ISSN-0387-0324

神奈川大学

工学研究所 所報

SCIENCE REPORTS OF RESEARCH INSTITUTE FOR ENGINEERING KANAGAWA UNIVERSITY

NO.29

NOV.2006

工学研究所所報第29号目次

巻　頭　言

工学研究所所報巻頭言（所長就任にあたって）……許　瑞邦… 1

総　　説

気泡微細化沸騰とその応用可能性……庄司正弘… 2

人工酸化酵素の開発を指向した遷移金属-活性酸素錯体の研究 ……引地史郎…10

インダストリアルエンジニアリングの成果と現状……北岡正敏…18

団地映画を通してみる公共空間の活用についての研究……曽我部昌史…27

CPの破れ－新しい物理を探る ……三田一郎…35

共 同 研 究

マイクロ熱電発電素子に関する研究……山口栄雄，米田征司…43

放射線高速計測システムの耐放射線性能向上のための研究開発

……田村忠久，鳥居祥二，高柳昌弘，久保　信…51

放射線医療・被曝そして宇宙ガンマ線観測にも有効な

ダイヤモンド・リコイル・テレスコープ（DCRT）の開発

……柏木利介，日比野欣也，奥野祥二，内堀幸夫，北村　尚，

高嶋　健，矢島佳央理，太田幸雄，横田　護…59

随　　想

すばらしき先達に恵まれて……田島　守…67

デザインの理論と実践……高橋志保彦…70

国際交流研究

成均館大学との理工系学術交流……亀山　敦…74

2006年度東アジア建築学術交流セミナーの報告……冨井正憲…78

施 設 紹 介

透過型分析電子顕微鏡　JEM-2010 ……宮尾敏広，内藤周弐…82

年 次 報 告……86

執 筆 規 程……89

執 筆 要 領……90

編 集 後 記……93

CONTENTS

Preface

Toward New Research Institute for Engineering ····· Zuihou KYO··· 1

Review

Microbubble Emission Boiling and Its Possible Application ····· Masahiro SHOJI··· 2

Studies on the coordination chemistry of transition metal-activated oxygen complexes for the development of bio-inspired artificial oxygenases ····· Shiro HIKICHI···10

On Application Results and Present Situation of Industrial Engineering ····· Masatoshi KITAOKA···18

Research of utilising common space : Observing the public space through the movie filmed at Danchi (housing apartment) ····· Masashi SOGABE···27

CP Violation - A Search for New Physics ····· A.I. Sanda···35

Joint Research

Study on thermoelectric microdevices ····· Shigeo YAMAGUCHI Seiji YONEDA···43

Research and development to improve resistance to radiation of a fast detector system measuring high energy particles and gamma-rays ····· Tadahisa TAMURA Shoji TORII Masahiro TAKAYANAGI Shin KUBO···51

Development of Diamond Compton Recoil Telescope ····· Toshisuke KASHIWAGI Kinya HIBINO Shoji OKUNO Yukio UCHIHORI Hisashi KITAMURA Takeshi TAKASHIMA Kaori YAJIMA Yukio OHTA Mamoru YOKOTA···59

Essay

Have wonderful professors ····· Mamoru TAJIMA···67

The Theory and the Practice of Design ····· Shiohiko TAKAHASHI···70

International Exchange

Science Exchanges with Sungkyunkwan University ····· Atsushi KAMEYAMA···74

Report: Architectural Joint Seminar of the Five Asian Universities Theme: The Cityscapes of Asian Cities and the Architectural Education ····· Masanori TOMII···78

Introduction of Facility

Transmission Electron Microscope JEM-2010 ····· Toshihiro Miyao Shuichi Naito···82

Annual Reports of the Institute ····· 86

Manuscript Submission Instruction ····· 89

Letters from the Editors ····· 93

巻頭言

工学研究所所報巻頭言（所長就任にあたって）

許　瑞　邦*

PREFACE--Toward New Research Institute for Engineering--

Zuihou　KYO*

工学研究所所長に選出され，今年度４月より就任いたしました．そこで今年度巻頭言の場を借りて，私の任期中の抱負を述べさせて頂きます．

岩田前工学研究所長は

[1] 工学部より独立した工学研究所組織への移行，

[2] 外部資金導入への努力，

[3] 研究所客員教授制度の導入，

を重点課題にして取り組んでこられました．その結果，[1]については，専任講師以上の教員全員を工学研究所の所員とする新体制に移行しております．又，工学研究所の運営では運営委員会審議と同時に、重要案件については所員会議で最終決定することとなりました．[2]については，共同研究採択審査にあたって外部の競争的資金導入の呼び水になり得るかどうかを審査項目に加えられました．今後の効果が期待される所であります．[3]については，既に工学研究所案が大学本部に提出され，中島副学長が主催する総合学術研究推進委員会で審議が始められている状況で，来年度４月にはこの制度が施行される運びになる筈です．このように前所長が蒔いた種が実を結びつつあります．ところで，工学研究所の日常業務を円滑に実行するだけでも結構な仕事になりますが，より一層の発展を図るために，次の点をこれからの重点課題にしてはと考えております．

『社会に，より一層貢献する工学研究所へ！』

＝社会に開かれた工学研究所への展開

これまでも工学研究所は研究の推進，公開を通して学会や産業界にも少なからず貢献してきましたが，**「広く社会へ貢献する」という**視点から研究所の活動内容・研究成果を社会により一層広く公開すると共に　日本最大の研究拠点が集積する横浜地区で，これまでに４万名に達する学部卒業生及び１５００名の大学院卒業生を輩出してきた神奈川大学工学部・工学研究科の膨大な研究財産を活かして，社会・産業界のご協力を得て地域の研究拠点となりうる研究所を目指したいと考えております．この実現ために先ず次のような具体策を工学研究所運営委員会に提案させていただきました．なお，この一部はすでに実行に移しています．

1．プロジェクト方式による研究推進体制の導入
2．社会のニーズを先取りする課題研究所の設立提案
3．現行客員研究員・特別研究員・補助研究員制度の改訂と導入予定の客員教授制度の具体的適用
4．研究所の活動を伝える「工学研究所たより」の発行
5．共同研究審査会の強化（今後，研究推進部会への再編成と外部委員の招致）
6．工学研究所一般公開の企画（講演会＋大型研究設備の公開・実演＋共同研究の成果発表）
7．工学研究所所報記事の充実
8．工学研究所大型装置管理委員会の強化
9．研究設備説明用パネルの設置
10．工学研究所大型研究設備のパンフレット作成
11．産官学連携推進室との連携の実現
12．職階変更も考慮した現行工学部助手の所員化

以上，**「社会に開かれた研究所」**を実現するため，現在，工学研究所運営委員会では上に挙げました項目を含めて種々の検討を進めている状況です．運営委員会としては社会でこれまで以上に評価される工学研究所を実現すべく，鋭意努力する所存ですので，今後，所員を初め関係各位のご助言・ご理解・ご協力を一層お願いする次第です．

*所長　Director Research Institute for Engineering

総説

気泡微細化沸騰とその応用可能性

庄司　正弘*

Microbubble Emission Boiling and Its Possible Application

Masahiro SHOJI*

１．緒言

近年の極度に集積化された電子回路やデバイスの発熱密度は非常に大きくなっており，近い将来には単位面積当たり数MWに達するとも言われている．このように高い発熱密度を持つ物体の冷却は，もはや気体や液体単相の伝熱では不可能であり，沸騰冷却による他なく，それも液体温度が低い高サブクール沸騰を用いざるを得ない．一方，近年のマイクロテクノロジーの発展に伴って高性能で小型の冷却デバイスの開発が要望されている．そしてＭＥＭＳなどのマイクロ加工技術を用い構成されたマイクロミニチャネル構造体に沸騰冷却を用いようとした場合，狭い流路を閉塞して大きな流動抵抗（圧力損失）を来たさないためには，沸騰により発生する気泡（沸騰気泡）は充分小さなものでなくてはならない．本報で取り上げる気泡微細化沸騰（MEB: Microbubble Emission Boiling）は発生気泡の大きさが数μｍから数十μｍと微小であり，しかも十数MW／m^2の伝熱能（冷却性能）をもつことから上記の冷却に関わる諸問題をクリアできる伝熱様式であり応用上有望なものである．しかし，現象が複雑であるため不明な部分や未解決の問題が多い．そこで筆者らはここ数年，最も基本的な沸騰系である加熱細線のプール沸騰において，関係パラメタを広範囲に変えた系統的な実験研究を行っている[(1)－(9)]．本報はこれまで得られた研究の成果と残された課題を纏めたものである．

沸騰の科学的研究は昭和８年（１９３３年）に発表された抜山の研究[(10)]を嚆矢とする．爾来，火力や原子力による発電産業の進展を背景に，数多くの研究がなされてきた．しかし従来の応用対象，研究対象はボイラーや原子炉といった規模の大きなものであったため，微細なスケールで生じる沸騰現象はあまり扱かわれてこなかった．しかも研究の主眼は熱伝達（伝熱量）に置かれ発生する気泡（通常は数mm程度の大きさ）にはあまり関心が払われてこなかった．こうした事情のために，高サブクール条件下の気泡微細化沸騰といった，ある意味で特殊な沸騰形態の研究は比較的新しく，１９８０年代初頭に群馬大学の稲田によってなされた報告[(11)]が最初と言ってよい．その後，我が国において継続的に研究がなされていたが[(12)－(29)]，前記のような社会的背景もあって最近は海外においても関心を呼んでいる．

沸騰は工業的応用の意味では成熟した（mature な）技術となっている．しかし，学術的には未解明の面が強く成熟していないと言われる．気泡微細化沸騰についてみると，微細気泡がどのようなメカニズムで発生するのか，またどのようなメカニズムとプロセスで高い熱伝達が得られるのかなど，基本的な事柄が不明で残されている．そもそも「気泡微細化沸騰」という名称や定義自体にも怪しさがあり議論が多い．本研究はこうした状況を打破することを最大の目的としている．

２．実験装置と方法

図１は実験装置の概略図である．試験液体としては，充分に脱気した純水を用いている．加熱体は長さ３０mm，直径が１００μｍから３００μｍの白金線であるが，細線材質の影響を調べることを目的にニクロム線やステンレス線も用いている．また、加熱細線の熱容量の影響を調べるため細線の径もいくつか変えて実験している．細線は直流で電気加熱し，発熱量（ジュール発熱）から細線表面の伝熱量（熱流束）を求め，電気抵抗から表面温

*教授　機械工学科
Professor, Dept. of Mechanical Engineering

度を決定する．水温は補助ヒータとクーラーによって所定の温度に設定し，細線下方１０mmの水温を熱電対で測定しバルク液温とみなす．沸騰の挙動は最高３２，０００駒／秒の高速ビデオで観察するが，気泡が微細であるため２００倍の拡大レンズを用いた．沸騰では様相に応じて発生音が特徴的に変化する．この沸騰音は気泡発生の仕方や伝熱のメカニズムと密接に関係しているため，ハイドロフォンを用い２０ｋＨｚで集音，記録した．

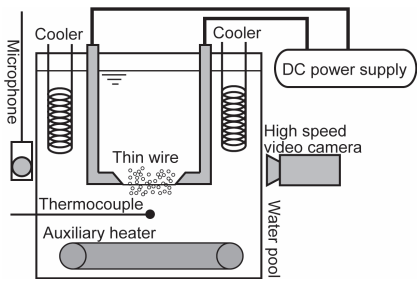


図１　プール沸騰実験装置

３．実験結果

３．１ 沸騰曲線

図２は実験で得られた代表的な沸騰曲線であり，サブクールによる伝熱特性の違いを示している．低過熱度では発生する気泡の数が少なく，細線の温度は変動し一定しない．熱流束の増加（過熱度の増加）と共に次第に安定した沸騰状態となり，サブクールが大きいほど熱伝達も大きくなる．核沸騰の上限（限界熱流束、CHF: Critical Heat Flux）は，低サブクール下では核沸騰から膜沸騰に遷移する形で発生し，高サブクール下では細線が溶融切断（バーンアウト）する形で生じる．なお，沸騰曲線は，熱流束を上げていった場合と下げていった場合では僅かに異なり，ヒステリシスが存在する．

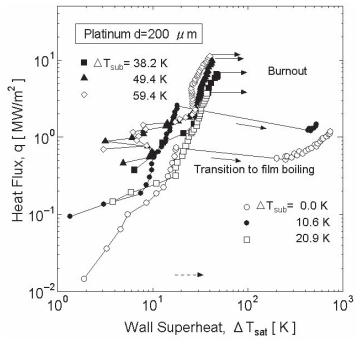


図２　典型的な沸騰曲線（細線径が200μmの白金線の場合）

３．２ 気泡の発生挙動

図３に熱流束およびサブクールによる沸騰挙動の違いを示す．図４は，サブクール度（*ΔTsub*）が１０K及び４０K の場合の写真であり，サブクール度によるに気泡発生の違いを示している．図４(a)に見るように低サブクールでは，気泡の先端から上方にプルームが発生する．このプルームは表面張力の温度依存性に起因するサーモキャピラリ対流であり，熱流束が大きくなると細線周りのあらゆる方向に現れる．図５は，そのサーマルプルームの時間的な変動の様子である．一方，高サブクールでは図４(b)に見るように，細線の周りに多数の微細気泡が雲のごとく発生し，気泡微細化沸騰が現れる．微細な気泡は，プルームに乗る形でバルク液中に放出されるため，サブクール下でも容易に消滅（凝縮）しない．なお，低サブクール下でも気泡の表面は蒸発と凝縮によって振動し安定しないが，振動は比較的穏やかであり，微細な気泡の発生はない．なお、この低サブクール下の気泡界面の振動現象については Kuzma-Kicha ら[30]により詳細に調べられている．図６は低サブクールにおける発生気泡の熱流束（過熱度）による違いを示す．図６(3)と図６(4)は，核沸騰から遷移した後の膜沸騰の状態である．一方，図７は高サブクール下の状況であるが，気泡の微細化は高熱流束でのみ生じている．このように，一般に気泡微細化沸騰は２～３MW／m^2 以上の高熱流束において生じるものである．

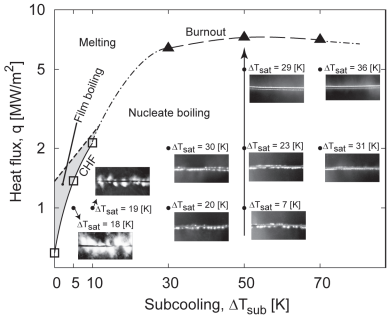
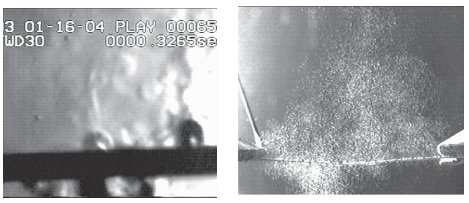


図３　熱流束とサブクールによる沸騰様相の違い



(a)　(b)

図４　サブクールによる気泡の発生挙動の違い．
(a) *q* ＝*1MW／m*^{2}，　*Δ Tsub*＝*1 0K*
(b) *q* ＝*3MW／m*^{2}，　*Δ Tsub*＝*4 0K*

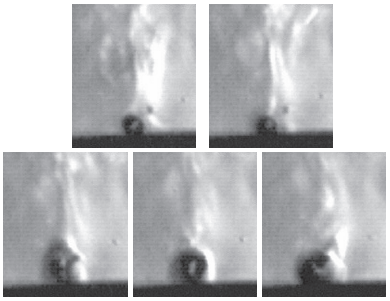
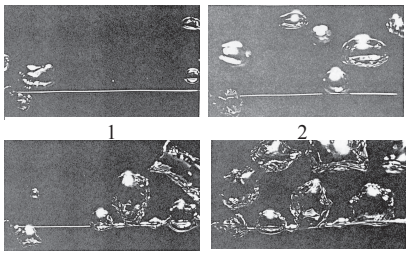
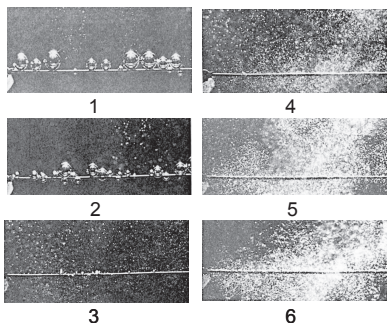


図５　サーマルプルーム（図４(a)）の時間的変動. 0.5ｍｓごとの写真.



1: q=0.36 MW/m^2, ΔT_{sat}=18.0K　2: q=0.52 MW/m^2, ΔT_{sat}=24.0K
3: q=0.63 MW/m^2, ΔT_{sat}=401K　4: q=0.93 MW/m^2, ΔT_{sat}=674K

図６　飽和状態（$\Delta tsat = OK$）の沸騰挙動



1: q= 0.99 MW/m^2 , ΔT_{sat}=7.0 K　4: q= 3.38 MW/m^2 ,ΔT_{sat}= 29.0 K
2: q= 1.24 MW/m^2 ,ΔT_{sat}= 11.0 K　5: q= 6.45 MW/m^2 ,ΔT_{sat}= 34.0 K
3: q= 1.77 MW/m^2 ,ΔT_{sat}= 26.0 K　6: q= 10.3 MW/m^2 ,ΔT_{sat}= 43.0 K

図７　サブクール状態の沸騰挙動

３．３ 発生気泡の大きさ

発生する気泡は高サブクールでは非常に小さいものとなる．しかも液中にかなりの速さで射出されるため鮮明な映像を捉えることは難しく，これまでほとんど測定例がない．唯一の例外として強制流動サブクール沸騰でなされたCelataらの測定[31]があるが，気泡サイズは数十μｍ以下の小さなものであるとしか報告されていない．そこで本研究では，200倍率の拡大レンズとシャッター速度が数μsecのストロボ光源を用いて瞬間接写撮影を行い，詳細に気泡径を測定した．拡大写真の場合、視野の大きさに限界があるため，細線近傍５mm内に存在する気泡群を撮影し，２μｍごとの大きさに区切って気泡の個数を数えた．その結果の一例（熱流束q＝2MW／m^{2}の場合）が図８である．この図でデータの円の大きさが気泡の個数の多少を示している．また破線は各サブクールにおける平均値である．図８からわかるように，気泡径は広く分布するものの，サブクールと共に小さくなり，気泡が微細化する高サブクール（$\Delta Tsub$＞３０～４０K）で平均値はほぼ一定で２０μｍ程度であり，最小のものは数μｍであることがわかる．こうのような微細気泡に働く浮力は小さく，気泡は細線周りに生じるプルーム（サーモキャピラリ流）に乗った形で液中を移動する．図４(b)，図７(4)～図 7(6) から推察されるように，プルームは細線周りのあらゆる方向に生じる。したがって微細気泡は細線周りに広く分布する．

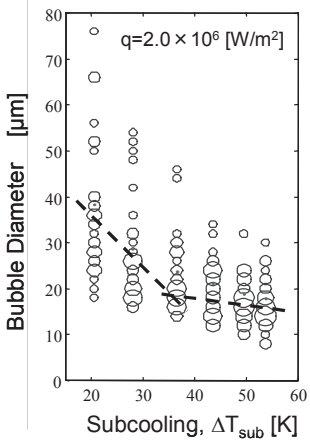


図８　気泡径のサブクールによる変化．各データ点の大きさは気泡の個数を，破線は平均値を表す．

３．４ 気泡微細化のメカニズム

図９は気泡の微細化の過程を捕らえた高速度写真の一例である．この写真から，微細気泡は始めに発生する１次気泡の一部が界面から剥がれ，それが分裂する形で生じていることがわかる．すなわち，気泡が微細化する高サブクール，高熱流束条件では，蒸発と凝縮が同時に激しく生じ，その結果，気泡の界面は激しく変動して不安定となり，微細な気泡を生むと考えられる．この発生機構は，いわゆるキャビテーション型の発生機構（気泡の急激な収縮と固体面への衝突による）とは異なったものであり、むしろノズルから噴出する気泡に超音波を印加したときに観察される微細化の機構[9]によく似ており興味深い。

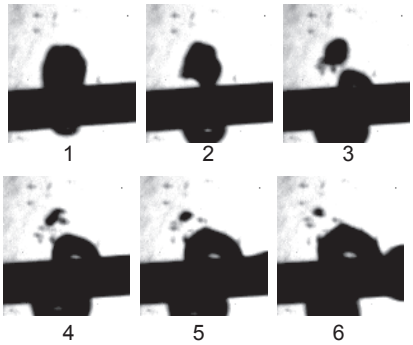


図９　気泡が微細化する様子．ｑ＝５．０MW／m2, ΔTsub＝３０K の場合．３１，２μsec ごとの連続写真.

３．５　１次気泡

加熱した細線上に最初に現れる１次気泡の大きさ（最大サイズ）はサブクール度と熱流束によって異なる．図１０はその大きさであり，サブクールの増加と共に始め小さくなるが，気泡が微細化する高サブクールではほぼ一定であり，熱流束による違いも小さい．前節で見たように微細気泡はこの１次気泡から引き千切られる形で発生するが，この状態はサブクールが３０～４０K 以上の高サブクールにおいてのみ観察される．

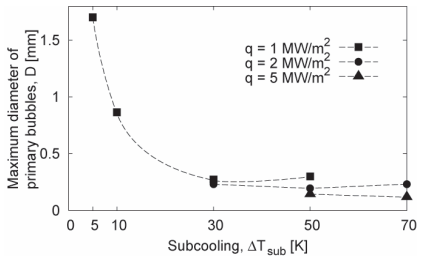


図１０　１次気泡の大きさ．サブクールと熱流束による変化.

３．６ 沸騰音

気泡微細化沸騰は高速の現象であり，その挙動（伝熱の機構）を捉えるのは難しい．サブクール沸騰では，沸騰によって発生する音（沸騰音）は熱流束やサブクールによって特徴的に変化する．この音は沸騰で生じる熱流体挙動と密接に結びついたものと考えられる．そこでマイクロフォンを用いて沸騰音を測定し，そのスペクトル分布を調べてみた．図１１は測定結果の一例であり，サブクール度が0K（飽和沸騰），２０K，４０K の場合の周波数によるペクトルの強さ（パワー）を示している．この図からわかるように，スペクトル強度は3 つの周波数（ａ，ｂ，ｃ）で強く現れる．そして低サブクールではａの低周波のものが卓越し，中程度のサブクールでは周波数の高いｂ，ｃが強度を増し，高サブクールでは高周波数のｃが卓越する．ここで注目すべきことは，ｂの周波数はサブクールと共に僅かに変化するものの，ａとｃの周波数はほぼ一定となっていることである．つまり，われわれが耳にする沸騰音の変化は周波数の変化によるものではなく，スペクトルの強度変化によるものであることがわかる．沸騰音に見られるこの３つの卓越した周波数が沸騰のどのようなメカニズムと結びついているのか，現在のところ未だ明らかにできていない．しかし，その周波数の大きさから見て，ａの周波数は１次気泡の発生に，ｂとｃは気泡の微細化に関連したものであると考えられる．

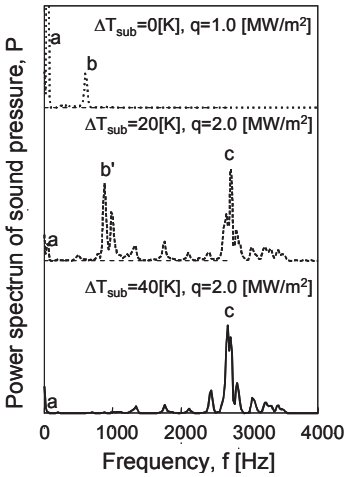


図１１　　沸騰音のスペクトル

４．限界熱流束

４．１ 線径依存性

核沸騰の上限は沸騰応用熱機器の安全性（焼き切れ）に関連することから限界熱流束（CHF: Critical Heat Flux），と呼ばれ，沸騰研究における最大の関心事項である．ＣＨＦについては未だ不明の事柄も多いのであるが，水平加熱面の値 q_{CHF} は次の Zuber の式でほぼ与えられる．

$$q_{CHF} = C \cdot \sqrt{\rho_V}\, h_{fg} \sqrt[4]{\frac{(\rho_L - \rho_V)\sigma g}{{\rho_V}^2}} \qquad (1)$$

ここに，ρ_V，ρ_L は蒸気および液体の密度，h_{fg} は蒸発潜熱，σ は表面張力，g は重力加速度である．細線や円柱の場合は，その大きさ（直径）によってＣＨＦは異なってくるが，円柱の場合のこの線径依存性について Lienhard ら [32] [33] は多数の実験を行って，無次元の形

で図１２のように整理している．ここに，縦軸に現れる $q_{CHF,Z}$ は式（1）の Zuber の値であり，横軸は毛管定数で規格化された円柱の半径

$$R' = d/\sqrt{\frac{\sigma}{(\rho_L - \rho_V)g}} \qquad (2)$$

である．Lienhard らのデータは直径が数 mm 程度以上のの比較的大きな円柱に関するものであるが，図１２にはこれまで細線で得られている他の研究者のデータを加えている．図１２を見ると，細線及び円柱系の CHF の線径依存性は次のように４つの領域に分類できることがわかる．

領域 I（$1.0 < R'$）: 大きな円柱の場合であり，CHF は水平平板の値とほぼ同じになる．

領域 II（$0.1 < R' < 1.0$）: 小さな円柱の場合であり，円柱径の減少と共に CHF は大きくなる．

領域 III（$0.05 < R' < 0.1$）: 比較的小さな円柱あるいは比較的大きな細線の場合であり，CHF は細線径が小さくなると CHF も小さな値となる傾向にあるが，遷移的な領域であってデータのばらつきが大きい．

領域 IV（$R' < 0.05$）: 小さな極細線の場合であり，CHF はほぼ一定となる．この一定値は平板の CHF の値より小さい．

なお，図１２は飽和沸騰における線径依存性に関するものである．線径依存性は液体サブクールや系圧力など CHF に関係したパラメタによって異なってくると予想されるが，現在のところそれを検証するに十分なデータはない．また，CHF は細線や円柱の熱容量や材質にも依存すると考えられるが，図１２のデータには，中実の細線や円管状のパイプのデータが含まれており，統一されていない．今後，関係パラメタの影響を含めた系統的なデータの収集と検討が必要である．

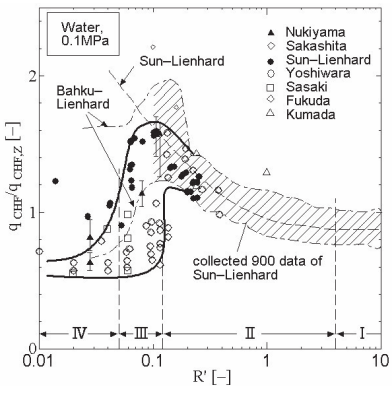


図１２　限界熱流束 CHF の線径依存性

４．２ サブクール依存性

沸騰においては一般に，サブクール度の増加と共に CHF も増加する．そして，平板，円柱などの加熱面の形状に関わらず，CHF はサブクールに比例して直線的に増加すると考えられている[34)－36)]．実際，水平加熱面や円柱の実験でそのことが確かめられている[37)－39)]．しかし，ごく小さな細線の場合はやや事情が異なる．図１３は白金細線の CHF に関する吉原と庄司[1)]の実験データである．また，図１４(a)～(c)は，線径の異なる白金細線と細線の材質がステンレス，ニクロムの場合のデータである．図１３，図１４に見るように，サブクールの増加と共に CHF は始めは直線的に増加するが，やがて増加率が鈍化し，高サブクールではほぼ一定の値をとる傾向にある．このような傾向はメタノールやアセトン，R113 などの液体について調べた Bakhru と Lienhard[32)] や福田ら[39)]のデータにも見られる．先に述べたように，気泡微細化沸騰はサブクール度が大きい場合に生じる．また，図１０に見るように１次気泡の大きさのサブクールによる変化傾向も上記 CHF の変化傾向に似ている．したがって，この CHF のサブクール依存性は気泡の微細化に関係していると推察されるが，未だそれを定量的，物理的に明らかにできていない．

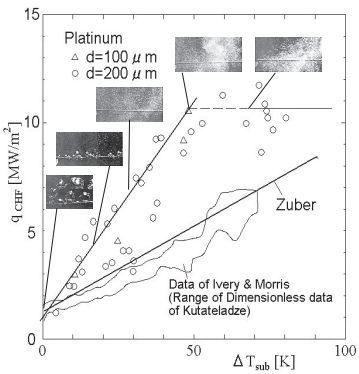


図１３　限界熱流束のサブクール依存性

４．３ 細線材質の影響

細線の沸騰の場合，核沸騰の限界（限界熱流束ＣＨＦ）は二つの異なった形であらわれる．その一つは核沸騰から膜沸騰への遷移の形であり，比較的低サブクールで現れる（図１４の○で示すデータ）．他の一つは高サブクールで生じる形であり，加熱細線の焼き切れ（バーンアウト）が発生する(図１４の●で示すデータ)．両者の境界は図１４の a 点であり，サブクールがおよそ１０～２０K，熱流束が２～４MW／m^2にある．そして実験によれば，a 点のサブクールや熱流束は細線材質やサブクールにはあまりよらない．つまり，上記 CHF の現れ方の違いは核沸騰における状況に理由するのではなく，核沸騰から膜沸騰に至る遷移の状況に原因していると考えられる．

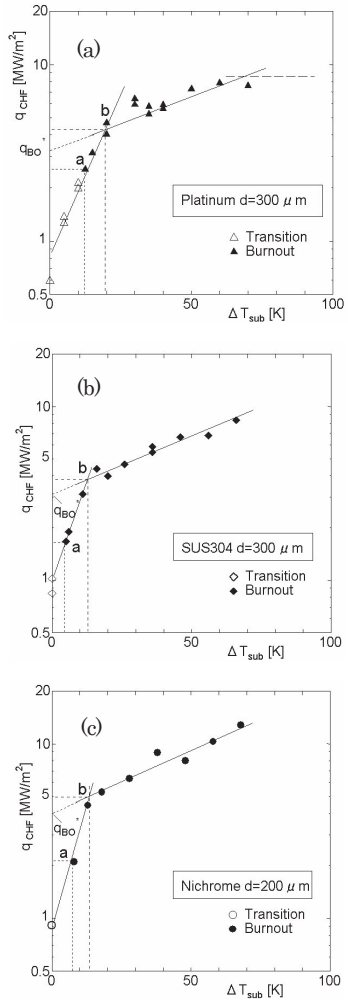


図１４　限界熱流束の細線材質とサブクール依存性

細線の溶断は，膜沸騰に遷移したときの加熱面温度が細線材質の融点を超えているために生じると考えるのがごく自然である．しかし残念ながら，このことを検証するに十分な膜沸騰のデータはほとんど存在しない．一方，図１３および図１４から明らかなように，細線の材質や直径が違うとバーンアウトが生じるCHFに差が現れる．このことは細線の熱容量や融点がバーンアウトに関連したものであることを間接的に示している．図１４のｂ点以上のサブクールでは，CHFはバーンアウトの形で発生するが，サブクール度による変化がほぼ直線的で一定の傾向を有している．そこで，この領域にあるデータをサブクール度０（飽和条件）まで延長し，その熱流束q_{BO}をサブクール度によらないバーンアウト型の特性的な限界熱流束とみなし，細線材質との関連を調べてみたのが図１５である．ここで横軸のSは，沸騰熱伝達と加熱面の熱容量の関係を議論するために BarCohen [40] が導入したパラメタであり，

$$S = d\sqrt{\rho c \lambda} \qquad (3)$$

と定義され，加熱面の寸法（今の場合は細線径）と過渡熱伝導に関係した量となっている．なお，式（３）でρ, c, λはそれぞれ加熱面材質の密度，比熱，熱伝導率である．図１５に見るように，q_{BO}はSによりほぼよいまとまりを示しており，上記の推論を間接的ながら支持している．

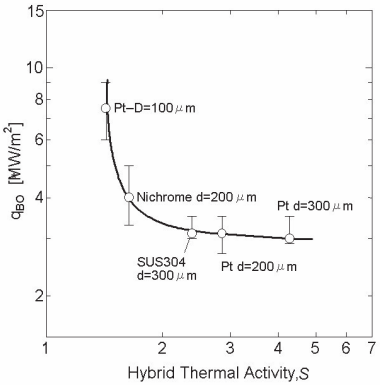


図１５　バーンアウト熱流束の細線熱容量依存性の整理

５．気泡微細化沸騰の応用

気泡微細化沸騰は発生気泡が非常に小さく，また高い伝熱特性を有することから，マイクロチャネル構造体を用いた高性能で小型の冷却デバイスへの応用に適している．この適用可能性を確認するため，流路幅が１mmで高さが 200μmから１mmの矩形ミニチャネル内で流動沸騰の実験を試みた．紙数の関係で，実験装置や方法，結果の詳細は別報 [5] [6] [8] に譲り，ここでは得られた伝熱特性と流路の圧力損失（流動抵抗）に関する主要な結果のみについて紹介する．図１６，図１７は伝熱特性と流路の圧損に関する典型的な実験結果である．図１６に見るように，ある熱流束（この場合は 4.8MW／m^2）を境に，チャネルの上流と下流で伝熱特性に明確な差が現れる．つまり，加熱度の低い低熱流束ではチャネル内は安定した核沸騰状態にある．このため，上流と下流の伝熱性能の差は小さい．一方，過熱度が大きく熱流束が高くなると流れは不安定な振動流となり，このため上流と下流で伝熱特性に差が現れる．こうした流動様式と伝熱特性の差は，必然的に流れの抵抗（圧力損失）の違いとなって現れる．すなわち図１７に見るように，低熱流束下では流れの抵抗は液単相の場合と大差が無く比較的小さい．一方，熱流束がある限界を超えて高くなると，流れの抵抗が激増する．マイクロ冷却デバイスとして有効であるのは，図１６，図１７において伝熱特性が安定で流れの抵抗の小さな低熱流束域である．この実験の場合，低熱流束の上限は約 4.8MW／m^2である。ここで注

目すべきは，低熱流束と言っても通常のプール沸騰ＣＨＦの約４倍であり，非常に高い．

この流動沸騰の結果から，ある長さ以下のミニチャネルを多数並列に配置し，液体の流入と流出を繰り返しながらそれをカスケード式に多重配列することで，伝熱性能の優れたマイクロ冷却デバイスを構成できる可能性のあることがわかる．原理的には，現在の冷却能を１桁も越える高い冷却能を持ったデバイス（ヒートシンク）が可能である．残されている問題は，デバイス設計に資するチャネル径やチャネル長さに関するデータベースの蓄積，および具体的にマイクロチャネル構造体を製作することである．

６．結言

本報では，冷却能の非常に高い小型冷却デバイスへの応用が期待される気泡微細化沸騰に関し，水平加熱細線を用いたプール沸騰実験を行って，現象挙動を詳しく調べた結果について述べた．また今後、研究課題として残されている問題を指摘した．

参考文献

(1) 庄司正弘, 吉原正博, “極細線のバーンアウト熱流束に関する研究”, 第 28 回日本伝熱シンポジウム, 博多, **1**-B142 (1991-5), pp.121-123.

(2) 庄司正弘, 吉原正博, “沸騰熱伝達における微細気泡発生現象の観察”, 可視化情報, **11**-2 (1991), pp.143-148.

(3) 湯浅真樹, 丹下学, 渡辺誠, 庄司正弘, “加熱細線における気泡微細化プール沸騰”, 第 41 回日本伝熱シンポジウム, 富山, **1**-A131 (2004-5), pp.17-18.

(4) M.Tange, M.Yuasa, S.Takagi and M.Shoji, Microbubbles Emission Flow Boiling in a Microchannel and Minichanell, *Thermal Science and Engineering* , **12**-6 (2004-6), pp.23-30.

(5) 丹下学, 渡辺誠, 高木周, 庄司正弘, “ミニチャネル内の気泡微細化強制流動沸騰”, 第 41 回日本伝熱シンポジウム, 富山, **2**-A223 (2004-5), pp.365-366.

(6) 丹下学, 渡辺誠, 高木周, 庄司正弘, “マイクロチャネル内の気泡微細化沸騰と蒸気泡の動的挙動”, 日本機械学会年次大会講演論文集, 札幌, OS**2** (2004), pp.87-88.

(7) 丹下学, 渡辺誠, 高木周, 庄司正弘, “細線上気泡微細化沸騰の伝熱機構”, 第 42 回日本伝熱シンポジウム, 仙台, **3**-A352 (2005-5), pp.762-763.

(8) M.Tange, M.Watanabe, S.Takagi and M.Shoji, Microbubble Emission Boiling in a Rectangular Minichannel Flow, *Proc. 3rd International Conference of Microchannels and Minichannels* , J, June 13-15 Toronto, Canada, 2005.

(9) 幕田寿典, 竹村文男, 飛原英治, 松本洋一郎, 庄司正弘, “超音波場における均一微細気泡”, 日本機械学会論文集, 70-699 (2004-11), pp.2758-2767.

(10) S.Nukiyama, “The maximum and minimum values of the heat Q transmitted from metal to boiling water under atmospheric pressure”, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.27, pp.959-970, 1984.原典は抜山四郎, “金属面と沸騰水との間の傳達熱の極大値並びに極小値決定の実験”, 日本機械学会誌, **37**-206 (933-6), pp.367-374.

(11) 稲田茂昭, 宮坂芳喜, 泉亮太郎, 小長谷芳彦, “サブクールプール沸騰特性曲線の研究（第１報）”, 日本機械学会論文集, B**47**-417 (1981-5), pp.852-860.

(12) 稲田茂昭, 宮坂芳喜, 佐久本伸, 泉亮太郎, “サブクールプール沸騰特性曲線の研究（第２報）”, 日本機械学会論文集, B**47**-422 (1981-10), pp.2021-2027.

(13) 稲田茂昭, 宮坂芳喜, 佐久本伸, 泉亮太郎, “サブクールプール沸騰特性曲線の研究（第３報）”, 日本機械学会論文集, B**47**-422 (1981-10), pp.2030-2039.

(14) 稲田茂昭, 宮坂芳喜, 泉亮太郎, 小林盛一, “サブクールプール沸騰特性曲線の研究（第４報）”, 日本機械学会論文集, B**47**-423 (1981-11), pp.2199-2206.

(15) 稲田茂昭, 宮坂芳喜, 泉亮太郎, “サブクール液中に離脱した合体蒸気泡の消滅”, 日本機械学会論文集, B**52**-477 (1986-5), pp.2222-2227.

(16) S.Inada, Y.Miyasaka, S.Sakamoto and G.R.Chandratilleke, Liquid-solid contact state in subcooled pool transition boiling system, *Trans. of the ASME J. of Heat Transfer*,Vol.108 , pp.219-221, 1986.

(17) 藤林晃夫, 熊谷哲, 武山武郎, “姿勢と流動の組み合わせによる四つの強サブクール沸騰系の熱伝達”, 日本機械学会論文集, B**51**-463 (1985-3), pp.919-927.

(18) 広野, 島田了八, 熊谷哲, 武山武郎, “水平面から高サブクール水への気泡微細化沸騰”, 東北大学紀要, **52**-2 (1988), pp.149-165.

(19) 久保良, 熊谷哲, “気泡微細化沸騰の発生と安定性”, 日本機械学会論文集, B**58**-546 (1992-2), pp.497-502.

(20) 久保良, 熊谷哲, “気泡微細化沸騰の発生音と熱伝達の相関性”, 日本機械学会論文集, B**59**-557 (1993-1), pp.183-190.

(21) R.Kubo and S.Kumagai, Occurrence and stability of microbubble emission boiling - stormy and clam regimes, *Editors: Hewitt, Geoffrey Frederick, Heat Transfer 1994, Proc. 10th Int. Heat Transfer Conf*, Vol.5, pp.99-104, 1994.

(22) 熊谷哲, 久保良, 川崎正史, “水平および鉛直伝熱面から並行流サブクール水への気泡微細化沸騰”, 日本機械学会論文集, B**64**-627 (1998-11), pp.3808-3813.

(23) 熊谷哲, 久保良, “気泡微細化沸騰における気泡の挙

動，日本機械学会論文集，B**65**-629 (1999-1), p.296-300.
(24) 熊谷哲，川端和典，吉川浩行，島田了八，“鉛直平面からの気泡微細化沸騰における気泡の挙動と圧力変動”，日本機械学会論文集，B**65**-632 (1999-4), pp.1383-1388.
(25) 熊谷哲，兎原剛史，中田俊彦，泉正明，“気泡微細化沸騰におけるボイド信号に基づく固液接触の考察”，日本機械学会論文集，B**67**-661 (2001-9), pp.2304-2310.
(26) 鳥飼欣一，鈴木康一，竹内光生，“ぬれ難い面の沸騰伝熱に関する研究”，日本機械学会論文集，B**55**-511 (1989-3), pp.770-775.
(27) 鈴木康一, 鳥飼欣一, 佐藤英明, 石丸淳二, 田中康夫, “矩形管流路内のサブクール沸騰熱伝達”，日本機械学会論文集，B**65**-637 (1999-9), pp.3097-3104.
(28) K.Suzuki, H.Saitoh and K.Matsumoto, High Heat Flux Cooling by Microbubble Emission Boiling, *Annals of The New York Academy of Sciences* , pp.364-377, 2002 Oct.
(29) 国分太一，鈴木康一，“拡大加熱面からの微細気泡の発生を伴うサブクール流動沸騰”, 第 41 回日本伝熱シンポジウム，富山，**2**-A132 (2004-5)，pp.19-20.
(30) Y.Kuzma-Kichta, A.K.Ustinov, A.A.Ustinov and L.Kholpanov, Investigation of interface oscillations during boiling, *The third international conference on transport phenomena in multiphase systems* , pp.45-52, 2002.
(31) G.P.Celata, M.Cumo, A.Mariani and G.Zummo, Burnout in subcooled flow boiling of water. A visual experimental study,, *Int. J. Therm. Sci,* , Vol.39, pp.896-908, 2000.
(32) N.Bakhru & J.H.Lienhard, Boiling from small cylinders, *Int. J. Heat Mass Transfer,* Vol.15, pp.2011-2025, 1972.
(33) K.H.Sun & J.H.Lienhard, The peak pool boiling heat flux on horizontal cylinders, *Int. J. Heat Mass Transfer,* Vol.13, pp.1425-1439, 1970.
(34) S.S. Kutateladze and L.L.Schneiderman, Experimental study of influence of temperature of liquid on change in the rate of boiling, *USAEC Report AEC Tr-3405,* pp.95-100, 1953.
(35) N. Zuber, M.Tribus and J.W.Westwater, The hydrodynamic
crisis in pool boiling of saturated and subcooled liquids, *Int. Development in Heat Transfer, ASME,* No.27, pp.230-236, 1963.
(36) H.J.Ivey and D.J.Morris, Critical heat flux of saturation and subcooled pool boiling in water at atmospheric pressure, *Proc. third Int. Heat Transfer Conference*, Vol.3, pp.129-142, 1966.
(37) 横谷定雄，渡辺誠，庄司正弘，“高サブクール沸騰における限界熱流束”，第 37 回日本伝熱シンポジウム，神戸，**1**-B131 (2000-5)，pp.65-66．.
(38) 坂下弘人，大森武志，榊野大創，熊田俊明，“水平線および垂直線のサブクール沸騰限界熱竜束”，第 35 回日本伝熱シンポジウム，名古屋，**3**-H341 (1998-5)，pp.937-938.
(39) 福田勝哉，櫻井彰，“種々の液体中の水平円柱における異なる機構をもつサブクールプール沸騰ＣＨＦに及ぼす円柱直径の影響”，第 38 回日本伝熱シンポジウム，大宮，**2**-G221 (2001-5)，pp.587-588.
(40) A.Bar-Cohen et al., Pool boiling critical heat flux in dielectric liquids, Proc. Fifth International Conference on Boiling Heat Transfer, Jamaica, 2003.

総説

人工酸化酵素の開発を指向した遷移金属-活性酸素錯体の研究

引地　史郎*

Studies on the coordination chemistry of transition metal-activated oxygen complexes for the development of bio-inspired artificial oxygenases

Shiro HIKICHI*

1．緒言

生体内での酸素代謝過程における有機化合物への酸素添加反応は，大気中の酸素分子を酸化剤とした極めて穏和な条件下における高効率な反応であることから，その反応機構には生命化学の枠組みを越えて合成化学・触媒化学等の幅広い分野から大きな関心が寄せられている．

遷移金属イオンを触媒反応活性点としている酸化酵素における反応機構を理解するためには，人工的に合成したモデル，すなわち遷移金属-活性酸素錯体の諸性質の解析等，錯体化学的なアプローチによる分子化学的研究が不可欠である．そしてこのような研究を発展させることで酵素模倣型酸化触媒，すなわち“人工酸化酵素”の開発が達成されるものと期待される．本稿では生体内における金属イオンの触媒作用及び炭化水素の酸化反応について概説した上で，筆者が取り組んできた遷移金属錯体による酸素活性化反応に関する研究について解説する．

2．生物無機化学と触媒化学の接点

2.1 生体内における金属の触媒作用

生体内における触媒的な物質変換反応，すなわち酵素反応は，通常常温・常圧という温和な条件下において極めて効率よく進行することから，酵素反応を直接物質生産に利用することはもちろん，酵素反応の仕組みを理解できればそのエッセンスを人工物である触媒及び触媒反応プロセスの設計・構築に取り込めるのではないかとの発想から，酵素における触媒反応活性点の構造と機能・反応性の相関や反応機構については触媒研究開発の観点から興味が持たれてきた．

生命体にとってはある種の金属元素が生命活動を維持していく上で必須である．そして，これら生体必須金属元素のうちの幾つかは酵素中に含まれており，これが種々の物質変換反応を触媒する機能を担っている（表１）．このような生体内における金属の触媒機能に関する研究は，“生物無機化学(Bioinorganic chemistry)”と総称される学問領域の範疇に入る [1]．生物無機化学とは通常無機化学において取り扱われる元素の生命体との関わりを研究する学問であり，生物学と化学の接点に位置している学際領域の学問であることから，基礎化学全般（有機化学・物理化学・分析化学・生化学）はもちろんのこと，環境学や工学・医学・薬学・農学等とも関連が深い．近年の基礎化学的事象に関する理解の進歩と様々な分析機器・手法の発達に伴い，以前は直接観察することやデータの解析・解釈が困難であった生物無機化学的な現象についての解明が進行中である．金属イオンが触媒活性点として機能している“金属酵素”に関しても，ここ数年でいくつかのものの構造がＸ線結晶構造解析等の手法により原子レベルで解明されているが，触媒反応機構に関しては現在のところ未解明な点が多い．金属酵素の場合，その

表１．生体必須金属元素（d-ブロック元素）の機能

金属	機能
V	酸化(ハロゲンイオンの酸化)，窒素固定
Mo	窒素固定，酸化(酸素転移)
W	酸化(脱水素)
Mn	光合成(酸素発生)，活性酸素(H_2O_2, O_2^-)の無毒化
Fe	酸素運搬，酸化，活性酸素の無毒化，窒素固定，電子伝達
Co	アルキル基転移
Ni	水素活性化，一酸化炭素体代謝，加水分解
Cu	酸化，酸素運搬，電子伝達
Zn	加水分解，アルコール酸化，タンパク質構造維持

*教授　物質生命化学科
Professor, Dept. of Material and Life Chemistry

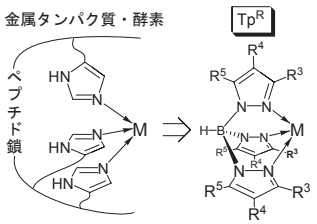
活性点は分子量が数十万にも及ぶ巨大分子に埋め込まれた状態であり，しかも触媒機能を発揮する条件が極めて限定されてしまうために，反応過程を直接観測することには多くの技術的困難を伴うことがその理由である．また近年の分析技術の進歩により酵素の活性点で進行している反応を観測した例も報告されるようになってきたが，観測結果を合理的に説明するためには根拠となる事例が求められる．そこで人工的に合成したモデル化合物，いわゆるモデル錯体を用いた分子化学的研究（錯体化学的研究）が行われてきた．

モデル錯体には活性点構造や反応中間体の分光学（物理化学）的特徴を再現することを目的とした“構造モデル”と，反応性の再現に重点を置いた“機能モデル”とがある [2]．かつて現在ほどに酵素そのものの状態を観察する技術が発達していなかった頃は，構造モデルは金属酵素の謎を解き明かす上で大きな役割を担ってきたが，多くの金属酵素の活性点構造が解明されてきたここ数年間で，多くの研究者達の興味の対象は触媒作用機構の解明を目的とした機能モデルに移りつつある．このような生体機能の再現を目的とした研究は“bio-mimetic chemistry”とも表現される．また最近では，生体反応を忠実に再現することにはとらわれずに，酵素や酵素モデルの特性を活かして，生体反応のエッセンスである高効率・高選択性・低環境負荷な化学反応を実践することを目指した取り組み，いわゆる“bio-inspired chemistry”と表現されるような研究も進展しつつある．

2.2 配位子（金属支持体）の分子設計

金属酵素において触媒活性点となっている金属イオンは，酵素を構成しているタンパク質のアミノ酸残基や，補欠分子族あるいは補因子と呼ばれる生体中に存在する有機化合物分子に結合しており，これにより金属イオンはその電子的・立体的な環境が制御され，触媒機能を発揮している．モデル錯体とは，金属酵素から触媒活性点である金属イオンの周辺構造のみを切り出したものとイメージされるが，決して酵素の忠実なレプリカではなく，金属イオンの支持体，すなわち配位子には生体系と同じアミノ酸や補欠分子族を用いる必要はない．重要なポイントは金属イオンの触媒能を発現させるためには如何なる環境にあることが必須要件であるかを考察し，配位子自体の分子構造，電子的性質を考慮した分子設計を行うことである．換言すれば，触媒設計に通じる自由な分子設計を行うことも可能であり，研究の最終到達目標を酵素反応機構の解明にとどまらずに触媒開発を念頭に置いた場合にこそ，モデル錯体研究は有意義なものとなる．

筆者らが本稿で紹介する研究では金属酵素における金属中心の環境に類似した構造を構築するために，図1に示したヒドロトリス(ピラゾリル)ボレート(以下 Tp^R と略記)と称される化合物を配位子に用いている [3]．Tp^R の原形は1960年代に開発された，ホウ素に3つのピラゾリル基及び1つのヒドリド基が結合した化合物であり，それ以後ピラゾール環上に様々な置換基を導入した類縁体及びそれらを用いた数多くの金属錯体が合成されてきた．Tp^R はアニオン(–1 価)種であることからカチオン種である金属イオンとは静電的な相互作用により解離しにくく安定な錯体を形成するという特性を持つ．またピラゾールについては様々な置換基を持つ類縁体の合成が比較的容易であることから，それらを水素化ホウ素化合物と反応させることで様々な置換基を持つ Tp^R へと誘導することが可能である．ピラゾール環の3位に導入した置換基(R^3)は金属錯体形成時には金属中心を取り囲むように位置するため，その嵩高さに応じて中心金属の立体的環境を制御することが可能となる．また3,4,5位のいずれの置換基(R^3, R^4, R^5)ともピラゾリル基を通じて中心金属の電子状態に大きな影響を及ぼす．更にこれらの置換基は錯体全体の溶解性などにも深く関わっている．つまりこの様な効果を理解した上で適宜置換基を選択することにより，錯体の性質を自在に制御することが可能となる．従って Tp^R は様々な分子設計が可能な配位子として錯体化学全般で広く用いられ，これまでに多くの不安定錯体種の単離・構造決定等に貢献すると共に，近年では錯体触媒における配位子としての応用も検討されている．また Tp^R はいくつかの金属酵素に見い出されている三つのヒスチジン由来のイミダゾリル基が形成する金属中心の配位環境を再現できるものとして生物無機化学的な研究においては特に注目を集めてきた [4]．その代表例としては，軟体動物・節足動物の血液中に存在する酸素運搬体である銅タンパク質ヘモシアニンの酸素付加体モデルが挙げ



Tp^R	R^3	R^4	R^5
Tp^{iPr2} (**a** series)	iPr	H	iPr
$Tp^{Me2, Me}$ (**b** series)	Me	Me	Me
$Tp^{Me2, H}$ (**c** series)	Me	H	Me
$Tp^{Me2, Br}$ (**d** series)	Me	Br	Me

図1．ヒドロトリス(ピラゾリル)ボレート（Tp^R）

られる．1989年，筆者の恩師である北島・諸岡らはピラゾール環の3及び5位にイソプロピル基を導入したTp^{iPr2}を配位子とする複核銅(II)酸素錯体 **1**（図 2）を合成し，これがヘモシアニンの酸素付加体に極めて類似したスペクトル的特徴を示したこと，さらにX線結晶構造解析によりペルオキシドイオン(= O_2^{2-})の配位様式が特異な“μ-η^2:η^2”型であったことから，銅タンパク中でも酸素分子は同様な配位構造として取り込まれていることを予言した [5]．後年実際のヘモシアニンの酸素付加体の構造解析がなされ，この予言が正しかったことが証明された [1]．

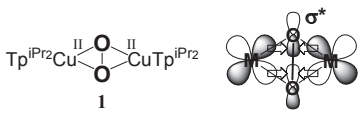


図2．複核銅(II)－μ-η^2:η^2-ペルオキソ錯体 1 及び金属－ペルオキソ配位子間の軌道相互作用

3．酸素分子の活性化とアルカン水酸化反応

3.1 金属による酸素分子の活性化様式

酸素分子あるいは過酸化水素などの過酸化物を酸化剤として用いる触媒的酸素化反応は，生体内でエネルギー生産・異物代謝などで重要な役割を果たしているのみならず，化学工業や実験室レベルでの合成反応において欠くことのできない素反応となっている．なかでも酸素を酸化剤とした反応系は，酸素分子が最も安価な酸化剤であり，廃棄物が副生しないクリーンなプロセスであるため，工業レベル・実験室レベルではその達成に多くの期待が寄せられているが，現在のところ効率的な反応が達成された例は少ない．一方生体内では，酸化酵素の触媒作用によって酸素分子を酸化剤とする酸化反応が効率よく進行することから，その仕組みに注目が集まっている．生体内の酸素酸化反応は，(a) 金属酵素による遷移金属イオン上での酸素分子の活性化を経由するものと，(b) フラビン酵素などによる有機過酸化物中間体を経るものに大別されるが，筆者らは(a)のタイプの反応に着目し，研究を展開してきた．

金属酵素による酸素分子を酸化剤とした有機化合物の酸化反応は，①酸素分子の金属イオンへの結合と，②結合した酸素種の活性化とその基質への移行，という段階を経て進行していると考えられる．酸素分子はまず酵素中の金属イオンに結合するが，このとき酸素分子は低原子価状態にある金属から電子移動を受けて還元され，一電子移動の場合はスーパーペルオキシド(O_2^-；超酸化物イオン)，二電子移動の場合はペルオキシド(O_2^{2-}；過酸化物イオン)となる．これは元来気体であり溶液中にごく低濃度でしか存在しない酸素を金属イオン上に固定化するためには必須のプロセスである．血液中に存在するヘモグロビン等の酸素運搬をつかさどるタンパク質では，金属イオン上に固定された酸素分子還元体は，周囲の酸素分圧が低い状況下では再び金属へと電子を移動させることで中性の酸素分子となって金属イオン上から解離する．酸素呼吸を行っている生物の体内では，このような可逆的な吸脱着を制御することで酸素運搬は行われている．

一方酸化酵素の場合，続いて起こる酸化反応を進行させるためには，金属イオン上に固定された酸素分子還元体を，もう一段何らかのプロセスにより活性化して触媒作用を発現していると考えられている．なぜならば酸化反応というのは本質的に基質から電子を取り去るプロセスであり，これを効率的に進行させるためには酸素種自体は電子を豊富に持つ基質と反応しやすい（すなわち求電子性が大きい）ことが望ましいが，酸素分子還元体(O_2^{n-}: n= 1,2)はそれ自体が電子を豊富に持つことから，電子が不足している基質と反応しやすい種（＝求核種）であり，酸化活性種としての反応性は乏しいためである [6]．酸素分子還元体の活性化としては，ペルオキシドへのH^+の付加によるヒドロペルオキシド（OOH^-）種の発生や，ペルオキシドの 2 電子還元によるオキソ(O^{2-})種の発生が考えられる．ヒドロペルオキシド，オキソ共に陰イオン種であることから，これら自体の求電子性は低いと考えられるが，これらが電気的に陽性な金属イオンに結合することでその性質は変化する．金属－ヒドロペルオキソ種（M-OOH）の場合，ペルオキシドの両末端に種類の異なる陽イオンが結合しているために O-O 結合が分極して一方の酸素上にδ^+性が生じ，これにより求電子性が発現していると考えられる．一方金属－オキソ種（M=O）の場合，金属イオンが電子が不足した高原子価状態にあるときには図 3 に示すように低原子価金属－酸素原子結合体(図 3 における右端の種)と等価であると考えられ，この金属イオンが酸化還元電位が高い(還元状態が安定)ものであれば酸素原子としての反応性，すなわち求電子的な反応性を示すようになると考えられる．

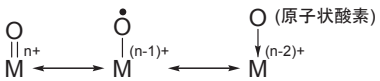


図3．高原子価金属-オキソ種の共鳴構造

3.2 メタン水酸化反応

メタン（CH_4）はもっとも単純な飽和炭化水素化合物であり，天然ガスの主成分である．天然ガスの埋蔵量は石油に匹敵しており，また最近注目されているメタンハ

イドレート，バイオマス処理ガスなどにおける潜在的な埋蔵量はさらに莫大であることから，石油代替エネルギー・化学資源として近年益々関心が高まっている．現在メタンは直接燃料に用いられる他，水蒸気改質による合成ガス（一酸化炭素と水素の混合ガス）製造を経由してメタノールへと変換され，化成品原料やアルコール燃料として利用されている．しかしこのメタンからメタノールへの転換プロセスは高温・高圧条件下での反応であり，もしもメタンを温和な条件の下で空気中の酸素分子を酸化剤として触媒的にメタノールに変換することが出来たならば，エネルギー消費量及びCO_2排出量の低減により環境保全に大きく貢献するばかりか，メタノールを出発原料とする多彩な化学工業プロセスの発展も期待される．ところがメタンは C-H 結合エネルギーが高く（104 kcal/mol），また双極子モーメントがなく他の化学種との相互作用を形成しにくい等の理由から，全ての飽和炭化水素類の中で最も水酸化することが困難な物質である．そのため，実用的な観点に加えて学術的な興味からも，多くの化学者達によりメタン水酸化反応触媒に関する研究が行われてきた．

自然界にはメタン資化細菌というメタンを主栄養源とする生物がおり，この細菌が保有するメタンの代謝過程に関与する酵素の１つにメタン水酸化酵素(Methane monooxygenase, 通称 MMO)がある．この酵素は，常温・常圧下でのメタンからメタノールへの選択的な酸化を触媒することから特に注目を集めている．1990 年代半ばに MMO の単結晶 X 線構造解析が行われ，その触媒活性点が 3Å 程度離れて存在する 2 個の鉄イオンで構成されていることが明らかになった（図４）．さらに反応機構に関する研究から，2 個の鉄イオンによる酸素分子の活性化を経て反応が進行していることが示唆された [8]．これらの事実より，複核金属中心上での酸素活性化を経たメタン酸化反応機構に対する関心が高まった．

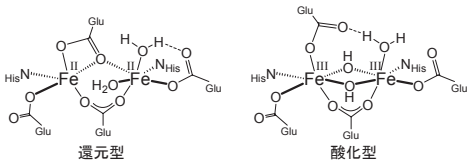


図４．メタン水酸化酵素の触媒活性点の構造

４．複核高原子価金属-架橋ジオキソ錯体の合成と反応特性に関する研究

4.1 研究のコンセプト

前述したヘモシアニンの酸素付加体モデルである複核銅(II)酸素錯体 **1** の大きな特徴として，O-O 結合の伸縮振動値が約 750 cm^{-1} であり，これは通常 800 cm^{-1} 以上に観測されるペルオキシドの振動値に較べて極めて低波数であることが挙げられる．このことはペルオキシドが μ-η^2:η^2 の配位様式を採った場合，2 つの金属中心から O_2^{2-} のσ*軌道への電子逆供与（図 2 右）の為に O-O 結合次数が低下しており，O-O の結合が切れる寸前の状態にあると解釈される．しかし，ペルオキシドの状態を保っているこの銅酸素錯体はフェノールなどのごく限られた基質以外には顕著な酸化活性を示さない [5]．

そこで本研究では，複核金属-μ-η^2:η^2-O_2^{2-}錯体に対し，電子的な摂動を与えてペルオキシドの 2 電子還元を進行させることで，求電子的な反応性を示すことが期待される高原子価金属ーオキソ種を発生させることを計画した．可能な方法としては，全く異なった配位子を用いることや，Tp^R の置換基を調節すること等も考えられるが，筆者等は北島・諸岡の研究を更に展開し，最も直接的に摂動を与える方法として，支持配位子は Tp^R に固定した上で異なった中心金属を導入することを検討した．金属を変えることによって，d 電子の数および d 軌道のエネルギーレベルは変化するが，同一配位子を用いることによって，基本的な電子及び幾何構造が保たれたまま，生成する酸素錯体に及ぼす金属の効果を直接的に観察することができるのではないかと期待した．そこで中心金属をニッケル及びコバルトへと展開した結果，複核金属中心上でペルオキシドが原子状酸素にまで活性化された複核高原子価金属-架橋ジオキソ錯体の合成に成功し，これが MMO の反応機構とも関連した重要な酸化活性種であることを明らかにするに至った [8]．

4.2 高酸化活性種の発生− Tp^{iPr2} 錯体による研究

研究開始当初，前述の銅酸素錯体**1**と同様，Tp^{iPr2}を用いて複核ニッケル及びコバルト酸素錯体の合成を検討した．一般に酸素錯体の合成法としては低原子価状態にある金属錯体と酸素分子との反応が利用される．実際銅錯体**1**の場合にも銅+1価錯体と酸素との反応で合成されていたが，複核銅+2価-架橋ジヒドロキソ錯体 $[(Tp^{iPr2}Cu^{II})_2(\mu\text{-}OH)_2]$ (**2a**^{Cu})と過酸化水素との脱水縮合反応によっても合成可能であるため（図５），ニッケル及

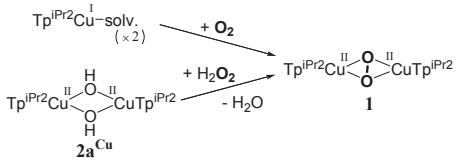


図５．複核 Cu(II)-ペルオキソ錯体 1 の合成法

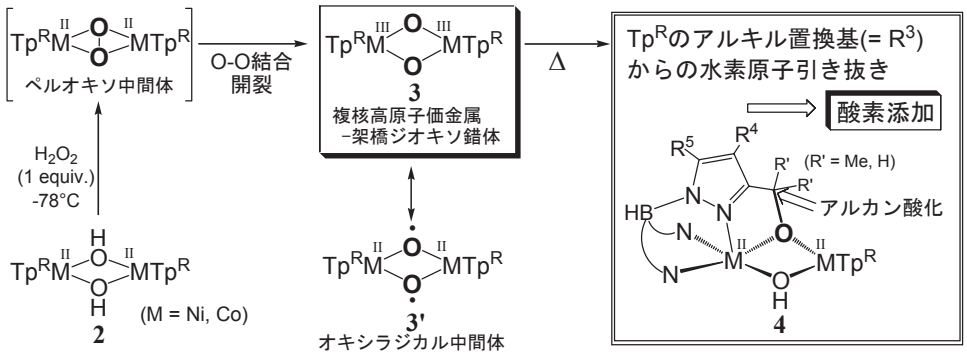


図６．複核高原子価金属–架橋ジオキソ錯体３の生成とそのアルキル基への酸素添加活性

びコバルト錯体での研究に際しても，原料錯体の合成及び取り扱い容易である後者の脱水縮合法を適用した．複核金属+2価-架橋ジヒドロキソ錯体**2a^{M}** (M = Ni, Co)[9]と1等量のH_2O_2との反応では，極低温下（Ni: –60℃，Co: –50℃）においてのみ観測し得る熱的に極めて不安定な褐色の錯体種**3a^{M}**が生成し，しかもそれらの低温下(–40℃以上)での自己分解反応の結果，金属イオンの近傍に位置する配位子のイソプロピル基のメチン部への酸素添加反応が進行（錯体**4**が生成；図６右端）することが判明した．このことは複核金属中心上でペルオキシド中間体のO-O結合の活性化を経てアルキル基への酸化活性を示す中間体が生成していることを示唆するものであるが，この時点では反応中間体の構造決定には至らなかった[10]．

4.3 酸化活性種の同定– Tp^{Me2,X}錯体による研究

以上のようにニッケル及びコバルト酸素錯体は極めて反応性に富むことが明らかとなったが，それ故に反応活性種の単離，同定や機構解明は極めて困難で，Tp^{iPr2}錯体では反応中間体の単離・構造決定には至らなかった．これは生成した活性種の反応性の高さに加えて，その近傍に酸化を受け易い３級 C-H 結合（イソプロピル基のメチン部）が存在するためであると考えられたことから，Tp^{R}配位子のピラゾール環の 3,5 位の置換基を結合エネルギーが高い１級 C-H 結合のみから構成されるメチル基とすることで分子内酸素添加反応が抑制できるものと予想した．そこでピラゾール環の 3,5 位にメチル基置換基を導入した Tp^{Me2,X} 配位子（= ヒドロトリス(3,5-ジメチル-4-X-1-ピラゾリル)ボレート; R = Me, H, Br）を用いてヒドロキソ錯体と 1 等量の H_2O_2 との反応について検討を行った．いずれの配位子を用いた場合にも，ヒドロキソ錯体**2b-d^{M}**は１等量のH_2O_2と反応してそれぞれ**3a^{M}**に類似したスペクトルを与える錯体 **3b-d^{M}**が生成した．このうち配位子の４位の置換基がメチル基のものについてニッケル，コバルトの両者につきそれぞれこの不安定種の単離及び X 線結晶解析による分子構造の決定に成功し，これらが複核 Ni(III) 及び Co(III)-架橋ジオキソ錯体$[(Tp^{R}M^{III})_2(\mu\text{-}O)_2]$であることが確認された [11]．これらオキソ錯体**3b-d^{M}**はヒドロキソ錯体**2b-d^{M}**とH_2O_2以外の酸化剤との反応では得られず，従って銅錯体 **1** の場合と同様にヒドロキソ錯体 **2** が H_2O_2 と脱水縮合することで$\mu\text{-}\eta^2\text{:}\eta^2$-ペルオキソ中間体が生成し，その O-O 結合が開裂して複核高原子価金属-架橋ジオキソ錯体 **3^{M}** を与えたものと推定される．

Tp^{R} 錯体系において中心金属が銅である場合には O-O 結合開裂による複核銅+3 価-架橋ジオキソ種の生成は見られない．ここで銅・ニッケル・コバルトの d 軌道レベルを比較すると，Cu < Ni < Co の順である．従ってニッケル・コバルトと比べて d 軌道レベルが低い銅錯体ではσ*軌道への逆供与が不十分であるため前述したようにO-O結合が保持された$\mu\text{-}\eta^2\text{:}\eta^2$-ペルオキソ錯体**1**が生成するのに対し，d 軌道レベルの高いニッケル・コバルト錯体の場合にはO_2^{2-}のσ*軌道への電子供与によりO-O結合が開裂して複核高原子価金属-架橋ジオキソ錯体 **3^{M}** が生成したと解釈することができる．なお銅錯体の場合でも，sp^3 混成の窒素原子の方が sp^2 混成の窒素原子より電子供与性が大きいことを考慮すると，sp^2-配位窒素しか持たない Tp^{R}錯体 **1** では O-O 結合を保持した$\mu\text{-}\eta^2\text{:}\eta^2$-ペルオキソ錯体のみが生成するのに対し，$sp^3$-配位窒素を持つアミン系配位子を有する錯体では O-O 結合切断を経て複核銅(III)-架橋ジオキソ錯体が生成することも上記の解釈と一致する [12]．また Tp^{R}錯体以外の系でも，同一配位子に支持された銅とニッケルとで O-O 結合活性化能に差が見られる（銅では複核銅(II)-$\mu\text{-}\eta^2\text{:}\eta^2$-ペルオキソ錯体，ニッケルでは複核ニッケル(III)-架橋ジオキソ錯体が選択的

に生成する）ことが報告されている[13].

単離が可能なほどには安定ではあったものの，$Tp^{Me2,X}$を配位子とするオキソ錯体 **3b-d^{M}** の場合にも室温において自己分解が進行し，アルキル置換基に対する分子内酸化反応が進行することが明らかになった．そこでこのアルキル基酸化過程の速度論的検討を行ったところ，活性種の近傍に位置するC-H結合からの水素引き抜き反応が律速過程に含まれており，またニッケルの方が 10^3 程度コバルトよりも大きな速度定数を示す（＝酸化活性が高い）ことが明らかになった[8].

また特記すべきはコバルト錯体 **3^{Co}** が Co(III)種でありながら酸化活性を示す点である．通常コバルト+3 価イオンは6配位の低スピン型反磁性種を形成しやすく，またその速度論的・熱力学的安定性の高さゆえ，酸化反応に対して顕著な反応性が観測された例はこれまでない．これに対し，本研究で得られたコバルト錯体 **3^{Co}** は Co(III)種としては希な金属中心が5配位構造を持つ常磁性種であり，加えて Tp^{R}配位子が金属中心の低原子価状態を安定化する傾向が強いことから，金属+2 価-オキシラジカル構造との間に平衡が存在し，このラジカル種による水素引き抜き活性が発現しているものと考えられる[14]．またニッケル錯体の方がコバルト錯体よりも活性が高いことも同様にオキシラジカル構造の寄与を考慮することで説明できる．つまり d 軌道レベル低いニッケルの方がコバルトよりも低原子価状態が安定でオキシラジカル種への平衡がより傾いており，アルキル基からの水素引き抜き活性が高いと考えられる．このオキシラジカル種を経るアルキル基酸素化反応の推定機構を図７に示す.

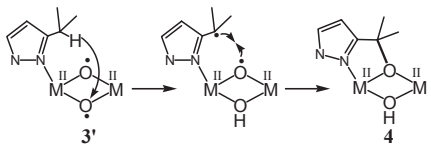


図７．アルキル基酸素化の推定反応機構

筆者等の研究に相前後して，MMOにおける複核鉄中心（図８）[15]や銅・ニッケル・コバルト・鉄などの複核

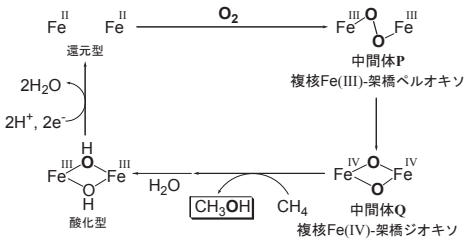


図８．MMO の推定反応機構

錯体[12–14]で，O-O結合活性化を経て高原子価金属オキソ種が生成し，しかもこれらがアルキル基酸化の直接的な活性種であることが明らかにされた．これらの反応機構，特にアルカンへの酸素移行の過程に金属によるアルカンC-H結合活性化が含まれているのか否かといった点についてはまだ議論の余地があるものの，この様な複核高原子価金属-架橋ジオキソ種を経る反応経路は，複核金属中心を持つ第一周期後遷移金属種による普遍的な酸素活性化様式であると推定される[16].

５．単核金属中心を有する酸化活性種に関する研究

5.1 研究の背景

飽和炭化水素類の水酸化反応を触媒する酵素には，MMO のように 2 個の金属イオンが触媒活性点となっているものばかりではなく，1 個の金属イオンだけが触媒活性点となっているものもある[1,2]．例えば，神経伝達物質の代謝に関わる酵素の一種に，ドーパミンβ水酸化酵素という単核銅サイトが触媒活性点となっているものがある(図９)．そこで本研究では複核金属上でのペルオキシド活性化に有効であったニッケル・コバルト錯体について，単核金属上でのペルオキシド活性化能についても検討した.

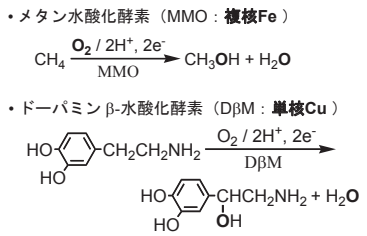


図９．飽和炭化水素類の水酸化酵素の例

単核金属上でのペルオキシド活性化過程にはヒドロペルオキソ種（M-OOH）が中間体として存在するものと推定される．錯体化学的に M-OOH 種を発生させる方法としては，(a) 金属ペルオキソ錯体（M-O_2^{2-}）への H^+の付加，(b) 金属ヒドリド錯体（M-H^-）の M-H 結合への酸素分子の挿入反応，(c) 金属ヒドロキソ錯体（M-OH^-）と１等量の過酸化水素との脱水縮合反応，といった方法が考えられる．ところが Tp^{R}を配位子としたニッケルおよびコバルト錯体では単核金属-ペルオキソ錯体は得られておらず，また一般に極めて不安定な化学種であるヒドリド錯体も合成困難であった．さらにヒドロキソ錯体 **2** と過酸化水素の反応では，反応させる過酸化水素を 2 等量以上（過剰量）にしても前章で述べた複核金属オキソ錯体 **3** となってしまい，ヒドロペルオキソ錯体の生成を

確認できなかった．そこでヒドロペルオキシドの末端水素をアルキル基に置き換えたアルキルペルオキシド（OOR^-）が金属に配位したアルキルペルオキソ錯体（M-OOR）の合成を検討することとした．

5.2 アルキルペルオキソ錯体 5 の性質

Tp^{iPr2} を補助配位子とするヒドロキソ錯体 **2a** に量論量（2 等量）の R'OOH（R' = *tert*-Bu, $PhMe_2C$）を作用させることで，ニッケル・コバルトについては銅の場合と同様にそれぞれ対応する単核２価金属アルキルペルオキソ錯体[$Tp^{iPr2}M^{II}(OOR')$] ($\mathbf{5}^{M}$)が生成した（図９）．ニッケル-*tert*-ブチルペルオキソ錯体 $\mathbf{5}^{Ni}$ については単離及び分子構造決定に成功したが [17]，コバルト錯体 $\mathbf{5}^{Co}$ は低温下においてさえ配位子のアルキル置換基の酸素化を引き起こすほど熱的に極めて不安定であったので，ピラゾール環の３位の置換基をイソプロピル基よりも更に嵩高い *tert*-ブチル基とした $Tp^{tBu,iPr}$ を補助配位子に用いることで安定性の向上を図った結果，$\mathbf{5}^{Co}$ と分光学的特徴が一致したコバルト２価-クミルペルオキソ錯体 $\mathbf{5'}^{Co}$ の構造決定に成功した [10]．なお Co(III)-OOR 錯体については様々な配位子を用いた系で報告例があるものの，Co(II)-OOR 錯体の存在が確認された例は本研究が世界で初めてである．

前述の複核高原子価金属-架橋ジオキソ錯体 $\mathbf{3}^{M}$ と同様，単核金属+2 価-アルキルペルオキソ錯体 $\mathbf{5}^{M}$ では自発的熱分解に伴い Tp^{iPr2} 配位子中のイソプロピル置換基への酸素添加が進行することが明らかになった（図 10）．

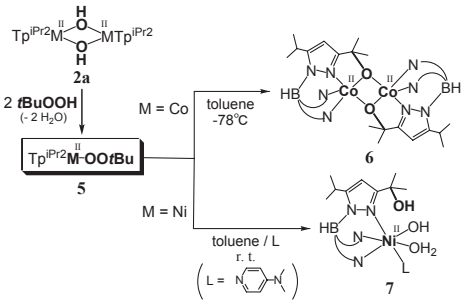


図 10. アルキルペルオキソ錯体 5 の合成とその反応性

低温条件下(–78℃)にてヒドロキソ錯体 $\mathbf{2a}^{Co}$ に２等量の R'OOH を作用させることにより発生させた $\mathbf{5}^{Co}$ のペンタン溶液をそのまま–78℃に放置しておいたところ，$\mathbf{3a}^{Co}$ の自発的熱分解により得られた錯体 **4** とは異なって，複核錯体中で二ケ所のアルキル基が酸化された錯体 **6** が生成していることが判明した．これまでに数多く報告されている Co(III)-OOR が熱的には安定であるのに対して [18]，この配位子酸化反応は–78℃において進行しており，Co(II)-OOR 錯体の反応性の高さ（熱的不安定さ）を如実に表している．

一方ニッケルアルキルペルオキソ錯体 $\mathbf{5}^{Ni}$ は，室温付近で溶液状態における半減期が約三時間とコバルト錯体に比べてかなり熱安定性が高いものの，やはりイソプロピル基への酸素添加を引き起こすことが判明した．配位子酸化生成物の捕捉を目的として DMAP（4-*N,N*-ジメチルアミノピリジン）存在下で室温での分解反応を検討した結果，期待通り一つのイソプロピル基の三級炭素部位が水酸化された単核ヒドロキソ-アコ錯体 **7** の単離及び X 線結晶解析により構造決定した [17]．なおコバルト，ニッケルいずれの場合においてもアルキルパーオキソ錯体の熱分解過程での複核金属-オキソ錯体 $\mathbf{3a}^{M}$ の生成は認められなかった．

ところで $\mathbf{5}^{Ni}$ について外部基質に対する酸化活性についても検討を行った結果，トリフェニルホスフィン（酸化剤の求電子的反応性の有無を示す指標となる物質の一つ）に対しては室温にてほぼ定量的に酸素添加反応が進行してホスフィンオキシドを与えたものの，ホスフィンよりも酸化されにくいスルフィドやオレフィンに対しては全く酸素添加活性を示さなかったことより，ニッケルに結合したアルキルペルオキシドの求電子性は極めて低いと結論される．このことを考慮すると，$\mathbf{5}^{M}$ の熱分解過程におけるアルキル基への酸素添加は，ラジカル的な反応中間体を経由する機構，即ち① O-O 結合のラジカル的開裂（ホモリシス）による M-O•と•OR'の発生 ② •OR'によるメチン水素の引き抜き ③ 三級アルキルラジカルと M-O•とのカップリングによる C-O 結合生成という過程を経ているものと推測される [10]．

5.3 活性点の幾何構造と反応性の相関

アルキルペルオキソ錯体 **5** においてはコバルトの方がニッケル錯体よりも圧倒的に熱安定性が低く，速やかに金属近傍に位置するアルキル基への酸素添加を引き起こすことが判明したが，この結果は上述の複核高原子価金属-架橋ジオキソ錯体 **3** の熱安定性及びアルキル基酸化活性の序列とは逆転している点は興味深い（オキソ錯体：Co＞Ni，アルキルペルオキソ錯体：Ni＞Co）．これは２つの金属中心からの協同的な電子供与が為されるために速やかに O-O 結合が開裂する複核錯体の場合とは異なり，単核金属-アルキルペルオキソ錯体の場合，O-O 結合開裂が分解反応の律速段階であるためと解釈される．つまり d 軌道レベルの高いコバルトの方がニッケルよりもパーオキサイドに対して電子供与し易く，その結果 O-O 結合開裂が促進されるものと考えられる．

一方複核高原子価金属-架橋ジオキソ錯体の安定性については，その共鳴構造体である+2 価金属オキシラジカル構造の寄与を考察することで合理的に説明できる．即ち，d 軌道エネルギーが高く高原子価状態を採りやすいコバルトが中心金属である場合，オキソ錯体 $\mathbf{3}^{Co}$ では Co(III)-オキソ種の状態が安定化されるために Co(II)-オキシラジカル構造の寄与が小さく，ニッケル錯体 $\mathbf{3}^{Ni}$ に比べてアルキル基酸化能が低下（熱安定性が向上）しているものと解釈される．つまり錯体の幾何構造と中心金属の酸化状態との相関により遷移金属-活性酸素種の反応性が支配されているものと考えられる[19]．

6．結言

アルカン水酸化酵素における反応中間体と関連の深い，複核高原子価金属-架橋ジオキソ種や単核金属-アルキルペルオキソ種の反応特性に関する知見を得た．これらによるアルキル基酸化では，金属イオンに配位したラジカル種が活性種となっていることが示唆された．これらのラジカル種は金属上に“束縛されて”いるために，いわゆるフリーラジカル種とは異なり，金属イオン(触媒活性点)の近傍に位置する基質に対してのみ酸化活性を示し，反応選択性が高められているものと推測される．

本研究の結果は，ニッケルやコバルトといった天然のアルカン水酸化酵素の触媒活性中心には全く存在しない金属であっても活性点の周辺環境さえ整備すれば酵素と同様な酸化活性が発現し得ることを示唆しており，触媒(人工酵素)の設計を行う上での一つのヒントとなろう．また一連の研究を通じて，配位子上の置換基を適宜選択することによる反応中間体の安定化や，酸化剤と金属イオン及び錯体の幾何構造の組み合わせに応じた活性制御といった反応設計が可能であることを示すことが出来た．これらの知見は単一配位子系に基づいた系統的研究によって初めて得られるものであり，他に例を見ない[19]．従ってこれらの研究は生体機能のモデル化にとどまらず，酸化反応全般に関する知見を与えるものとして大きな意義があるものと考えている．現在，本研究で得られた知見に基づく触媒(人工酵素)の設計・開発を推進している．

21世紀の化学のキーワードとして「グリーンケミストリー」，「省エネルギー」などが標榜されている中で，生体反応に関する分子化学的研究により得られた知見を巧みに触媒や反応プロセスの設計に活用していくことがこの先求められていくであろう[20]．金属酵素の活性点構造に基づいた触媒の分子設計は今後益々盛んになるものと予想される．

謝辞

本研究は文部科学技術省および日本学術振興会からの援助の下で行われたものである．研究遂行に当たって有益な指導・助言を頂いた東京工業大学名誉教授諸岡良彦博士，東京工業大学教授穐田宗隆博士及び東京大学教授水野哲孝博士，さらに共同研究者である学生諸君の熱意と努力に謝意を表する．

参考文献

(1) (a) S. J. Lippard, J. M. Berg（松本和子監訳）, “生物無機化学”, 東京化学同人 (1997). (b) 増田秀樹, 福住俊一, “生物無機化学 –金属元素と生命の関わり–”, 三共出版 (2005). (c) R. H. Holm, E. I. Solomon (eds.), “Bioinorganic Enzymology”, Chem. Rev., 96, 2237 – 3042 (1996).

(2) R. H. Holm, E. I. Solomon (eds.), “Biomimetic Inorganic Chemistry”, Chem. Rev., 104, 347–1200 (2004).

(3) (a) S. Trofimenko, “Scorpionates – The Coordination Chemistry of Polypyrazolylborate Ligands”, Imperial College Press, London (1999). (b) 穐田宗隆, 引地史郎, 諸岡良彦, 有機合成化学協会誌, 57, 619 (1999).

(4) N. Kitajima, W. B. Tolman, Prog. Inorg. Chem.., 43, 419 (1995).

(5) N. Kitajima, Y. Moro-oka, Chem. Rev., 94, 737 (1994).

(6) 諸岡良彦，触媒，41, 600 (2001).

(7) M. Merkx, D. A. Kopp, M. H. Sazinsky, J. L. Blazyk, J. Müller, S. J. Lippard, Angew. Chem. Int. Ed., 40, 2782 (2001).

(8) S. Hikichi, M. Yoshizawa, Y. Sasakura, H. Komatsuzaki, M. Akita, Y. Moro-oka, Chem. Eur. J., 7, 5011 (2001).

(9) N. Kitajima, S. Hikichi, M. Tanaka, Y. Moro-oka, J. Am. Chem. Soc., 115, 5469 (1993).

(10) S. Hikichi, H. Komatsuzaki, M. Akita, Y. Moro-oka, J. Am. Chem. Soc., 120, 4699 (1998).

(11) S. Hikichi, M. Yoshizawa, Y. Sasakura, M. Akita, Y. Moro-oka, J. Am. Chem. Soc., 120, 10567 (1998).

(12) L. Que, Jr., W. B. Tolman, Angew. Chem. Int. Ed., 41, 1114 (2002) and references cited therein.

(13) S. Itoh, H. Bandoh, M. Nakagawa, S. Nagatomo, T. Kitagawa, K. D. Karlin, S. Fukuzumi, J. Am. Chem. Soc., 123, 11168 (2001).

(14) S. Hikichi, M Akita, Y. Moro-oka, Coord. Chem. Rev., 198, 61 (2000).

(15) L. Shu, J. C. Nesheim, K. Kauffmann, E. Münck, J. D. Lipscomb, L. Que, Jr., Science, 275, 515 (1997).

(16) B. Meunier, “Biomimetic Oxidations Catalyzed by Transition Metal Complexes”, Imperial College Press, London, 2000.

(17) S. Hikichi, et al., 投稿準備中.

(18) F. A. Chavez, P. K. Mascharak, Acc. Chem. Res., 33, 539 (2000).

(19) M. Akita, S. Hikichi, Bull. Chem. Soc. Jpn., 75, 1657 (2002).

(20) 引地 史郎, 触媒., 46, 262 (2004).

総説

インダストリアルエンジニアリングの成果と現状

北岡　正敏*

On Application Results and Present Situation of Industrial Engineering

Masatoshi　KITAOKA*

1．緒言

フレデリック・W・テイラーの始めた科学的管理法ほど人類の歴史に大きな足跡をのこした技術はない(1)。彼の考えた科学的管理法（Scientific Management）とその後継者が考えたインダストリアルエンジニアリング（以下 IE と省略する ; Industrial Engineering）は世界を一変させた。ここであげる IE とは作業研究などの狭い範囲でなくシステムを最適化するための管理手法を含んだ広い範囲を意味する。あらゆる産業分野で IE を活用すると、労働生産性を向上できる（1）。たとえば、トヨタは敗戦後（1946 年）、従業員一人あたりの生産台数が１台であった、それが１９６０年で 15 台になり、1980 年で６０台になり生産性は６０倍になっている(2)。これまで、近代化は「技術」と「資金」とがあり、それに「制度を変革」すれば簡単に実現できると妄信してきた(3)。それが間違いであることは西欧を含めて２００年間で証明された。さらに、機械化とロボット用いた自動化を徹底すれば生産性はあがると信じた。しかし、トヨタは自動化や機械化よりも、現場で働く人の知恵と従来の機械でＩＥを駆使した独自の生産システムを構築した。そして、GMもフォルクスワーゲンもトヨタ生産システムに対して、生産性や効率面で遅れをとった(3)(4)。現時点ではトヨタ生産システムは最良のシステムである。ＩＥの分野では、新しい管理手法はたえず進化していく。ここでは、急激な進歩をしているＩＥの歴史的な経過と現在、そして次世代の生産システムで適用されている知能化したＩＥについて検討する。

*教授　情報システム創成学科
Professor, Dept. of Information　Systems　Creation

2. マルクス主義とテイラーの科学的管理法

フレデリック・W・テイラーほど人類の歴史に大きな影響を与えたアメリカ人はいない(1)(5)。テイラーのはじめた科学的管理法とその後に発展したＩＥは生産性を大幅に上げ、人々の生活を豊かにし、社会を大きく変革させた。日本やヨーロッパは IE を用いることで、製造業における労働生産性を５０倍にあげた(1)。多くの知識人は近代社会を作ったのはダーウイン、フロイド、マルクスであると言われてきた。しかし、世界的に著名な社会学者であり経営学者でありコンサルタントであるドラッカー博士は、マルクスはソビエトの崩壊でその評価をなくしたため、マルクスのかわりにテイラーを入れるべきであると述べている(1)(5).マルクスの死の 2 年前にテイラーの始めた科学的管理法は仕事の革命を始めた。これまで、生産性の向上の原因に対して、経済学者は設備投資のおかげだという。しかし、資本主義の初期のヨーロッパでも明治以来の日本でも膨大な設備投資をしてきた。しかし、一人当たりの生産性は向上していない。ヨーロッパの先進国でも１９世紀、２０世紀も同様である。一方、技術者は生産性の向上が機械化のおかげだという。しかし、機械化はヨーロッパを中心に２００年にわたり豊富に実施していた。ところが、労働者の生産性は増大しなかった。生産量は機械の能力だけしか生産できない。しかし、アメリカのみが一人当たりの生産性が上昇した。そのことを知ったソビエト連邦を創設したレーニンは、社会主義建設でテイラーの科学的管理法の重要性を指摘した。日本でも明治政府の指導のもと産業の近代化による機械化を、１９４５年まで設備投資を増やした。そして、機械化を導入してきたが、生産性はほとんど向上していない。一方、古くから多くの経済学者は国が豊かになる方法を解説してきた。マルクスは「資本論」の中で

剰余価値説から人々の貧しさの原因を説明した。日本でもマルクス経済学者は、なぜ人々は豊かになれないかを解説し、日本における社会主義の実現こそが豊かになれると紹介した(6)。その背景にはロシア革命による、ソビエト社会主義国の建設と独ソ戦の勝利それに５ヵ年計画などがあげられる。しかし、その考えが間違いであることがソビエトの崩壊で証明された。このような中で、小室直樹博士はソビエト連邦の崩壊をその１０年前から科学的に予言した(7)。ソビエト連邦という世界の最強で最先端国が崩壊するとは誰も予想ができなかった。それを政治制度、官僚制とノーメンクラツーラ、経済面、軍事システムから科学的に説明し予言した。さらに、ソビエト連邦崩壊後の政治、経済の混乱状態をアノミー現象から明確に説明し、それが現実になっている(7)(8)。

３．生産性向上のためのＩＥ

第二次世界大戦後にヨーロッパ経済は完全に壊滅していた。アメリカは経済的に崩壊したヨーロッパ諸国の再建を援助した。中でもヨーロッパ諸国の生産性の向上を全面的に協力した。生産性向上とはテイラーの始めた科学的管理法をヨーロッパに輸出することである。このため、アメリカはヨーロッパにＩＥ技術者を派遣した。当時、科学技術、文化などあらゆる面でアメリカよりもはるかに先進国の西側ヨーロッパの経営者は、アメリカの研究開発、設備投資、流通などの方法や提案について聞き入れなかつた。しかし、西側ヨーロッパの経営者は科学的管理法のみは進んで導入をした。西側ヨーロッパの経営者は他の国の人々と同様にアメリカ経済の巨大化の原因が科学的管理法すなわち、IE であることを確信した(5)。ヨーロッパ、南米、インド、北欧、アジア諸国はアメリカの産業発展の原動力はＩＥにあることを学び、企業への導入と大学にＩＥ学科を創設した。いまでこそテイラーの科学的な手法は世界で受け入れられているが、1910 年までにテイラーの科学的管理法は知識人や労働組合の抵抗にあった。1911 年にアメリカではテイラーの科学的管理法が労働者や経営者から批判を浴びて下院の特別委員会でテイラーの論文「工場管理法」(9)の調査に乗り出した。そして、１９１２年には下院特別委員会においてにテイラーは証言をした(10)。証言録の中で、テイラーは言う「科学的管理法の本質とは何か。それは企業で働く工員たちに完全な精神革命を起こさせることである。仕事に対する義務、仲間に対する義務、使用者に対する義務といった問題について、徹底した精神革命を工員自身に起こさせることである」と述べ、そして IE の適用により生産性が向上し、利益が出てくる。その利益の余剰について労働者側と経営者側にたいして、余剰金の分配方法について争う必要のないほど、余剰金を増大させることができると述べた。お互いに争うのをやめて、同じ方向に協力して働くようになる。そして、「工員の賃金も経営者の利益も大きく増加することを双方が認識するようになる」と述べている。敗戦後の１９５０年代から日本の企業はアメリカから最新の IE を学び、それを実践した。そして、１０年後には日本独自の IE を開発した。１９６０から始まった、「カイゼン活動」と品質管理による「TQC 活動」などは代表的なものである。これらを集大成した「トヨタ生産システム」は世界の生産に関する考えを大きく変えた。新しいシステムには誤解と批判が生じる。１９１２年のテイラーと同じくトヨタ生産システムも１９７７年日本共産党と公正取引委員会から衆議院で批判された(11)。トヨタの生産システムも初期はいろいろな問題をかかえてえいたがほとんど解決されていた。ところが、トヨタ生産システムは人間性を重んじ、カイゼンによる人間の可能性を引き出し、人間の相互信頼を確立し、従業員が安定した生活を保障することをアメリカのカリフォルニヤ州で世界最大の自動車会社GMとトヨタとのジョイント工場で証明した(3)。トヨタ生産システムは、世界最大の自動車メーカGM、フォードをも驚かせたシステムであった。それまでGMは自社の生産システムが世界最大と信じ、日本の自動車メーカを馬鹿にしていた。GMもフォードも経営者が官僚化して思考に柔軟性がかけていた(4)。生産システムは進化することを信じなかった。生産システムはカイゼンにより永久に進化していく(2)。

４．仕事の研究とテイラーの科学的管理法

人類の歴史以来、「仕事」を体系的に研究したのはテイラーだけである。1750 年から 1850 年までの農学、工学、医学の三つの技術が農業革命、産業革命、医学革命を引き起こした(1)。これまで、「仕事」は所与のものと考えられてきた。「仕事を研究する」などということは考えられなかつた。アメリカで始まった科学的管理法は第二次世界大戦の後であらゆる国にいきわたった。１９世紀のマルクスやリカードのような経済学者は、生産において労働者の個人差はあるが、生産性には影響は無いと考えた。そこには生産性という概念は無かった。現在のケインズ学派やオーストリ学派は計量モデルにおいて、生産性は外生変数として処理され、数式モデルには組み込まれていない。生産性は単なる労働力の量としてしかとらえられていない。たとえば、ダグラスの生産関数では実質 GDP を計算するのに全要素生産性、稼働率、民間企

業資本ストック、所定内労働時間、所定外労働時間、就業者を用いて計算している。しかし、この式には働く者の個人の能力は無視されている(12)。テイラー以前に仕事を研究したのはチャールス・バベッジ（１８７２－１８７１）である。彼は英国の数学者であった。有名なコンピュータの先駆となる機械を開発した。バベッジは「分業の原則」として、一人で仕事をするよりも、分業したほうが生産性は上がることを実験で示した。バベッジの示した考えはテイラーとその弟子たちが築いた科学的管理法の基礎になった。テイラーの始めた「仕事の研究」とは何をしたのだろうか(13)(14)。１）テイラーは仕事を個々の動作に分析することをした。そして、人間のおこなう作業の動作に対して時間を測定する。次に作業を分解して、無駄な作業や無理な作業を探す。人間のおこなう作業を分解すると、ほんとうに必要な作業（正味作業）と無駄な作業から構成されている。作業の中には無駄な作業が多いことをデータから明らかにする。２）無駄な作業を無くして、作業を実施するうえでどうしても必要な作業のみをとりあげる。そして、簡単な動作で短い時間でできるような作業を新たに設計する。３）作業に必要な道具や機械をつくりなおす。仕事を分解することで、これまで、数千年にわたりおこなわれてきた仕事さえもが、その道具や機械や作業方法が適切でないことが明らかになる。

この単純な方法は今も全世界で適用されている。テイラーの方法は簡単に見える。しかし、あらゆる科学や工学の法則も一見、単純に表現されている。テイラーは分けるという西欧の分析学の方法を仕事に適用した。テイラーの考えた手法は多くの協力者や弟子達の協力を得て新たなる発展をした。テイラーは仕事に「知識」を適用した最初の人である(1)(5)。

５．フォードの大量生産方式からの進化

テイラーの後に出て IE そのものを大きく変えたのがヘンリー・フォードである(4)(5)。彼は流れ作業による大量生産システムを構築した。フォードの考えは「仕事のところ」に人が往き来しては、歩く時間のムダが生じる。そして、作業者のところに仕事を運ぶという逆の方法を採用した。これが組み立てラインになり、１９１３年にフライホイール磁気発電組み立てに採用した。その後、コンベヤを用いて自動車の流れ作業による組み立て作業に発展した。フォードのコンベヤシステムはシカゴの缶詰業者が牛肉を処理するときに用いる天上コンベヤからヒントを得たことを述べている(15)。これまで発電機の組み立て作業時間は熟練工一人が部品置き場から運んできて、１個当たり平均２０分であった。コンベヤを用いると１個あたり１３分１０秒に短縮された。さらにＩＥによるカイゼンで５分になった。１９１４年には組立てラインもでき、従来、１台の生産時間が５時間５０分から２時間３８分に短縮され、さらに、改善されて１時間３３分になった(4)(15)。フォードは科学的管理法を徹底的に利用して組み立て作業に適用した。そして、一人に一つの作業を割り当てて組み立て作業を成功させた。このような流れ作業で１０数年にわたりＴ型フォードを生産した。生産の習熟効果から価格は１９１０年の９５０ドルから１９２５年には２９０ドルになった。フォードは「機械だけでは大量生産はできない。大量生産は機械と人の両者を得てはじめて可能になる」と述べている。人道主義者のフォードは企業の責任、労働者の給与の大幅向上、労働時間短縮、労働者の幸福の追求といろいろな福祉政策を実施した。フォードは黒色のＴ型モデルのみを生産することが国民の生活向上につながると考えたが、国民は豊かになり彼の考えとは逆の方向に進んでいた。１９２７年にフォードはGMに販売台数を抜かれた。フォードのはじめた流れ生産システムはその後、あらゆる産業で適用されてきた。フォードの死後２０年後にトヨタは独自のＩＥを展開した「トヨタ生産システム(リーン生産)システム」を開発した(11)(2)。トヨタ生産システムはＩＥを日本で独自に発展させたもので、テイラーシステム、フォードシステムについでトヨタ生産システムが世界の 3 大生産システムの基準になっている。また 1980 年代からフォード生産の逆を行く、コンベヤを用いないセル生産システムが個別生産工場で利用されてきた(16)。

６．近代産業の発展と日本における企業発展の原因

日本は敗戦の中から急激な経済発展をした。経済発展の原因について経済学者は傾斜生産方式であるといわれるが、その政策は明治維新以来とられた手法である。日本の経済発展の原動力になったのは「個別企業」の活躍である。この点に関して経済学者の宮崎義一博士は現代資本主義の基本単位は国民経済でなく、国民経済をこえて活動する「現代企業」にあるとした（17)。日本経済発展の理由として、１）戦争で戦った、多くの日本人は軍人として機械技術、電気技術などの固有技術を蓄積した。戦艦は工作機械を備えた大工場であり、工廠や民間企業での兵器生産は高度な技術を要求された。航空機の整備、通信など高度な技術を取得した軍人が、戦後、復員して全国の工場に就職して、日本の産業発展に貢献した(2),(18)。2)１９５０年代にアメリカから科学的管理法

の新しい IE 手法（工程分析、ワークサンプリング、動作時間分析、運搬管理手法、デミング博士の標本調査法、統計的品質管理、OR、,EE、VE,設備計画,生産在庫管理、信頼性工学等）を導入した。

3)日本には江戸時代からの手工業技術が盛んでその技術と管理の蓄積があった。さらに、明治維新以来、三井、住友、古河などの財閥を中心に伝統的な産業運営の手法を蓄積してきた。また、これらを可能にしたのは国民の中に江戸時代いらいの労働に対する精神的に優れた価値観を持っていたからである(19)(27)(28)。

なぜ、日本だけが明治維新から産業が急激に発展したのだろうか。明治維新以前に、中近東、アジア、アフリカ諸国の非ヨーロッパ諸国の中で近代化に成功したのは日本だけであった。日本以外の国で体制の改革と経済の近代化に日本よりも早く着手したのはモロッコ、トルコ、タイ、中国などがあるがすべて失敗している。中国の近代化への志向は日本よりも早い(20)。１８４０年のアヘン戦争の敗戦後、１８６２年から洋務運動を始めた (21)。しかし、「中体西用」というハードは西洋のものを用い、内容は中国文化に固執した(22)。そして、近代的な企業の運営がうまくいかず失敗し,軍事面でも清仏戦争、日清戦争で敗北した。その後、日本の明治維新をモデルにした戊戌維新を断行したが失敗した。戊戌維新はロシアの改革を参考にし、日本の明治維新をモデルにした改革である (22)。内容は中国の歴史そのものである皇帝専制から立憲君主制に変える大きな改革である。しかし、西太后を中心にした保守派の勢力で、時の皇帝である光緒帝を幽閉して失敗に終わった (23)。その後、1900 年の義和団事件で清朝は崩壊の危機に面した。1904 年の日露戦争の日本の勝利は中国の政策を変えた。辛亥革命が起こり、混乱が始まった。そして、軍閥内戦、国民党内戦、国共内戦となった。そして、社会主義革命でも三反五反、反右派運動、大躍進、文化大革命と混乱が続いてきた。最後に、鄧小平の改革開放政策で外資導入により経済は急速に発展してきた。しかし、中国の近代化は日本の援助なくしては不可能であった。ところで、ドラッカー博士は現代史におけるもつとも重要な事件は１）１８５７年の「インド大反乱」（セポイの乱）と２）１８６７年の日本の「明治維新」であると指摘している(24)。この指摘は非西洋文明が西洋に立ち向かうための２つの方法を示している。この２つの重要な事件を歴史学者の誰も気づかなかった。歴史を見るのに生産技術面を考慮することの重要性をドラッカー博士は指摘している(1)(24)。「インド大反乱（セポイの乱）」はインド人傭兵の英国人支配に対する反乱であつた。この反乱は「インド大反乱」、「第一次インド独立戦争」とも呼ばれ、1857 年５月に勃発した（25)。この反乱は兵力の上でイギリスを圧倒した反乱軍が敗北した。反乱の目的はインドを統一してイギリスから独立を達成しょうとする運動であった。西洋化を止めようとする戦いであった。しかし、インドは敗北した。それは、インドはイギリスのもつ西洋技術の基本である鉄道建設、用水路、産業、科学、教育、農業、医学などを導入しないと生きていけないことを悟ったからである。そして、インドは英国政府の直接統治になった(25)。一方、西洋に対して逆の考えで立ちあがったのが日本の明治維新である。なぜ明治維新は成功したのか、それについてドラッカー博士はその理由を説明していない。アジア諸国を植民地にし、アヘン戦争で清国に圧勝した無敵のイギリス艦隊を薩摩藩は一藩で戦い勝利した。戦争を機会に薩摩藩は英国と協定を結び、近代工業技術の基礎を修得した。日本には藩を中心にした産業技術力が幕末にはすでに芽生えていた(19) (26)。

7．日本人の労働観と二宮尊徳の科学的管理法

これまで、近代化は「技術」と「資金」とがあり、それに「制度を変革」すれば簡単に実現できると妄信してきた。しかし、先にあげたような理由で３つの条件をそろっても近代化は不可能である。このことは戦後、多くの国で実行して失敗した。そこには「労働」に対する価値観が大きく作用している。ギリシャ時代には人間活動で一番大切なのが、思索（哲学）をすることで、２番目が戦争で、労働は最下位であった。ラテンアメリカには日本での「勤勉の哲学」は存在しない。インドの階級社会もヨーロッパの貴族社会でも中国でも労働は低く見られている。「労働」、すなわち働くことを美徳とする国はプロテスタント諸国と日本だけである(27)。また、このような国々から資本主義の原理が確立され経済発展をした。小室直樹博士はソビエトの崩壊にともなうロシア経済の再建はロシア人の労働価値観が変わらないと不可能であると指摘している。国民の思考、すなわち「労働観」にその国の経済発展の基本が隠されている。日本の経済発展に影響した２つの流れがある。それは、現在の日本人の労働観を支える思想である(28)。

１）第一は、鈴木正三の思想と石田梅岩の石門心学である。近代化に成功するかどうかは、マックス・ウエーバのいう「資本主義の精神」をその国民が持つかどうかである。資本主義は中国にもインドにもイスラム国にも生まれる素養は無かった。資本主義はヨーロッパのプロテスタント諸国に生まれた。なぜ、東洋の日本で資本主義の精神が受け入れられて近代化に成功したのだろうか。

山本七平は、日本の経済発展は、日本人の労働観から来ていることを指摘した(28)。その思想は鈴木正三のいう「世俗的行為は宗教的行為である」という発想と石田梅岩の石門心学にあると指摘した(28)。山本七平は鈴木正三の思想を「労働を宗教的な救済の方法と見、これに徹する者ほど精神的に健康」と規定している。これが日本人の「農業観・労働観・職業観の基礎をなし、同時に日本的資本主義の基礎となっている」と述べている。そして、「「成仏の方法＝仕事」という発想はおそらく日本独特のものであろう」と言う。「何の事業も皆仏行なり」という発想は逆に仕事をせずになまける者は地獄に落ちるという考えに通じる。鈴木正三の考える仏教は独自の考えを展開させたもので、神道も孔子・老子も駆使した独創的な思想である。一方の石田梅岩の「石門心学」は鈴木正三の思想を継承し発展させたものである。石田梅岩は宇宙の秩序も人間の秩序も同一とし、正三の、仏教という枠を出て、宇宙の本源に仕事の価値を求めた。正三の仕事に対する考えと禁欲的プロテスタントに共通な点はひたすら仕事に励むことで救済が得られるとする。この思想はマックスウエバーの述べた資本主義の精神と同じ思想である。

２）第二は二宮尊徳（1787-1856）の報徳思想(29)とその実践である。その実践手法は科学的管理法そのものである。二宮尊徳は破綻した藩や農村や個人の家の経済状態を立て直し、荒れた土地の開墾をし、水利工事をした。そして独自の科学的管理法を用いてテイラーよりも１００年前にすでに農業の生産性を大幅に向上させた。一方では天保の大飢饉を予測して飢えと飢饉から人々を救った人道と実践の人でもあった。彼は飢饉の救済でも村人を３つに分けて、その分類にそって救済方法を変えるという独自の方法で４３，９００人を餓死から救った(30)。また、藩の財政再建でいろいろな開発答申書（仕法）を著して、それを実践している。世界で最初に科学的管理法を体系化した人である。彼の考えは報徳思想として発展し,その手法は、農村ばかりでなく企業経営やあらゆる産業分野に大きな貢献をした(31)。報徳思想はいろいろな分野の人に大きな影響をあたえた。たとえば、現在のトヨタの創設者である豊田佐吉もその一人である。佐吉の生まれた静岡県湖西市は報徳思想の教えが強く残っている。豊田佐吉の生き様と経営思想はまさに報徳思想そのものである(32)。佐吉の思想や尊徳の考えはさらに、豊田喜一郎を始め、現在のトヨタの経営思想にも大きな影響を与えた。

二宮尊徳の始めた科学的管理法を整理すると次のような方法があげられる(29)(30)(31)。

１）現在のＩＳＯやＪＩＳの元祖となる標準化を実施して測量器の統一をした。当時の小田原藩では農民の年貢米を測定するのに升が１８種類もあり農民はそのため余分に米を納めなければならなかった。このため、升を１種類に標準化して農民から米の計量の標準化をした。この結果、農民の年貢の公平な支払いが確立し人々にゆとりと安心感を与えた。

２）「分度」という概念を利用して、日常生活から困窮した農村や藩の財政再建に用いた。「分度」とは科学的な管理法でいう、「標準生産量」であり「標準作業」や「標準工程」のことである。分度の計算では、藩の建て直しに過去の統計データを収集した。相馬藩では１８８年間のデータを収集して、分度の計算をしている。有名な分度には「為政鑑士台帳」8 冊がある。そこには詳細な計画が作業手順として記述してある。また個人の生活において、尊徳は自己の能力を知り、それに応じた生活の限度を設けて農村の生活を基準にした分度を適用した。「分度」の利用により、標準出来高が確立され、農民と領主の分配が決定される。分度の考えは１００年後に出たテイラーの「標準作業」、「標準出来高」と同じ考えである。

３）「仕法」とは作業計画手順書であり、工程分析表に相当し、復興計画書で、現在の作業計画書を確立している。そのために分度と一体化して利用している。この仕法は報徳仕法として財政的に破綻した藩や荒廃した農村を立て直し、有名な相馬藩の再建でその有効性が検証された。

４）工場で利用されている標本調査と同じ思考法を１８４４年に相馬藩の２２６カ村に実施している。そして、分度のデータに利用した。農村の復旧には長いときには１８０年の統計データを収集し、総計分析をはじめている。そして、時系列データとして、平均値やレンジを用いて標準となる収入を計算している。このデータから農村の生産性を予測している。

5）品質管理の原点となる管理図を適用している。管理限界に入るときは偶然の動きとし、通常の予算を立て、管理限界を大きく出るときは収入を準備金として次の成長段階の予算にしている。

6）報徳の実践は「至誠、勤労、分度、推譲」の４つをかかげている。尊徳は人間が働くのは自分のためだけでなく、他の生命のために働くとし、「他の恩に報いる」、報徳の精神を説いている。テイラーが１９１２年に下院特別委員会で発言する８０年前のことである。

８．IE の威力を発揮した第二次世界大戦

ＩＥがいかに有効であるかを示したのが第二次世界大戦である。アメリカはＩＥ手法を駆使して戦争遂行をお

こない、完勝した。１９４１年当時、日本には戦争を遂行するためのシステムが米国に比べてはるかに劣っていた。また当時の社会システムはあらゆる面で戦争を遂行できるシステムになっていなかつた（８）。有名なオペレションズ・リサーチによりドイツのＵボートや神風特別攻撃隊の攻撃を防いでいる。アメリカは戦前から大学で予備士官の養成をおこなっている。またその講座を今も持っている。年間１万人が教育を受けていた。真珠湾攻撃による開戦とともに２０万人の予備士官が動員できた。日本では大学や旧制の専門学校、中学を出て再度、予備士官学校に入ることになっていた。そして、アメリカなみの学徒動員は開戦後の２年後である。日本もドイツも女性の動員や国家総動員法はアメリカ、イギリスよりずっと後になった(8) (33)。アメリカにおいてIEは兵器の生産現場から戦闘場面、補給、教育、運用、ロジスティクスとあらゆる場面で採用された。たとえば、４発のボーイング社の爆撃機Ｂ２９は２７,０００ポンドのアルミ二ウム、１０００ポンドの銅、60万個のリベットを使用し、未熟練の労働者が組立作業にあたった。たとえば航空機エンジンの組み立て作業に、ほとんど読み書きのできない黒人女性労働者がエンジンの複雑な図面を読みながら作業に従事した。航空機のエンジンには８０以上の要素動作が必要であった。熟練工のいない中でＩＥの原理によるタスク分析を利用して高度の作業を実施した。そして、驚異的な生産量を達成した。Ｂ２９の１１名（１０名の場合もある）の搭乗員は3カ月から6カ月の訓練で戦場に出た。Ｂ－２９の生産台数は３９６０機で、搭乗員と航空機の整備技術者が戦場にでるわけである。このため、合計で6万名以上の人がＢ２９の運行に従事した。アメリカは生産現場の教育にも、飛行機の操縦から兵器の運用までにＩＥを利用した訓練法を適用した。アメリカは戦争中に4発爆撃機を３６，０００機生産したが、このための搭乗員は３０万人以上になる。これだけの人数を最初から教育するにはＩＥを用いた訓練法を適用するしか方法はなかった。日本語に翻訳されたアメリカ空軍 B-29 操縦マニュアル(39)には航空機に対して何も知らない素人が3カ月から6カ月の訓練で空を飛べるようにＩＥの動作分析、時間研究などのタスク分析と図と絵を利用してわかりやすく解説してある。そして、実地訓練にもＩＥ手法を適用した。日本にはこのようなシステム的な思考は不可能であった。日本ではパイロット2万人の養成計画案があったが計画だけで実現できなかった。１９４１年に真珠湾攻撃でアメリカが第二次世界大戦に参戦したとき、アメリカは国内に軍需用の生産施設は持っていなかつた。しかし、アメリカには巨大な自動車産業が存在していた。たとえば、GM（ゼネラルモータ）がニュージャジ州リンデンの自動車組立工場でビュイック、オールズモビルなどを生産していた。第二次世界戦争とともに、この工場は戦車や戦闘車両を生産する工場に簡単に改造して多量の戦車が生産された。アメリカはＩＥの基本である量産化を空母、航空機、戦車などの生産に適用した(34)。たとえばエセックス型の同じ攻撃型空母を１７隻も建造し、習熟効果をもちいて生産性を大幅に向上させた。日本には大量生産の概念に欠け、空母の建造でも多品種使用量で効率の悪い生産をした。また、アメリカは IE の基本である、標準化を航空機、空母、潜水艦、輸送船、銃器、兵器の部品などで実施した(35)(36)。標準化の考えはアメリカの南北戦争から始まるが、生産の効率化と運用それに修理の問題から始まった(36)。日本には同じ工場で航空機を生産しても陸軍と海軍で交流もなく対立のみがあり、部品の互換性が無かった（33）(35)。このため、航空機などの修理に混乱が起きた。ドイツもテイラーの科学的管理法を軍事訓練に適用した。しかし、ドイツは一部の産業にしか科学的管理法を適用しなかったため、生産性は上昇しなかった。中でも、アメリカのロジスティクスはアジア大陸、太平洋、アフリカ大陸、ヨーロッパ大陸、大西洋にまたがる作戦を世界の歴史上で始めて同時進行させた(37)(38)。しかし、日本でも 1910 年代に IE の重要性を知り、その研究と実践をしたのが山下興家、伍堂卓雄、上野陽一である。山下は鉄道省と基幹産業で IE を採用し生産性を向上させた。伍堂は造船でブロック工法を考え軍艦の生産納期の短縮に成功した。

９．GMとフォードによる生産方式からトヨタ生産方式

工業生産には個別生産、大量生産、プロセス生産の３つの生産システムがある(5)。ここでは大量生産として、自動車産業をとりあげて IE の考えを検討する。アメリカのフォードの多量生産システムは IE の分野に大きな変革をした。フォードのコンベヤラインによる組み立て方式は世界の産業に革命をもたらした。未熟練工を採用して、テイラーの作業分析で単純作業を繰り返した。フォードの生産システムは生産工程を分割し、繰り返し作業に同期化した。これは純フォード方式といわれ、1900 年から 1920 年までアメリカの自動車産業の主流であった。次の時代は GM やフォードは部品の共有化によるフレキシブル大量生産方式が主流になって現在にいたっている。この方式は生産がスムーズに行くようにさまざまな部品を緊急の代替用バッファ在庫を用いて、工程内でのトラブルや品質維持に利用してきた。しかし、1

９８０年代に GM とフォードの生産システムは日本のトヨタに比べて品質と信頼性面、コスト面、開発期間で完全に劣っていることが明確になった。フォード生産システムの後、生産システムそのものを根本から変えたのがトヨタ生産方式である。トヨタは１９４０年からフォード、GM に遅れて自動車の生産を開始した。日本の敗戦とともに1940年の後半にIE手法を導入した。そして、従来のフォード方式と併用して生産をした。１９５０年から各種の IE 手法を導入して、カイゼン活動を実施した。創意工夫によるカイゼン活動は外国車と競争して勝ち抜くための手段であった。１９５０年には TQC を導入してデミング賞を受賞した。藤本によればトヨタは外部からいろいろな技術を導入したが、不完全な技術移転となり、それが新しいシステムが確立できたという(2)。いわゆるカンバン方式、JIT による在庫圧縮、TQC,自働化、平準化、段取時間の短縮、混流生産、1 個流し、多能工、多工程持ち、少人化、ポカヨケ,アンドン、U 型レイアウト、TPM などの手法が確立された(2)。設計面では敗戦時に航空機産業から優秀な技術者がトヨタに転職し、重量級プロダクトマネージャ制を採用して成功した。最初は世界の自動車企業の中でスバ抜けて巨大な会社 GM はトヨタ方式などは問題にしなかった。GM の凋落は油断そのものが企業の命取りになることを示した(4)。

１０．知能化されたＩＥと知識労働

ドラッカーは今日、IE そのものが長い停滞を続けていると指摘している(5)。IE は 1890 年から 1920 年にかけて独創的な理論家が出た。その後、ナドラーのワークデザィンという手法は独創的であった。しかし、その後は個別の手法の開発に集中している。現在はこれらの個別の IE 手法を統合化することで、新らしい知識 IE ができている。トヨタ生産システムはその代表例である。現場レベルでの IE による問題解決に対して、藤本はトヨタでの問題解決方には２段階問題解決モデルで処理していることを示している(2)。問題解決に利用されている手法は作業研究、動作分析、QC,VA,DE,カイゼン、TQC,TPM,SLP,統計手法などの従来の手法である。これら手法はこれからも現場での問題解決に利用される。ところが、これ以外に今後、知能化された高度の IE 手法が他の IE 手法と併用して開発されている。そして、高度な IE 手法が生産分野に適用されている。これを知識 IE 手法と呼ぶことにする。広い IE の研究分野の中で一部のみをあげる。

1) 多国間での SCM の展開：
マレーシア、タイ、中国などとの多国間にまたがるネットワーク型 SCM の研究が各種モデルの開発でより計算が精密になる。特に海外での生産にともなう、部品調達、生産システム、輸送システム等が国際化し IE と情報システムと結合し、モデルが知能化してくる。

2）工程管理や品質管理面での工学手法の適用：
田口玄一博士によるタグチメソド（品質工学）と直交表による実験計画法が現場の問題解決に広く利用される。それとあわせて各種の高度な統計解析法が利用される。また、現場で測定された時系列データがオンラインパラメータ推定とオンライン制御管理図に利用され工程管理となる。品質管理の知能化として、画像処理、高度な信号処理手法の利用が一般的になる。データベースの利用による信頼性解析手法の一般的な活用が実現する。

3）ロジスティクスのソフトウエア技術との結合：
自動化システムを構成するセンサー、アクチエータ、コントローラ、メカニズムのペトリネットによる自動解析とレイアイウト計画の３DCG による表示。また、生産物流のシミュレーション解析、故障の自動化診断などが一般化する。

4）人工知能の一般化：
各種の人工知能を用いた生産工程のスケジューリング手法の開発と運用の実用化(11)。スケジューリング問題は NP 問題として数学的に解けない。このため新しいエキスパートシステムの開発が広くいきわたる。そして、生産の現場でファジイ、ニューロ、GA 手法と各種人工知能手法が問題解決に適用される。

5)人間的側面の研究：
トヨタは作業負担の評価にＴＶＡＬを採用している(1)。これはドラッカー博士の言う仕事の生理的次元の問題を解析するものである。それ以外に心理的次元、社会的次元、経済的次元、政治的次元での解析が要求される。

しかし、いくら IE の手法が知能化高度化して、機械の完全自動化をはかっても生産性は伸びないことが GM,フォードで実証済みである。やはり、基本的な IE 手法により現場で働く人の問題解決力とトヨタ生産システムをさらに改良した新しいシステムがその企業のコスト削減につながる(40)(41)。また、知識労働の生産性をいかに上げるかの具体的な対策が必要になる。

１１．まとめ

フレデリック・W・テイラーの始めた科学的管理法とその後継者が開発した IE の成果と現状について考察してきた。日本において近代産業において IE の残した偉大な貢献は生産工場に従事する一部の人にしか認識されていない。しかし、ドラッカー博士の指摘したように、

テイラーは人々の生活を豊にし社会を大きく変革させた(1)(5)。IE は生産問題だけでなく、あらゆる分野にその思想がいきわたっている。その威力を見せ付けられたのが先にあげた第二次世界大戦であった。特に、IE によるアメリカの人事考課は公正である。太平洋艦隊司令官のニミッツ少将の就任は２０名の抜擢人事を公正におこなった結果である。同じように日本海軍を崩壊させたスプルーアンス少将やキンメル提督などの抜擢人事も同様である。アメリカ的な生産システムの考えの根底に IE がある。残念ながら日本がアメリカに対等またそれ以上に生産性を維持している産業は自動車、機械、電気電子産業など２０％くらいである。その他の分野では生産性ははるかに低い。化学、医薬品産業、農業、土木建築などの分野では企業規模も小さく生産性も低い。特に、知識労働の生産性向上が２１世紀の課題である。最後に日本に科学的管理法を体系的に導入した３名の中で、上野陽一は能率の父といわれ、日本の産業界の生産性向上に貢献し、産業能率大学を創設した。上野陽一は昭和１０年に横浜専門学校において、「科学的管理法」を講義した。さらに専門学校の中に日本で始めて IE を専門にする学科を創設した。その偉大な業績に心から敬意を表したい。

参考文献

(1) P・F・ドラッカー著、上田惇生訳、“ものづくりが文明をつくる:テクノロジストの条件”、ダイヤモンド社、(2005)、 p 73-79,p.268-270,p.43,

(2) 藤本隆宏:「生産システムの進化論」、有斐閣、(2002)、p.53-54,p.71-72,p.82-86.

(3) マリアン・ケラー、鈴木訳、“激突、トヨタ、GM, VWの熾烈な闘い”、草思社、(1994),p.211.-216

(4)D・ハルバースタム、高橋訳、“覇者の驕り、上,下”、日本放送出版協会、(1987)上 p.84-546,下 p.226-422

(5) P・F・ドラッカー著、上田惇生訳,”現代の経営、下”, ダイヤモンド社,(2005),p.141-158,p.167-179.

(6) 川上肇、”資本論入門第一分冊、第二分冊”,青木書店、(1971)

(7) 小室直樹”,ソビエト帝国の崩壊”,光文社、(1980)

(8) 小室直樹,”日本の敗因”、講談社、(2000),p.20-325.

(9) F.W.Taylor, ”Shop Management, ”Harper & Bros. New York,(1919),p.207.

(10)ハーウッド・メリル、上野一郎訳,”経営思想史変遷史”,産業能率大学出版部、(1968),p.64-68,p.10-26.

(11) 門田安弘 “トヨタプロダクションシステム”、ダイヤモンド社、(2006),p.72-82,p.331-337

(12) 貞広　彰,”戦後日本経済のマクロ経済分析”、東洋経済新報社、(2005),p.68-75.

(13) F.W.Taylor,”The Principles of Scientific Management”,Harper & Brothers,(1911),p.144

(14) R.M.Barnes,”Motion and Time Study”,John Wiley & Sons,(1949),p.640.

(15) 溝口兼治,”自動車を育てた人々”,産業能率大学出版部、(1969),p.46-66

(16)J.Nicholas,”CompetitiveManufacturing Management”,Irwin-Mcgraw-Hill,(1998),p.352-416

(17) 宮崎義一,”現代資本主義と多国籍企業”,岩波書店、(1982).

(18) 盛田昭夫,”MADE IN JAPAN”、朝日新聞社 、(1987) ,p.7-43.

(19)渋沢栄一,”青淵百話”,実業の思想 11,筑摩書房、1964,pp.134-164.

(20) J・K・フェアバンク、市古訳,”中国（上、下）”, 東京大学出版会,(1972)

(21)野村浩一,”近代日本の中国認識”、研文社,(1966)

(22)黄文雄,”中国の大誤算,”、福昌堂,(2006),pp.224-240.

(23) 黄文雄,”日本植民地の真実”, 扶桑社,(2003),p.272-347.

(24) P・F・ドラッカ、上田, 佐々木訳、”新しい現実”, ダイヤモンド社,(1989),p.39-60.

(25) 佐藤他、”世界歴史 14、ムガール帝国から英領インドへ”,中央公論社、(1998),p.383-413.

(26)鈴木梅四郎、”実業家としての中上川彦次郎先生”,実業の思想、筑摩書房、(1964),p165-178.

(27) 山本七平,”日本人とは何か,上”, ＰＨＰ文庫、(1992),p.270-289.

(28) 山本七平,”勤勉の哲学”、 PHP 文庫,(1984),p.64-153,p.154-201.

(29)吉地昌一,”二宮尊徳全集,思想と事業”,福村書店、(1968),p.24-36.

(30)三戸岡道夫,”二宮金次郎の一生”,栄光出版、(2002),p.123-206.

(31) 大石三四郎,”二宮金次郎”、同文書院、(1983),p.160-215.

(32)日野三十四,”トヨタ経営システムの研究”,ダイヤモンド社、(2004),p.12-55.

(33) 児島襄,”誤算の論理”,文芸春秋,(1993),p.311-361

(34)三野正洋,”日本軍の小失敗の研究”,光文社 NF 文庫、(2000)。

(35)森本忠夫,”魔性の歴史”,文芸春秋、(1991)

(36) 小山弘健,”世界軍事技術史”, 芳賀書店、(1972)p.319-346

(37)Final Report of The Army Service Forces,"Logistics in World War 2,Center of Military History ,US Army,1993.
(38) 谷光太郎,"ロジスティクス",同文書院インタナショナル、(1990),p.86-300.
(39) 米陸軍航空隊編,"Ｂ－２９操縦マニュアル",光人社、(1999).
(40)大野耐一、"トヨタ生産方式",ダヤモンド、(1978),p.9-131
(41) 新郷重夫,"トヨタ生産方式のIE的考察",日刊工業新聞社、(1988),p.95-335.
(42)産業能率短期大学,"上野陽一伝",産業能率短期大学出版部,(1957),p.1-170.

総説

団地映画を通してみる公共空間の活用についての研究

曽我部　昌史*

Research of utilising common space :

Observing the public space through the movie filmed at Danchi (housing apartment)

Masashi SOGABE*

0　はじめに

0.1　背景

ある財団の助成を受け、団地（ここでは、公団や県営など、公共の組織がつくった集合住宅を団地と呼ぶこととする）のリノベーションに関する研究を行った。1998年のことである。この研究を行っていた時期、建築の改修利用に関しては、その建物が歴史的な価値を有しているかどうかが一つの重要な評価基準となっており、公共の集合住宅のような建物については、狭い意味でのストック活用として、つまりは、コスト的なメリットがエコロジーブームに支えられて評価されるのが関の山であった。この状況に疑問を持ったことが、この研究のきっかけとなっているのだが、団地を舞台に具体的な生活像を思い描くことが、生活の場としての建築の可能性を大きく切り開いていくように思われた。そういった生活の＝建築活用のイメージを広く共有できるようにしたいという思いから、この研究の成果をヴィジュアルにまとめ書籍としてまとめた。

今回は、団地の中でも都市の周辺部に建つ郊外団地に限定し、さらに、郊外団地がもつ、もっとも特徴的な部分である屋外の公共空間に注目し、具体的なアクティヴィティについて調査を行うこととした。郊外団地の屋外公共空間に注目することにより、これまでとは違った角度から建築の可能性を追求してみようと考えたのである。

0.2　研究の目的

郊外団地を舞台として、屋外公共空間の特性と、そこで行なわれる具体的なアクティヴィティとの関係を把握し、場所の使い方に関する新しいアイデアを構想することが、この研究の目的である。

団地に限ったことではないが、建築を計画する時には、その場所の使い方を機能名に代表させ、その配列を調整するようにして検討を重ねる。しかし、大抵の場合、計画段階で想定された使い方（機能名）と、実際にそこで起こっているアクティヴィティとの間には、ずれがある。当たり前のことながら、想定された使い方だけで、全体の場が成立しているわけではない。郊外団地を観察していると、機能名では説明することのできない多様なアクティヴィティが創出されていることがよくわかる。この、多様なアクティヴィティに注目したいと考えた。そうすることで、実際のアクティヴィティとそこの場の特性の関係を、浮かび上がらせることを目指している。

1　研究の概要

1.1　団地の位置づけ

1960年前後から70年代の初頭に建てられた団地は、空間配列の形式において共通している部分が多い。標準設計的に大量の建物の建設を推進したためだが、このことが、本公共空間研究にとっては都合が良い。共通した空間配列と、そこでの場の使い方との関係に注目することで、場の特性とアクティヴィティとの関係を抽出しやすいからである。

また、この時期に建てられた団地群は、既に建て替えの時期を迎えており、耐震性能の問題などから、解体が進められている。つまり団地を舞台として繰り広げられる具体的なアクティヴィティを調査研究することは、年を追う毎に困難になっており、この時期にこういった視点で郊外団地に注目することには意味があると考えた。

*教授　建築学科
Professor, Dept. of Architecture

1.2　公共空間への注目

団地をめぐる問題のなかで、最も特徴的なのは、団地がそれまでになかった、独特の共同体を前提としていることである。規模的にも、集住している人たちのまとまりの面からも、独特である。団地では立体的に集合して住むことになるわけだが、その構成を実現するためには、構造的にも感覚的行為的にも様々な公共空間が必要であり、そういった場所の存在が団地らしさの一端を担ってもいる。また、いわゆる行政が直接管理運営しているわけではなく、共同体の自治組合的な組織が管理運営しているという状況も、今日の日本ではめずらしく、郊外団地の中にある公共空間を、日本におけるハーバーマス的な意味での公共圏注 4）として捉えることが可能だと考えた。

1.3　映画の中で描かれる団地

本研究では、公共空間を考察するにあたり、団地が舞台となっている映画に注目をすることとした。映画というフィルターを通すことで、団地の社会的なイメージの一端を把握することが可能になると思われたし、団地での生活が始まった頃から現代に至るまでの、通時的な変化についても分析が可能になると考えた。

同種のメディアとしては、団地が舞台のマンガや小説などもあるが、サンプルが膨大となること、映画に限定しても検討するのに十分な事例があること、アクティヴィティに注目するのにもっとも直接的なメディアであることなどから、ここでは映画に限って考察をする。

1.4　使い方の提案

ここでの目的は、郊外団地を舞台として、屋外公共空間の特性と、そこで行なわれる具体的なアクティヴィティとの関係を把握し、場所の使い方に関する新しいアイデアを構想することである。最終的には、分析の結果をふまえ、具体的な団地の活用のアイデアをまとめることを目指す。また、アイデアの表現方法についても、表現の内容にもっとも適した方法を試みる。

2．団地映画

2.1　団地映画の概観

公団の団地が登場した直後である 1960 年代前半から、団地は多くの映画の舞台になってきた。団地が、その時代その時代の象徴的な風景を作り出しているとみなされていたからか、団地が舞台となっている映画は少なくない。特に、都市部の一般集合住宅に混ざって建っているものよりも、郊外の自然の中につくられた典型的な郊外型大規模団地が舞台となる。

今回、分析の対象としたのは、表 1-1 の全２７作品である。対象となる作品の選定においては、（1）日本の、基本的には首都圏の団地を舞台とした映画であること（それ以外のものは、団地の社会的な位置づけが違うことから、同列に並べて検討するには不向きであると考えた）、（2）ドラマなどは含まない（場所とアクティヴィティの関係について、映画程強く意識されていないように思われた。）、（3）「にっかつロマンポルノ」系の映画は含まない（後述するが、ある特別なイメージをもって、特定の時期に大量の「にっかつロマンポルノ」系映画が作られている）の３点を条件とした。

2.2　団地映画の変異

団地映画には、はっきりとした時代毎の変遷がある。およそ 10 年毎に、団地の描かれ方、つまり団地の社会的な位置づけは大きく変化している。(表 1-1)

【黎明期】日本団地映画の黎明期ともいえる 1960 年代の作品では、ほとんどの場合、団地が新しいライフスタイルを象徴する器として描かれている。その新しさに対してのスタンスは映画によって異なるが、それまでになかった「文化的な」生活イメージを表現するのに団地を舞台として利用されていると考えられる。

※作品例：『私は二歳』『団地七つの大罪』など。

【低迷期】それにつづく 1970 年代は低迷期といえる。実はこの時期は、「にっかつロマンポルノ」系映画の『団地妻シリーズ』がもっとも活発だった時代であった。団地妻シリーズが作り上げた独特のイメージによる社会的な位置づけに影響されたからか、団地妻シリーズ以外で団地が舞台になっている映画は、見つけられなかった。

※作品例：ドラマに『なぞの転校生』一部の『ウルトラセブン』などがある。

【悲観期】1980 年代は悲観期である。80 年代の頭に団地妻シリーズの製作はほぼ終わったものの、黎明期にあったような新しいライフスタイルを代表する存在として扱われることはなくなった。この時期、団地に向けられているまなざしは、総じてネガティブである。団地のような画一的な空間が、社会問題（事件）を起こすという図式で描かれる場合が多い。

※作品例：『家族ゲーム』『震える舌』など。

【懐古期】そして 1990 年以降から最近にかけては、割と牧歌的な、思い出の場所として団地が描かれる。Ｓ３０ブーム（昭和 30 年代のムードを懐古するような流行）に代表されるように、この時代のものに対する再評価が積極的に行なわれるようになっていたことも連動

し、団地はそういったムードの舞台として取り扱われる。理想的な生活像ではないにしても、少なくともネガティブなイメージで描かれることは少なくなって行く。

※作品例：『耳をすませば』『ピカ☆ンチ』など。

こういった、映画での団地の描かれ方の流れからも、商業映画という表現分野において、団地が、紋切り型的に時代のムードを伝えるための舞台として活用されていることは明白である。描かれ方においては、その時代のムードの影響を色濃く反映し、判りやすい形で、団地独特のアクティヴィティが描かれていることが予想できる。

表 1－1　研究の対象とした団地映画

No	映画タイトル	監督	制作年	備考
1	駅前団地	久松静児	1961年	
2	団地への招待		1962年	宣伝用映像
3	キングコング対ゴジラ	本多猪四郎	1962年	
4	しとやかな獣	川島雄三	1962年	
5	団地七つの大罪	千葉泰樹他	1964年	
6	大市民	和田勉	1966年	TVドラマ
7	私は二歳	市川崑	1968年	
8	ウルトラマンタロウ第21話 東京ニュータウン沈没	深沢清澄	1974年	TVドラマ
9	なぞの転校生	吉田治夫	1975年	TVドラマ
10	震える舌	野村芳太郎	1980年	
11	ねらわれた学園	大林宣彦	1981年	
12	遠雷	根岸吉太郎	1982年	
13	家族ゲーム	森田芳光	1983年	
14	ゴンドラ	伊藤智生	1986年	
15	無能の人	竹中直人	1991年	
16	トカレフ	坂本順治	1994年	
17	平成狸合戦ぽんぽこ	高畑勲	1994年	
18	毎日が夏休み	金子修介	1994年	
19	耳をすませば	近藤喜文	1995年	
20	デジモンアドベンチャー	細田守	1999年	
21	踊る大捜査線	本広克行	1999年	
22	どこまでもいこう	塩田明彦	1999年	
23	張り込み	篠原哲雄	2001年	
24	仄暗い水の底から	中田秀夫	2002年	
25	ピカ☆ンチ	堤幸彦	2002年	
26	FRONTIER	宮崎淳	2003年	
27	ピカ☆☆ンチ	堤幸彦	2004年	

2.3　公共空間の描写

団地映画での公共空間の描かれかたについて、具体的に確認を行った。まず、対象とした全 27 作品について、調査表を用いて公共空間の描かれ方をピックアップしていった。ここでは、調査内容の全体を紹介することは難しいので、一部を全体の概要とともに紹介する。次章以降は映画一作品単位ではなく、一つ一つの場面単位での公共空間でのアクティヴィティに注目することになる。

- 『団地七つの大罪』：黎明期の代表的な作品である。「団地」という新しい生活の器の特徴を、その特徴故に起こってしまう七つの事件を題材にして紹介している。（画一的で区別のつかない住戸、他人の家が覗きやすい配置計画、など。）
- 『私は二歳』：市川崑監督の、団地映画というと必ず出てくる作品である。新しい団地を舞台とした若い夫婦の生活を、２歳の子供の視点で描いている。特に、階段室が地域コミュニティのための場として、あるいは住宅のアクティヴィティがしみ出す場として活用されている様子が印象的である。
- 『ウルトラセブン』：ウルトラマン、ウルトラセブンシリーズでは、団地が舞台となることが少なくない。21 話「あなたはだあれ」では、画一的で個性が表出しにくいという、団地的な正確を利用した、団地が主題となった作品である。
- 『家族ゲーム』：団地での生活が、家族のコミュニケーションを壊す、あるいは団地という空間構成の特質故に恐ろしい事件に巻き込まれる、といった物語の構造が、悲観期の映画の典型である。舞台となっているのは、都心の高層型団地であるが、湾岸の新たに開発されたエリアで、郊外団地的な性格を備えていると考えた。映画全体の中では外部空間が描かれている部分は多くはないが、住戸外の夫婦のプライベートな密室空間として駐車場のマイカーが用いられていることが印象的である。
- 『耳をすませば』：聖蹟桜ヶ丘の団地が舞台となっている。実写を元にして原画が作られていることもあり、舞台設定の現実感は強い。悲観期までの映画が、映画としてのフィクション性が強いのに対し、懐古期の団地映画では、日常の一風景として団地が描かれる傾向が強い。階段室をコミュニケーションスペースとして展開している映画は少なくないが、ここでは、階段の踊り場が住戸の拡張した部分として活用されているのが印象深い。階段室の踊り場は、住戸の扉から半層分の移動だけで得られるテラス状の場所とみなせることに気づかされる。
- 『ピカ☆ンチ』：舞台は品川の八潮団地（映画では八塩団地）。都心型だが、六千世帯を有する巨大団地であり、郊外団地と同様の外部空間でのアクティヴィティが密度高く描かれることが期待できた。子供たちが生活している世界が、団地のエリアと一対一

で対応しているようにとらえられている。

2.4　映画を通して得られる見方

前述した通り、本論考では団地映画を通して機能名では説明することのできない多様なアクティヴィティへの注目を目指している。ここで紹介したのは一部だが、様々な場所の使い方を取り出した。ある場所の使い方に注目するとき、その場所が、ほかのどのような場所と関係を持っているかということが、その場所の使い方の可能性を規定する。映画を通してみることで、抽象化されることなく、実際の人間のアクティヴィティを通して、いろいろな場所がどのように位置づけられているのかを確認することができた。

また、例えば階段室のように、時代を横断して、様々な異なる種類のコミュニケーションの場として活用されている部分が存在していることは、機能で場所を規定することの困難さを象徴している。つまり、その時の時代背景や、隣接している場所など環境条件の違いが、あらかじめ規定された機能よりも、大きな影響をもっていることが、映画を通してみることで、特に明確になった。

3．　映画に見る団地公共空間

3.1　団地公共空間の類型

2 章で例として取り上げたような外部空間での活動を、映画の内容や時代背景を考慮せずに、横断的に並べ、映画を通して得られた公共空間の特性と、そこで行なわれる具体的なアクティヴィティとの関係を整理した。

まず公共空間に関して 1)空間的分類、2)概念的分類の２つのカテゴリーに分類した。空間的分類では、廊下、道路など物理的な空間で、アクティヴィティのおきている空間について分析した。また概念的分類では、団地の公共空間を、住人同士の人間関係でつくられる概念的空間として細かなスケールに分けて分析した。

3.2　空間的分類

空間的分類は、団地の建物内部の公共空間、団地のランドスケープの公共空間の２つに大きくわけることができる。またこの公共空間に関して、住人のアクティヴィティを接近、遭遇、拡張、加入、征服（視線）、疎通（視線）の６つのタイプに分けた。

はじめに、団地内部の公共空間を取りあげる。映画に登場する公共空間は、廊下や階段など、動線空間が多い。基本的にこれらの動線空間は、使う人がある程度固定的であり、お互いが知人同士であることが多い。特に階段室型の団地の階段室は親密性が高く、階段ですれ違い、挨拶を交わすシーンが映画全体を通して多くみられた。階段室でのアクティヴィティは空間の狭さ故か、スケールが身体的であり親密性が高い。『大市民』では、多くの主婦が階段室に集まり、トイレットペーパーの受け渡しをしている。明らかに空間的に人の密度が高いが、それ故エネルギーのこもった空間演出になっていた。

その他、階段室が個人空間のしみだしとして使われている例もあった。例えば、お互いの玄関扉を開放して踊り場空間を共有したり、同じく踊り場を日曜大工の作業場として使用して使うといったシーンである。

廊下では、会いたい人間に高い確率で会うことができるため、待合せ、待伏せの空間として登場する。『キングコングVSゴジラ』では、船で遭難したと思われていた男に男の友人である女が、偶然廊下で出会う。住戸が密室的で何をしているかわからない団地において、廊下では都市で偶然知人に出会うような偶然性の質も兼ね備えていた。

階段や、廊下など動線空間でのアクティヴィティには、「接近」「遭遇」のような動線空間特有の使い方や、個人空間のしみ出しのように空間の「拡張」がおきる場合もあった。「拡張」のように、階段や廊下は、半個人的な空間としても使えるため、私有化したアクティヴィティがおこることもある。

ベランダは、視線によるコミュニケーションの空間である。団地のベランダは、人間にとって新たな視線を獲得することとなった。ここでのアクティヴィティは、一つは覗きであり、一つは視線による交流である。まず覗きに関しては、数多くの映画で部屋を覗くシーンがみられた。覗きは、人間の強い欲望なのであろう。覗きのようなうしろめたさはないが、野菜売りのトラックや、救急車、パトカーが来たときにベランダから様子をうかがうといったようなアクティヴィティは、ベランダ特有のものである。また『どこまでもいこう』では、覗きというよりは、子供たちの異性に対する興味から、自分の部屋の窓から向いの棟の部屋を見つめるというアクティヴィティがおこる。この映画では、偶然、向いの部屋の異性が出てきて、目が合うのだが、このような「疎通」ともいえる関係も団地ベランダ特有のコミュニケーションである。このようにベランダでのアクティヴィティには、視線による「覗き」「疎通」といったものがみられた。

続いて、団地のランドスケープ的なの公共空間を取りあげる。ランドスケープは、空間的に広がりがあるため、空間を大きく使うものもいくつかが見られた。

団地の道路は、『団地七つの大罪』などで見られたように、道路を閉鎖してイベントをおこなう広場となる。この場合、道路が舞台であり、団地のベランダが客席と

いう構成となる。道路＋団地＋ベランダの団地の空間が一体となって、お祭りを盛上げている。

『家族ゲーム』では、普通なら道路空間の延長で考えられる駐車場を、住戸の延長として使えることを示されていた。狭い団地の住戸の中では大事な話ができないこともあって、駐車場に駐車している車を個室空間として使用していたのだ。駐車場の私有地化、つまりアクティヴィティの拡張が、ここでもおこっている。

『どこまでもいこう』では、団地のベランダ下の空間を活用している。子供達は、そこに彼等のための公共圏をつくりだしていた。ベランダ下の空間には、ちいさな体しか入れない。そこでは、子供たちの場所の「拡張」がおきていた。

『耳をすませば』では、団地の入口がコミュニケーションの場となっている。この入口の周辺には、ベンチや掲示板が配置されており、ベンチや階段の段に子どもたちが集まり、団地を訪問する人々を確認し声をかける。団地全体に対してのチェック機構をになう場になっている。ここは団地内部と同様の「接近」とでもいうようなアクティヴィティが起きている。

3.3　概念的分類

『団地への招待』で繰り返し発せられる「共同生活」は、日本古来からの長屋における生活や「ムラ社会」的な意味での共同生活の延長線上にある。団地における「共同生活」の新しい点は、上下左右に住居があり他者が住んでいるという点である。圧倒的な数の人々が立体的に集中して住み顔をあわせることは、日本人にとって新しい経験であり、このことは、生産をともなわない「トシ社会」の始まりであった。そしてこの「トシ社会」的な「共同生活」という考え方によって、個人空間、近隣空間、社会空間のそれぞれの差が曖昧になっていった。

個人空間とは、団地の住戸を指す空間概念である。同じような住戸がくりかえして配置される空間配置が、他者との差異化を難しくしている。近隣空間は、団地敷地内の住棟同士の関係を指す空間概念である。そして社会空間とは、団地に対する社会がもっているイメージを指す空間概念である。

まず個人空間に関しては、『団地七つの大罪』における「〇棟〇号室の奥さん」という台詞が示す匿名性が象徴的である。団地において、名を持たない個が存在していることを示している。人間関係が、個人でなく住戸の位置によって表現されているのである。格子状で区切られた箱の集合体である団地では、自分で自分の位置すら空間的に認識することもままならず、お互いを記号で呼び合うことで自分の位置を確認しているようだ。

近隣空間は、住む人々の微妙な関係で成立している。『トカレフ』で、それまでは子供たちとともに仲良くしていた近隣の母親たちは、タカシの死後急に、タカシの母親に対してよそよそしい態度をとる。この場合、母親同士を引き寄せ合っていた唯一のコネクションは同じ歳の子供をもっていることもあり、それを喪失してしまった瞬間に彼女達の関係もなくなるのだ。その結果、タカシの母親の近隣空間の公共性が成立しなくなった。

社会空間は、社会が団地に対してもっている印象に支配される空間である。団地の印象は時代によって異なるが、例えば『大市民』で押売の格好をした左幸子が「(押売のような) バカな格好はやめなさい」といわれるのには、団地に住むことに対するプライドが示されている。団地がいつの時代においても、社会的に特別な意味をもった空間であり、そのことが、団地内でのコミュニケーションの形に大きく関わっていることが予想される。

3.4　空間利用の可能性の展開

団地での公共空間の活用方法を横断的に考察してきた。空間的分類では、公共空間をアクティヴィティを切り口に観察し、概念的分類では、団地に対する社会的概念から分析した。空間的分類では、人々のアクティヴィティが団地のどのような場所や条件なら発生するのかということを考察し、また概念的分類では、さまざまな空間のスケールにおいて、団地に対する社会的な印象などについて考えた。

空間的分類では、空間のスケールあるいは親密性が空間活用の面で大きく影響していることが確認できた。人が集まっている空間には狭いところが多く、計画的に用意した広場や公園に人が集まるようなシーンは、今回分析対象とした映画にはほとんど出てこなかった。空間的に開放的な道路や公園にはアクティヴィティは見られず、むしろやや閉鎖的で人々の親密性が高まるような場所の方が、人々が集まる場所として描かれやすい。道路空間や広場などに、普段は人々がおらず閑散としているのだが、一旦パトカーが来たり事件が起きたりすると、その広い場所に人だかりができる。広場や公園のようなスケールの大きな空間は、日常的に活用されるような場になりにくく、何らかのきっかけを元に、ちょっとしたイベントスペース的に活用されるようになるようだ。

概念的分類では、個人空間、近隣空間、社会空間の３つのスケールで考察を進めたが、それぞれの規模に応じた住人同士のコミュニティが確認できた。

4　団地再生のアイデア

4.1　アクティヴィティへの注目

団地映画を通して、公共空間内での活動に注目することで、既存の公共空間の空間的特性が、豊かなアクティヴィティを誘発する可能性をもっていることが確認できた。そこで、映画を通して確認することができた公共空間の特性と、それ故に発生するアクティヴィティとの関係を利用して、これまで考えられてきていないようなアクティヴィティ空間を具体的にデザインしていく。

同じ場所をデザインする場合においても、機能名称に翻訳をした上で、その名称のために必要充分な状況を整えるようなやり方と、そこでおこってほしいアクティヴィティを想定しながら、それを想起する、あるいは受け入れることのできるような状況を作ろうとするようなやり方とでは、引き上げられる問題のタイプが大きく異なる。どちらの方法がデザイン手法上有効であるのかを考えることは不毛である。いずれにしても、計画した通りに、その場が活用されることはないからだ。しかし、今日の建築家の職能が、(機能を全うするための)「もの」をデザインするという水準を越えて、(そこでおこる)「こと」をデザインするような方向に向かっていることを考えると、直接、アクティヴィティと空間の特性の関係に注目をすることを通してデザインを考えることが、新しい可能性を広げていくと考えた。

団地に限らず、多くの公共的な空間（建築）では、最低限の機能を全うすることができていて、その上で特段の問題が発生しないということが、その空間を評価する上で基本的なスタンスとなる。その場の持つ豊かさ（ここでは、いろいろなアクティヴィティが誘発されるきっかけの豊富さ）がその建築の評価すべき内容として注目されることは極めて少ない。この論考では具体的なアイデアを考えることにより、この問題の重大さを再認識させると同時に、取り壊しを目前としている団地でも、場の豊かさを評価軸とすれば、ポジティブに評価しうる側面が少なくないことを表明することが重要だと考えた。

また、公共空間の特性と、そこでおこるアクティヴィティとの関係を、より明確に伝えることを優先したため、改修として実現可能なものもあれば、まったく荒唐無稽なものも含まれている。

4.2　具体的な提案

アクティヴィティを発生させるきっかけとなるべく、場の特性を極端化するようなアイデアとなるよう検討を重ね、以下のカテゴリー別に整理し、28 アイデアに絞り込んだ。

A／ベランダ下：もっとも団地的な建築構成部位である。特にベランダの下の空間は、ある種の余剰空間として、たまたま生まれたものだが、独特のスケール感や、家の下という位置（しかも、上の家からは見えない）から、さまざまな使用法が広がる。日常のちょっとだけ裏側にある秘密の場所のような、子供が親近感を持ちやすい場の特性を備えている。スケール感的にも、大人の侵入を拒否できる。

B／広場：隣棟間隔を確保するためのスペースは、団地コミュニティのイベントスペース的な活用法が可能となる。団地と団地に挟まれるという構成上の特徴から、各住戸が観客席的な位置となるし（特にベランダ側）、同時に、建物への入り口にも面していることから、イベントスペースとしてのシンボリックさを得ることも可能である。

C／廊下：片廊下型の場合、廊下は住戸にとっての前面道路的な場となる。当然、車が通る心配も無く、ある限られた人たちだけの場所でもあるため、下町の路地空間のような、コミュニティに開かれた場としての特性を備える。ちょっとしたしつらえを追加したりスケールを変えることで、無機質な動線空間が濃密なコミュニケーションの場に変容しうる。

D／階段：階段室型の団地では、階段を共有するのは、わずかに 8ー10 戸の住戸である。階段室の入り口に扉をつけるだけで、コレクティブハウスのビルディングタイプとみなすことも可能なほどである。このような、プライベートな家の延長と見なせる公共的な場の存在が、郊外団地における公共圏の展開のきっかけとなっているのではないだろうか（例えば、住戸の拡張スペースとして用いられる踊り場部分など）。階段室型はバリアフリー的にネガティブであるという側面が強調されることが少なくないが、アクティヴィティの可能性を広げるという意味では、大変重要な場所でもある。

E／玄関：今回のアイデアのカテゴリー中、唯一の住戸側に所属するスペースである。団地においては、戸建住宅の場合とは異なり、玄関は、不特定な人たちが通行する場所に面していない。つまり、玄関に期待されるバリアーが、相対的に低いものとなる。そうなると、玄関や玄関前のスペースは、住戸にとって単に通過するための場所ではなく、何らかの活動の場所として活用しやすくなる。

F／場の共有：ある空間が住戸と住戸に挟まれているという構成は、住む人たちに、その空間を自分たちのプライベートな場として認識させる。隣棟間隔の上

空も、二つの住戸で挟まれた、二つの住戸のためのスペースとして見なせる。またベランダは複数の住戸が面する特別な場所で、避難などの場合に複数の住戸がシェアすることを前提で計画されている。

G／駐車場：住戸単位で所有する場が、建物の外部に分散的に存在している。駐車スペースが個室的な場として活用されうることを考えると、分散配置的な住戸形式（個室が散在している形式）と見なせる。ここにはさまざまなタイプの個室を追加することが可能であり、住戸としての多様化が図れる。同時に、住戸と公共空間が極限まで近接した関係をとることとなり、公共空間側にとっても、その場でのアクティヴィティが変容するきっかけとなる。

H／アプローチ：郊外団地においては、アプローチ周りのスペースが、公共の空間でありながら、個の関わりを許容する場所であり、そのことが、郊外団地の公共空間の特徴を生んでいる。団地のもつ、無機質で均一な空間感と対比的に、アプローチ側おいては、いろいろな場で、少しずつ個が表出しているのである。この表出を計画することで、アプローチ空間のアクティヴィティが格段と高まることが考えられる。

I／エレベータ：エレベータは日常的な移動で使用する場所でありながら、その中にいる時には、動かずにじっとしている。目的の階に至るまでは、ある種の個室性をもった場となるわけである。

J／その他：どのカテゴリーにも属さないもの、あるいは、複数のカテゴリーに関わるものを「その他」としている。「のぞき」という団地全体の区間構成が誘発する状況も、その他とした。

4.3　公共空間をデザインすること

公共空間でのアクティヴィティをデザインしようとすることは、その場でのアフォーダンスのデザインを試みることに近い。完全なアフォーダンスをデザインすることはかなり難しいことだと思われるが、その「きっかけ」をデザインすることは可能なのではないだろうか。もともと郊外団地が備えているのは、公共空間としてのハードルの低さではないだろうか。このハードルの低さ、つまりは、個が関わることを受け入れる寛容さを積極的に引き出すような「きっかけ」を作り出すことが、郊外団地が備えている公共圏的に人々が積極的に関わるような公共空間をデザインすることとなるのだと考える。

4.4　アイデアの表現方法

ここでは 28 のアイデアに整理したが、案の数を限定せざるを得なかった一番大きな理由は、アイデアを動画的に表現しようとしたからである。直接のアクティヴィティに注目したアイデアは、平面的な表現によって、その内容全体を伝えることが難しい。平面的な図を言葉で補足するようなことも考えられるが、ここでは、より直感的に内容をとらえられるようにすることを目指し、フラッシュムービーを用いた、動画的な表現を試みている。

5　分析

5.1　機能の場所と実践の場所

映画の団地空間に注目することで、機能的な検討では見出せないような公共空間の可能性を見つめてきた。そこで確認できたことを基準として、前章では空間におけるアクティヴィティをアイデア化することを試みた。これらのアイデアでは、映画に出てきたアクティヴィティに一工夫加えて、場所の使われ方の新しい可能性を示そうとしている。

場の空間的な定義（何に使う場所であるかを機能で表すこと）ではなく、そこに関わるアクティヴィティに注目して場を考えることを「実践の場所」と呼ぶ。機能を全うするためのデザインの完成度が高いと、その機能以外のアクティヴィティが生じることは期待しにくい。機能的な意味での完成度が低い、あるいは、時代遅れになってしまったことより機能的にズレてしまったような場が団地には多く、そういったある種の冗長性の高さが、多様なアクティヴィティを生む。

『団地への招待』では、団地内に用意されている機能や施設などをうまく利用すれば機能的に不足のない未来の生活、言ってみれば「近代的な暮らし」ができると説いていた。しかし、いざ使ってみるとそれらが使いにくかったり、または時代にあわなくなり使えなくなっていく。『団地への招待』の製作された2年後に登場した『団地七つの大罪』では、団地生活の中で起こる事件（アクティヴィティ）をモチーフにして、きれいごとだけではすまされない近代的な暮らしを滑稽に描いている。『団地七つの大罪』では、基本的には団地の生活を社会的な視点で批判しており、生に、人間同士の関係を批判していた。しかしいくつかのシーンでは、団地生活における「機能の場所」が「実践の場所」として活用されている様子が見てとれた。回想シーンではあったが、エレベータの中の秘め事なども団地のエレベータの密室性ゆえの「実勢の場所」といえる。

『団地への招待』がつくられた頃の団地の計画では、住民の生活が団地敷地内で完結できるように、さまざまな機能的な場所を団地敷地内に配置している。例えば、初期の団地では団地敷地内にスーパーが用意されていた。しかし、近隣に別の大型店舗が増えたことなどによって、スーパーの閉鎖が余儀なくなり、計画されていなかった

場所が残る。そうしたプロセスによって「実践の場所」としての場が形成されるのである。

そうしたプロセス以外にも団地内の公共空間が実践の場所として使われている例は少なくない。階段、廊下などの動線空間は人々が集まって話をする場として、機能を越えた使われ方を確認できた。住民の「機能の場所」（住戸など）と他の住民の「機能の場所」（他の住人の住戸、スーパーなど）を結ぶ団地の公共空間（廊下、階段、道路など）が、「機能の場所」以上の、あるアクティヴィティを実践する場所として描かれていた。

またこれとは逆に、「機能の場所」としての公共空間に人がいないこと（機能していないこと）を利用して、個人的な空間をつくりだしている映画のシーンも見られた。『家族ゲーム』の伊丹十三と松田優作や由紀さおりが大事な話をする際に、駐車場にある車を居室として使っているシーンである。素直に考えると、これは、団地内の居室が狭く大事な話ができず、それ故仕方なく駐車場の車を利用してそこを個室化するということである。ところがこの空間の構造を見つめると、＜機能していな（＝人のいない）公共空間にゆく＞→＜プライベート性を獲得しやすい＞→＜一方、その場は（大概）団地から見られる＞→＜シェル化して使用する＞と読み替えることができる。つまり、駐車場（＋車）は、団地の居室の一部として扱われており、機能しなくなった場所をあるアクティヴィティによって「実践の場」とし、改めて場を創出したのである。さらに、団地室内で行っている行為、例えば最もネガティヴなアクティヴィティの一つである覗きという行為も、この非・機能の場所である駐車場においても当てはまる。

5.2　公共圏としての郊外団地

まず団地における公共圏ということを考える前に、郊外に住まうということを考える。「郊外」は、いつでも都市の周縁に位置しており、郊外に住まうということは、都市から遠いことと引き替えに、緑豊かな生活ができるという印象を与えてきた。そして団地は、ほとんどの場合郊外に建てられるものとして計画され、碧豊かな生活を実現するものであった。それ故郊外団地は、一つのあこがれの場であった。しかし時代を重ねることによって、そういった夢は遠のいた。郊外団地は、これらの印象の変化の過程をもって成り立っているのである。

映画における公共圏は、時代の表象としてあらわれてくる。60 年代は、団地はポジティブに捉えられ、主婦の活躍がみられる映画が多かった。消費材などを共同購入してみんなで分け合ったり、保育所やクリーニング施設の設置を要求したりするような、主婦によるコミュニケーションの場として団地内のさまざまな場所が活用されていた。ところが、80 年代に入ると、そういった主婦のコミュニケーションが描かれることはほとんどなくなった。むしろそれ以降の団地に住まう主婦に見られるのは、近隣に無関心な、コミュニケーションのない関係である。60 年代に主婦が活躍していた団地の公共圏は、触れてはいけない問題であるかのように、全く扱われなくなった。対象的に、団地に住む子供同士の公共圏は、90 年代になって団地映画で多く見られるようになった。実際の団地に住む子供たちが団地内で活発に遊んでいるか否かは別として、彼等は空間的にも、コミュニケーションにおいても、団地の中を縦横無尽に使っていた。

60 年代にみられた主婦による公共圏は、時代に支えられていたといえる。「郊外」が夢だったから、主婦が意気揚々と団地内外で活躍していたのである。この時の公共圏は、公民館や公園などコミュニケーションのための機能の場で、主婦たちのアクティヴィティによりコミュニケーションの場として機能していた。また主婦が、団地内に引きこもることもせず活発に活動していたため、団地内に人的ネットワークも張り巡らされ、何か事件が勃発すればすぐにウワサが団地内に巡っていた。主婦の活動を中心として、団地内に公共的な場が発生していた、とみることができる。

子供は、団地内のいたるところを公共圏的に活用する。子供は、大人が躊躇するようなところにも入っていく。独自のスケール感覚と常識にしばられない自由さによって、場の新しい活用法を見いだすようだ。団地のベランダ下での密談や、向かい合っている棟のベランダ同士でのコミュニケーションすら可能になる。団地の外に出れば、緑豊富なランドスケープを走り回ったり、ちいさなベンチでおしゃべりをしたりして、彼等なりの公共圏をつくりだしている。建物を計画する側の意図とは無関係にその場の可能性を引き出し、意外な公共圏を創出しているのである。

共同研究者

田中皇彦（建築家）

会沢佐恵子（(株)UG 都市建築）

飯田彩（千葉大学大学院 2 年生）

岩下陽子（ディティールジャパン）

上村育美（(有)乾久美子建築設計事務所）

中島祐太（東京芸術大学 3 年生）

中林仁子（神奈川大学曽我部研究室アシスタント）

総説

CP の破れー新しい物理を探る

三田一郎*

CP Violation - A Search for New Physics

A. I. Sanda

平成１４年秋の紫綬褒章
2004年　J.J. Sakurai 賞（米国物理学会賞）
その他

1　緒言

人間は昔から, 夜空を見上げながら, わたしたちはなぜこの世に存在するのだろうか, この宇宙はどのようにしてできたのだろうかと疑問を持ち続けてきた. また, わたしたちは何からできているのだろうか. そもそも物質ってどのようにできているのだろうかと疑問を持ち, 分子, 原子, 原子核, 陽子, クォーク (陽子や中間子を構成する基本粒子.) など, 最も基本的な物質は何かと追求してきた.

この二つの基本的疑問を統一的に考えることが出来る. つまり, この世の中で一番大きいもの「宇宙」と一番小さいもの「素粒子」の両者を総合的に理解できる可能性がある. それが素粒子論的ビッグバン宇宙論である.

後から詳しく説明するが, ごく簡単な考え方から素粒子論は, それぞれの素粒子に 反素粒子と呼ばれる相棒が存在することを予言する. 陽子には反陽子, 中性子には反中性子, 電子には陽電子という相棒である. これら反粒子は粒子と同じ質量, 同じ寿命, 同じスピン (素粒子は駒のように回転していて角運動量をもつ. この角運動量をスピンと呼ぶ.) をもっているが, 電荷など, あらゆる量子数 (電荷や他に様々な性質を量子数と呼ぶ.) の符号が反対なのである.

さらに, この反粒子が存在することによって

エネルギー　→　陽子＋反陽子

など, エネルギーが同量の物質と反物質に遷移することが予言される. この反応はアインシュタインの有名な質量とエネルギーの関係式 $E = mc^2$ によって, 終状態のエネルギーが始状態のエネルギーと等しい. さらに, 粒子と反粒子は反対の量子数を持つがゆえに, 終状態である同量の粒子と反粒子の量子数の和はゼロになり, エネルギーや量子数は始状態と等しい.

わたしたちの周りの星や銀河も, 宇宙に存在する全ての物質はエネルギーの塊から出来たと考えられる. つまり, ビッグバン宇宙論によると, 現在の宇宙は針の先より, もっともっと小さな球の中に莫大なエネルギーが押し込まれていて, その状態が爆発して誕生した. 宇宙が膨張するにつれて温度が下がり, エネルギーが物質に変化し, 137億年後に, 現在我々が住む宇宙になったわけだ. ここで述べた素粒子論の予言とビッグバン宇宙論はただの仮説ではなく, 全て実験で証明されている.

この初期宇宙の状態を考えてみよう. 初期にさかのぼればさかのぼるほど宇宙の体積が小さくなるので, 熱力学によると温度が高い状態であり, 宇宙を構成する粒子のエネルギーが高くなる. 粒子は小さな空間に閉じ込められて, すさまじいエネルギーで運動しているので、お互いに衝突し, 原子核はさらに小さい陽子と中性子に壊れてしまう. このようにして生成された陽子や中性子も, さらに基本粒子（クォーク) に壊れてしまう.

現在の宇宙に存在する全てのエネルギーがこの小さな球の中に閉じこめられたときの温度は, わたしたちの考えうる最高の温度である. さらに, この最高の温度の状態で存在する粒子と反粒子こそ最も基本的な粒子であり, これらの粒子がクオークなど全ての物質を構成する. さらに, この最も基本的な粒子と反粒子が運動して出来ている初期宇宙の究極な状態を記述する法則こそ, 最も基本的な物理学であり, わたしたちが探求する理論である.

現在わたしたちが理解している素粒子論の有効領域は, 大爆発した100億分の１秒までで, それ以前を記述する物理は解っていない. これは究極な物理学に比べて極めて低い温度の素粒子論であり, この宇宙を完全に理解す

* 教授　物理教室
Professor of Physics Department of Physics

るには役に立たない．もっと高い温度で有効な素粒子論を追求するには何か実験からのヒントが必要である．このヒントを与えてくれるのが初期宇宙の観測である．最近の例として，WMAPで観測された負のエネルギー密度は我々の理解するに物理を超えた理論を構築する必要がある．

ここではもっと具体的な課題を追求する．わたしたちがこの宇宙に存在するという観測事実が基本的素粒子論にたどり着くのに大きなヒントを与えてくれる．仮に，**素粒子論が物質と反物質を同じように扱う**としよう．つまり，反粒子に作用するあらゆる力は，粒子に作用する力と全く同じだとする．この場合，エネルギーは同量の宇宙と反宇宙に変化するので，もし生成された宇宙と反宇宙の物理法則が全く同じであったら，

(1) 同量の銀河と反銀河が存在する，

(2) お互いに消滅してエネルギーの宇宙に戻る，

のどちらかである．

奇妙なことに銀河と銀河の衝突は観測されているが、反銀河と銀河の衝突は，今だかつて観測されていない．もし銀河と反銀河が衝突すれば，近づいた部分は互いに消滅し合い，夜空が明るくなるほどエネルギーが放出されるので絶対見逃せない。従って，(1) は除外される．更に，わたしたちが存在するのだから (2) も除外される．つまり，上記のごく簡単な観測事実から仮定した「素粒子論が物質と反物質を同じように扱うとしよう」が間違っていることになる．

「素粒子論が物質と反物質を同じように扱わない」ことを **CP** 対称性の破れ (**CP** は荷電共役 × パリティーを意味する．ここでは粒子の世界を反粒子の世界に変換させることと理解していただきたい．) という．上の議論で解ったことは，究極な素粒子論は **CP** 対称性を破る．

わたしは究極的素粒子論の探究には，まずわたしたちが理解している素粒子論の **CP** 対称性の破れを研究することが不可欠と考え，30 年前にこの研究を始めた．1980 年に，当時未発見であった B 中間子の崩壊で 15%以上の **CP** 対称性の破れが存在することを予言した．つまり，B とその反粒子 $\overline{B}$ の振舞いには 15%以上のずれがあると予言した．K 中間子の **CP** 対称性の破れは既に発見されていたが，0.2%と極めて小さかったのでこの予言は極めて画期的なものであった．

わたしは 1980 年から 16 年間，この予言を確認する可能性のある世界の研究所を周り，この研究の重要さと面白さを述べ伝えた．当時 B 中間子のことは何も知られておらず（1980 年には発見もされておらず)，わたしの計算も物理学者としての直感で行った要素が多かった．何百億円もの大型予算を一人の直感に賭けるわけにはいかない．7 年間は完全に無視された．1987 年ごろからわたしの直感が次々と的中していることが明確になり，わたしの話をまじめに聞いてくれるようになった．そしてついに 1996 年には米国ではスタンフォード加速器研究機構（SLAC) と，我が国では高エネルギー物理学研究所（KEK) でこの研究に必要な新加速器の建設が始まった．それ以降，我国と米国の研究者はすざましい競争を続けてきた．両国合わせて 700 億円の予算をつぎ込み，2000 年には同時にわたしが予言した B 中間子における 70%の **CP** 対称性の破れを発見した．

この 3 年間の結果を見てみると驚くべきことに，KEK の加速器は SLAC の加速器より強度が 2 倍もあることが明確になった．我国が最先端技術を必要とする最先端物理学の研究で世界を相手に勝利をおさめたことは明らかである．

我が国では日本人の選手がオリンピックで金メダルを取ると，国を挙げて大喜びするが，この研究で日本が全世界を相手に勝利したことは，オリンピックの勝利と比べ物にならないほど大きいものである．国民 1 人あたり 400 円もの貴重な税金を使って勝ち得た勝利であり，大いに喜んでいただきたい．

この論文を出筆するにあたり，幅広い分野の理系専門家に理解していただくために，込み入った専門的な素粒子論の議論は避け，国際研究の様々なエピソードも含めて，この研究を理解していただいたら幸いと考える．なお，詳しいことは参考文献 [1] を参照していただきたい。

2　反粒子は平方根から出る

「われわれの知る素粒子は，それぞれ反粒子という相棒をもっている」と上で述べたが，ここでは，物理法則からどのようにして反粒子の存在が導かれるかを説明する．

2.1　$E = mc^2$

ニュートン力学では，質量 m の粒子が速度 v で運動した場合，その物質の運動エネルギーは

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \tag{1}$$

と学んだ．でもアインシュタインの式では停止している物質も，質量を持つ限りエネルギーを持つ．質量 m をもつ粒子のエネルギー (E) と運動量 (p) 光速 (c) の関係は

$$E^2 = p^2c^2 + m^2c^4 \tag{2}$$

である．

わたしたちの生活に限れば反物質は縁が薄い存在である．日常生活に必要な物理法則は，反物質が有っても無くても変わらないからである．このこともアインシュタインの式から導かれる．ビリヤードボールの運動を考えよう．いくらわたしたちがビリヤードボールを強くたたいても速度 v は光速 $c = 3 \times 10^8 m/sec$ に比べれば圧倒的に小さい（$v << c$, $p = mv << mc$）．したがって，式（2）は

$$\begin{aligned} E &= mc^2\sqrt{1+\frac{p^2}{m^2c^2}} \\ &\approx mc^2 + \frac{p^2}{2m} \\ &= mc^2 + \frac{1}{2}mv^2 \end{aligned} \tag{3}$$

と近似される．ニュートン力学（古典力学）では物質の質量は変化しないので，質量のエネルギー mc^2 は運動に影響がなく，ビリヤードボールの運動を考えるには運動エネルギー

$$E_{古典} = \frac{1}{2}mv^2 \tag{4}$$

のみ考慮すればよい．

このようにして，古典力学の運動は相対論的力学の特殊な場合の近似であることがわかる．エネルギーの低い領域 ($v << c$) では，式（2）の代わりに式（3）を使える．

素粒子論は粒子の生成などを扱い，古典力学を超えるので式（2）を使う必要がある．式（2）で第 2 項を無視できないとき，式（4）と本質的違いがある．式（2）は平方根で表されており，平方根をとれば解は二つある．

$$E = \pm\sqrt{p^2c^2 + m^2c^4} \tag{5}$$

この負のエネルギーの状態はなにを意味するのか．解らないものは無視するのが人間的反応だが，このようなパズルを最後まで追及すると大きな発見につながることもある．この負のエネルギーの状態こそが反粒子の存在を意味する．

式 (3) では ± の符号を考える必要がない。この場合 mc^2 の項が $\frac{1}{2}mv^2$ よりあまりにも大きく、どちらの符号を選んでも同じニュートン力学が導かれることが簡単に示せる。式 (5) では平方根の中の 2 項が同じように寄与すると負のエネルギーの解と正のエネルギーの解が互いに影響し合い，物理学が変更される．

電流の例を考えてみよう．電流は乾電池の正の電極から負の電極に正の電荷が流れると定義されているが，実は電子が逆さまに流れていることは現在の常識である．伝導体には電子が占拠できる穴を持った原子が存在する．電子は電圧を感じ，その穴をつたわって電圧の低いほうから高いほうに運動する．この運動はあたかも電子の反対の電荷を持った穴が電圧の高いほうから低いほうに運動するように考えられる．

電流の例から分かるように，もし粒子の電荷を e とし，穴を反粒子と仮定したら反粒子の電荷はその反対 $-e$ となる．

上記の議論をまとめる．式 (5) では平方根を取ったとき ± サインが出るが，負のサインは意味が無いといって捨ててしまわず，負のエネルギーの状態がどのような物理的意味をもつか，真剣に考えることによって反粒子の存在を予言することが出来た．負の解は粒子と同じ質量を持つが，あらゆる性質が全く正反対の粒子が存在することを予言する．この粒子を反粒子とよぶ．

このようなごく簡単な解析で反粒子の存在が予言された．そして電子の反粒子，陽電子が宇宙線の中で観測され，この理論が実験で確認された．

3　基本粒子とは何んだろう

基本粒子という概念はそのときの物を壊す能力に依存する．昔，原子の構造を研究出来なかったころは原子が基本粒子であった．原子のイオン化されるのを観測可能になったとき，原子核と電子が基本粒子となった．現在観測されている全ての素粒子は 6 個のクォーク

$$\begin{pmatrix} u_\alpha \\ d_\alpha \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} c_\alpha \\ s_\alpha \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} t_\alpha \\ b_\alpha \end{pmatrix} \tag{6}$$

と，6 個のレプトン

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix} \tag{7}$$

で構成されている．

3 グループのクォークを 1 世代 (up, down)，2 世代 (charm, strange)，3 世代 (top, bottom) とよぶ．これらのクォークは「色」，（ここでは α ＝青，赤，緑色と記述する）という量子数を持っている．　レプトンは色をもたない．

クォーク u, c, t の電荷は $+\frac{2}{3}e$ であり、d, s, b の電荷は $-\frac{1}{3}e$ である．さらに，レプトン ν_e, ν_μ, ν_τ の電荷は 0, e, μ, τ の電荷は $-e$ である．

レプトンは全て実験で発見されているが電荷が $+\frac{2}{3}e$ や $-\frac{1}{3}e$ をもつ粒子は一切発見されていない．

中間子はクォークと反クォークの結合状態であり，クォークと反クォークの色が帳消されるので，無色の中間子は実験で発見される．中間子を構成するクォークと反クォークを引っ張ってクォークだけを取り出す実験を考えよう．

もしN極とS極で成り立つ磁石を引っ張ってN極のみを取り出そうとすると，それは無理なことがわかる．半分の長さの二つの磁石ができてしまう．つまり単磁極は存在しない．色の量子数を持つ粒子を単独で取り出そうとすると，この現象と同じことが起き，わたしたちが観測できるエネルギー領域ではクォークは独自で存在できない．理論的に解析すると，エネルギーが高い領域ではクォークと反クォークを結ぶ力が弱くなり，クォークと反クォークは独自で存在できることも予言する．

4 K中間子

CP 対称性は初めて K 中間子の崩壊で発見された．K^0 中間子とは d クォークと $\overline{s}$ 反クォークの結合状態であり，$\overline{K}^0$ 中間子は $\overline{d}$ 反クォークと s クォークの結合状態である．つまり，K^0 中間子の反粒子は $\overline{K}^0$ である．素粒子物理学で最も面白い現象の一つとして

$$K^0 \leftrightarrow \overline{K}^0 \tag{8}$$

遷移がある．つまり，K^0 中間子が時間がたつとその反粒子 $\overline{K}^0$ 中間子に遷移してしまうのである．ここでは説明しないが、K^0 と $\overline{K}^0$ の終状態がレプトンを含む崩壊ではかならず

$$\begin{aligned} K^0 &\rightarrow l^+\nu\pi^-, \\ \overline{K}^0 &\rightarrow l^-\overline{\nu}\pi^+, \end{aligned} \tag{9}$$

($l = \mu$ か e) のように K^0 は μ^+ か e^+, $\overline{K}^0$ は μ^- か e^- を含む終状態に崩壊する．従って放出される $\mu^\pm$ を測定すれば K^0 の崩壊か $\overline{K}^0$ の崩壊かが明確にわかる．例えば電子と電子の反粒子である陽電子が消滅するとエネルギーになる．そのエネルギーはある確立で粒子と反粒子の対 $K^0\overline{K}^0$ に遷移する．もし $K^0 \leftrightarrow \overline{K}^0$ の遷移があれば

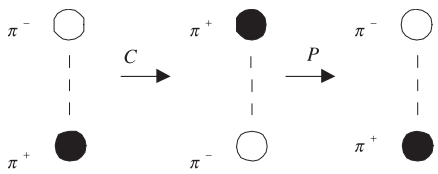


図 1:

$K^0\overline{K}^0 \rightarrow K^0K^0$, $\overline{K}\overline{K}^0$ の遷移が起こり、

$$e^+e^- \rightarrow \quad \text{エネルギー} \rightarrow K^0\overline{K}^0 \rightarrow \mu^\pm\mu^\pm\pi^\mp\pi^\mp \tag{10}$$

が観測される．この反応は同じ電荷を持つ μ 中間子が2個放出されているので，$2\mu^+$ の場合2個の K^0, $2\mu^+$ の場合2個の $\overline{K}^0$ が生成されたことを意味している．従ってこの終状態は式 (8) のような遷移があった証拠である．式 (8) はクオークの遷移として

$$K^0 = d\overline{s} \rightarrow c\overline{c} \rightarrow s\overline{d} = \overline{K}^0 \tag{11}$$

のような遷移があることを示している．この遷移は電荷など重要な量子数を保存するが $\overline{s} \rightarrow s$ の遷移で *strange* の量子数が反対になっている．この遷移確立は素粒子の標準模型によって計算でき理論は実験結果をよく再現している．式 (8) のような遷移が起こるということは K^0 と $\overline{K}^0$ を粒子として扱うよりも

$$\begin{aligned} K_+ &= \frac{1}{\sqrt{2}}(K^0 + \overline{K}^0) \\ K_- &= \frac{1}{\sqrt{2}}(K^0 - \overline{K}^0) \end{aligned} \tag{12}$$

の方が扱いやすい．なぜかと言うと **CP** が K^0 を反 K^0 に変化させると

$$\begin{aligned} \mathbf{CP}\ K^0 &= \overline{K}^0 \\ \mathbf{CP}\ \overline{K}^0 &= K^0 \end{aligned} \tag{13}$$

$$\mathbf{CP}K_+ = +K_+, \qquad \mathbf{CP}K_- = -K_- \tag{14}$$

なので K_+ と K_- の状態は **CP** の量子数 (±1) で分類される．(詳しいことは [1] を参照)

4.1 K_L と K_S

図1に $\pi^+-\pi^-$ の系を示した．この系を **C** そして **P** で変換すると図で示したように元にもどる．そして，

$$\mathbf{CP}\ \pi\pi = +\pi\pi \tag{15}$$

が示される．つまり $\pi\pi$ の状態は **CP** 量子数 $+$ である．もしこの世界が **CP** 対称性を保存するならば（**CP** 量子数が始状態と終状態と等しいならば）$\pi\pi$ の終状態に崩壊するのは K_+ のみである．つまり

$$K_+ \to 2\pi, \qquad K_- \not\to 2\pi. \tag{16}$$

である．この場合 K_- は **CP** 量子数が保存される限り，2π に崩壊できず，

$$K_- \to 3\pi. \tag{17}$$

に崩壊する．

この事実から K_+ と K_- の寿命は大きく違うことが予言できる．式 (16),(17) の終状態が持つ運動エネルギー－(M_K－終状態に含まれている粒子の質量の和) を計算してみよう。$M_K = 500MeV$, $m_\pi = 140MeV$(MeV = 10^6 Electron Volt) なので，$M_K - 3 \times m_\pi = 70MeV$，$M_K - 2 \times m_\pi = 210MeV$ である．$K \to \pi^+\pi^-$ の終状態の運動エネルギーは $K \to 3\pi$ の終状態の運動エネルギーよりも 3 倍も高く，位相空間も大きい．崩壊確立は位相空間に比例するので $K \to \pi^+\pi^-$ 崩壊確立は $K \to 3\pi$ に比べて大きい．従って K_+ と K_- の寿命は大きく違う。

$$\begin{aligned} \tau_S &= (0.8926 \pm 0.0012) \times 10^{-10}\ \mathrm{s} \\ \tau_L &= (5.15 \pm 0.04) \times 10^{-8}\ \mathrm{s}. \end{aligned} \tag{18}$$

両者の寿命 τ_S と τ_L は 600 倍も違う．ここでは寿命の違う 2 つの K 中間子 K_+ と K_- を K_S と K_L 呼ぶ．ラベル S と L は短い寿命（Short）と長い寿命（Long）からくる．

わたしたちも日常，位相空間の影響を受けている．車を駐車するときと駐車してある車を出すときと，どちらがより注意が必要か．それは入れるときである．車が入るときの位相空間は出るときの位相空間より小さいからである．位相空間が大きいと速く車が出せる．

この寿命の大きな比は自然のいたずらとしかいえない．ただただ，K 中間子の質量と π 中間子の質量の関係がこのような大きな比を生み出した．もし，π 中間子の質量が非常に小さいか無質量だったら，$\tau_L \sim \tau_S$ になり，次に書くような **CP** の破れの発見はなかったかもしれない．

1964 年，クローニンとフィッチは K_L 中間子が物質の中を飛ぶときに奇妙な現象がおこると発表された論文を見て，その結果の確認に取りかかっていた．陽子のビームが標的と衝突すると K^0 と $\overline{K}^0$ が生成される．これらの粒子が，真空を走るときは，K_L と K_S として走る．ただし，K_S は寿命が短いので素早く崩壊し，ちょっと時間がたつと，K_L しか残らない．彼らは K_L が 2 個の π 中間子に崩壊することを発見した．

$$\frac{\text{確率}\ (K_L \to \pi\pi)}{\text{確率}\ (K_S \to \pi\pi)} = 2 \times 10^{-3} \tag{19}$$

これが **CP** 非対称性の発見である [2]．K_S も K_L も **CP** 正の固有状態に崩壊することがこの実験で示された．**CP** の量子数が -1 の K_- が **CP** 量子数 $+1$ の 2π 状態に遷移することは自然が **CP** 量子数保存を無視することであり，この現象を **CP** 対称性を非保存という．

5 B 中間子について

当時 K 中間子の **CP** 対称性を破ることを説明する最有力候補は小林・益川模型であり，わたしの解析もこの模型にそったものであった．この模型では 6 個のクオークの存在を仮定している．1980 年には B 中間子が発見されていなかったと上で記したが，その後まず $b\bar{b}$ の結合状態が Lederman 氏らによって発見された．この状態の質量は約 $10GeV$ なので b クオークの質量は約 $5GeV$ であることが分かった．

5.1 B と K の関係

b クオークが存在すれば B 中間子が存在することが K 中間子と s クオークの関係から分かる．

$$\begin{pmatrix} K^+ \\ K^0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{s}u \\ \bar{s}d \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} B^+ \\ B^0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{b}u \\ \bar{b}d \end{pmatrix} \tag{20}$$

たんに s クォークを b クォークに置き換えただけで，B 中間子は K 中間子のコピーみたいなものだ．従って，K 中間子で観測された $K^0 - \overline{K}^0$ 振動や **CP** 対称性の破れなど，面白い物理現象が B 中間子でも期待される．

$K^0 - \overline{K}^0$ 振動の計算を経験しているわたしにとって $B^0 - \overline{B}^0$ 振動の計算など朝飯前だった．ではなぜわたしは $B^0 - \overline{B}^0$ 振動を予言出来なかったのだろうか．それは当時まだトップクォークが発見されていなかったからである．もちろんトップクォークの存在は仮定した．でも，その質量が与えられていなかった．ある実験結果ではトップクォークの質量は $50GeV$ 以下と発表されていた．わたしはこの間違った結果に惑わされた．

1996 年にトップクオークが発見されたが質量は $170GeV$ であり，振動確立はトップクオーク質量にその 4 乗で依

存するので, 私の計算はなんと $\left(\frac{170}{50}\right)^4 \sim 134$ もくるってしまった. このことはわたしの予言「15%以上の **CP** の破れ」が実は 70%であったことにつながる.

5.2 B と K の違うところ

B 中間子と K 中間子の質量は大きく違う. B は $5GeV$ で K はその 10 分の 1 だ. 質量が $500MeV$ しかない K 中間子にエネルギー保存で許されている崩壊は 2π か 3π だけである. 2π は **CP** 固有値が正であるから, **CP** が保存していれば K_L は 2π に崩壊できず, 3π の崩壊は位相空間が小さいので K_L は寿命が長い. さて, B の場合だが, 質量が $5GeV$ にもなると, 数多くの崩壊過程があり, 次式で示される 2 つの固有状態には K 中間子の崩壊に存在したような終状態の制限がない.

$$B_{\pm} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(B^0 \pm \overline{B}^0\right) \tag{21}$$

B_+ と B_- の寿命はほぼ同じである.

K 中間子の場合, 陽子を標的に入射すると K^0 と $\overline{K}^0$ が生成され, 待っていると K_S が崩壊して自然に K_L ビームができる. B 中間子の場合, このように簡単に固有状態を分けることができない. 後ほど述べるが, このことは大きな課題であり新しいデザインの加速器を設計することにつながる.

5.3 CP 対称性の破れはどこから

ここでは一般に **CP** 対称性が観測可能になる条件について簡単に述べる. B 中間子がある終状態 X に遷移するとき二つ異なった中間状態が存在するとしよう. この二つの遷移振幅を

$$\begin{aligned} &S(B \to C \to X) \\ &S(B \to D \to X) \end{aligned} \tag{22}$$

と表す. 崩壊を観測する場合, 中間状態は観測できず, 式 (22) に示した二つの崩壊振幅は区別がつかない. 量子力学の法則によると, 崩壊確立は式 (22) に示した二つの振幅の和の二乗に比例する.

$$\begin{aligned} \text{崩壊確立}\,(B \to X) &\propto |S(B \to C \to X) + S(B \to D \to X)|^2 \\ &= |S(B \to C \to X)|^2 + |S(B \to D \to X)|^2 \\ &+ 2\mathrm{Re}\left(S(B \to C \to X)S(B \to D \to X)^*\right) \end{aligned}$$

最後の項は二つの振幅が干渉することから生じる. 両者の位相が異なる場合この干渉項が存在すると

$$\text{崩壊確立}\,(B \to X) \neq \text{崩壊確立}\,(\overline{B} \to \overline{X}) \tag{23}$$

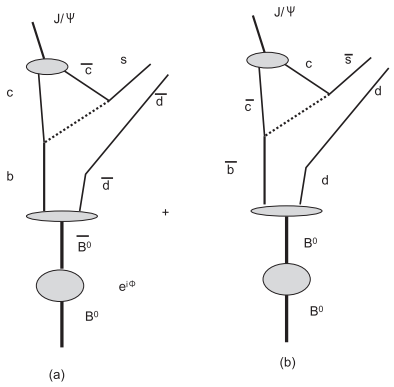


図 2:

B 中間子の崩壊と反 B 中間子の崩壊確立が異なることが示せる. わたしは $B^0 - \overline{B}^0$ 混合によってこの現象が観測できるのではないかと考えた. そして 2 つの位相が大きく違う図 2 を書き, この 2 つの振幅が干渉したら大きな **CP** の破れが生じることを予想した. しかし図 2(a) の終状態は $s\bar{d}$ で, 図 2(b) の場合は $d\bar{s}$. ふたつの異なる終状態は干渉しない. ここで, 行きづまり, 2 週間悩んだ.

丁度その時, わたしの恩師であるパイス先生がロックフェラー大学でセミナーをされた. そのセミナーはこのように始まった [1].

> 「今日私はあなた方に良いニュースと悪いニュースをお伝えします. まず良いニュースから. 重いクォークの系にも **CP** の破れは存在します. そして悪いニュース. やはり K 中間子の系と同じ様に **CP** の破れは小さいです. 」

わたしはそのセミナーが終わってがっくりときた. **CP** の破れの研究で世界に名がとどろくパイス先生が B 中間子系で **CP** の破れが小さいと言われたのだ. でも少し時間が経って気を取り戻した. いくら偉大な先輩だからといって全面的に信じる必要はない.

ある暑い夏の土曜日の午後, 試験監督をしながらノートを見ていたら急に気がついた. 実験家は $s\bar{d}$ や $d\bar{s}$ を観測するのではない. これらの状態は K_L と K_S で観測されるのだ.

計算した結果, 粒子と反粒子崩壊の非対称は [1]

$$a(t) = \frac{Br(\bar{B}(t)\to J/\psi K_S) - Br(B(t)\to J/\psi K_S)}{Br(\bar{B}(t)\to J/\psi K_S) + Br(B(t)\to J/\psi K_S)} = \sin(2\phi_1)\sin(\Delta m t) \quad (24)$$

であった. もし $B^0 \leftrightarrow \overline{B}^0$ の遷移が存在したら B^0 と $\overline{B}^0$ の状態は時間によって変化するので, $B(t)[\overline{B}(t)]$ は時間 $t=0$ の時, $B^0[\bar{B}^0]$ と示す. $\Delta m = M_- - M_+$ である ($M_\pm$ は $B_\pm$ 中間子の質量).

まず, ϕ_1 の位相が重要だ. 私の計算によると, ϕ_1 が大きくなるパラメターの領域は存在する. さらに, $B^0-\bar{B}^0$ 混合が無いと $\Delta m = 0$ なので, 混合が存在する必要がある. わたしはこの混合確立を理論的に計算した。

次の大きな課題は, どのようにして時間依存性を測るかである。これだけは実験家の技術に頼るしかない.

すぐに $B\to J/\psi K_S$ の崩壊過程の **CP** の破れについて当時ロックフェラーの研究員だったカーター氏と共著で論文を書いた. ただし, なにしろ $B^0-\overline{B}^0$ 混合が発見される 7 年も前なので, ある特定なパラメター領域では **CP** の破れが大きい可能性があるという予言であった.

20 年後振り返って見ると, 面白いもので, 広いパラメター領域の中で, 自然はなんと我々が論文で指摘した **CP** が大きくなるパラメター領域を選んでくれた. トップクォークの質量もわたしたちが考えていたよりずっと重く, 混合振幅もわたしたちが計算した結果よりも大きく, 現在ではほぼ 70%の **CP** の破れを予言する.

6　実験のデザイン

さて $B^0-\overline{B}^0$ 混合が 1987 年発見されたので, 7 年間眠っていた理論的提案にやっと実験家が興味を持ち始めた. 5.2 章で説明したように, B 中間子は K 中間子と違い, B_+ と B_- のビームを造るのは不可能である. まず式 (24) を見てみよう. この非対称性を測定するには $B(t)$ と $\overline{B}(t)$ のビームを造る必要がある.

我々は $B\overline{B}$ を生成するにあたり,

$$e^+e^- \to \text{エネルギー} \to \Upsilon(4S) \to B^0\overline{B}^0 \quad (25)$$

に着目した. まず B^0 と $\overline{B}^0$ を見分けるにはどうしたらよいか. ひとつの B^0 か $\overline{B}^0$ がレプトンを含んだ崩壊をしたとしよう.

$$\begin{aligned} B^0 &\to l^+\text{を含む状態} \\ \overline{B}^0 &\to l^-\text{を含む状態} \end{aligned} \quad (26)$$

K 中間子のときと同じように $B^0(\overline{B}^0)$ の崩壊で μ レプトンを含む場合, 必ず $\mu^+(\mu^-)$ である. そうすれば式 (26) にあるようにレプトンの電荷を観測することによって B^0 か $\overline{B}^0$ であるかを識別できる. 仮に, μ^- が時間 t に観測されたとしよう. そのとき 1 個の B 中間子は時間 t に $\overline{B}^0$ であったことが示された. ではこの瞬間, 観測されなかった方は B^0 か $\overline{B}^0$ か？これは $\Upsilon(4S)$ がスピン 1 で, B^0 と $\overline{B}^0$ が角運動量 1 の状態にあることから, もし時間 t に $\overline{B}^0$ が観測されたらペアーの相棒はその瞬間 B^0 であることが分かる.

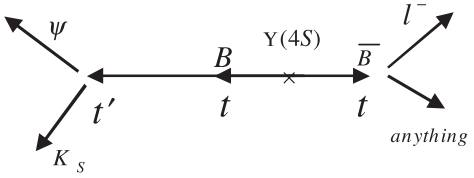


図 3: 時間 t で $\overline{B}^0 \to l^- + anything$　を観測した. 従ってその瞬間 B^0-$\overline{B}^0$ ペアーの相棒は B^0 である. この図では $B^0(t'-t)\to\psi K_S$ の崩壊が B^0 ビームの時間 $t'-t$ に測定された.

このように相棒が $\overline{B}^0$ であることを測定することによって $B(t)$ のビームを原理的には造ることができる.

さて時間 t に崩壊した相棒をどのようにして識別するのか？B 中間子は約 10^{-12} 秒で崩壊する. これは光でさえ 0.3mm しか飛ばず, B 中間子は 20 ミクロンぐらいしか飛ばない時間である. 今日の技術ではとうてい時間依存性を実験的に観測するのは不可能である.

この壁にぶつかり, 途方に暮れていたときの様子が『**CP** Violation』[1] に記述されているので紹介する.

> 非対称電子・陽電子加速器を建設するという気違いじみた案がブレーク・スルーとなった. 著者と P. Oddone が上記の困難を議論していたときに Odonne が発案した. もし $\Upsilon(4S)$ が飛んでいたら, B^0-$\overline{B}^0$ ペアーも飛ぶ. 例えば, 9 GeV の電子と 3 GeV の陽電子が衝突した場合, B^0-$\overline{B}^0$ ペアーは平均 200 ミクロン飛ぶ. 200 ミクロンは, 現在の技術で測定可能な距離である. この提案を我々は SLAC と KEK の加速器専門家に持っていった. たびたび門前払いをくらった. でも現在両研究所ではこの非対称加速器での実験が行われている.

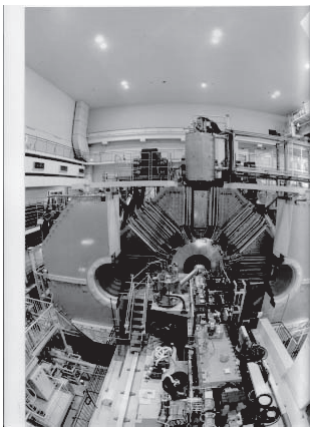


図 4: KEK で建設中の Belle 検出器. 検出器は 3 階建ての建物と同じ大きさで, よく見ると人間が小さく見える.

つまり今までの常識である同じエネルギーの電子と陽電子を加速して正面衝突させる加速器とちがい, 9 GeV の電子と 3 GeV の陽電子が衝突する非対称型加速器を提案した. そして, 1996 年に KEK と SLAC で非対称形 B 工場の建設が始まった. ここでオリンピックで言えば研究のマラソンが始まった.

7 結果

2001 年の 2 月に名古屋大学が主催し, 伊勢志摩で開催されたＢＣＰ４国際会議で実験の結果が発表された.

実を言うと SLAC の加速器は KEK の加速器より 6 ヶ月早くビームを出した. 発見は最初に測定したグループが全ての栄誉を受け, 2 番目に観測したグループの業績は発見を確認した業績のみである. ここで神様が統計の奇跡を行い, KEK のグループも SLAC のグループと同時に発見を発表することが出来た.

我々の業界で発見を発表するには、新しい現象のシグナルが測定のエラーより 4 倍大きいことが条件である。これが 4σ の発見と定義されている. つまり, 非対称 $a(t)$ を測ったと発表するとき $a(t)$ の測定誤差が $a(t)/4$ である必要がある. $a(t)$ が大きければ大きいほど大きな誤差でも 4σ を達成することが可能になり, 少ないエベント数（$B^0\overline{B}^0$ 対の数）でも 4σ の発見になるのだ. 初めての実験では統計が少なく, SLAC の実験結果は KEK の値の $a(t)$ 半分しかなかった. 従がって SLAC が発見を発表するには KEK で必要なエベント数の 4 倍必要であった. 現在 $a(t)$ は 5%の誤差で測られており, KEK が当初発表した値に近いところに落ち着いている. なぜ SLAC のグループの結果が統計の誤差内と言えども小さく出て発表が遅れたのか, いまだかって分からない. 神業としか言えないのである.

その後 5 年間 KEK と SLAC はいい意味で競争を続けた. 現在 KEK の加速器は SLAC の加速器の二倍のビームの強度をだしている. 米国の研究環境は厳しい. 世界で 2 位の研究グループには研究費を出さない. この研究を続けたいアメリカの研究者は日本に来るしかない.

今後の課題はこの観測から新しい物理を探求することである. ここでは説明しなかったが, そのような理論ができたら, クォークやレプトンの質量の起源が同時に分かるであろう. 逆に言うと, クォークやレプトンの質量の起源を理解しないかぎり **CP** の破れは理解できない.

過去には途方もない大きなチャレンジと考えられていたことが急に完全に解けるということがよくある. 同じようなブレーク・スルーが期待される.

CP 非対称性を理解することは宇宙の存在の理解につながる. より基本的な理論が発見されれば, 現在理解している宇宙よりさらに初期の宇宙を考えることが可能になる. このようにして我々は宇宙の歴史をどんどんさかのぼることができるであろう.

参考文献

[1] この論文は三田一郎 **CP** 非保存と時間反転 失われた反世界 岩波講座 物理の世界 2001 年に基づいています. 更に専門的なことは I. I. Bigi and A. I. Sanda *CP Violation* Cambridge University Press, (2000) に記されています.

[2] J. H. Christensen *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **13** 138 (1964).

[3] A. B. Carter and A. I. Sanda, *Phys. Rev.* **D23** 1567 (1981), I. I. Bigi and A. I. Sanda, *Nucl. Phys.* **B193** 85 (1981).

共同研究

マイクロ熱電発電素子に関する研究

山口　栄雄*　米田　征司**

Study on thermoelectric microdevices

Shigeo YAMAGUCHI*　Seiji YONEDA**

１．はじめに

日本は石油や天然ガスなどのエネルギーを海外から輸入しているが、この第一次供給エネルギーを燃焼により発電している。しかし、有効に利用しているエネルギーは全体の約３０％にすぎず、残りの７０％は大気中または水中に排熱として捨てられている。この膨大な排熱エネルギーの有効利用はエネルギーの残量問題、また、環境問題において重要課題の一つである。

一方、二酸化炭素あるいは放射性物質等を排出することなく、またタービン等の可動部無しで排熱を電気エネルギーに直接変換することのできる熱電発電は、エネルギー環境技術の中において、産業用から民生・家庭用まで、分散的に存在する排熱エネルギーを電力に変換する分散熱エネルギー有効利用技術と位置づけられている。第一次供給エネルギーの削減とそれにともなう CO_2 排出量の削減に直接貢献するため、その実現が期待される技術である。

*助教授　電子情報フロンティア学科
Associate　Professor,
Dept. of Electronics and Informatics Frontiers
**助手
Research Associate,
Dept. of Electronics and Informatics Frontiers

以上のことは従来から提唱されている用途であるがわれわれは、むしろ積極的な熱エネルギーの用途として、マイクロデバイスの電力源としての用途を究極的には実現したいと考えている。近年、ユビキタス社会に向け電気電子機器の小型化によるウエアラブル、インプランタブルといった実装可能な小型コンピュータなどが求められている。それらには電源力をどこから取るかという問題が生じてくるが、この場合、人間の体温を効率よく利用できればその問題も解決する。とくに、Ⅲ族窒化物は、発光ダイオードなので、すでに、デバイスプロセスが確立されているため、材料の効率増大に成功すれば、実現は容易であると考えられる。

ここで、熱電変換材料の性能指数は次式で表される。

$$ZT = \alpha^2 \sigma T / \kappa$$

ゼーベック係数（熱電能）α、電気伝導率 σ および、熱伝導率 κ に依存するが、前の二者を制御することは困難であるため、本研究課題では、熱伝導率の低減による変換効率を大幅に改善、すなわち、熱伝導率を材料の微視的構造から制御をおこない、具体的には、熱伝導率が熱拡散率、比熱、質量密度の三要素から構成されていることに着目し、とくに、熱拡散率を、アモルファス材料を用いることで低減化の実現を狙うと共に、高効率な薄膜のデバイス、

また回路に組み込み可能な小型化デバイスの作成を目的とする。

２．研究項目

①Ⅲ族窒化物半導体薄膜作製

(1)作製方法：反応性高周波スパッタ法

(2)使用原料：金属 Al,In,Ga、およびスパッタ用ガス：Ar,N_2

(3)SEM、XRD、評価型表面粗さ測定器による測定

②薄膜の熱電気的評価

(1)光交流法熱定数測定装置を用いた熱拡散率の測定

(2)光交流法熱定数測定装置を用いた比熱の測定

(3)高精度デジタル天秤による質量密度の測定

(4)熱直流法によりゼーベック係数の測定

(5)ホール効果による電気抵抗率の測定

(6)(1)～(3)により得られた測定値から、熱伝導率の値実験的に見積もる。さらに、(4)、(5)の実測値考慮して変換効率を見積もる。

③Ⅲ族窒化物半導体デバイスの試作

(1)　マスクパターンの作製

(2)　作製・使用原料は①に同じ

④デバイス出力特性(電圧・電力)の評価

(1)　熱電出力測定装置による電圧・電力出力測定

(2)　結果をふまえて、マスクパターンの考慮また薄膜作製の条件にフィードバックさせ、高効率化を目指す

３．実験結果

薄膜実験

アモルファス構造のⅢ族窒化物薄膜を作成することで、窒化物薄膜の熱伝導率を低減化させることを目的として、反応性高周波(RF)スパッタリング法を用いて成膜をおこなった薄膜(自立サンプル)を、光交流法熱定数測定装置を用いて熱拡散率、比熱の測定をおこない、実測による質量密度とから、熱伝導率の算出をおこなった。また電気特性の測定をおこない、熱伝導率とから熱電材料の変換効率を示す、無次元性能指数の算出をおこなった。

[薄膜作製法]

薄膜作製には反応性高周波(RF)スパッタリング法(図１)を用いた。成長基板温度 100[℃]、放電電力を 70[W]、ターゲットには Al、InN また、雰囲気ガスを Ar:N_2=5:5 で流入させ、酸化物作製の際には O_2 ガス流量を 0.01～0.5[sccm]として、石英ガラス基板上(SiO_2)に InN を主としたアモルファス構造のⅢ族窒化物(AlInN、InN)およびⅢ族酸窒化物薄膜(AlInON、InON))を各～100[μm]で成膜した。

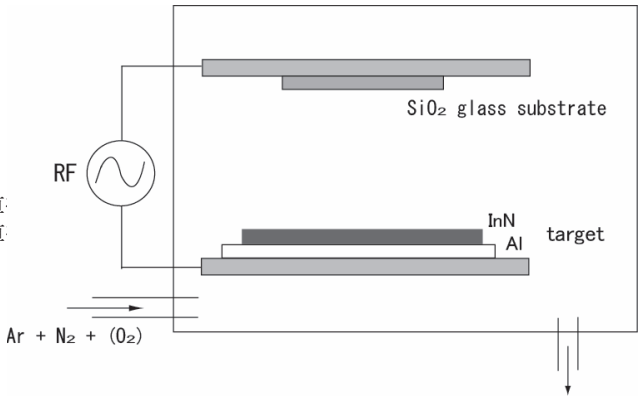


図１　RF スパッタリング装置概略図

[薄膜測定法]

ac カロリーメーター法を応用した光交流法熱定数測定装置 (図２) を用いて、成膜した InN、AlInN、InON 薄膜(各：～100[μm])の熱拡散率、比熱の測定をおこなう。窒化薄膜を基板より剥離し、ペースト剤(金ペースト)により熱電対(chromel－alumel)交差点に接着させてから、試料の受光面に表面が一様に黒くなるようにカーボンを塗布し、300–773[K]の範囲で熱拡散率、比熱の測定をおこない、実測による質量密度とから熱拡散率を算出する。

・熱拡散率測定

光交流法熱定数測定装置は ac カロリーメーター法を応用し、熱拡散率 D[m²/s]の測定をおこなう。薄膜(自立)の試料の片面に交流化された単位面積当たり振幅 Q の熱エネルギーを照射し、このとき反対側の面に取り付けられた熱電対で検出される交流温度 Tac は、試料面方向の移動距離 L の関数として次式で与えられる。

$$|Tac| = \frac{Q}{2(i\omega cd + 1/R)} \exp\left(-\frac{i\omega cd + 1/R}{Sd} L\right) \quad (1)$$

このとき、S は試料面方向の熱伝導率、R は試料と熱欲との熱抵抗である。

試料面方向の熱拡散長の逆数 K と、熱拡散率 D との関係式は

$$K = \sqrt{\pi f / D} \quad (2)$$

となる。ここで f は測定周波数(光源チョッパー周波数)である。

R と f を大きくする($\omega cdR \gg 1$)と（1）式は次のようになる。

$$Tac = \frac{Q}{2\omega cd} \exp -KL - i(KL + \sqrt{\pi/2}) \quad (3)$$

（3）式から明らかなように、距離Lにおける試料の交流温度 Tac の絶対値 $|Tac|$ は、$Q/2\omega cd = A$ とおくと、（1）式は次のようになる。

$$|Tac| = Ae^{-KR} \quad (4)$$

（4）式を変形すると次式となる。

$$Log\ (|Tac|) = LogA - KL \quad (5)$$

（5）式では、K は L を変数とする関数log $|Tac|$の勾配とから Kを求め、（2）式に代入して拡散率 Dを求めることができる。

・比熱測定

チョッパー周波数 fにおける受光吸収熱量に比例して試料温度が上昇する原理を利用して比熱値が既値である標準試料サンプル(Ni)との比較測定から未知サンプルの比熱 Cp[J/gK]を見積る。

理論的に、交流温度振幅 $|Tac|$ と比熱には以下の関係をもつ。

$$|Tac| = \frac{Q}{2\pi f\, Cp\, \rho\, d} \quad (6)$$

ここで、Qは吸収熱量、fは周波数、Cp は比熱、ρは密度、dは厚さである。

式(F)で吸収熱量 Q と周波数 fを一定にすると、Cp、ρ、d、$|Tac|$ が一定になることがわかる。この関係より、単位面積当たりの比熱 $Cp\rho$を比較法で測定できる。

$$Cp\,\rho_S = \frac{Cp\,\rho_R \cdot d_R \cdot |Tac|_R}{d_S \cdot |Tac|_S} \quad (7)$$

ここで、$_R$は標準試料につて、$_S$は未知試料についてである。

標準試料の比熱、厚さ、未知試料の厚さおよび、それぞれの交流温度幅を測定し、式(7)より未知試料の比熱を求めることができる。

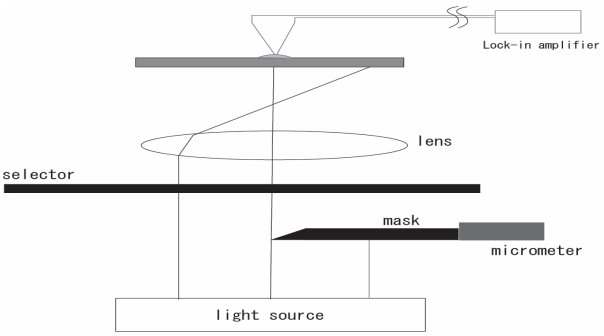


図２　光交流法熱定数測定装置概略図

・質量密度測定

実測（質量測定：高精度デジタル天秤、高性能膜圧測定：評価型表面粗さ測定器、膜面積：実測）による質量密度 δ[g/cm³]の測定をおこなった。

・熱伝導率の算出

上記で求めた、熱拡散率 D、比熱 Cp、質量密度δから熱伝導率 k[W/mK]を

$$k = DCp\delta \quad (8)$$

の関係式より求める。

［薄膜測定結果］

・熱拡散率測定結果（測定周波数 1Hz）

光交流法による移動距離 L における In｜Tac｜の値を図３に示す。図３の勾配より式（２）を用いて算出した熱拡散率 D と温度との関係を図４に示す。

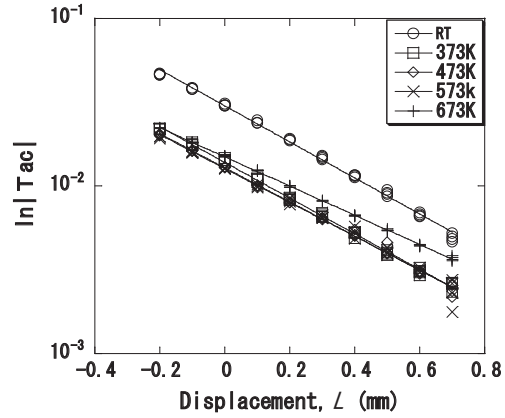


図３　InN 移動距離と振幅信号

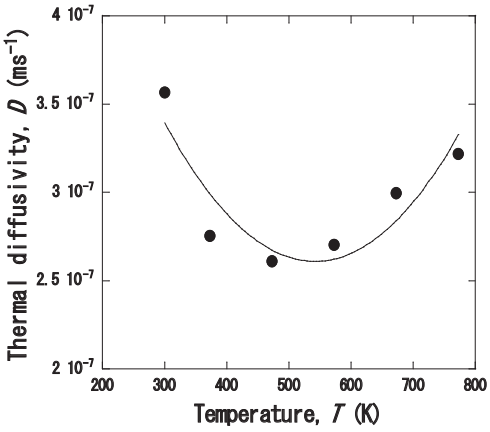
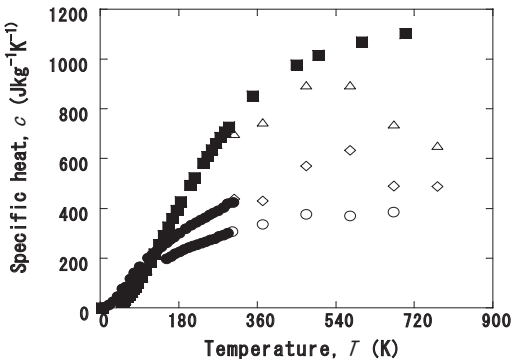


図４　InN 熱拡散率の温度依存

・比熱測定結果

InN 薄膜では、膜を粉末にし、DSC(Differential Scanning Calorimetry)法により比熱測定をおこない、光交流法(ac)での測定との比較をおこなった。なお、光交流法では、測定周波数 0.5、0.7、1.0Hz での平均値を、測定感度「200」での値になるよう計算した。実測による $Al_{0.35}In_{0.65}N$ 薄膜の膜圧 31μm、質量密度 4.80[g/cm^3]であった。実測による $InO_{0.82}N_{0.86}$ 薄膜の膜圧 37μm であった。これらから求めた InN、AlInN、InON の比熱測定結果を図５に示す。実測による InN 薄膜の膜圧 98μm、質量密度 5.78[g/cm^3]であった。



Close circles：文献値(■：AlN、◆：GaN)
Open circles：測定値(△：InON、◇：AlInN、●：InN-DSC、○：InN)

図５．文献値による比熱と測定値

・熱伝導率算出結果

各薄膜各測定データ、および式（8）より算出し、熱伝導率の温度依存特性をそれぞれ示す。熱伝導率には、測定精度を６％の error bar を付けて表してある。

・InN 薄膜

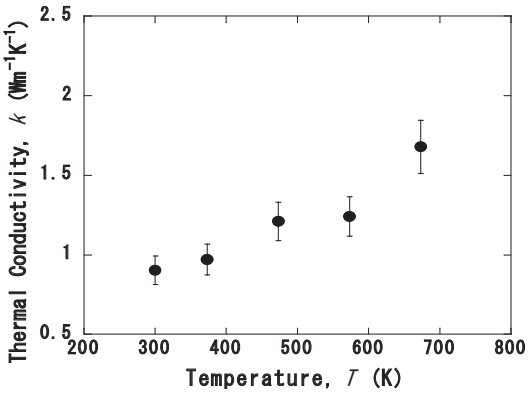


図６　InN 熱伝導率の温度依存特性

われわれの成膜したアモルファス構造 InN 薄膜、373[K]での熱伝導率 0.97[W/mK]は、報告されているバルクの値 80±20[W/mK]に比べ、２桁程の低減が確認できた。測定した単位面積当たりの比熱は、バルクの値とほぼ同じであることから、アモルファス構造にしたことで、熱拡散率が大幅に低減し、熱伝導率が低減していると考えられる。

・AlInN 薄膜

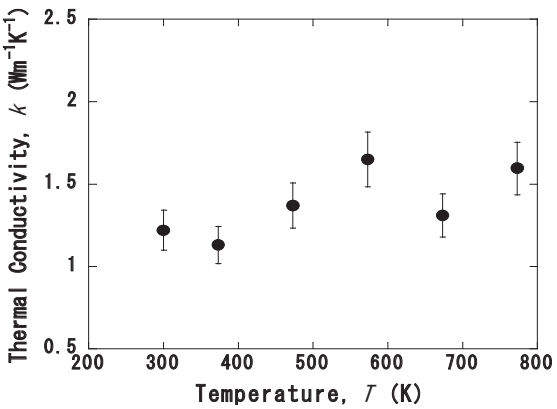


図７　$Al_{0.35}In_{0.65}N$ 熱伝導率の温度依存特性

われわれの成膜したアモルファス構造 AlInN 薄膜、373[K]での熱伝導率 1.06[W/mK]は、報告されているバルクの値 285[W/mK]に比べ、２桁以上の大幅な減少した値が得られた。これは InN 薄膜と同様のアモルファス構造化による減少だけではなく、混晶化による熱伝導率減少が一因と考えられる。

・電気特性測定結果

ゼーベック係数α の測定、ホール効果による電気抵抗率 ρ の測定をおこない、それらの結果より Power factor(出力因子)の算出をおこなった。算出をおこなった Power factor の温度依存を以下に示す。

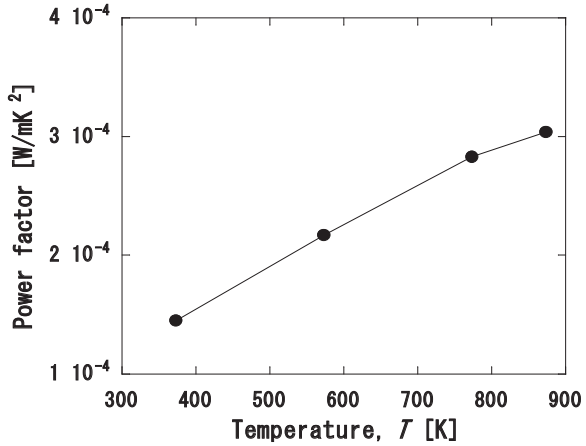


図８　InN 薄膜の電気特性

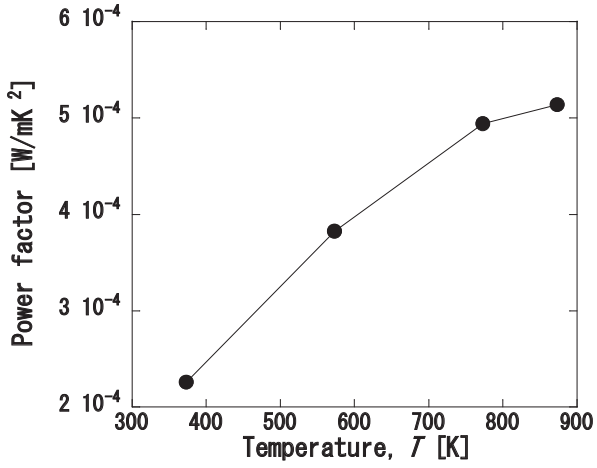


図９　AlInN 薄膜の電気特性

・*ZT*算出

上記で求めた電気特性$\sigma\alpha^2$と、熱伝導率κより、関係式

$$ZT = \alpha^2 \sigma T / \kappa$$

から熱電変換材料の変換効率を示す無次元性能指数*ZT*の算出をおこなった。それぞれの算出した値を表１、表２に示す。

表１　InN 薄膜の無次元性能指数

Temperature [K]	RT	373	473	573	673
Thermal conductivity [W/mK]	0.91	0.97	1.24	1.23	1.74
Power factor		1.45E−04		2.17E−04	
ZT		0.06		0.10	

表２　AlInN 薄膜の無次元性能指数

Temperature [K]	RT	373	473	573	673
Thermal conductivity [W/mK]	1.17	1.06	1.29	1.54	1.23
Power factor		2.26E−04		3.83E−04	
ZT		0.08		0.14	

表の結果からもわかるように、373[K]にて0.02から0.08の値が得られた。これらの値は熱電変換効率として小さな値であるが、材料探索の初期値として遜色ないといえるだろう。

デバイス実験

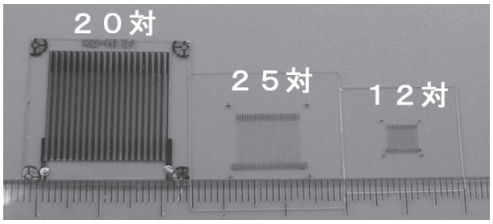
12、20、25、50 対の InN および AlInN 薄膜熱電変換デバイスの作製をおこなった。作製したデバイスを、熱電特性評価装置を用いて、両端に温度差ΔTを与え、各温度差での電流をパラメータとした出力電圧・電力の測定をおこなった。

［デバイス作製法］

薄膜作製と同様にスパッタリング法を用いて、石英ガラス基板（SiO_2）上、ポリイミド基板に薄膜熱電変換デバイス、各～２[μm]で成膜した。n 型(α<0)にはアモルファス構造の InN、AlInN 薄膜、また p(α>0)型には、chromel を用いた。後者は、スパッタリング法による p 型の窒化物薄膜の作製は非常に困難であることから使用した。

［作製したデバイス］

SiO_2基板上に作製したデバイスを図１０に示す。



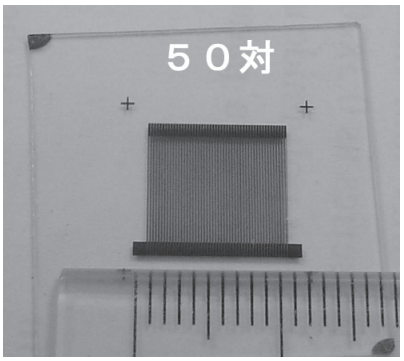


図１０　SiO_2基板上デバイス

［デバイス測定］

薄膜デバイスの両端を挟み込んだ状態で、一方のステンレスをヒーターにより高温(T_h)にし、もう一方は室温(T_c)約 300[K]の状態で、温度差ΔT (= T_h—T_c) を与え、各温度差で電流をパラメータとして、出力電圧(*V*)・電力(*P*)の測定をおこなった。それぞれの測定結果を以下に示す。

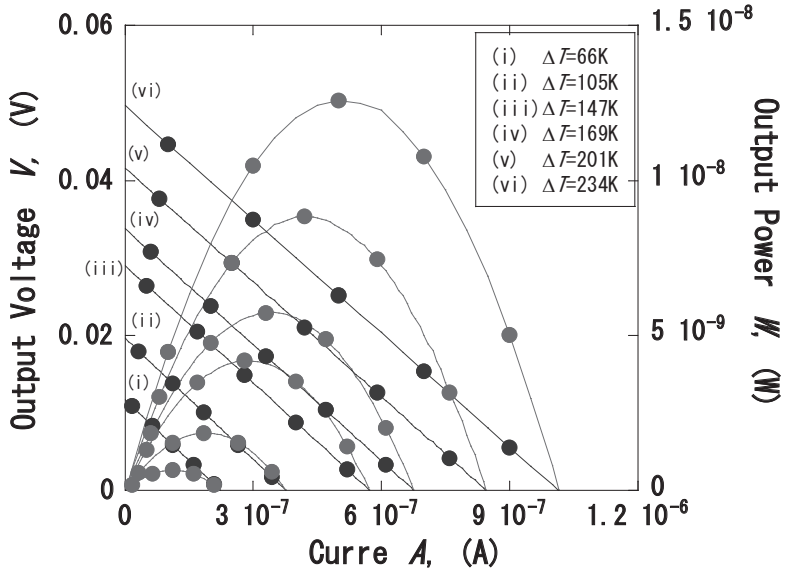


図１１　InN-chromel１２対各温度差での出力特性

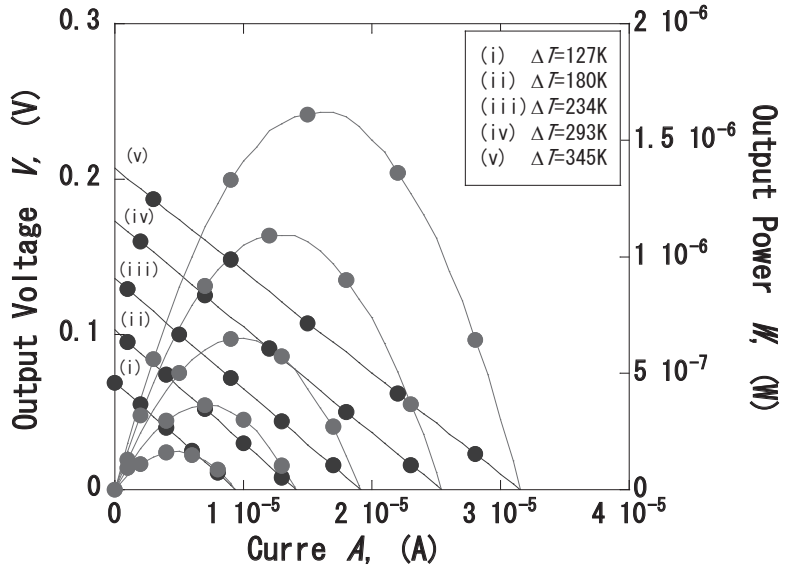


図１２　AlInN-chromel ２０対各温度差での出力特性

表３　各デバイスの出力特性

		12対 InN	20対 InN	20対 AlInN	25対 InN	50対 InN
ΔT≒100[K]	V_{op} [V]	0.02	0.06	0.07	0.05	0.01
	P_{max} [W]	19×10^{-10}	25×10^{-8}	17×10^{-8}	32×10^{-10}	0.8×10^{-10}
	R_{in} [kΩ]	54	3.2	6.5	145	1190

これらの結果より、２０対デバイスがもっとも大きな値が得られているが、２０対は他のデバイスに比べて対の幅が広く、デバイス総面積が大きいことから抵抗が最も低くなったと考えられる。また対が総面積に対してもっとも満であり、対の幅が狭い５０対は抵抗が非常に大きく、出力電圧・電力共に小さな値となった。

５．まとめ

成膜をおこなったアモルファス InN 薄膜の熱伝導率は、373[K]にて 0.97[W/mK]の値が得られた。この値は、報告されているバルク InN の 80±20[W/mK]と比べて、２桁程の低減が確認できた。またアモルファス AlInN 薄膜においても、373[K]にて 1.06[W/mK]の値が得られ、バルク AlInN の 285[W/mK]に比べ、２桁以上の大幅な減少した値が得られた。AlInN 薄膜に関しては、アモルファス構造化による減少のみならず、混晶による熱伝導率の減少も一因と考えられる。

６．参考文献

[1] R. Izaki, N. Kaiwa, M. Hoshino, and T. Yaginuma, S. Yamaguchi, and A. Yamamoto, Appl. Phys. Lett., 87, 2435080 (2005).

[2] S. Yamaguchi, T. Matsumoto, J. Yamazaki, N. Kaiwa, and A. Yamamoto, Appl. Phys. Lett., 87, 201902 (2005).

[3] S. Yamaguchi, R. Izaki, N. Kaiwa, and A. Yamamoto, Appl. Phys. Lett., 86, 252102 (2005).

共同研究

放射線高速計測システムの耐放射線性能向上のための研究開発

田村　忠久*　鳥居　祥二**　高柳　昌弘***　久保　信****

Research and development to improve resistance to radiation of a fast detector system measuring high energy particles and gamma-rays

Tadahisa TAMURA*　Shoji TORII**　Masahiro TAKAYANAGI***　Shin KUBO****

1．はじめに

現在、宇宙や地球大気圏で起こる高エネルギー粒子による宇宙線現象の解明を目指して、次世代の観測装置の開発を行っている。その一つは図 1 に示すように、電子やガンマ線といった宇宙線をスペースステーションなどの飛翔体を利用して検出することで、地球上では見ることも実現することも不可能な高いエネルギーまで超新星残骸などにおいて粒子が加速されるメカニズムや、そういった高エネルギーの粒子が宇宙空間を伝播してくる現象を解明するのが目的である[1][2][3]。もう一つは原子核も含めた宇宙を伝播してきた宇宙線が、地球大気突入後に大気と相互作用して、次から次に粒子を多重発生する宇宙線空気シャワーとよばれる超高エネルギーの現象を理解することを目的としている（図 2）。後者はスイスとフランスの国境に 2007 年に完成して世界最高エネルギーを達成する予定の粒子加速器 (CERN-LHC)を利用するビーム実験の計画である（図 3）。加速器で実現できるエネルギーは宇宙線の最高エネルギーよりもまだ 3 桁も低いが、詳細な研究が可能となるビーム実験では前人未踏の領域である。宇宙線空気シャワー現象と同じように相互

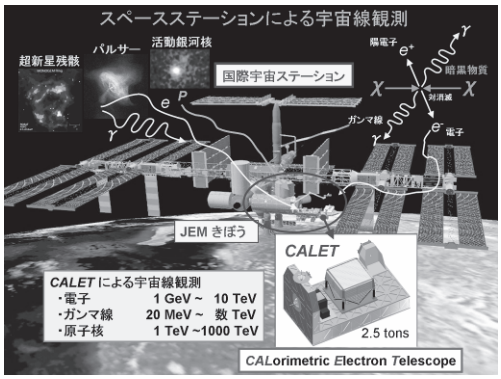


図 1　スペースステーションに 2.5 トンの宇宙線観測装置 CALET を搭載して高エネルギーの電子、ガンマ線、原子核の観測を行って、宇宙における高エネルギー現象の解明を目指す計画を提案している。

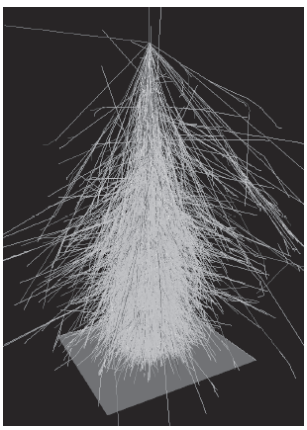


図 2　高エネルギーの宇宙線（陽子）が地球大気に突入した場合に起こすカスケードシャワー現象のシミュレーション。

*助教授　物理学教室
Associate Professor, Institute of Physics
**教授　早稲田大学理工学総合研究センター
Professor, Advanced Research Institute for Science and Engineering, Waseda University
***副主任研究員　宇宙航空研究開発機構（JAXA）
Japan Aerospace Exploration Agency
****技術部員　クリアパルス（株）
Clear Pulse Co.Ltd.

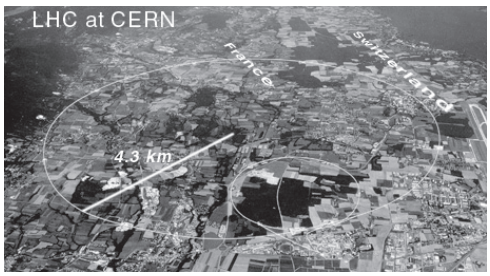


図 3　ジュネーブ近郊のスイスとフランスの国境にある欧州共同原子核研究所 CERN では、世界最高エネルギー（7 TeV）を実現する陽子陽子衝突型加速器 LHC の建設が行われている。半径 4.3 km の円周の地下 100 m にビームパイプが設置される。完成は 2007 年、本格的な実験の開始は 2008 年の予定になっている。写真は CERN のホームページ[4]より。

作用した粒子が最前方方向に散乱されてくる場所に、検出器を置いて研究を行うという、加速器実験でもユニークな手法である（図 4）。この LHCf 実験は 2006 年 9 月に CERN の LHC 委員会で正式実験として認められた。LHCf 実験は加速器施設で行うため、宇宙空間以上に放射線レベルの高い環境下に実験装置がさらされる。

どちらの放射線検出にも、我々は荷電粒子に反応して微弱な蛍光（シンチレーション光）を出すシンチレータを検出器として用いる。微弱な光を電気信号に変えて増幅するための光電子増倍管は放射線損傷に強く、その影響を考える必要はない。これに対して、光電子増倍管の信号を読み出すフロントエンド回路は省スペース化および省電力化のために VLSI 化を行う必要がある。VLSI は半導体チップであるため、宇宙空間や加速器施設での使用は放射線損傷に留意する必要が出てくる。それでも VLSI 化を行う理由は、まず宇宙空間における実験では興味のある高エネルギーの宇宙線ほど強度が弱くなるために大面積の装置が必要となり、結果として数万チャンネルの読み出し処理が要求されるからである。そして、加速器によるビーム実験では粒子の衝突点から最前方に飛び出してくる粒子を検出するために、ビームパイプの間にわずかに存在する狭いスペースに装置を置かなければならないためである。

光電子増倍管を読み出すための VLSI を使ったフロントエンド回路の開発は進んでいるが、次の段階として上述したような VLSI を含めた回路の耐放射線性能を向上させる開発が必要となっている。既に開発した VLSI を耐放射線性に優れたものに改良することが本研究の課題である。

図 5　シンチレーティングファイバー（1 mm 角）を横一列に並べたシートの断面。

2．シンチレーティングファイバー検出器

2．1　宇宙線観測用（CALET）

我々の開発した放射線検出器はシンチレーティングファイバーを採用している[5]。これは図 5 のような断面が 1 ㎜角のファイバーで、コア材にシンチレータが用いられている。このファイバーを横一列に並べてシート状にしたものを、鉛やタングステンといった物質量の大きな板と交互に積層したものが検出器となっている。スペースステーションに搭載する計画の検出器の概念図（断面）を図 6 に示した。

検出器に入射してきた高エネルギーの電子、ガンマ線、陽子、重粒子といった粒子は、鉛などの物質層で電磁相

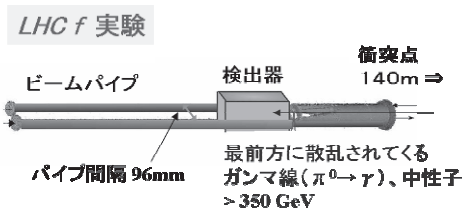


図 4　陽子は 2 本のビームパイプの中をそれぞれ反対方向に回り、衝突点付近では 1 本のビームパイプに合流する。衝突点から 140 m 離れたところにビームパイプの分岐点があり、その 96 mm の隙間に検出器を置くことで、衝突点から最前方に散乱してくる中性の粒子（ガンマ線、中性子）を測定することができる。

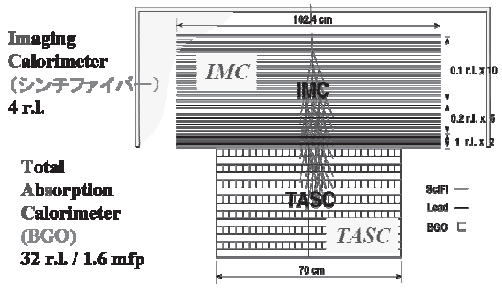


図 6　スペースステーションに搭載する計画の CALET の検出器の概念図。上部のシンチレーティングファイバーでできたイメージングカロリメータ（IMC）と、下部の BGO シンチレータを組んだ全吸収型カロリメータ（TASC）からなる。

図 7 およそ 3cm 角の受光面の中に 8×8 のマトリックス状に 64 チャンネル分のアノードを持った光電子増倍管（浜松ホトニクス）。出力端子はこの裏側にある。

互作用や核相互作用を起こして、二次粒子を多数発生する。この相互作用が繰り返されることによって、発生した粒子群があたかもシャワーのような形状になるため、この現象はカスケードシャワーと呼ばれている。図 2 に示した大気中でのカスケードシャワー現象と同じものが図 6 に示したように検出器内で起こる。カスケードシャワーのサイズは大気中では数 km であるが、検出器内では相互作用を起こす物質（鉛やタングステン）の密度が高いために数 10 cm となる。

シンチレーティングファイバーのシートはファイバーが XY 方向に直交するように重ねられて二層で一組と

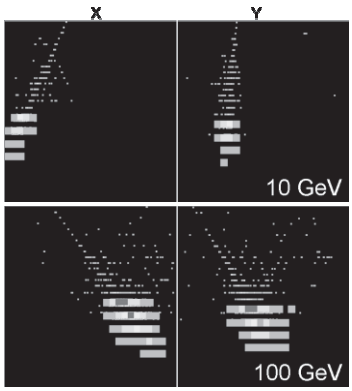


図 8　電子が CALET に入射したときに取得されるカスケードシャワーの XY 画像を、入射エネルギーが 10 GeV（上）、100 GeV（下）の場合についてシミュレーションした例。画像の上部はシンチレーティングファイバーによるイメージングカロリメータの画像で、一つの点が 1 mm 角のファイバー1 本に対応している。下部は断面が 2.5 cm 角の BGO による全吸収型カロリーメータの画像である。

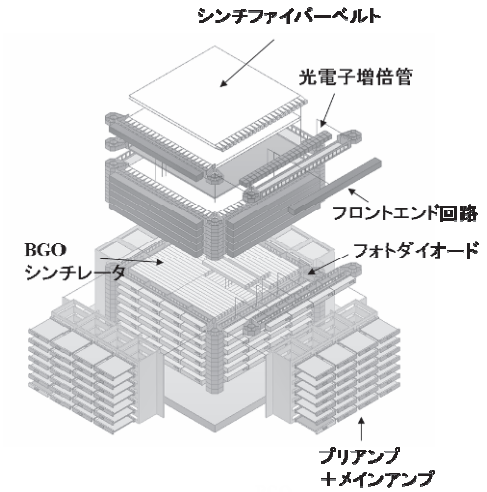


図 9　CALET の検出器の構成。上部、下部のいずれも信号処理のためのフロントエンド回路は検出器の側面に取り付ける。

なっている。そこをカスケードシャワー中の荷電粒子が通過するとシンチレーション光が発生し、その光がファイバー方向に伝播して光電子増倍管（図 7）の受光面に到達して電気信号に変換される。この信号を読み出すことによって粒子通過点の XY 位置が求まり、カスケードシャワーを XY 方向に投影して側面から捉えた図 8 のような画像が得られる。

スペースステーションにおいて高エネルギーの宇宙線（電子、ガンマ線、原子核）を観測する計画に用いる検出器（CALET）は、図 9 の上部のようにシンチレーティングファイバーが 1024 本並べられた幅約 1m のシートを XY の各方向にそれぞれ 18 枚使用して、合計 36864 本の

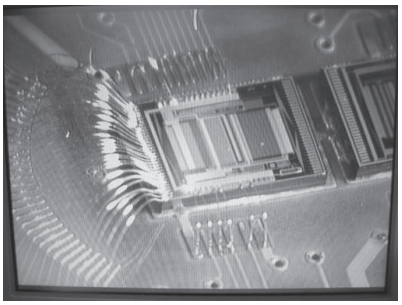


図 10　アナログ VLSI（VA32HDR14）。前置増幅器、波形整形増幅器、サンプルホールド回路の組を 32 チャンネル分、さらにサンプルホールドされた電圧を順次読み出すためのアナログマルチプレクサを内蔵。サイズは 4.375×3.330 mm^2。

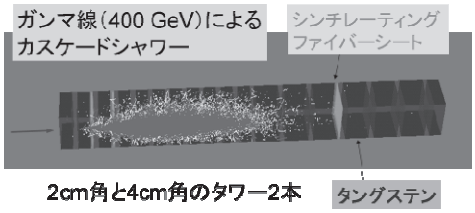


図11　CERN−LHC加速器を用いた最前方散乱粒子測定実験LHCfに用いる検出器に400 GeVのガンマ線が入射した場合のシミュレーション。タングステンとシンチレータを積層したタワー中でカスケードシャワーが発生する。途中に挿入されたシンチレーティングファイバーシートでカスケードシャワーの断面画像を取得する。

シンチーティングファイバーを用いる予定である。それぞれのファイバーからのシンチレーション光は光電子増倍管によって独立に電気信号に変換されて処理される。その際に必要な信号処理回路として、前置増幅器と波形整形増幅器とサンプルホールド回路を1組としたものが36864 チャンネル分必要になる。光電子増倍管からのアナログ信号を長く引き回すと雑音の要因となるため、検出器の直近で信号処理を行わなければならない。そのために32チャンネル分の信号処理を1チップに内蔵した図10のようなアナログVLSI（VA32HDR14）を開発し、検出器の直近で信号処理を行うフロントエンド回路を開発している。

2．2　ビーム実験用（LHCf）

CERN-LHCにおいて最前方に散乱される中性粒子（ガンマ線や中性子）を測定するLHCf実験にも、CALETで用いる検出器と同じ原理を利用している。このLHCfの検出器は図11に示したように、その断面が2 ㎝と 4cmの二種類、長さが30 ㎝弱のタワー状の構造になっており、CALET と比べると非常に小型である。粒子の位置を検出するシンチレーティングファイバーのシートは幅 2 cmのものが8枚、幅4 cmのものが8枚であるため、シンチレーティングファイバーは合計480本である。しかし、検出器の設置場所が96 ㎜幅と極端に狭いため、信号読み出しのための回路はやはり小型化する必要がある。そのため、当初はCALET 用に開発してきた VLSI を用いたフロントエンド回路の試作機を利用した。

3．フロントエンド回路

CALET 用フロントエンド回路として開発をした試作機は、図12のように1本の光電子増倍管に対して幅が3 cm弱の4枚の両面基板からなる。光電子増倍管の出力は64チャンネルであるので、それを処理する32チャンネルのアナログVLSI（VA32HDR14）が2チップ必要になる。VA32HDR14 からアナログマルチプレクサによって読み出されるアナログ信号は、即座に同じ基板上にマウントされた16bitのADCによってAD変換される。AD変換レートは最大250 kHzであるが、ノイズ等を考慮して100 kHz（1チャンネル当りの変換時間10 μ 秒）で使用している。マルチプレクサによるチャンネルの切り替えとAD変換のシーケンスは、デジタル回路を集結した別の2枚の基板にFPGAを搭載して制御している。図13は、4枚1組のフロントエンド回路の基板を光電子増倍管の受光面と反対側の出力端子に取り付けたところである。

ビーム実験に用いるLHCf用のフロントエンド回路にも、予備実験の段階では、このフロントエンド回路の試

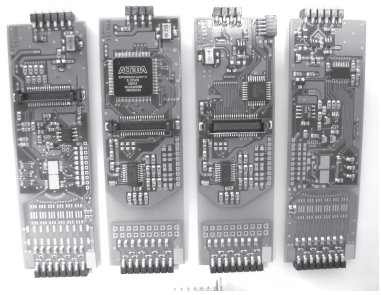


図 12　CALET 用に開発したフロンドエンド回路の試作機の基板。両脇の2枚のそれぞれにアナログVLSI（VA32HDR14）とADCが1チップずつマウントされ、AD変換までが行われる。中央の2枚はデジタル回路になっており、AD変換の制御及びバスラインとの通信制御を行う。

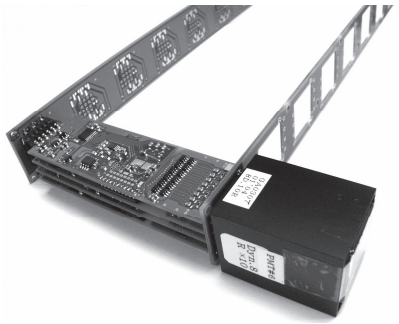


図 13　フロントエンド回路の基板を光電子増倍管の出力に取り付けたところ。反対側はデジタルデータ読み出しのためのバスとなっている。

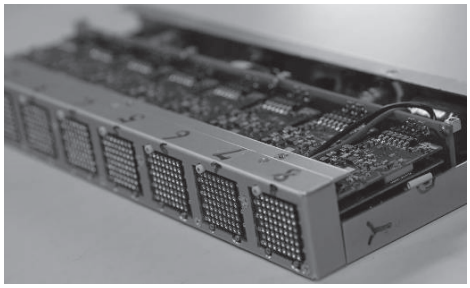


図 14　ビーム実験用に新規に製作したフロントエンド回路ユニット。光電子増倍管 8 本分（512 チャンネル）の読み出しができる。予備実験に用いたものより、高速化したのみならず、さらに小型化も行われた。

作機を用いた。これにより、非常にコンパクトな検出器を製作することができ、シンチレーティングファイバーと光電子増倍管を組み合わせた高速なイメージデータの収集装置が完成した。

この予備実験の結果をもとに、さらに改良を加えた LHCf の本番用の検出器の製作を行った。フロントエンド回路もビーム実験専用に使用するためのものを新規に製作し、高速化を施すと共に、できる限りの耐放射線性を考慮した部品選定を行った。まず、高速化のために ADC を高速なものに変更した。これによって 32 チャンネル分の AD 変換レートがそれまでの 5 倍の 500 kHz となった（最高は 1 MHz であるが、やはりノイズなどを考慮）。さらに、内部バスをパラレル化して、AD 変換されたデジタルデータの吸い上げ速度の高速化を図った。また、予備実験用に利用したフロントエンド回路は、数 cm ではあるが装置全体のケースに収まらなかったため、コネクタ位置の変更などによって、さらなる小型化を行った。図 14 が完成した 512 チャンネル分を読み出せるフ

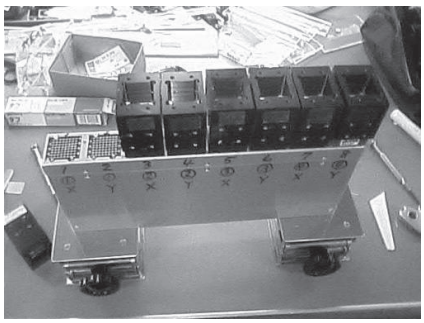


図 15　ビーム実験用フロントエンド回路ユニットに光電子増倍管を取り付けているところ。

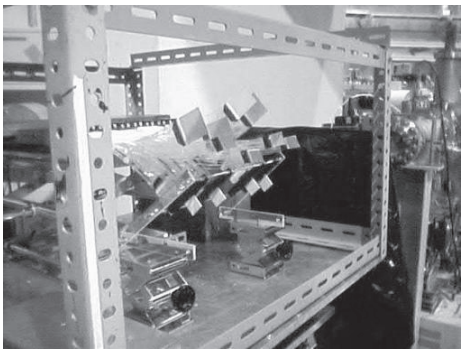


図 16　放射線医学研究所の重粒子イオン加速器（HIMAC）での 290 MeV/u の C ビーム照射実験。写真右にビーム出口となるビームパイプが見える。その下流のビームライン上にシンチレーティングファイバーのシートを設置した。

ロントエンド回路のユニットである。これに 6 本の光電子増倍管を取り付けている様子を図 15 に示す。光電子増倍管の受光面側にはファイバー束を取り付けるためのアダプタが取り付けてある。

4．ビーム実験

4．1　HIMAC での C ビーム照射実験

LHCf 実験の本番用に製作したシンチレーティングファイバーのシートを光電子増倍管に取り付け、それらを図 14、15 のフロントエンド回路ユニットで読み出すシステムを準備した。このシステムによるフロントエンド回路の読み出し試験と、480 チャンネルについてのチャン

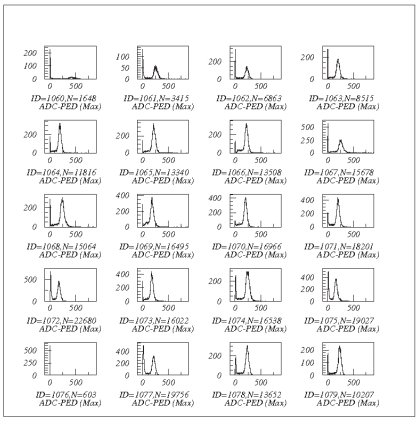


図 17　シンチレーティングファイバー20 本分の 290 MeV/u の C ビーム照射による発光量に対応する ADC 値の分布。横軸は ADC 値、縦軸は頻度。

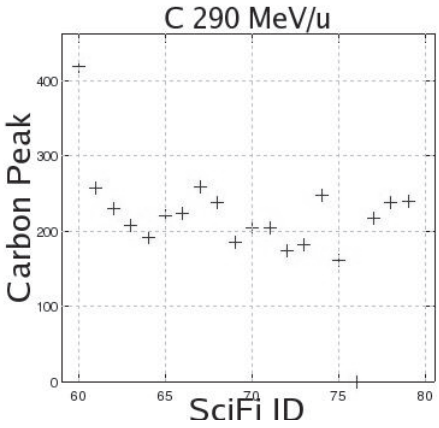


図 18　シンチレーティングファイバー20 チャンネル分（2 cm 幅の 1 シート分）について、横軸がシンチレーティングファイバーの番号で、縦軸が C ビームによる発光量に対応する ADC 値分布のピーク中心値。

ネルごとの総合ゲイン（シンチレーティングファイバーの発光量、集光効率、光電子増倍管の増幅率、VA32HDR14 内の増幅器の増幅率、ADC までを全て込みにしたもの）の測定を目的として、放射線医学総合研究所の重粒子イオン加速器（HIMAC）による 290 MeV/u の C（炭素）ビームの照射実験を行った。照射実験は 2006 年の 5 月 12 日 21 時から夜中も連続して 13 日 20 時まで行われた。

C ビームがシンチレーティングファイバーを通過するとエネルギー損失が起き、それに対応した発光が起こる。図 17 はその発光量に対応した ADC 値の分布である。こ

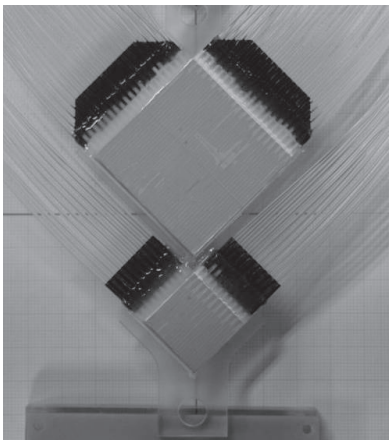


図 19　LHCf 実験のためのシンチレーティングファイバーのシートを直交する方向に 2 枚重ねてホルダーに固定したところ。上が 4 cm 角のタワー、下が 2 cm 角のタワーに対応する。

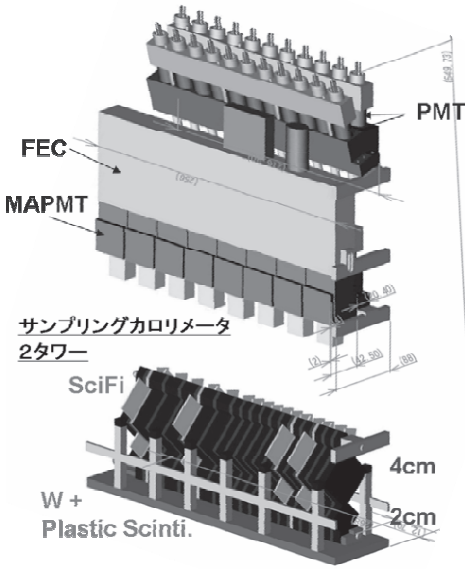


図 20　LHCf 実験用の検出器の概要。下部に 2 cm 角と 4 cm 角のタワー状の検出器がある。タワーはタングステンとプラスチックシンチレータを積層したもので、4 箇所にシンチレーティングファイバーシートが直交するように挿入されている。上部にはシンチレーション光検出のための光電子増倍管と読み出しのためのフロンエンド回路（FEC）がある。

の分布のピーク中心の ADC 値を求めることによって、チャンネルごとの総合ゲインのばらつきを相対的に補正することができる。図 18 は、2 cm 角タワーの検出器に用いられるシンチレーティングファイバー20 本（1 シート分）について、ピークの中心値を求めた結果である。ゲインが高いチャンネルが 1 チャンネルあるが、それ以外は 2 割程度のばらつきに収まっている。その他のチャンネルについても解析中である。

4．2　CERN-SPS でのビーム実験

HIMAC においてビーム実験を行って、シンチレーティングファイバー検出器用のデータ収集システムの動作を確認するとともに、基礎的なデータを取得することができた。続いてこのシンチレーティングファイバーを LHCf 実験用の検出器に組み込むために、図 19 のように、2 枚のシートが 4 cm 角タワーと 2 cm 角タワーの位置で直交するようにホルダーに固定した。これが図 20 に示したようにタワーの 4 箇所に挿入されている。

実際に組みあがった検出器が図 21 である。下部にある検出器タワーのプラスチックシンチレータとシンチレーティングファイバーシートを上部の光電子増倍管に光学

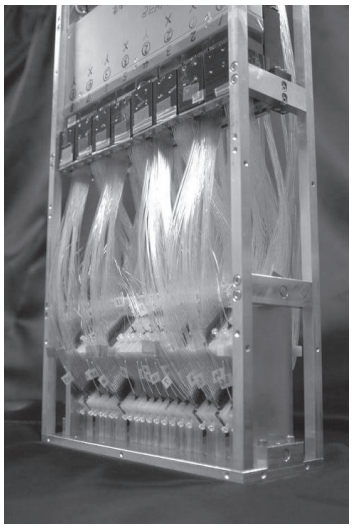


図 21　完成した LHCf 実験用検出器。下部の検出器タワーのプラスチックシンチレータとシンチレーティングファイバーシートは、オプティカルファイバーによって上部の光電子増倍管へと接続されている。

的に接続するために 1 mm 径のオプティカルファイバー（クリアファイバー）を使用している。検出器の寸法は高さ 620 mm、幅 92 mm、奥行き 280 mm と非常にコンパクトにまとまり、総重量は 15 kg である。

この検出器の性能試験を行うために、CERN-SPS 加速器を用いて、電子 100, 200 GeV/c、陽子 150, 350 GeV/c、μ 粒子 150 GeV/c のビームを照射する予備実験を 2006 年 8 月 28 日 8 時～9 月 4 日 8 時のマシンタイムで行った。図 22 は検出器を T2-H4 ビームラインのビームパイプの

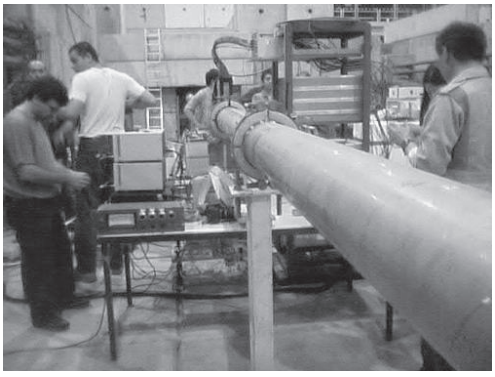


図 22　LHCf 実験用の検出器の性能試験を行うために、CERN-SPS 加速器を用いた予備実験を行った。電子（200 GeV/c）、陽子（350 GeV/c）、μ 粒子（150 GeV/c）ビームを照射するためのビームパイプの後方に検出器が設置されている。

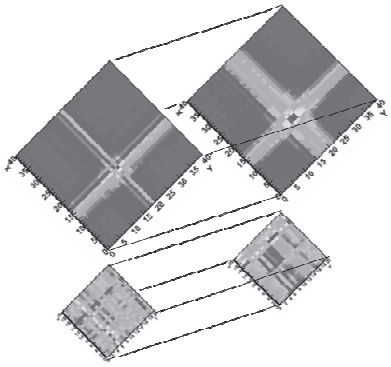


図 23　電子ビームが起こすカスケードシャワーの画像をシンチレーティングファイバー検出器によってとらえた例。上の 4 cm 角タワーへの入射で、前 2 箇所の XY シートでのシャワー中心が捉えられている（後ろ 2 箇所の XY シートは省略）。

後方に設置しているところである。総取得データは 350 万イベントで、現在解析を進めているところである。図 23 は 4 cm 角のタワーに 200 GeV/c の電子ビームを入射した場合に、4 箇所のシンチレーティングファイバー検出器のうち、前 2 箇所まででカスケードシャワーが発生して、その画像データを捉えている例である。画像データは XY へ投影したものが得られるので、図 23 では XY 方向それぞれの輝度を加えたものをその交点の輝度とすることで 2 次元的に表現している

５．新チップ

ここまでに述べたフロントエンド回路の開発は第一段階がほぼ完了した。この回路に用いた VLSI は 0.8 μ m プロセスで製造されたものである。これを 0.35 μ m プロセスのものに改良することで放射線損傷を受ける確率が下がる。さらなる本格的な耐放射線性能の向上には、VLSI の基板として埋め込み酸化膜の上に超薄膜シリコンを形成して回路素子を作る薄膜 SOI（Silicon On Insulator）技術を用いたものを採用することが挙げられる。これによって基板の厚み方向での放射線損傷の確率が劇的に下がる。但し、この薄膜 SOI 技術を取り入れるための開発費用は本研究の予算を上回るため、これは次段階以降の開発へ見送ることとする。

耐放射線性の改良の第一段階としてまずは 0.35 μ m プロセスを採用したチップの製作を行うことにした。VLSI の製造を行っている IDEAS 社（ノルウェー）において、我々の開発したフロントエンド回路用 VLSI（VA32HDR14）についても 0.35 μ m プロセスに合わせた改造を行って VA32HDR14.2 を製造した。これまでの

VLSI チップの開発はイタリアとの共同研究で行っている。VA32HDR14 は入力電荷として正負の両極に対応するが、我々は光電子増倍管からの信号が負電荷であるために、負入力に対してダイナミックレンジを最適化してある。これに対して、今回の VA32HDR14.2 の開発は、イタリアのシエナ大学で開発しているシリコン検出器に合わせて、正入力に対してダイナミックレンジを最適化したものとなっているため、負入力に対するダイナミックレンジが若干落ちている。しかし、今回の目的は 0.35 μm プロセスのチップの耐放射線性能を調べることであるので、ダイナミックレンジの最適化に関しては、今回のチップの性能試験後に、次段階の開発において考えることにした。

現在、放射線医学総合研究所の重粒子イオンビーム加速器（HIMAC）を用いて 6 MeV/u の He ビームを VA32HDR14 および VA32HDR14.2 に照射する実験の準備を進めている。この VA32HDR14.2 も VA32HDR14 用のフロントエンド回路基板に取り付ける。ビーム照射実験のためのマシンタイムは 2007 年 2 月 7 日、13 日の 2 回分が承認されている。この照射実験によって、トータルドーズの影響や SEU（Single Event Upset）などについて調べる予定である。

HIMAC でのビーム実験前に VA32HDR14.2 についてはノイズなどの基本性能の試験を行う。0.35 μm プロセスに変更することでノイズ特性も向上することが期待される。

６．今後の発展性

本研究で行う VLSI の 0.35 μm プロセスの採用や、その次の段階で計画している VLSI 基板の薄膜 SOI 技術は耐放射線性の向上のみならず、ノイズ特性の向上や、高速化、低消費電力化、高集積化が見込める。スペースでの宇宙線観測と最高エネルギーを達成する加速器でのビーム実験のために我々が開発している検出器は、プラスチックシンチレータの数 ns という短時間の蛍光を高速な光検出素子である光電子増倍管で読み出すが、現在の VLSI では増幅、波形整形などの処理に数 μs の時間がかかる。新たな VLSI の開発は、さらなる高速処理の可能性を開くことになる。また低消費電力化は特にスペースにおける実験の熱設計を容易なものとしてくれるので、非常に重要な要素となる。

このように本研究の放射線粒子検出器の読み出しシステムの耐放射線性を含めた性能の向上は、将来の大型予算による本格的な開発につながるものとなる。このような開発においては、高速かつ高精度な回路技術についての豊富な知識と経験が重要である。クリアパルス（株）は JAXA（宇宙航空研究開発機構）や KEK（高エネルギー加速器研究機構）などで放射線計測技術についての実績を積んで来た貴重な企業であり、既に我々のこれまでの VLSI 開発でもフロントエンド基板の設計製作などを担当している。スペースステーションでの宇宙線観測計画の実現に向けては、この計画のメンバーでもある JAXA の宇宙環境利用研究センターの高柳氏の協力を得ながら、JAXA が公募する予定の次期搭載機器に応募する準備を整えている。また CERN-LHC における加速器実験について、文科省の科研費（基盤 B）の助成を 2006 年度から 3 年間受けることになったが、これをもとにしてさらに大型科研費に応募していく予定である。本格的な開発段階での導入を予定している VLSI の薄膜 SOI 技術などについては、その技術力を持つ三菱重工業（株）の担当者と連絡を取っており、いつでも検討を進められるように準備している。

現在開発している放射線粒子検出器は、コンパクトかつ多チャンネルの高速データ収集が可能なので、いろいろな分野での精密な測定を可能にする。医療分野では例えば、陽電子・電子トモグラフィ（PET: Positron Electron Tomography、ポジトロン CT）に利用すれば、より多くのチャンネルを高速に読み出すことで、いっそう精度の高い X 線断層撮影画像が得られると期待される。また放射線測定を利用した電気泳動法による DNA 分析などにも応用可能で、多チャンネル化による精度の向上と、データ収集の高速化が期待できる。その他にも原子力施設などの放射線モニターや、放射線計測を利用した地質調査や資源探査への利用も考えられる。

参考文献

(1) 鳥居祥二, 槙野文命, “宇宙ステーションからの宇宙線観測”, 日本物理学会誌, **52-1,** (2001-1), p.8.

(2) S.Torii, et al., “The CALET, CALorimetric Electron Telescope, on ISS/JEM”, Nuclear Physics B, **134** (2004), p.23.

(3) S.Torii, et al., “The CALET, CALorimetric Electron Telescope, Mission for the International Space Station”, Nuclear Physics B, **113** (2003), p.103.

(4) http://www.cern.ch

(5) 田村忠久　他, “宇宙環境下におけるシンチファイバー検出器の実証化研究”, 工学研究所所報, 28 号 (2005－11), p.49.

共同研究

放射線医療・被曝そして宇宙ガンマ線観測にも有効なダイヤモンド・リコイル・テレスコープ(DCRT)の開発

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

Development of Diamond Compton Recoil Telescope

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

1. 緒言

ダイヤモンドはエネルギーバンドギャップが最も大きい半導体素材として知られ、様々な検討が行われているが、我々としてはこの素材を用いた放射線センサの開発を行っている。

センサとは物を測る、というある意味簡単な装置と考えられがちだが、完全なセンサを開発するには、多くの難題の解決が必要であり、そのハードルは他の電子デバイスを開発するより困難であることが多い。

その代表が「放射線センサ」であり、このセンサでは電子100個程度の揺らぎを測定するレベルが要求されている。

このダイヤモンド放射線センサが近い将来、完全に開発できれば電子工学関連の他のダイヤモンド・デバイス開発にも大いに役立つ結果が得られるだろう。この放射線センサ開発から得られる電子工学的な事項とは、半導体としてのキャリア(電子・正孔)のドリフト移動度、電子飽和速度、適切なショットキー電極やオーミック電極の製作といった、様々なダイヤモンド半導体素子開発で直面している性能である。

ところで、他のダイヤモンドセンサとしては、「紫外光だけに感ずるセンサ」、「圧力センサ」「温度センサ」等の物理的センサが考案されていると共に、ダイヤモンドが安定であることを利用した「超微量物質検出センサ」「ガスセンサ」などの特殊な応用も考えられている。我々の研究開発は、この様な他のダイヤモンドセンサ開発にも、影響を与えることになるだろう。

ダイヤモンドを用いたセンサは特殊な目的として使われていくことになるだろうが、今後多くの研究者が、様々な観点からダイヤモンド素材に対してアプローチしていくことで、この素材の有効性が明らかになっていくだろう。また、我々の行っているダイヤモンド放射線センサの製作もその一助になりたいと考えている。

2. ダイヤモンド・コンプトン・リコイル・テレスコープの発案

現在、ダイヤモンド・コンプトン・リコイル・テレスコープ(DCRT)を発案している。ダイヤモンドは原子番号が小さいため光電効果を起こしにくく、約10keVのエネルギーを超えたX・γ線に対して、ほとんどがコンプ

*専任講師 情報システム創成学科
Lecturer, Dept. of Information Systems Creation
**助教授 物理教室
Associate Professor, Physics
***助手 情報システム創成学科
Research Associate, Dept. of Information Systems Creation
****放射線医学総合研究所
National Institute of Radiological Sciences
*****宇宙航空開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency
******東邦大学
Department of Physics, Toho Univ.
*******学校法人工学院大学
The Special Engineering College of Kogakuin
********学校神奈川県立向の岡工業高校
Mukainooka Technical Highscool

トン散乱を引き起こす素材である。

例えばダイヤモンド検出器を数枚重ね、X・γ線を入射させると散乱を続けていくことになり、最終的にエネルギーが低くなった時点で全エネルギーが吸収されることになる。この性質を利用してやると、X・γ線の入射方向と共に、入射粒子の全エネルギーを決定することができる。

現在のシミュレーションでは一つの 500keV のエネルギーを持ったγ線に対して0.5度程度の角度分解能(入射角度の決定精度)が得られている。また実際の測定としてエネルギー分解能(エネルギー決定精度)は、Si 検出器と同等な結果が得られている(後述)。

現在、医療現場は X 線や CT などの放射線装置が使用されているが、多量の放射線線量を照射しなければ鮮明な画像を得ることはできない。簡単には約 10 年間、X 線医療検査を受け続けた人は、1/1000 程度の確率で、放射線被曝からガンを生ずる、ということが話題になっている。

この DCRT という装置が実現化すれば、患者に対して約 1/100 程度に被曝線量を減らすことができるだけでなく、画像もより鮮明になると考えている。またこの DCRT は医療方面だけでなく、宇宙における X・γ線観測に関しても、今まで考えられていなかったような方向決定精度とエネルギー決定精度を持った観測を行うことができると考えている。本研究では、この DCRT の基礎研究を行っているのである。

そして DCRT のアイデアが実証されると、全世界でこの DCRT を用いた X 線検査や CT の装置が取り入れられ使用されることになるだろう。また、宇宙 X・γ線検出機器としても独壇場の計測機器になるだろう。

ところで、本研究で使用しているダイヤモンド素材は住友電工から購入しているが、実際のダイヤモンド検出器の製作は、情報システム創成学科(旧経営工学科)のクリンルームを使用している。現在、このクリンルームでは、DCRT の基礎研究を行うことができるような施設を備えており、これらを活用して研究を行っている。

この研究に関して、今まで様々な結果を得ることに成功している。特にエネルギー分解能(入射放射線のエネルギー決定精度)に関して、ダイヤモンド検出器の性能は、従来の Si 検出器に匹敵した性能を得ている。

現在、研究が不十分な点は、ダイヤモンド検出器に入射する X・γ線の入射位置を 100μ程度の位置分解能で決定できるかどうかを検証することにある。このため、ダイヤモンド検出器の電極を 100μm程度のストライプ電極に構成し、それぞれの電極にアンプを付け、位置分解能という観点でも十分な特性が得られることを確認したいと考えている。なお、この位置分解能を実験するためにマスクアライナーという装置を、科学技術研究費で購入済みであり、このための製作および検査を行う準備が出来ている。今後は様々な製作と検査を行う現状である。

ただし、実際に DCRT を元にした CT 装置等の製作には、アンプ系とコンピュータによる多チャンネルデータ取得システムを備えることが重要な問題である。このアンプ台数は、数 100 チャンネルが必要である。このためのシステムとして、CAMAC や VME というシステムを導入する予定であるが、予算としては数千万〜億が必要である。しかしこの様な金額は大学予算でまかなえる額では無く、外部の競争的資金の調達を行わなければならないと考えている。我々は今までに、科学技術研究費(B)(A)をこの研究のために頂いてきたが、本研究を達成するためには、さらに多くの資金を必要としている。

そのため、今からこの様な医療や宇宙での予算取得や応用を考えるべきと思い、特に放射線医療で日本の中枢をなす「放射線医学総合研究所」や、宇宙 X・γ線観測に関しては「宇宙航空開発機構(JAXA)」のメンバー等と共に共同研究を行っている。今後、これらの研究者と共同研究を行うと共に、各研究所での資金を獲得していくことを検討していきたいと考えている。

なお具体的には、数億円の資金が応募可能な JST などの計測関係のプロジェクト研究に関しても積極的に応募を考えているなど、今回の研究で得られる基礎データの結果を元に、様々な競争的予算申請へアプローチしていきたいと考えている。

3. ダイヤモンド放射線センサ開発の現在

前述した様に、ダイヤモンド放射線センサを開発することは、センサとして使用すると共に、ダイヤモンドの半導体としての性能を検査するということにおいても有効である。

半導体材料としての性能は、キャリア(電子・正孔)の挙動で決まる。これを明らかにするためにダイヤモンドセンサを構成し、放射線を入射させることによるキャリアの観測方法がある。放射線の使用は、電子工学分野には異質として考えられがちだが、この方法は実に 50 年以上前から様々な半導体のキャリアの測定に用いられてきた。そして以前より良質な人工ダイヤモンド素材が得られる様になってきた現在、ダイヤモンドセンサに対して、この様な研究が必要と考えている。

ところで、ダイヤモンドを用いたセンサ開発、特に放射線センサとしての開発は、1940 年代に「クリスタル・カウンター」という名前ではじめての研究が行われていた。しかし本格的な研究は 1970 年代頃に主に旧ソ連を中心とするグループによって行われ、固体センサとして代表的な Si 放射線センサとくらべて遜色の無い性能を持つ可能性があることが知られている。しかし、その当時用いられていた天然ダイヤモンドが、あまりにも高価であり、大面積で均一な結晶が得られない、という欠点から、有望であるにもかかわらず、研究は進まなかった。

その後、約 30 年を経過し、ある程度良好な人工ダイヤモンド素材が入手できるようになったことで、現在は様々なグループによってダイヤモンド放射線センサの開発が行われている。しかし、他のグループが扱っている材料は、大きな面積が得られる CVD 法を使用したものばかりである。また、この CVD を用いた放射線センサからは良好な結果は得られていない。

CVD という方法はある基板を高温中に置き、その上に炭素を積もらせて共有結合結晶を作っていく方法だが、ダイヤモンドと格子間距離が近い基板物質が見つからず、完全な単結晶を得ることは今のところ無理である。また、CVD ダイヤモンド結晶を用いた放射線センサでは、放射線入射によって発生した全ての電荷を集めることができず、放射線に対して応答があることが確かめられている程度である。

ところで、この様な発展途中の CVD ダイヤモンド材料に対する検査と、ダイヤモンドが本来持っている真の性能を測定することは別問題と考えている。大面積の CVD ダイヤモンドの放射線による検査を進めると共に、小さいながらもダイヤモンドが本来持っている真の性能検査を進めるべきである。その為には、現在結晶として最も良い品ができる、超高圧合成法によるⅡa ダイヤモンドを調べることが重要と思い、我々はこの素材に対する研究を行っている。

様々な研究がダイヤモンドに対して行われ、最終的にN型半導体が形成でき、大面積の製品が可能になったとしても、ダイヤモンド本来の半導体としての性能が他の半導体に勝っていなければ、ダイヤモンドに対する研究開発は、無意味なものになってしまう。

現在、様々な推測、およびシミュレーションからダイヤモンドは Si 半導体に対して利点があるからこそ開発が行われているが、現状では、その多くのデータが未確定である。我々の様に良好な結晶を持ったⅡa ダイヤモンドに於いて、真のダイヤモンドの半導体としての性能を出しておくことは、将来のダイヤモンド半導体産業が確立できるのかどうかという答えを出すことにつながっていくと考えられるだろう。

前にも述べた様に、特に半導体材料としては、キャリアの性質を明らかにすることが重要である。そしてこの目的の為に放射線を利用し、センサ開発を行うことは有効な方法と考えている。なぜなら、ダイヤモンド放射線センサ開発とは放射線が作り出した数100個程度の微少なキャリアの挙動を観察することができ、他のいかなる測定よりも詳細にキャリアの移動を観察することができるからである。

また、ショットキー、オーミック電極構造が完全であることがこの放射線センサには求められており、この点でも完全な放射線センサができれば、他のダイヤモンド半導体デバイスにも役に立つと考えている。

逆に言えば、放射線センサを作ることは半導体デバイスの中でも、おそらく最も難しいことであり、この放射線センサを製作することで、ダイヤモンドという材料が他のデバイスとしても有効かどうかが解ってくると考えている。

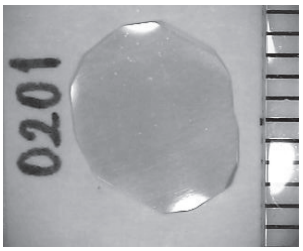


図1 使用している、超高圧合成法によるⅡaダイヤモンド（～9 mm × ～7 mm の面積で厚さは183 μm）

3．ダイヤモンド検出器の構成

まず購入したダイヤモンドを図１に示す。約 8mmφで、会社で 183μmt まで研磨を行ってもらっている。このダイヤモンドは超高圧合成法によるⅡa ダイヤモンドであり、現在この方法では、これ以上の大きさのダイヤモンドを製作することはかなり難しい。

入手したダイヤモンドは酸や有機洗浄を行い、高温処理などを行った後、ガラスエポキシの樹脂に糊で接着し、両側から、アルミ、Ti/Pt などの電極を真空蒸着法で着けている。

実際に構成したダイヤモンドセンサの側面断面図を図２に示す。正面から撮影したものを図３に示す。

ダイヤモンドはボロンがドープしてあるｐ型半導体である。またエネルギーバンドギャップが大きいため、ほ

とんどの金属とショットキー接触となる。また我々が製作しているセンサでは、真空蒸着によってアルミ着け、ダイヤモンドとショットキーバリアを形成している。

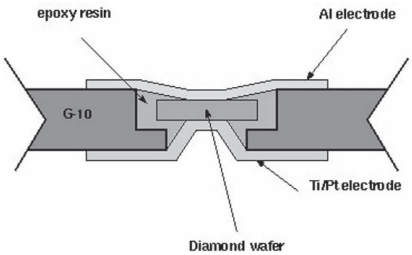


図2. ダイヤモンドセンサの側面断面図（G-10 のガラスエポキシ樹脂にダイヤモンドを糊付けしている。その上からアルミ電極を、例えば裏面は Ti/Pt 電極を真空蒸着によって着けている。(注)裏面の構造は本文中を参照)

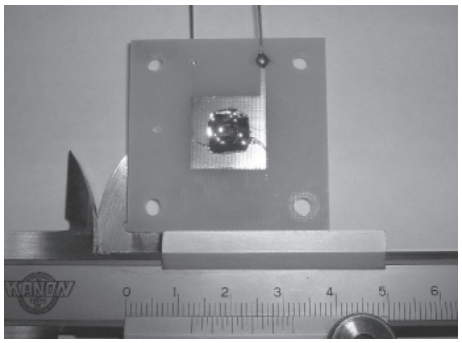


図３．ダイヤモンドセンサの正面写真

問題は裏面でありショットキー面に対して、オーミック接触になっていなければならない。単に裏面に Ti/Pt をつけることでも、ある程度のオーミック特性は得られるが完全ではない。他の方法では、ダイヤモンドに数100℃に熱を与えたうえで水素を流すことによって、表面に水素を着ける、という水素終端法や、ダイヤモンド表面に高濃度にボロンをドープしたエピタキシャル層を着けることでオーミック電極を得ることが有効であるとされていた。しかし、前者は実際に試してみたところ、完全なるオーミック接触には成らず、かつ後者も完全な電極は得られていない。

本研究ではこの難しいオーミック接触電極を DLC（Diamond Like Carbon）膜を使用することで可能であることを突き止めている。

この方法では、超高圧合成法のダイヤモンド基板の中心に DLC 膜を成長させ、約 800℃の高温炉の中で Ar(95%)+H(5%)を数時間流すことによって DLC の抵抗値が下がり、この上に金属を真空蒸着することで完全なオーミック接触電極が得られることが解ったのである。この方法は比較的簡単であり、汎用性という観点においても有益だろう。

ただし、この方法による DLC 膜は水素の影響で剥がれやすく、密着性に欠けている。そこで現在、図４に示す様に taC 膜を着けたオーミック接触の検討を行っている。この taC 膜は、水素終端処理を行った後も、密着性に優れ、かつ、オーミック膜が得られることがある程度は解ってきた状況である。

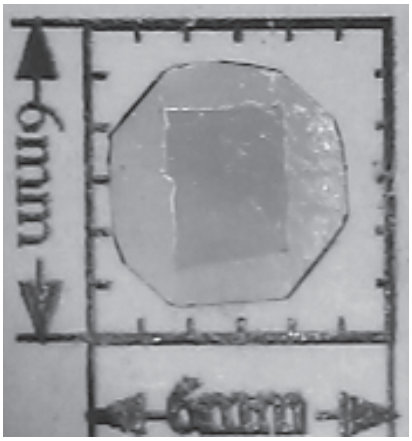


図 4. オーミック接触として taC 膜を使用した場合の写真（ダイヤモンドの中心に長方形に写っている物が taC 膜である。）

ただし、高温処理の方法は未解決な問題が多く、現在検討中である。

ところで、この taC 膜は別の観点が考えられる。現在この膜は島津製作所に依頼して着けているが、島津製作所では、直径 8inch φにも及ぶ taC 膜が出来ている。

また、この taC 膜は、今までの DLC に比べて良質なダイヤモンドを構成することができている。

ダイヤモンドの製作法として我々が用いている超高温高圧合成法以外に、CVD 法による製作法が考えられるが、さらに、この taC という全く新しいダイヤモンドをオーミック接触を得るための目的だけでなく、この素材を用いた大面積ダイヤモンド・センサが出来る可能性がある。

またこの taC 膜は、今まで機械的な特性はかなり検査されているが、キャリア（電子・正孔）がどの様な動きを

示すか、という電子工学的なアプローチは殆どなされていない現状である。我々は、この taC 膜を基に放射線センサを開発し、そのキャリアの動きを検査してみることを現在検討している。

もし、この taC 膜でのキャリアのドリフト移動度が大きいことが確認できれば、センサだけでなく、各種の大面積ダイヤモンド開発への大きな貢献がなされるだろう。

前述した様に、ドリフト移動度などの電気的特性は、他の方法より放射線を用いることで、より精度の高い測定ができる。また、こういった方法は、我々のみのグループでしか行うことができないと考えている。

4．漏れ電流の測定

ダイヤモンド放射線センサが製作された後、真っ先に行うテストは高電圧を印加した場合の逆方向漏れ電流の測定である。様々な洗浄、高温処理、糊の塗布、金属電極を着ける際にも、汚染に注意しながら作業を行っており、図５に示す様に実際に良好な漏れ電流の測定結果が得られている。

図 5 で明らかな様に、ダイヤモンドサンサに 1000[V] 以上の電圧を印加しても、漏れ電流は、数 p～10pA 程度しか流れないことがわかる。

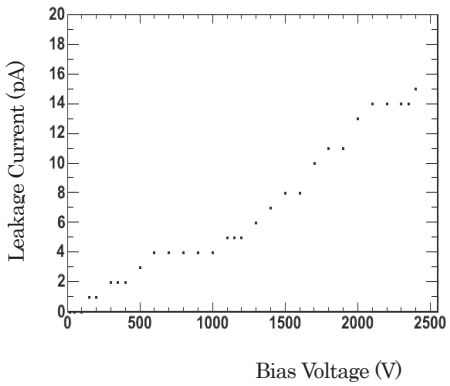


図 5. 高電圧を印加した場合の逆方向漏れ電流の値

例えばシリコンセンサの漏れ電流は良い場合でも数 10nA であることを考えると、1／1000 程度の良好な値である。この結果は、シリコンよりもダイヤモンドのエネルギーバンドギャップが 5 倍程度大きいことに依存している。シリコン検出器でも十分低温にしてやれば 1nA を下回ることが出来るのだが、ダイヤモンドでは、低温にしなくても、この様に低い漏れ電流値が得られるのである。

放射線センサにとって、この電流測定は重要である。この漏れ電流は直流的にセンサを流れる電流であり、ノイズ源になる。ダイヤモンドセンサは、この漏れ電流値が低いことで放射線を検出する際に、高エネルギー分解能を得ることができるのである。

5．α線によるダイヤモンドの測定

ＤＣＲＴを製作する予備実験として、α線による測定を行った。つまり製作されたダイヤモンドセンサが放射線センサとして、どの程度のエネルギー分解能（エネルギー決定精度）を得ることができるかどうかを実際に放射線を入射させて行ったのである。使用した線源は Am-241 から放出される 5.486MeV からなるα線である。

計測された結果を図６に示す。

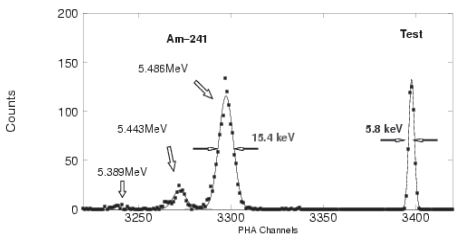


図 6. Am-241 から放出される 5.486MeV からなるα線を製作したダイヤモンドセンサに入射させた場合のエネルギー分解能

図を見て解る様に、5.486MeV の入射エネルギーに対して 15.4keV（FWHM）のエネルギー分解能が得られていることが解る。この値はシリコンセンサで測定された値にほぼ匹敵した良好な値である。また、Am-241 から放出されるエネルギーは 5.486MeV が圧倒的に多数であるが、少量ではあるが、５つのエネルギーを持ったα線も放出されている。図６では、そのうち３種類のエネルギーも検出されており、これもダイヤモンドセンサが良好に働いているということを意味している。

6．α線を測定する回路とキャリアの測定

半導体センサにおいて放射線を検出するには、センサに使用されている物質が、N型であるか、ｐ型であるかが重要である。また、センサは片面はショットキーバリア電極であり、もう片面はオーミック電極となっている

が、空乏層はショットキーバリア電極側から発生し、印加電圧を上げるにしたがってオーミック電極側に広がっていくことになる。

前述した様に、現在使用されているダイヤモンドは、超高圧合成法で作成された物であるが、ボロンが少量のこっているｐ型素材である。

ところで、ダイヤモンドでｎ型素材は現在までは製作されていない。通常、Si 等でｎ型半導体を製作するためにドープする物質であるＰ(リン)のエネルギー準位は、ダイヤモンドの場合は充満帯から上に 1.7eV あり、このリンでは、N型素材にはなり得ない。ダイヤモンドでｎ型となるドープ物質が見つかれば大発見である。つまり、現在世界中で様々な開発が行われているダイヤモンドは全てｐ型である。

このｐ型ダイヤモンドに対してアルミを真空蒸着してショットキーバリア電極を作り、アルミに向き合った電極には DLC 膜(または taC 膜)を着けた後、真空蒸着で金を蒸着する、というやりかたでオーミック電極を形成する方法を現在はとっているが、その構成を図７に示す。また、この図では同時にα線計測を行うための４種類の回路が示されている。

全ての図ではアルミ電極側にショットキーが形成され、印加電圧を上昇させるにしたがって空乏層(depletion layer)がオーミック電極である金(Au)電極側に向かって成長することが示されている。

ここで、α線はアルミ電極側から入射させるか、金電極側から入射させるかの２種類になっている。また、アンプをどちら側につなげるかも２種類になる。つまり、合計４種類の検出方法が考えられるのである。(注)この図の中で、放射線によって発生した電荷を捕らえる電荷有感型アンプは、Bias 側に設置してある。

また入射α線はダイヤモンドの中で ～13μｍ しか走れず、持っている全てのエネルギーをダイヤモンドセンサの表面付近だけに与えていることも考慮に入れて考えなければならない。

以下に、４種類の計測方法を述べることにずる。

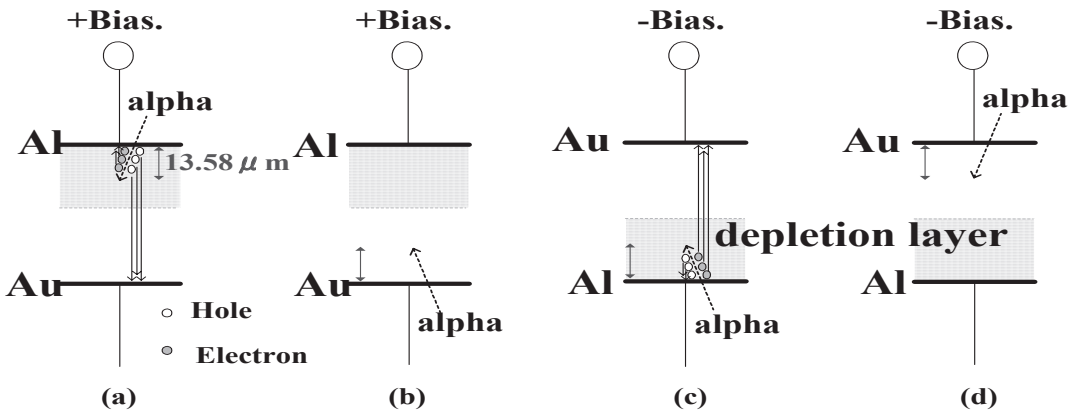


図7 ダイヤモンド放射線検出器でα線を測定する方法 (注) Bias 側に電荷有感型のアンプが接続されている

まず､図７(a)ではα線はショットキー接触であるアルミ電極側から入射され、与えられたエネルギーに比例した電子と正孔対が生じることになる。電子は+Bias 側に走り、正孔は逆の金電極側に向かって走ることになる。ここで注意しなければならないことは誘導電荷という問題である。普通に考えると、+Bias 側にアンプが着けられていることから、+Bias 側に走っていく電子だけが検出される様に思われがちだが、金電極側に走って行く正孔も考えなければならないのである。+Bias 側には、放射線入射によって発生した電子と正孔の両方の電荷が誘導されることになるのである。その両方の電荷を+Bias 側に着けた電荷有感型のアンプで測っているのである。

印加電圧を上昇させていった場合の飽和特性を図８に示す。図７(a)の回路の場合、低電場でもアルミ電極側はショットキー電極なので空乏層が作られており、入射させたα線の全電荷(つまりエネルギー)を測定することができている。

それに対して、図７(ｂ)の回路の場合は、低電場では電荷収集率が低いが、電圧を上げるに従って大きな値を持つことになる。この結果によって、アルミ電極側から

生じた放射線に有感な空乏層が金電極側に広がっていくにつれて、金電極側でもα線のエネルギーが徐々に検出されていくことが解る。ただし、電荷収集率が 100%にならないのは、印加電圧が不十分であると考えられる。

図７(C)の場合は、図７(a)と同じくショットキー電極を作っているアルミ電極側からα線を入射させ、今度は金側に-Bias を印加し、同時に電荷有感型アンプにつながれている。図7(d)は、図7(b)の場合と同じく、オーミック電極である金電極側からα線を入射させ、その入射に-Bias を印加している。

結果として図7(c)の飽和特性は、図7(a)と殆ど同じ特性を示し、また図7(d)の場合は、図7(b)と殆ど同じ飽和特性を示した。

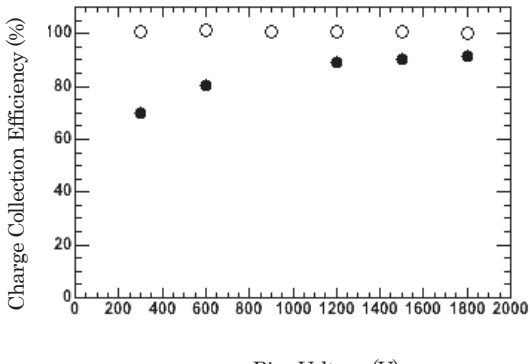


図8 ダイヤモンド検出器にα線を入射させた場合の印加電圧と電荷収集率の依存性 ○:図7(a)の回路で測定した場合、●:図7(b)の回路で測定した場合を示す。

図7(a)の場合は正孔が長い距離を走り、図7(c)の場合は電子が長い距離を走るが、両方の飽和特性が同じであったということは、正孔も電子もダイヤモンドの中をトラッピングせずに良好に移動しているということを示している。また図7(d)と図7(b)と同じであったことも、図7(a)と図7(c)が同じ特性を持っていたことと同じであり、電子、正孔が長い距離を移動できたことを示している。

通常、半導体シリコンセンサでは、以上と同じ良好な値を示すが、アモルファス・シリコンなどを用いたセンサでは、特に正孔の移動度が電子に比べて数桁も低く、センサとしては良好な結果を得ることができない。

この様なキャリアの移動度をμとし、電場をEとすれば、キャリアの平均ドリフト速度vは、

$$v = \mu E$$

で表すことができるが、移動度が低い場合には、キャリアのスピードが上がらず、格子欠陥などのトラッピングセンターにつかまってしまい、放射線で発生させた全電荷を検出することができない。

アモルファス・シリコンなどのセンサでは、この問題があり、電子のみを検出しなければならず、センサとして良好な性能を得ることはできない。

それに対して、ダイヤモンドセンサでは、以上の様に４つの回路で試した結果、電子・正孔の両方のキャリアが共に良好に移動することができるという結果を得ることができたのである。

7．α線によるダイヤモンドの品質調査

現在までに、α線によってダイヤモンドセンサのテストを行ってきたが、図６で示した様な良好な結果が得られない場合がある。図９はその様子を表している。

この図では、横軸に得られたエネルギー(ch)を示し、縦軸に各エネルギーである ch ごとにカウントされた値(counts/ch)によるヒストグラムを示している。

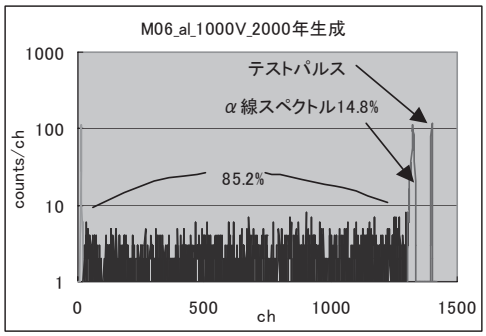


図9. 2000年に製作されたダイヤモンドを使用したセンサのα線入射テスト。きれいなピークを形成しているのは14.8%だけであり、あとの 85.2%はピークより下にでてしまっていることが解る。

この図９は2000年に住友電工で製作されたダイヤモンドを使用したセンサのα線入射テストである。見て解るとおり、きれいにα線スペクトルのピークを形成しているのは14.8%だけであり、あとの85.2%はピークより下にでてしまっていることが解る。

この結果は、入射させたα線がダイヤモンドの良好な

場所に当たった場合に発生した電子・正孔対は、きれいなピークを形成しているが、ダイヤモンドの中の格子欠陥やひずみがある場所にα線が入射された場合には発生したキャリアがそれらのトラッピングセンターに捕まってしまい、放射線によって発生した全ての電荷が検出できていないと考えられる。

2002 年に製作されたダイヤモンドに対して、同じ測定を行った場合を図 10 に示す。

この場合はきれいなα線スペクトルを示すピークは 80.1%もあり、2000 年に製作されたダイヤモンドセンサより良好であることが解る。

この様な結果は、ダイヤモンドセンサの開発と言うよりも、ダイヤモンド素材の善し悪しを表している結果である。つまりダイヤモンドセンサを製作し、α線を入射するテストを行うことは、ダイヤモンド素材の品質を評価できる、新しい方法であると考えられる。

また、2000 年に製作されたダイヤモンドより、2002 年に製作されたダイヤモンドのほうが、良好な値を示しているのは、年々ダイヤモンドを製作してる住友電工の技術が向上していると考えられる。

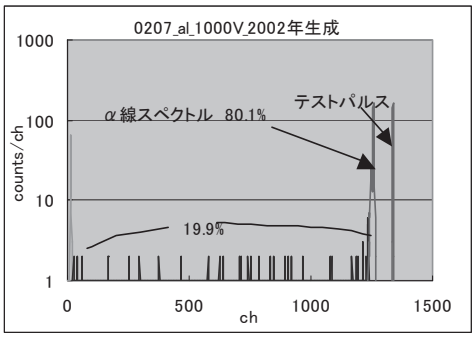


図10. 2002 年に製作されたダイヤモンドを使用したセンサのα線入射テスト。きれいなピークを形成しているのは 80.1%であり、あとの 19.9%はピークより下にでてしまっていることが解る。

8. まとめ

現在は、ダイヤモンド放射線センサに対して、本編で述べた様に、漏れ電流測定やα線による検査を行っている。またそれ以外に、放射線医学総合研究所において、鉄などの重粒子入射させた場合の測定も行い、その反応検査も行っている。

この様に多角的にこのセンサ調べ、最終的には、ダイヤモンド・リコイルテレスコープ(DCRT)を製作して行きたいと考えている。

参考文献

(1) 「Investigation of Basic Characteristics of Synthetic Diamond Radiation Detectors」IEEE-NS (in press)

随想

すばらしき先達に恵まれて

田島　守*

Have wonderful professors

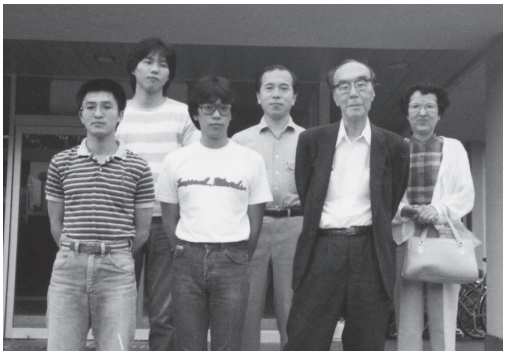
Mamoru TAJIMA*

出会い

昭和 42 年, 大学に勤めて最初に研究のお世話になったのは, 5 号館 133 号室･内燃機関研究室の古浜庄一先生(当時本学非常勤，武蔵工業大学教授，武蔵工業大学長)であった．当時，内燃機関の研究は盛んで，2 サイクルエンジンの熱負荷およびピストン温度，ディーゼルエンジンのアイドリングノック，4 サイクルエンジンのアルミニウムシリンダーの摩擦磨耗およびオイル消費量の測定，排気ガス分析などを 5 号館の研究室で実験を行っていた．特に，熱電対によるピストン温度測定の技術は，その後の研究に大いに役立った．稼動中のピストン温度を測定するのは至難の業であり,断線すること度々であった．写真は, 特殊なピストンリングを考案したロバート･ゲフロイ氏(フランス)が，実際に実験している様子を見学するために訪問した時のものである．中央に立っているのが古浜先生で，右方の 4 サイクルガソリンエンジンにそのピストンリングを取り付けて実験を行っていた．排気マニホルドが全負荷連続運転で真っ赤になり，特別に取り付けたブロワーで冷やしながらの実験であった．当時の測定データは，現在主流であるデジタルデータと異なり全てアナログで，データ収集後の解析に多くの時間を費やした．時々，卒業研究の打ち合わせのため武蔵工業大学の古浜研究室を訪問したが，研究室の広さおよび研究設備のすばらしさに驚かされた．古浜先生には短い期間であったが，内燃機関を通して，研究目的にかなった手作りによる実験器具の作製，実験の直接観察とデータ収集・解析および資料整理の重要性を教わった．

後列中央が古浜庄一先生，左がロバート･ゲフロイ氏
(5 号館 133 号室，内燃機関研究室)

私が材料の研究を開始したきっかけは, 昭和 50 年に恩師牧忠先生(名古屋大学名誉教授，日本機械学会副会長)が教授として本学に着任されたときである．当時私は，手作りの定容燃焼室装置により，様々な空燃比に対する燃焼温度および燃焼後のガス分析の測定を行っていた．牧先生に現在の研究状況を説明したところ，熱力学および伝熱の専門であり，さらに内燃機関などの燃焼に関しても専門であった先生は首を傾げられた．当然のことながら，定容燃焼室内は実験ごとに高温高圧となり，常に



牧忠先生と奥様　（富士見研修所玄関）

* 教授　機械工学科
Professor, Dept. of Mechanical Engineering

危険を伴っている．使用していた熱電対による燃焼温度の測定精度および分析ガス成分の少なさなどから，この研究を継続するには問題があると判断された．

そこで，牧先生は着任後すぐに，東京工業大学の片山功蔵先生(東京工業大学名誉教授，日本熱物性研究会会長)の研究室に私を連れて行き，今後のことを依頼された．海の物とも山の物ともつかない私を，心の広い片山先生は快く受け入れてくれました．その後，独りで片山先生の部屋へ伺ったとき，熱処理に関して研究してはどうかと進められた．さらに，君は大学に勤めているのだから，その分野を幅広く勉強しなければいけないと念を押された．次の日から，私の図書館(現 6 号館)通いが始まり，熱処理に関する論文の雑誌検索に明け暮れる毎日を送った．長い間，内燃機関の実験を通して，それに関する勉強をしていた私にとって大きな変化であった．過去の研究論文を調べていくうちに，熱処理の明らかにされていない分野がおぼろげに分かってきた．片山先生は，「私の指導は，先ず研究材料をまな板の上に載せることで，その先は本人の仕事であり，その進み具合を時々聞いて，手綱を上手にさばいて前に進めることである．」と語っていた．時折，ミーティングの後先生の部屋に呼ばれて，冷蔵庫の中の貴重な宝をご馳走になることもあった．先生は，難しい内容もとろりと溶けるような口調で説明してくださるのが常であった．

10 年の長きにわたり毎週午後，片山研究室のミーティングと院生の輪講に定期的に参加し，研究に対する先生の指導および討論を間近で経験することができた．この間，研究室の服部賢先生(長岡技術科学大学教授，長岡技術科学大学学長)および斎藤彬夫先生(東京工業大学教授)には，研究に関する様々な内容を丁寧に教えていただいた．もう一人の斉藤明宏先生(新潟工科大学教授)には，研究装置の設計や試料の作製および測定機器の選定など，ハードに関する内容を教えていただいた．

左から二人目が片山功蔵先生(右上顔写真)
(第 10 回日本熱物性研究会シンポジウム功労者表彰)

研究室の夏の合宿にも数回参加する機会があり，楽しき語らいの中にも貴重な経験を積むことができた．これらの経験は，その後の私の研究生活に計り知れない影響を与えた．

牧先生が本学に着任されて間もなく，一つのことを 10 年研究すれば物になると言われた．単純な私は，その言葉を素直に信じて片山研究室のミーティングに毎週参加し，熱処理の研究に邁進し，没頭していった．結果的には 10 年でかなわなかったが，13 年目に目標を達成することができた．牧先生および片山先生には，研究に関して，細部にわたって口出しすることは簡単であるが，忍耐強く待つことの大切さを教わった．故人となられた両先生にとって，最後にとんでもない不肖の弟子を持ったと，あちらで杯を交わしながら苦笑しているのではと何時も思っている．

鋼の焼入れ[1–7]

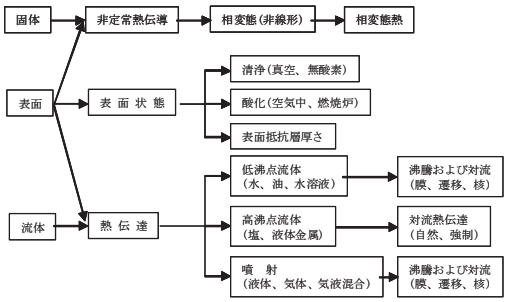
鋼は，強いという特徴を持っていることから，金属の中でもあらゆる分野に使われている重要な材料である．この鋼を熱処理することにより，硬くて強い性質あるいは粘り強い性質を付与することが可能となり，他の金属の追随を許さないものとなっている．加熱と冷却の組合せ操作による代表的な熱処理として，焼ならし，焼なまし，焼入れおよび焼戻しなどがある．これらは，いずれも固相内の相変態を巧みに利用して，その目的を達成しようとするものである．

熱処理を伝熱学的見地から眺めて，興味あるものは焼入れである．焼入れの目的は硬くすることおよび機械的性質の改良にあり，これらを達成するために高温に熱した鋼を急冷却しなければならない．急冷却により材料の表面と内部に大きな温度分布ができ，それに伴う焼入れ

前列左 2 人目からそれぞれ斉藤明宏先生，
服部賢先生，斎藤彬夫先生
(平成 12 年東京工業大学，熱科学研 OB 会，一部分拡大)

ひずみが発生し，また熱応力および変態応力に伴う残留応力も発生する．焼入れに伴うひずみや残留応力を予測しあるいはその軽減対策を立てるためには，焼入れ冷却曲線の予測が必要とされる．

焼入れの伝熱をまとめてみたのが以下の図である．材料内部では相変態を伴う非線形非定常熱伝導であり，表面と流体の間では熱伝達の複合伝熱であることが分かる．

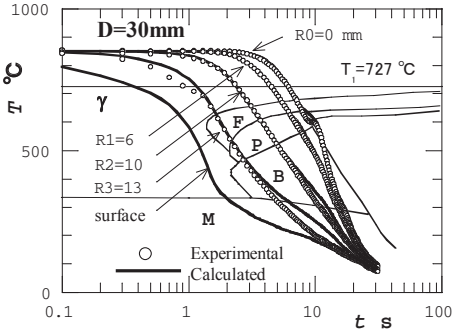


我々の年代は，電子計算機の目ざましい進歩と共に歩んできた．このため，従来解析できなかった現象が可能となり，この焼入れもその中の一つであり，国内外を問わず多数の人々によって研究がなされている．

軸や歯車などの鋼製部品の焼入れ冷却曲線を精度よく予測できるようにするためには，高温相と低温相との熱伝導率や比熱などの熱物性，相変態に伴って発生する潜熱，これらを熱伝導方程式の中にどのように組み込むかが重要である．文献の熱物性値は準平衡状態におけるものであり，鋼の場合相変態温度付近で比熱にピークが現れる．この過渡現象における相変態付近の熱物性利用の検討が，当時十分なされていなかった．

相変態に関しては，焼入れのような非常に早い冷却を必要とする場合の潜熱測定が現状の測定器では無理であることから，相変態熱の影響が顕著に現れる円柱試験片の中心に着目し，水焼入れ冷却曲線および冷却速度曲線を用いて相変態熱を求めた．得られた相変態熱を熱容量に含める見掛けの熱容量を使って非定常熱伝導の数値計算を行い，さらに文献の値と比較して定性的および定量的考察を行い，相変態熱に関する新しい考え方を示した．

境界条件として沸騰曲線を用いる場合がほとんどであるが，特に，水焼入れにおいて必要とされるサブクール度(水の飽和温度－水温)が大きい場合の沸騰曲線の文献値が不十分なため，その必要性が痛感された．そこで，試験片として熱伝導の良好な金および銀円柱を用いて，サブクール度 0－80Kまでの過渡プール沸騰曲線を求め，その特徴を明らかにした．さらに，直径の効果が良く調べられている水平円柱飽和膜沸騰熱伝達率を参考にして，測定で得られた沸騰曲線に直径の効果を組み入れたモデルを作成し，冷却曲線の数値解析と実験結果とを比較して良い一致を得ることができた．一例として，S45C 炭素鋼, 直径 30mm の水焼入れ冷却曲線の実験結果と数値解析との比較を図に示した．特に，相変態を伴う非線形部分が，良く表現されているのが特徴である．



金属材料の相変態熱[8–10]

その後，焼入れのような非常に早い冷却中の相変態熱の測定が現状の測定器では無理であることから，示差走査熱量計を用いて，加熱および冷却における相変態温度および相変態熱の測定を開始した．材料として，純鉄，炭素濃度 0. 1%から 4. 44%までの亜共析鋼と過共析鋼，鋳鉄，さらに、鉄および鋼の合金元素として重要なニッケル、クロム、モリブデンの各濃度を変化させた場合、および実用鋼合金などについて幅広くデータを収集し，基礎的な内容を報告してきた．

最後に，本文に登場しなかった多くの先達，機械工学科および工学部の諸先生方ならびに本学関係者に日々助けられて，今日を迎えることができたことを深く感謝し，紙面を借りて御礼申し上げる次第です．

主要な報告論文

1) 日本機械学会論文集，50-460,B(1984-12),3033-3040.
2) 日本機械学会論文集，53-495,B(1987-11),3383-3388.
3) 日本機械学会論文集，54-508,B(1988-12),3491-3496.
4) 日本機械学会論文集，54-508,B(1988-12),3497-3500.
5) 日本機械学会論文集，55-512,B(1989-4),1181-1187.
6) 日本機械学会論文集，56-529,B(1990-9),2774-2778.
7) 日本機械学会論文集，58-555,B(1992-11),3407-3412.
8) 熱処理，38-6 (1998-12),322-326.
9) 鉄と鋼，84-8 (1998-8),547-552.
10) 鉄と鋼，90-10 (2002-10),807-811.

随想

デザインの理論と実践

高橋志保彦*

The Theory and the Practice of Design

Shiohiko TAKAHASHI*

１．はじめに

私はこれまで、本学では教育・研究の場にいて、また社会では建築家として建築と都市デザインの分野で「理論と実践」を進めてきた。デザインにおいては「理論と実践」を、いかに切り離すことが出来ない関係にあるか、また、定年退職を機にいくらか過去を振り返ってみて、私の仕事を含め、随想として述べさせて頂く。

２．デザイン

「デザイン」には計画と意匠を併せ持つ意味がある。純粋芸術としての絵画はデザインではなくアートである。生産技術に関係して計画を立て意匠を行うのがデザインである。産業革命以来、機械が大量に物を生産するには、人々は何を求め、それがどう用いられるか、生産と消費を、また流通をも考慮して製品が生み出される。そこに「用と美」すなわち機能や形態と、材料、技術、それにコストをも含めた総合的な判断が求められる。今日では、数多くのデザインの領域や呼称が生まれており、それらはグラフィックデザイン、ファニチュアデザイン、プロダクトデザイン、テキスタイルデザイン、ランドスケープデザイン、インダストリアルデザイン、照明デザイン、インテリアデザイン、建築デザイン、都市デザイン等々である。日常生活はデザインに包まれており、身の回りには、本のデザイン、本箱のデザイン、椅子のデザイン、机のデザイン、パソコンのデザイン等々、ありとあらゆる生産品はデザインによってつくり出される。

現代ではデザインの中にアート性の強いものがもてはやされるし、アートとデザインの境も曖昧になっている。それに、もはやモノだけではなく、キャリアデザインとか、ライフサイクルデザインという行為や行動計画等、美意識をもって計画することにもデザインという語彙が用いられる。若い女性がよく言葉に発する「カワイイ！」もある種の美と心地よさの価値判断を示している。市民の中にこれほどデザイン意識が浸透してくれれば、デザインの質 quality が求められる。その価値の判断力を高めるとすれば、デザインのグレードを見定められる能力が必要とされる。そう考えると、大学の教育にもデザインに重きを置いた授業科目が多くあってよいし、デザイン学部があってよい。ハーバード大学にはデザイン学部大学院があり、都市計画、都市デザイン、建築、ランドスケープデザインのコースがある。私見だが、本学において、建築学部ないしはデザイン学部が新設され、建築、都市環境デザイン、都市・地域計画、インテリアデザイン、グラフィックデザイン、プロダクトデザイン、テキスタイルデザイン等の学科を擁するとすれば、時代の先端を行くことになり、多くの入学希望者が望めるに違いない。

３．デザインの理論と実践

建築と都市デザインに関して述べると、デザインは理論だけでは出来ない。絵が上手だからといって質の高い建築を創れるとは限らない。計画と意匠は車の両輪である。右脳で感性、左脳で理論を交互に往復してデザインを磨きだす。それに各人の嗜好と経験が加わり短い振幅の中に短時間に、能力によっては瞬時にその価値や良さが読み取れる。実践は当然理論的組み立てが必要であり、モノを造ってみてその理論を実証する。それで良かったか、悪かったかを自分で確かめる。満足できないときは

＊名誉教授
Professor Emeritus

次にはどうするかを考える。良いものが蓄積されてデザイナーの個性やアイデンティティが形成されていくことが多い。天賦の感性と、修練による蓄積によって、優れたデザイン能力が備わる。

以前、世界的に高名な建築家M氏が審査委員長を務める都市デザインの国際コンペ審査委員をしたときの話だが、M氏いわく「コンペは非情だね、何ヶ月も頑張って提出された作品も30秒で良し悪しが分かってしまう」。確かに、不思議なほどに一見してその作品のグレードはおおよそ見当がついてしまう。

デザイン能力を養うには書籍や文献を読むことと優れた建築を見ることである。学生には物事に接したとき、常に「なぜ・なるほど・それならば」を実行するよう繰り返し述べてきた。即ち「疑問→理解・合点→創造」である。そして、常にメモ帳をしのばせ、すぐメモる習慣をつけることを望んだ。建築学会主催のコンペにおける審査委員会で、いまや世界的に活躍する建築家A氏と審査を行ったとき、A氏はポケットから小さなメモ帳を取り出し、机の上に並べられた提出作品の良いところや自分に参考になるアイデアをメモっていた。「一流の建築家にしてここまでやるか」と感じ入ったことがある。

大学での授業では、デザインの理論と実践の話や、各種委員会に委員として出席して得たup to dateの最新情報を受講生に話してきた。学生も「理論と共に実際にはこういうところがキーポイントになる。社会システムにもこういう問題がある。クライアントと設計と施工の間にはこのような問題点が常に内在する。設計における諸々の諸問題がこれほど沢山あり、建築家の情熱と努力が必要だが、誠意を持って積極的にコトに当たればこのように解決する。」という話に目を輝かせる。

学生にとって、「建築が面白く、やりがいがあり、苦しみの中にも楽しさがある。」とモチベーションが高まるよう授業を行ってきた。何事もそうであるが、やる気になれば自己研鑽に弾みがつき、いつか花開く。

学外でも国土交通省の外郭である全国建設研修センターや道路環境研究所で毎年のように、「都市デザインの理論と実践」という講義を、国土交通省関連や地方自治体の若手技師や設計事務所員に向けて続けてきた。受講者に問題提起をして、共にわが国の美しい環境整備に尽力してもらいたく喜んで講義に参加してきた。

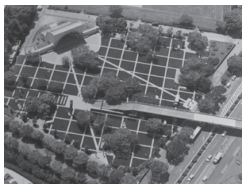
4．私の仕事・・・建築と都市デザイン／街づくり

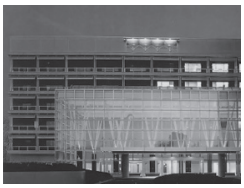
もとより私は建築家・都市デザイナーであり、建築作品では、今はない後楽園球場ジャンボスタンド、後楽園遊園地、横浜の金沢ハイテクセンター公共棟、大和駅ビル、代々木公園野外音楽堂、カルビー清原工場R&DDEセンター、ブレス／fitnessや数多くの住宅の設計。都市デザインでは、わが国のいくつかの都市の街づくりに参画し、作品をつくってきた。具体的には、各都市の調査・分析と基本計画や中心市街地の活性化策の立案、緑豊かな中心商店街のモール整備、広場や公園の設計である。

主たる作品例をあげると、北海道は**北見**(駅南口広場)、**旭川**（しあわせ銀座)、東北は、**仙台**（一番町モール)、関東は、**つくば研究学園都市**（中心市街地ストリートファニチュア)、**千葉ニュータウン**（タウンセンター・駅前広場)、**多摩ニュータウン**（唐木田地区整備、唐木田ガーデンロード)、**千葉**（千葉銀座、中央銀座)、**柏**（柏駅前通り)、**東金**（東口駅前通り)、**東京**（銀座西並木通り、銀座花椿通り、代々木公園野外音楽堂及び広場、武蔵境駅周辺整備、千歳烏山駅周辺整備、三軒茶屋商店街整備、東深沢エーダンモール、武蔵小山パルム、武蔵小金井中央銀座)、**横浜**（馬車道ガーデンストリート、吉田橋及び馬車道広場、開港広場、山下公園通り、山下公園整備基本計画及び海岸柵、本町通り、横浜国際競技場周辺整備、川辺公園及び帷子川プロムナード、菊名ウエストモール、天王町シルクロード）**横須賀**（中心市街地整備、京急久里浜駅前通り、どぶ板通り）**逗子**（逗子駅前広場)、**藤沢**（辻堂駅周辺商店街プロムナード整備)、**平塚**(中心市街地整備･紅谷パールロード･東海道本通り)、甲信越は**甲府**（中心市街地整備・春日モール・ペルメ桜町)、北陸は**富山**（富山ブールバール、多目的広場、平和通り整備)、関西は**神戸**（サンセットモール／ポートアイランド）中国では**南京**（建業区倉巷街ショッピングセンター基本設計）等である。

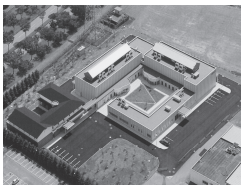
街づくりは昭和51年（1976）完成の「馬車道計画」が最初であったが、既存の道路を豊かな歩行者空間にするわが国最初の試みであったため、警察から「ベンチを置くのは道交法違反。歩道にタイルを貼ると学生が剥がして投げつける」と大変叱られた。それにもめげず知恵を絞ってその後のモール事業のモデルを創り上げた。海外での国際会議にも何度か招待されて発表し、建物の壁面後退の技法を含む日本のモール整備事業が賞賛された。

街づくりは大変根気のいる仕事で、多くの住民や商業者の意見を聞き、ワークショップを行い、行政との打合せ、警察や消防とのディベートもある。商店街では多種多様の商業者がいるので､時には利害の衝突conflict of interestsがある。行政においても関係局がいくつか絡むことが多い。都市デザインが「関係のデザイン」といわれる所以はここにある。商店街の仕事にはコンセンサスを形成することが最も大切だが、計画の当初は「賛成


代々木公園野外音楽堂


横浜金沢ハイテクセンター

鵠沼の家（自邸）


カルビー清原工場実験研究棟

馬車道ガーデンストリート

開港広場

山下公園通り

川辺公園・帷子川プロムナード

仙台一番町モール

平塚紅谷パールロード

３：中間６：反対１」のケースが殆どである。意見をまとめる大事なポイントは、「反対者の意見に耳を傾け、尊重する」ということである。非常な努力と忍耐が必要だが、これをしないと後々までギクシャクする。反対者の意見にはかなりの正論が含まれるケースが多い。それを理解し、共に受容と修正を重ね、反対から賛成に回ってもらう。それにはこちらが「公正、平等、寛容の精神」をもって情熱を傾けなければならない。

何事もそうであるが街づくりには熱意と創意が求められる。専門的には、都市計画・建築・シヴィックデザイン・ランドスケープデザイン・プロダクトデザインの総合的知識と設計能力が要求される。その上にアインシュタインが言うように「知識より構想力」が必要とされる。

ダンテは「神は田園をつくり、人は都市をつくる」と言った。私は「人は都市をつくり、都市は人をつくる」と考える。都市のアメニティ形成はユニバーサルデザイン、エコロジカルデザインを伴い、人間形成にとって大切な都市環境デザインである。幼児にはそれが原風景になり、心象風景になる。それは理屈を越えるものである。

５．社会活動

先に述べた審査委員会の他、思い出に残る審査委員会として、3〜5 年前 BELCA（ベルカ）賞（建築・設備維持保全協会）や BCS 賞（建築業協会）の審査員を任命された。BELCA 賞には、築後 30 年以上大切に利用されメンテナンスの良好な建築に「ロングライフ賞」を、リノヴェーションが行われ姿を変えてもサステナブルに生き生きとしている建築に「ベストリフォーム賞」を与えるという、環境重視の現代においては大変意義ある賞である。

BCS 賞は、デザインが秀逸で、設計と施工の技術に優れ、学術的・社会的に意義があり建築界の歴史に名を留めるような建築を表彰する名誉ある賞である。書類審査とスライドでの審査。のち手分けして全国の応募作品を現地審査する際、著名な建築家等からも説明を受ける。毎年80〜100の応募の中から15〜16作品を選定するという、審査員の見識も問われる大変責任ある審査である。

丁度その頃、東京駅前丸の内新丸ビル隣に、大正８年建築の経済同友会やその他が入る日本工業倶楽部という歴史的建造物があり、保全活用の委員会に都市計画学会から任命された。放っておくと消滅する大正期の建築を保存すべく、学会、建築家協会等で署名運動が展開されていた。私を含む5 名の委員と関係者で幾度となく話し合いをもち、事業者の理解を得て保全することが出来た。低層部に旧館を残しその上に超高層を建てるというやり方で決着。すでに完成をして学会賞を受けている。

3 年ほど前には、文部科学省や会計検査院の入る「中央合同庁舎 7 号館の PFI 事業」の審査委員を国土交通省から任命され、建設部門審査は早大、東大の先生方と共に４名、及び経営部門審査は一橋大、鳥取大、不動産関係の 4 名計 8 名で、2 年間大変重要かつハードな審査をするという貴重な体験をした。旧文科省の建物を一部保存し、霞ヶ関ビルと同じほどのボリュームをもつ２棟の超高層ビルが、まもなく虎ノ門に出現する。

これらの審査員を務めると、現代の最先端の設計、施工の内容や傾向が分かり、審査員自身も学ぶことが多い。

ユニークなボランティア活動としては、「日本トイレ協会副会長」の役目がある。もはや 22 年活動し、日本はトイレの先進国となった。公共トイレ、学校のトイレ、山・観光地のトイレ、ユニヴァーサルトイレ、次世代トイレについての活動である。我国のトイレ協会に刺激され、

各国でトイレ協会が発足している。文化的領域を超えてトイレ問題を考えようと、世界トイレフォーラムも世界各地で何回か開催された。今世界では 24 億人の人達が満足なトイレにアクセスできない。限りある水資源を考えると、水洗トイレが金科玉条の文明施設とも考えにくい。脱水洗トイレも含め、エコロジカルサニテーション等の次世代トイレを水問題と共に考えることは、福祉社会のトイレと共に人類共通の課題である。

9 月には英国の研究者が、日本トイレ協会の活動や私のトイレ作品を取材するというし、来年秋にはアメリカでトイレの講演を今から依頼されている。英語でトイレの薀蓄を語る講演をどう展開させるかこれから準備する。

また、景観問題に関しては、昨年発効した新しい法律「景観法」の関連もあり、藤沢市の都市景観審議会会長として、住民主体の望ましい景観形成に関しての審議や、景観条例の制定に向け微力を尽くしている。

6．国際交流とアジア 5 大学学術シンポジウム

国際交流の重要性はいまさら述べることもない。

去る 7 月 5・6 日に建築・都市分野で、「最近の都市の状況と都市デザイン」と題するアジア 5 大学学術セミナーを本学で行った。併せて、現在国際的な重要課題である「建築教育の問題」を論じ合った。東アジアにある本学の国際交流協定校（成均館大学校／韓国、同済大学、武漢理工大学／中国、国立台湾科技大学／台湾）と本学の 5 大学で、実行委員会の尽力があってスムーズに実現した。3 年前からその計画を立て、各大学を回り準備をしてきた私にとってその成功に肩の荷を降ろした。

昨年は成均館大学校との学術シンポジウムで神奈川大学から教員 4 名と学生 24 名が先方を訪れ、その先鞭をつけた。特に学生間の交流は有効であり、学生の建築デザインのモチベーションが向上した。今年は成均館大学校との学術交流を発展させ、アジア 5 大学のセミナーとし、大変有意義であった。学生も成均館大学校から 7 名、武漢理工大学から 3 名、台湾科技大学から 4 名、合計 14 名が参加した。各大学の卒業設計作品を WEB 上で展示、また本学ではパネル展示を 16 号館で行った。参加した代表学生の作品のプレゼンテーションも行い、各大学の先生方のコメントも受けられるようにした。学生にとっても大きな刺激となり今後の成長に役立つものと確信する。その後学生間で、都市と建築を視察するプログラムを立て内容の濃い交流が行われた。来年は上海か武漢でセミナーやワークショップを行うことに内定した。

とりわけ学生の交流が首尾よく行われた。学生同士の交流に教員はあまり口出しをせず、自由に任せたこともあって、学生の自主性が大いに発揮され、学生間交流の萌芽が勢いづいたのは仕掛け人としては大いなる喜びである。今後ますます本学の多様な分野で国際交流が活発に行われるよう願っている。

7．定年退職を機に

退職後、再びアトリエでの仕事に戻った。これまでは、大学での研究・教育とアトリエでの設計活動を完全に分けて行動していた。日中は大学、夜は 11 時か 12 時までがアトリエでの設計活動。週日の夕食は常に外食。土日以外家で夕食を摂ることはなかった。いまは 7 時半頃には自宅に戻り家で食事をする。体が楽になり、犬との散歩の時間がとれるようになった。夕食後の散歩は翌日の計画や、設計のアイデアを考えるのに大変有効である。

4 月以降、これまでも行っていた 1 年次の「建築のデザイン」の講義を非常勤講師として担当している。情報の 8 割は目からといわれる。デザインの講義はヴィジュアルに授業をすることが肝要である。これまで世界の都市を歩き、撮ったスライドは数万枚になる。その中から選定し、パワーポイントに編集して、左右の映像を、昔と今、都市デザインプロジェクトの before/after, 欧米と日本、アジア諸国と日本　というように価値観の違い、人々のライフスタイル、空間やシーンを比較対照して講じ学生から好評を得ている。

ここ数年間、アジアの国を訪れることが多かった。そろそろ欧州の風を体に受け充電をするために 9 月半ばから 20 日間ほど、イタリアを中心に欧州を周る計画を立てている。優れた風景を創り出す建築や風景と調和をとりながら、より優れた風景を創り出す建築はどうあるべきかを探りたい。イタリアの小さな町は、民族や町の「目」を持つ。優れたデザイン能力を持つイタリア人の民族の美意識や暮らしそのものを物語る表情豊かな「目」である。その視線と向き合って思索を深めたい。

年末には武漢理工大学へ講義に行く。書籍の寄贈をしたので高橋コーナーの開所式もあるというので楽しみにしている。周祖徳学長、曽春年外事処長、李百浩土木・建築学院長を始め多くの知人に会うことも楽しみである。

8．謝意

私は、1988 年から 18 年間神奈川大学に奉職させて頂いた。その間、多くの教職員・関係者の方々にご厚誼を頂き、特に横浜キャンパス再開発計画や国際交流の基本方針等の改訂に関しては、多大なご理解とご協力を頂き、心から感謝いたします。また、拙文を掲載する機会を用意して下さった編集委員の方々に深く感謝いたします。

国際交流研究

成均館大学との理工系学術交流

亀山　敦*

Science Exchanges with Sungkyunkwan University

Atsushi KAMEYAMA*

神奈川大学が韓国の成均館大学と交流協定を締結してから約4年になります．2003年から2006年まで両大学の理工系で学術交流が行われております．2003年に成均館大学で，バイオ・高分子マテリアルをテーマにしたシンポジウム，2004年に神奈川大学で，ソフトマテリアルをテーマにしたシンポジウムが教員の学術交流として行われました．また，2005年と2006年に，それぞれ成均館大学と横浜キャンパスで都市・建築デザインをテーマにしたシンポジウムが両校の学生も含めた学術交流として行われました．ここでは，成均館大学との理工系学術交流の背景と経緯，ならびに2003，2004年に行われたシンポジウムについて紹介を致します．

１．はじめに

大学環境の国際化の中にあって，最近の極東アジア，中でも韓国の産業，科学技術の発展はめざましいものがあります．神奈川大学でも韓国から多くの留学生を受入れており，また教員レベルでの研究交流も行われていました．このような背景から，神奈川大学の国際交流センター（当時）が韓国の大学との交流協定の充実を目的として，調査，準備を進めて，2002年に神奈川大学と成均館大学との間で交流協定が締結されました．このような学術交流により両大学の教育・研究の発展，さらに将来的には大学院生も含めた交流はもちろん，共同研究の可能性など多くの成果が期待されます．

*教授　化学教室
Professor, Dept. of Chemistry

２．成均館大学について

成均館大学はソウル首都圏に位置し，儒教の学校として設立されてから600年余の歴史を持つ総合大学です．成均館大学の本部と人文社会系の学部，大学院はソウルキャンパスにあり，理工系の学部，大学院は，ソウル近郊の水原（Suwon）キャンパスにあります．理工系は，以下の7つの学部構成になっています．1）School of Natural Science，2）School of Engineering，3）Electrical and Computer Engineering，4）Archtecture，Landscape Archtecture and Civil Engineering，5）Medicine，6）Pharmacy，7）Sport Science．韓国の約250大学の中で，成均館大学は上位5校にランクされる総合大学で，人文社会学分野，理工学分野ともに質の高い教育・研究を行っています．2003年に成均館大学を訪問した時，日本の大学のCOEに相当する教育研究プロジェクトが5つ推進されていました．最近では，韓国の大企業サムスンがかなり資金援助をしているようです．以下の写真にある研究施設は2001年にサムスンの寄付でできたものです．

写真1．サムスンの寄付で設立された研究所

成均館大学は，17カ国の60余の大学と交流協定を結んでおり，学生の海外留学や教員の交流の機会を多く作

り，国際社会で活躍できる人材の教育に積極的に取り組んでいます．最後に余談ですが，卒業生の中には大リーグで活躍している投手なども多く，また，韓国ドラマで有名になったヨン様（ペ・ヨンジュ）が一時映像学科に在籍していました．なお，成均館大学の歴史，大学の組織等について工学研究所所報第 26 巻，p115（2003 年発刊）に，長宗雄先生（数学教室）が詳しい紹介記事を執筆されていますので，そちらを参照して頂ければと思います．

３．理工系学術交流の経緯

神奈川大学と成均館大学の間で 2002 年度交流協定が締結されました．それを契機に 2002 年 11 月に成均館大学新素材学科の招聘教授（客員教授）であり，本学工学部に知己の人がいる夫龍淳教授（Dr. Lyong Sun Pu）が本学を訪問され，学術交流の提案がありました．両大学の理工系のアクティビティーが高いことから，1 回で終わるような交流ではなく，両校交互に開催するような学術交流を行うことについて意見交換がなされました．その後，ワーキンググループとして理工系学術交流実行委員会を設置して具体的な検討を行った後，国際交流センター（当時）で学術交流として審議，決定されました．シンポジウムのテーマとしては，科学技術分野，国際社会で益々重要と思われるテーマを選びました．キーワードを挙げますと，資源・エネルギー，環境，デザイン，システム制御，バイオマテリアル，ナノサイエンスなどです．このシンポジウムを好機会として両大学間で中長期的かつ質の高い学術交流を推進していくことは，本学にとって大変意義のあることであると思います．

2003 年 9 月 1 日に，シンポジウムと並行して本学国際交流センター（当時）所長の高橋志保彦先生，他 2 名が成均館大学理学部長を表敬訪問し，第 1 回のシンポジウム開催のお礼を述べるとともに，今後の学術交流について意見交換を行いました．

４．2003 年度学術交流

2003 年 9 月 1 日に成均館大学水原キャンパス化学工学科において，“Advanced Bio & Polymeric Materials”のテーマでシンポジウムを行いました．両校からそれぞれ 5 名の先生が最近の研究について講演を行いました．講演タイトルと講演者は以下の通りです．

1) “Development of New Oranic Reactions of Oxetanes for Polymer Synthesis”, Prof. Tadatomi Nishikubo

2) “Surface Treated Polymer Electrolyte Membranes for Direct Methanol Fuel Cells”, Prof. Dukjoon Kim

3) “Biodegradation of Polyhydroxyalkanes”, Prof. Terumi Saito

4) “Non-fouling Polymeric Materals for the Regeneration of Nerve Tissue”, Prof. Dong June Chung

5) “Synthesis of Some Bioactive Compounds from Sugars”, Prof. Kenichi Sato

6) “Conducting Polymer/Metal Nanocomposites”, Prof. Youngkwan Lee

写真 2．シンポジウム（2003）の参加教員

写真 3．化学工学科周辺のキャンパス風景

7) “Formation of the Supramolecules of Metal (II) Carboxylates with Polymer”, Prof. Wasuke Mori
8) “Finite Element Analysis of Time-dependent Viscoelastic Flows for Highly Concentrated Polymeric Fluids”, Prof. Youngdon Kwon
9) “Control over Molecular Weight and Polydispersity in Polycondensation”, Prof. Tsutomu Yokozawa
10) “Electroactive Polymer Actuator for Endoscope Applications”, Prof. Jae-Do Nam

成均館大学からは Dept. of Engineering, Dept of Polymer Science の先生方と大学院生を中心に約 50 名が参加し，活発なディスカッションがなされました．それぞれの講演者の研究内容は独創的かつ先端のものであり，今後応用展開の期待できるものでした．このシンポジウムは両校の研究者にとってお互いの研究内容について知る良い機会であり，日韓両国の研究スタイルの違い等を理解する上で大変有意義なものでした．

５．2004 年度学術交流

2004 年 7 月 23 日に神奈川大学横浜キャンパス 16 号館において，“Soft Materials” のテーマでシンポジウムを行いました．両校からそれぞれ 5 名の先生が最近の研究について講演をしました．講演タイトルと講演者は以下の通りです．

1) “Swelling and Mechanical Properties of Superporous Hydrogels”, Prof. Dukjoon Kim
2) “Synthesis and Properties of Hyperbranched Polymers with Oligo(ethyleneoxide) Chains”, Prof. Atsushi Kameyama
3) “Preparation and Properties of PEG Graft Copolymer & Hydrogels from PEG Macromonomer Containing Sulfonate End Group”, Prof. Ji-Heung Kim, Prof. Jun-Guk Kim, and Prof. Young Ha Kim
4) “Introduction of Carboxylic Group on the Surface of Inorganic Materials Using Silane Coupling Agents Containing Photodegradable 2-Nitrobenzyl Esters”, Prof. Kazuo Yamaguchi
5) “Human Chondrocyte Culture on the Various Polymeric Scaffolds”, Prof. Dong June Chung and Prof. Hye Sung Nam
6) “Photorearrangement of Hydroxy-Substituted Diarylnitrones and Its Application to Refractive-Index Control of Polymer Film”, Prof. Tadamitsu Sakurai
7) “All-Polymer Field Effect Transistor Using Photolithographic Micro-Patterning Technique of Electrically Conducting Polymers”, Prof. Jun Young Lee
8) “Epitaxial and Electroconductive Properties of Self-Assembly Fabricated with Aromatic Polyether ob Si-Wafer”, Prof. Kazuo Tajima
9) “New Oligomeric Plasticizer for Lithium Secondary Battery”, Prof. jinhwan Kim
10) “Penetrating Spherulites in Crystalline/Crystalline Polymer Blends”, Prof. Takayuki Ikehara

本学から約 85 名が参加し，その内訳は理学部，工学部の教職員 18 名，学部生約 45 名，大学院生約 20 名でした．講演の内容は，ソフトマテリアルとしての有機化合物を素材にした研究で，その機能，応用分野は多岐にわたるものでした．いずれの研究も独創的かつ先端のものでした．また，いくつかの研究については，応用研究への展開が検討されているものでした．

写真４．シンポジウム（2004）の会場風景

写真 5. 懇親会風景－山火学長を囲んで－

6．おわりに

ここで紹介した成均館大学との学術交流を通して感じたことは，最近の韓国の科学技術の発展の速度が増しているということです. この分野の教員は 30, 40 代が多く，若手教員の多くがアメリカで大学院教育を受け，その後研究員としてキャリアを積んでいます．また，大学の教育・研究のハードとソフトシステムがアメリカナイズされており，合理的に運営されているように思いました．政府からの教育研究プロジェクトや企業からの大型研究寄付金にみられるように，これらは政官民が協力して支援していることも大きな推進力になっています．日本の大学においても，大学の基礎研究の独創性，産官学共同研究による研究成果，科学技術の社会への還元が強く求められております．このような状況で，教育・研究のアクティビティーの高い成均館大学と学術交流を深めていくことは，両大学にとって意義が大きいと思われます．

話は少々変わりますが，2005 年に神奈川大学と国立台湾科学技術大学との間で交流協定が締結されました．今後はこれらの大学の他にも，韓国，台湾，そして中国の大学などの東アジアの大学との交流を深める機会が増え，神奈川大学の国際交流が活発に行われることを期待しております．

写真 6. シンポジウム（2004）の参加者

国際交流研究

２００６年度東アジア建築学術交流セミナーの報告

冨井　正憲*

Report: Architectural Joint Seminar of the Five Asian Universities Theme: The Cityscapes of Asian Cities and the Architectural Education

Masanori TOMII*

「はじめに」;

韓国成均館大学校との理工系学術交流がスタートしたのは 2003 年度のことである。当時の西久保工学部長のもと、中長期的観点で両校の建設的な学術交流を推進することを目的に、工学部と理学部によって成均館大学理工系学術交流実行委員会が組織され、初年度 2003 年は神奈川大学の化学系教員が韓国に出かけ、第１回目のジョイントシンポジウムが開催された。そして翌 2004 年度は成均館大の化学系教員が来日することになり、7 月に横浜で第２回目が開催された。

こうした実績を踏まえて、２００４年度から成均館大学学術交流委員会は工学部長、理学部長のワーキンググループとして改めて位置づけられ、活動を引き続けることになった。その年度初めの４月の実行委員会において次年度のシンポジウムの計画が募集され、すぐさま建築系が応募した。その後、他の分野からの申し出がなかったために第３回目のシンポジウムは建築系が行うことで承認された。この決定を受けて建築学科では具体的準備を開始し、成均館大側とも相談の結果、2005 年度は韓国において建築デザイン歴史分野で行うことを決めた。その後両校の運営委員の選出があり、幹事を中心にシンポジウムのタイトル、内容、参加者、開催期日、費用等の確認と詳細を取り決め、2005 年 2 月に計画書を作成して学科承認手続きに入った。その後運営委員長から工学部長、学長補佐への説明を経て、工学部長と連名のもと計画書を学長室に提出した。この申請承認手続きの流れは過去２回と大きく異なった。従来の手続きとしては計画書を成均館大学校理工系学術交流実行委員会に提出して、学部長会で承認を得ると国際交流センターを窓口として作業が進んだのである。ところが 2005 年度から学内組織改革により国際交流センターが廃止され、経過処置として学長室で学術交流が取り扱われた。それまで国際交流センター長であった高橋志保彦教授は改めて学長補佐に任命され、引き続き国際交流業務を担当されることになったために、さほどのトラブルもなく改革前に決まっていた建築系の成均館大学校との交流計画手続きが進んだことは幸いなことであった。２００５年度４月になって総合学術研究推進委員会が発足し、ここで学外機関との学術研究の交流が審議されることになり、学内で正式に成均館大学校での建築系の学術交流が承認されたのである。これを受けて両校の運営委員会では運営委員会を実行委員会に名称変更して、具体的な事項の立案に入り、教員同士の研究交流のほかに、大学院を中心とした学生の参加交流を目的に加え、参加学生の募集と発表者、開催時期、調査対象地、宿泊所、費用等の検討に入った。こうして５月２７日から３１日まで韓国において「２００５年度神奈川大・成均館大建築交流セミナー」が開催された。都市居住環境と建築デザイン教育をテーマに発表、フィールドワークを行い、両校の相互交流をはかり、学術面ばかりでなく、教育面においても大いに成果が得られた。因みに神奈川大学からの参加者は教員４名、大学院生１０名、学部４年生１４名（内車椅子対応者１名）の総勢２８名であった。

２００５年のセミナー終了後の懇談会において、交流が学術面ばかりでなく、教育面においても大いに成果が得られたので、来年はぜひ横浜で開催したいという双方からの申し出を確認し、帰国早々学科報告の中で次年度建築交流セミナーを横浜で行う提案を出し、承認を受けた。すぐに計画書作成の準備に入り、その検討過程のな

* 専任講師　建築学科
Lecturer, Dept. of Architecture

かで高橋学長補佐の助言を受けながら、２００６年度は更に交流の対象を東アジアに拡大し、すでに神奈川大学と交流協定を結んでいる韓国（成均館大学校）、台湾（台湾科技大学）、中国（同済大学、武漢理工大学）と本学の5校により東アジア学術交流セミナーを開くことを模索した。５大学の既知の教員同士と緊密な確認を取り合いながら可能性を検討し、お互いの了解が取れた１１月に西久保忠臣工学部長、室伏次郎準備委員会代表者連名で国際交流事業計画書を学長に申請した。その後ヒアリングを受け、幸いに年度末に採択結果をいただいた。実質的には成均館大学校理工系学術交流がスタートして４回目のシンポジウムにあたる。途中組織改革があり、担当窓口が変更して混乱することも多々あったが、西久保忠臣前工学部長と高橋志保彦前学長補佐の深い理解と強いバックアップのもとようやく実現までこぎつけることができた。

そして２００６年度の東アジア建築学術交流は、教員の他に学生運営委員および留学生の参加も含めて、メーンテーマを「東アジアにおける都市景観と建築デザイン教育」と決め、以下のようなスケジュールと内容で実施した。

７月５日：シンポジウム＋学生作品発表
　第１部「現代都市の状況と景観デザイン」
　第２部「街並み保全と街づくり」
　学生作品発表
７月６日：「建築デザイン教育について」
７月４日～７日：参加５大学卒業設計展
７月６日～１５日都市建築フィールド・ワーク
参加者は
台湾：国立台湾科技大学　教員２名、学生４名
韓国：成均館大学校　教員３名、学生５名
中国：同済大学　教員１名
中国：武漢理工大学　教員１名、学生３名
と、海外より５大学５名の教員と１２名の大学院生が参加し、会場は英語、中国語、韓国語、日本語がとびかった。

『シンポジウム及び学生作品発表』

２００６年のメーン・テーマは『東アジアにおける都市景観と建築デザイン教育』として最初に２つの主題による講演発表が行われた。第一主題はデザイン系の先生方が中心となって、アジアの中心的な都市である上海、ソウル、台北、横浜が取上げられ、景観の特質と今後の方向性等が報告された。次の第２主題においては歴史的な文脈における町づくりの具体的な興味ある事例が各国から取り上げられた。司会者と各発表者及びテーマをあげれば以下の通りである。

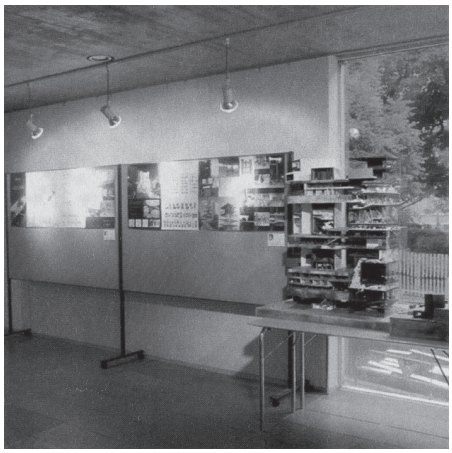
第１主題：現代都市の状況と景観デザイン：司会　室伏次郎（神奈川大学）
高橋志保彦（神奈川大学名誉教授）：「現代都市の現状と景観デザイン」
金度中（成均館大学校）：「Making a Good City utilizing High Tech and Cultural Contents」
張尚武（同済大学）：「変化中的上海」
李威儀（台湾科技大学）：「An introduction on the change of urban-image and country-scape in Taiwan」
第２主題：街並み保全と街づくり：司会　高木幹朗（神奈川大学）
西和夫（神奈川大学）：「町並み保全と町づくり」
慎重進（成均館大学校）：「韓国の住民参加まちづくり」
李白浩（武漢理工大学）：「Conservation and Adaptive Reuse of Industrial in Shanghai」

各国の報告を比較しながら聞くと、近年グローバリゼーションに伴い、都市は大きく変わりつつあり、特に東アジアにおいてはその傾向が顕著であることがよく理解できた。またグローバリゼーションはローカリティを浮かび上がらせる結果ともなっており、ローカリティを重要視する流れは、近代から引き継ぐ街並みを維持していこうとする動きにも連動している。具体的に都市景観及びまちづくりにおける街並み保存の現状がとりあげられ、各都市の事例や街並み保存の手法等が紹介されて、内容は非常に興味深かった。特に日本においては本年６月に景観法が施行されたばかりであり、国内における関心が高いことと併せて、参加者の国々においても現在研究中ということもあり、相互に時宜を得たテーマと言うことで情報の交換が盛んに行われた。

この後、引き続き曽我部昌史教授（神奈川大学）司会のもと、参加教員全員がコメンテーターとして、１１名の学生作品発表が活発に行なわれた。学生作品は台湾科技大学、成均館大学校、同済大学、武漢理工大学がそれぞれ４作品、神奈川大学が２作品の合計１８作品であった。昨年度英語で発表した成均館大の学生が、今年は日本語で発表するなど、中国、韓国の学生のプレゼンテーション能力の高さが昨年同様印象に残った。

これらの発表作品はシンポジウムを含む４日間１６号館セレストホールのホワイエに各大学Ａ１サイズ４枚割当で構成したボードを作成展示して、学生や教職員の方々に公開した。また同時に出品作品はウェヴ（http://www.arch.kanagawa-u.ac.jp/2006asia/）上でも公開し、活動をより広く外部に発信するとともに、今回

参加できなかった韓国、中国、台湾の学生達にも情報を流し、好評を博した。引き続き現在も公開しているので、学科ホームページをぜひご覧いただきたい。



セレストホールの作品展示風景

『各国の建築デザイン教育に関する研究会』

7月6日午前中、海外参加大学の7名の先生全員と高橋名誉教授、および本学実行委員会主メンバー参加の元、室伏実行委員長の挨拶後、建築家教育の将来像について、東アジア各国の状況をお互いに把握することを大きな目的とし、具体的には建築家資格の国際相互認証の制度を話題に取上げ、デザイン教育の現況と課題について報告と質疑が活発に行われた。そして最後に来年度以降の本シンポジウムの予定や進め方についての意見交換が行われた。特にそのなかで取り上げられた各国の建築学5年制教育の問題は学部と大学院との問題、資格制度との関係等重要な内容を含んでいるのでここに具体的に紹介しておきたい。

①はじめに山家教授より日本の建築デザイン教育認定制度の現況と課題について、⑷JABEE(日本技術者教育認定機構及び)⑹ユネスコ UIA とラウンドテーブル⑹大学院 JABEE について、資料にもとづき説明がされた。JABEE はわが国では 2001 年から認定が始まり、2003 年度から建築分野でも制度化の動向にあったが、UIA とは起源と認定システムが異なることから、現在、特に大学院教育との関連で試行を模索している段階であり、両者の枠組みをどのように調和させるかが課題である旨、報告された。

②続いて本学建築学科の JABEE 認定に関わった高木教授から、準備から認定にいたるプロセスの説明があり、審査概要とその結果についての説明があった。特にスタート時の「専門プログラム」と「教育プログラム」の併置から、2006 年度から「専門プログラム」に移行した旨の説明がされた。

③上記2者の説明に関連して海外のメンバーから質疑意見があった。

⑷台湾鄭教授から日本においての認定制度を進めていく上での学部と大学院との関係についての質疑があり、現状ではどの国も 4 年生の学生は UIA を受けられない旨の確認があった。

⑹ＪＡＢＥＥの作品等の保管の問題、認定証は誰が出すのかといった管理・運営の問題から、JABEE は工学技術者教育であって、そのＪＡＢＥＥ教育がデザインが中心となる建築家教育（UIA）とどのように関連するのか、といった根本的問題が話題に上がった。

④次に中国の李武漢理工大学教授より中国の建築デザイン認定制度の説明があった。１９９６年3月までが旧制度、１９９７年から4大学が新制度の認定を受け、「工学」から「建築学」へ移行するとともに4年制から5年制に学部が変更した旨の報告があった。

⑤引き続いて尹成均館大学教授より、韓国の建築学教育の現況についての説明が行なわれた。韓国ではすでに２００２年から一部の大学で5年生教育が開始された．そして２００３年に政府と学会が一体となって建築教育認定システムの開発研究が行なわれた。特に成均館大学では任教授がスタート時より中心メンバーとしてこの開発プロジェクトに参加してきた経緯があり、２００５年には自国による制度認定が設立されたのである。現在、２００６年度より3大学が認証準備中であり、成均館大学は２００７年度認証に向けて準備中とのことである。具体的には成均館大では工学部からデザインの分野を独立させ、1学年定員９０名の建築学科学生を新しく出来る建築デザイン系に５１名、そのまま工学部に残る建築システム系に３９名と分けることとした。大学院との関係は5年生を基本とし、その中身を3，5年＋1．5年、4．5年＋1．5年の2種類があり、デザイン系は5年制を卒業して2年後にＵＩＡの資格審査を受けることができるということに決定したと報告があった。昨年私達が成均館大学校を訪問したときも、この制度に対応する為に校舎の増改築が盛んに行なわれていた。

⑥最後に鄭台湾科技大学教授より台湾の建築教育の現況についての報告がなされた。台湾で建築学科のある国立大学は2校で、他は全て私立大学である。教育認定制度については韓国、日本よりも遅れている。特に自国で認定制度をつくることは難しい面があり、検討中ではあるが進んではいない．現在台湾には4年制と5年制の建築学科があるが、5年制の私大は4年制に移行しつつある

との興味ある報告があった。この流れは４年制を５年制に移行しようとしている他の国とは逆行するものであり、その主な理由としては認定制度が定まっていない台湾では学生達にとって5年制は時間的にも経済的にも１年余分にかかり、負担の割りに利点が見えないことに原因しているとのことである。

⑦以上の報告の後にフリートーキングに入った。主な発言を上げれば

⑷中国と韓国は共に４年制の建築工学科を残しつつも、５年制のデザイン系の建築学科を創って UIA 認定制度に対応するようにスタートしている。台湾も認定制度は遅れているが、５年制のデザイン中心の建築設計学院がある。しかし日本は現在のところ４年制がそのまま続いているとの確認があった。

⑹5 年制にしたときの１年増えた分は何を教えるのかが話題になった。成均館大学校の例では３年まで建築、４年で都市、５年で総合と位置付けている由説明があり、中国も同様の考え方をしているとのことである。

⑹学部と大学院の関係が話題に上がり、４年＋２年の他に、５年＋１年、５年＋１．５年、４．５年＋１．５年等、現在４年制から５年制に移行しつつあることもあって、種々のケースが報告された。

⑹日本のようにデザイン、計画研究、歴史等に分かれているのに対して、今後設計中心の大学、大学院に移行ということになると、大学院に入って設計中心の建築家になりたいと考えている学生はよいが、研究者として論文を志望する学生の対応に苦慮しているとの問題も上げられた。

現在、建築家資格の国際相互認定制度に向けて世界が大きく動いていること、東アジアにおいても情勢が刻々と変化していることを直接相互に把握しあうことができ、大変意義深かった。

「フィールドワーク」

都市建築のフィールドワークは初日のシンポジウムが終わった次の日より１５日までの９日間、昨年度成均館大学校に参加した大学院生を中心に、更に中国からの留学生２名と韓国からの留学生２名を加えた神奈川大学学生１６名によって、１２名の各国参加学生をサポートして東京横浜を中心とした伝統的な都市から現代的な建築まで幅広く視察し、スケッチ、写真撮影をしながら同行学生と交流を行い、日本の景観を深く理解した。昨年度は成均館大所有のバス１台で全員移動することができたので、時間も経費も少なくすんだが、今年は個別に電車を利用して移動するので大変だったが、事故もなく無事に済んで安心した。

『おわりに』

今回の５大学におけるシンポジウムは参加者にとって実に有意義なものであった。終了後引き続いてこうした交流を続けていくことが重要であることを確認し、早速次回は中国での開催を検討することとし、今年度中に幹事が集まって内容を検討していくこととした。また、長く学術研究交流を続けていくには教員だけではなく、大学院生を中心とした若い世代の学生や留学生の積極的な参加を促すことが重要であることも体験を持って確認された。

アジアにおける建築デザイン教育の現況と課題は各国大学間で学部・大学院の教育制度の変革の時期にあたり、認定制度を中心とした共通の問題と、各国各大学の差異性が確認された。参加者全員が建築デザイン教育のテーマはお互い今後とも密接な連絡を取り合いながら、引き続き情報交換を行なっていく必要があることを痛感したのである。

参加大学が増えると、お互いの学年暦や夏季休暇の違いがあって、開催時期の調整が難しくなる等の問題も新たに生じた。

２回の建築系交流のなかで最も痛感したのは神奈川大学に現在交流用の施設がないことである。いくつかの大学の学生たちが一箇所に数日間泊り込んで、１つの課題に取り組むことができたならば、どんなに研究教育効果が上がることか。よその国に出かけていくと交流関係のスペースが充実していて実にうらやましい。国際交流事業が本格的に動き出したわが大学も、是非ハード面の充実を図るべく、交流施設を早急に実現していただきたい。

フィールドワーク：横浜赤レンガ倉庫前にて

施設紹介

透過型分析電子顕微鏡　JEM-2010

宮尾　敏広*，内藤　周弐**

Transmission Electron Microscope JEM-2010

Toshihiro Miyao*, Shuichi Naito**

1．はじめに

本装置は日本電子株式会社製の透過型分析電子顕微鏡であり，23 号館が完成した翌年の平成 12 年にハイテク・リサーチ・センタープロジェクトの大型装置として工学研究所内に設置された．通常の電子顕微鏡像や電子線回折像の観察に加えて，エネルギー分散型 X 線分光装置によって極微小領域の X 線分析も可能で，現在工学部の多くの研究室によって利用されている．本稿ではこの装置の特徴と最近の研究成果を紹介する．

2．本装置の特徴

JEM-2010 は国内では最も普及している透過型電子顕微鏡の一つである．TEM 像は，フィルムや CCD カメラ等の観察媒体に到達した電子の空間密度分布を白黒のコントラストとして映し出すことによって得られる．分解能が高く歪みの少ない TEM 像を得るために，対物レンズが最も重要な部分であり，試料や EDS 検出器，アンチコンタミネーションのための ACD 等が配置された非常に込み入った構造をしている．したがって対物レンズの構造は目的に応じて最適化される必要があり，ハイレゾリューション構成の装置は分解能を主眼においた構成であり，ハイコントラストは主に生体用，ハイチルトは電子線回折に重きを置いた材料分析用とそれぞれ用途が異なっている．本学に導入した顕微鏡はハイレゾリューション構成で理論分解能 0.194 nm，微小プローブ系 0.5 nm が得られ，原子配列を直視しつつ，極微小領域 X 線分析，極微小領域電子線回折，収束電子線回折が可能で，より精密な構造解析が可能である．

本装置には走査型透過電子顕微鏡（STEM）モードも装備されている．これは微小に絞った電子線プローブを走査して像観察を行うものであるが，このモードを用いることによって，電子線が透過しにくい試料の観察や，走査と同時に X 線分析を行うことによって試料の X 線マッピングを行うことができる．電子顕微鏡観察中に観察者を困らせる現象の一つに試料のドリフトが挙げられるが，本装置に装備された ThermoNoran 社製の EDS 検出器と Vantage システムは，試料形状を記憶することによって，X 線マッピング中に試料の移動を自動的に追尾してドリフト補正を行うことが可能である．図 1 に本装置の外観を示す．鏡塔の左側にある PC が EDS 用の端末，右側にあるモニターは STEM 観察用である．通常の顕鏡操作は真ん中の蛍光板と鏡塔右下の小さなプラズマディスプレーに映し出される情報を覗き見ながら行う．（数年前にモデルチェンジした最新型の TEM は Windows マシンとなっている．）

図 1　透過型電子顕微鏡　JEM-2010

物質生命化学科，助手*，教授**
Dept. of Material and Life Chemistry
Research Associate*, Professor**

我々の研究室は「触媒ナノ化学研究室」であり，固体触媒のナノ構造の観察は必須であり，当研究室の触媒研究にはJEM-2010が日夜貢献している．次節では我々の最近の成果を簡単に紹介する．

３．透過型電子顕微鏡を用いた固体触媒の観察

３．１．ナノ構造触媒の観察

当研究室では貴金属超微粒子を内包したシリカやチタニア等の中空酸化物ナノ構造体を調製しその吸着・触媒作用を研究している[1,2]．我々が鋳型として用いている金属アンミン錯体は，その結晶表面上で金属アルコキシドを選択的に加水分解する性質を有している．したがってこれらの金属アンミン錯体を鋳型としてケイ素アルコキシドやチタンアルコキシドなどを加水分解した後に加熱処理を加えると，外側にアルコキシドの加水分解から生じた酸化物の外殻を残して金属アンミン錯体が分解し，金属超微粒子を内包した酸化物ナノチューブやナノカプセルを作ることができる．図２に白金アンミン錯体を鋳型として調製した白金シリカナノチューブの TEM 像を示す. この白金シリカナノチューブは, 直径100-200 nm, 長さ数μm の高いアスペクト比を有する中空ナノ構造体であり, シリカ外殻の内部の中空中に数 nm から数 10 nm の金属超微粒子を含んでいる．また高倍率で観察することによって, 外殻の壁の中にも 1-2 nm の非常に微細な金属微粒子が存在することが分かる．この壁中の微細な金属粒子が特異な触媒活性の発現に寄与しているものと考えられる．このように観察対象の粒子に多元分布が存在しているような系は TEM が最も威力を発揮する対象であり，他の分析手法ではなかなか正確な評価を行うことができない.

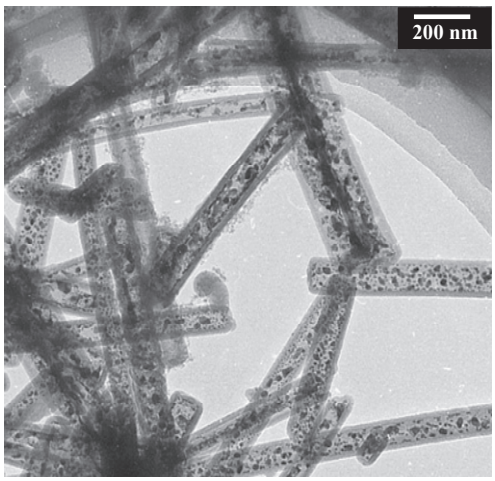


図２　白金シリカナノチューブの TEM 像

シリカナノ構造体の形状は鋳型の金属アンミン錯体の結晶形状を反映する．図３にそれぞれパラジウム，イリジウム，ロジウム，ルテニウムのアンミン塩化物錯体を鋳型として調製したシリカナノ構造体の TEM 像を示す. パラジウム-シリカはチューブ状となり, 他はカプセル状になっている．どのナノ構造体も，白金の場合と同様に内部に金属ナノ結晶を含み, 壁中にも 1-2 nm の金属を含んでいる．これらの金属シリカナノ構造体は特異的なガスの選択吸着能を有している．水素や一酸化炭素，エチレンやプロピレン等の吸着量を測定してみると，高温で加熱処理を加えたナノ構造体は水素の吸着量だけが際立って大きいことが分かる．外殻のシリカ壁に水素は透過するが窒素分子や CO 分子などは透過しないウルトラミクロ孔が生じるためと考えられる．このウルトラミクロ孔は前駆体のアルコキシドの加水分解と縮合の過程で生じるものと考えられる.

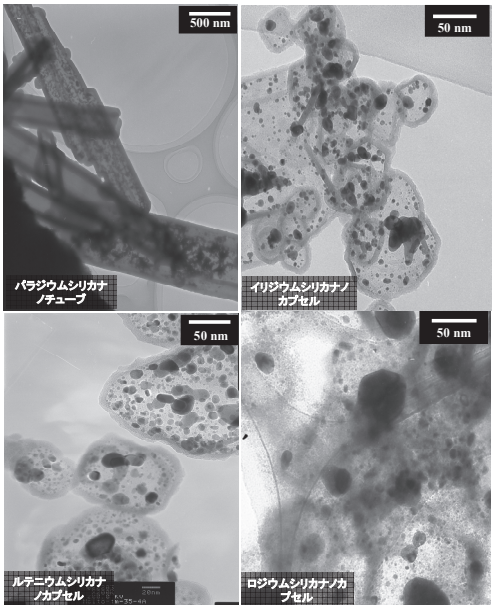


図３　種々の金属シリカナノ構造体の TEM 像

次に，逆ミセル法を用いて調製した球状の中空ナノ粒子の TEM 観察結果を紹介する．逆ミセル法は有機相中で両親媒性分子が作る自己集合組織であり，内部にナノサイズの水相を含んでいる．この水相をナノサイズの反応器として利用すると，通常の手法では合成できない合金や複合酸化物，極めて単分散性に優れた超微粒子などの合成が可能となるため近年注目されている.

我々は，金属アンミン錯体水溶液を逆ミセル中に添加

した後にケイ素アルコキシドの加水分解を行うと，平均直径 50 nm の極めて単分散性に優れた中空ナノ粒子が合成できることを見出した．この中空は逆ミセル中で金属アンミン錯体が析出することによって生じるものと考えられる．図 4 にイリジウムアンミン錯体を用いて調製したイリジウム-シリカ中空ナノ粒子の TEM 像を示す．TEM 観察のために通常のコロジオン膜貼り付けメッシュの上に試料を載せると，ナノ粒子の単分散性が高いために粒子同士がヘキサゴナルに配列する．中空のサイズは約 8 nm で，その中に 1-2 nm 前後のイリジウムクラスターが複数個入っている．TEM 観察中に電子ビームを照射すると，このイリジウムクラスターが鼠のようにチョロチョロと中空中を動き回る様を観察することができる．このイリジウム-シリカ中空ナノ粒子の水素吸着特性を検討した結果，常温でイリジウムの化学量論の数倍の水素を吸着する特異な性質があることが見出された．現在我々は，中空中のイリジウムクラスター上で解離した水素のスピルオーバー現象がこの過剰な水素吸蔵に関係していると考えている．

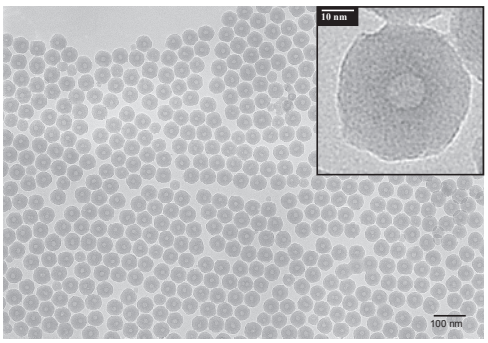


図 4　イリジウム-シリカ中空粒子の TEM 像

3．2．担持金属触媒の TEM 観察

不均一触媒の分野では，反応速度定数の決定に電子顕微鏡観察により得られる表面原子数は不可欠であり，この情報無くしては国際学術誌への掲載はおぼつかない状況にある．酸化物等の担体に担持された金属の粒子径や表面原子数を見積もる方法は化学吸着法やX線回折法等他にも挙げられるが，これらが平均的な情報を与えるのに対して TEM 観察から得られる情報は局所的である．それ故に平均的な値に近づけるためには相当数の試料を観察する必要がある．しかし結晶性に乏しい数ナノメートル以下の金属の構造解析には TEM は欠かせないツールである．

図 5 に Pd-Re/TiO_2 触媒の TEM 像を示す．この触媒は一酸化炭素の水性ガスシフト反応に高活性を示し，TiO_2 担体上の Re 種の分散状態の解明が研究上の重要な課題であった[5]．TEM 観察によって Re 種はその一部が Pd と合金化し，残りは担体上に高分散することが明らかとなった．図 5 の TEM 像からは金属原子の配列が直接観察でき，金属表面に 2 原子ずつのステップが存在する様が明瞭に観察できる．

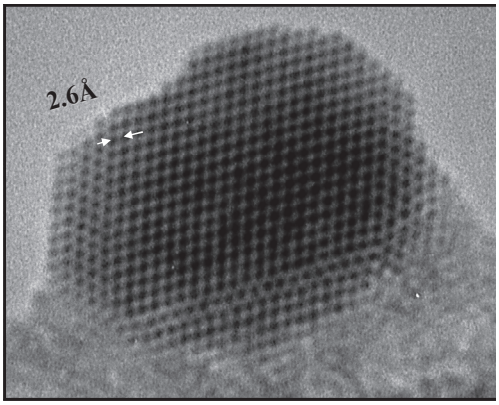


図 5　Pd-Re/TiO_2 触媒の TEM 像

図 6 にチタニアに担持した Pt-Ru 触媒の TEM 像を示す．この触媒はメタノールの液相改質反応に対して非常に高活性を示す触媒である．メタノールの液相改質反応は従来直接メタノール型燃料電池の電極反応として検討されてきた．我々はこの反応が適当な触媒上では温和な条件下でも進行することから，コンパクトな高純度水素製造プロセスとして着目し検討を進めてきた．気相で行われるメタノールの水蒸気改質反応は，従来から水素および合成ガスの製造のために研究されているが，我々の検討によって従来提唱されている気相の水蒸気改質反応と液相改質反応は全く反応機構が異なることが明らかとなった．

Pt-Ru はチタニア以外の他の塩基性酸化物に担持しても活性を示すが，特に TiO_2 に担持されたものは特異的に優れた活性を示す．TiO_2 に担持された Pt-Ru 粒子の表面を注意深く観察すると，金属が 2-3 原子層の薄い酸化物膜で被覆されていることが分かる．これは SMSI（Strong Metal Support Interaction）と呼ばれ，一部還元された低原子価の酸化物（ここではチタニア）が蒸気圧を持つために金属表面を移動し被覆する現象である．この現象は当初は担体酸化物と金属の化合であると考えられていたが[6]，TEM 観察によって初めて金属表面が酸化物で被覆されて起こる現象であることが証明された．我々のメタノールの液相改質反応においては SMSI が触媒活性を促進することが見出されている．これらの知見から新規

な触媒の設計指針を得，現在更に高活性を有する触媒の開発を行っている．

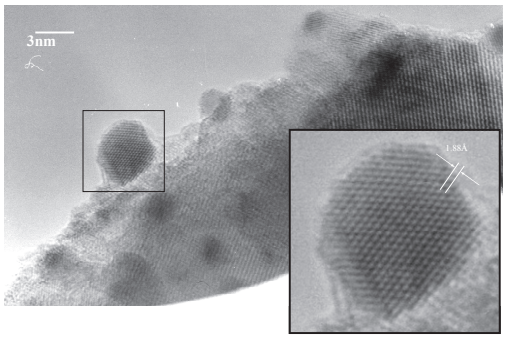


図６　Pt-Ru/TiO_2触媒の TEM 像

３．３．　炭素材料の TEM 観察

カーボンナノチューブに代表される様にナノ構造を制御した新しい炭素材料は，新規な機能を有する電子デバイスや水素貯蔵材料への応用の可能性から様々の分野で精力的に研究開発が行われている．これらの炭素材料の多くの機能はグラフェン層の積層の仕方に強く依存するため，微細な構造評価が必須である．通常グラファイ構造の解析にはラマン分光法等が用いられているが，TEM 観察ではグラフェン層の積み重なり様が直視できる利点がある．

酸化物に担持した Ni や Pd，Fe などの金属触媒上でメタンやアセチレン等の分解を行うと様々な形態のナノカーボンが生成する．図７に炭化水素の分解によって得られたナノカーボンの TEM 像を示す．Ni/SiO_2 を触媒として用いメタンの分解を行った場合，図 7(a)に示す様に非常に長いカーボンナノファイバーが生成する．このカーボンナノファイバーをよく観察すると長軸方向に傾いてグラフェン層が積層したヘリングボーン型のグラファイトナノファイバーであることが分かる．ナノファイバーの先端を探し出して観察してみると，ニッケル結晶からファイバーが成長しており，これはメタン分解によって生成したカーボンがニッケル結晶中にいったん溶解し，結晶の反対側からグラフェンファイバーが伸びていくものと考えられる．これに対して Pd/SiO_2触媒の場合(b)，分枝したカーボンナノファイバーが生成する．触媒の Pd 金属結晶の成長した平面（テラスと呼ばれる）からファイバーが生成することによってこの分枝構造が生成する．また，Fe/Al_2O_3触媒上でアセチレンの分解を行った場合は(c)，多層カーボンナノチューブが生成する．

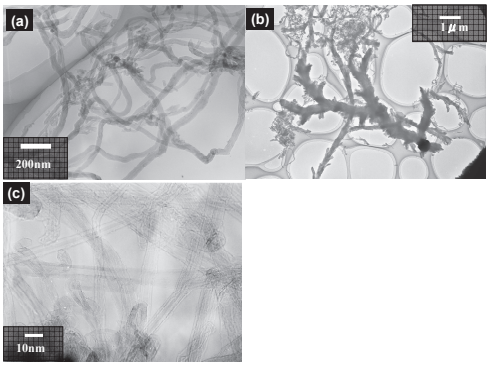


図７　カーボンナノ構造体のＴＥM像

以上見てきたように，高機能な固体触媒やナノ構造体の機能の多くはそのナノ構造に由来している．TEM 観察はナノ材料の研究開発において，今後もますます重要なツールとして発展するものと思われる．

参考文献

(1) S.Naito, M.Ue, S.Sakai and T.Miyao, “Unique adsorption behavior of H_2 and CO over group 8-10 metals encapsulated inside silica nanotubes and nanocapsules”, *Chem.Comm.*, p.1563(2005).

(2) T.Miyao, Y. Saito, S.Naito, “Preparation of alumina and silica-alumina nanotubes encapsulating platinum ultrafine particles.” *J.Mater.Sci.Letters*, **22**, p.543(2003).

(3) Toshihiro Miyao, Koji Minoshima and Shuichi Naito, “Remarkable Hydrogen Occlusion Ability of Hollow Ir-SiO_2 Nanoparticles Prepared by Reversed Micelle Techniques”, *J.Mater.Chem.,* **15**, p.2268(2005).

(4) Toshihiro Miyao, Masaya Yamauchi, Hiroaki Narita, and Shuichi Naito, “Remarkable Support Effect for Liquid Phase Methanol Reforming with Water over Supported Pt-Ru Catalysts”, *Applied Catalysis A General*, **299**, p.285(2006).

(5) Y.Sato, K.Terada, S.Hasegawa, T.Miyao and S.Naito, "Mechanistic Study of Water-gas-shift Reaction over TiO_2 Supported Pt-Re and Pd-Re Catalysts", *Appl.Catal.A General*, **296**, p.80(2005).

(6) S.Tauster, S.Fang, and R.Garten, *J.Amer.Chem. Soc.*, **100** (1978) 170.

2005年度（ 平成17年度）工学研究所年次報告

１．人事　（運営委員）

所　　長	岩田　衛　教　授
工学部長	西久保忠臣　教　授
機械工学科	浦田　暎三　教　授
電気電子情報工学科	中山　明芳　教　授
応用化学科	岡本専太郎　助教授
経営工学科	瀬古沢照治　教　授
建 築 学 科	室伏　次郎　教　授
生物学教室	朝倉　史明　助教授

本研究所の職員　教務技術職員 萩原健司
　　技術員 八高優勝

２．予　算

平成17年度の予算・決算額を表－１に示す。

表－１　（単位：千円）

業　務　項　目	予 算 額	決 算 額
本 部 運 営	2,337	1,130
大型共同設備管理運営	4,200	2,342
工学研究所共同研究*	14,000	14,100
合　　計	20,537	17,572

*工学研究所共同研究内訳

共同研究代表者	予算額（千円）
山　口　助教授	8,000
柏　木　専任講師	4,000
田　村　助教授	2,000
計	14,000

３．共同研究

平成17年度の工学研究所共同研究を表－２に示す。

表－２

電気	助教授	山口　栄雄	先験的熱閉じ込めによる熱伝導率の制御
物理	教　授	大成　逸夫	
電気	助　手	米田　征司	
経営工学	専任講師	柏木　利介	放射線医療・被曝そして宇宙ガンマ線観測にも有効なダイヤモンド・リコイル・テレスコープ(DCRT)の開発
情報	助教授	日比野欣也	
経営工学	助　手	奥野　祥二	
学外者	2名		
物理	助教授	田村　忠久	放射線高速計測システムの耐放射線性能向上のための研究開発
学外者	3名		

４.講演会

『建築物の美装性とエイジング』

講師：首都大学東京　橘高　義典　教授

日時：平成 17 年 10 月 3 日　16:20〜17:50

場所：16 号館セレストホール

講演内容：

建築デザインにおいては，新築時の価値だけではなく，時間経過に伴う価値の向上にも考慮することが重要であろう．建築大辞典第２版（彰国社）によると，エイジングには，「年月の経過に伴い建物の景観的な質が向上する働き」という意味がある．理想的なエイジングとは，新築時には新しさの価値があり，時間の経過とともに、新築時とは異なる新たな価値が生じることである．メンテナンスをあまり必要とせず，時間が維持でき，むしろ美的価値が向上するエイジング建築は,地球環境保護の面からも今後重要となる.この，エイジング効果を得るための条件について，具体例を挙げながら解説する．

５．大型装置使用実績

平成 17 年度の大型装置装置使用実績を表－３に示す。

表－３　（時間）

研究室名	TEM	SEM	XRD	XPS	ICP	ELS	CCD
機械工学科	22.5	22.5	17.5	0	0	0	0
竹村研究室		22.5					
田島研究室	22.5		17.5				
電気工学科	0	392	232	134.5	0	712	0
穴田研究室						712	
大野研究室		2	31				
中山研究室			2				
平手研究室		358	182.5	134.5			
山口研究室		32	16.5				
応用化学科	672.5	375.5	213	543	336	0	58
井川研究室		67.5			40		
岡本研究室							32
小池研究室	149	63			88		
小出研究室		102.5		17			
桜井研究室							9
佐藤(憲)研究室							9
佐藤(祐)研究室	156.5	103	180	359.5	136		
内藤研究室	367		11.5	37.5			
西久保研究室							8
横澤研究室		18.5					
山村研究室		21	21.5	129	72		
化学教室	465	252.5	520.5	92	0	0	0
亀山研究室		130.5					
田島研究室	465	122	520.5	92			
理学部	0	0	41.5	13	0	0	0
森研究室			28				
山口研究室			13.5	13			
合計時間	1160	1042.5	1024.5	782.5	336	712	58
機械工学科（%）	1.9	2.2	1.7	0	0	0	0
電気工学科（%）	0	37.6	22.6	17.2	0	100.0	0
応用化学科（%）	58.0	36.0	20.8	69.4	100	0	100
共通教室（%）	40.1	24.2	50.8	11.8	0	0	0
理学部（%）	0	0	4.1	1.7	0	0	0

神奈川大学工学研究所所報執筆規程

1978年（昭和53年）2月 5日
改訂1988年（昭和63年）4月13日
改訂1990年（平成 2年）7月18日
改訂1991年（平成 3年）5月29日
改訂1994年（平成 6年）1月26日
改訂2005年（平成17年）1月27日

1．投稿資格

投稿筆頭者は原則として神奈川大学工学部属教職員とする．ただし原稿を編集委員会が依嘱する場合はこの限りではない．また連名者については制限しない．

2．記事の種類

巻頭言

論説 学問・技術・本研究所の事業・動向などに関する論説，意見．

総合論文 専門の学協会などに発表された研究論文を骨子として，著者の一連の研究をまとめ，これにその分野における地位を明らかにするような解説を若干つけたもの．

共同研究報告 発足時点では〔共同研究の紹介〕，中間時点では〔共同研究の現況〕，研究終了または一段落の時点では〔共同研究の成果要約〕として，その現状が報告される．

総説 総合論文と略同一性格の記事であるが，解説的色彩の強いもの．

トピックス その時々のトピックスについての展望あるいは解説．

随想 研究・開発などの思い出，意見，感想，経験談など．

国際交流研究 学外（国内，国外）における研究・講義・出張に関する経験談など．

特集 その号の特集として特別記事を設けることがある．

3．用語

用語は和文とする．ただし総合論文に限り欧文でもよい．また〔英文目次〕作成のため，原稿には〔英文題目〕のほか〔著者氏名〕および〔職名，所属〕の英語名をつける．

4．提出期日

その年度により定める．

5．頁数

以下の頁数はすべて〔刷り上り〕のものを示す．

総合論文 原則として20頁以内．和文の場合は〔欧文内容概要（1頁以内）〕，欧文のときは〔和文内容概要（1頁以内）〕をつけることができる．

論説・随想 原則として4頁以内．

総説・トピックス・その他の記事 原則として8頁以内．

6．原稿の書き方

原稿の書き方は，この〔規程〕ならびに〔神奈川大学 工学研究所 所報 執筆要領〕による．

7．原稿の責任と権利

掲載された論文などの内容についての責任は著者が負うものとする．またその著作権･編集出版権は〔神奈川大学 工学研究所〕に属する．

8．採否

原稿の採否および分類は〔神奈川大学 工学研究所 編集委員会〕において行う．

9．原稿の提出先

原稿の提出先は〔神奈川大学 工学研究所 事務室〕とする．そこで受領した日を原稿受付日とする．

10． その他

（1）原稿の枚数が規定限度を超過する場合は委員会の承認を要するが，状況により超過分の実費を徴することがある．

（2）図が印刷に不適当な場合は，専門家に依嘱して書直すことがある．この場合の経費は著者負担とする．

工学研究所所報執筆要領

工学　太郎*　　研究所　花子**

Making Reports of Research Institute for Engineering

Taro KOUGAKU*　　Hanako KENKYUJO**

１．緒言

□この工学研究所執筆要領は，このファイル自体が所報原稿のテンプレートになっているので，著者が別にタイプしてある原稿をこの様式内にペーストすれば，以下に記載する体裁の原稿が作成される．

□テンプレートファイルは工学研究所事務室から著者あてにメールにより送付する．

□原稿は，テンプレート（A4 版）に従って執筆し，提出の際は，印刷した原稿（ハードコピー）とそのデジタルデータ（ファイル）を提出する．ファイルは MS Word（Windows または Mac）または TEX とする．

□原稿記載の順序は，標題，本文，文献，付録，である．

２．本文及び原稿の体裁全般

□A4 版用紙を用い，本文レイアウト（1 ページあたりの文字数）は，25 字×45 行×2 段＝2250 字とする．ただしタイトルのみは 1 段組である．

□MS Word の“ページの設定”の“文字数と行数”のタブ中の設定はフォントサイズ 8，段数 2 で文字数 26，行数 45 とし，“余白”のタブ中の設定は上 45 下 40 左 34 右 34 としてある．

□和文文字は MS 明朝，英文文字は Times New Roman とする．ただし，記号などに Symbol を用いることが出来る．

□本文，図，表及び式は原則として左右の段にまたがらないように書く．

□小数点は〔.〕を用い，カンマ〔,〕を用いない．

□句読点は〔,〕〔.〕とし，〔、〕〔。〕を用いない．

□脚注はなるべく避ける．

３．記号及び単位の書き方

□諸記号の字体は次のとおりとする．

（種　別）	（字　体）	（例）
数学的演算記号	立　体	sin，sinh
単位記号	立　体	cm，kg，MΩ
ベクトル量	斜体ゴシック	速度 $\boldsymbol{V}$，力 $\boldsymbol{F}$
量記号	斜　体	周波数 f，長さ l
化学記号	立　体	H_2O，$BaTiO_3$

□文字の大きさは**表 1** に示すとおりとする．

４．図，写真及び表の作成

□図，写真及び表が単段（片側）に収まらない場合は 2 段（両側）にまたがって書くことができる．

□図，写真及び表の横に空白ができても，その空白部には本文を記入しない．

□図，写真，表と本文及び図表相互の間は 1 行余白をとる．

□図，写真，表の見出しは本文と同一言語とする．図及び写真の見出しはその下に，表の見出しは上に書く．

□図，表中の記号類は，小さすぎて判別不能にならないようにする．また，複雑な記号類は，大きめに描くようにする．

□写真は本文に貼るだけでなく，写真のファイルを添付する．

５．数式

□数式エディタを用いて記載する．

□式は単列に書くように整形する．

□字体は Times New Roman を使う．ただし，Symbol は使用できる．

□数式は原則として文章の行の中に入れない．やむを得ず挿入する場合には，1 行高さを守る．

*教授　機械工学科
Professor, Dept. of Mechanical Engineering
**助手　建築学科
Research associate, Dept. of Architecture

例１〔分数式の例〕
…これは $(a+b)/(c+d)$ の形を取る．
例２〔指数式の例〕
…電流は $i = I\exp(-t/x)$ の形となる．
□文中でなく，式を別行にする場合には，次のように書いても良い．その結果，〔上例の式〕は次の形を取る．
例１〔分数式の例〕
…その結果，これは次式の形を取る．

$$\frac{a+b}{c+d} \tag{1}$$

例２〔指数式の例〕
…その結果，電流は次式の形となる．

$$i = Ie^{-t/x} \tag{2}$$

６．文献記載方法

□文中の文献引用は，引用箇所に文献ナンバーを上付きカッコでつける．
□参考文献（References）はナンバーに（ ）を付して本文末に列記する．
引用文献は原則として以下の A，B のように記載する．
（A）雑誌の場合
(No.) 著者名，“標題”，雑誌名，巻－号（発行年-月），p.ページ.
例
(x) 赤坂憲夫，青山幸夫，宮下俊夫，“広帯域増幅器の特性”，電子通信学会誌，**52**－192（1977-8），p.1125.
(x) E. W. Euller and R. F. Stoessel, “……”, Mech. Engng., **90**-3 (1968-3), p.42.
（B）単行本の場合
(No.) 著者名，“書名”，発行所名，（発行年），p.ページ.
例
(x) 田部浩三, 竹下　誠，“塩酸触媒”, 産業図書，（1976），p.1225.

７．原稿作成上のヒント

□このテンプレートは Windows MS Word 97 で作成してある．著者が別に書いた原稿をコピーペーストすれば，自動的に割付が決定する．
□Word からコピーペーストする際, 書式情報無しのテキストのみをペーストするには，コピーした後にメニューの “編集” から “形式を選択して貼り付け...” を選択し，“テキスト” を選ぶ.
□第 1 ページ標題部分は 1 段組である．この部分では，項目ごとにコピーペーストが必要である．
□本文は著者原稿から図，表，脚注を除いてコピーし，テンプレートにペーストする．その後で，図等のスペースを作ってテキストボックスを挿入し，その中に図などをペースト，あるいはファイルからの挿入をする．
□第 1 ページの脚注（著者所属など）には，直接入力しても，コピーした内容をペーストしても良い．ただし、MS Word の制限により、脚注の機能を先頭の **“1. 緒言”** の後ろに見えないように白文字で “＊” をつけてある．ここを削除すると脚注も消えてしまうので注意が必要である．（標題下の著者名に脚注の機能をつけるべきだが，その場合は脚注が両段にまたがってしまうため，この形式を採用した）
□このテンプレートについて不明な点がある場合は，工学研究所　事務局に問い合わせる．

８．結言

□校正は著者に依頼するので，校正刷りが到着後，速やかに校正を済ませて, 工学研究所　事務室まで返送する．校正は，内容が著者提出のハードコピーと一致することを確かめるものであって, 変更を加えることはできない．
□著者の責任による修正が生じた場合には，その修正に必要な実費を徴収する．

表１　文字及びサイズ

題目	MS 明朝	14 ポ
著者名	MS 明朝	10 ポ
欧文題目	Times New Roman	12 ポ
欧文著者名	Times New Roman	9 ポ
本文	MS 明朝	8 ポ
本文の各節・小項目	**MS ゴシック**	**8 ポ**
図・表の見出し	**MS ゴシック**	**7 ポ**
参考文献・脚注	MS 明朝	7 ポ

参考文献

(1) 工学太郎，研究所花子，“執筆要領”，工学研究所所報，27 号（2004－11），p.126.

（雑誌の場合）

(2) 工学太郎，研究所花子，“工学研究所所報 27 号”工学研究所，(2004)，p.126.

（単行本の場合）

付録

［参　考］研究所所報の配布

刷上がった所報は以下の各者に 1 部宛贈呈する．

（1）本学理事および工学部所属教職員．

（2）理，工学部を有する国内の大学またはそれに準ずる学校．

（3）官公庁の研究機関．

（4）主要の学協会．

（5）民間の主要研究機関．

（6）その他委員会が認めたもの．

［資　料］英文用語一覧

Research Institute for Engineering	工学研究所
Science Reports of Research Institute for Engineering	工学研究所所報
Faculty of Engineering	工学部
Department（Dept.）of	学　科
Mechanical Engineering	機械工学
Electronics and Informatics Frontiers	電子情報フロンティア
Material and Life Chemistry	物質生命化学
Information Systems Creation	情報システム創成
Architecture	建築学
Mathematics	数　学
Physics	物　理
Chemistry	化　学
Biology	生物学
Professor	教　授
Professor Emeritus	名誉教授
Associate Professor	助教授
Lecturer	講　師
Research Associate	助　手
Technical Assistant	技術員
Graduate（M.C.）	大学院（博士前期課程）
Graduate（D.C.）	大学院（博士後期課程）
Research Student	研究生
Dean	学部長
Chairman of Dept. of …	学科主任
Abstract	概　要

注：工学部，助教授，助手，技術員，研究生などについては種々の呼称があるが，上記のように統一する．

編集後記

現在では，工学の各分野の学会，国際会議などの原稿は，それぞれが定めた書式で原稿を書いて提出するようになっています．若い方々はこれが当然で，それ以外の提出様式は知らないという人もいるかも知れません．ずっと以前は研究者の作る原稿は，日本語ならば手書き，欧州の言語でもタイプの平打ちで，出版側が活字を組んで印刷形態にしていたものでした．これを版組みといいますが，版組みの技術は光学機器を使って活字からの脱却が行われました．一方原稿提出側もワードプロセッサの普及により，ここ10年ほどの間に手書き原稿は，めったに見られなくなりました．

この数年の間にもワープロ性能の向上と，ネットを使った文書送付などの周辺技術の向上によって，変化はさらに続きました．現在国際会議などの原稿は，執筆者が印刷形態に合わせた原稿を PDF ファイルとして作成し，会議のオーガナイザーに送ることが一般化しています．ジャーナル原稿の場合は，PDF にする前の原稿を，学会所定のワードプロセッサのテンプレートに著者がテキストや図を流し込めば良いようにしているところが多いようです．

さて，わが工学研究所所報はどうしていたかといいますと，実は昨年までは手書き原稿でも，ワープロ作成でも良く，執筆者は研究所所定の原稿用紙に書き込んだハードコピーを提出するという化石状態でありました．これでは印刷費も高く，印刷に要する時間も長く，間違いも多くなりがちです．そこで本年度はこれを改め，原稿は研究所所報の印刷形態にあわせたテンプレートを全所員にメールで配信し，執筆者はテンプレートに記入したファイルと，プリントアウトしたハードコピーを提出することにしました．急な変更でありましたが，混乱も無く本年度所報を完成する運びとなりました．執筆者はもとより，皆様方のポテンシャルが，実は十分高いということがこの結果に現れています．敬意を表するとともに，ご協力に感謝する次第です．

（浦田暎三）

工学研究所　所報（No. 29）

工学研究所所長　　許　　瑞邦

工学研究所　所報　編集委員会
委 員 長　浦田　暎三（機械工学科）
副委員長　中山　明芳（電子情報フロンティア学科）
委　　員　山村　　博（物質生命化学科）
瀬古沢照治（情報システム創成学科）
室伏　次郎（建築学科）
朝倉　史明（生物教室）

SCIENCE REPORTS (No. 29)
of
Research Institute for Engineering (KANAGAWA University)

Director of the Institute　Zuihou KYO

Chief Editor	Eeizo URATA	(Dept. of Mechanical)
Deputy Editor	Akiyoshi NAKAYAMA	(Dept. of Electronics and Informatics Frontiers)
Editor	Hiroshi YAMAMURA	(Dept. of Material and Life Chemistry)
	Teruji SEKOZAWA	(Dept. of Information Systems Creation)
	Jiro MUROFUSHI	(Dept. of Architectonics)
	Fumiaki ASAKURA	(Dept. of Biology)

神奈川大学工学研究所所報第29号

2006年11月27日　印　刷
2006年11月30日　発　行

編集兼発行者　神奈川大学工学研究所
〒221-8686　横浜市神奈川区六角橋３丁目27番

印　刷　者　中　村　栄　一
東京都港区三田５丁目14番３号

印　刷　所　昭和情報プロセス㈱
東京都港区三田５丁目14番３号

RESEARCH INSTITUTE FOR ENGINEERING
KANAGAWA UNIVERSITY
3-27 Rokkakubashi, Kanagawa-ku, Yokohama, 221-8686, Japan