレーションはできなかったが、PH_3ガスの流量が多い場合には、立ち上がり電圧が理論式によく一致した。ガスの流量が少ない場合には、電流の大きさを含めて、一致させることは困難であったが、障壁の大きさを考慮して近づけることができた。

本報告では、蒸着した金属がAlであったので、電流が小さく理論値より少なくなる傾向であったが、金属がNiやAuの場合は、電流はかなり増加するので、理想に近くなり、シミュレーションが向上すると思われる。

a-Siは、単結晶Siに比較して簡単に作製でき、さらにAlという安価な金属との接触でも、通常の理論に近い順方向電流特性が観測され、このような単純な構造でも、理論式が成立していることが確認された。

参考文献

(1) 超LSI時代のプラズマ化学,
電子材料編集部 P105-115(1983)
(2) アモルファス電子材料利用技術集成
桜井良文，浜川圭弘　他
サイエンスフォーラム P18-32(1981)
(3) 柚賀正光　ｿﾌﾄｴﾈﾙｷﾞｰ教育研究施設
研究報告書　Vol.1 p13(1984)
(4) 高橋清　半導体工学，森北出版 p168(1978)
(5) 基礎センサ工学，電気学会 p94(1999)

（平成21年9月25日　受理）

半導体物性に親しむための実験授業

永吉　浩*，小池清之*

Introduce a New Style Experiment to be Familiar with Semiconductor Properties

Hiroshi NAGAYOSHI and Kiyoyuki KOIKE

New style semiconductor experiments using silicon chips have developed and introduced to the 4th year student program in the Department of Electronic Engineering. Each experiment method is very simple and designed to grasp semiconductor properties by intuition. The result of the survey to the student suggests that the experiments are very helpful to understand electrical behaviors of semiconductor material.

(Keywords: Engineering, Experiment, Semiconductor, Silicon)

1. はじめに

電子工学科ではものづくり教育を効果的に推し進めるために学生実験室の設備を充実させ、個々の学生が独立して実験できる実験設備をクラス人数分準備している。（図１）以下に設備内容を示す。

１）オシロスコープ
２）ディジタルマルチメータ
３）電子電圧計
４）直流電源
５）トラッキング直流電源
６）低周波発振器

このような設備環境を生かしたものづくり関連講義・実験が３年生以上の学年に設置されてきた。

１）３年［ディジタル回路］：PIC マイコンに関する実験・演習とそれを応用したアイディア回路の製作
２）３年［電子回路 I］：各種アナログ回路実験とAMラジオのアイディア製作（アンテナコイルまで手作り）
３）５年［電子工学実験 IV］：ものづくり教育の総仕上げとしてアナログ／ディジタル両者を含む実用的なアイディア装置の設計製作

以上の様な講義・実験を回路系ものづくり教育の中心として推進しており、各学生が独立してテーマに取り組んでいる。物性に関連したテーマも同様に導入したいところであるが、半導体等の材料物性に絡んだものづくりテーマは電子回路に比較して導入しにくい。一般に半導体の学生実験テーマでは、蒸着や洗浄、熱処理、測定など大がかりなものが多く装置の数が限られるためにグループ実験となる。さらに専用の装置を使用した処理及び評価装置を用いることが多いので半導体に触っている実感がない。そこで我々は３年前から半導体、特にシリコンの物性に慣れ親しめるように従来にない教育方法を４年の電子材料の講義で実施してきた。

実験テーマ設定の方針としては、
１）電子回路で各自が実験できる設備を整えているので、それらを生かして、物性系でも各自が独立して実験できるテーマにする。
２）同学年に対して行っている固体電子工学の講義とリンクさせて教育効果を高める。
３）シンプルかつ半導体の原理を肌で感じるようなわかりやすい内容にする。

以上のような方針で表１に示すような実験テーマをこれまで考案した。４年時では固体電子工学で半導体内における電子の挙動について説明しており、電子材料の講義では半導体を材料的見地から解説している。前半では結晶と化学結合、様々な半導体の材料的物性、表面、構造等の分析方法等について説明を行い、後半で実験を行っている。すべての実験テーマは９０分以内に終わるように設定した。評価はレポートで行っており、最後にすべての実験結果をまとめて提出をする。課題として実験で得られた結果を応用したアイディア工作を２件考案することを課している。

＊東京工業高等専門学校　電子工学科

図１実験設備

表１　実験テーマ

1) へき開
2) 温度、光による抵抗変化
3) PN判定
4) 各種ダイオードのIV特性観測
5) 光起電力特性
6) ホール効果
7) 太陽電池
8) 点接触ダイオード
9) ダイオードの少数キャリア蓄積効果観測
10) 偏光実験

２．実験テーマの内容

一般に行われている半導体の実験では、半導体に直接手で触ることはご法度であるが、本実験テーマではあえて半導体を手で触れながら実験を行う。もちろん半導体は汚染に敏感で、シリコンウェハーを素手で持つようなことは普通あり得ないことを学生にあらかじめ説明している。このような実験テーマであるので、当初はテーマ作りのための予備実験で試行錯誤することが多かったが３年が経過して内容的にだいぶ落ち着き、まとまりつつある。本稿ではこの中の代表的な実験テーマについて紹介する。

実験に使用したシリコンウェハーは、当初は６インチウェハー（CZ,<100> 10 Ω·cm）を 5×10mm ほどの大きさにカットして用いていたが割れやすく、後述する洗濯ばさみダイオードなどの実験で不便であった。このため現在では厚さ 1mm の 12 インチウェハーをカットして使用している。実験はおもにＰ型基板で行い、PN 判定の実験ではＮ型基板も使用した。実験前に酸化膜は HF で除去しておく。

１）半田ごてを用いたＰＮ判定　古くからある判定原理であるが、専用の設備を使用せずディジタルマルチメータと半田ごてでＰＮ判定をする。加熱した半田ごてをシリコンウェハーにあてて、ウェハーと半田ごて間に生じる電圧をディジタルマルチメーターで観測する。ノイズによるオフセット電圧が出るが、半田ごてをウェハーにあてたときに表示が正方向、負方向どちらにシフトするかで判別することができる。数十 mV 程度の変化を観測することができるが、ノイズを避けるために測定時はコンセントを外し、こて先はよくクリーニングして酸化膜を除去しておくことがポイントである。

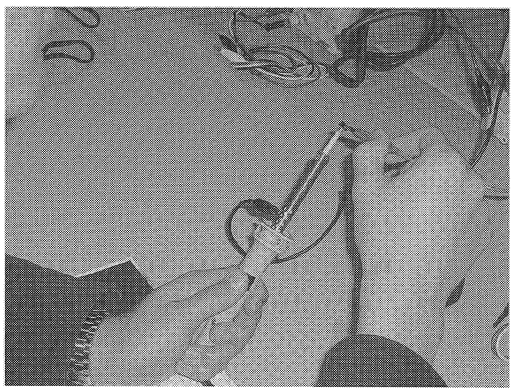


図２　ＰＮ判定の実験

２）光・熱による導電率変化　半導体チップの両端を図２の様にみの虫クリップで挟み、マルチメーターのΩレンジで両端の抵抗を表示する。ハロゲンランプは 12V、1A 程度のランプを使用し、直流電源により点灯させる。半田ごてでチップを温めるか、ハロゲンランプの光を半導体チップに当てると明確に抵抗が減少することを観測することができる。（加熱なしで数百 kΩ、加熱により半減、光照射で 1/3 まで減少）　熱や光でキャリアが発生して電気が流れやすくなることを、固体電子で示したバンド図による説明をイメージしながら実験するように指導している。

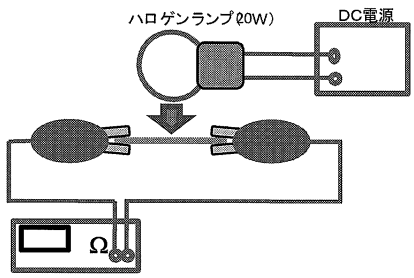
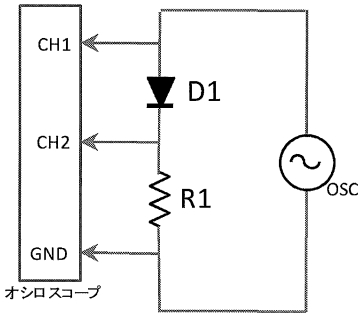
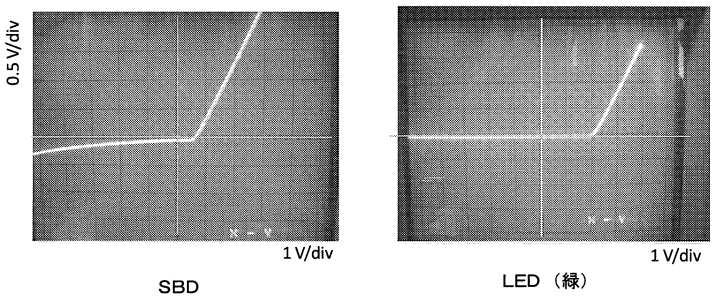


図２熱、光による導電率変化の観測実験



(a)



(b)

図３　I-V特性表示実験　(a)回路図 (b)表示波形

３）オシロスコープを用いたダイオード特性評価

図３(a)のようにオシレータとオシロスコープを用いてダイオードのＩ－Ｖ特性をオシロスコープ上に表示することができる。オシレーターの周波数は１ｋＨｚである。ちらつきが気にならない程度まで下げた方がよい。スイッチング速度の遅い素子では周波数が高いとヒステリシスが現れる。オシロスコープの表示画面には抵抗の電圧がわずかに重畳した波形が表示されるが、Ｉ－Ｖ特性の立ち上がりの比較をすることは可能である。D1とR1の接続点をアースに取る方が素直な特性が得られそうであるが、ノイズが強く出て安定した表示を得ることはできない。図３(b)にショットキーバリアダイオード、ＬＥＤのＩ－Ｖ特性の表示例を示す。ショットキーバリア、ＰＮ、ＬＥＤなど各種ダイオードのＩ－Ｖ特性を表示させて、立ち上がり特性の違い、逆方向飽和電流などを直接的に比較することができる。ＬＥＤに関しては、立ち上がり特性とバンドギャップ、発光波長の関係を講義と実験を通じて理解させるようにしている。

４）光発電特性　ＬＥＤは発光デバイスであるが、太陽電池と同じpn接合で構成されているので、バンドギャップ以上の光を照射すると発電動作をする。オシロスコープにＬＥＤのＩ－Ｖ特性を表示した状態でハロゲンランプ光を当てることによってＩ－Ｖカーブがシフトする様子を直接観測することができる。砲弾型ＬＥＤの正面にハロゲンランプを置くことによってランプの光をＬＥＤチップに集光することがポイントである。図４に実験の様子を示す。ＬＥＤの光電流は小さいので、オシレーターの出力を絞り、オシロスコープは最大感度付近に設定する。このようにすると、光を当てた時にＬＥＤのＩ－Ｖカーブがマイナスの電流方向にシフトする様子を明確に見ることができる。シフト量は光の加減で変化するので、固体電子工学で触れる太陽電池の原理、基本特性について理解を深めることができる。後述する手作り点接触ダイオード、拡散層をつけたｐｎダイオードの発電特性についても評価実験を行う。

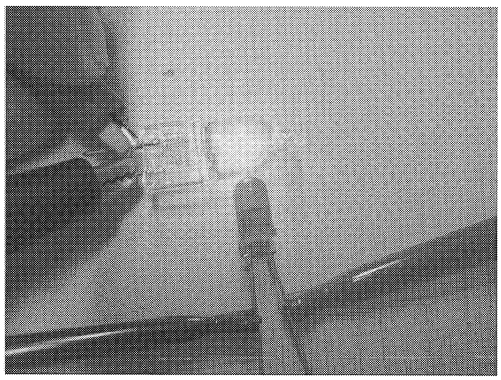
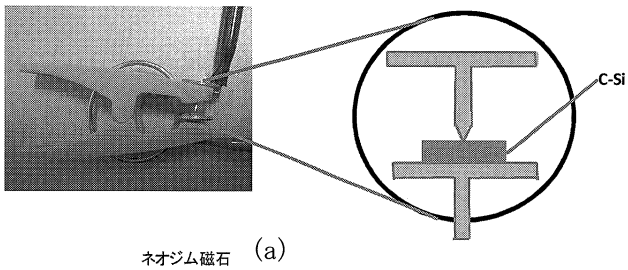
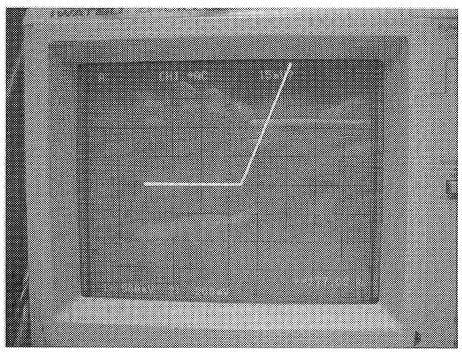


図４光発電の実験



(a)



(b)

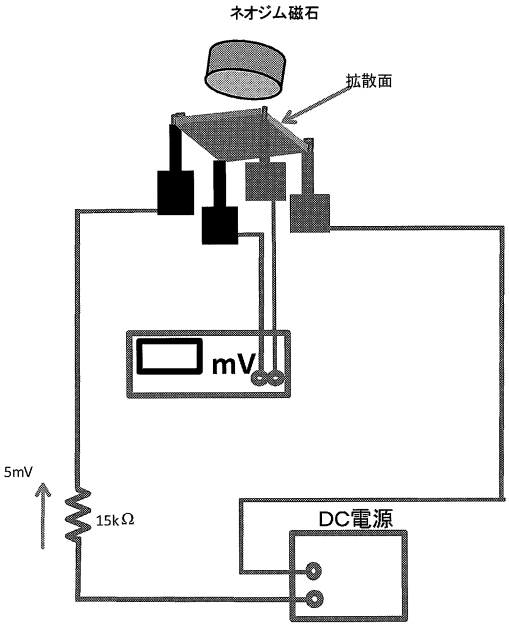
図５洗濯ばさみを用いた手作り点接触ダイオード

5）点接触ダイオード　図５のようにシリコンチップと画鋲、洗濯ばさみを用いて点接触ダイオードを作製する。シリコンチップは銀ペーストで画鋲上に固定する。清浄表面の場合は図５（ｂ）に示すように驚くほど良好な整流特性を得ることができる。立ち上がり電圧が低いので、ラジオの検波用にも使用できる。ゲルマニウムラジオである傘ラジオに適用して良好な受信特性の得られることを確認した。但し表面保護を施していないので長期使用できない。この点をクリアすれば他のものづくり科目の作品などに組み込むことも可能である。オシロスコープを用いたＩ－Ｖ特性観測、光起電力特性の測定を行う。

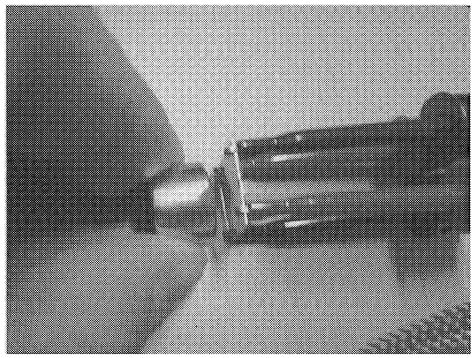
6）拡散基板を用いた実験　片側にＮ層を形成したシリコンチップを用いていくつかの実験を行っている。Ｎ 層の拡散はリンペーストを用いた一般的な固相拡散法により形成した。高濃度拡散を行っているので、表面のＮ層の抵抗率が基板より１桁以上低くなっている。肉眼では拡散層ができていることは分からないので、まずテスターで表、裏の表面抵抗の違いを確認させて拡散層ができている事を実感させる。さらに基板縦方向に整流特性のあることをテスターのｋΩレンジで確認させる。

7）ホール効果測定　４つのクリップを直接シリコンの拡散層に接触させる。図６に回路、接続状態を示す。直流電源から抵抗を介して２端子間に電流を流す。電流値は抵抗の電圧降下をマルチメータで測定して求めた。２つの電圧端子の相対位置によりオフセット電圧が発生し、完全にゼロにすることは難しいが、ネオジム磁石を近づけるとホール起電力による電圧シフトが明確に観測できる。電圧シフトの方向により p/n 判定が可能である。このような簡単な方法でもホール効果の実験が可能で、磁界による半導体の反応を楽しむことができる。拡散層付き基板を用いることが実験を成功させるポイントで、拡散なしの基板では明確なホール電圧を得にくい。

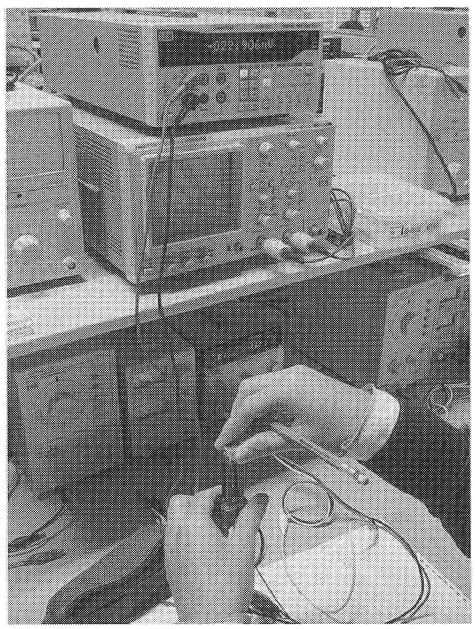
8）四端子法による抵抗率測定　ホール効果測定と同じ拡散層付き基板で４端子法により拡散層の抵抗率評価を行うことができる。電圧端子はテスター棒でよい、電圧端子の棒の間隔などを変えると、それに合わせてメーターの振れが変わるので、電位分布があることを直接感じることができる。大まかではあるが、４端子法の理論式に測定データをあてはめて抵抗率の算出を行う。実験の様子を図７に示す。



(a)

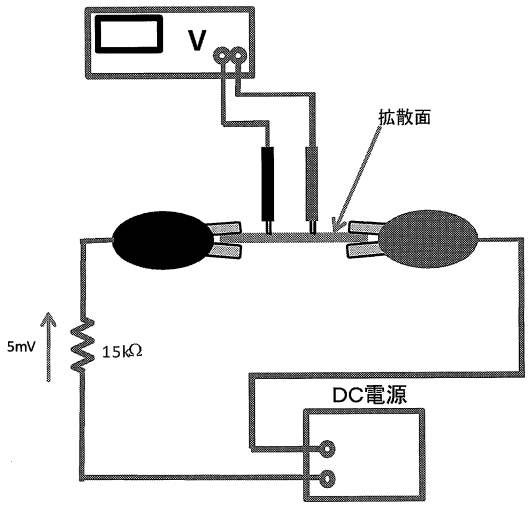


(b)

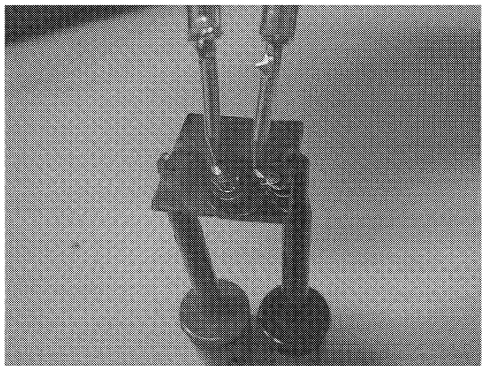


(c)

図６ホール効果実験



(a)



(b)

図７　４端子法による抵抗率測定

３．効果と今後の予定

通常の学生実験では指導書の手順通りにやって精密にデータを取ることを重視しているが、本実験ではデータの取得自体は大まかである。それよりも、そこに現れる現象自体を感覚的に味わってもらうことを主眼にしている。アンケートの回答の多くが楽しみながら実験を行って半導体に親しみを覚えることができたと述べている。（表２）これは、各自が独立して実験を行ったことも関係あると思われる。今後は熱電対、液晶表示器の自作実験などを加え、シリコン以外のテーマも導入するとともにものづくり関連実験の作品に取り込めるような部品の製作も兼ねさせる内容に発展させたいと考えている。

表２　学生の感想　（３６人クラス）

*楽しみながらできた　13
*半導体の理解が実験によって深まった　15
*Ｓｉチップに実際に触りながら実験を行い、半導体を身近に感じることができた　14
*ダイオードが簡単に作れることに驚いた　3
*電子工学実験で触れていない部分であったので貴重な体験であった。3
*半導体の測定方法についての理解が深まった　2
*様々なダイオード特性のあることを改めて実感した 2
*半導体の性質を直感的に理解できた　5
*半導体の性質について実感が持てた　2
*光電現象に興味を持った。
*実験を通じて半導体と物性について興味を持つことができた 2
*様々な実験を通じて半導体の性質について実感をもつことができた。
*原理を調べること、実験することで理解を深める授業で最高でした
*ＬＥＤが太陽電池として利用できることが意外
*結晶のへき開の性質を実際に体験できてよかった
*光や温度で抵抗値が大きく変化することを実際に見て、思った以上に繊細であると驚いた
*物性を学ぶことで回路とは違うものの見方、考え方がわかり、こういった分野にも取り組んでいけたらと思う授業であった。
*半信半疑であった半導体の性質が実験を通じて本当の現象として素直に受け入れることができた。
*半導体体について理解していなかった部分を復習するという意味でも良い機会であった。
*Si 以外の材料についてももっと知りたいと思った。
*電子工学にはまだまだいろいろな実験があると思った。
*偏光板の実験でまだまだ知らないことがたくさんあるのだということを実感した
*偏光板の実験に興味を持ち調べてみた。難しいがおもしろかった

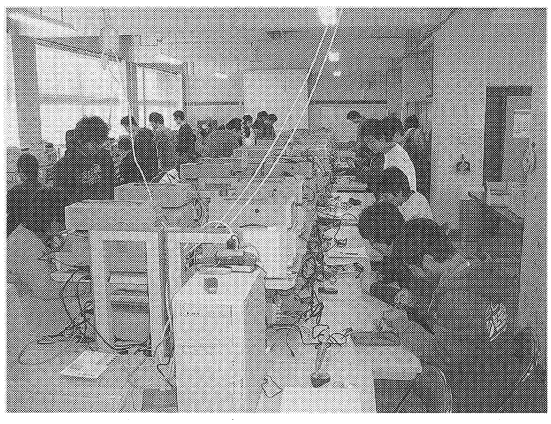


図８　実験風景

（平成 21 年 9 月 25 日　受理）

エージェント間における学習能力格差の解消を実現する階層型マルチエージェント強化学習システム

北越大輔*，宮内龍之介**，鈴木雅人*

Interactive Hierarchical Multi- Agent Reinforcement Learning System for Reducing the Gap Between Learning Performance of the Agents

Daisuke KITAKOSHI, Ryunosuke MIYAUCHI, Masato SUZUKI

This article proposes Interactive Hierarchical Multi-Agent Reinforcement Learning system (IH-RL) which allows agents to cooperate in multi-agent environments. The goal of our study is to make agents using IH-RL acquire adequate behavior in "Discrepancy-Extending condition". This condition is satisfied in a variety of environments (e.g. economic discrepancy between people, companies, etc.), however, important to resolve.

Several computer simulations are carried out to evaluate the performance and property of our system. As a result of simulations, it has been confirmed that IH-RL resolved the above-mentioned condition through agents' cooperative behavior.

(Keywords: Hierarchical reinforcement learning, Multi-agent system, Discrepancy-Extending condition)

1．はじめに

近年，複数エージェントにおける集団全体の挙動に注目する研究の中でも，エージェント集団の協調・競合行動に関する研究が盛んである．マルチエージェント環境では，個々のエージェントの振舞とともに，集団全体の挙動について観測・調査することも重要であるが，各エージェントが最大化すべき利益と集団全体の利益は必ずしも一致しない．このような状況は実世界においても数多く存在し，個々の問題をマルチエージェントモデルで表現した上で解決するための試みも報告されている[1][2]．マルチエージェント環境におけるエージェント集団全体の目標が全エージェントの“共存”であり，各エージェントが集団内で共存するための条件が“一定期間内に一定以上の利益を得ること”であると仮定する時，エージェントの学習能力や初期状態に差があれば，時間の経過とともに個々の獲得利益の差が拡大することで共存不能となり得る．近年の経済格差問題等，実世界に存在する多くの問題は上述の設定で表現できると考えられ，本研究ではこれを格差拡大状態と呼ぶ．格差拡大状態では個々のエージェントが集団全体の利益を最大とする（＝集団が長期間共存する）ために取るべき同一の行動は存在しない可能性がある．

本研究では，格差拡大状態におけるエージェント間の格差軽減を目的とした相互作用型階層強化学習システム(Interactive Hierarchic Reinforcement Learning system : IH-RL)を提案し，その性能と特徴について評価する．IH-RL では，環境中での個々の目標達成を目的に適切な振舞を学習するエージェントと，エージェント集団全体の状況を判断し，集団の振舞が改善するような適切な命令の与え方を学習する上位エージェントを用意する．二種類のエージェントの双方とも，強化学習（Reinforcement learning）[3]によって適切な振舞を学習しながら，相互作用的に情報をやり取りする．学習の結果，適切な命令方策を獲得したMAによって，PA集団が協調的に振舞うことで格差の軽減を図る．

IH-RL の適用例として，複数エージェントの存在する追跡問題を取り上げ，計算機実験を実施する．

2．格差拡大状態

マルチエージェント環境では，各エージェントの振舞いが絡み合うことで集団全体としての挙動が生成される．文献[1][2]では，個々のエージェントが達成すべき目標とエージェント集団全体としての目標との関係性を，次の3状態に分類した．

- 非干渉状態：全てのエージェントが利益を追求

＊情報工学科　＊＊機械情報工学専攻

する（目標に対して利己的に振る舞う）時に集団全体の利益も最大化.

- 泥沼状態：全てのエージェントが利益を追求しないときに集団全体の利益が最大化.
- 競合状態：一部のエージェントが利益を追求し，残りが利益を追求しない時に集団全体の利益が最大化.

上記の 3 状態は，実世界上で複数の行為者（人間，野生動物，企業等）が存在する環境でも想定され，これらの状態が時間的に継続するような状況も実世界環境下では数多く存在する．加えて，時間の推移とともに各エージェントの獲得すべき振舞が変化する状態も実世界中に数多く存在する.

例えばサッカー等のチームスポーツにおいて，各選手はそれぞれの目標達成（例：得点を多く挙げる，失点を最小化する等）のため振舞うが，それぞれの振舞を最適化することでかえって選手間の能力差拡大を助長し，結果としてチームの目標（＝勝利）を達成できなくなる可能性がある．このように，時間の経過とともに行為者間の利益差が拡大し，結果として集団全体の利益が減少する状態を，本研究では格差拡大状態と定義した．チームが目標を達成し続けるためには，状況に応じて一時的に各選手が自身の利益追求を放棄したり，協調的に振る舞ったりする必要も生じる．従って，格差拡大状態の軽減・解消には，エージェント集団の協調な振舞の発現が重要な要素の一つであると考えられる.

本研究では格差拡大状態を計算機上で実現するため，寿命と共存という用語を定義する．寿命はエージェントの活動可能な残り時間として定義し，その値は各エージェントが目的を達成できない期間に比例して減少するものとする．目的を達成したエージェントの寿命は増加し，寿命が 0 となったエージェントは活動を停止する．また，集団中の全エージェントの寿命が 0 となることなく行動選択可能な状況を，エージェント集団の“共存”と定義する.

サッカーの例で考えると，能力が高く多くの利益を獲得する選手の“寿命”の値は大きいが，他の選手に学習の機会がなければチーム全体として機能することは困難となり，結果としてチームの勝利が遠のく．高能力の選手が他選手へ学習機会を与えることで，他の選手の寿命も増加し，共存期間の延長（チームとして勝ち続けること）につながる．格差拡大状態では，格差を軽減し，集団の共存を長期間継続可能となることが集団の利益の最大化に対応する.

3．相互作用型階層強化学習システム

提案する相互作用型階層強化学習システム（Interactive Hierarchic Reinforcement Learning System: IH-RL）では，2 種類のエージェントのそれぞれが適切な振舞を強化学習によって獲得する．強化学習とは，環境から与えられる報酬を手掛かりに，試行錯誤的にエージェントの振舞を最適化する機械学習の枠組みの一つである.

3.1. IH-RL で使用する強化学習

IH-RL で利用される 2 種類のエージェントには，それぞれの特徴に応じて Profit Sharing と Bucket Brigade と呼ばれる強化学習アルゴリズムが実装される．以下に順を追って示す.

(1) Profit Sharing

Profit Sharing では，エージェントの観測する状態 s と，状態 s において出力する行動 a の対からなるルール (s,a) に対してルール重み $w(s,a)$ が付加され，これを基準に行動選択を行う（$s \in S, a \in A \mid S, A$：エージェントの取る状態，行動の集合）．また，報酬を獲得するまでのルール系列はエピソードとして保存される．ルール (s_C, a_C) の選択後に報酬 r が与えられた際，エピソード中のルール重みを更新式 $w(s_i,a_i) \leftarrow w(s_i,a_i) + f(i)$ を用いて一括更新することで学習を行う（$f(i) = r\gamma^{C-i} \mid i = 1, \ldots, C;\ \gamma \in (0,1]$）.

(2) Bucket Brigade

Bucket Brigade は Profit Sharing と異なり，報酬獲得時だけでなく，環境からの報酬が 0 である状態でもルール重みの更新を行う．ルール (s,a) が選択された後，ルール (s',a') が適用され，$r = 0$ だった場合，ルール重みは次の更新式 $w(s,a) \leftarrow (1-\beta)w(s,a) + \beta w(s',a')$ を用いて更新される．同様に，報酬 $r(\neq 0)$ が与えられた場合の更新式は $w(s,a) \leftarrow (1-\beta)w(s,a) + r$ となる（$\beta \in (0,1]$）.

Bucket Brigade は報酬伝搬を一段階分だけしか行わないので，Profit Sharing と比較して学習速度は遅いが，報酬が長期間与えられない場合でも，ルール重みの更新を継続して学習を進めることができる．従って，Profit Sharing はエージェントの報酬獲得頻度が比較的高い場合に有効で，そうでない場合は Bucket Brigade を利用した方が良好な学習性能を示すことが多い.

3.2. IH-RL システムの概要

本稿において著者らは，エージェント集団における利益格差の軽減・解消を目指し IH-RL を提案した.

提案システムの概念図を図1に示す．2節で挙げたサッカーの例のように，集団全体の利益と，集団の構成要素（エージェント）の利益が一致しないような場合に有効と考えられる一解決法として，集団全体を見渡し，監督（まとめ）役となる上位エージェントによる調整が挙げられる．IH-RL ではこの考えにもとづき，個々に自身の利益最大化を目的とする下位エージェント（Playing Agent: PA）と，PA 集団全体の状況をもとに，集団の利益向上につながる指示を PA へ与える上位エージェント（Management Agent: MA）による階層型構造を有している．

IH-RL における具体的な処理の流れについて以下に述べる．各 PA はそれぞれの目標を達成することで報酬を獲得し，報酬の総和（= 利益）を最大化すべく独立して適切な振舞を学習する．PA による一定期間の振舞学習後，学習の状況（例：報酬獲得回数，ルール重みの値等）が MA への入力情報として与えられる．MA は各 PA から得られた情報を集約した統計量から状況を把握し，現在の PA 集団全体がより環境に適応するような命令を PA に対して出力する．対象となった PA は，命令の内容をもとに自身の振舞を修正する．PA の取り得る状態と行動，および MA の取り得る状態と行動（命令）は問題設定に依存する．本稿における PA，MA はそれぞれ Profit Sharing，Bucket Brigade によって振舞を学習する．IH-RL における一連の処理を，以下に順を追ってまとめる．

1. 各 PA 及び MA のルール重みを初期化
2. 一定期間，集団中の各 PA が振舞を学習
3. PA の学習によって得られた情報を MA へ送信
4. MA は PA からの情報をもとに，集団が環境へより適応するような命令を特定の PA へ出力
5. 2. へ戻る

MA は自身の出力した行動（命令）による集団全体の振舞の改善度合いに従って報酬を獲得し，これをもとに適切な振舞（命令の与え方）を学習する．提案システムは，MA，PA 間で相互作用することによって，相乗効果による学習性能の向上を目指す．

学習頻度の面から MA と PA を比較すると，PA は各自の目標を達成するたびに報酬を獲得可能であるのに対し，MA は PA 集団の一定期間の学習を待ってから行動選択を行うため，報酬を得られる頻度は PA よりも少ない．このため，IH-RL における MA の学習手法には Bucket Brigade を，PA の学習には Profit Sharing を利用する．

これまで，階層型の枠組と強化学習アルゴリズムを用いた様々な問題解決・最適化手法が提案されている[4][5][6]．それらの多くは上位階層から下位階層へ移るに従い，達成目標がより単純なサブゴールへと分割されていく構成となっている．これらの手法では，サブゴールを解決した下位階層のエージェントの情報を集結することで，上位階層のエージェントが本来のゴールに到達可能となる．一方，IH-RL における上位階層の MA と下位エージェントにあたる PA の間に従来手法に見られるような関係性はなく，PA の目標と MA の目標も異なっているため，これまで提案されてきた階層型のアプローチとは，“階層”の意味合いが異なる．PA と MA はそれぞれ別の目標を持ちながら，学習の過程で情報交換することによって，相互作用的に格差拡大状態の解消を図る．

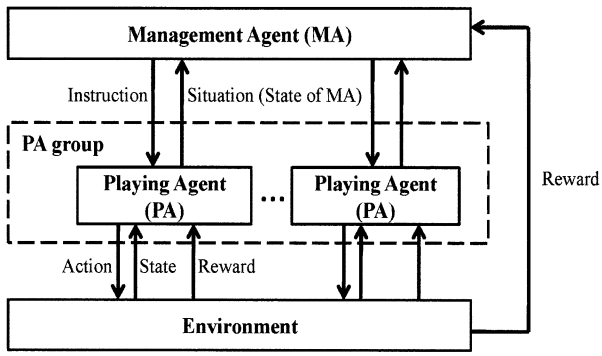


図1　IH-RL のシステム構成

4．適用例

格差拡大状態における IH-RL の特徴，性能評価のため，エージェント追跡問題を適用例として計算機実験を行う．追跡問題は追跡者エージェントが逃避者エージェント（以降逃避者）を捕獲することを目的とする問題である．追跡者エージェントを IH-RL における PA，PA 集団に命令を与える上位エージェントを MA とする．本実験における逃避者は，提案システムの評価を容易にするため移動しないものとする．実験環境は 30×30 のマス目状で構成され，エージェントの初期位置は固定されている（図2）．

4.1. 格差拡大状態を実現する問題設定

追跡問題を用いて格差拡大状態を実現するための準備について述べる．実験では PA と MA の試行を異なるものとして定義する．PA の場合，報酬獲得時または行動選択回数が 500 を超えた時に1試行とカウントするのに対し，MA では PA 集団中に寿命 0 のものが発生した（共存期間が終了した）時に1試行終了と定義する．PA と MA の試行を区別するため，本研究では PA の試行を個体試行と呼ぶ．逃避者の捕獲

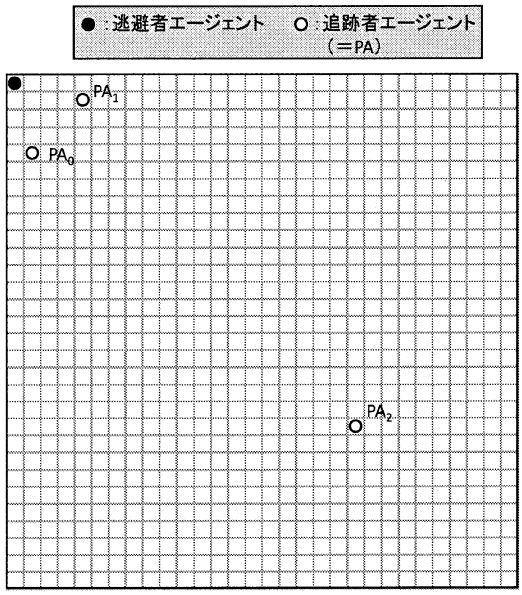


図 2 実験環境

は，PA が逃避者の右と下のマス目に同時に存在することで実現し，捕獲に直接関与した 2 体の PA に報酬 r が与えられる．その他の設定は以下の通り．

(i) PA の寿命初期値 ＝ 500
(ii) 寿命が 0 となる PA が表れるまで，各 PA は個体試行を繰り返し実施
(iii) 総 PA 数 $I=3$ （$PA_0, PA_1, ..., PA_{I-1}$）
(iv) 総 MA 数 ＝ 1
(v) 報酬を獲得した PA の寿命を初期値にリセット
(vi) 1 個体試行間に報酬を獲得できなかった PA の寿命を 1 減少

図 2 に示す通り，PA_2 の初期位置を PA_0，PA_1 と比較して逃避者より遠くに配置することで，個体試行の増加に従い PA_0，PA_1 と PA_2 の報酬獲得回数に格差が生じることが容易に想像される．

4.2. PA における学習の設定

IH-RL における PA の諸設定を以下に示す．

(1) ルール重み $w(s,a)$ の初期値 ＝0
(2) 上下左右の壁，他の PA，逃避者の有無をもとに状態を決定
(3) 行動は{停止，上移動，下移動，左移動，右移動}のいずれかを選択
(4) $\gamma=0.25$，PA への報酬 $r=100$
(5) PA のルール重みは MA の試行終了後に初期化
(6) 行動選択はルール重みにもとづくルーレット選択

PA は，知覚する状態が変化するまで同一の行動をとり続けることとする．

表 1 PA 集団の共存度

$N_n - N_{n-1}$	$\sigma_n^2 - \sigma_{n-1}^2$	C_n
0 以上	0 未満	3
0 未満	0 未満	2
0 以上	0 以上	1
0 未満	0 以上	0

表 2 PA の寿命と危険度

PA_i の寿命	$D_n(i)$
50 以下	3
166 以下	2
333 以下	1
500 以下	0

4.3. MA における学習の設定

MA の諸設定を以下に示す．

(1) ルール重み $w(s,a)$ の初期値 ＝ 0
(2) $\beta=0.1$
(3) MA は 50 個体試行おきに行動選択
(4) 状態は後述する PA 集団の寿命に関する危険度と共存度によって特定
(5) MA への報酬 R ＝ 100
(6) 行動選択はルール重みにもとづくルーレット選択

MA の状態は上記(4)に示す 2 つの情報から決められる．MA の n 回目の行動選択までに PA が実施した 50 個体試行における PA 集団の共存度 C_n は，報酬獲得回数の平均と分散 N_n と σ_n^2 を用い表 1 に示すように設定する（$n=1,2,...;\ N_0=0,\ \sigma_0^2=0$）．$C_n=3$ であることは，集団の報酬獲得状況が“高値安定”していることを意味するため，PA 間で獲得報酬の格差減少が実現している状況であるといえる．PA 集団の寿命に関する危険度 D_n は，環境中の PA_i の危険度 $D_n(i)$ の組（$D_n = <D_n(0),..., D_n(I-1)>$）として表わされ，その値を表 2 のように定めた．$I=3$ であるため，MA の観測する状態は，共存度（4 通り）と危険度（64 通り）を組み合わせた計 256 通りとなる．これらの状態のもとで，MA はいずれかの PA へ以下に示す命令（行動）を出力する．

(1) 何もしない
(2) 全てのルール重みを平滑化
(3) 直前 50 個体試行で最も報酬獲得回数が多い PA のルール系列に含まれるルール重みをコピー

平滑化では，PA の全ルール重みをその平均値とする．ルール系列のコピーは，コピー元のエージェントが報酬獲得時に選択したルールから 10 個前までの系列をコピーする．平滑化は報酬を多く獲得している PA の行動にランダム性をもたせ，他の PA に報酬獲得の機会を与えるために，ルール系列のコピーは，学習が進んでいない PA に対して学習を促すことを

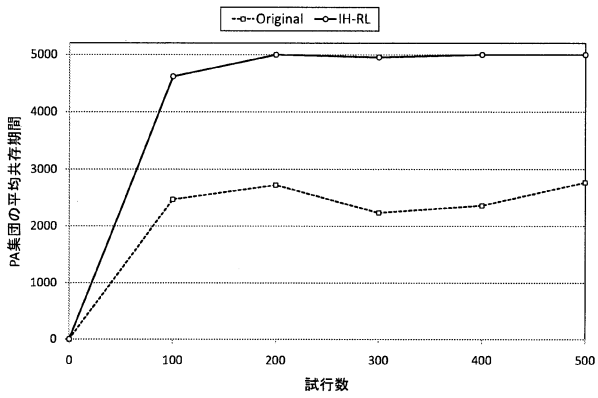


図3　PA集団の平均共存期間の推移

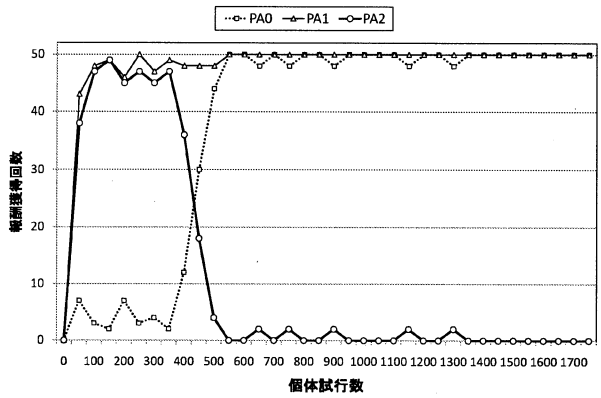


図4　PAの報酬獲得回数の推移（Original法）

目的として実装した．MAは，$\sigma_n^2 < \sigma_{n-1}^2$ および $0.8 < N_{n-1}/N_n < 1.2$ である時，報酬 R を受け取る．IH-RLの特徴・性能を評価するため，MAによる指示を行わずPAのみで学習した結果（以降，Original法と呼ぶ）を比較対象とする．

5．結果・考察

計算機実験を実施し，Original法とIH-RLとの比較を行った．実験時間短縮のため，共存期間の上限を5000とし，各手法に対して500試行を行った．100試行毎の集団全体の平均共存期間の推移を図3に示す．この図から，Original法より提案システムを用いた場合のPA集団の共存期間が延びていることがわかる．500試行全体におけるOriginal法とIH-RLの平均共存期間はそれぞれ1838と4924であった．Original法とIH-RLにおける学習の特徴について考察するため，集団中の各PAにおける50個体試行ごとの報酬獲得回数の推移を比較する（図4，5）．図5は，全500試行中MAが振舞をある程度学習したと考えられる200試行以降の典型的なIH-RLの結果を示している．図4から，Original法では主に PA_0 と PA_1 のみが報酬を獲得し，格差拡大状態が発生・継続した結果，共存期間が1700付近で終了していることがわかる．図5では，IH-RLを適用した集団の共存期間が5000まで続いていることに加え，共存期間の後半部では前半部と比較して，各PAの報酬獲得回数の格差が軽減している．図5では，PA_0 と PA_1 の報酬獲得回数がともに減少し，それに伴い PA_2 の値が増加している箇所が複数見られる．このような状況のほぼ全ては，ルール重みのコピーと平滑化という二種類の行動によって引き起こされている．行動選択直後の報酬獲得回数の推移から，本実験で使用したルール重みのコピーは，コピー先のエージェントにとって必ずしも報酬獲得に貢献しないルールの重みまで複写してしまうことから，有効に作用しない場合が多いことが確認された．

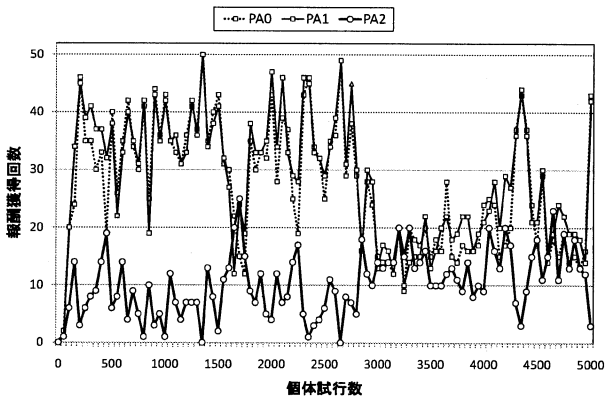


図5　PAの報酬獲得回数の推移（IH-RL）

一方，平滑化は共存度 $C_n = 1$ の時，PA_0 を対象として実行される場合が多いことが分かった．MAはこの状況において PA_0 に対して重みの平滑化を行い，結果として PA_0 がランダムに行動選択するようになるため，PA_0 の報酬獲得回数は一時的に減少する．逃避者の捕獲には2体のPAが必要であるため，PA_0 をパートナーとして報酬を得ていた PA_1 の報酬獲得回数も同様に減少する．一方で，これまで報酬獲得（学習）の機会が極端に少なかった PA_2 の学習機会が増加したことによって PA_0 の報酬獲得回数が増加し，集団中の格差軽減に寄与する結果となった．MAが選択した行動によって引き起こされる「PA_0 が報酬獲得を放棄し，その結果報酬を得られなかった PA_2 が報酬獲得可能となる」という集団の振舞は，MAからの命令によって生成された協調的な行動であるとみなせる．このようなMAの振舞は，特に3000個体試行以降において頻繁に観測され，個体試行を経るにつれてコピー行動は選択されなくなる傾向を示した．

上述の実験で設定した共存期間（= 5000）において，MAは全状態で望ましい命令を選択可能となるような，適切な方策の獲得まで至っていない．そこで，PA集団の共存期間の上限を50000まで増大してMAの学習を1試行実施し，得られた方策について考察を行った．その結果，個体試行数を経るごとにMA

の振舞およびPA集団の報酬獲得状況に変化が生じ，最終的に上限の50000個体試行に達して終了した．各PAの45001～50000試行における報酬獲得回数の推移を示した図6では，PA_0とPA_2双方の報酬獲得回数がおよそ20～30付近，同様にPA_1も50付近で安定している．この結果から，MAを行動選択回数1000回分学習させたことで，MAがPA集団の報酬獲得格差を軽減したまま安定させる，ある種の振舞を獲得したと予想される．具体的には$C_n = 0$の時，MAは約100%の確率でPA_0にルール重み平滑化を行っており，集団内における報酬獲得量に格差が生じる兆しがある場合，PA_2より初期位置の面で報酬を獲得しやすいPA_0のルール重みを平滑化し，PA_0の報酬獲得機会を奪うと同時にPA_0よりも不利な初期位置にいるPA_2に学習の機会を与え，格差の軽減を図っている．この結果から，MAはPA集団の状況を把握して特定のPAへ命令し，集団に協調的に行動させることで格差の軽減を実現する振舞を獲得したと言える．表3は，図6のうち連続する適当な1000個体試行を抽出し，そのうち報酬を獲得したPAの対とその回数を示している．この表からPA_0，PA_2双方ともPA_1と報酬を獲得する頻度が多く，PA_0とPA_2による捕獲は僅かであることが分かる．当該個体試行の間，MAはPA_0に対してほぼ100%の割合で平滑化行動を出力しているため，今回の実験では集団全体の“調整役”としてPA_1が選択されたことが分かる．

以上の結果から，IH-RLは各々利己的に振舞うPA集団における格差の軽減に効果的であることが示された．IH-RLを用いることで，MAは各PAに対して効率の良い命令の与え方を学習し，集団全体の目標（共存期間の伸長）を達成できた．

6．まとめ

本稿ではマルチエージェント環境において，集団中の各エージェントにおける利益格差が時間経過に伴い拡大する格差拡大状況を定義し，当該状態において集団が適切に振舞うことで集団全体の利益最大化を実現する相互作用型階層強化学習システムIH-RLを提案した．計算機実験の結果，MAがPAに協調的な行動をとらせる効率のよい命令の与え方を学習可能であること，およびPA集団の協調行動の結果，集団全体の共存期間がMAの存在しない集団より大きく伸びたことを確認した．

IH-RLは2種類のエージェントを用いた階層的な枠組みによって，マルチエージェント環境における格差拡大状態の軽減を目的としているが，MAの状態・行動に関する設定を変更することで，格差拡大状態ではない他のマルチエージェント問題へも適用可能となることが期待できる．

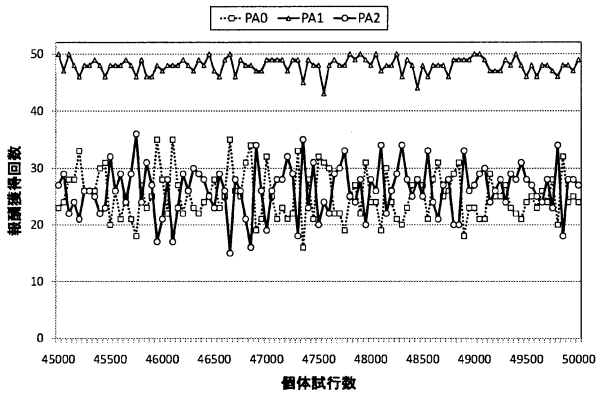


図6 報酬獲得回数の推移（IH-RL：45001-50000試行）

表3 報酬獲得したPAの対（PA_i, PA_j）とその回数

i	j	報酬獲得回数
0	1	453
0	2	36
1	2	503

今後は，MAのより良い状態・行動設定，およびMAの適切なパラメータ設定について検討を行う必要がある．また，格差拡大状態とは異なる問題設定によるマルチエージェント問題に対してIH-RLを適用し，特徴や性能を観測・評価することを予定している．

参考文献

[1] 今福啓： 環境の変化に適応するマルチエージェントの学習手法，人工知能学会論文誌，Vol. 21，No. 2，153-166，2006

[2] 森本淳，銅谷賢治：階層型強化学習を用いた3リンク2関節ロボットによる起立行動の獲得，日本ロボット学会誌，Vol. 19，No. 5，574-579，2001

[3] R. S. Sutton，A. G. Barto（三上貞芳 訳，皆川 雅章 訳）：強化学習，森北出版，2000

[4] 高橋泰岳，浅田稔：複数の学習器の階層的構築による行動獲得，日本ロボット学会誌，Vol. 18，No. 7，1040-1046，2000

[5] 片山謙吾，興石尚宏，成久洋之：強化学習エージェントへの階層化意思決定法の導入-追跡問題を例に-， 人工知能学会論文誌，Vol. 19，No. 4，279-291，2004

[6] 近藤 賢治，山内 康一郎，大森 隆司：マルチタスク学習効率化のためのサブゴール発見法，情報科学技術フォーラム(FIT)2003，355-356，2003

（平成21年9月25日 受理）

プログラミング添削指導支援のための プログラム意味解析ツールの開発

鈴木雅人*，北越大輔*

A Development of Program Semantic Analysis Tool for Assisting Program Correction

Masato SUZUKI and Daisuke KITAKOSHI

In the lectures of the programming language, it is necessary to do a lot of exercises to acquire the technique of the programming language. Therefore a teacher must correct a huge amount of reports. The correction methods are improved by automation of structural analysis, compilation, and execution of the program using some sample data, so far. But it is very difficult to automate the correction completely. Moreover, it is necessary to improve the program copy detection accuracy, since there are many students which submit the copy report of other one, to our regret.

To evade these problems, we developed the semantics analysis tool for C language. In this report, we report that it is succeeded to simplify the report correction process, and improve the accuracy of the program copy detection, by using our tool.

(Keywords: denotational semantics analysis tool, correction of programming exercises)

1．はじめに

高度情報化社会が確立しつつある現在の世の中において，我が高専を取り巻く状況も急速に変遷している．このような中，これまで情報工学を学ぶ上での基礎と考えられていたプログラミング開発技術は，あらゆる分野の技術者に期待されているものになっていると言っても過言ではない状況である．

プログラミング言語の授業においては，さまざまな実施形態が工夫されているが，基本的には演習を中心に，より沢山の課題をこなすことによって真の実力がつくと考えられている．例えば，1年間でC言語などの文法を一通り理解して自分で使いこなせる実力をつけるためには，少なくとも100課題以上こなす必要があるが，実際の授業においては，40人以上の学生を1人の教員が担当するため，添削指導には多大な時間と労力が必要となる．

一方，学生が作成したプログラムを添削する際のポイントとして，文法に従ったプログラムであるかどうか，課題で指示したとおりの動きをするかどうかをチェックするほかに，更に良いプログラムにするためのアドバイスなどがある．このうち前の2つは，課題の出し方を工夫することで，完全，あるいは部分的に自動化することが可能な場合も多い．特に文法に従ったプログラムであるかどうかを検証するためには，既存のパーザーを使うことも可能であるが，さらにプログラムの意味解析を行うことで，プログラムの等価性を証明する研究も行われており[1]，この成果を活用できれば，あらかじめ用意した模範解答プログラムと学生が提出したプログラムとを比較することにより，プログラムの動作の正しさの検証も自動化することが可能である．しかしプログラムの等価性については，関数型言語・論理型言語など表現に制約の多い言語や項書き換え系などを対象とした研究が多く，C言語などの実用的な言語を対象とした研究はあまり進んでいない．

そこで本研究では，等価性の検証が可能な，ある程度制限された範囲内でプログラムの意味解析を行い，プログラムの等価性を検証するツールの開発を行う．開発するツールを模範解答プログラムと学生の提出プログラムとの間に適用することで，限られた範囲内ではあるがプログラムの等価性を検証して添削の支援とすることができる．また，意味論の研究に関しては，自然言語を対象とした類似性判定の応用研究も行われている[2]が，プログラムに対して開発する解析ツールを適用すれば，プログラムの不正コピーに対しても効果があり，添削指導支援の一助になるものと考えている．

本稿では，2章で開発するシステムの概要を述べ，3章で意味解析手法の詳細を述べる．4章では検証実験についてのべ，5章で成果をまとめる．

＊情報工学科

2．システム概要

関数型言語や論理型言語など，論理的枠組みから派生した言語の意味論については，古くから研究が盛んに行われている．一方，実用的な開発言語であるＣ言語等では，構文や意味の記述が複雑なため，意味解析そのものは可能でも，意味の等価なプログラムのクラスを規定することは難しいため，コンパイラの最適化処理などにおいても，部分的な等価変換によって最適化を行っているのが現状である．

このような状況を踏まえて，本稿では，図１に示すような意味解析ツールの開発を行う．

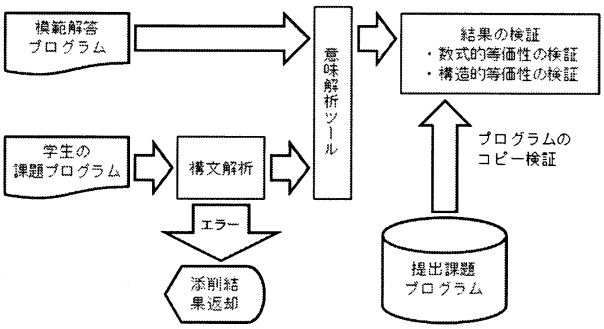


図１　意味解析ツールの概要

このツールでは，出題する課題に対してあらかじめ模範解答を用意し，学生が提出したプログラムと模範解答の意味解析を行う．次に構文上問題がないかどうか確認した上で，解析可能な範囲内でプログラムの意味に不一致点がないかどうかを確認する．また，プログラムの類似性から，プログラムの不正コピーの可能性についても検証する．前述のようにプログラムの等価性を判定するための完全な意味解析処理は不可能であるため，本ツールでは添削指導に有効と思われる，数式的等価性および構造的等価性に関する意味解析処理を実装している．

3．意味解析

開発するツールで実装する意味解析は，数式的な等価性を判定するための解析と，プログラムの構造的な等価性を判定するための解析とで構成されている．以下に詳述する．

（1）　数式的等価性

一般に計算式を簡略化することによるプログラム等価変換（最適化処理）はコンパイラなどでも活用されている．これは連続するステップを１つのステップにまとめることで実現できる場合に行う変換であり，従来の表示的意味論によって実現可能である．

本ツールではこれに加え，数式としての等価性を検証することによってプログラムの等価性を評価することが可能である．例えば，変量ｘに関するデータが配列ｖ[n]に代入されているとき，その分散Ｖは

$$V = E[X^2] - E[X]^2$$

$$V = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}(v[k] - E[X])^2$$

の２種類の方法で求めることができる．ここにE[X]はデータの平均であり，E[X²]はデータの二乗の平均である．これらの式をプログラムとして実装すると，プログラムの構造はまったく異なるものになるが，分散がｖ[k]の関数になっていることに注目すると，どちらの数式を用いたとしても分散は

$$V = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}v[k]^2 - \frac{1}{n^2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}v[i]v[j]$$

となるため，係数を比較することにより等価性を判別することが可能である．

一般に，この例のように分散Ｖが，広域変数や途中で値が変わる変数にまったく依存しないで計算できる場合というのは非常に特殊な例であるが，プログラミングの入門段階や数値計算の演習問題の段階では，出題できる課題に限界があり，かつ，意図的に本ツールが活用できるように課題を工夫することで，十分一般性のある意味解析手法として使うことが可能であると考えられる．

（2）　構造的等価性

残念なことであるが他の学生のプログラムをコピーして課題を提出する学生が後を絶たない．単なるコピーであれば教員は一目でコピーであることを確認できるが，年を重ねるに従って学生のコピー技術も高まっており，コピーしたプログラムに手を加えることによって，慣れない教員がみると少々のチェックではコピーしたレポートを検出できない場合も少なくない．

そこで，逆に，コピー検出に利用することを念頭において，意味解析によるプログラムの等価性評価を検討する．すなわち，不正にコピーされたプログラムを改変して得られたプログラムと，もとのプログラムとが等価であることを検出する目的で意味解析ツールを構築する．

長年の経験から，プログラムをコピーして改変する場合，一般に下記のような改変を施すことが多い．

（1）　変数名や関数名などを変える．
（2）　コメントを削除する．
（3）　関数の順番を入れ替える．
（4）　段付けやスペース・タブの数など，一部の書式を変更する．

他にも改変の方法は多様であるが，基本的にコピー・改変を行おうとする場合，課題プログラムの内容を学生本人が理解していない場合が多く，従って，内容に踏み込んだ複雑な改変は不可能であることから，どのような改変を行うにせよ，見た目の改変を重視することは共通であると言える．

そこでこのような改変を行っても，改変残後のプログラムが等価であることを判定するために設計した意味解析ツールの概略を図２に示す．

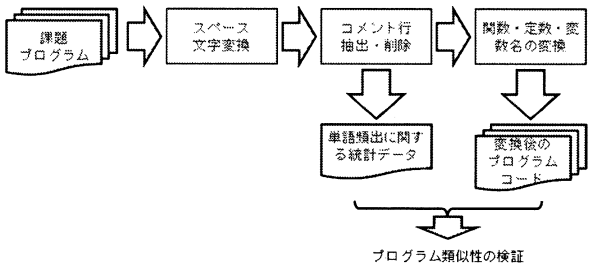


図２　意味解析ツールの概要

本ツールでは比較したい２つのプログラムに対し，スペース文字の変換を行った後，コメント行に関する処理を行い，関数の並び替え，変数名および関数名の変換を行う．得られた結果から２つのプログラムの類似性を検証し，等価性が認められるかどうかを判断する．具体的には以下の処理を行う．

（a）スペース文字の変換

通常，プログラム開発中にスペースやタブはエディタが自動的に挿入することが多いが，デバッグを行って最終的な完成を見たときに，それらは無秩序に混在していることが多い．本来，スペースやタブの並びはプログラムの意味には全く影響しないが，学生がプログラムを改変する場合，これらの並びを意図的に変更することは少ないため，コピーの手がかりとしては重要な要素になりうる．そこで，本ツールでは，スペースとタブもプログラムを構成する１つのリテラルであると考え，解析結果を視覚的に表すために，スペースを△，タブを□に変換して表現する．

（b）コメント内単語の統計処理

コメント部分は，本来プログラムそのものには関係ない部分であるが，これもプログラムのコピーを判断する手がかりの一つとして重要である．本ツールでは，コメント行の内容に対して構文解析を行い，単語ごとの出現頻度を統計データとして抽出する．さらに統計処理後，すべてのコメントを削除する．

（c）関数の並び替え

Ｃ言語においては，関数定義の順番に依存して，関数のプロトタイプ宣言を行う必要がある場合もある．そこで，プログラムファイル内に宣言されているものを，include 文，define 文，関数宣言の順にまとめ，それぞれは名前がアルファベット順になるように整列する．また関数のプロトタイプ宣言はすべて削除する．

本来，プログラムとしてプロトタイプ宣言は必要不可欠なものであるが，本ツールの目的は２つのプログラムの意味的等価性を検証することであるため，このような部分を削除することは，特に問題にはならないと考える．

（d）関数名・変数名・定数名の置き換え

関数や変数・定数の名前がプログラムの意味に影響することはない．本ツールでは，２つのプログラムの等価性を判定しやすくするため，関数・変数・定数の名前を出現する順番に「a001」などのような連番の名前に変換する．

４．検証実験

本ツールの有効性を検証するために，実験を行った．使用したデータは，プログラミング演習の課題として適切な，「１からＮまでの和を求めるプログラム」「与えられた正数の階乗を求めるプログラム」「ベクトルの内積を求めるプログラム」「行列の和を求めるプログラム」「行列の積を求めるプログラム」の５題で，いずれもプログラムの多様性を排除するため，与えられた仕様を満たす関数を作ることを課題とした．今回は，プログラムの不正コピーに関する検出精度も調査したいため，被験者である学生５名には，作成したツールの中身は一切伝えずに，意図的にプログラムをコピーするなどして課題プログラムを作成してもらった．

（1）数式的等価性の検証

あらかじめ５つの課題に対して模範解答を作成しておき，合計２５の提出課題の正しさを，本ツール

を用いて検証した．最初の段階で，すでに２５件中６件に構文上または仕様上の誤りが検出された（驚くことに実際にコンパイル実行していないケースがある）が，それらはスクリプトによる自動処理によって自動検出されたため，すべて訂正してもらったものを改めて実験データとして用いた．

その結果，２５件中２４件について，少なくとも模範解答と同様の計算をしているプログラムである（正しいプログラムである）ことが本ツールによって確認できた．プログラムの正しさを検証できなかった１件は，行列の和を求めるプログラムであるが，この提出プログラムでは，各成分の和を計算するために，わざわざ和を計算する部分を１つの関数として実装していたため，各成分を計算するための式が等価かどうか判定できなかったことが原因である．今回，意図的にさまざまなプログラムを作ってもらっており，通常は演算子で書けるものをあえて関数にすることはしないが，このように定義した関数を使って新しい計算をする場合に，本手法の限界があると考えられる．

（２）構造的等価性の検証

次に学生が提出した任意の２つのプログラムに対して，構造的な等価性が見られるかどうか（コピーしたかどうか）の検証を行った．データ収集後にヒアリングを実施したところ，実際に他人のプログラムを改変して提出したものは２５件中１１件であることがわかっているが，実際にコピーの可能性を検出したのは，２５件中１４件であった．１４件のうち，１０件は実際にコピーしたものであったが，４残る４件はコピーしたものではなかった．検出に成功したコピープログラム１０件について分析を行ったところ，変数名の変更以外全く同じであるため検出できたのが５件，変数名を変更し，さらに一部分の書式を変更したものが３件，変数名の一部を変更して，コメントを削除したものが１件，変数名を変更して一部分の書式を自分で変更したものが１件であった．特に書式に手を加えた１件については，図３のように，一見するとコピーとは判定しにくいものであるが，段付けの部分にタブとスペースの特殊な列が並んでおり，そこまで一致するは不自然であるという理由からコピーの可能性を検出したものであった．

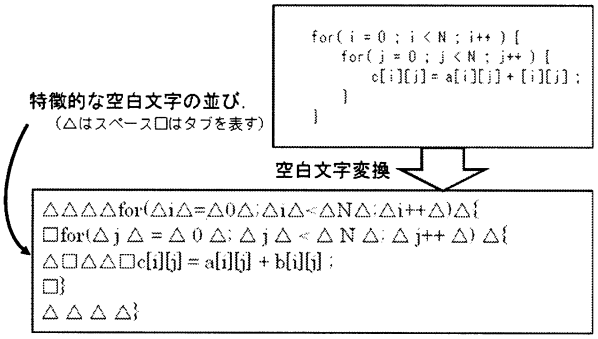


図３　コピー検出の例

逆に，本来はコピーされたものではないが，本ツールによってコピーの可能性があると判断されたものが４件ある．これは，「１からＮまでの和を求めるプログラム」の課題が２件と「与えられた正数の階乗を求めるプログラム」の課題が２件である．原因としては，いずれも数行で書けるプログラムであるため，自然と同じ形のプログラムになってしい，コピーによるものかどうかの判別ができないためだと考えられる．

以上の結果から，課題プログラムの添削を行う上で，これまで教員のスキルを活かした手作業による指導の一部を自動化することが可能となり，開発した意味解析ツールの有効性が確認できた．また，このツールで扱う意味解析によって，学生が故意にプログラムをコピーしてしまう問題に対する防止策の一つとしても有効であると考えられる．

５．むすび

プログラミングなど，本当の意味での実力を付けるためには大量の課題による演習が必要不可欠である．本稿では，その指導を支援するための方法として，意味解析ツールを用いた方法を提案した．このツールを用いると，数式レベルでのプログラムの等価性を判断し，プログラムが正しいかどうかを判定するための支援を受けることができるだけでなく，構造レベルでの等価性評価を逆用することにより，学生による不正なプログラムコピーを見抜くための支援も受けられることがわかった．本稿で示した実験では，意味解析の性能評価のために，意図的に多様なプログラムを作成してもらってサンプルデータを収集したが，今後は，実際のプログラミング演習に活用して，その効果を評価してゆく予定である．

参考文献

[1] Aho, A. V. and Ulman, J. D., “Theory of Parsing, Translation, and Compiling”, vol. 1, Printice-Hall, NJ, 1972.

[2] 石井徹，金子敏信，“類似レポート判別アルゴリズムの提案”，2008年信学総大，情報・システムソサイエティ特別号，Mar., 2009.

（平成21年9月25日　受理）

ユウロピウム（Ⅲ）とジエチレントリアミン五酢酸のモル比５：３金属錯体の生成

工藤節子*，佐々木　慧**，工藤翔慈***

Formation of a Metal Complex with a 5 : 3 Molar Ratio of Europium (Ⅲ) and Diethylenetriaminepentaacetic Acid

Setsuko KUDO, Satoshi SASAKI, Shoji KUDO

A europium (Ⅲ) complex with a 5 : 3 (metal:ligand) molar ratio was formed by the reaction of europium (Ⅲ) oxide and diethylenetriaminepentaacetic acid in pure water. The composition of the resulting pentanuclear complex, $Eu_5(dtpa)_3$, was estimated on the basis of elemental analysis data. The hydrated complex has been characterized by IR spectroscopy, X-ray diffraction, thermal analyses, and pH measurements. The IR spectra showed a high probability of a bridged COO^- structure. The complex did not cause a lowering of the pH of CO_2 saturated water.

(Keywords: lanthanide, europium (Ⅲ), DTPA, contrast-enhancing agent)

1. はじめに

ランタニド(III)と N,N,N',N'',N''- ジエチレントリアミン五酢酸（Fig.1）のモル比 1 : 1 錯体は，特に医療分野で注目されてきた．例えばガドリニウム(III)錯体は核磁気共鳴（MRI）診断法の造影剤（Magnevist®）[1] として，ユウロピウム(III)錯体はその蛍光特性からラベル化剤[2][3]として応用されている．上記の配位子は代表的なキレート化剤の一つであり，DTPA としてよく知られるが，本報では H_5dtpa と略記する．

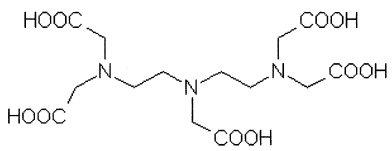


Fig.1　Structure of H_5dtpa (or DTPA)

一方，ランタニド(III)とポリアミノカルボン酸のモル比 1:1 以外の組成をもつ錯体についてはあまり知られていない．

本研究では，酸化ユウロピウム(III)と H_5dtpa の直接反応によるモル比(金属：配位子) が 5 : 3 の生成物について性質を検討したので，報告する．

2. 実　験

2.1 合 成

H_5dtpa（同仁化学研究所）を含む水溶液中に Eu_2O_3（和光純薬，99.9%）をモル比(金属：配位子)として 5.1 : 3.0 の割合で加え，約 60℃で反応させた．吸引ろ過後，ろ液を加熱濃縮し，母液から生成物を分離した．必要に応じて再結晶により精製した．生成物は減圧乾燥（室温，約 2h）し，大気中で恒量にした．

2.2 元素分析

大気中で恒量にした生成物，更に加熱乾燥（150℃，1h）した生成物の有機元素分析（C, H, N）を理化学研究所に依頼した．前者について重量分析法または ICP 発光分光分析法により，金属分析を行った．

2.3 装 置

赤外吸収スペクトルは FT/IR-620（日本分光）を用いて，KBr 錠剤法により測定した．熱分析は TG/DTA 6300（セイコーインスツルメンツ）を用い，N_2 雰囲気（流量 50mL/min），昇温速度 10℃/min の条件下で行った．粉末 X 線回折は Cu $K\alpha$を線源とし，X 線回折装置 D8 ADVANCE システム（Bruker AXS）で行った．

3. 結果と考察

＊物質工学科　＊＊専攻科物質工学専攻修了
＊＊＊物質工学科卒業生（東京農工大学工学部化学システム工学科）

3.1　生成物の組成

生成物の元素分析結果の例を Table1 に示す．生成物の組成は $Eu_5(dtpa)_3 \cdot xH_2O$ に近く，H の分析値は熱乾燥した方が大気中で恒量にした場合より計算値との一致がよかった．加水分解生成物の可能性は低いと思われるが，上記組成は次の一般式で表わされる他組成と計算値が等しく，区別できない．

$$Eu_5(H_2dtpa)_p(Hdtpa)_q(dtpa)_r(OH)_{2p+q} \cdot (x\text{-}(2p+q))H_2O$$

ここで，p+q+r=3（p, q, r は 0～3 の整数），x は水和数である．酸化イットリウムと H_5dtpa の反応で得られたモル比(金属：配位子) 5:3 の生成物は，構造の詳細が不明なため計算値が明らかでないと報告されている[4].

3.2　赤外吸収スペクトル

Fig.2 に反応生成物と H_5dtpa の IR スペクトルを示す．H_5dtpa では 1600～1750cm^{-1} に 3 本の吸収帯がみられるのに対し，生成物では 1600 cm^{-1} 付近に 1 本の強い吸収帯がみられる．これはカルボキシラト錯体の生成[5]を示すものである．本研究で得られた Eu(III)錯体では $\nu_{as}(COO^-)$ と $\nu_s(COO^-)$ の吸収帯がそれぞれ 1588cm^{-1} と 1411cm^{-1} に現れ，その差（$\Delta_{complex}$）は 177cm^{-1} であった．この値は Δ_{H_5dtpa} すなわち 237cm^{-1} に近く，猪俣ら[6]の報告よりカルボキシラトは架橋配位している可能性が高い．

3.3　その他

熱分析では錯体の水和物が主として 2 ないし 3 段階で脱水された後，約 370℃で分解する過程が示された．X 線回折パターンから，この錯体は仕込み量や析出条件により，結晶にも非晶質にも成り得ることが明らかとなった．結晶性の錯体（大気恒量）では $2\theta \fallingdotseq 5.8°$ に Eu(III)を含む面による回折ピークがみられ，15.3 Å の面間隔が得られた．

CO_2 飽和水溶液中に錯体を溶解した際，pH は変化しなかった．pH 滴定曲線では，Eu(III)の加水分解 pH 以下で NaOH を消費するカルボン酸の存在は認められなかった．

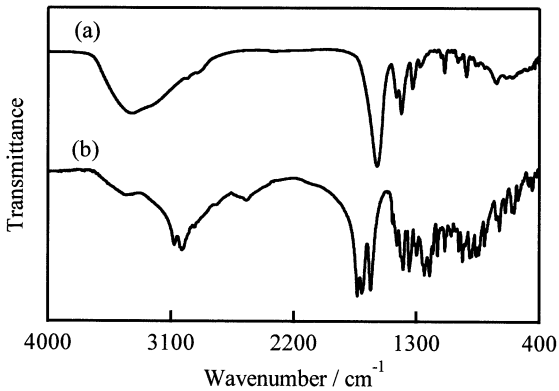


Fig.2　IR spectra of (a) $Eu_5(dtpa)_3 \cdot xH_2O$ and (b) H_5dtpa

本研究の一部は，平成 20 年度重点配分経費（東京高専学内予算，研究課題「ジエチレントリアミンペンタ酢酸を配位子としたランタニド(III)錯体の合成と性質－MRI 造影剤に関する基礎的研究－」，申請者：工藤節子）によって実施されました．深く感謝致します．

参考文献

[1] R. B. Lauffer, *Chem. Rev.*, **87**, 901-927, 1987.
[2] K. Blomberg, C. Granberg, I. Hemmilä, T.Lövgren, *J.Immunol. Meth*, **86**, 225-229, 1986.
[3] K. Blomberg, C. Granberg, I. Hemmilä, T.Lövgren, *J. Immunol. Meth*, **92**, 117-123, 1986.
[4] 足立吟也，塩川二朗，石野俊夫，日本化学雑誌，**87**, 346-350, 1966.
[5] K. Nakamoto, *"Infrared and Raman Spectra of Inorganic and Coordination Compounds"*, Part B, John Wiley & Sons, Inc., New York (1997) pp.59-60.
[6] Y. Inomata, T. Sunakawa, F. S. Howell, *J. Mol. Struc.*, **648**, 81-88, 2003.

（平成 21 年 8 月 27 日　受理）

Table 1　Results of elemental analyses of $Eu_5(dtpa)_3 \cdot xH_2O$

Drying conditions	Composition	C / %		H / %		N / %		M / %	
		Calcd	Found	Calcd	Found	Calcd	Found	Calcd	Found
Ambient atmosphere	$Eu_5(dtpa)_3 \cdot 24H_2O$	21.40	21.34	4.36	3.95	5.35	5.14	32.24	32.3
	$Eu_5(dtpa)_3 \cdot 23H_2O$	21.57	21.45	4.31	3.86	5.39	5.18	32.48	32.42
Heating (150℃, 1h)	$Eu_5(dtpa)_3 \cdot 10H_2O$	23.97	24.10	3.54	3.66	5.99	5.99	36.10	—
	$Eu_5(dtpa)_3 \cdot 5H_2O$*	25.04	24.94	3.20	3.09	6.26	6.04	37.71	—

*Amorphous

理科教育のためのCO_2/O_2計測システム

高橋三男*，山内峯生**，羽鳥広範***，松岡　敏***，松原静郎****

CO_2/O_2 Measurement System for Science Education

Mitsuo TAKAHASHI, Mineo YAMAUCHI, Hironori HATORI, Satoshi MATSUOKA, Shizuo MATSUBARA

We have developed CO_2 and O_2 measurement system that meets science education. The system measures time varying O_2 and CO_2 density. The system is composed of CO_2 sensor, O_2 sensor, voltage measurement device, Windows PC, and data gathering software. The CO_2 sensor is purchased from the Figaro company. The O_2 sensor is our original Galvanic sensor. Using the above system, we have practiced three experiments of CO_2 and O_2 phenomenon such as combustion of candle, breath of man, and respiration of plant.

(Keywords: Science education, Galvanic type Oxygen Sensor, CO_2 sensor, O_2 sensor, USB, Data gathering)

1.　はじめに

1.1　二酸化炭素（CO_2）と酸素（O_2）

二酸化炭素（CO_2）や酸素（O_2）は我々の生活に密着した気体である。たとえば植物の光合成はCO_2を消費してO_2を生成する。このとき太陽エネルギーを炭水化物として蓄える。人間の呼吸では肺でO_2が取り込まれ血液のヘモグロビンで体内細胞に運ばれる。ここで炭水化物などの燃焼に使用される。人間はこのとき発生する熱エネルギーを生体活動の維持に使用している。このとき体内細胞でCO_2が生成される。このCO_2はヘモグロビンで運ばれ肺から放出される。植物も呼吸しO_2を消費しCO_2を生成する。植物では血液に相当するものが無いため空気中のO_2は細胞と直接に作用する。燃焼はO_2を消費してCO_2を生成する。このとき熱エネルギーが発生する。熱機関はこのとき発生する熱エネルギーを応用したものである。

1.2　CO_2とO_2に関する実験

CO_2とO_2の関係は、光合成、燃焼、呼吸など我々の身の回りの生活に関係している現象でもある。このため理科教育の実験テーマとして多く紹介されてきた。理科の教科書ではCO_2とO_2を検出するのに「検知管式気体測定器」が紹介されている。検知管式気体測定器は、検知管と気体採取器とで構成されている。検知管は細いガラス管でできており、一本が数百円の使い捨てである。ガラスの扱いに危険性が伴い、使い捨てのため環境問題にも良いとはいえない。教育現場では、多人数で実験したり、実験を繰り返したりすると多額の費用が発生する。測定原理として対象ガスと発色試薬との反応を利用しているため精度も良くない。また濃度の時間変化も測定できない。検知管を用いた実験は、CO_2とO_2が「増えた」、「減った」を実証する比較的粗い実験であった。

最近、高精度なCO_2センサ、O_2センサ、測定回路が入手可能な環境になってきた。これらを使って理科教育の実験に使用できる高精度なCO_2/O_2計測システムを開発した。このCO_2/O_2計測システムは（1）高精度であること、（2）CO_2濃度とO_2濃度の時間変化を同時に計測できることが特徴である。これにより光合成、燃焼、呼吸などの実験でCO_2濃度とO_2濃度の時間変化を高精度に計測できるようになった。

今回、開発したCO_2/O_2計測システムと、この計測システムを使った理科教育の実験例について報告する。

＊物質工学科　＊＊元東京工業高等専門学校　＊＊＊教育研究支援センター　＊＊＊＊桐蔭横浜大学

2． 測定システム

2．1 全体構成

CO_2/O_2 計測システムは、CO_2 センサ、O_2 センサ、直流電圧測定器、パソコン、そのパソコン上で動作するデータ収集ソフトウエアから構成されている。図１に CO_2/O_2 計測システムの構成図、図２に直流電圧測定器、CO_2 センサ、O_2 センサを示す。

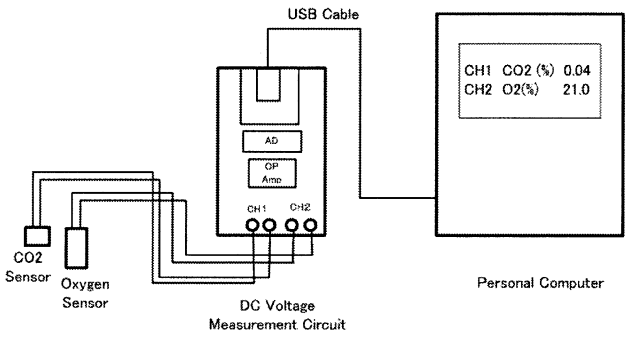


図1 CO_2/O_2 計測システム構成図

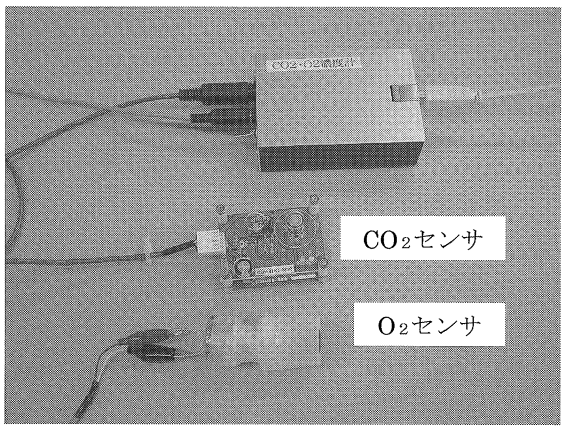


図２ 直流電圧測定器とセンサ

2．2 CO_2 センサ

高精度な CO_2 センサを自作することは、現状では難しいため市販品から選択することにした。市販品の CO_2 センサの原理は、赤外線吸収方式のものと固体電解質方式のものがある。赤外線吸収方式は高精度であるが高価である。今回は値段が手ごろで測定範囲もほぼ十分である固体電解質方式のフィガロ技研[1]の CO_2 センサモジュールを採用した。このモジュールは、CO_2 濃度が 9,000PPM まで対応できるもの(CDM4161-M00)と 45,000PPM まで対応できるもの (CDM4160-H00) との２種類がある。図３に CDM4161-M00、図４に CDM4160-H00 のフィガロ技研のカタログからの写真を示す。表１にその仕様を示す。

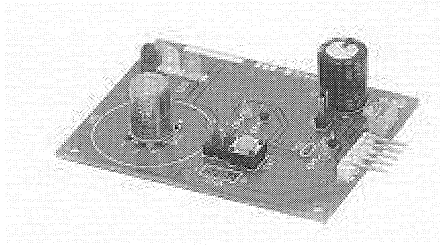


図３ CDM4161-M00

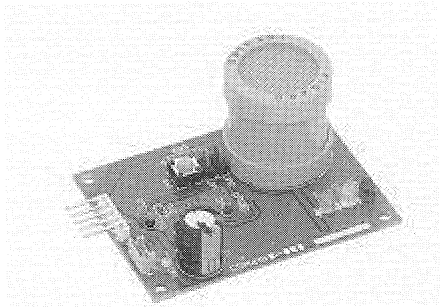


図４ CDM4160-H00

表１ CO2 センサモジュール仕様

	CDM4161-M00	CDM4160-H00
検知濃度域	400-9,000PPM	400-45,000PPM
消費電力	0.3W	1.3W
突入電流	100mA	600mA

どちらも供給電源は 5.0V で、CO_2 濃度に比例した直流電圧を出力する。CO_2 濃度フルスケールで 4.5V の直流電圧を出力する。CDM4161-M00 は消費電力が少ないから USB 端子から電源供給できるという利点がある。しかし測定上限が 9,000PPM (0.9%) と少ないため CO_2 濃度が高くなる実験には使用できない。一方、CDM4160-H00 は消費電力が大きいので電源供給用に別途５V 電源を必要とする。低濃度での誤差は、CDM4161-M00 より大きいが、広範囲の濃度が計測できるので、呼気の実験のような高濃度の CO_2 計測が可能となる。

2．3 O_2 センサ

O_2 センサは東京高専・高橋研究室で開発した「隔膜ガルバニ電池式酸素センサ」である（詳細は参考文献[2]参照)。この O_2 センサは酸素分圧に比例した直流電圧を発生する。この直流電圧を測定することで酸素分圧を測定できる。この O_2 センサには以下の特徴がある。

（1）酸素透過膜にラップのポリエチレン膜を使用しているので、実験中に膜が破損しても安価に入手でき修復できる。
（2）使用されている電解液は、身の回りの材料である洗濯のりと重曹からできており安全性に工夫してある。
（3）センサ本体は穴の開いたシリコン栓で、透過膜と電解液を電極に簡単に装着できる。
（4）気体中の酸素濃度と液体中の溶存酸素の双方の測定に使用できる。
（5）学生全員が自作した O_2 センサを所有するため個々の学生が自主的にテーマを選択して実験できる。

2．4　直流電圧測定器

直流電圧測定器はCO_2センサとO_2センサからの出力電圧を受信し、増幅・AD変換し、パソコンにデータを送信する装置である。この直流電圧測定器はOPアンプ、PICマイコン（PIC16C771）、USBシリアル変換モジュールから構成されている。PICマイコンがAD変換とデータの送信処理を行っている。PICマイコンのAD変換分解能は12ビットである。この直流電圧測定器への電源はパソコンからUSBケーブルで供給される。

この直流電圧測定器は参考文献[3]で報告したものとほぼ同じである。今回、参考文献[3]記載のものから以下の改良を行った。

（1）零点調整がしやすいように零点調整用のスイッチを付けた。またケースをポリカーボネートケースからアルミケースに変更した、
（2）PICマイコンは12ビットAD変換のPIC16C771だけにした。10ビットAD変換のPIC12F675の使用は止めた。12ビットAD変換では入力電圧は0～4095の数値に変換される。従って有効数字は3.5桁である。
（3）各種のセンサに対応できるようにするためジャンパソケットでOPアンプの増幅度を調整できるようにした。
（4）部品配置を見直しプリント基板サイズを小型化した。
（5）センサと直流電圧測定器とをコネクタ接続にしてセンサ部分を容易に取り外して交換できるようにした。

2．5　データ収集ソフトウエア

データ収集ソフトウエアは直流電圧測定器からUSBケーブル経由でセンサ信号を受信して、その信号データをCO_2濃度・O_2濃度に変換し、その濃度をリアルタイムに数値とグラフで表示する。CO_2濃度・O_2濃度を音声で読み上げることもできる。また解析のためExcelに転送することもできる。このデータ収集ソフトウエアは先に参考文献[3]で報告したものとほぼ同じである。今回、参考文献[3]記載から以下の改良を行った。

（1）設定機能の機能アップ
参考文献[3]記載のものは、設定を変更するためにはエデイタで設定ファイルを書き換える必要があった。今回これらの設定変更を画面操作から出来るようにした。

（2）校正機能の機能アップ
校正は2つの校正点P1とP2で行う。校正点P1での出力電圧をX1、濃度などの物理量をY1とする。この出力電圧はセンサ出力電圧ではなく直流電圧測定器からの出力電圧である。校正点P2での出力電圧をX2、濃度などの物理量をY2とする。X1、Y1、X2、Y2の4つのパラメータを校正データとして保存する。出力電圧Xに対する校正された物理量Yは以下になる。

$$Y=(Y2-Y1)/(X2-X1)*(X-X1)+Y1$$

CO_2センサとO_2センサでは校正点P1ではX1=0、Y1=0であるから校正された物理量Yは以下の簡単な式になる。

$$Y=(Y2/X2)*X$$

今回、新たにハードウエア校正とソフトウエア校正という考え方を取り入れた。ハードウエア校正はセンサ仕様書の情報を校正データとする。すなわち仕様書記載のセンサ電圧を入力したときの直流電圧測定器の出力電圧をX1、X2とする。これに対応する仕様書記載の物理量をY1、Y2とする。

ソフトウエア校正は物理量が分かっている校正環境（校正点P1、P2）で実際にセンサを使って物理量測定し、直流電圧測定器の出力電圧X1,X2と物理慮Y1,Y2を校正データとする。CH1、CH2ともに2つの校正点P1、P2のそれぞれでハードウエア校正とソフトウエア校正ができるようにした。

2．5．1 主画面

データ収集ソフトウエアを起動するとパソコンと直流電圧測定器との USB 接続が確立され図5の主画面が表示される。零点校正、ソフトウエア校正、設定、測定開始ボタンが主なメニューとボタンである。画面上部がパラメータ設定部、画面中央および左下がデータ表示部、画面右下がグラフ表示部である。直流電圧測定器とパソコンは USB 接続されている。ソフトウエア上ではUSBはパソコンの COM ポートを使用して接続されている。このためパソコン側から見ると直流電圧測定器は RS232C で接続されているように見える。従来こうした USB 接続では使用可能なパソコンの COM ポートの番号を調査してソフトウエアに手入力する必要があった。今回のデータ収集ソフトウエアでは使用可能なパソコンの COM ポート番号は探索されて自動記入される。このため COM ポート番号を手入力する必要はない。

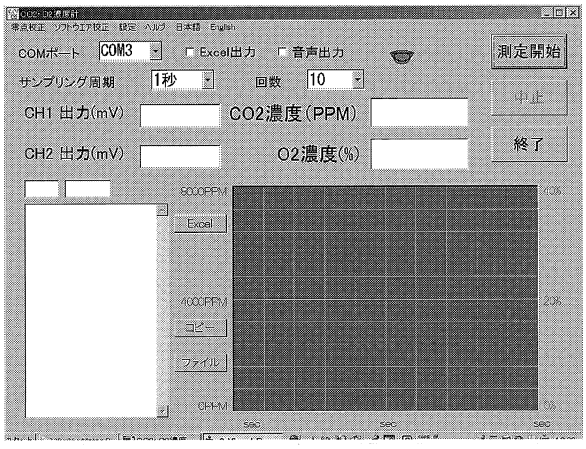


図５　主画面

2．5．2 設定

このデータ収集ソフトウエアは汎用ソフトウエアであるが、CO_2/O_2 濃度計ソフトウエアとしてリリースされるとき、多くは CO_2/O_2 濃度計としてすでに設定されている。使用者が新たに設定変更する必要がある場合は、CO_2 センサ種類の変更（CDM4161-M00 から CDM4160-H00 への変更）、濃度表示単位の変更（%から PPM への変更）、濃度表示フォーマットの変更などである。このときこの設定機能を使用する。

設定画面は、全体設定画面、CH１設定画面、CH2 設定画面から構成される。

図６に全体設定画面を示す。ここでは CH1 のセンサ名称、CH2 のセンサ名称、データの表示ラベル、桁数などの表示フォーマットを設定する。CO_2 濃度単位を PPM から%に変更するときは図６の赤色マーク部分を変更する。

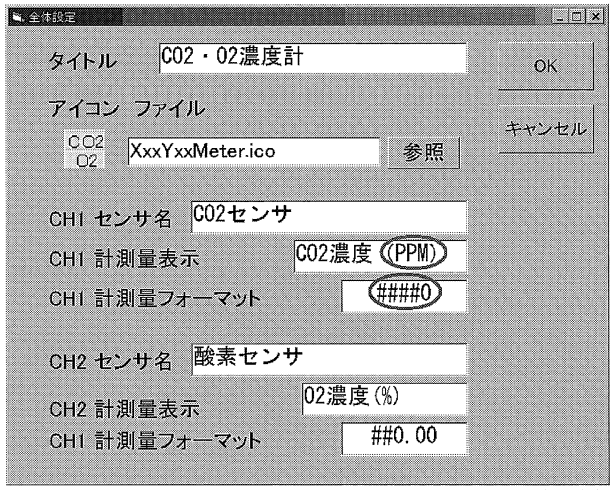


図６　全体設定画面

図７に CH1 の設定画面を示す。ここでは CH1 直流電圧測定器からの出力電圧を CO_2 濃度に変換するためのハードウエア校正データ、CO_2 濃度をグラフ表示するときの表示ラベル、および表示範囲を設定する。ハードウエア校正では、２つの校正点 P1 と P2 での直流電圧測定器出力電圧 X1、X2 と CO_2 濃度 Y1、Y2 を校正データとして定義する。校正点 P2 は後でソフトウエア校正するためソフトウエア校正にチェックを入れる。

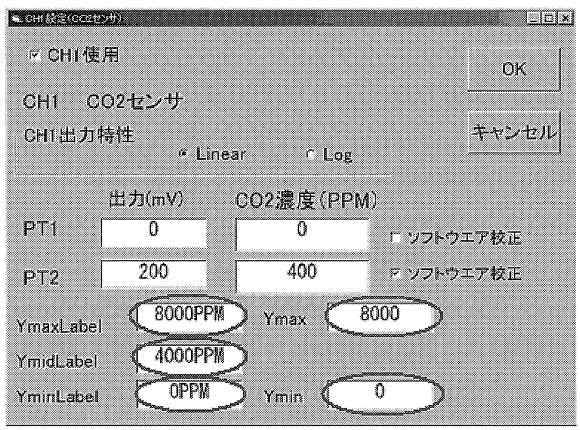


図７　CH1 設定画面

校正点 P2 でのソフトウエア校正は、CO_2 濃度 Y2 が分かっている環境で、CH1 からの直流電圧測定器の出力電圧 X2 を計測してこの値を校正データとして定義する。ソフトウエア校正がチェックされていると先のハードウエア校正値は無効になりソフトウエア校正値が優先される。

CH２に対しても同様に設定する。

表２に CO_2 センサを交換するときの設定変更例を示す。これは CO_2 濃度 8000PPM まで計測する CDM4161-M00 を CO_2 濃度 40000PPM まで計測する CDM4160-H00 に変更するときの設定例である。YmaxLabel、YmidLabel、YminLabel はグラフの表示ラベルの設定である。Ymax と Ymin はグラフ表示範囲の設定である。表示ラベルはグラフの Y 軸のラベルである。これは内容が分かればよいから 40000PPM を 40kPPM としても良い。図７の赤色マーク部分を表２のように変更する。

表２　CO_2 センサ交換での設定例

	CDM4161-M00	CDM4160-H00
YmaxLabel	8000PPM	40000PPM
YmidLabel	4000PPM	20000PPM
YminLabel	0PPM	0PPM
Ymax	8000	40000
Ymin	0	0

２．５．３ 零点校正

測定に先立って零点校正を行う。この零点校正は OP アンプのオフセット値をソフトウエアで補正するために行う。零点校正スイッチを ON として（センサからの入力電圧が零であるとして）、このときの直流電圧測定器からの出力電圧を測定する。この電圧をオフセット値として保存する。CO_2 濃度・O_2 濃度測定のときは直流電圧測定器からの出力電圧をこのオフセット値で補正する。この零点校正は直流電圧測定器を取り替えたときに一回行うだけでよい。図８に CH1 の零点校正画面を示す。CH2 の零点校正画面も同様である。

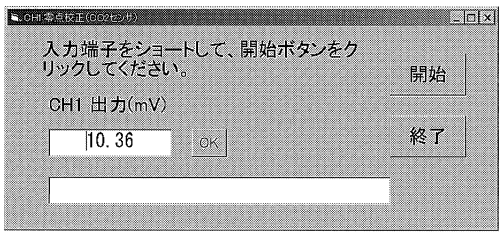


図８　零点校正画

２．５．４ ソフトウエア校正

ソフトウエア校正は校正点での CO2 濃度 Y1、Y2 に対する直流電圧測定器からの出力電圧 X1、X2 を測定して、これらのデータを校正データとして保存する。図７の CH1 設定画面でソフトウエア校正にチェックがあるときはこのソフトウエア校正の値がハードウエア校正の値よりも優先される。

図９に CH1 のソフトウエア校正の画面を示す。図７の CH1 設定画面において、校正点 P1 では、CO_2 濃度 0PPM(Y1=0)に対する出力電圧が 0mV（X1=0）であること、およびこれに対するソフトウエア校正は無いことが設定されている。すなわち校正点 P1 はハードウエア校正で使用されると設定されている。このため校正点 P1 に対するソフトウエア校正は行われなく、校正開始ボタンは無効になっている。

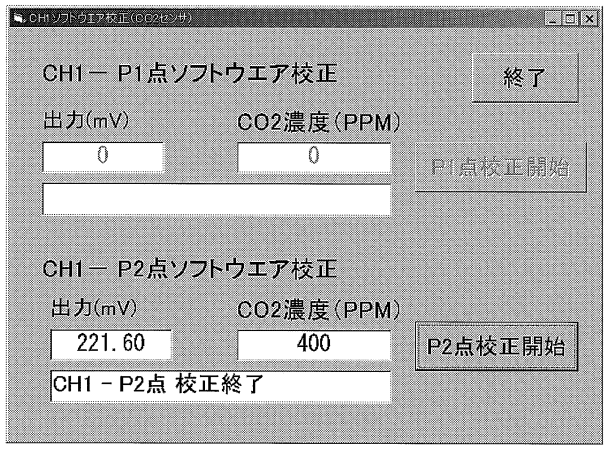


図９　ソフトウエア校正結果画面

図９は校正点 P2 でのソフトウエア校正結果の画面でもある。CO_2 センサを大気中に置き CO_2 濃度は 400PPM(Y2=400)であるとして校正した。CH1 出力電圧を測定した結果、出力電圧は 221.60mV(X2=221.60)であった。CH1 に対して、このデータ X2、Y2 を校正データとして保存する。

CH2 に対するソフトウエア校正も同様である。O_2 濃度は大気での濃度が 20.9%であるとして校正する。校正点 P2 である O_2 濃度 20.9%に対する出力電圧を測定して校正データとして保存する。

２．５．５　測定

サンプリング周期と回数を指定して、測定開始ボタンをクリックするとデータ収集が始まる。測定では、パソコンが直流電圧測定器からの出力電圧を受信し、校正データを参照して出力電圧値から CO_2 濃度・O_2 濃度への変換を行う。図 10 に測定画面を示す。CO_2 濃度・O_2 濃度に変換された

測定値がリアルタイムに表示される。同時にグラフにもプロットされる。音声出力がチェックされているときには CO_2 濃度・O_2 濃度が音声で読み上げられる。

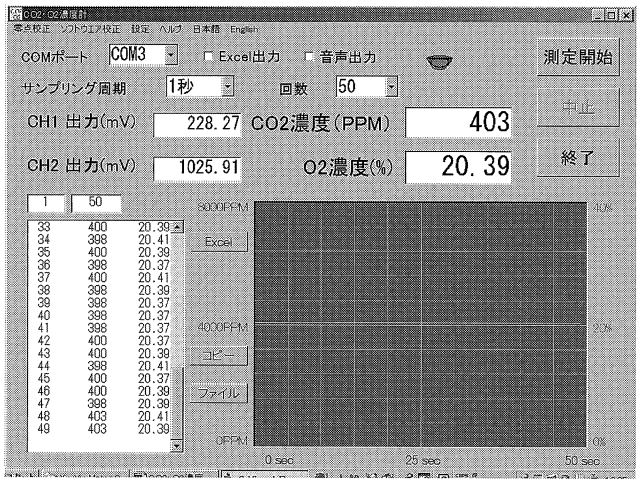


図１０　測定画面

２．５．６　付加機能

2.5.6.1　Excel 出力

Excel ボタンをクリックすると収集データが Excel ソフトに送信され Excel 画面でグラフ表示される。また「Excel 出力」にチェックがあるとデータ収集後に自動的にデータが Excel 表示される。

2.5.6.2　音声読み上げ

視覚障害者が CO_2/O_2 計測システムを理科実験で使う場合の対応として TTS（Text-to-Speech）機能を使用した音声読み上げ機能がある。主画面で、「音声出力」にチェックがあるとデータ収集ごとに CO_2 濃度・O_2 濃度が音声で読み上げられる。この機能を使用するにはパソコンにスピーカが接続されていること、および TTS エンジンソフトがインストールされていることが必要である。

2.5.6.3 日本語・英語　画面切り替え

英語圏でも使用可能とするため画面の言語切り替え機能がある。メニューで「英語」をクリックすると画面が英語表示画面に切り替わる。英語表示画面のメニューで「Japanese」をクリックすると画面が日本語表示画面に切り替わる。

3.　CO_2/O_2 計測システムを使った実験

今回作成した CO_2/O_2 計測システムを使った理科実験とその結果を紹介する。

3.1 ローソクの燃焼実験

燃焼に必要なものとして、燃えるものと酸素と温度が燃焼の３要素といわれている。ローソクが燃焼する場合、O_2 が消費され CO_2 が生成される。O_2 が少なくなると燃焼が維持できなくなり温度が低下してローソクが消える。ローソク燃焼過程での CO_2 濃度と O_2 濃度変化を実験で確かめる。ローソクの主成分はパラフィン（炭化水素化合物）のためローソクの燃焼の場合には CO_2 以外に水蒸気（H_2O）も発生する。容器は、上蓋と下床には不燃材ボードを貼り付けた熱帯魚飼育用のアクリル水槽（$30\times18\times25cm^3$）を使用した。また、ローソクの熱がセンサ群に影響しないように遮蔽板を設けた。ローソクの燃焼で発生する水蒸気の影響を取り除くため、水分吸収材として（塩化カルシウム）を挿入した。

3.1.1 実験配置図

図11にローソク燃焼実験配置図を示す。

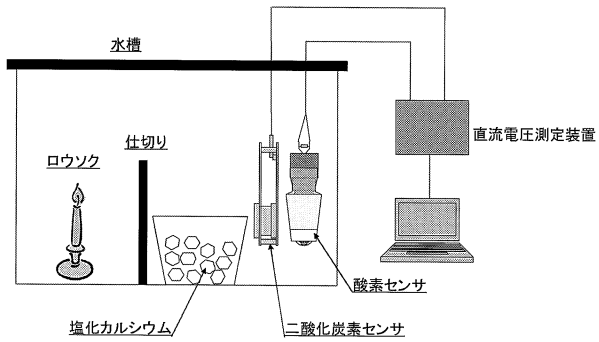


図11 ローソク燃焼実験配置図

3.1.2 実験結果

図12にローソクの燃焼実験結果を示す。

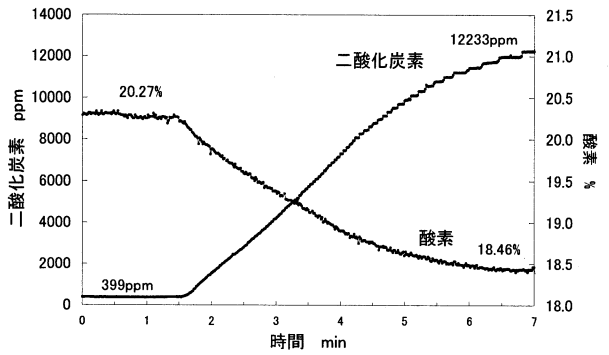


図12 ローソク燃焼による O_2 と CO_2 の経時変化

最初は O_2 濃度 20.27%、CO_2 濃度 399PPM である。燃焼が進むと O_2 が減少し、O_2 濃度が約 18.46%にな

るとローソクが消炎した。一方、CO_2 濃度が増加して12233PPMまで増加していることが観測された。O_2とCO_2 の濃度の合計は、19.8%となり、水蒸気の分を考慮するとほぼ、20.9%となることが分かった。

3.2 人間の呼吸実験

人間は、絶えず酸素を必要とし、一方で二酸化炭素を排出している。したがって生命を維持するために、空気中から酸素を体内に取り込み、体内で発生した二酸化炭素を体外に放出する。体内の血液の酸素と二酸化炭素は、体循環系を介して内呼吸（末梢組織）と外呼吸（肺）の間を運搬され、呼吸が成立する。今回、吐息による酸素濃度と二酸化炭素を計測した。

3.2.1 実験配置図

図13に人間の呼気実験配置図を示す。

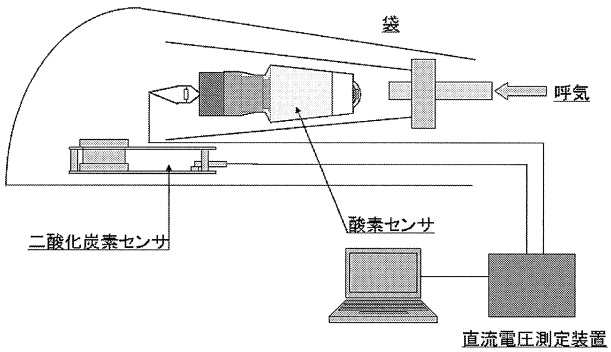


図13 人間の呼気実験配置図

3.2.2 実験結果

図14に人間の呼気実験結果を示す。

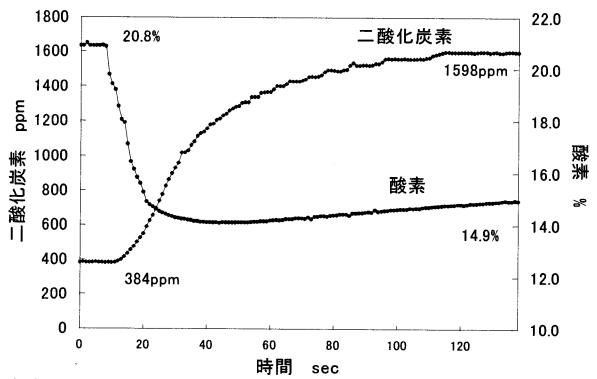


図14 人間の呼気によるO_2とCO_2の経時変化

O_2 濃度は、始めは 20.8%であるが、14.9%まで減少している。長く息を止めてから吐いた息を吹きつけたため O_2 濃度は通常の呼吸のときより大きく減少している。一方、吐息の CO_2 濃度は増加しているが、この値は低すぎ外気がもれているようである。
実験装置に改良が必要である。

3.3 リンゴの呼吸実験

果物は、肺のような呼吸器がなく、内呼吸だけである。リンゴが内呼吸していることを実験で確かめる。

デシケータにリンゴと CO_2 センサ、O_2 センサを入れる。リンゴが呼吸するとCO_2以外にエチレンなどのガスも排出して全圧が変化しているため気圧調整袋を設けた。

3.3.1 実験配置図

図15にリンゴの呼吸実験配置図を示す。

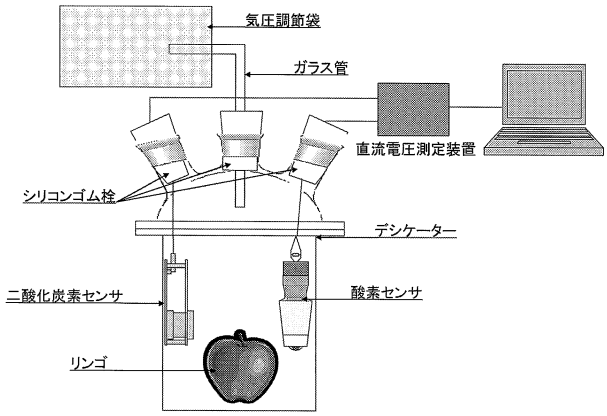


図15 リンゴの呼吸実験配置図

3.3.2 実験結果

図16にリンゴの呼吸実験結果を示す。

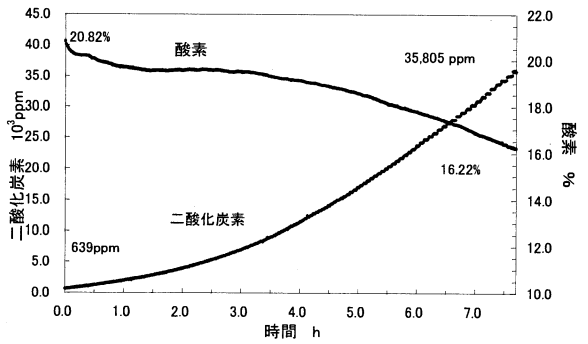


図16 リンゴの呼吸によるO_2とCO_2の経時変化

8時間にわたるCO_2濃度とO_2濃度の測定結果である。最初はO_2濃度 20.82%、CO_2濃度 639PPM であった。8 時間経過後には、O_2濃度約 16%、CO_2濃度約35800PPMになっている。たった1個のりんごが、

8 時間後には、約 3.5%もの大量の CO_2を排出していることに驚きを感じる。

4. まとめ

4.1 CO_2/O_2 計測システム

理科教育実験に使用できる CO_2/O_2 計測システムを開発した。この計測システムは CO_2 センサ、O_2 センサ、直流電圧測定器、データ収集ソフトウエアから構成されている。O_2 センサ、直流電圧測定器、データ収集ソフトウエアは自作した。CO_2 センサはフィガロ技研の固体電解質方式の CO_2 センサモジュールを採用した。このモジュールは、理科実験用センサとしては、様々な環境で CO_2 濃度を計測しなければならず、高濃度 CO_2 を測定する場合、下記の改善が必要である。

（1）形状が大きい。

（2）発熱がある。CDM4160-H00 は消費電力が 1.3W である。これは小型の豆電球の点灯と同じ発熱である。実験にとっては温度が一定であることが求められる。センサが発熱することは好ましくない。

（3）CO_2 センサが安定稼動するまでには時間がかかる。電源スイッチを投入してから実際の測定までに時間がかかる。一応 1 分位経過してから計測を行った。

（4）長期安定性と耐久性

固体電解質の CO_2 センサは、無通電時に空気にさらされた状態で放置すると空気中の水蒸気の影響で特性が劣化する。無通電時にはシリカゲルなど乾燥剤入りの容器で保管しなければならない。長期安定性と耐久性がまだ不足している。空気中に放置したためセンサ特性が劣化したこともあった。ただし測定では、毎回ソフトウエア校正をしてから実際の計測を行うようにした。このため CO_2 センサ特性の劣化が直接に測定値に影響することは無い。しかしセンサ特性が劣化すると出力が小さくなるため 12 ビット AD 変換出力の一部しか使用していないことになるから分解能が低下する。

CO_2 センサの校正も課題である。今回は CO_2 センサを大気に置いて、大気の CO_2 濃度が 400PPM であるとして校正した。このことは高い CO_2 濃度データは外挿で算出されていることになる。外挿は内挿よりも精度が悪くなる。本来はフルスケールに近い CO_2 濃度の校正ガスを使用した校正の方が望ましい。

4.2 CO_2/O_2 の計測実験

ローソクの燃焼実験、人間の呼気実験、リンゴの呼吸実験を行い、CO_2 濃度、O_2 濃度の時間的な変化を計測した。ほぼ予想どおりの結果や予想外の結果も得られた。CO_2 濃度と O_2 濃度変化を計測するとことで新しい発見がみられ、理科教育における CO_2/O_2 計測システムの有用性が期待される。

参考文献

[1] フィガロ技研のページ, http://www.figaro.co.jp/.

[2] 高橋三男,「手作り酸素センサの試作と実験」, トランジスタ技術 2003 年 12 号

[3] 山内峯生，高橋三男，パソコンを使用した電圧出力センサ対応 USB 接続データ収集システム，東京高専研究報告, 第 38 号(2)，2007.

（平成 21 年 9 月 25 日　受理）

トウモロコシにおける銅の分配と毒性

庄司　良*，長田拓哉*，田中優也**

Evaluation of copper distribution in vegetable body and copper toxicity on vegetable

Ryo SHOJI, Takuya OSADA, Yuya TANAKA

The effects of Cu on each parts growth of 5 vegetables (Maize, Barley, Rice, Cabbage and Radish) and accumulation of Cu in their roots were investigated in present study. In petri dish test, the concentration of Cu was controlled within the range from 10^{-5}mol/l to 10^{-2}mol/l. In the agricultural field test, the concentration of Cu was controlled within the range from 80 mg/kg to 130 mg/kg. The accumulation of Cu in maize roots which were grown in agricultural field and petri dish were higher than those in the other plants. These results indicated that maize is promising to remove Cu from soil and to accumulate Cu. Cu was significantly distributed in the root and berry of maize.

(Keywords: plant, maize, copper, phytoremediation)

1. 緒言

近年、企業の跡地や工場近くで重金属による土壌汚染が懸念される。日本では重金属の被害として、栃木県足尾銅山における銅による被害を始め、熊本県での有機水銀による被害、富山県でのカドミウムによる被害などが有名である[1)]。そのような重金属の被害が前例にあるにも関わらず、いまだに銅は農薬として使用されており、銅による土壌汚染は深刻な問題である。土壌汚染対策法によると土壌における銅の汚染濃度は 125ppm 以下と定められている。しかし、栃木県にある渡良瀬川周辺を中心にさまざまな地域の土壌で基準値以上の銅が検出されている[1)]。渡良瀬川は足尾銅山鉱毒事件で被害を受けた川であり、足尾銅山鉱毒事件が起きて 100 年以上たった現在でさえ土壌中に銅が多量に含まれている。重金属は自然に分解が起こらないことから、長期間土壌中に残存し、土壌中の重金属洗浄が困難である。また、足銅山鉱毒事件では足尾銅山付近の生物が大量に死亡したというように銅による生物への被害が深刻であった。以上のことより、銅は生物にとって多大なる害となるため土壌の浄化が必要となる。

現在用いられている一般的な土壌浄化手法は客土して土壌を移動させる方法が一般的である。しかし、この手法で土壌浄化を行うとコストと手間がかかってしまう点が問題となっている。よって、より簡便かつコストのかからない方法としてファイトレメディエーションが注目されている。ファイトレメディエーションとは植物を汚染地域に播種させ、植物に汚染物質を吸収、蓄積させることで、土壌浄化を行う手法である[2)]。

ファイトレメディエーションに用いる植物にとって必要な要素として植物に銅を多く吸収、蓄積できることが重要である。トウモロコシは根が深根性で他の植物に比べ、強い吸肥性をもっているため、重金属の吸

＊物質工学科　＊＊物質工学専攻

収量が多いと考えられる [3]。さらに、実への銅の分配が少ない場合には、食用として利用することができる。よって、ファイトレメディエーションに用いる植物としてトウモロコシを主に検討した。しかし、トウモロコシも高い銅濃度においては枯死するため、銅のトウモロコシに対する毒性を蓄積と同時に評価する必要がある。

そこで、トウモロコシにおける銅の各部位への分配及び銅の毒性を評価し検討した。また、他の植物と銅の毒性と蓄積性を比較した。

2. 実験方法

2.1 フィルター試験

滅菌シャーレにろ紙を敷き、pH を 6.0 ～ 6.5 に調製した塩化銅溶液を 4 ml 添加した。各濃度区につきトウモロコシ(*Zea mays*)、イネ(*Oryza sativa*)、オオムギ(*Hordeum vulgare*)の種を各シャーレにそれぞれ 10 粒ずつ播種し、暗所において 25℃で 5 日間生育した。5 日間生育後、根と芽の長さを測定した。

2.2 圃場試験

紙ポット内(1×1×3cm)内に土壌を加え、トウモロコシを 100 個播種した。2 週間、紙ポットでトウモロコシを生育したのち圃場を 7 区画に分割し、各濃度区(面積 1m×2.5m)につき 8 本移植して生育した。5 週間後、硫酸銅と炭酸カルシウムの混合液を 1L 作製し、濃度区ごと(土壌 2 ～土壌 7)に撒いた。7 週間後に 5 週間後と同様に濃度区ごとに溶液を撒き、11 週間後に 8 本のトウモロコシを無作為に 4 本採取し、それぞれの測定に使用した。また、土壌の銅濃度測定用の土壌も無作為に採取した。

実験に伴い土壌に添加した溶液の濃度および実験後の土壌の銅濃度を Table 1 に示した。

Table 1 圃場土壌に添加した溶液の濃度および実験後に採取した圃場土壌の銅濃度

土壌資料	土壌に添加した溶液の濃度 [mg/kg] 硫酸銅	炭酸カルシウム	土壌の銅濃度 [mg/L]
1	0	0	79.9
2	2000	2000	94.7
3	4000	2000	91.0
4	6000	2000	130.2
5	8000	2000	112.2
6	10000	2000	131.2
7	12000	2000	128.0

採取したトウモロコシを純水にて洗浄し、採取した各トウモロコシの根、葉、茎の長さを測定して、土壌資料 1 のトウモロコシに対する成長阻害率を比較した。

2.3 蓄積量分析

採取したトウモロコシを根、実に分け、120℃で 24 時間乾燥させた後、乾燥重量を測定した。重量測定後、熱濃硝酸で分解した。ろ過し、10ml に定溶して、ICP-AES にて銅濃度を測定した。

フィルター試験の試料も同様の方法で蓄積濃度を測定した。

2.4 解析

実験結果より成長率はロジスティック式(1)を用い、蓄積濃度はミカエリスメンテン式(2)を用いて各植物の成長率、蓄積濃度のフィッティングを行った。ここで、C は銅の総濃度[mg/kg]、％ＲＥは成長率[%]、EC_{50}は 50%成長阻害を生じる C の値である[mg/kg]。また、Cmax は各植物の最大蓄積

濃度[mg/kg]、Kは定数[mg/kg]である。

$$\%RE = \frac{100}{1+(\frac{C}{EC_{50}})^{\beta}} \quad (1)$$

$$蓄積濃度 = \frac{C_{max}\times[Cu]}{K+[Cu]} \quad (2)$$

3. 結果と考察

3.1 トウモロコシに対する銅の毒性評価

Fig. 1 に銅濃度変化に伴う部位ごとの成長率変化を示した。

同様にフィルター試験にて銅濃度変化に伴うトウモロコシ、オオムギ、イネ、ダイコン、キャベツの成長率変化について Fig. 2 に示し、トウモロコシの根と芽、オオムギの根、イネの根、ダイコンの根、キャベツの根についての 50%成長阻害を生じる銅濃度を Table 2 にまとめた。

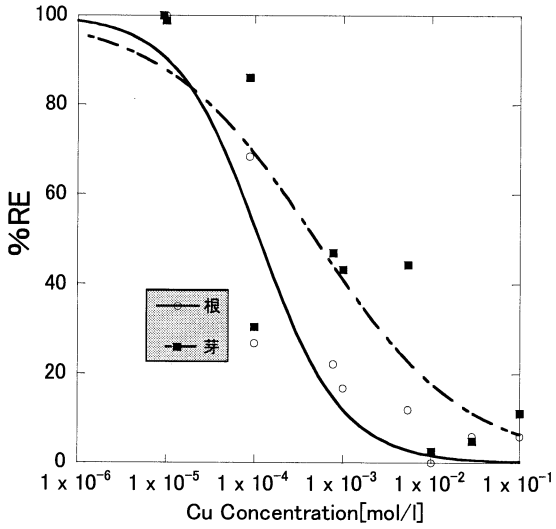


Fig. 1　フィルター試験における銅濃度変化に伴うトウモロコシの根、トウモロコシの芽の銅に対する成長率変化

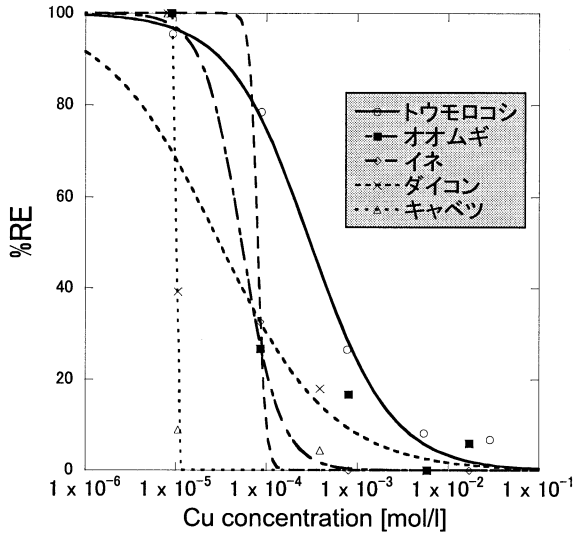


Fig. 2 銅濃度変化に伴うトウモロコシの根、オオムギの根、イネの根、ダイコンの根、キャベツの根の銅に対する成長率変化

Table 2　フィルター試験における銅に対する各植物の 50%成長阻害を生じる銅濃度(EC_{50})

	部位	EC_{50}[M]
トウモロコシ	芽	4.8×10^{-4}
	根	2.2×10^{-4}
オオムギ	根	0.5×10^{-4}
イネ	根	0.8×10^{-4}
ダイコン	根	0.3×10^{-4}
キャベツ	根	0.1×10^{-4}

根と芽を比較した際、根のほうに毒性が出やすいことから銅濃度が低い濃度区でも他の植物と成長率の比較を行った際、根は毒性が出やすいので比較が行いやすいと考えたので、今後は根による毒性評価を行っていく。

トウモロコシの根、オオムギの根、イネの根、ダイコンの根、キャベツの根について成長率を比較した際、圧倒的にトウモロコシが高濃度でも生育していることがわか

る。つまり、トウモロコシは他の植物と比較すると銅に対して耐性を持っていることがわかった。

しかし、フィルター試験は、実際のトウモロコシの生育方法とは違い、水耕栽培に近く、さらに生育期間が短いために圃場の土壌の結果と異なる可能性がある。よって、Fig. 3 に圃場での土壌の銅濃度変化に伴うトウモロコシの根とイネの根の成長率変化を示した。

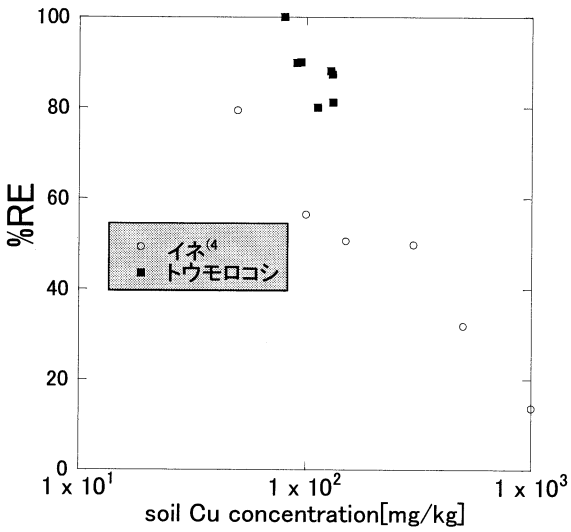


Fig. 3 圃場における土壌の銅濃度変化に伴うトウモロコシの根、イネの根の銅に対する成長率変化

トウモロコシとイネの成長率を比較すると、土壌中の銅濃度が 100 mg/kg 付近でトウモロコシの成長率が 80%であるのに対して、土壌中の銅濃度が 100 mg/kg 付近でイネの成長率が 60%と 20%の成長率の差があり、フィルター試験と同様にトウモロコシがイネと比較して成長率が高い結果が得られた。つまり、トウモロコシは他の植物と比較すると銅に対し耐性を持っていることがわかった。

3.2 トウモロコシ各部位における銅の蓄積量評価

圃場での土壌の銅濃度変化に伴うトウモロコシの実、根に対する銅の蓄積の変化について Fig. 4 に示した。

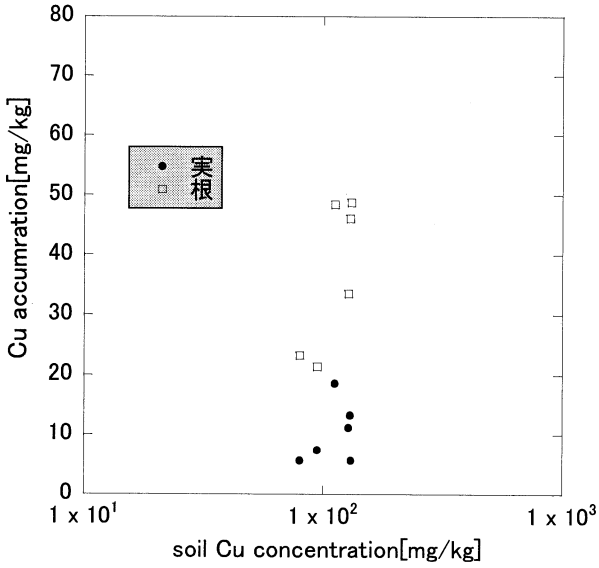


Fig. 4 圃場における土壌の銅濃度変化に伴うトウモロコシの実、根の銅蓄積濃度変化

実と根の蓄積量を比較すると、圧倒的に実への蓄積より根の蓄積のほうが多いことがわかる。つまり、土壌に触れている根はより蓄積しやすく、土壌から離れている実は蓄積しづらいことがわかった。

3.3 3 種類の植物による銅の蓄積濃度評価

フィルター試験による銅濃度変化に伴うトウモロコシ、オオムギ、ダイコン、キャベツの蓄積濃度変化を Fig. 5 に示し、フィルター試験におけるトウモロコシ、オオムギ、ダイコン、キャベツの C_{max} を Table 3 に示した。

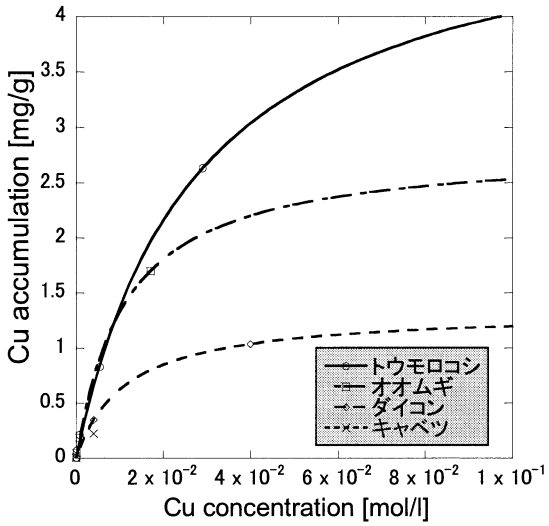


Fig. 5　フィルター試験における銅濃度変化に伴うトウモロコシの根、オオムギの根、ダイコンの根、キャベツの根の銅蓄積濃度変化

Table 3　フィルター試験における銅に対する各植物の銅の最大蓄積濃度(C_{max})

	C_{max} [mg/kg]
トウモロコシ	5.1×10^{3}
オオムギ	2.8×10^{3}
ダイコン	1.3×10^{3}
キャベツ	—

トウモロコシ、オオムギ、ダイコン、キャベツの C_{max} を比較すると、フィルター試験においてトウモロコシ、オオムギ、ダイコン、キャベツの順に蓄積しやすいことがわかる。しかし、銅の毒性実験同様にフィルター試験は、実際のトウモロコシの生育方法とは違い、水耕栽培に近く、さらに生育期間が短いために圃場の土壌の結果と異なる可能性がある。よって圃場での銅濃度変化に伴うトウモロコシの根とダイコンの根とトウモロコシの実の蓄積量変化を Fig. 6 に示した。

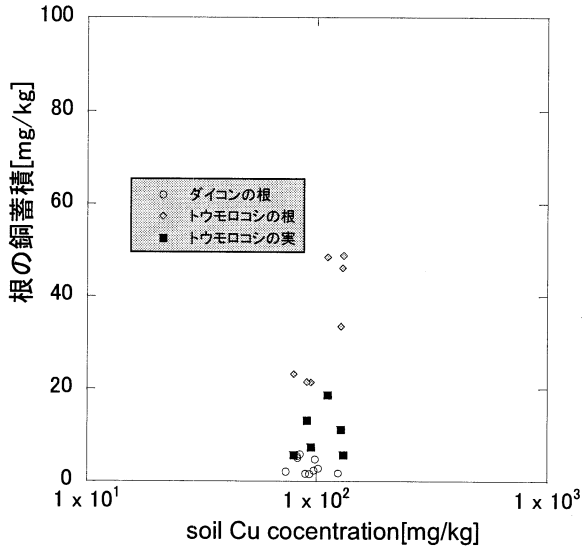


Fig. 6　圃場における土壌の銅濃度変化に伴うトウモロコシの根、ダイコンの根、トウモロコシの実の銅蓄積濃度変化

トウモロコシの根の蓄積量とダイコンの根の蓄積量を比較すると、圧倒的にトウモロコシの根の蓄積量が多いことがわかる。圃場での銅濃度変化に伴うトウモロコシの可食部である実と、ダイコンの可食部である根を比較すると、実の蓄積量が少ないことがわかる。つまり、ダイコンの根に比べトウモロコシの根が蓄積しやすく、また、可食部であるトウモロコシの実とダイコンの根を比較すると、トウモロコシの根は蓄積しやすく可食部には蓄積しづらいことがわかった。

WHO によると成人男性が 1 日に摂取上限が 10 mg/day としている[3]。トウモロコシの実 1 本当たりの質量は芯を含め 0.2 kg[4]である。よって、トウモロコシの実 1 本の蓄積量 4 mg と 1 日の摂取上限 10 mg/day 未満なのでトウモロコシの可食部である実は食用に利用できることがわかっ

た。

しかしながら、１人の人が１日も何本もトウモロコシを食すると摂取上限量を超えてしまう。よって、食用にする際は、トウモロコシの本数や量に気を付ける必要がある。

フィトレメディエーションにおいて必要なことは

・コストがかからないか、銅の土壌浄化に用いた植物を食用に利用し、利益を得ること。

・土壌浄化すべき土地が至るところにあるので、人間の手をあまり加えず、植物自身の吸収を用いて簡易的に、より吸収量を多いものを用いたほうが短期間で土壌浄化できことになる。

トウモロコシは結果より、ほかの植物に比べ、銅の吸収量が飛躍的に大きいため、トウモロコシは短時間で土壌浄化ができ、また、銅による毒性に一定の耐性を有するため、トウモロコシが枯死する心配がなく、土壌浄化を行うことができる。さらに、トウモロコシの実は食用として用いることができるため、トウモロコシの実を販売することで利益を得ることができる。よって、トウモロコシはファイトレメディエーションに有望な植物と考えられる。

4.結論

トウモロコシは他の植物に比べ、土壌での銅の蓄積に優れている。かつ、可食部である実への銅の蓄積が少ないので、食用として用いることができ、トウモロコシの銅の土壌浄化において、無駄が少なく土壌浄化をすることができる。よって、ファイトレメディエーションとしてトウモロコシを用いることは妥当である。

5. 参考文献

1) 浅見輝男　日本土壌の有害金属汚染　アグネ技術センター(2001)　79-81

2) 犬伏和之 土壌学概論 23 章　朝倉書店(2001)　212-213

3) 戸澤英夫 トウモロコシ　農山漁村文化協会(2005)　101-102、205

4)Jiakuan Xu, Lianxin Yang, Ziqiang Wang, Gichun Dong, Jianye Huang, Yulong Wang
Toxicity of copper on rice growth and accumulation of copper in rice grain in copper contaminate soil 2005,08,2

5) WHO Copper in Drinking-water 2004

（平成 21 年 9 月 25 日　受理）

『新撰万葉集』注釈稿（上巻　冬部　八八～八九）

一般教科　津田　潔・共立女子大学　半澤幹一

The Annotation of the Shinsen-man'yōshū (16)

Kiyoshi TSUDA, Kan'ichi HANZAWA

This paper is the annotation of the Shinsen-man'yōshū edited in 893 ?
(Keyword : the Shinsen-man'yōshū)

88　白雲之　下居山砥　見鶴者　降積雪之　不消成芸里
　　白雲の　下り居る山と　見えつるは　降り積む雪の　消えぬなりけり

【校異】

本文では、永青文庫本と久曽神本が、第二句の「居」の後に「流」字を補い、結句の「消」を「銷」と、同句の「芸」を「介」とする。また、藤波家本が、第四句の「積」字を欠く。

訓では、結句の「きえぬ」を、藤波家本が「きえず」とする。

同歌は、寛平御時后宮歌合（十巻本、冬歌、一三七番）に見られ（ただし、第四句の「雪」が「宿」に）、後撰集（巻八、冬、題しらず、四八四番）にも同文で見られる。

【通釈】

白い雲が下りてきて留まっている山と見えてしまったのは、（前々から）降り積もった雪が消えていなかったのだなあ。

【語釈】

白雲の　「しらくも（白雲）」については、本集八六番歌【語釈】「立

88　四山霽後雪猶存。
　　未辨白雲嶺上屯。
　　終日看来無厭足。
　　況乎墻陰又敦々。

　　四山霽れて後雪猶ほ存す。
　　辨たず白雲の嶺上に屯（あつま）ることを。
　　終日看来たれども厭き足ること無し。
　　況んや墻陰又た敦々たるをや。

【校異】

「白雲」を、永青文庫本・久曽神本「白雪」に誤る。「嶺上屯」を、文化写本「嶺上地」、永青文庫本・久曽神本「嶺上長」に作る。文化写本には「屯群」の注記、永青文庫本には「髡也」の注記あり。「況乎」を、永青文庫本「呪乎」に作る。「墻陰」を、底本等版本・日本詩紀本・下沢本・文化写本・藤波家本「墻陰」に作るも、類従本「廬广」に作り、和学講談所本・道明寺本「牆陰」、林羅山本・無窮会本・永青文庫本・久曽神本「廬陰」に作る。和学講談所本・道明寺本には、「墻廬」の異本注記あり。今、京大本・大阪市大本・天理本に従う。「敦々」を、林羅山本・無窮会本「数々」に作り、林羅山本には「敦」の異本注記あり。

【通釈】

雲が晴れてなくなった後にも、四方の山々には、雪がまだ残っている。

つ白雲に」を参照。八六番歌同様、本歌でも見立てる際、色の白さも根拠の一つであるため、単に「雲」ではなく「白雲」と表現したと見られる。**下り居る山と**　「下（お）り居（ゐ）る」という複合動詞の主体は初句の「白雲」である。万葉集には「朝ぐもり日の入り行けばみ立たしの島に下り居て嘆きつるかも」（万葉集二－一八八）の一例があるが、主体は人であり、八代集にも「あだなりなとりのこほりにおりゐるはしたよりとくる事はしらぬか」（拾遺集七－三八五）「さはみづにおりゐるたづはとしふともなれしくもゐぞこひしかるべき」（後拾遺集一七－九八〇）「くものうへになれにしものをあしたづのあふことかたにおりゐぬるかな」（金葉集九－六〇一）の三例があるのみで、しかもその主体はすべて鳥である。雲が主体となる例は、勅撰集ではかなり下って「紫の雲のおりゐる山里にこころの月やへだてなからん」（続千載集一〇－一〇二八）「山ふかみおりゐる雲はあけやらでふもとにとほきあかつきのかね」（風雅集一六－一六二八）「白雲のおりゐる方や時雨るらむおなじみ山のふもとながらに」（新千載集一六－一八〇四）など見られる。「居る」単独なら、「瀧の上の三船の山に居る雲の常にあらむと我が思はなくに」（万葉集三－二四二）「春日山朝立つ雲の居ぬ日なく見まくの欲しき君にもあるかな」（万葉集四－五八四）などのように、万葉集以来、雲を主体とした例があり、「立つ」に対し、山（の峰）に「居る」つまり留まっているさまを表す。雲が「下る」をとる例としては、八代集に「世とともに峰へふもとへおりのぼりゆく雲の身は我にぞ有りける」（後撰集一五－一〇七九）の一例があり、「のぼる」との対で用いられている。本歌において当時は、雲に対してはなじみのない「下り居る」という複合動詞が用いられたのは、「立つ」という、空への上昇方向を含む語を念頭に置いたうえで、山との近接性と雲の不動性を強調し、雪の見立てとしての適合度を高めるためと考えられる。なお、**【校異】**に示したように、寛平御時后宮歌合の同歌では「山」が「宿」になっているが、宿では、雲とのスケールバランスが悪く、その位置も不自然になるだろう。また、『新撰万葉集注釈　巻上[一]』は、「（白雲の下りゐる（それと）白雲が嶺の上に寄り集まっているのと見分けが付かない。一日中見続けても、もう良いということがない。ましてや家の垣根の陰に、（雪が）更に厚く集まっているのであれば、尚更のことだ。

【語釈】

四山　四方の山。自分を取り巻く山々。陳後主叔宝「五言昼堂良夜履長在節歌管賦詩迺筵命酒十韻成篇」詩に「雲興四山霾、風動万籟答」、劉禹錫「始至雲安…故有属焉」詩に「暮色四山起、愁猿数処声」とあり、菅原道真「早春内宴…暗迎春応製」詩に「千里遣懐銷尽雪、四山廻眼染初藍」（『菅家文草』巻六）とある。**霽後**　「霽」とは、江淹「雑体詩三十首　謝法曹贈別　恵連」詩に「幸及風雪霽、青春満江皐」（『文選』巻三一）とあり、李善が『説文』を引いて「霽、雨止也」と言うように、本来は雨や雪の止むこと。ただし、ここは李端「送苟道士帰廬山」詩に「月明尋石路、雲霽望花源」とある通り、雲のなくなること。なお、六七番詩**【語釈】**該項も参照のこと。巨勢識人「奉和春日江亭閑望」詩に「山光霽後緑、江気晩来鮮」（『文華秀麗集』巻上）、源英明「重寄」詩に「栄名皆是波中沫、富貴寧非霽後雲」（『扶桑集』）とある。**雪猶存**　「猶存」は、今になってもまだ存在している。『捜神記』巻十一に「宋康王舎人韓憑娶妻何氏、…今睢陽有韓憑城、其歌謡至今猶存」、陶淵明「帰去来辞・序」に「三逕就荒、松菊猶存」（『文選』巻四五）とあり、大江匡衡「寿考対策」に「燕毛之有序、猶存四始之篇。馬氏之拠鞍、能退五渓之寇」（『本朝文粋』巻三）とあって、韻文に用例を見出しがたいように、散文語。また、王維「晦日遊大理韋卿城南別業四声依次用各六韻」詩に「冬中余雪在、墟上春流駛」、杜甫「前苦寒行二首其一」詩に「去年白帝雪在山、今年白帝雪在地」とあるように、「雪」を主語とする場合は、「在」を取るのが一般。また、「猶在」という語例なら韻文にも少なくない。**未辨**　まだ、区別がつかない。一三・八六番詩**【語釈】**該項参照。**白雲**　白い雲。『毛詩』小雅・白華に「英英白雲。露彼菅茅」、謝霊運「入彭蠡湖口」詩に「春晩緑野秀、巖高白雲屯」（『文選』巻二六）とあり、百済和麻呂「五言秋日於長王宅宴新羅客」詩に「青海

山）からは神仙が降臨する趣を見て取ってよいかもしれない」（三三六頁）とするが、その趣が本歌の解釈にどのような影響を及ぼすのか、詩のほうを勘案しても、判然としない。**見えつるは**　本句による見立て表現の構造については、本集一三番歌【語釈】「見えつるは」の項を参照。歌末に「なりけり」もともなった見立て表現の類歌は、万葉集にはなく、八代集に「しらなみのおとせでたつとみえつるはうの花さけるかきねなりけり」（後拾遺集三－一七二）「しらくもとをちのたかねにみえつるはこころまどはすさくらなりけり」（金葉集（三）一－四二）がある。**降り積む雪の**　「降（ふ）り積（つ）む」については、既出の本集八三番歌【語釈】「あられ降り積め」の項および八六番歌【語釈】「雪降り積める」の項を参照。**消えぬなりけり**　この句表現の主体は前句の「雪」であり、その消失を表す語として、「いつのまに霞立つらんかすがのの雪だにとけぬ冬とみしまに」（後撰集一－一五）「けふやさは雪うちとけてうぐひすのみやこへいづるはつねなるらん」（金葉集一－一四）のように、「とく」も用いられるが、多くは「雪こそは春日消ゆらめ心さへ消え失せたれや言も通はぬ」（万葉集九－一七八二）「御食向かふ南淵山の巌には降りしはだれか消え残りたる」（万葉集九－一七〇九）、「春立つとききつるからにかすが山消えあへぬ雪の花とみゆらむ」（後撰集一－二）「いづれをか花ともわかむ故郷のかすがの原にまだ消えぬ雪」（新古今集一－二二）などのように「きゆ」であり、本歌とは異なり、消えて無くなってしまうことではなく、消えずに残っていることが詠まれている。

【補注】

本歌における見立ては、雪と雲の関係から成り立つが、表現上は、（山に）降り積もった雪を、雲のかかった「山」に見立てていることになり、このような微妙なズレについては、八六番歌【補注】で述べたとおりである。雪と雲を見立ての関係でとらえるのは、自然現象という点で共通しているためか、他ではほとんど試みられず、同歌を載せる後代の歌論書（俊頼髄脳・八雲御抄・悦目抄・袋草子など）では、下句の「雪」を千里外、白雲一相思」（『懐風藻』）、菅原道真「秋日山行二十韻」詩に「白雲何澗口、紅樹幾巌腰」（『菅家文草』巻一）とある。**嶺上屯**　「嶺上」は、嶺のてっぺん。白居易「山中五絶句　嶺上雲」詩に「嶺上白雲朝未散、田中青麦旱将枯」とある。なお、一五番詩【語釈】該項参照のこと。また、謝混「遊西池」詩に「恵風蕩繁囿、白雲屯曽阿」（『文選』巻二二）とあり、李善が「広雅曰、屯、聚也」と引用するように、「屯」は、多くのものが寄り集まる、たむろする、の意。大江澄明「北堂文選竟宴各詠句探得披雲臥石門」詩に「傍山披得暮雲屯、好是貪幽臥石門」（『扶桑集』）とある。**終日**　一日中。六八番詩【語釈】該項参照。**看来**　「来」は、動詞・形容詞の後について、継続や完了などのニュアンスを表す助字。ただし、蔡孚「奉和聖製龍池篇」詩に「帝宅王家大道辺、神馬潜龍湧聖泉。昔日昔時経此地、看来看去漸成川」、白居易「代迎春花招劉郎中」詩に「幸与松筠相近栽、不随桃李一時開。杏園豈敢訪君去、未有花時且看来」とある唐詩の「看来」の例を見ると、「来」の実字としての意味を失っていないように見えるが、島田忠臣「仲春釈奠聴講春秋賦左氏艶而富」詩に「看来更訝開珍蔵、聴得初知向艶陽」（『田氏家集』巻下）、菅原道真「感殿前薔薇一絶」詩に「薔薇汝是応妖鬼、適有看来悩殺人」（『菅家文草』巻五）とある日本漢詩の例、特に前者は対語の「得」と同義。諸注が挙げる白居易「題岐王旧山池石壁」詩の「俗客看来猶解愛、忙人到此亦須閒」の例も、「看来」の対語が「到此」であることに注目すれば、容易に「来」を助字と見なすべきでない。**無厭足**　もうこれで十分ということがない。孟浩然「初春漢中漾舟」詩に「軽舟恣来往、探玩無厭足」とあるものの、詩語としては極めて稀で、『漢書』食貨志に「富人臧銭満室、猶無厭足」とあるように、専ら散文中に用いられる。**況乎**　まして～であれば、なおさらだ。任昉「為范始興作求立太宰碑表」に「況乎甄陶周召、孕育伊顔」（『文選』巻三八）、司馬相如「上書諫獵」に「而況乎渉豊草、騁丘墟」（『文選』巻三九）とあるも、中国詩中に用いられることは極めて稀な語。ただし、日本漢詩には何故か、仲雄王「奉和重陽節書懐」詩に「災不勝徳※

「たかねに花やちりまがふらむ」のように、類例の多い「花」に替えている。

また、八六番歌【補注】では、嶺と雲との一般的な形状の違いを問題にしたが、後撰集所載の同歌について、岩波新古典大系の注に「冬のほかは京都の山々には雲がかかっていることが多いので、白雪を白雲と錯覚しかけたと言っているのである」とあり、本歌に付された詩の起句にも「四山」とあり、そのように「山」を横並びの複数ととるならば、形状的に雲と近くなる、つまり見立てとしての無理がなくなるといえる。

八六番歌と本歌の表現を比べてみると、二つの点で異なっている。一つは、前者が見立てるもの（白雲）を下句にしているのに対して、後者がそれを上句に示している点、もう一つは、前者が「雪降り積める」状態そのままであるのに対して、後者が「消えぬなりけり」と表している点である。

二点目に関して、本歌の「消えぬなりけり」が含意するのは、表現主体における、もう消えていると思っていたのに、という前提であり、だからこそ見間違えたのだ、という見立ての説明である。この前提が成り立つのは、もう冬が終わりかけの時期に至っているか、あるいは雪が降ってから相当の時間が経過したか、のどちらかの場合であろう。

※古来在、況乎神哀輔自天」（『文華秀麗集』巻中）、菅原道真「有所思」詩に「三人已至我心動、況乎四五人告之」（『菅家文草』巻二）などと頻出する。中国詩では助字の「乎」を欠いて、「況」一字で用いられるのが一般。　**墻蔭**　「墻」は、異文「牆」の俗字なるも、今しばらく底本等の諸本に従う。「蔭」は、物陰。「陰」に同じで、底本は「陰」に作るが、「陰」は平声であり、平仄が合わない。家の垣根の陰。「垣牆」の語があるように、「牆」も「垣」も垣根のこと。王維「晩春閨思」詩に「鑪気清珍簟、牆陰上玉墀」、元稹「秋相望」詩に「蠨蛸低戸網、螢火度牆陰」とあり、物部安興「巡検山野」詩に「煙生村巷遥知柳、雪積墻陰暗辨梅」（『新撰朗詠集』早春）、具平親王「風度諳春意」詩に「迎晴払尽※↗墻陰雪、解凍翻来岸曲波」（『新撰朗詠集』風）とある。　**又敦々**　「敦敦」とは、『説苑』至公に「敦敦然皆立」とあり、また『毛詩』大雅・行葦に「敦彼行葦、牛羊勿践履」とある、その鄭箋に「敦敦然道傍之葦」とあるように、物の集まる様。ただし、この場合は、上平声二十六桓韻となり、厳密に言えばこの詩の脚韻である上平声二十三魂韻とは、通押しないことになる。「又」は、更にその上。

【補注】

韻字は、「存・屯・敦」で、上平声二十三魂韻。平仄にも基本的誤りはない。

本詩の各句が言わんとすることは、特に理解が難しいということはない。前半の二句が、和歌の内容をほぼ満たすであろうし、転句もそれなりに理解は出来る内容になっている。しかし、結句はそれ自体の意味は分からないことはないが、全体として何を言いたいのかが判然としないのである。

転句で言う「見飽きない」のは、山の残雪の美しさであるのが当然とすれば、何故近景の「垣根の陰に残る雪」が、その興趣を更に増すことになるのか、全く理解できなかったのであるが、『本朝文粋』に収載される、紀長谷雄「春雪賦」にヒントがあると思われる。

それは、「雪の春に逢へる、深きこと尺に過ぎず。（雪之逢春、深不過尺。）」で始まるが、その末尾は、「既にして、地毛肥え、土膏施す。農畝普く液ひ、泉脈遠くに被ぶ。豈に止に墻陰に宿りて夕の寒きのみならむや、忽ちに能く郊外の淑気に混じる。適に遅日の楽しぶべきに在りて、還に豊年の瑞を致すことを。（既而、地毛肥、土膏施。農畝普液、泉脈遠被。豈止宿墻陰而夕寒、忽能混郊外之淑気。適在遅日之可楽、還知豊年之致瑞。）」とある。

春に降る一尺ほどの雪は、土地を潤し、水脈を蓄えるだけでなく、豊年の瑞祥となるのだというのである。これは、小島注の指摘する通り、謝恵連「雪賦」（『文選』巻一三）の「盈尺則呈瑞於豊年、袤丈則表沴於陰徳（一尺積もれば豊年の瑞兆、一丈を過ぎれば世の中が乱れる）」を

踏まえるが、こうした「雪」に対する当時の信仰を知って初めて理解が行くということであろう。中唐・韓愈「喜雪献裴尚書」詩に「為祥衿大熟、布澤荷平施」とあるのを見れば、中国に於いては六朝からずっとその俗信が続いていたのである。万葉集の末尾歌も「新しき年の初めの初春の今日降る雪のいや頻け吉事」であった。

また、大枝永野「詠雪」詩に「国有豊年瑞、家無閉戸哀」（『経国集』巻一三）、島田忠臣「観禁中雪」詩に「常看順令未曾愆、瑞雪呈豊又可憐」（『田氏家集』巻上）、同「元慶七年冬美濃大雪以詩記之」詩に「且莫誇張豊歳瑞、先須労問孝廉家」（『田氏家集』巻中）、同「府城雪後作」詩に「野老始知春澳沐、農夫只道歳豊穣」（『田氏家集』巻中）などとしばしば詠まれる。

見飽きないのは、ただ風景が美しいからではなく、その背後に秋の実りが約束されるからこそなのである。

【比較対照】

当歌詩は、詩【補注】に言うごとく、詩の「前半の二句が、和歌の内容をほぼ満たすであろう」。この「内容」の中心は見立て関係であるが、詩のほうが次の三点において詳述される。一つは、歌の「山」が一つではなく「四山」のように、四方を取り囲む山とする点、二つ目は、その山の着眼する位置を「嶺上」と限定している点、そして三つ目は、起句の「霽後」が雲に関してであり、雲と雪の存在確認が時間的に近接している点である。このどれもが、雪を雲に見立てる、というよりは、実際に見間違えうる条件を示しているといえる。

ただ、その見間違えによる興趣は一時的なものであって、詩の転句の「終日看来」につながるわけではなく、あくまでも残雪をいただく山の景色そのものに対して「無厭足」でなのであろう。歌では、見立て（見間違い）の興趣が中心であって、雪の残る景色の美しさを歌うものにはなっていない。

詩の結句については、詩【補注】に述べるような意図を含むとしたら、歌からは離れた展開になっていることになる。しかし、残雪という点に注目するならば、日本でも古くから、「雪形」つまり山に残る雪の形により、その年の農作物の豊凶を占う習慣があり、それへの連想が詩の発想の根底において働いたと考えられなくもない。

89　大虚之　月之光之　寒芸礼者　影見芝水曽　先凍芸留
　大ぞらの　月の光し　寒ければ　影見し水ぞ　まづ凍りける

【校異】

本文では、第二句の二つめの「之」字を、無窮会本が欠き、第四句の「曽」および結句の「先」字を、藤波家本が欠く。また、第三句および結句の「芸」を、永青文庫本と久曽神本は「介」とし、第四句の「影」を、類従本・林羅山本・無窮会本・永青文庫本・久曽神本が「景」、藤波家本が「顕」とする。

訓では、第二句末の「し」を、元禄九年本・元禄十二年本・文化版本・

89　寒天月気夜冷々。　寒天月気夜冷々たり。
　池水凍来鏡面瑩。　池水凍り来りて鏡面瑩（かがや）けり。
　倩見年前風景好。　倩（つらつら）見るに年前風景好し。
　玉壺晴後翫清々。　玉壺晴れて後清々たるを翫ぶ。

【校異】

「池水」を、底本等版本「池上」に作り、藤波家本・和学講談所本・道明寺本・京大本・大阪市大本・天理本「池中」に作るも、類従本・林羅山本・無窮会本・永青文庫本・久曽神本に従う。「鏡面瑩」を、底本等版本・下沢文庫本・文化写本「鏡面熒」に作り、藤波家本・和学講談

下沢文庫本・和学講談所本・林羅山本・無窮会本が「の」とする。

同歌は、歌合には見られないが、古今集（巻六、冬歌、三一六番）に「題しらず、読人しらず」として（ただし第三句「きよければ」）、古今和歌六帖（第一、歳時部、天、三一八番）に「ふゆの月、つらゆき」として、和漢朗詠集（巻上、冬、三八六番）に「氷」という題で（ただし第二句末「の」）見られる。

【通釈】

大きな空にある月の光が寒かったから、その姿を見た（池の）水が他より先に凍ったのだなあ。

【語釈】

大ぞらの　「大（おほ）ぞら」は漢語「大〔太〕虚」の翻訳語と見られる。万葉集には「大空ゆ通ふ我すら汝が故に天の川道をなづみてぞ来し」（万葉集一〇－二〇〇一）の一例が見られ、「蒼天」を「おほぞら」と訓んでいるが、本集では本歌を含め四例すべて「大虚」を「おおぞら」と訓む。八代集にも少なからず見られ、「月」とともに詠まれた歌としては、「おほぞらをてりゆく月しきよければ雲かくせどもひかりけなくに」（古今集一七－八八五）「おほぞらの月のひかりしあかければまきのいたども秋はさされず」（後拾遺集四－二五二）「まつ人のおほぞらわたる月ならばぬるるたもとにかげは見てまし」（金葉集八－四五三）など見られる。「（てり）ゆく」や「わたる」などの動詞からもうかがえるように、「おほぞら」という語は月の移動する空間の広大さを印象付けていると考えられる。　**月の光し**　「月の光」という表現は、万葉集から「み空行く月の光にただ一目相見し人の夢にし見ゆる」（万葉集四－七一〇）など見られるが、「月読の光は清く照らせれど惑へる心思ひあへなくに」（万葉集四－六七一）「月読の光を清み神島の磯間の浦ゆ舟出す我は」（万葉集一五－三五九九）などのように、「月読の光」という表現のほうが多い。古今集以降は、「月の光」のみで、「秋の夜の月のひかりしあかければくらぶの山もこえぬべらなり」（古今集四－一九五）「秋の夜の月の光はきよけれど人の心のくまはてらさず」（後撰集六－三二所本・道明寺本「鏡面蛍」に作るも、類従本・京大本・大阪市大本・天理本・林羅山本・無窮会本・永青文庫本・久曽神本に従う。「翫清々」を、類従本・林羅山本・無窮会本「翫清光」、永青文庫本・久曽神本「翫　清」に作る。文化写本は「翫清清」とした後、下の「清」をミセケチにして「光群」と右傍注。

【通釈】

冬の寒々とした空に月が浮かんで、夜気も冷え冷えとしてきた。池の表は凍って、良く磨かれた鏡のようだ。よく見てみると、これは年末の美しい風景と言えそうだ。玉壺の氷のような清らかで澄んだ月とそれに輝く氷を、雲一つなくなった後に、心ゆくまで堪能したいものだ。

【語釈】

寒天　唐代以後の詩語。初めこの語は、沈佺期「隴頭水」詩に「隴山飛落葉、隴雁度寒天」、岑参「寒天草木黄落尽、猶自青青君始知」とあるように秋の澄んだ清涼な空を意味したが、次第に、張籍「寄別者」詩に「寒天正飛雪、行人心切切」、白居易「初授賛善大夫早朝寄李二十助教」詩に「寂寞曹司非熱地、蕭條風雪是寒天」（『千載佳句』歳暮）とあるように、冬の寒さの厳しい日を意味するように変わった。　**月気**　月の精気。月白、あるいは、月光のこと。この語は、顔延年「応詔讌曲水作詩」の「朏魄双交、月気参変」（『文選』巻二〇）に基づく。李善は、「月気謂三月也。月気参変、毎月一変、故曰参也。周書曰、凡四時成歳、各有孟仲季、以名十有二月、月有中気、以著時応」と説明する。この語も、唐詩の用例は稀。　**夜冷々**　「冷冷」には、擬音語（平声、清らかな音）としての用法と、擬態語（上声、寒涼な様）としての用法の二通りがある。ここは無論後者。ただし、平声として用いた可能性が高い。晋・傅咸「神泉賦序」に「気冷冷以含涼、風肅肅而恒起」（『藝文類聚』泉）、李嶠「石涼」詩に「金灶浮煙朝漠漠、石床寒水夜冷冷」、沈宇「擣衣」詩に「洞房寒未掩、砧杵夜冷冷」とあり、島田清田「同安嶺客感客等礼仏之作」詩に「法風冷冷疑迎暁、天萼輝輝似入春」（『経国集』巻一〇）とある。　**池水**　池の水。『漢書』王莽伝に「莽就車、之漸臺、欲

三）「冬の夜の池の氷のさやけきは月の光のみがくなりけり」（拾遺集四－二四〇）「てる月のひかりさえゆくやどなれば秋のみづにもこほりゐにけり」（金葉集三－一九三）などあり、秋あるいは冬の月の光に関して「あかし・きよし・さゆ」などの表現が用いられることが多い。句末の「し」は限定強調の副助詞であるが、【校異】に示したように、「の」と訓むテキストもあり、『新撰万葉集注釈　巻上㈠』では「『新撰万葉集』は「之」をノの正訓として採用し、シには草冠の付いた「芝」を使用することで明快に区別する」ので、「寛文版本の付訓にシと訓まれている「月之光之」（89）の下の「之」は、ノと訓むべきか、「芝」の誤りかであろう」（三八五～三八六頁）とする。この点については【補注】で取り上げる。　**寒ければ**　「寒（さむ）し」については、本集五〇番歌【語釈】「羽風を寒み」の項で触れたように、風に対して用いるのが一般的であり、月に関しては、新古今集になって「さむけし」の形で「冬がれのもりのくちばの霜の上におちたる月の影のさむけき」（新古今集六－六〇七）「霜むすぶ袖のかたしきうちとけてねぬよの月の影ぞさむけき」（新古今集六－六〇九）などのように見られる。古今集所載の同歌は「きよければ」とするが、これについて「「さむければ」という本文では、あまりに下句とつきすぎる」（竹岡正夫『古今和歌集全評釈』）、「「きよし」は水面に映じたひえびえとした月光をいうのにまことに適した語であり、「さむければ」の直截的表現を一歩進めたものといえる」（『新撰万葉集注釈　巻上㈡』）などという見方もされている。　**影見し水ぞ**　「影（かげ）」は、文脈からすれば「月の影」とするのが妥当と考えられるが、月の光の意にも月の形の意にもとることが可能である。当歌ではすでに第二句に「月の光」という表現があることと、「見る」の対象としての適切さを勘案すれば、この「影」は月の形の意であろう。ただし、その形が空にある月そのもののか、水に映ったそれかという問題がある。前者の例としては、「我妹子や我を思はばまそ鏡照り出づる月の影に見え来ね」（万葉集一一－二四六二）、「このまよりもりくる月の影見れば心づくしの秋はきにけり」（古今集四－一八四）「さ夜ふけて阻池水、猶抱持符命」、梁・王僧孺「夜愁示諸賓詩」に「簷露滴為珠、池水合如璧」（『藝文類聚』愁）とあり、藤原敦信「池水繞橋流」詩に「池上雨収景気晴、溶溶流水繞橋清」（『本朝麗藻』巻上）とある。異文「池上」は、謝霊運「登池上楼」詩（『文選』巻二二）、阮籍「詠懐詩十七首其一二」詩に「徘徊蓬池上、還顧望大梁」（『文選』巻二三）とあるように、例外なく池のほとりの意。異文「池中」の「中」は、平声で平仄に合わない。　**凍来**　「来」は、完了や継続などのニュアンスを表す助字。ただし、本集以外に「凍来」の用例を知らない。本集には、「流涙凍来夜半寒」（一一五番詩）、「暁夕凍来冬泣血」（一一六番詩）とある。　**鏡面瑩**　「鏡面」は、鏡の表面。水面を鏡に喩えること自体は古くからあるが、「鏡面」の語は中唐以後の詩語。白居易「初領郡政衙退登東楼作」詩に「水心如鏡面、千里無纖毫」、白居易「泛春池」詩に「蛇皮細有紋、鏡面清無垢」などと比喩に用いた例があるので、それを真似た可能性がある。「瑩」は、明らか、鮮やかな様。「瑩鏡」は、良く磨かれて曇りのない鏡のこと。『晉書』楽広列伝に「命諸子造焉曰、此人之水鏡、見之瑩然、若披雲霧而青天也」、白居易「百錬鏡」詩に「五月五日日午時、瓊粉金膏磨瑩已、化為一片秋潭水」とあり、源順「暮春於浄閣梨洞房同賦花光水上浮」詩序に「則漢女施粉之鏡清瑩、欲謂之花、亦蜀人濯文之錦燦爛、蒙竊惑焉」（『本朝文粋』巻一〇、『和漢朗詠集』花）、大江匡衡「月露夜方長」詩に「鏡瑩北斗漸廻後、珠点東方難曙間」（『江吏部集』）とある。異文「熒」は、光のかすかな様。後述するが、この異文関係は、恐らく押韻に関係する。　**倩見**　よく見る。念入りに見る。本集九番詩【語釈】該項参照のこと。　**年前**　年の暮れ。年末。本集一九番詩【語釈】該項参照のこと。　**風景好**　風景の美しいこと。ただし、本集一八番詩【語釈】「風景」の項に既述の通り、原義は風と光の意であるから、春の暖かな昼間の光景をいうのが一般。「年前」とあるのが、僅かに春の気配を感じさせるものの、夜の景色をいうのは異例。王維「座上走筆贈薛璩慕容損」詩に「更待風景好、与君藉萋萋」、白居易「早春憶蘇州寄夢得」詩に「呉苑四時風景好、就中偏好是春天」とあり、菅

あまのと渡る月影にあかずも君をあひ見つるかな」（古今集一三－六四八）など、後者には「落ち激ち流るる水の岩に触れ淀める淀に月の影見ゆ」（万葉集九－一七一四）「池水に影さへ見えて咲きにほふあしびの花を袖に扱入れな」（万葉集二〇－四五一二）、「久方のあまつそらなる月なれどいづれの水に影やどるらん」（拾遺集八－四四〇）などが当てはまる。この問題は「影」と「見し」と「水」の三者の関係のとらえ方、つまり「見し」の主体は何かということに関連する。古今集所載の同歌に対する諸注釈書を見るかぎりでは、「「見し」は、月の光を映した意をいいかえたもので、水を有情に近いものとしての詞」（窪田空穂『古今和歌集評釈』）のように、水を主体とみなしていて、結果的に「影」は水に映る月のそれを表すことになる。それに対して、『新撰万葉集注釈　巻上㈡』では「〔影〕を〔見〕る主体は水ではなく作主であ」り、「前に月影を映していたのを私が見たことがある池水の意になる」（三四四頁）とする。この説によれば、「水」は「見し」場所を示し、「影」は水に映る月ということになる。つまり、どちらにせよ、「影」が空の月そのものではないという点では共通している。「見し水」という表現を含む句を、新編国歌大観で検索してみたところ、古今集所載の同歌の影響が圧倒的だったのか、そのほとんどが「影見し水～」という形で、月と結び付けられているため、問題解決の糸口が見出せない。本稿では、次の二つの理由から、「見し」の表現上の主体は「水」であり「影」は空中の月のそれであると考えたい。一つは、上句の表現は明らかに空にある月を取り上げているのであり、月を視認したことを、表現発想上の基点としているからである。その場合、視認した、つまり「見し」主体として詠み手がなるのは当然としても、結句にある「まづ」が示唆するのは、詠み手よりも先に「水」が「見し」ことであり、それはもとより「水」のみについて言うのではなく、詠み手も水もともに「見し」という点で同じ共通しているのである。もう一つは、「月の光―寒し」と、月の「影見し」と、「水―凍る」という三つのことがらを、「水」を中心として結び付けることによって、詠み手を介在させるよりも、一首全体原道真「早春内宴侍仁寿殿同賦春娃無気力応製」詩序に「殿庭之甚幽、咲嵩山之逢鶴駕、風景之最好、嫌曲水之老鶯花」（『菅家文草』巻二）とある。**玉壺**　明月のこと。鮑照「白頭吟」詩に「直如朱糸縄、清如玉壺氷」（『文選』巻二八）とあって以来、「玉壺」及びその「氷」は、麗しく清らかなものの代表として用いられる。李華「海上生明月」詩に「皎皎秋中月、団団海上生。影開金鏡満、輪抱玉壺清」とあるのは、清らかな月光の喩え。**晴後**　雨が止み、雲がなくなった後。本集八六番詩【語釈】該項参照のこと。顧況「遊子吟」詩に「夜晴星河出、耿耿辰与参」、韋応物「送令狐岫宰恩陽」詩に「大雪天地閉、群山夜来晴」、竇庠「奉酬侍御家兄東洛閒居夜晴観雪之什」詩に「洛陽宮観与天斉、雪浄雲消月未西」などとある如く、それは夜、昼に関係がない。**翫清々**　「清清」は、清らかで透き通っている様。宋玉「風賦」に「清清冷冷、愈病析酲」（『文選』巻一三）とあり、李善が「清清冷冷、清涼之貌也」と言って以来、大気の動きに用いられるが、皎然「渡前渓」詩に「清清鑑不足、非是深難度」とあるように、水にも用いられる。ただし、用例は日中ともに極めて少ない。異文「清光」は、沈約「応王中丞思遠詠月」詩に「洞房殊未暁、清光信悠哉」（『文選』巻三〇、『藝文類聚』月）、梁蕭子範「望秋月詩」に「河漢東西陰、清光此夜出」（『藝文類聚』月）とあり、菅原道真「八月十五夕待月席上各分一字其四」詩に「縦使清光纔透出、当勝徹夜甚簷疎」（『菅家文草』巻一）、菅原道真「霜夜対月」詩に「夜感難勝月易低、清光不染意中泥」（『菅家文草』巻五）とあるように、月光のこと。

【補注】

韻字は「冷」（下平声十五青韻）、「瑩」（下平声十二庚韻）、「清」（下平声十四清韻）で、十五青韻は独用、十二庚韻は、十四清韻と同用なので、押韻に問題がある。平仄には基本的誤りはない。

冒頭の【校異】でも分かるとおり、本詩は押韻字に異文が多い。異文のない起句末字は、独用の「冷」字であるので、基本的にはそれで通すべきなので「瑩」ではなくて、恐らく「熒」（下平声十五青韻）が生じ

が一貫した視点からの、因果的な展開になるからである。　まづ凍りける　「まづ」という副詞は万葉集から用いられ、「春さればまづ〔麻豆〕咲くやどの梅の花ひとり見つつや春日暮さむ」（万葉集五－八一八）では、他の花に先んじてウメの花が咲くことを、「あらたまの年行き反り春立たばまづ〔末豆〕我がやどにうぐひすは鳴け」（万葉集二〇－四四九〇）では、他の家に先んじて我が家でウグイスが鳴くことを、「しののめの別ををしみ我ぞまづ鳥よりさきに鳴きはじめつる」（古今集一三－六四〇）では、鳥に先んじて私がなく（鳴―泣）ことを、そして「はるの日の影そふ池のかがみには柳のまゆぞまづは見えける」（後撰集三－九四）では、他の物に先んじてヤナギの葉が池の水面に映ることを表している。同様に、本歌においては、「凍る」ことに関して、「影見し水」が他に先んじることを表す。その「他」とは、「凍る」ことを前提とすれば、水分を含むすべてとなりうるが、当面の池水に限るとすれば、月影が映っていた箇所以外と見ることもできよう。

【補注】

【語釈】の「月の光し」の項で取り上げた、「し」か「の」かという問題を取り上げる。その前に、確認しておきたいのは、この場合の「し」は副助詞、「の」は格助詞とし、万葉集ではどちらにも「之」字がもっとも多く使われ、この二語の表記が「之」字の用法の中心になっているということであり、本集歌を表記するにあたって、それは当然了解されていたということである。

本集歌における「之」字は計三四六例（二一七首中）あり、本歌と同じく、一首に「之」字が三回見られるのが二七首、そのうち同一句内に二回出てくるのが二一首ある。この二一首のなかで、後続句が名詞で始まる（つまり連体修飾関係が成り立ち、「し」の可能性が排除される）以外の、本歌と同一条件となる例を挙げると、次の五首ある。

夏之夜之　伏歟砥為礼者　郭公　鳴人音丹　明留篠之目（二六番）

山沢之　水無杵砥許曽　見亘　秋之黄葉之　落手翳勢者（一六七番）

※↗

たのだろう。字形も類似する。しかしその字は「鏡」には何の関係もない字義しか持たない。その上、結句末字は、「清」は勿論、異文の「光」は、下平声十一唐韻であり、本来の韻からは更に遠い韻になる。日本漢字音からしても、「冷」（レイ）、「瑩」（エイ）、「清」（セイ）のほうが押韻の点からも良く、「光」（クヮウ）は、意味上からは良くても、とても音からは採用できない。

『新撰万葉集注釈　巻上㈡』は、「晴後」を、夜が明けた後と解釈するが、それでは月自体の存在が隠れてしまうので、意味をなさない。

結句の内容が全体の締めくくりとして良くできていないために、纏まりの感じられない作品となっている。更に、韻字の瑕がそれに輪をかけている。起句の末字の「冷冷」も、語釈で触れたように本来は上声のはずであり、いわゆる踏み落としと考えるべきかもしれないが、本集の漢詩には今までそうした形式を取ったものは極めて少なく、この作品が意識的にそのようなことをしたとは考えにくい。内容からすれば、上手く纏めようとしたが結果として出来なかったと考える方が、蓋然性が高いだろう。

「冷冷」「清清」という、宋玉「風賦」を出典とする連綿字の安易な使用も、作者の力量の貧しさを感じさせる。あるいは、和歌の内容そのものにさしたる興味を覚えなかったか、それに加えるべきものを見いだせなかったのかも知れない。

※　打吹丹　秋之草木之　芝折礼者　郁子山風緒　荒芝成濫（一七四番）

白露丹　被瑩哉為留　秋来者　月之光之　澄増濫（一九〇番）

人之身丹　秋哉立濫　言之葉之　薄裳慈裳　千丹移徙礼留（二四八番）

『新撰万葉集注釈　巻上㈠』は「『新撰万葉集』は「之」をノの正訓として採用し、シには草冠の付いた「芝」を使用することで明快に区別する」とするが、その妥当性は、これらの枠囲みの「之」字も「の」であっ

て「し」ではありえないことを示すことによって検証されると考える。

「之」字が少なくても万葉集では「し」とも訓みえたことをふまえて、本歌において「の」よりも「し」のほうが適切と考えられる理由は、次の二点である。第一点は、音調として、上句で「の」音が三回も連続するのは、そのイメージからして、冬歌の本歌には似つかわしくないということである。その点、「し」ならば、第四句の「し」とも響きあって、ふさわしいと感じられる。第二点は、語連続に関して無標的な「の」に比べ、限定強調の「し」は「月の光」を前景化する働きをし、下句の「水ぞ」以下の係り結びによる強調と釣り合いがとれると考えられることである。

【比較・対照】

和歌の意味は、例によって漢詩の前半で尽くされている。しかし、それは極めて大まかな意味でであって、内実はかなり相違するものを持っていると言えそうである。

和歌は「寒ければ」という、人事を伺わせる言葉を僅かに含むものの、全体的には極めて叙景の勝った内容であり、「月の光」「水」とその対象も「し」「ぞ」の助詞によって明確に指示されている。「太虚」という漢語を背景とする「大空」と、そこに浮かぶ「月」、それに対して地上の凍りはじめた「水」という図柄は、二つの「し」と「ぞ」「づ」「ける」などの音と相俟って、冬の厳しい寒さと冴えた景色をよく写していると言うべきだろう。古今集が冬の部の冒頭近くに採用したのは、本歌に対する当時のそれなりの評価を反映していると納得できる。

それに対する漢詩は、その明確な「月の光」を、「月気」と訳した。この語は語釈にもあるように、その出自からして「moon」そのものよりも、「month」をより強くイメージさせる語であった。その意味では漢詩作者は、和歌のポイントをかなり外していると言わざるを得ない。

承句も、和歌の「影見し水のまづ凍りける」を、単に「鏡面瑩」と訳して、和歌の細かな観察を、全く生かしていない。恐らく、この和歌の眼目は、池の水が部分的に凍り始める所を捉えた点にあるのであって、それを「鏡」と紋切り型の比喩で表現するだけである。「鏡面」という、比較的新鮮な語を用いたにしても、和歌の観察には遠く及ばないと言うべきだろう。

漢詩の後半も、補注にあるとおり、殆ど見るべき所がない。「玉壺」で、月と氷をイメージさせることを狙ったのかも知れないが、「清々」という語がそれに相応しいものであったとは、言えない。

なお、「年前」の語によって、漢詩作者の季節のとらえ方は、年末のどちらかといえば春に近い時季になるが、古今集では冬の初めに配置されている。そこにも和歌と漢詩のズレがある。

〔注〕本稿は、『共立女子大学文芸学部紀要』第四〇集～第五五集（平成六年二月～平成二一年一月）および『東京工業高等専門学校研究報告書』第二六号～第四〇（一）号（平成六年一二月～平成二〇年十二月）の続稿である。なお「凡例」については『共立女子大学文芸学部紀要』第四〇集を参照されたい。

（平成二十一年九月二十五日受理）

東京工業高等専門学校研究報告書

第 41（1）号

平成21年度

平成22年１月18日発行

編　集　者　東京工業高等専門学校図書委員会

発　行　者　東京工業高等専門学校

東京都八王子市椚田町1220の２

TEL　八王子（042）668－5111

〒193－0997

印　刷　所　電算印刷株式会社

長野県松本市筑摩１－11－30

TEL　松本（0263）25－4329

〒390－0821

The name of the journal has been changed from *"Research Reports of Tokyo National Technical College"* into *"Research Reports of Tokyo National College of Technology"* since the 1984 issue.

古紙配合率100%再生紙を使用しています