

# 水曜会誌

第23卷 第7号

## 目 次

### 退官記念講演

京大45年の思い出	花崎 紘一	707
量子材料科学曼荼羅世界	足立 裕彦	713
金属間化合物の研究	山口 正治	721
物性における個と全体 -不均質構造における場と流れの相関-	吉田 起國	726

### 大会記念講演

アルミニウム産業の成長を支える材料技術 -現状と課題-	永田 公二	737
産業災害防止のためのリスクマネジメント	小川 輝繁	748

### 講 座

金属学とその研究手法の進歩 -研究生活を顧みて〔III〕	村上陽太郎	755
------------------------------	-------	-----

### 談 話 室

自己集積化分子膜	杉村 博之	771
超軽量ポーラス金属の創製	馬渕 守	775
社会人大学院について思うこと	松田 陽一	778
名字の話／熱田姓のいわれ	熱田 善男	783
最近のスチール誌の中に見たロシア鉄鋼業の再生への歩み	増尾 誠	791

### 研究速報

.....	795
-------	-----

### 会 報

.....	819
-------	-----

会員消息	840
------	-----

### 卒業者名簿

.....	853
-------	-----

平成16年12月25日発行

京 都 大 学  
水 曜 会

# 技術を拓く、アルミが拓く

お客様の製品開発や技術革新ニーズに  
アルミニウムの無限の可能性が応える

古河スカイが国内最大の  
アルミニウム・メーカーの総合力を駆使してサポートいたします

 古河スカイ株式会社

---

本社／東京都墨田区錦糸1-2-1 アルカセントラルビル20階  
TEL. (03) 5611-2300 FAX. (03) 5611-2460 ホームページ：[www.furukawa-sky.co.jp/](http://www.furukawa-sky.co.jp/)

創業以来60余年――

私たちは合金生産技術の可能性を

追求しています。

## 非鉄 中間合金

りん銅、マンガン銅、けい素銅、  
ボロン銅、鉄銅等

## 銅合金 鋳造加工

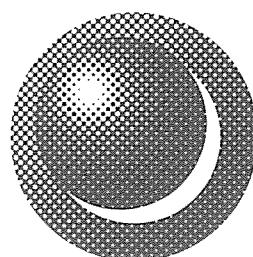
耐磨耗性銅基合金(OMアロイ)  
超電導用プロンズ及び各種青銅  
真空溶解による鋳造品



株式会社 大阪合金工業所

代表取締役社長 水田泰成

本社 〒910-3131 福井市白方町第45号5番地9 TEL (0776)85-1811(代) FAX (0776)85-1313  
大阪 〒567-0005 茨木市五日市1丁目2番1号 TEL (0726)26-1313(代) FAX (0726)26-1353  
東京 〒104-0031 東京都中央区京橋3丁目9番4号 TEL (03)3563-0301(代) FAX (03)3563-0302



JFE

挑戦・柔軟・誠実  
JFE スチール



JFE スチールは、  
常に世界最高の技術をもって  
社会に貢献します。

JFE スチール 株式会社

〒100-0011 東京都千代田区内幸町2丁目2番3号(日比谷国際ビル) TEL 03(3597)3111 URL <http://www.jfe-steel.co.jp>

# AICHI STEEL

あなたの笑顔が、  
わたしのしあわせ。

人と人、そして人と自然の  
コミュニケーションを大切に  
幸せな未来を  
あなたといっしょに  
創造したいと願っています。

(株)愛知製鋼株式会社  
TEL 052-8666  
愛知県東海市荒尾町ワノ割1番地  
TEL 052-604-1111(代表)  
<http://www.aichi-steel.co.jp/>

**NEWJEC**



自然と人を技術で結ぶ

☆美しい国土、安全快適な環境の保全  
省エネルギー、水の循環、資源の有効利用  
を考え、総合的提案を行います。

☆魅力的で高度な生活空間の創造  
災害に強く、生き生きとしたまちをつくるため  
あらゆる技術分野の知恵を結集します。

☆少子高齢化社会での健康的な生活の確保  
地域に密着した福祉施設、伝統や文化を樂  
しめる住民参加型社会実現を目指します。

総合建設コンサルタント  
株式会社 ニュージェック

大阪本社：大阪市中央区島之内 1-20-19  
東京本社：東京都文京区西片 1-15-15

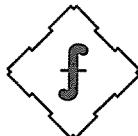
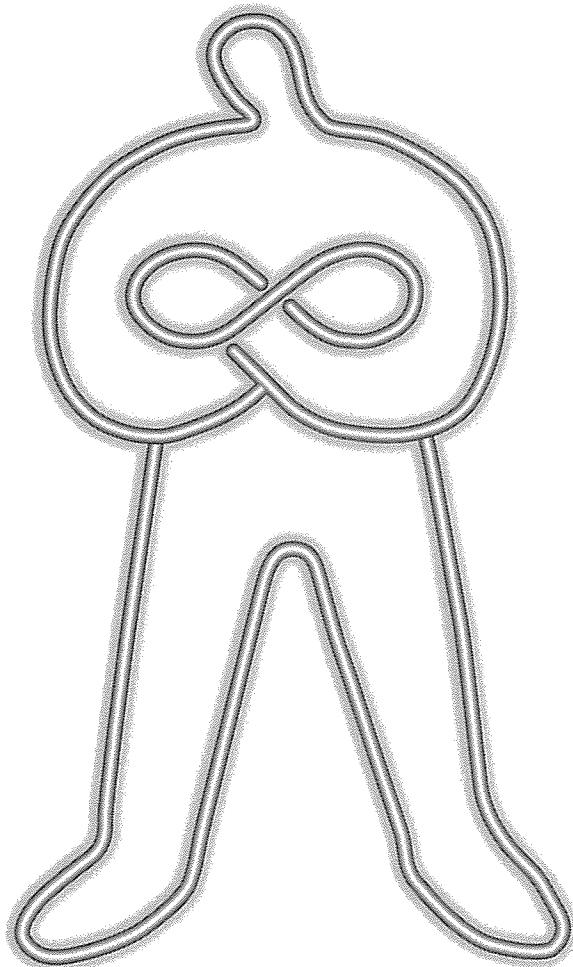
TEL.06-6245-4901  
TEL.03-5800-6701

URL <http://www.newjec.co.jp>



*METAL STYLIST*

FUKUDA  
FUKUDA METAL FOIL & POWDER CO., LTD.



メタルスタイリスト -

**福田金属箔粉工業** 株式会社

本社／京都市山科区西野山中臣町20番地  
TEL.075-581-2161(代) FAX.075-581-7271

工場／京都・滋賀 支店／東京・名古屋・関西

<http://www.fukuda-kyoto.co.jp>

見て  
新日  
鐵の  
鮮度。

<http://www.nsc.co.jp>

新日鉄のホームページが、新しくなりました。

情報の鮮度と見やすさが、新しい。

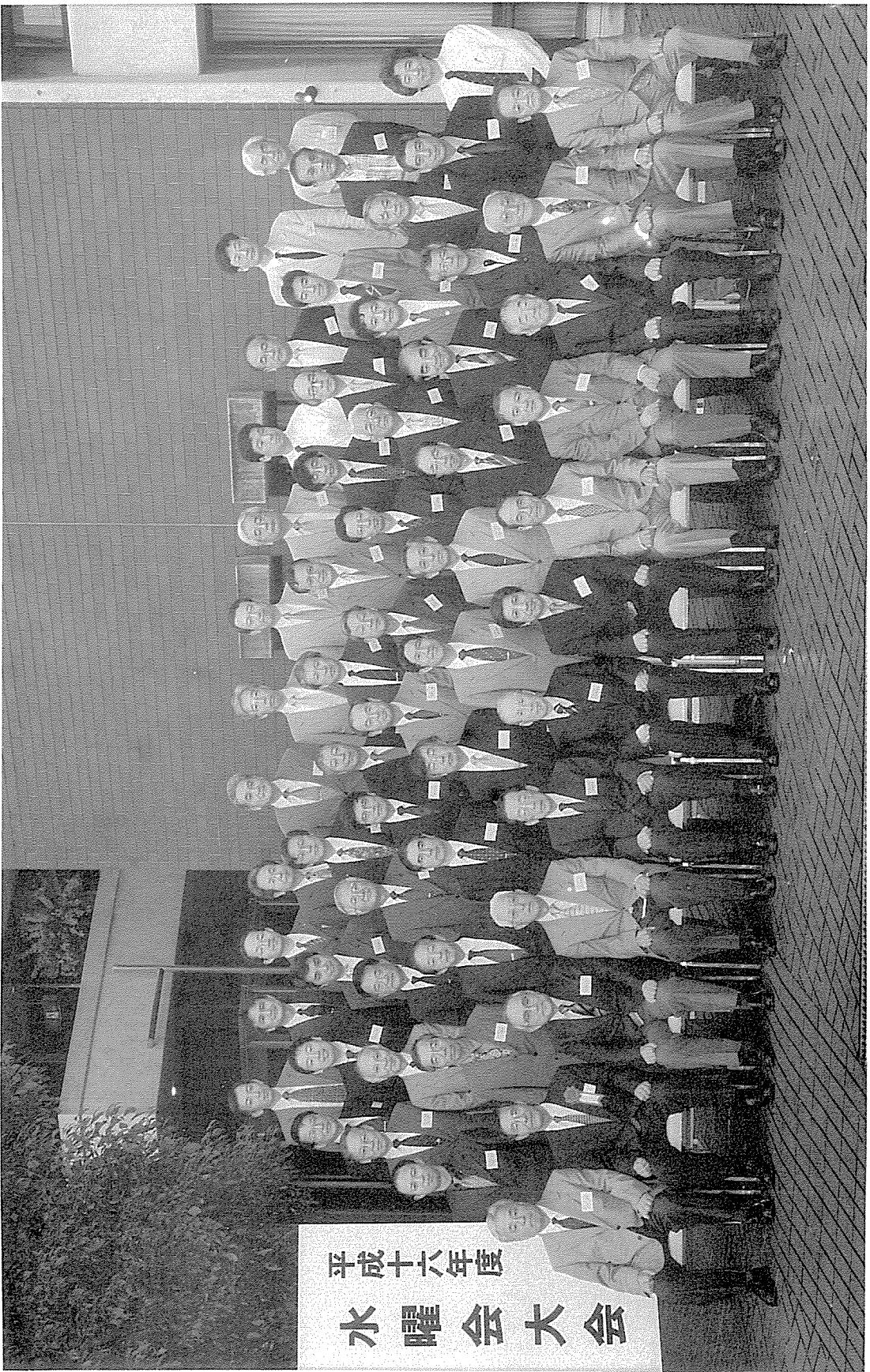
アクセスのしやすさが、新しい。

IR情報、環境情報、グループ情報も、新しい。

いろいろ新しい新日鉄を、さあ、ご覧ください。

◎お問い合わせは：広報センター Tel.03-3275-5016

平成16年度 水曜会大会 記念写真（平成16年6月12日 京大会館にて）

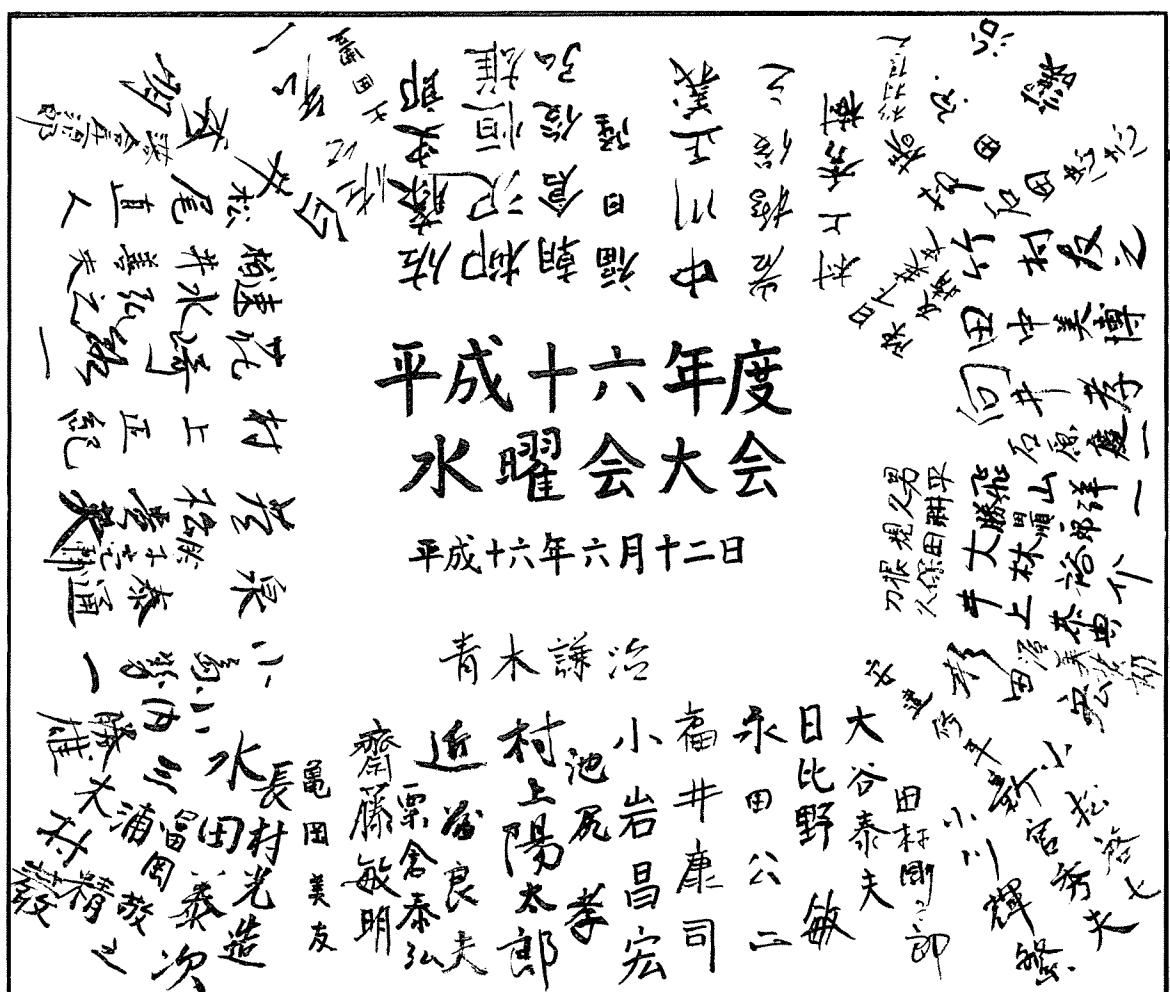


# 平成十六年度 水曜会大会

平成十六年六月十二日

青木謙治

小畠 永  
大谷 田  
日比野 公  
泰夫 錦  
上陽 太郎  
藤井 昌宏  
池尻 宏司  
斎藤 勝良  
栗原 泰弘  
山岸 俊明  
太郎 次



## 退官記念講演

## 京大45年の思い出

花崎紘一\*

Reminiscences of My 45 Years at Kyoto University

by Koichi HANASAKI

## はじめに

私は昭和34年4月に京都大学工学部鉱山学科に入学し、4回生では故伊藤一郎先生ご担任の採鉱学第一講座に配属された。その後、大学院修士課程、博士課程へ進学し、昭和43年6月からは同講座（資源工学教室開発工学講座と名称変更）の助手として、教育と研究に携わることになった。昭和51年9月から2年間、教室の皆さんのご協力を得て、カナダの客員研究員として国立火薬研究所で研究に従事させて頂いた。昭和60年4月には故藤中雄三先生ご担任の応用計測学講座の助教授として配置換えになり、平成6年10月に教授に昇任した。同8年4月からは大学院重点化に伴う改組により探査計測システム講座計測評価工学分野の担任になった。さらに同15年4月の地球工学科系専攻統合改組によって社会基盤工学専攻地殻工学講座ジオメカトロニクス分野と改称され、本年3月31日の停年退官の日までお世話になった。ひとえに今は亡き伊藤、藤中両先生をはじめ、学生時代からお世話になった寺田先生、佐々先生など多くの先生方のご指導とご鞭撻の賜物と心から感謝し、厚くお礼申し上げる次第である。

本稿は平成16年5月16日に京都ブライトンホテルでお話を頂いた退官記念講演の内容を取りまとめ、当日充分お話を出来なかった留学当時のカナダ事情も付け加えさせて頂いたものである。

## 宇治分校と伊藤先生

入学当時一回生は宇治分校（写真1）で教養課程の教育を受けることになっていて、新入生ガイダンスには本部キャンパスから専門課程の主任の先生が来られた。長

身の骨張った体を紺のダブルに包み、物静かではあるが威厳に満ち、ちょっと怖そうな先生というのが私の第一印象であった。この先生にその後ずっとお世話になることになるとは知る由もなかった。その時も自己紹介されたと思うが、2年後本部構内の教室（写真2）で専門課程の授業を受けるまで、伊藤一郎先生（写真3）というお名前は存じ上げなかった。先生は残念ながら十数年前に亡くなられたが、多くの門下生に親しまれ、毎年5月に数十人が命日のお墓参りに集まっている。今年はちょうど私の退官講演の前日がその日に当り、学生時代の思

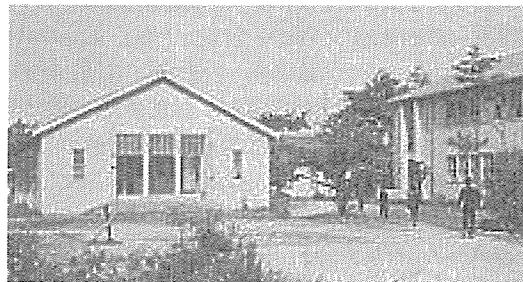


写真1 宇治分校の校舎（水曜会誌）



写真2 鉱山学学科校舎（水曜会誌）

\*工学研究科教授



写真3 伊藤先生 (S43卒業アルバム)

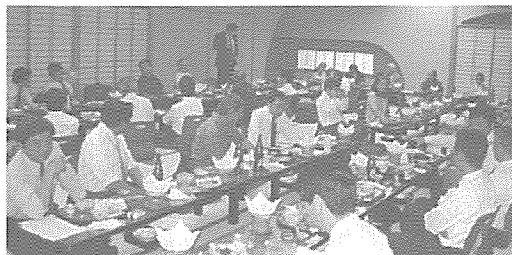


写真4 伊藤先生を偲ぶ会 (2004.5.15)

い出を語りあって、先生のご遺徳を偲んだ（写真4）。

### 卒業論文

4回生になると学生は各自一つの講座に配属され、特別研究（卒業論文）の指導を受ける。当時、鉱山学科には、理学的な地質学（鉱床学）をはじめ、探査のための電気と弾性波の知識（物理探査）、採鉱のためのトンネルと地下空洞の開削に必要な発破技術（採鉱学第一）、その維持のための岩石力学（採鉱学第二）、採取した鉱石処理のための化学（選鉱学）、および機械設備のための機械工学（採鉱機械学）など多岐にわたる教育と研究がなされていた（括弧内は当時の講座名）。このように学問や技術の幅が広く、後ほど総合工学のジャンルに分類された所以でもある。その頃、国内の鉱山が少なくなっていく傾向にあり、各講座とも、それまでに培ってきた研究業績や設備を生かしながら、鉱山関連以外の研究テーマへの転換を図っていた。

私は岩石の掘削が主なテーマであった伊藤先生の採鉱学第一講座を希望した。講座には助教授の故若園吉一先生、助手の寺田孚先生と佐々宏一先生がおられ、ゼミや卒業論文のご指導を受けた。寺田、佐々先生には今でも大変お世話になっている。私は機械いじりが好きなので、図1に示す火薬で機械部品を加工する爆発成形という新しい技術の基礎的研究をテーマに選んだ。この技術は実

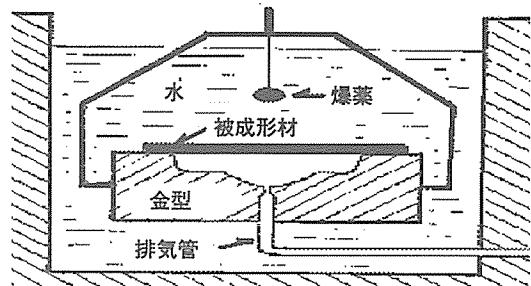


図1 爆発成形の概念図

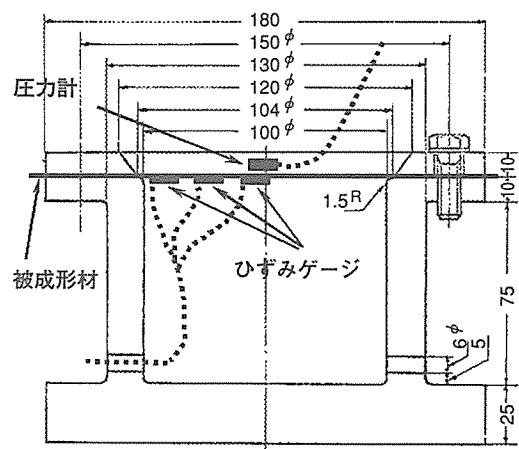


図2 試作金型の設計図

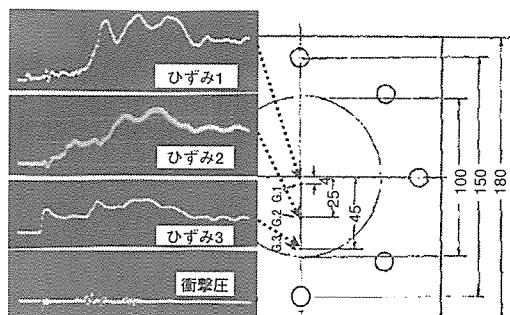


図3 ひずみ記録（上3段）と圧力記録（下段）

際には大掛かりな装置になるが、実験室では中古のドラム缶を水槽に改造し、3号電気雷管を用いる小規模なもので行った。図2のような成形型を自分で設計するという初めての経験に、意氣込んで取組んだものである。実験では水中衝撃圧と被成形材のひずみの時間的変化を測定し、図3に示すように、被成形材は金型の周縁部から伸び始め、変形場所が中心部へと移動していくことが観

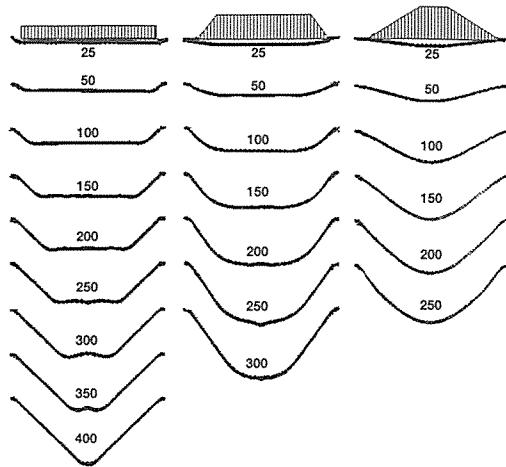


図4 爆発成形のシミュレーション

測された。後年になって、この現象の数値シミュレーションが図4に示すように可能となり、水中衝撃圧の分布と被成形材の変形挙動との関係を定量的に把握することが出来るようになった。

## 宿題

ところで、図2には現在のJIS規格の表記法では誤りが2つある。私が担当していた「工業製図」や「材料試験法」の授業でこの事情を既に講述していたが、この機を捉え「最終講義」まがいに、誤り部分を指摘してもらう復習問題を聴衆の皆さんに課した。答えは①寸法線を中心で切断せず連続させる、②寸法の補助記号( $\Phi$ , Rなど)は数字の前に書くの2つである。更に、「なぜこのJIS改定が行われたのか」についてのレポート課題を提出期限なしの宿題として課させていただいている。私の想像では、その頃コンピュータが急速に発達し、CADやCAMが広く使われ始めたことに関係していたのではないかと思う。そうなら、昨今IT革命がともすれば人間味を損ない一択の寂しさを覚えることが、その始まりであったのかもしれない。

## 海底発破の研究

昭和43年に助手に採用されたころ、本州四国連絡橋の実験工事が始まり、橋脚の基礎地盤整地に発破工法を採用することが検討された。我々の研究室では発破振動の予測と測定を受持ち、特に発破地点の近くにある石油コンビナートへの影響を究明した。図5は、大型計算機センターにあったオープン使用形式のシステム」を使って、発破時の海底と海水の挙動をシミュレートした結果の一例である。プログラム作成時間を除いて、計算と映

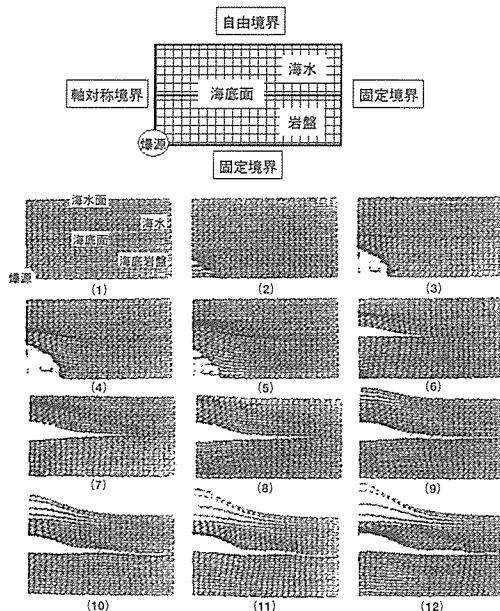


図5 海底発破シミュレーション

像作成まで今ならパソコンで5分と掛からないであろうが、当時は、システム予約、計算実行、8mmムービー撮影、現像と、1ヶ月は要し、今更ながらコンピュータの急激な発展に驚かされる。同図は左下すみの爆源から応力波が伝播し、海底面に達すると岩盤と海水の分離(キャビテーション)が起こり、さらに海水を伝わる波が水面を吹き上げる様子がよくシミュレートされている。このような方法で実際の現場地形に即したモデルについて計算し、地盤の振動を許容範囲に押さえるための火薬量の算定に必要なデータを提供した。残念ながら昭和48年に第1次オイルショックが発生し、起工式まで用意された本工事は直前で凍結された。私はこれらの一連の研究成果をまとめて学位を頂くことが出来、カナダの国立火薬研究所に赴くことが出来た。

## スラリー爆薬の研究

昭和51年9月からカナダの首都オタワで2年間、カナダ資源エネルギー省(DEMR 現カナダ天然資源省(DNRC))のカナダ鉱山エネルギー技術センター(CANMET)の火薬研究所(CERL)にポスドク・フェローとしてスラリー爆薬の基礎的研究に従事した。かつてCANMETで2年間研究しておられた佐々先生や寺田先生の紹介で実現したもので、オタワでの生活のアドバイスやご友人の紹介など先生方には大変お世話になったことを感謝している。研究所では、そのころスラリー爆薬の輸送中に起こる交通事故等の機械的衝撃による暴

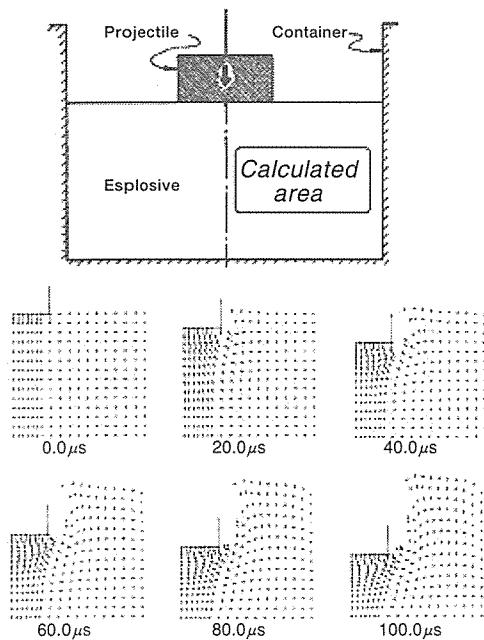


図6 スラリー爆薬の衝撃荷重のシミュレーション

発を防ぐための法規作成が行われていたらしく、スラリーより爆薬に平頭弾丸を撃ち込んでその速度およびサイズと爆発の有無の関係を調査していた。そのうち、数値シミュレーションによるスラリー爆薬の機械的挙動の把握の研究を受け持った。図6は計算結果の一例である。

### オタワの思い出

研究の話から逸れるが、オタワでの生活で感じたことなど、思い出を振り返りたい。

当時の日本では見られなかった（または知らなかった）珍しいものが沢山あり、合理的なものも多かった。土産話にしようと思って帰国したら、既に日本でも見られるようになっていたり、今日では常識になっているものもある。それらの思い出を順不同に列記して見たい。ただ4半世紀も前のことでもあり、数字や名前などの記憶が間違っていたり、独断的偏見の部分もあるのでお許し頂きたい。

#### \*第一印象

1976（昭和51）年9月中旬、カナダの首都の玄関にしては小じんまりとしたオタワ空港に家族3人が降り立ったときは、緯度の高い所とは思えないほどの暑さで、出迎えてくれた研究所マネージャーのA. Darling 氏が、この暑さはインディアン・サマーとも呼ばれる晩秋によくある現象で、そのうち直ぐに寒くなるよと説明してくれた。その通りに数日後には気温が下がり、仮住まいの



写真5 カナダ国会議事堂

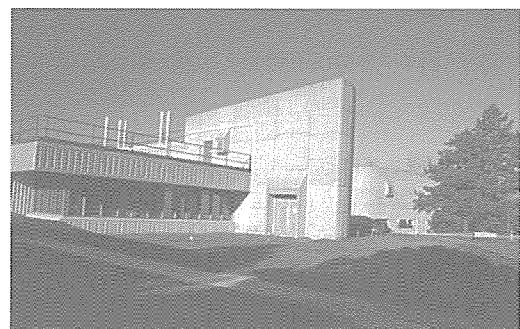


写真6 CERLの建物

アパートメント・ホテルの窓から見える樹木の葉は見る見るうちに落ち、一週間ほど枯れ木になってしまった。2年間のカナダ滞在の経験では、冬の訪問が早く、春は来たと思えばすぐに夏がはじまり、冬と夏が春と秋よりも長いことを実感した。

#### \*研究所・多民族国家

CANMETの本部は国会議事堂（写真5）がある市街地の中心にあるが、研究所（写真6）はそこから西へ20kmほど行った郊外にあり、数年前に広大な丘陵を切り拓いて新しく造られた研究所群の中にあった。他のどの研究所の建物もそれぞれユニークな形で広い芝生の敷地に点在していた。初日に紹介してもらった研究所のスタッフのルーツは、前以て聞いていた以上に多岐に亘っていた。Darling 氏はイギリス、共同研究を行い最もお世話になったK. K. Feng 博士は中国、よくスキーに連れてもらった上級研究員のR. Vanderveek 氏はオランダ、初対面の翌日がたまたま結婚式で印象的な現在 International Symposium on Fireworks の議長であるE. Contestable 氏はイタリア、その他フランス、デンマーク、ハンガリー、マレーシアなど出身の研究員や技官の人たちがいた。もちろん街中でも同様に多くの民族の人たちが見られ、その民族の違いが最もよくわかる光景

は真冬の小春日和に見られた。人々の服装がまちまちで、日本人なら薄手のセーターぐらいだが、少しでも日光を吸収しようとする北欧系の人は上半身裸であり、逆に赤道直下からと思われる人は皮ジャンパーにマフラー姿であった。また、カナダ到着間もないころ信号待ちしていると道を尋ねられ、私が外国人と思われていないことに驚いたものだった。

#### \*省エネ・カープール

省資源省エネルギーのキャンペーンが繰り広げられていて、どこにでもポスターが貼ってあった。第一次オイルショックの直後のことでもあったが、もっとひどい目にあったはずの日本では見られないほどの大規模で行われていた。カナダはカルガリーのオイルサンド、ナイアガラの水力発電をはじめ、森林資源などエネルギー大国であるにも拘わらずである。研究所での身近な例としては、オフィスの自室を無人にするときは必ず消灯していたし、政府機関内の書類の授受には差出人と受取人を書いては消し、書いては消して何度も使えるいわゆる「通い封筒」(写真7)を使うなど電力や紙の節約を期していた。さらに、「カープール」(写真8)という通勤システムを奨励していて、同じ方向の住宅地域から同じ職場に勤務するもの同士が数人でグループを組み、例えば週毎に交代で、誰か一人が他の人を送り迎えする。これによりガソリンや人的労力の節約、車の消耗低減を期している。私もフルサイズの中古車を買って、この仲間入りをした。ただ、仕事が終って帰るときも皆と一緒になので、急に残業したいと思っても不可能である。残業したいときは朝から自分で車に乗っていかなければならない。なお、燃費が悪くて省エネに反するフルサイズ車を、多少の後ろめたさで買ったのは、広いカナダでしか運転するチャンスがないと思ったからである。その後このサイズの大衆乗用車は生産されていないらしく、このときに乗っておいてよかったと思っている。

#### \*週休2日制・サマータイム

週休2日制をはじめて経験した。日本では帰国後5週

7休制などを経て完全週休2日制になるまで数年かかったので、帰国した時に感じた落差の最も大きなものであった。最近では日本でもハッピーマンデーとか云って、祝日のいくつかを月曜にする法律が出来たが、既にカナダでは祝日を金曜日か月曜日にし、ロングウィークエンドと言って長い休みに旅行やスポーツを楽しむことが出来た。また、今でも日本にないものにサマータイムがある。子供の頃日本でも一度経験していたものの、そのときは意味もよくわからず感心もなかったが、夏の長い日をレジャーや休養に有効に利用出来る合理的なシステムであることを実感した。ただ、それがいつ始りいつ終るかを知っていないとトラブルのもとになる。知らずに時計を調整しなかったために、朝いつもの時間に待っていてもカープールの迎えが来なかったり、まだ寝ているうちに1時間も早くたき起こされたりしたことがあった。短期の出張で国際会議などに出かけた時などでも、ちょうどサマータイムの切り替え日が含まれていて、危うく時間に遅れそうになったこともあった。

#### \*無料施設・税金・駐車違反

博物館、美術館をはじめ高速道路が無料であることは有難かった。逆に当時日本には無かった消費税（食品と子供用衣料は無税）には戸惑った。州毎に税率が異なり、オタワのあるオンタリオ州は当時は7%（現在は15%）、であった。しかし、年末に消費税額入りの領収書を添付して確定申告をすれば、支払った税金がいくらか還付されてきたが、消費税の逆累進性を緩和する制度であったのだろうか。

自治体の収入に直接寄与する駐車違反取締りの厳しさには驚くというよりもむしろ感心させられた。一般道路は勿論のこと、ホテルや大学の敷地内でも駐禁地帯に駐車すると、5分もしないうちにパトカーがやって来て交通切符を切られてしまう。沿道の住民や施設の警備員が直ぐに警察に通報するシステムになっているらしい。ホテルの売店で買物したとき、玄関わきに広い場所があつたので駐車し、10分ほどして戻ってくると切符が張られていた。ドアボーイが警察に連絡したそうである。大学

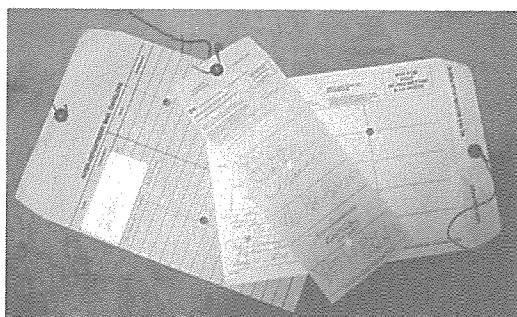


写真7 通い封筒

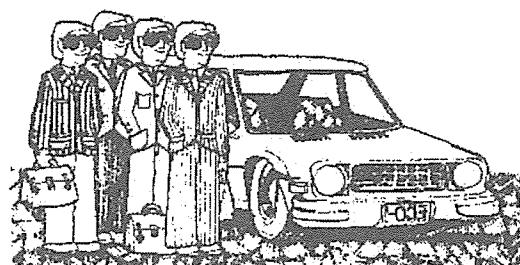


写真8 カープールの奨励ポスター

の購買部で本を買うため、その近くに車を止めて下車したとたん警備員に注意された。駐車場と逆方向に進んだ私の車を入り口からパトカーについて来ていて、駐禁場所に駐車しないように監視していたのである。

#### \*メートル法

アパートにテレビを買って見始めたころ、テレビ放送のカルチャーショックを感じたものであった。今の日本では普通になっているアンカーマンやキャスターによるニュースショーに新鮮味を感じ、CMのスマートさとインパクトに強烈な印象を受けた。子供向けのCMやマンガや教育番組にもについ見入ってしまったが、単に私の語学的幼稚性のためだったかも知れない。その中で、何のCMかわからない短いアニメーションが繰り返し流されていた。お母さんが子供の体温を測って38度°Cとか、大風で木が揺れて20m/sだと、自動車が疾走して100km/hというものである。そのころカナダでは国際単位への移行がなされていて、一般生活でもこれを使うようにとのキャンペーンの一環であることがわかった

#### \*英語・仏語

人口の数から言えばもちろんイギリス系とフランス系が多く、公用語も英語と仏語である。公共の標識やパンフレットは勿論、日用品・商品など全てに両国語で表記しており、用紙・材料や労力が全て2倍必要になり不経済である。ただ、イギリス系の人は西の州に多く、フランス系の人は逆に東の州に多く偏っていて、政府関係のものや、全国区的なもの以外は、片方の言葉を省略することもあるらしい。地理的にも政治的にも中心に位置するオタワ近辺は完全なバイリンガルであった。あるときマネジャーのDarling氏が勤務時間中に毎週仏語教室に通っているのを不思議に思って尋ねたら、そのころ管理職は両国語を話さなければならない規則が出来、公務で勤務時間中に勉強をしていたらしい。これは、ちょうどこの時期、モントリオールがあるケベック州にフランス系カナダ人知事が誕生し、ケベック州のカナダからの独立運動がピークに達していたため、政府がフランス系カナダ人に対するサービス向上の一環として行われていたものらしい。はたしてケベック州議会が州の独立を議決

し、国民全体の民意を問う国民投票に持ち込まれたが、結局は否決されて現在もカナダはひとつの国である。なお、最近の選挙でイギリス系カナダ人知事に戻ったと聞いている。

#### 破壊から非破壊へ

カナダから帰って半年後に伊藤先生が定年退官されるなど、教官の再編成が必要になった。私も藤中雄三先生(1993年ご逝去)が担当されていた採鉱機械学講座(応用計測学講座と改名)に配置換えになり、ワイヤロープの電磁探傷に関する研究など、非破壊検査に関する教育と研究に重点を置くことになった。藤中先生には、初めて非破壊検査の国際会議に連れて貰い、それもラスベガスのカジノ併設の会議場であったため非常に印象的であったので、今でも続けてその会議には出席している。また先生は中国からよく招聘されて赴いておられたが、逆に多くの外国人招聘学者や留学生も引受けられておられた。そのお陰で私も多くの中国の先生や留学生と知り合いになり、じかに中国事情の一片に触れることが出来たことをありがたく思っている。

その後、大学院重点化の改組が行われ、研究室名を計測評価工学分野としてこの分野を担当することになった。さらに退官一年前には専攻の再編成があり、ジオメカトロニクス分野と改め、他の分野と協力して「かけがえのない地球」の有効利用技術の教育と研究を目指していくことになっている。

#### おわりに

45年の思い出と題しながら、主にその前半のことだけになってしまった。年をとると若い頃のことがよく思い出されるといわれるが、そのせいかもしれない。

記念パーティでは懐かしい後輩の皆さんにお会いでき、思いも掛けぬ方々のご出席もいただいて、教師冥利に尽きる思いで涙が出そうになった。生涯忘れないこの会を盛り立てていただいた教室の先生方、幹事として終始お世話をいただいた塚田和彦先生に心からお礼を申し上げ、皆さんの今後の活躍を祈る次第である。

## 退官記念講演

## 量子材料科学曼荼羅世界

足立裕彦\*

Mandala of Quantum Materials Science

by Hirohiko ADACHI

## 1. はじめに

本年3月をもって材料工学教室で大学での教育・研究活動を終了することになった。退官にあたり最終講義を企画していただき「量子材料科学曼荼羅世界」いうタイトルでお話したのでその要約を述べたい。材料工学教室には12年間を籍し、専任講座「材料設計工学」分野を担当した。ここでは材料学に量子力学とその計算技術を導入し、一つの研究分野を拓くよう努めてきた。その分野は「量子材料科学」というのが最も相応しいと考えている。「曼荼羅」はサンスクリットで「本質を得る」という意味であり、今まで自分の研究していく姿勢が常に「本質を理解したい」であったと思っている。

実際の曼荼羅は、多くの仏、菩薩を仏教、特に密教の教理に従って配置した絵で、図1は弘法大師空海が中国から初めて我国に持ち帰ったものを写し取って伝わっている胎藏界曼荼羅（伝真言院曼荼羅、東寺）である。その中央部は中台八葉院と呼ばれ、大日如来を中尊に宝幢、開敷華王、無量寿、天鼓雷音の4如来と普賢、文殊、觀音、彌勒の4菩薩が配置され、その周りを明王や天など四百余の諸尊が取り囲んでいる。如来は悟りに達した仏、菩薩は永遠に悟りを求める修行者である。大日如来は大宇宙あるいは大宇宙の真理そのものを表し、宇宙の永遠性、普遍性を仏としたもので、無数の相をもって世に現れ諸仏はその相を表している。曼荼羅は仏教の精神世界を表すものであるが、密教では現実世界そのものと解釈される。大日如来（本質）が散乱波のように無数の仏（相）になって外へ展開・発展し、また諸仏が大日如来の求心力で内に向かって集約され帰依するといった相互作用で森羅万象が説明される。

次に、筆者が今まで続けてきた研究の内容を1枚の絵で表すとすると図2のようになる。物質中にはA、B、Cといった原子が配列していて、また無数の電子が存在する。電子は原子のポテンシャル場を運動しているが、図はそのエネルギーと分布状態と機能性とを模式的に表している。各々の電子は様々な性質をもっていて、例えば化学結合に寄与する電子や電気伝導に寄与する電子などが存在する。したがってこのような電子の状態を正確に知ることができれば、物質の性質を正確に理解でき、またどのような原子がどのように配列すればどのような性質が現れるかを予測することができる。筆者は現在まで種々の物質の電子状態を主に量子力学の理論計算という手段で研究してきた。

## 2. 局在量子構造に基づいた材料科学

今まで量子材料科学という分野を開拓すべく教育・研究を行ってきたが、ある意味でそれを集約するプロジェクト研究を行っているので紹介したい。それは科学研究費特定領域研究「局在量子構造に基づいた新しい材料機能創出技術の構築」というタイトルで行っている総合研究である。平成12年から16年の5年間のプロジェクトで今年度が最終年度となりまとめに入っている。以前からDV-X $\alpha$ 分子軌道法<sup>1)</sup>を用いて量子化学的な観点から金属やセラミックス材料の研究を進めている中で、局所領域における電子状態と化学結合が物質の性質を決める上できわめて重要ではないかと考えるようになった。「局在量子構造」は固体中の表面、界面、原子空孔、不純物あるいはドーパントや特にそれらの複合体近傍の特異な原子配列に起因する電子状態と化学結合状態を意味する。我々が扱う材料は一般に構造材料と機能材料に分けられ、機能材料も電気材料、磁気材料、光学材料、触媒材料などに分類できる。それらは今まで、それぞれ個

\*京都大学名誉教授

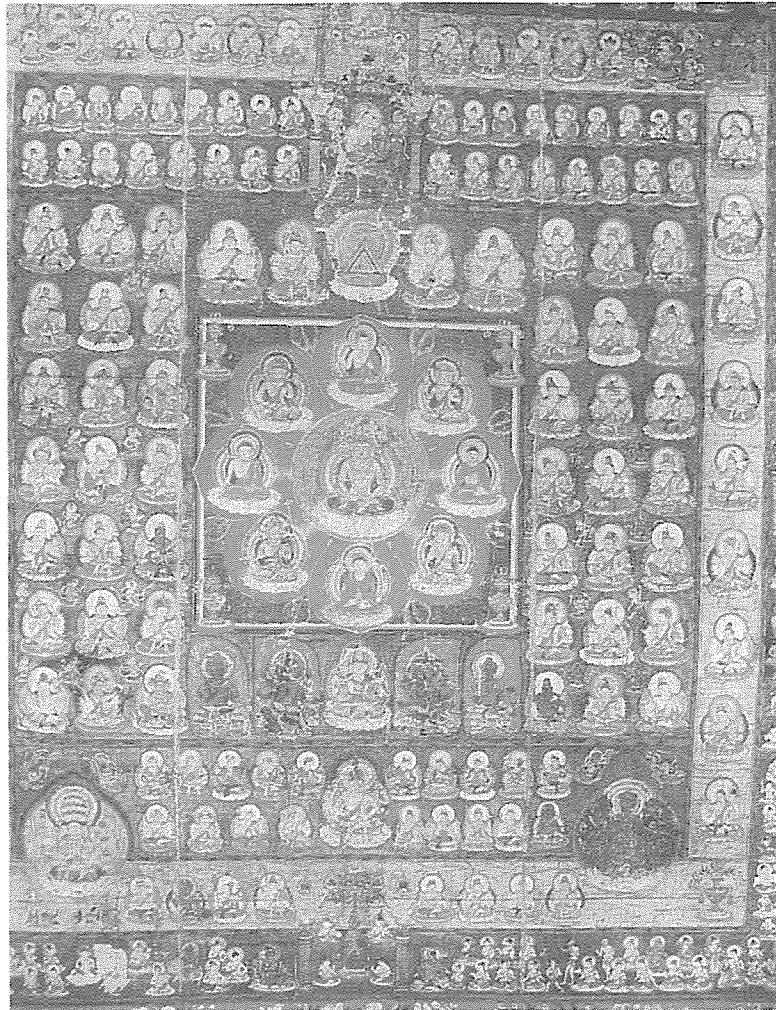


図1 胎藏界曼荼羅（国宝伝真言院曼荼羅、東寺）

### 物質中の電子状態とその機能

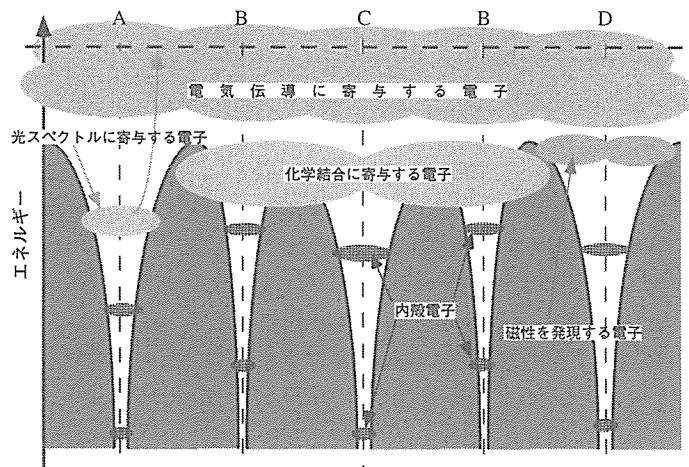


図2 物質中の電子とその機能性を表す模式図

別の分野で異なる学問体系のもとで開発研究が進められてきた。しかし、これらは局在量子構造の概念で整理すれば、統一的に理解でき、効率的で汎用性のある材料学を構築できるのではないかと考えた。このプロジェクトは様々な材料の局在量子構造を研究するため立ち上げたもので、5つの計画班で構成され、理論計算と局所構造解析実験との強い連携で進められているのが特徴である。それら計画班は第一班：局在量子構造研究基盤の体系化（代表 足立裕彦）、第2班：セラミック粒界の局在量子構造（代表 佐久間健人）、第3班：量子プローブによる原子空孔の局在構造（代表 那須三郎）、第4班：軽元素修飾による局在量子構造（代表 森永正彦）、第5班：回折・分光法による表面の局在量子構造解析（代表 松原英一郎）で全体を総括班（代表 足立裕彦）で取り纏めている。このプロジェクトでは、多くの水曜会のメンバーが主力で参加しており、大変心強く感じている。このプロジェクトの成果は既に数多く発表されているが<sup>2)</sup>、コアとなる研究テーマの一つとして酸化亜鉛や酸化マグネシウムの局在量子構造の解明を取り上げた。これら酸化物中におけるドーパントの役割、それに伴う原子空孔生成、さらに粒界の局所構造変化による物性変化などの局在量子構造を多面的な観点から研究している。そのためバンド理論や分子軌道論による理論予測と検証に基づいて、SPring-8シンクロトロン放射光を用いたX線分光、陽電子寿命測定、メスバウア一分光、高分解能電子顕微鏡による構造解析と分光測定などの実験を行い、局在量子構造、すなわち原子レベルのミクロ構造と物性がマクロな電気伝導性やイオン伝導性、さらにパリスター特性の直接的な原因になっていることを解明している<sup>3)</sup>。その他、アルミニナやジルコニアセラミックスなどの粒界における局在量子構造が、これら高温構造材のクリープ特性や超塑性などの機械的特性を支配していること、また金属酸化物セラミックス中の水素やリチウムイオンの局在量子構造と伝導性との関連の解明など多くの成果が挙げられている。このような局在量子構造に基づいた材料学は、ナノ材料やそれ以後の材料科学の最も基礎的な学理として役立つものと考えている。

### 3. これまでの経緯

次に、今までに至った経緯について述べたい。昭和15年神奈川県藤沢市で生まれた。第2次世界大戦が始まり戦争が激しくなってきたので、両親と4人の兄弟がバラバラになって疎開し、筆者は兵庫県川西市に住む祖父母のもとに引き取られた。終戦後そこで小学校に入学したが、途中大阪の盾津町（現在の東大阪市）に転居し中学校を卒業するまで過ごした。中学卒業と同時に今度は枚方市へ変わり、高等学校は大阪府立高津高校へ入学、

昭和34年に卒業し京都大学理学部に入学した。当時は2年間教養部で過ごしたが、1年間は宇治分校へ2年から吉田分校へ通った。理学部は当時定員が150名で50名ずつの3つのクラスに分かれ、筆者はS2クラスに配属された。このクラスは理学部ということもあり50名中20名ほどが大学に残り教育・研究を続けているが、その中にはノーベル賞をもらった利根川進君、現京大総長尾池和夫君などいろいろな分野で活躍している者も多い。

教養部で2年間過ごし専門課程では化学科に分属した。4年から小寺熊三郎教授担当の無機化学研究室に所属し卒業研究を行った。その頃になってやっと大学での勉強に興味が持てるようになったことが思い出される。研究室では分子線、表面物理、質量分析などの研究が行われていたが、分子線を用いた研究テーマを選んだ。卒論のテーマは「アルカリ原子線の他の気体による散乱とその散乱断面積」で、卒業後修士課程に進学したが、ここでも「分子線を用いた化学反応の素過程」のテーマで研究を行った。このような研究を行うのには多くの理論や基礎知識を学ぶ必要があった。まず気体運動論や量子論による衝突理論、化学反応論、統計力学などの理論を勉強しなければならなかった。また実際に実験研究を行うために、分子線や真空技術、電気測定、質量分析技術などを学んだ。さらに実験装置の組み立てのために金属工作やガラス細工の部屋に日参して技官の方からそれらの技術を学んだ。大学院でのテーマは、自ら「交叉分子線を用いた化学反応の素過程の研究」を提案して研究を始めた。このテーマは基礎科学としては大変興味深いが、技術的には困難を伴うことが予想され、指導教官の小寺先生からはあまり期待してもらえなかつた。修士課程では技術的な課題を克服するため、自分なりに懸命の努力をしたつもりであったが、結局先生との意見が合わずこの研究を断念し、博士課程への進学をあきらめた。それから20年後の1986年にこのテーマでアメリカのHerschbachとLeeがノーベル化学賞を受賞した。日本でもあのときこの研究続けることができたらと残念に思うことがある。しかし修士課程を終了するまでの3年間は、自分としては最も学問と研究に集中し、多くの事を学んだ時期であったように思われる。

修士課程を1965年3月に終了後、4月からは大阪大学工学部原子力工学科の助手に採用され、新しく開設された井本正介教授担当の核燃料工学講座に所属することとなった。しばらくして安保問題による大学紛争が激しくなり始めたが、1969年に工学博士の学位を取得した。その後1973年から1974年まで約1年間はアメリカのノースウェスタン大学の材料工学教室に留学したが、1981年に兵庫教育大学に転勤するまで16年間大阪大学工学部の助手として過ごした。ノースウェスタン大学では

DV-X $\alpha$  法と呼ぶ分子軌道法の開発に携わり、帰国後は主にこの方法を用いた電子状態の理論計算による研究を続けることになる。兵庫教育大学は現職教員の再教育のため、兵庫県河東郡社町に新設された大学院大学で、教員公募があり応募した結果助教授として採用され、その後1986年教授に昇任した。この大学は学校教育学部のみの単科大学であるが、その中で自然教育学講座の物理化学と無機化学を担当した。大学院の入学者は大半が小学校から高等学校までの現職教員で、学部卒も少數いたが皆教員を目指していた。社町は焼き物の郷、丹波立杭のある今田町（現在篠山市）に隣接していた。このようなことから「焼き物の化学」を研究室のテーマとして教育・研究を行うことにした。すなわち陶磁器を科学的な観点から研究してみようということで、生地となる粘土鉱物やシリカ・アルミナ系セラミックス、また釉薬となるガラスを対象として、X線回折、熱測定、可視紫外、ラマン分光、蛍光X線、光音響分光などに加え、メスバウアーフィルタ、X線光電子分光、X線吸収分光（EXAFS, XANES）などの新しい測定手法や電子状態計算なども取り入れた研究を行い、それを学部生や院生の教育に活かすことに努めた。X線吸収分光測定には研究チームを作り、田無市の東大原子核研究所にあった当時は我国唯一の放射光施設（東大物性研所属）のマシンタイムをもらって研究を行った。

このような教育・研究活動を行っていたが、京都大学金属系教室の新宮秀夫先生から、教授の空席（鋳造冶金学講座）があるので来ないかというお誘いをいただいた。少し考える時間をいただいたが結局お誘いを受け、1992年4月に京大へ転勤した。工学部の冶金学科は未知の世界であったが、新しい分野の研究でもよいということをお聞きしていたので、それまでの経験から量子論による電子状態計算を導入して新しい材料研究の分野を拓くことにした。転勤してまもなく大学院重点化の改組が始まり、金属系教室の大部分が工学研究科材料工学専攻になり、その中の大学院専任講座（材料設計工学分野）を担当することになった。新しい研究室を立ち上げるため、河合潤（現材料プロセス工学講座教授）、田中功（現材料物性学講座教授）の両先生を助手に採用させていただいた。研究室の組織は縮小していくかなければならない時であったが、教室に大変な無理をお願いして実現できた。

研究室はそれまでの鋳造冶金学から理論計算主体の材料設計学へ変わるので、徹底的大改造を余儀無くされた。研究室のスタッフ、学生総出で行ったが、教室の理解と支援があつてはじめて実行できたと思う。研究室のテーマは量子論計算に基づいた材料研究であるが、河合先生が量子論に基づいたX線分光学を材料研究に導入

し、また田中先生が電子状態論による金属、セラミックス研究を開拓していく中で、その具体的方向が決まっていった。以来12年間、材料設計工学講座の教育・研究に携わることができた。

#### 4. 研究歴

京大の修士課程を1965年終了し阪大工学部原子力工学科の助手に就職した当時は、高速増殖炉開発の機運が強く、研究室ではその核燃料としての可能性をもつ物質の基礎研究が始まられた。ウランやトリウムの炭化物や窒化物が主に研究対象であったが、筆者はまだあまり研究されていなかったリン化物を選んで研究を始めた。まずウランやトリウムのリン化物を直接反応で効率よく生成する装置を考案し、生成反応の機構を調べた。最終的に岩塩型のUPやThPが得られる。炭化物、チッ化物、硫化物にも同様の岩塩型化合物が存在する。これらは侵入型化合物と呼ばれるTiCなどの遷移金属化合物と類似の性質をもち、硬くて融点が高くかつ高い伝導性を有する。しかもウランの化合物は磁気的にも興味深い性質を示す。そこで生成した化合物について結晶構造、機械的性質、熱的性質、電気的性質、磁気的性質などを測定し、物理的、化学的性質について考察した。これらの興味深い性質を示す本質を知りたかった。考察の結果、それらはフェルミレベル近傍の電子状態によって決まり、化合物の価電子状態が微妙に変化することが原因ではないかと考えた。そこでこのことを直接確かめるための手段を考えた。まず、実験的に価電子領域の光電子スペクトルを調べることができれば、フェルミレベル近傍の電子構造がよく分かるのではないかと考えた。当時はまだ光電子分光法は一般的によく知られていなかったが、文献を調査するとスエーデンのK. Siegbahnのグループが、いろいろな化合物のスペクトルを測定していることがわかった。その後1981年にSiegbahnはESCAの研究でノーベル物理学賞を受賞している。まだウラン化合物まではまだ研究されていなかったが、その時点からこの研究をスタートしても後れをとると思われる所以、この手法を用いることは断念した。次に考えたのは理論的に電子構造を計算することであった。その頃はまだコンピューターはあまり発達していなかったが、既にエネルギー・バンド理論に基づいた多くの計算手法が開発されていた。その中でSlaterとKostreが開発したタイト・バインディング法が金属化合物の計算には適していると思われた。しかしウランやトリウムなど原子番号の大きい元素では相対論効果が大きいので、まず相対論の計算ができるようなプログラムを開発し、それを用いて岩塩型ウラン化合物のバンド計算を行った。その結果、これらの化合物の興味ある種々の性質は、その価電子状態が本

質であることを示すことができた。これらの研究をまとめて「アクチニドリン化物の生成とその電子状態に関する研究」というタイトルで工学博士の学位を取得した。当時は実験装置も理論手法も自分でつくりながら研究しなければならないところが多く、試料生成装置の他熱天秤、磁気天秤など多くの測定には手作り装置を用いた。このためには大学院修士時代に学んだ理論や技術が大いに役立ったように思う。

その後も核燃料の研究を続けていたが、常々これを踏み台にして研究を発展させたいと考えていた。その頃米国ノースウェスタン大学材料工学教室の飯井政博先生にお会いする機会があった。ノースウェスタン大学の材料

工学教室には、相対論計算で著名であった J. T. Waber 教授がおられた。飯井先生に相談したところ直ぐに連絡していただき、先方から客員研究員として採用したいとの返事をいただいた。このようにして1973年8月から1974年8月までノースウェスタン大学材料工学教室に留学することになった。Waber 教授の興味は相対論計算と化学吸着の表面物理とであったが、筆者は化学吸着の電子状態計算をテーマにして研究を開始した。この研究にはまず精度のよい量子化学計算の手法を開発する必要があった。その頃物理学教室の Don Ellis らが新しい計算手法の開発を始めていたので、そのグループに加わり、Discrete Variational (DV)-X $\alpha$  法と呼ばれる分子軌

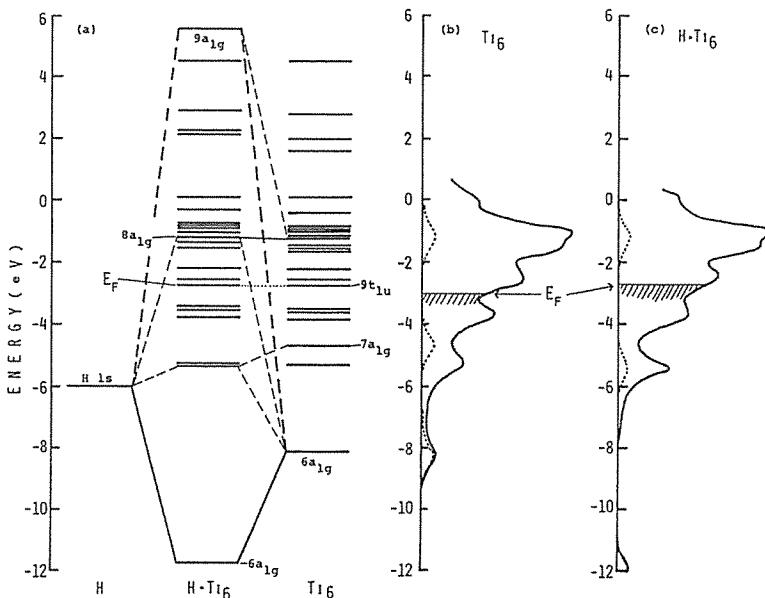


図 3(A)  $Ti_6$  および  $HTi_6$  クラスターの分子軌道レベルとバンド構造

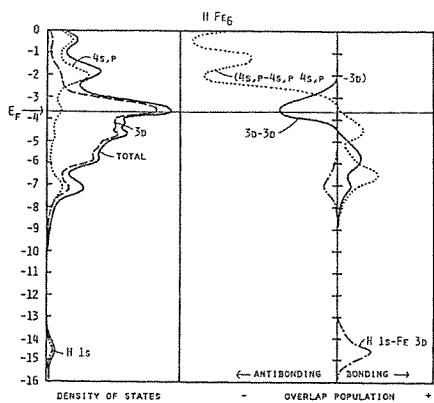


図 3(B)  $Fe_6$  および  $HFe_6$  クラスターのバンド構造と化学結合性

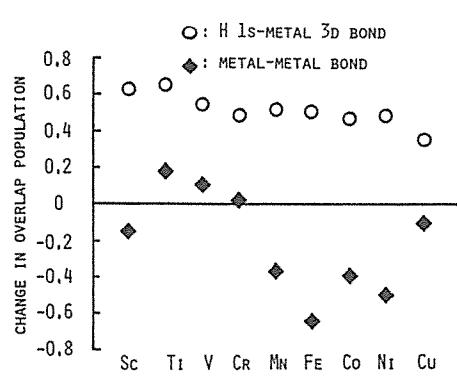


図 3(C) H-M および M-M 間の化学結合性の変化

道法の開発に携わった。その当時の表面物理では化学吸着の微細機構の研究がトピックスであった。IBM の Eastman らが化学吸着した分子の光電子スペクトルを初めて測定し、その理論的解釈をめぐって論争が起こっていたが、DV-X $\alpha$  法を適用したところスペクトルを見事に解析することができ、分子の電子状態のみならず、クラスター・モデルを用いると、固体や固体表面のような複雑な系の電子状態計算にも大変有効であることが示された。日本に帰国後もプログラムの開発を続け、1978 年から 80 年にかけて DV-X $\alpha$  法の理論と応用に関する基本的な 4 遍の論文<sup>4-7</sup>（論文 I, II, III, IV）を発表した。特に論文 I<sup>4</sup> では理論手法の詳細な説明がされていて、DV-X $\alpha$  法の原論文として、最近でも毎年数十編の論文で引用されている。

帰国後は表面電子状態の研究の他に金属材料の問題に応用することを考えた。特に遷移金属中の侵入型不純物原子近傍の電子状態と化学結合に着目した。水素や炭素などの不純物原子が金属中に侵入すると、不純物原子とまわりの金属との相互作用で結合が生じるが、まわりの金属原子の電子状態と化学結合にも変化が起こる。例えばチタン金属中に水素が侵入すると、チタンと水素との共有結合ができる。HTi<sub>6</sub> クラスター・モデルの計算<sup>8</sup>では、水素が侵入する前の Ti<sub>6</sub> の 6a<sub>1g</sub> 軌道と H 1s 軌道との相互作用で HTi<sub>6</sub> の結合軌道 6a<sub>1g</sub> と反結合軌道 9a<sub>1g</sub> ができる（図 3 参照）。波動関数の解析から、6a<sub>1g</sub> は分布が水素に偏った H-Ti 結合軌道で、この軌道を 2 個の電子が占める。したがって水素は部分的なマイナスイオンになる。9a<sub>1g</sub> は H-Ti 間では強い反結合的であるが、水素が侵入する前の Ti<sub>6</sub> の 6a<sub>1g</sub> 軌道が主成分のチタンに偏った非占有軌道である。すなわち Ti-Ti 間の結合を与っていた電子が、H 原子の侵入によって H-Ti 間の結合に移行し、そのため金属間の結合が弱くなる。しかし H 原子は 1 個の電子をもっているので、この電子はフェルミレベルの軌道を占有することになり、フェルミレベルが少し上昇する。遷移金属のフェルミレベルは d バンド中にあるが、d バンドの下部は金属原子間の結合的軌道、上部は反結合的軌道で形成されている。したがって H 原子の電子が占有する軌道は周期表の前半の金属では結合的で、後半の金属では反結合的になる。系全体の結合性から、Ti, V などの周期表前半の金属中には水素が安定に侵入できるが、Fe, Co など後半の金属では不安定になることがわかる。金属中水素の問題は現在でも未解決の部分が多いが、当時も水素脆性、遅れ破壊、水素吸蔵などの研究が盛んであった。それらの実験の解釈にも論争が多かったが、上記のクラスター・モデルは、電子論から水素の存在状態を明らかにし、それらを解決するための基本的な理解を与えるものである。

金属中炭素の研究は鉄鋼材料の最も基本的なものであるが、この問題にもクラスター・モデルの応用を試みた。鉄中炭素の原子位置に関して阪大・基礎工学部の藤田英一先生のグループでは<sup>9</sup> メスバウアー分光の実験から新しい見解を示し、これに基づいたマルテンサイト変態機構を提案していた。クラスター・モデルによる鉄中炭素原子の電子状態を計算したところ、メスバウアー測定の結果を理論的に説明でき、また炭素原子近傍のスピニ状態や化学結合状態を明らかにすることができた<sup>10</sup>。

金属中の不純物原子の基礎的な研究を続いている中で、森永らによってこの手法の実用合金の研究への応用が始まられた。まず Ni-Al 系超合金のクラスター・モデルを計算し<sup>11</sup>、その結果得られた添加元素の局在電子レベルと結合次数とをパラメーターとすると、合金の様々な特性を予測できることがわかり、電子論に基づいた新しい合金設計理論が提案された<sup>12</sup>。この理論は、超合金のみならずチタン合金、鉄合金、アルミニウム、マグネシウム合金、水素吸蔵合金など種々の実用合金の理論設計にも有効であることが示され、大きな成果が得られている<sup>13</sup>。

最近光電子分光や X 線分光が材料研究によく利用されている。DV-X $\alpha$  法が固体表面の研究に有用であることは開発当初から示されているが、オキソ酸塩や金属酸化物など、固体の光電子スペクトルの理論計算を行ったところ、正確なスペクトル解析ができることがわかった。また、価電子領域の蛍光 X 線スペクトルや X 線吸収端近傍構造 (XANES) を理論的に再現でき、材料研究に極めて有効であることがわかった<sup>14</sup>。さらに、電子線エネルギー損出スペクトルの吸収端近傍構造 (ELNES) は原理的に XANES と同様のスペクトルを与えるが、この理論解析にも役立つことが示されている<sup>15</sup>。今後、高分解能電子顕微鏡や放射光などを利用した材料の局所構造と電子状態解析が進歩する中で、それらの適格な理論解析が求められ、DV-X $\alpha$  法による電子状態計算がますます重要になると考えている。

大学院生時代の分子線研究に始まり、核燃料研究そして DV-X $\alpha$  法の開発とその材料学や分光学への応用研究を通して、40余年の研究生活を送ってきた。その間、DV-X $\alpha$  法の研究者が集まり、1988年に初めての研究集会を開いた。以来今年で 17 回目の年会が行われている。1992 年には DV-X $\alpha$  研究協会を設立し、現在では会員が 500 名をこえる学術団体に成長している。DV-X $\alpha$  研究を通して実際に様々な分野の研究者との交流や共同研究を行うことができた。その中には材料科学の他、無機化学、物理化学、触媒化学、分析化学、分光学、物性物理、原子・分子物理、原子核物理で活躍する研究者が含まれる。それらの分野で行われている研究の一端を垣間見ること

もできたように思う。

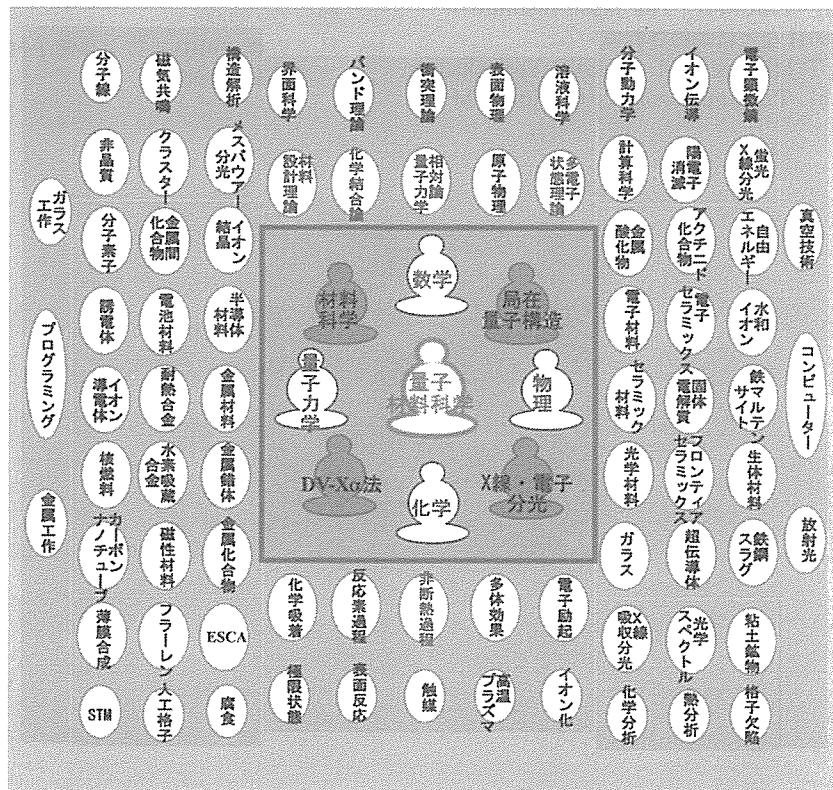
## 5. 教育経歴

約40年の研究生活を大阪大学、兵庫教育大学、京都大学で送ってきたが、それを通して多くの事を学ぶことができたように思う。また研究で学んだことを学生の教育に生かすように努めてきた。兵庫教育大学では一般化学、無機化学、物理化学（学部）や化学結合論（大学院）、京都大学では材料物理化学、量子無機材料学、材料量子化学（学部）、材料設計工学、先端材料設計学（大学院）といった講義を担当した。また研究指導の面では、兵庫教育大学では12名の修士課程、京都大学へ移ってからは34名の修士課程の学生の研究指導をさせていただいた。京都大学では博士課程での研究を通して、研究室から12名が博士の学位（内2名は論文博士）を取得し、現在東京大学、大阪大学、京都大学、名古屋大学の助手、韓国科学技術院（KAIST）、ファインセラミックスセンター研究員、日本学術振興会特別研究員や民間企業の研究所でそれぞれ研究活動に携わっている。また非常勤講師として、他の多くの大学の講義も依頼された。大阪大学理学部では量子化学、工学研究科では固体物性特論、龍谷大学では量子化学、大阪電気通信大学では物理化学、福

岡大学では分析化学特論の講義を長年に亘って担当させていただいた。さらに北海道大学（理化）、東京大学（院材料）、東京工業大学（院物理）、新潟大学（理化、院自然科学）、豊橋技術科学大学（工物質化学）、名古屋大学（院材料）、大阪市立大学（院化学）、大阪大学（院応物、マテリアル）、和歌山大学（教育）、兵庫教育大学（学教）、岡山大学（工機械）、愛媛大学（理化、院材料）では集中講義の形で量子化学と物質・材料学の講義をさせていただいた。これらの講義ノートを作っていくうちに、量子材料科学の観点で一冊の本としてまとめることができるようになったので「量子材料化学入門」<sup>10</sup>を執筆し出版した。また DV-Xα 研究の基礎と金属材料への応用をまとめて共同研究者と著作した<sup>11</sup>。京都大学では学部教育のための教科書<sup>12</sup>も執筆した。これらの本を教科書や参考書として材料科学に提供できたことは大きな喜びである。

## 6. おわりに

筆者が生まれてから定年退職するまでの間、いろいろなことを学び、また仕事をすることができたのは、多くの方々のお陰である。学校の恩師や指導教官の先生方、また大阪大学、兵庫教育大学、京都大学での先輩、同僚



の教職員の方々、特に新宮秀夫先生、村上正紀先生や材料工学教室の先生方への感謝の念は言葉では尽くせない。研究室のスタッフや学生、卒業生の皆様とは毎日共同生活し、大変お世話になったがうまくやれたか心配である。また DV-X $\alpha$  研究を通して、多くの方々と共同研究や交流をすることができ、研究・教育生活を豊かにすることことができた。最後に両親と家族に毎日を支えてもらったことを感謝したい。

筆者の「量子材料科学」の世界は様々な研究と教育、実に多くの分野の研究者との共同研究や交流を通して形成されたと思っている。いろいろな学問体系、実験、理論、対象物や現象が縦横無尽にまた複雑につながってできていることを強く感じている。斯くしてできた「量子材料科学曼荼羅」では、中尊は量子材料科学であり「材料科学」が永遠に衆生を救済するために修行をつづける菩薩の位置に座する。材料工学教室はいつまでも発展を続け世の中に貢献していく役目を背負っているということになる。ますますの発展を祈って筆を置きたい。

### 参考文献

- 1) 足立裕彦：「量子材料化学入門－DV-X $\alpha$  法からのアプローチー」，三共出版，1991
- 2) 例えば “The Fourth Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing (PRICM4)”, The Japan Institute of Metals (2001) などに集約されている。
- 3) I. Tanaka, T. Mizoguchi, M. Matsui, S. Yoshioka, H. Adachi, T. Yamamoto, T. Okajima, M. Umesaki, W. Y. Ching, Y. Inoue, M. Mizuno, H. Araki and Y. Shirai: Nature materials 2, 541-545 (2003)
- 4) H. Adachi, M. Tsukada and C. Satoko: J. Phys. Soc. Jpn 45, 875-883 (1978)
- 5) C. Satoko, M. Tsukada and H. Adachi: J. Phys. Soc. Jpn 45, 1333-1340 (1978)
- 6) H. Adachi, S. Shiokawa, M. Tsukada, C. Satoko and S. Sugano: J. Phys. soc. Jpn 47, 1528-1537 (1979)
- 7) H. Adachi and K. Taniguchi: J. Phys. Soc. Jpn 49, 1944-1953 (1980)
- 8) H. Adachi and S. Imoto: J. Phys. Soc. Jpn 46, 1194-1200 (1979)
- 9) T. Moriya, H. Ino, F. E. Fujita and Y. Maeda: J. Phys. Soc. Jpn, 24, 60 (1968)
- 10) H. Adachi and S. Imoto: Trans. JIM 18, 375-383 (1977)
- 11) M. Morinaga, N. Yukawa and H. Adachi: J. Phys. Soc. Jpn 53, 653-663 (1984)
- 12) 森永正彦, 湯川夏夫, 足立裕彦: 日本金属学会会報 第23巻, 911-919 (1984)
- 13) 足立裕彦, 森永正彦, 那須三郎: 「金属材料の量子化学と量子合金設計」, 三共出版, 1997
- 14) 足立裕彦, 中松博英, 向山毅: X線分析の進歩, 第23集, 19-42 (1992)
- 15) 田中功, 溝口照康, 吉矢真人, 岩田貴普, 小笠原一禎, 足立裕彦: 電子顕微鏡, vol. 35, No. 3, 221-229 (2000)
- 16) 足立裕彦, 田中 功: 「量子材料学の初步」, 三共出版, 1998

## 退官記念

## 金属間化合物の研究

山口正治\*

Studies of Intermetallic Compounds

by Masaharu YAMAGUCHI

## 定年退官の日

感慨無量、後ろ髪を引かれる思いなどなど、いったいどんな気持ちで最後に研究室を出るのかなと、自分自身の気持ちに大いに興味がありましたが、いざ3月31日を迎えた、午後5時過ぎに研究室を出る段になると、妙にうきうきして一向に後ろ髪を引かれる思いが湧いてきません。おまけに学会期間中とあって研究室にはほとんど誰もいませんでしたから、あっけなく大舞台の幕が下りてしましました。明けて4月1日、以前から楽しみにしていましたスポーツクラブに出かけトレーニングを始めました。この日に感じた開放感はいまも忘れることができません。ただ、体力の衰えはすさまじいもので、特に上体の筋力など情けなくなるような状態でした。鉄棒にぶら下がっても全く懸垂できないのです。そこでいくつかのマシーンを用いて少しづつ筋力の向上に努めることにし、毎日欠かさずスポーツクラブに出かけトレーニングを重ねましたところ、いまでは軽く懸垂できるようになりました。6月中頃から9月中旬まで、かねての計画通り海外で過ごしましたが、トレーニングは欠かしませんでした、体重は数キロ減り、今では両手を上げた高さにある鉄棒に逆上がりできるまでに回復いたしました。いま開放感溢れる生活を大いにエンジョイしていますが、思えば17年間にわたる京都大学における研究生活をうきうきするような気持ちで終えることができたことが、この開放感の根底にあると思っています。17年間お世話になった先生方、学生諸君に心から感謝申し上げたいと思います。

さて、ほつほつ本論に入らなければなりませんが、エンジョイしていると申し上げた定年退官後6ヶ月余りの

具体的な内容の方が面白いとお考えの読者の方も多いかも知れません。しかしエンジョイしているのもまだ6ヶ月少々で、いさかデータに乏しいと言わざるを得ません。私小説的“ある定年退官教授の生活”は次の機会に譲ることとして、ここでは、退屈でしょうが、題目にそつて私の京都大学における17年間の研究を振り返って見たいと思います。

## 金属間化合物に出会ったこと

17年間を振り返って見えるものは一面の金属間化合物で、とにかく首尾一貫して金属間化合物の研究に取り組んで参りました。“一貫して”と申し上げると格好よく聞こえますが、実際には居心地のいい金属間化合物の研究にどっぷりつかっていたのかもしれません。“居心地がいい”とは、研究領域として注目され、研究者の数も研究費もどんどん成長している領域であったからという意味です。実際、次世代超耐環境性先進材料プロジェクト（平成元年～7年）、科学研究費重点領域研究「新高温構造材料としての金属間化合物」（平成4～6年）、NEDO国際共同研究「金属間化合物の変形と破壊に対する原子結合の方向性の効果」（平成4～6年）、日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業プロジェクト「先進高温材料・耐熱金属間化合物の実用化」（平成8～12年）と大きなプロジェクトが次々と実施され、幸い全てその中核にいる幸運に恵まれましたから、研究費も十分で、確かに居心地がよかったと思います。海外の数人の仲間たちと国際学術誌“Intermetallics”を立ち上げることができたことからも分かるように、金属間化合物は国際的にも羽振りのいい時代で、いさか自慢話めいで申訳ありませんが、国際会議にもたびたび招待されました。招待講演は50回を越えただろうと思います。もっとも最後の頃は方々で同じ話をしていたように思いますが、當時、

\*工学研究科名誉教授

金属間化合物の研究を始めた動機や金属間化合物にしがみついていた理由を格好よく説明しようとしたこともありますが、正直なところいくつか可能性があった中でたまたま金属間化合物に取り組んだとき、幸運にも金属間化合物の研究が立ち上がり始めたということだろうと思います。論理的に自信をもって説明できるのは金属間化合物の研究をどう進めたかという問題についてであって、金属間化合物に取り組んだ動機に論理的説明はありません。幸運に恵まれたことを神様に感謝している次第です。

さて、17年間いろいろな金属間化合物を取り上げましたが、研究資源の大半を高温構造材料として注目されていた TiAl 基合金と高融点シリサイドに投入したと思います。高融点シリサイドではいくつかの学問的に興味深い特性を発見できたと思っていますが、それら特性の実用的な価値を見出すことはできませんでした。一方、TiAl 基合金にはジェットエンジンのタービンブレードや自動車用ターボチャージャーローターなど現実的な用途への応用が期待されていましたから、国際的に研究が盛り上がり緊張感のある激しい研究競争が巻き起こりました。科学研究費重点領域研究を推進していた頃はその真っ只中で、研究者冥利に尽きる数年だったと思っています。その後、日本企業が TiAl 基合金の自動車用ターボチャージャーローターの開発に成功しています。この TiAl 基合金の研究を中心に、本稿と同じ題目で本年 2 月 10 日に最終講義をさせて頂き、その原稿を「私の最終講義 - 金属間化合物の研究」として「金属」2004 年 Vol. 74, No. 2 (アグネ技術センター) に発表いたしました。ここでは、この原稿の要点である私の金属間化合物観について述べたいと思います。

### 金属間化合物は脆い物質です

1980 年代以降、高温構造材料たる可能性をもったさまざまな高融点金属間化合物の力学物性が研究され、少なくとも高温強度に注目する限り Ni 基スーパーアロイを凌駕する可能性のある金属間化合物がたくさんあることが明らかになりましたが、これらの化合物の大部分が室温付近ではほとんど引張延性を示さず脆いことが問題でした。したがって、この脆さを改善できれば、高融点金属間化合物をあらたな高温構造材料として実用できると考えられ、金属間化合物の“延性化 (ductilization)”を試みること、あるいはそのために必要な基礎的知見を得ることが、1980 年代以降の構造用金属間化合物研究の主流を形成するに至りました。“延性化”はこの時代の金属間化合物研究の中心的思潮だった訳です。平成 4 年に立ち上がった金属間化合物に関する科学研究費重点領域研究でも、この延性化問題が大きく取り上げられ、

研究が行われています。

もちろん“延性化”的可能性をやみくもに 100% 信じていた訳ではありません。たとえば Peierls のモデルによれば、結晶中の転位を動かすために要する応力 (Peierls 応力) は、剛性率  $\mu$ 、ポアソン比  $\nu$ 、すべり面の面間隔  $d$ 、転位のバーガースベクトルの大きさ  $b$  を用いて

$$\tau_p = \{2\mu/(1-\nu)\} \exp[-\{2\pi/(1-\nu)\}(d/b)] \quad (1)$$

のように与えられます。したがって金属間化合物の構造が複雑になって  $d/b$  比が小さくなると  $\tau_p$  が大きくなり、転位が動き難くなつて延性を期待し難くなることは良く知られています。転位の運動を Peierls 機構によって議論できるような結晶では、変形応力は温度の上昇と共に低下し、ある温度  $T_0$  で変形応力の温度依存性がなくなります。外力がなくても格子の熱振動によって転位が障壁を越え得るようになるからで、 $T_0$  は Peierls 機構がはたらく上限温度に対応します。この  $T_0$  も Peierls 応力と同じ  $d/b$  比依存性を示すことが導かれています。すなわち金属間化合物の構造が複雑になって  $d/b$  比が小さくなると  $T_0$  も上昇し、温度が上昇しても変形応力が容易には低下しなくなる訳です。金属間化合物の探索が統計的必然的に簡単な結晶構造のものからより複雑な結晶構造の化合物が研究対象になります。しかし構造が複雑になればますます延性に乏しくなることはある程度分かってはいたのです。

結晶構造が複雑になれば  $d/b$  比が小さくなるのはなぜ?と考え込まれる方も多いと思いますが、この問題についても興味深い考察がなされています。fcc や hcp 構造は稠密充填構造ですが、原子と原子の間には空隙が生じます。fcc 構造を例にとれば、4 面体空隙とそれより大きい 8 面体空隙があります。このことから fcc 単位胞内の原子の詰まり方には揺らぎがあると言えます。fcc 結晶のすべり系は {111}<110>ですが、<110>方向の原子間距離が短いのは原子が稠密充填しているからで、同時に {111} 面の面間隔が大きいのも稠密充填に伴う原子の詰まり方のゆらぎによると言えます。このような稠密充填構造に対して、もっと複雑な構造、たとえば耐熱合金の世界で嫌われ者の  $\alpha$  相や  $\mu$  相とよばれる金属間化合物の構造では、原子は幾何学的に稠密充填していないが、原子はより均一に詰まっていると指摘されています。言い換えると、特に密に詰まった方向も、特に大きな面間隔の原子面も存在しないということになります。このような見方が多くの複雑な結晶構造について大枠として成立していると思っていますが、このことは、“さまざまな金属間化合物”に探査の手を広げても強さと延性を兼ね備えた金属間化合物に出会う可能性は少ないと暗示しています。この程度のことも分かっ

てはいたのです。

破壊力学の観点からも脆さの問題が議論されています。結晶のどこかにクラックが発生しても、そのクラックが進展しなければ結晶は破壊しないので、クラックの進展を妨げるメカニズムがあれば脆さを回避できることになります。クラック先端から転位が放出されればクラック先端は鈍化しますが、転位とクラック先端の応力場の相互作用から、転位にはクラック先端近傍では引力、クラックから離れると斥力が働きます。したがって、クラック先端のどこかに引力と斥力が釣り合うところができ、その距離はほぼ  $\mu b^2/10\gamma$  になると計算されています。この距離が転位のバーガースベクトル程度ならクラック先端から転位がどんどん放出されてクラックは瞬時に鈍化するでしょう。しかしバーガースベクトルの数倍もあれば、クラック先端から転位が放出されるためにはエネルギー障壁を越える必要が生じ、クラックは進展しやすくなると考えられます。このような観点から、結晶が脆性あるいは脆性-延性遷移を示す範囲として

$$\mu b/\gamma > 7.5 \sim 10 \quad (2)$$

が提案されています ( $\gamma$  は表面エネルギー)。結晶構造が複雑になれば  $b$  が大きくなりますから、破壊力学的視点に立っても結晶構造の複雑さは Peierls 応力や  $T_0$  から考察した内容と同じく金属間化合物を脆くすることになります。複雑な結晶構造の金属間化合物では、構成原子の周囲の電子分布が異方的で、特定の方向の結合が強くなるため弾性異方性が強くなり、せん断剛性率  $\mu$  そのものも大きくなる傾向があります。このことは同時に特定の方向の電子雲の重なりが小さくなり特定の面の  $\gamma$  が小さくなり得ることを示唆しています。したがって結晶構造が複雑になるにつれて  $\mu b/\gamma$  の値が大きくなる傾向があり、やはり脆くなっていくことが分かります。

このように、1980年代以前あるいは中頃までには、金属間化合物の脆さについてかなり系統的な議論があつた訳ですが、いずれの考え方もさまざまな金属間化合物をまとめて一般的に成り立つほどの精密さを持ち合わせていなかつたため、いろいろな金属間化合物の力学的性質、特に強さと延性が実験的に調べられたのだと思います。その結果として、言ってみれば先のような脆さに関する大枠としての考え方方に膨大な実験結果が繰り込まれ理解の精度を上げた結果として、延性（もちろんここで言う延性とは普通に引張試験したとき数%以上の伸びがあること）を示す可能性のある金属間化合物は fcc, hcp および稠密充填構造に近い bcc 構造をベースとする  $L1_2$ ,  $L1_0$ ,  $D0_{19}$ ,  $B2$ ,  $D0_3$  型のような数種の簡単な構造の化合物には限られることが明らかになったのだと思います。このような理解が確立するまで、遷移金属シリサイドも含め高融点化合物の延性化に関わる研究が研究費を

得て続けられましたが、今後そのような研究は成り立たなくなるだろうと思います。もちろん、これらの簡単な構造に結晶する金属間化合物が全て延性を示す訳ではありません。たとえば、比較的耐熱性のある軽量化合物として  $Al_3Ti$  は非常に魅力的ですから、その複雑な結晶構造 ( $D0_{22}$  型) を第3元素添加によってより簡単な  $L1_2$  構造に変える試みがなされています。その結果、結晶構造の改変には成功しましたが、残念ながら延性を獲得するには至りませんでした。結晶構造が簡単になっても、彈性的な性質は  $D0_{22}$  型の  $Al_3Ti$  とほとんど変わらず数種の面でべき開する性質も変わらなかったのです。その原因について電子論的な立場から説明が試みられています。結局のところ結晶構造の幾何学的特徴と原子結合の特性が変形に有利な一部の金属間化合物のみが強度と限定的な延性を合わせ持つのだと思います。繰り返すことがあります、 $Al_3Ti$  は  $Al$  基でありながら高融点、高剛性であり、しかも  $Al$  基であるが故の優れた耐酸化性を有しています。しかしこれらの優れた性質、たとえば高剛性をもたらしている異方的な原子間結合が脆性の原因であって、 $Al_3Ti$  の優れた性質をそのままに優れた延性と強靭性を付与することは不可能であることを私たちは実験によって思い知った訳であります。このように“脆さ”はほとんど金属間化合物の属性であって、金属間化合物の優れた性質を利用するためには、脆さの特性を理解しその脆さを組み込むつもりで臨むべきであることを思い知らされたと言ってもいいと思います。構造用金属間化合物に関する研究の結果、学術的に貴重な多くの発見がありましたから、私達の学術的な意味における金属間化合物に関する理解は格段に進歩しました。したがって基礎研究として大いに成果があった訳ですが、構造用材料として実用につながる“脆さの克服”という問題になると現実は厳しい今まで、率直に申し上げれば“脆いものは脆いのだ”という限界を認めざるを得なかつたというのが長年の研究で得られた結論です。

### 圧縮変形能を利用できないでしょうか？

金属間化合物は確かに脆い物質ですが、クラックの発生伝播を阻止すれば、たとえば圧縮によれば  $Al_3Ti$  でも塑性変形します。さらに極端な例をあげれば、 $Nb_3Sn$  を 2000 MPa 以上の静水圧下で常温押出変形した例（ひずみは 60% もに達する）があります。 $Nb_3Sn$  は超伝導化合物で一部の超伝導磁石用に実用化されていますが、力学的には非常に脆い化合物です。このように脆い化合物でも転位による塑性変形機構を備えている点で金属間化合物はセラミックスと異なっています。たとえ圧縮応力下あるいは静水圧下であっても変形できれば、そのような条件下で変形を試みることによって変形に関与する

転位や面欠陥さらには塑性変形機構を解明できます。そしてこのようにして得られた転位や面欠陥、塑性変形機構に関する数多くの成果は金属間化合物の変形に関する知識を拡大することに大いに貢献しました。しかし、“圧縮であれば変形できる”ことの実用的意味をほとんど見出し得ています。

意識的に圧縮応力下での変形能を利用した例ではありませんが、金属間化合物の圧縮変形能が機能していたと考えられる事例が身近な亜鉛めっき鋼板に最近見出されています。鉄鋼製品に亜鉛めっきを施すのは防食のためですが、自動車のボディーのようなプレスその他の加工が施される鋼板の表面には、防食性はもちろんプレス型との摩擦係数や表面硬さが適度な値を持っていることも求められます。そこで、亜鉛めっきの後、表面の亜鉛を亜鉛と鉄の金属間化合物に変えるための熱処理（合金化処理）が行われます。鉄-亜鉛系には鉄含有量の多い順に、 $\Gamma$ ,  $\Gamma_1$ ,  $\delta_{1P}$ ,  $\delta_{1K}$  と相とよばれる金属間化合物相がある、熱処理によって亜鉛層は下地鉄直上の $\Gamma$ 相から表面の $\delta$ 相に至る複相の金属間化合物層に変わります。これら金属間化合物は全て下地鉄の bcc 格子を基礎とする大きな単位胞の複雑な結晶構造をもつていて、これまでの議論を踏まえれば、室温付近で延性のある化合物であるとは到底考えられません。しかし、実際にはこれら化合物で表面を覆われた鋼板が厳しいプレス加工を経て自動車ボディーに加工されています。これら表面の脆い化合物は加工によって破壊しながらも、曲げ加工の圧縮側表面でもほとんど剥がれずに付着しているのです。一見不思議な現象ですが、最近の研究によって、曲げ加工に伴う圧縮ひずみの緩和にこれら化合物の圧縮変形能がかなり寄与していることが明らかになっています。防食性という力学特性以外の性質と、構造材料としてなら実用性のない圧縮応力下でのみ存在する変形能がうまく結びついた非常に興味深い例で、今後これに類する新しい視点に立った金属間化合物の利用法を考えることも大いに有意義であると考えます。

### TiAl 基合金について

ほとんど TiAl 単相からなる Ti-36.03 wt% Al 合金 (Ti-50 at% Al) の高温強度特性、衝撃強さ、耐酸化性等が報告され、TiAl 相が新しい軽量高温材料として注目され始めたのが 1950 年代の終わりです。構造用金属間化合物の研究を時系列的に眺めて頂くとよく分かりますが、高温材料としての金属間化合物の研究の主流は当初 Ni<sub>3</sub>Al にありました。しかしこれ第に TiAl 基合金に移り、1999 年には TiAl 基合金製ターボチャージャーローターがスポーツカータイプの市販車に搭載され TiAl 基合金の実用化が始まりました。Ni<sub>3</sub>Al は高温材料として多く

の優れた特性を有しますが、現在の基幹高温材料である Ni 基スーパーアロイの主たる構成相であるため、Ni<sub>3</sub>Al 単独で Ni 基スーパーアロイを明らかに凌駕する特性を発揮できなかったことが、研究の主流を TiAl 基合金に譲った原因であろうと思います。TiAl 合金のライバルは Ni 基スーパーアロイと Ti 合金ですが、Ni 基スーパーアロイと比べれば、耐熱温度ではかなわないものの圧倒的に軽量であり、かつ 800°C 程度までなら比強度で匹敵します。一方、Ti 合金の強度は 600°C を越えると低下し始めますが、TiAl 合金は 800°C 程度まで強度が低下せず耐酸化性も Ti 合金より優れています。このように TiAl 基合金が活躍できる独自の領域があったことが、TiAl 基合金実用化への道を開けた大きな理由の一つであります。

実用性の高い TiAl 基合金は Ti-46~48 at% Al をベースとする 2 相合金で、主相はもちろん TiAl 相ですが体積率にして 10% 前後の Ti<sub>3</sub>Al 相を含んでいます。この 2 相組織の合金であることが重要で、多くの複相組織の実用構造材料と同じく、熱処理あるいは高温加工によってその 2 相組織をさまざまな形態に作り込むことができ、そのことによって機械的性質を最適化できます。TiAl 基合金をふつうに溶解し铸造凝固すればラメラ組織が形成されますが、私達のグループは幸い 1 つのラメラ粒からなるインゴットを育成することに成功し、その組織的特徴から polysynthetically twinned crystal (PST) 結晶、薄い双晶が積み重なった（集片双晶）結晶という意味）と命名しました。その後、この PST 結晶を活用してラメラ組織の力学特性を系統的に研究いたしました。強靭性と高クリープ強度を備えた TiAl 基合金を開発するためには、それらに優れたラメラ組織を活用し、ラメラ組織に欠如している延性を改善することが重要であると認識されていましたので、幸い私達の PST 結晶によるラメラ組織の系統的研究が大いに注目されました。ラメラ界面が引張軸に対して 30° から 50° 傾いている試料を引張試験すればよく伸びます。このような方位では、変形は TiAl 相のラメラ内でラメラ組織界面に平行なすべりと双晶によって起こります。このことから 2 相 TiAl 基合金中の TiAl 相そのものにはかなり変形能があることが分かります。すなわち、多結晶ラメラ組織に延性がないのは TiAl 基合金の本質的な性質ではなく組織的原因であって、ラメラ組織の組織制御には明確な意義があることが明らかになったのです。ラメラ粒の微細化などラメラ組織の制御によってラメラ組織合金の延性が改善されたが、TiAl 基合金中の TiAl 相がこのような変形能を有していたことは幸運でした。この延性の故に Ti 合金と同じように铸造しても、その間の熱履歴と応力環境に耐え得て製品に至り得るのです。TiAl

基合金が、Ti合金と同じプロセスで製造し得る、Ti合金にもNi基スーパー・アロイにもない特性をもった軽量耐熱合金であったことが、TiAl基合金の実用への道を約束していたのだと思っています。私個人の立場に立てば、私が自分の研究室を持って研究し始めたとき、このTiAl基合金の研究が盛り上がり始めたこと、そしてその時期にPST結晶に出会えたことがこの上ない幸運であった思います。

### おわりに

金属間化合物の研究者が期待していたほどではありませんが、金属間化合物の実用化も徐々に進展しています。本稿では触れませんでしたが、簡単な結晶構造を有して幸い延性を保有しているNi<sub>3</sub>AlやFeAlもそれぞれ耐浸炭性を生かした熱処理炉材、耐酸化性と高電気抵抗を生かしたヒーターエレメント等に用いられています。ただ、繰り返しになりますがTiAl基合金を含め実際に用いられている金属間化合物の場合、本来それらが持っている特性がそのまま用いられているという点に注意する必要があると思います。実用化するために解決しなければならなかった問題は、その特性の本質的な改良ではなく、特性を十分に發揮させるための作り込み技術にあったの

です。具体的には、TiAl基合金が有する限定的な延性を最大限利用して部品にまで至る技術であり、FeAlではこれまた限定的な延性を最大限利用して薄板にまで圧延する技術であった訳です。私達が構造材料としての金属間化合物の研究を始めた頃、高温強度や耐酸化性に優れた金属間化合物の延性を本質的に改良して新たな実用材料を開発することが夢がありました。しかし、あたかも鍊金術師たちが金の創造を目指して化学の基礎を築いたように、私達もその夢を追い続ける間に金属間化合物という物質に対するより正確な物質観を獲得していったのだと思っています。これからは金属間化合物の持っている等身大の特性の中で有効なものを見出し、それをいかに利用するかが問題になると思います。今後行われるであろう材料工学分野のみならず多くの異なる分野の研究者によるinterdisciplinaryな金属間化合物の研究に幸運を祈りたいと思います。

なお、関連の文献等、「金属」2004年Vol.74, No.2(アグネ技術センター)に掲載の「私の最終講義—金属間化合物の研究」ならびに本年3月、研究室の同僚と共に出版いたしました「金属間化合物入門」,(内田老鶴園)をご参考頂ければ幸いです。

## 退官記念講演

# 物性における個と全体 －不均質構造における場と流れの相関－

吉 田 起 國\*

**Individuals and the Whole in Constitution of Materials  
–Correlation between Fields and Flows in Inhomogeneous Systems–**

by Katsukuni YOSHIDA

### 1. はじめに

これまで、大学における長い研究生活の間、固体物理学と材料学の分野において、半金属の電子構造と電流磁気効果、半金属における固体プラズマとその電磁流体的挙動、多相複合材料における不均質構造と物性の相関、パーコレーション臨界現象、高温超伝導体における構造制御と機能発現、カルコゲナイトガラス半導体の物性を研究対象として、研究と教育を行ってきた。これらは一見したところ脈絡が見えにくい研究対象の配列であるが、これらの研究の動機には私なりの一貫した文脈と因果関係が底流にあって、そのキーワードとなるのが本講演の演題で表されている「個と全体」である。この講演は、私が定年退官を迎えるにあたって、平成16年3月17日、京都大学大学院エネルギー科学研究所における最終講義として行ったものであるが、本文ではその講演の内容を適宜要約しながら述べる。

### 2. 研究の背景

私がまだ研究者になりたての遠い昔であるが、文理の専門領域を越えていろいろな人たちと付き合う機会があり、科学論などについて随分議論を交わしたことが思い出される。その当時は産業経済の成長が急速になされつつある時期であり、その成長の光に対する影の部分として環境問題が顕在化し始め、成長の基盤となる科学技術が従来のままのアプローチに固執していて良いのかの問い合わせが強くなり始めた頃でもあった。これまでの科学において絶大な力を發揮してきた微視化にむかう分析的要素還元的手法にはこのような多元的で大域的な問題の対処には限界があり、いかにそれを脱皮して新しいアプローチを見出すかなどが主な話題となっていた。その当時はちょうど文化人類学などでレビューストロースの構造主義が風靡していて、その思潮にも刺戟されてか新しい学問的開拓に憧れる強い気持ちがその当時の若い研究者にはあったように思える。事物を分析的に局所化する方向のみではなく、局所化から全体性にむけての認識理解の構築、すなわち「個々の個性から如何に全体の挙動を描写し把握するか」の問題は科学のみならず社会学や文化人類学の領域においても共通の課題である。これはそれから20数年後の90年代にブームとなってマスコミにまで喧伝された「複雑系」の先駆けとなった関心事であったといつてもよい。

この関心事は実は、その当時の私にとり、単なる哲学の問題ではなく、自分の研究事情に密接に関連する現実の問題として意識していたことでもあった。当時、私は金属と半導体の中間の電気的性質を持つV族に属するBiなどの半金属の電流磁気効果を対象に、ボルツマン輸送方程式に径路積分法を適用して多谷型フェルミ面に対する伝導度の導出を行い<sup>1)</sup>、それと電子構造との関係を解明すべく研究をしていた。その研究過程で、半金属単結晶の磁気抵抗の測定において、試料と磁場の特別な幾何学的条件のもとで、全電流とは正反対の向きの電場が試料に発生する現象が見出されたのである。この異常現象は、上記にのべたような電子伝導の微視的素過程をどのように工夫考案してもその発現の仕組みが判明せず、しばらくは未解明の問題として頭を悩ませていた。結局は、図1に示すように、この現象では試料内部に導入されたわずかな電流不均一性が特殊な磁場条件の下で異常に発達して、電極付近から磁場ベクトルH方向に沿って斜めに成長した収束電流が、試料側面にポテンシャルの特異点すなわち電流の2次的なソース(potential mountain)とシンク(potential valley)を発生させてい

\*京都大学名誉教授

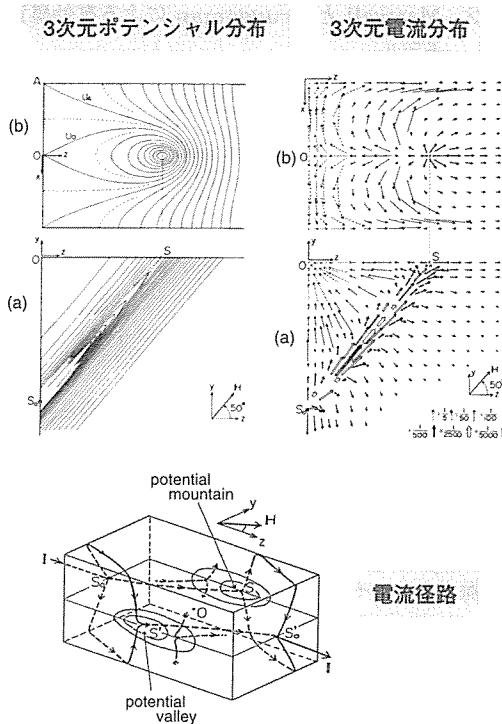


図1 強磁場下の半金属試料におけるポテンシャル分布と電流分布（解析計算による）<sup>3, 4)</sup>。(a)は電流電極 ( $S_0, S'_0$ ) を含む試料内部平面, (b)は試料表面。特異点  $S$  と  $S'$  は電流の2次的な source と sink で、磁場  $H$  の方位を変化させると試料表面を走査する。

ることが判明した<sup>2-4)</sup>。すなわち、電場と電流の空間分布に劇的な変化が生じるという電磁流体的な現象であることが明らかになった。これは複雑系における自己組織化過程に匹敵するような「個と全体」に関わった現象で、それまでの金属、半金属、半導体の輸送現象の研究において誰も予想だにしなかったことなのである。その後、その他のいろいろな金属に見出されていた縦磁気負性抵抗の問題もこの現象の枠内に入る効果であると判明し、その詳しい理論解析がなされた<sup>1, 5)</sup>。なお、これらの研究成果の一部は専門書などに解説紹介されている<sup>6, 7)</sup>。

この研究の結果に触発されて次に考えたことは、このような場や流れの分布の空間的不均一性は材料の物性発現の基本原理にも密接に関わってくるのではないかということであった。複合材料や合金材料のように一般的の材料は異なる物理化学的性質をもつ物質同士の複雑な組み合わせにより構成される不均質系と見なすことができる。そこでは構成相の相異なる性質が相乘（加算的ではない）しあって全体の物性特性や機能が発揮される。このような不均質系では相の異なる構成粒子（たとえば結晶粒）の境界近傍では、両者の性質が異なるほど場と

流れの乱れが顕著になる。したがって、このような場と流れの空間分布から全体としての物性（有効物性）を如何に導くかが課題になる。物性の多くは場と流れの応答を媒介する物理量であるからである。後述するように（表1），ここで言う「場」とは電場、磁場、あるいは温度勾配のことであり、「流れ」とは電流密度、電束密度、熱流密度、磁束密度のことである。対応する物性は電気伝導度、誘電率、熱伝導度、透磁率などである。

この不均質問題を基礎的に取り組む手法として摂動展開法による第一原理的な手法が行われていたが<sup>8, 9)</sup>、特定の条件下では厳密性は維持されるものの得られた解析解は不均質性が弱いものに限られ、適用の範囲が狭い。この解析法とは別な有効媒質の概念を用いる現象論的理論が Maxwell<sup>10)</sup>から始まり、Bruggeman<sup>11)</sup>や Landauer<sup>12)</sup>らによって展開されて、現在にいたるまでよく用いられているが、これらは一般的の材料に適用するには近似が荒すぎ、得られる組織構造の情報は極めて制限される。しかしながら不均質性の問題は、これらの理論以外に、原理的理解の発展がほとんどなされないままに長い間留まっていることがわかり、組織構造と物性の相関についてより一般的な理論の構築が痛感された。そこで、後述するように、有効媒質の概念に組織構造の基本的特徴が取り込められるように拡張した理論とその実証的研究に取り組むことになった<sup>13-15)</sup>。

また、当時統計力学の分野でコンピューター・シミュレーションの手法により盛んに研究されつつあった、ランダム粒子のパーコレーション過程にも着目するようになった。有効媒質の概念がこの現象に密接に関わってくることが分かったからである。ランダムな不均質系では構成粒子の凝集によるクラスターが幾何級数的に成長し、ある臨界濃度で系全体の構造を変えてしまうパーコレーション転移が生起するが、これは丁度2次相転移のプロトタイプとしても理解されるものである。しかしながら、この現象について、シミュレーション以外に実際の材料を用いての実証的研究（特に定量的な議論）が当時は極めて少なく、well-definedされたバルク材料を用いての実験の必要が痛感されたのである<sup>14)</sup>。本文の全般ではこの不均質系の構造と物性の相関に結び付いた有効媒質法を、後半ではパーコレーション過程について述べ、最後には最近行ってきた高温超伝導銅酸化物におけるナノ構造パーコレーションの問題を述べる。

### 3. 不均質系における有効媒質理論と物性の複合効果

#### 3.1 不均質構造と物性

多くの材料の組織構造は異種の物質の交じり合いによって構成される。この成分物質は凝集してクラスターを

形成し、固有の物性を持つ。このようなクラスターを形成する成分物質をここでは「相」と呼ぶことにする。このような異種の相から構成される不均質材料には、各種の合金や複合材料あるいは蒸着やスパッターなど非平衡的プロセスにより作製される材料、あるいは「水と油」のエマルジョンのように2相分離構造をもつ液体など多くの材料が該当する。その他、特殊なものでは、複雑に絡み合った金コロイドの連鎖が作る系や黒鉛の煤（多くはフラクタル構造をとる）、あるいは軽石などのような火成岩や砂岩なども同じ範疇の材料である。以下で対象とされる相はかなり広義に解釈され、例えば岩石やレンガに含まれる空洞やボイドのような空隙もここでは相の1種と見なされる。

以上のような複合体の不均質構造はその全体としての物性（有効物性）をどのようにして発現させるのだろうか。この有効物性は、個々の相の固有物性についての単なる「混合」（加算平均）ではなく、互いの相乗効果による「混成」効果として発現するのである。いま、このような不均質系のある場所  $r$  に作用する場を  $F(r)$ 、それに応答する流束密度を  $D(r)$ 、両者に介在する物性量を  $\kappa(r)$  のように表す。 $F(r) = \langle F(r) \rangle + \delta F(r)$ ,  $\kappa(r) = \kappa_0 + \delta \kappa(r)$  と表現すると、流束密度  $D(r)$  の体積平均は以下のようになる<sup>13)</sup>。

$$\langle D(r) \rangle = \langle \kappa(r) \rangle \cdot \langle F(r) \rangle + \langle \delta \kappa(r) \cdot \delta F(r) \rangle \quad (1)$$

右辺第1項は場も物性量も単に加算平均したもので表されており、この項のみが重要であるならこれ以下の議論を開拓する必要はない。注目すべきことは第2項で、これは物性と場（またはポテンシャル）の変動の場所的相関をあらわす物であり、これを厳密に求めることはポテンシャル論的には多体問題になる。これらの諸量  $F(r)$ ,  $D(r)$ ,  $\kappa(r)$  には具体的な物理量をあてはめたものが表1である<sup>16, 17)</sup>。

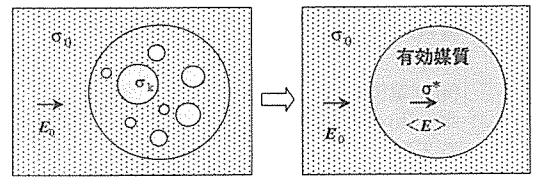
本文ではしばしば伝導度  $\sigma$  を例に上げて議論するが、理論の展開形式が同一なので、そのまま熱伝導度、誘電率、透磁率にも同じ適用が出来、代表する物性記号として  $\kappa$  を用いる。

### 3.2 Maxwell と Bruggeman による有効媒質モデル

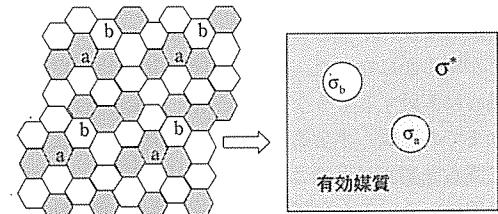
2つの成分相が分散構造を成す場合、連続体相である母相  $a$  に分散相粒子  $b$  が埋め込まれているとする。相  $a$ ,  $b$  の体積分率をそれぞれ  $f_a, f_b$  とする。図2(a)に示すように、分散粒子を囲む球体が同じ連続体母相に埋め込まれた未知の有効媒質の球体に還元することにより系全体の有効物性  $\kappa^*$  を求める方法が Maxwell モデル<sup>10)</sup>（または Maxwell-Garnett モデル<sup>18)</sup> である。以下では媒質は等方的であるとし、物性量をスカラーとして表現する。

$$\frac{\kappa^* - \kappa_a}{\kappa^* - 2\kappa_a} = f_b \frac{\kappa_b - \kappa_a}{\kappa_b - 2\kappa_a} \quad (2)$$

この式は Maxwell による電気抵抗の計算や金属コロイドを含む透明ガラスの着色現象の説明に用いられて以来古い歴史をもつモデルであるが、現在も良く用いられている。伝導度  $\sigma$  をもつ金属の誘電率  $\epsilon_m$  は角振動数  $\omega$  の電磁波（光）にたいして



(a)



(b)

図2 有効媒質の概念：(a) Maxwell モデル、  
(b) Bruggeman モデル。

表1 関与する物理量の関係<sup>16, 17)</sup>

流束密度 $D$ (ベクトル)	物性 $\kappa$ (テンソル)	場 $F$ (ベクトル)
電流密度 $J$	電気伝導度 $\sigma$	電場 $E$
熱流密度 $Q$	熱伝導度 $\theta$	温度勾配 $-\nabla T$
電束密度 $D$	誘電率 $\epsilon$	電場 $E$
磁束密度 $B$	透磁率 $\mu$	磁場 $H$

$$\varepsilon_m = \varepsilon_{om} + \frac{4\pi\sigma}{i\omega} \quad (3)$$

であるから、このような金属コロイドを含むガラスの誘電率  $\varepsilon^*$  は複素誘電率  $\varepsilon^* = \varepsilon_r^* + i\varepsilon_i^*$  で与えられる。上記の Maxwell モデルを用いて  $\varepsilon_r^*$  や  $\varepsilon_i^*$  を計算すると、可視光領域の短波長側に強い吸収がおこることがわかれ<sup>17)</sup>、金属コロイドによる着色現象が説明される。金属コロイドが金であれば赤(ベネチアン・グラスで有名)、銀では黄色、銅では茶色に着色する。

以上の分散構造の対極にあるのが、成分相粒子の分布が全くランダムに分布する場合である。図 2 (b) に示すように粒子(たとえば結晶粒)の集合体を未知の一様な媒質(有効媒質)で置き換え、各粒子はこの有効媒質に埋め込まれている。この系に電場  $E_0$  を印加したとき各粒子に誘起される電場の空間平均が  $E_0$  になるという自己無撞着法を用いると有効物性  $\kappa^*$  が満たすべき次の方程式が得られる。

$$f_a \frac{\kappa^* - \kappa_a}{2\kappa^* + \kappa_a} + f_b \frac{\kappa^* - \kappa_b}{2\kappa^* + \kappa_b} = 0 \quad (4)$$

これが Bruggeman モデル<sup>11)</sup>(または Bruggeman-Landauer モデル<sup>12)</sup>である。この自己無撞着法は磁性体などの相転移に適用される Weiss の分子場近似(または平均場近似)と同じアプローチであり、類似の考え方には、Bragg-William の合金相転移モデルや不規則固溶体系における電子のハミルトニアンのコヒーレント・ポテンシャル近似、また広義には多体電子系の Hartree の自己無撞着場近似も類似の思想に基づくと解せられる。(4)式のモデルの有効性は Landauer<sup>12)</sup>により各種合金の電気抵抗への適用によって示された。

### 3.3 有効媒質の一般化モデル

以上の 2 つのモデルは分散構造と全くランダム構造という両極端の構造を対象としているため、その適用からは組織構造の情報はほとんど得られず、一般的な材料へ適用には無理が出てくる。そこで、両者のモデルを統合し、かつ構造の基本的情報が得られるような理論が必要になる。以下では私が考え出した方法を述べよう<sup>13, 14)</sup>。ここでは前記した従来のモデルよりもより基本的な定式から出発して、第一原理的手法からどのように現象論的アプローチ(有効媒質概念)へ遷移すべきかの統一的道筋が示されるような理論的スキームが与えられる<sup>13)</sup>。系全体の物性を表す量である有効物性量  $\kappa^*$  の定義は次式で表現される。

$$\kappa^* \cdot \langle F(r) \rangle = \langle \kappa(r) \cdot F(r) \rangle \quad (5)$$

ここで表記  $\langle A \rangle$  は  $A$  の体積平均を表す。以下では場所に依存しない量を添え字  $o$  で表す。  $\kappa(r) = \kappa_o + \delta\kappa(r)$

と置き、 $\kappa(r)$  と  $F(r)$  の場所依存性を次式で定義される規格化伝導度因子  $s(r)$ (テンソル) に繰り込めるようにする。

$$s(r) \cdot F_o = \delta\kappa(r) \cdot F(r) \quad (6)$$

この  $s(r)$  はポテンシャル  $U(r)$  のもとでの流束密度  $D(r)$  の連続の方程式(7)式)から(8)式のように導かれる<sup>13)</sup>。

$$\nabla \cdot [\kappa(r) \cdot \nabla U(r)] = 0 \quad (7)$$

$$s(r) = \delta\kappa(r) \cdot [I + \int g(r_{12}) \cdot s(r_2) d^3r_2] \quad (8)$$

ここで、 $I$  は単位行列で、 $g(r_{12})$  は

$$\nabla \cdot [\kappa_o \cdot \nabla G(r)] + \delta(r) = 0 \quad (9)$$

を満たすグリーン関数  $G(r)$  の  $r_1, r_2$  に関する 2 階偏微分によって得られるテンソルである( $\delta(r)$  はデルタ関数)<sup>16, 17)</sup>。この  $s(r)$  を用いて有効物性量の一般表式が得られる<sup>13)</sup>。

$$\kappa^* = \kappa_o + \langle s(r) \rangle \cdot \langle \delta\kappa(r)^{-1} \cdot s(r) \rangle^{-1} \quad (10)$$

この一般式により、伝道度くりこみ因子  $s(r)$  が求められれば、直ちに有効物性  $\kappa^*$  が得られる。またこの表式は以下の議論でも判るように、第一原理的な摂動展開の方法と現象論的な有効媒質法の両者を自然なかたちで結び付けることを可能にする。

この(8)式は逐次近似により多項式に展開出来、それは更に次式に還元される(演算子表記の慣習用法に従つて  $r_1, r_2, r_3, \dots$  に関する多重積分記号を省く)<sup>13)</sup>。

$$s = \delta\kappa(I - g\delta\kappa)^{-1} \quad (11)$$

(10)式と(11)式から  $\kappa^*$  の次のような摂動展開式が得られる(以下でも多重積分記号を省く)<sup>16, 17)</sup>。

$$\kappa^* - \kappa_o = \sum_{n=1}^{\infty} \delta\kappa^{(n)} \quad (12)$$

$$\delta\kappa^{(1)} = \langle \delta\kappa \rangle \quad (13)$$

$$\delta\kappa^{(2)} = \langle \delta\kappa g \delta\kappa \rangle - \langle \delta\kappa \rangle \langle g \delta\kappa \rangle \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \delta\kappa^{(3)} &= \langle \delta\kappa g \delta\kappa g \delta\kappa \rangle - \langle \delta\kappa \rangle \langle g \delta\kappa g \delta\kappa \rangle \\ &\quad - \langle \delta\kappa g \delta\kappa \rangle \langle g \delta\kappa \rangle + \langle \delta\kappa \rangle \langle g \delta\kappa \rangle \langle g \delta\kappa \rangle \end{aligned} \quad (15)$$

⋮  
⋮

以上の式からも分かるように、有効物性量は構成相の固有物性量の単なる加算平均ではなく、異なる場所間の相間に本質的に依存していることが分かる。2体相間の寄与からなる2次の項については、不均質媒質が等方的であるなら（従って物性量はスカラーになる），

$$\delta \kappa^{(2)} = -[\langle \kappa^2 \rangle - \langle \kappa \rangle^2] / (3\kappa_0) \quad (16)$$

で与えられ、この式は他の様々な方法でも求められているよく知られた式である<sup>8, 9, 19, 20</sup>。3次以上の高次の項は、多体相間をあらわし、系の構造について特別な仮定や近似法の工夫が必要で、一般的な解析計算は困難である。

そこで、このような多体問題をポテンシャルの一体問題に還元する現象論的方法、すなわち有効媒質モデルへの転換を考える<sup>13</sup>。系を構成する単位要素（例えば結晶粒）の1つを任意に選んだとき、これが何らかの意味で均質化した媒質（有効媒質）に埋め込まれていると仮定する。1個の構成要素粒子（例えば結晶粒）に着目して、それが $\kappa_0$ の均質媒質に埋め込まれていると見なすわけである。すなわち、一体のポテンシャル問題に還元される。この均質媒質に一樣な外場  $F$ 。（例えば電場  $E_0$ ）が印加されているとき、構成要素内に誘起される場  $F$ （例えば電場  $E$ ）を求めるとき、繰り込みの関係式 (6) 式より  $s$  を求めることができる。この  $s$  が求められれば有効物性量の一般的公式の (10) 式から  $\kappa^*$  が得られるのである。

この段階で導かれる幾つかの具体例を示そう<sup>13</sup>。簡単のために等方的な二相混合系（夫々の固有物性は  $\kappa_a$ ,  $\kappa_b$ ）を考える。一方の相  $a$  が連続相でこれに他方の相  $b$  の構成粒子（球形）が埋め込まれている分散型の構造を考える。この粒子に誘起される場の計算から  $s$  を求め、さらに (10) 式において  $\kappa_0 = \kappa_a$  とおけば、直ちに Maxwell モデル (2) が得られる。また、二つの相のいずれもが連続相ではないときは、相  $a$  と相  $b$  の構成粒子を一定の比率 ( $f_a, f_b$ ) で未知の有効媒質  $\kappa^*$  にランダムに埋め込み、(10) 式で  $\kappa^* = \kappa_0$  とおけば、自己無撞着条件

$$\langle s(r) \rangle = 0 \quad (17)$$

が得られる。この式から直ちに Bruggeman モデル (4) 式が得られる<sup>13</sup>。

この自己無撞着条件から得られる成果の一つはパーコレーション転移（クラスター構造や物性が相転移的に変わること）が導き出されることである。すなわち有効媒質の概念が後述するパーコレーション過程と関連している

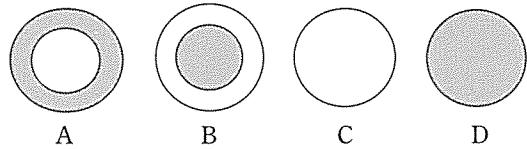


図3 複合細胞型の構造要素<sup>13</sup>

のである。このことは興味深いことであって、これは何らかの意味で多体相間効果が自己無撞着条件には近似的に取り入れられていることを示唆する。事実、先述の基礎定式に立ち返ると、(12) 式の展開は、グリーン関数積分のダイヤグラム法を用いて多体相間にある特別な近似を導入することにより、有効媒質の (4) 式に還元できる<sup>16</sup>。

以上の議論で一般化への基盤は整備できたが、まだ目的までの道のりの中途にある。このままでは系の組織構造の特徴を直接取り入れた形にはなっていないのである。そこで、Bruggeman モデルの考えを生かしながら Maxwell 型の分散構造を取り込み、有効物性を自己無撞着に記述できる形に理論を発展させる<sup>13</sup>。系の構造要素単位として図3に示すように、2つの複合セル (A と B) と 2 つの単純セル (Bruggeman型セルの C と D) の集合体を有効場質として考える<sup>13, 15</sup>。C と D を用いての有効媒質近似は前述したように Weiss の分子場近に対応しているが、A と B のセルでは着目する粒子の近傍の相との相間が考慮されており、これはちょうど分子場近似を高めた Bethe 近似に対応している<sup>14</sup>。これらのセルは構造要素としての実質的な機能を受け持つ意味で考えられているのであって、必ずしもこの形のセルがそのまま観測されるわけではないことに注意する。この集合体に自己無撞着条件を課すことにより、(17) 式から、有効物性量  $\kappa^*$  が満たすべき式が得られる<sup>13</sup>。

$$\begin{aligned} & \frac{\kappa_a + 2\kappa_b + \gamma_A(\kappa_b - \kappa_a)}{(2\kappa^* + \kappa_b)(\kappa_a + 2\kappa_b) + 2\gamma_A(\kappa_b - \kappa^*)(\kappa_a - \kappa_b)} F_A \\ & + \frac{\kappa_b + 2\kappa_a + \gamma_B(\kappa_a - \kappa_b)}{(2\kappa^* + \kappa_a)(\kappa_b + 2\kappa_a) + 2\gamma_B(\kappa_a - \kappa^*)(\kappa_b - \kappa_a)} F_B \\ & + \phi \left( \frac{f_a}{2\kappa^* + \kappa_a} + \frac{f_b}{2\kappa^* + \kappa_b} \right) = \frac{1}{3\kappa^*} \end{aligned} \quad (18)$$

$$F_{A,B} = \frac{(1-\phi)(\gamma_{B,A} - f_{b,a})}{\gamma_A + \gamma_B - 1} \quad (\text{添字は記載の順序に従う}) \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \gamma_A &= \sum_n C_n f_a^n, & (\alpha_2 \geq f_a \geq \alpha_1) \\ \gamma_B &= \sum_n D_n f_b^n. \end{aligned} \quad (20)$$

$$\gamma_A = f_a, \gamma_B = 1 \quad (\alpha_1 \geq f_a \geq 0) \quad (21)$$

$$\gamma_A = 1, \gamma_B = f_b = 1 - f_a \quad (1 \geq f_a \geq \alpha_2) \quad (22)$$

ここで、因子  $\alpha_1$  と  $\alpha_2$  ( $\geq \alpha_1$ ) は分散構造に関わる閾値で、 $f_a = \alpha_1$  で相 a の分散構造が消滅、 $f_a = \alpha_2$  で相 b の分散構造が生成される。パーコレーション転移の起こり易さはこの因子  $\alpha_1$  と  $\alpha_2$  により大きく左右される。また  $\phi f_a$  と  $\phi f_b$  はセル C と D の体積分率である。(20) 式の係数  $C_n$  と  $D_n$  は  $\gamma_A$  と  $\gamma_B$  のそれぞれが  $f_a = \alpha_1$  と  $f_a = \alpha_2$  で滑らかに連続する条件から決定される<sup>13</sup>。この(18) 式は拡張した有効媒質モデルの表式である。(18) 式において特別な極限を取れば従来の有効媒質モデルに還元できる<sup>13, 14</sup>。すなわち、

- (i)  $\phi = 0$  の条件のもとで  $(\alpha_1, \alpha_2) \rightarrow (0, 0)$  とすれば、(18) 式から Maxwell モデル (2) 式が得られる (a 相が連続相、b 相が分散相)。
- (ii) 同様に、 $\phi = 0$  の条件のもとで  $(\alpha_1, \alpha_2) \rightarrow (1, 1)$  とすれば (i) の構造を反転した分散構造に対応するもう一方の Maxwell モデルが得られる (a 相が分散相、b 相が連続相)。
- (iii)  $\phi \rightarrow 1$  であるか、もしくは構造因子  $(\phi, \alpha_1, \alpha_2)$  の値の如何に関わらず  $\gamma_A = \gamma_B = 1$  であれば、(18) 式は Bruggeman モデル (4) 式そのものに還元される。

以上に展開した理論は Yoshida モデルとしてさまざまな分野において解説・紹介されている<sup>21-27</sup>。また、この理論はパーコレーション転移を記述し、その閾値を上記の構造因子  $(\phi, \alpha_1, \alpha_2)$  によって定めることができるため、しばしば Structure-Oriented Percolation Model とも呼ばれる<sup>21, 30</sup>。この理論の応用としては一般的な不均質材料の構造と物性の評価、たとえば、カーボンブラック-高分子樹脂複合材料<sup>22, 24, 28</sup>、ナノクリスタル Si 薄膜<sup>29</sup>、ナノ粒子化合物複合薄膜<sup>27</sup>、高温超伝導多結晶体<sup>29</sup>、窒化物 2 相複合焼結体<sup>30</sup>、金属-セラミックス複合材料（薄膜<sup>13</sup>とバルク<sup>14</sup>）、など広範な材料の開発・評価にこの理論モデルが活用されている。実験と計算との比較の例として、図 4 (a) に W-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の蒸着膜における伝導度の組成依存性についての実験結果と計算結果（実線）を示す<sup>13</sup>。蒸着したままの状態とそれをアニールした状態の違いが示されているが、アニールにより  $f = 0.8$ あたりから金属相が連続体化してくる様子が計算によって表現されている。図 4 (b) にカーボンブラック-高分子樹脂の複合材料について電気伝導度の実験結果と計算結果（実線）を示す<sup>24</sup>。計算と実験の結果が

比較されているが、有効物性に急激な変化おきるパーコレーション転移とその臨界挙動が理論モデルによりかなり良く再現されている。また熱伝導度や熱電能についても良い一致が得られている<sup>28</sup>。その他、有効媒質モデルを用いた研究として、金属中の微小ボイド分散構造による線形磁気抵抗の発現<sup>31, 32</sup>、構造要素の幾何学的異方性によるパーコレーション転移の変化の理論解析が行われている<sup>33</sup>。

余談になるが、鳥や魚の群れのように、集団の全体としての運動は、各個体が自分以外の多数の仲間のそれぞれの運動を把握しながら行動することにより決まるではなく、個々が (1) 群れの中心に寄ろうとする、(2) 衝突を回避しようとする、(3) 自らの速度を加減調整しようとする 3 つの単純な志向性のみによって集団運動が律せられるようである。これにより鳥の大群はビルなどの障害をうまく回避しながら思いのほか複雑な集団飛遊ができる。上記の有効媒質モデルのアプローチにおいても個々の構成要素の個性とその近傍の環境を工夫して取り込むことによりパーコレーション転移のような全体的挙動を表すことができたが、共通する思想が感じられるのは興味深い。

#### 4. 不均質系におけるパーコレーション現象

##### 4.1 クラスターの成長

二つの異なる相の粒子物質 (a, b) が混じり合った不均質系を考える。両者の間に化学反応は起こらず、それぞれの個性に変化は生じないとする。すでに図 4 で示したように、成分の濃度を変えて行くと、濃度変化の途中で系全体の性質が急に変わる所がある。そこを境に系は a 的な性質から b 的な性質を強く持つようになるのである。この転移現象はかなり一般性のある現象で、磁性体など熱力学的な相転移は良く知られたその一例である。この転移現象はその基本的な機構がパーコレーション過程として理解され、また前章 3.3 で述べた有効媒質の一般化モデルによっても記述できる<sup>13, 14</sup>。コーヒーのパーコレーター やガスマスクに見られるように、液体や気体が気孔性媒質中を「浸透」して、気孔率がある閾値 ( $p_c$ ) 以上になると、全体に広がり始める（媒質全体を通り抜ける）過程がこの現象の本来の意味である。この現象を流体の「浸透」という固定したイメージに限定しなくても良い。系を構成する要素（粒子）が空間的にランダムに配置されている時、この要素間の「むすびつき」の空間的広がりであるクラスターの成長過程を対象としても良い<sup>34</sup>。このクラスターの成長は、ある微小なクラスターが近傍の粒子を吸収しながら徐々に大きくなることによってなされるのではなく、有限サイズのクラスター同士が合体する過程が繰り返されることによる飛躍的増大

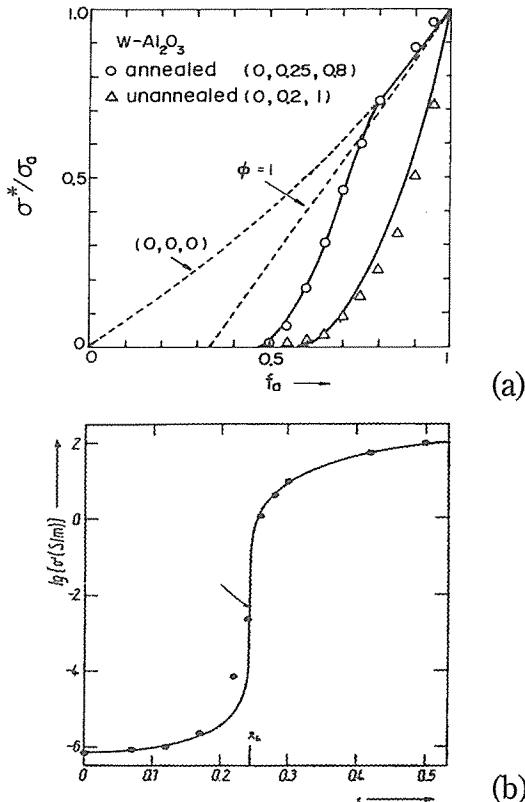


図4 (a) 2相W-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜の電気伝導度 $\sigma^{(1)}$  ( $f_b$ はWの体積分率) および(b)グラファイト-高分子樹脂2相複合体の電気伝導度 $\sigma^{(2)}$ に対する実験(マーク点)と理論計算(実線)の比較。(b)において、縦軸は対数目盛、横軸はグラファイトの重量分率、図中の矢印はパーコレーション転移の位置を示す。

が基本過程であり、その幾何級数的成长がやがては系全体に広がってパーコレーション転移が惹起する<sup>17, 34, 35</sup>。この過程により系は自己相似的構造を持つようになり、その幾何学的複雑さの指標としてフラクタル次元が適用できる。図5には転移直前で形成される大きさが上位にある3つの有限クラスターを示すが(図の余白の部分には大小のクラスターの群れがひしめいているが省かれている)、クラスターを隔てる僅かの空隙(破線)に粒子もしくは微小クラスターが入り込むことにより、一気に系全体を貫通するクラスターが形成され、転移が生じる<sup>17, 34</sup>。このような過程では、一般に個々のクラスターの平均サイズ、クラスターの個数やクラスター内2点間の平均距離(相関距離 $\xi$ )などの統計的物理量は粒子の臨界濃度 $p_c$ からの差( $x_c - x$ )のべき乗で表現される。連続体媒質では粒子濃度 $x$ の代りに構成相の体積分率 $f$ が用いられる。たとえば相関距離は以下のように表現される。

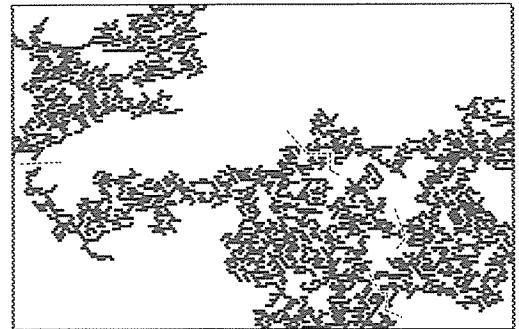


図5 パーコレーション転移直前の巨大クラスター  
—：3角格子系においてサイズが上位3位までのもの<sup>34</sup>。

$$\xi \propto |x - x_c|^{-\nu}, \quad \xi \propto |f - f_c|^{-\nu} \quad (23)$$

このようなべき指数則は、2次相転移の臨界挙動に特有なもので、べき指数は臨界指数であり、その値は空間次元に強く依存するが、系の構造の詳細にはあまり依存しないユニバーサリティを持つ。

パーコレーション過程は一般の2次相転移現象のプロトタイプとなるものであり、それに特有の臨界挙動を示す。原子や分子のようなミクロな粒子を対象とすれば、ゾルゲル転移、金属-絶縁体(あるいは半導体)転移、アモルファス半導体の易動度端、希薄強磁性合金の磁化などが典型的な例であるが、その他に、森林火災の延焼、伝染病や地震の伝播、情報(うわさ)の伝播の過程などの自然や社会の多彩な現象への広い適用例がある。物質世界のみならず、認知や理解の達成あるいは喜怒哀楽や好き嫌いの感情表出など脳の働きのプロセスにもこのようなパーコレーション閾値的な境目があるのでないだろうか。

## 4.2 物性の臨界挙動とスケーリング理論

### 4.2.1 物性のべき指数則

これまで述べてきたクラスター構造の振る舞いに対応して電気伝導、熱伝導、誘電率、拡散、弾性などの物性がどのように発現するのかはさらに興味ある問題である。有効物性 $\kappa$ (以下では簡単のため添記号\*を省略)を持つ系は等方的な媒質で、固有物性( $\kappa_a, \kappa_b$ )をもつ2つの相から構成されるとする。以下では $f$ および $f_c$ は相 $b$ の体積分率とパーコレーション閾値(臨界点)を表すことにする。臨界点 $f_c$ の近傍では、 $\kappa/\kappa_b$ は $\kappa_a/\kappa_b$ と $f-f_c$ の関数であると仮定すると、これらの変数をパラメーター $\lambda$ でスケールして次式が成立立つとする<sup>35</sup>。

$$\kappa = \kappa_b \lambda^{-1} Q [(\kappa_a/\kappa_b) \lambda^\alpha, (\Delta f) \lambda^\beta] \quad (24)$$

(ただし、 $\Delta f \equiv f - f_c$ )

$Q$  はスケーリング関数であり、また  $\lambda$  に関する同次式になっている。この同次式条件と  $\kappa_a/\kappa_b \approx 0$  の漸近解を考慮すると、新たなスケーリング関数  $F$  に書き直して(24)式は次のように変換される。

$$\kappa_{\pm} = \kappa_b (\Delta_{\pm} f)^t F_{\pm} [(\Delta_{\pm} f)^{-(t+1)} \kappa_a / \kappa_b] \\ (\text{ただし, } \Delta_{\pm} f \equiv \pm (f - f_c)) \quad (25)$$

$\kappa_a/\kappa_b \approx 0$  の場合、このスケーリング式から相 b の体積分率を変数とする次のような単一べき指則が得られる<sup>35, 36)</sup>。

$$\kappa_+ = \kappa_b F_+(0) (f - f_c)^t \quad (f > f_c) \quad (26)$$

$$\kappa_- = \kappa_a F'_-(0) (f_c - f)^{-s} \quad (f < f_c) \quad (27)$$

べき指数  $t$  と  $s$ （この指数は前章の伝導度くりこみ因子  $s$  とは別物である）は系の空間次元には依存するが、微細な構造には依存しないユニバーサリティを持つ。3 次元系では  $t \approx 2.0$ ,  $s = 0.7 \sim 0.73$  および 2 次元系では  $t = s = 1.1 \sim 1.3$  と見積られている。指数  $t$  についてはクラスターのバックボーン構造の普遍的な特徴に関係し、link-node-blob モデルから直感的に推算できる<sup>39)</sup>。しかし、この方面的臨界挙動の理論はまだ確立されているとはいえない。例えば、べき指数  $s$  については単なる経験式があるのみでモデル理論はない。また、実際の材料については、臨界点からかなり離れた体積分率にいたる広い範囲まで、べき指数則が成り立つことがしばしば観測されているが、この問題もまだ十分解明されていないようと思える。

#### 4.2.2 実際の材料での電気伝導度と誘電率のべき指則

図 6 は金属 (Nb) と絶縁性セラミックス ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) のバルク複合体の電気伝導度  $\sigma$  と誘電率  $\varepsilon$  の振る舞いを示す<sup>14, 37)</sup>。横軸は金属相の体積分率  $f$  であり、縦軸は対数スケールで、 $f = 1$  での  $\sigma$  の値  $\sigma_0$ 、および  $f = 0$  での  $\varepsilon$  の値  $\varepsilon_0$  で規格化されている。パーコレーション閾値（粒子の臨界濃度  $p_c$  に相当）は  $f_c = 0.154$  で、これは 3 次元格子上に作られた離散型パーコレーション系についてシミュレーションにより得られている値  $f_c = 0.16$  に極めて近い。有効伝導度は挿入図に示すように典型的なべき指則  $\sigma \propto (f - f_c)^t$ 、すなわち (26) 式に従っている。図 6 では臨界指数は  $t = 2.06$  である。この値は様々な構造の規則格子点で作られるパーコレーション系についてのシミュレーションで得られた指数とほぼ同じ値であり、系の構造の詳細に依存しないユニバーサリティーを持つと考えられている。一方、 $f < f_c$  の領域では系の絶縁性は

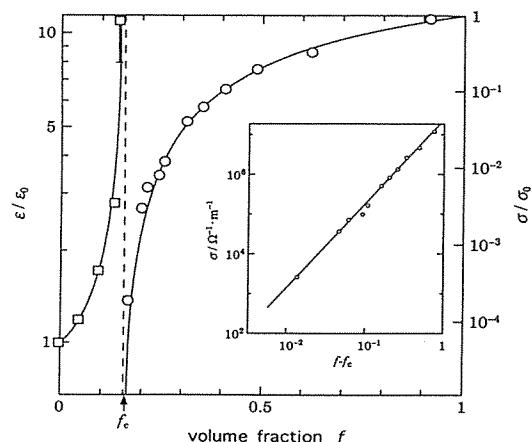


図 6 金属-セラミックス ( $\text{Nb}-\text{Al}_2\text{O}_3$ ) のバルク複合材料におけるパーコレーション転移（縦軸は対数目盛り）。(右) 電気伝導度  $\sigma^{14}$  と (左) 誘電率  $\varepsilon^{34, 37}$ 。挿入図はべき指則に従う電気伝導度。

高いので誘電率  $\varepsilon$  が重要な物性量となる。しかし、絶縁抵抗は現実には有限であるから有効伝導度も有限な値を持ち、有効誘電率  $\varepsilon$  と同じべき指則  $\varepsilon \propto (f_c - f)^{-s}$ 、すなわち (27) 式に従う。この  $f$  の領域では金属相のクラスターは孤立分散しているが、個々の金属クラスター内では外からの電場は伝導電子により完全に遮蔽されている。 $f$  が増大すれば試料全体としての遮蔽効果が強められるため、誘電率  $\varepsilon$  は増大し、 $f_c$  近傍では急速に無限大化する<sup>37)</sup>。この実験的研究<sup>14)</sup>は、クラスター分布の観測と解析も行っており<sup>38, 39)</sup>、実際の材料においてパーコレーション現象が理論の予想通りに実現されていることを 3 次元のバルク試料を用いて系統的かつ定量的に実証した初めての研究例になっていると思われる。

ここで、パーコレーションの応用として我々が行ってきた材料の診断について簡単に言及しよう<sup>36, 40, 41)</sup>。一般的の材料に対しては転移点  $f_c$  やべき指数  $t, s$  の値については以上に示したようなクリヤーカットな結果は得られないのが通例である。むしろ、このずれを測定して材料の診断を行うのである。たとえば、観測される転移点（パーコレーション閾値）の多くは  $f_c > 0.16$  である。これは 2 相の組織構造のモルフォロジーの対称性に関連し、非対称性が強いほど（極端な場合では分散構造のように）0.16 からのずれが大きくなり、3 次元系であっても  $f_c \sim 0.5$  ほどになる例は多い<sup>13)</sup>。また、3 次元系であるにかかわらずべき指数  $t$  が 2 から大きく隔たる場合が多く、時には 2 次元系であるかのような値 ( $t \approx 1.1$ ) が観測される<sup>36, 42)</sup>。その原因は、構成相の固有物性比の有限値が無視できなくなり、 $\kappa_a/\kappa_b \approx 0$  であることを必要

とする单一べき指数則が成り立たないためである。この場合はスケーリング関数  $F$  をより高次の項まで展開して議論しなければならない<sup>35, 36, 42</sup>。また、組織構造の特殊なモルフォロジーや伝導の素過程に依存して以上のランダム系のものとは異なるクラスのユニバーサリティの存在が考えられ、これによりべき指数値のずれが解釈される場合があるが、紙数の関係でここではその議論はしない。

#### 4.3 元素置換した超伝導銅酸化物におけるナノ構造不均質性と伝導機能

最後に、高温超伝導体の代表的な化合物である銅酸化物  $RBa_2Cu_3O_y$  ( $R$ -123,  $R$  は Y, Gd, Nd などの希土類元素) の  $R$  を Pr で部分的に置換した化合物  $R_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_y$  (あるいは、R-123 と反強磁性絶縁体化合物  $PrBa_2Cu_3O_y$  (Pr-123) の固溶体) におけるナノスケールの不均質構造とそれが関わる輸送現象について述べてみよう。これは我々が最近行ってきた研究である<sup>43-49</sup>。このような系では Pr の濃度  $x$  が増大するにつれて、系全体の超伝導性は弱くなり、超伝導の臨界温度  $T_c$  が低下する。やがて  $x$  がある閾値  $x_c$  を越えると、いかなる低温でも超伝導が現れなくなり、系全体が絶縁体的 (あるいは半導体的) 振る舞いを示す。このような系では構造要素として R-123 と Pr-123 の結晶単位胞 (セル) が入り混じったナノレベルの構造不均質性が存在し、それぞれの相から構成されるクラスターの成長はパーコレーション過程により記述されると考えられる<sup>43</sup>。上記の閾値は事実上パーコレーション閾値に相当するとみなされる。このような閾値近傍では一般に非オーミックな抵抗が現れやすくなり、比抵抗  $\rho$  は電流密度  $J$  に著しく依存するようになる<sup>43</sup>。図 7 (a) は Gd 系の化合物  $Gd_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_y$  の  $\rho$  の温度依存性であるが<sup>45</sup>、閾値  $x_c = 0.45$  では低温側で著しい非オーム性が現れ、 $\rho$  は  $J$  (または全電流  $I$ ) の増大とともに増大する。閾値近傍の濃度では、Gd-123 のセルのクラスターは系全体に広がる超伝導性のネットワークを形成して、超伝導を維持しているが、このネットワークのどこかに必ず最も脆弱な細いくびれ (neck) が存在して、全電流  $I$  は集中してこの neck を通らざるを得ないという状況が実現されている。図 8 はこの状況を模式的に示したものである<sup>45</sup>。電流  $I$  を増大するとまず全ネットワーク中で最も弱い neck である  $n_1$  の臨界電流を越えたときそこでの超伝導は破られ、 $n_1$  のところに有限の抵抗が表れる。分断された超伝導のサブネットワーク  $A_1$  と  $A_2$  にも同様な neck の  $n_2$  と  $n_3$  が存在し、電流がさらに増すことにより、そこでの超伝導が破られ、あらたに抵抗が発生し、抵抗が加算されていく。このように、階層的な超伝導ネットワークの各段階で同じ過程が繰り返されて、 $n_1, n_2, n_3, \dots$  と連なる neck の chain に沿って超伝導の破壊が進行していく<sup>45</sup>。この過程が、抵抗が電流とともに増大する仕組みと考えられる。問題はこの過程にとどまらない。さらに濃度  $x$  を高めると比抵抗は温度増大につれて減少する半導体的な振る舞いを示すようになるが、このとき電流依存性は一旦消失してオーミック抵抗が観測さ

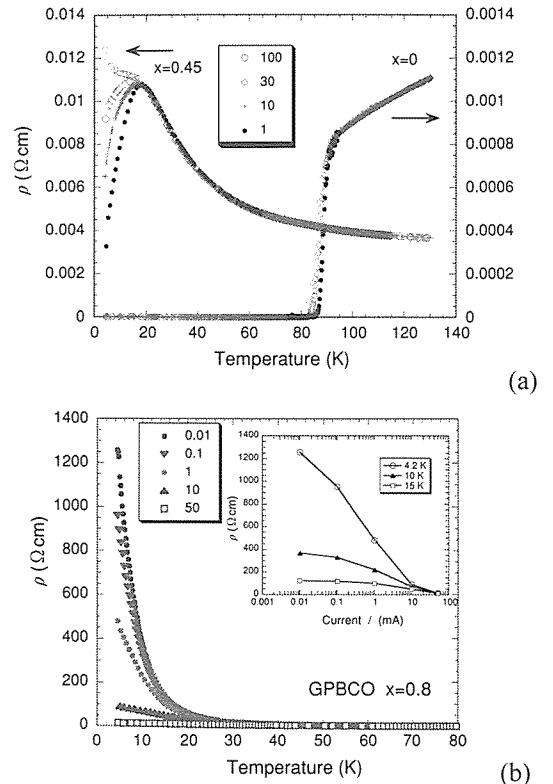


図 7 高温超伝導銅酸化物  $Gd_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_y$  における非オーミック抵抗<sup>45</sup>。電流  $I$  の増加とともに (a) 増加する比抵抗  $\rho$  と (b) 減少する比抵抗  $\rho$ 。凡例は  $I$  の値 (単位 mA) を示す。

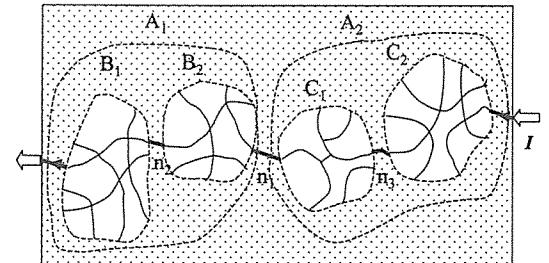


図 8 階層構造的な超伝導ネットワークのパーコレーションモデル: サブクラスター ( $A_1, A_2$ ,  $B_1, B_2$ ,  $C_1, C_2$  ...) に対応して超伝導が破れやすいネック ( $n_1, n_2, n_3, \dots$ ) が存在する<sup>45</sup>。

$n_1, n_2, n_3, \dots$  と連なる neck の chain に沿って超伝導の破壊が進行していく<sup>45</sup>。この過程が、抵抗が電流とともに増大する仕組みと考えられる。問題はこの過程にとどまらない。さらに濃度  $x$  を高めると比抵抗は温度増大につれて減少する半導体的な振る舞いを示すようになるが、このとき電流依存性は一旦消失してオーミック抵抗が観測さ

れる。しかしながら、図7(b)に示すように、さらに $x$ を増大させると、比抵抗 $\rho$ は再び電流に依存するようになるが、今度はそれが $I$ の増大につれて減少するという負性抵抗が現れるのである<sup>45, 46)</sup>。このような高濃度領域では、超伝導クラスターは細かく分断されて、全電流 $I$ はこの高伝導度クラスターを縫うように流れ、出来るだけ低い抵抗のパスを選択しようとする。このとき $I$ はこれらのクラスターの間隙の高抵抗部分(Pr-123)にも集中して流れざるをえなくなる。従ってこの微細領域では局所的なジュール熱上昇が起こり、電流 $I$ が増大するにつれてここの部分の抵抗が減少するのである<sup>45, 46)</sup>。これが、負性抵抗の発現の仕組みである。このとき電場そのものが $I$ の増大とともに減少する場合があり<sup>47)</sup>、試料はパリスター的な素子として働く。これらの非オーミック抵抗は $R_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_y$ 型のほとんどの化合物で発現しうるものである。以上の研究は濃度とともに銅酸化物固溶体のクラスター構造が系統的に変化する様子を抵抗の電流依存性を通して観察できることをはじめて明らかにしたものである。

その他、関連する現象として、 $R_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_y$ におけるナノレベルの非古典的なパーコレーション過程、とくに異種の結晶単位胞同士が隣接する場合に両者の分子軌道の共有により、特別な配置条件では単位胞の擬似変化が起こり、virtualなパーコレーション閾値が発現するというモデルを提案している<sup>43, 49)</sup>。

## 5. おわりに

不均質系において局所的な構成要素や素過程と全体構造や全体としての特性との関係がどのような仕組みで理解できるかの課題は材料科学の大きな目標の一つであると思われる。この課題は現在では人口に膚浅されるようになった複雑系と言われるもの範疇に入る対象でもある。冒頭において述べたように、私が若年の頃に抱いた「個と全体」という課題の研究は、原理的な理解を系統的に構築するという地道な研究であり、トピカルなテーマを追う流れとはかけ離れていたため人の耳目を引きにくく、その研究発表の場を探すのにたびたび苦労した憶えがある。そのような状況にあって、先に述べた有効媒質モデルを論文発表<sup>13)</sup>してしまもなくのことであったが、突然 Landauerから手紙が寄せられ、私の研究について勇気づけられる言葉をいただくとともにその研究方面における歴史的文献の引用<sup>16)</sup>について教示していただいたことは、大きな励みとなった。彼は本文で紹介した研究以外にも量子細線の電子伝導の Landauer 公式で有名であり、また情報処理とコンピューター計算の基礎理論に関する先駆的な仕事<sup>50)</sup>でも知られる物理学者である。また、ある国際会議では、相転移理論<sup>51)</sup>やパーコレーション

理論で知られる Stanley に「貴方の論文を読みましたよ」と話し掛けられたことも一期一会ではあったが印象に残る思い出である。

私がパーコレーションの研究に着手した頃は、材料科学の分野ではこの概念の認知はあまりなされておらず、研究発表しても関心の薄い反応に戸惑うこともあった。しかし、現在では様々な材料や化学の研究分野においてその意義が認識され、研究人口が増えてきたことに時代の流れを感じる。従来の科学では対象の尺度をマクロからミクロへ向かう方向の分析的研究手法は高度に発展して精緻を極めるようになってきた。しかし、ミクロからマクロへ向けて対象を統合的包括的に捉える「個と全体」の研究手法はこれから一層発展させなければならない課題である。有効媒質やパーコレーションの概念はこのような課題に向けての有力なアプローチになると信じている。最後に、これまで私を支えていただいた多くの方々に深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) K. Yoshida: J. Appl. Phys. **51**, 4226-4233 (1980).
- 2) K. Yoshida: Thesis for the degree of doctor of science, Univ. of Tokyo (1979), pp. 1-196.
- 3) K. Yoshida: J. Appl. Phys. **50**, 4159-4165 (1979), *ibid.* **50**, 4166-4171 (1979).
- 4) K. Yoshida: J. Phys. Soc. Jpn., **39**, 1473-1481 (1975), *ibid.* **40**, 1027-1034 (1976).
- 5) K. Yoshida: J. Phys. Soc. Jpn., **41**, 574-581 (1976).
- 6) 鈴木: 金属物性基礎講座6「半導体と半金属 - 基礎と応用」(日本金属学会編) p. 336 (1990).
- 7) 鈴木: 固体物理(別冊特集号)「エキゾティック・メタルズ」(アグネ社) p. 102 (1983).
- 8) C. Herring: J. Appl. Phys. **31**, 1939-1953 (1960).
- 9) M. Hori: J. Math. Phys. **14**, 514-523 (1973).
- 10) J. C. Maxwell: A Treatise on Electricity and Magnetism, Vol. 1 (Reprint: Dover 1954) p. 435.
- 11) D. A. G. Bruggeman: Ann. Phys. Lpz. **24**, 636 (1935).
- 12) R. Landauer: J. Appl. Phys. **23**, 779-784 (1952).
- 13) K. Yoshida: Philos. Mag. B **53**, 55-67 (1986).
- 14) K. Yoshida: J. Phys. Soc. Jpn. **59**, 4087-4095 (1990).
- 15) K. Yoshida: J. Phys. C, **15**, L87-L91 (1982).
- 16) 吉田: 京都大学原子エネルギー研彙報(総説), **72**, 5-17 (1987).
- 17) 吉田: 日本材料学会誌「材料」(総説), **39**, 103-113 (1990).
- 18) J. C. M. Garnett: Philos. Trans. Roy. Soc. A **203**, 385 (1904).
- 19) W. F. Brown Jr.: J. Chem. Phys. **23**, 1514 (1955).
- 20) L. D. Landau and E. M. Lifshitz: ランダウ・リフシツ電磁気学(東京図書, 1962), p. 61.

- 21) F. Lux: *J. Materials Science*, **28**, 285-301 (1993).
- 22) Z. Garncarek, R. Piasecki, J. Borecki, A. Maj and M. Sudol: *J. Phys. D*, **29**, 1360-1366 (1996).
- 23) Y. He, Y. Wei, G. Zheng, M. Yu and M. Liu: *J. Appl. Phys.* **82**, 3408-3413 (1997).
- 24) R. Piasecki, A. Ziembik, W. Waclawek and M. Zabkowska-Waclawek: *Phys. Stat. Sol. (a)*, **123**, K145-K148 (1991).
- 25) Z. Ziembik, M. Zabkowska-Waclawek and W. Waclawek: *J. Materials Science*, **34**, 3495-3504 (1999).
- 26) 小岩, 高田: 日本金属学会会報, **27**, 525-531 (1988).
- 27) S. K. Bera, S. Chaudhuri and A. K. Pal: *J. Phys. D*, **33**, 2320-2326 (2000).
- 28) R. Piasecki, A. Ziembik and W. Waclawek and M. Zabkowska-Waclawek: *Phys. Stat. Sol. (a)*, **128**, K109-K112 (1991).
- 29) A. Gerber, T. Grenet, M. Cyrot and J. Beille: *Phys. Rev. Letters*, **65**, 3201-3204 (1990).
- 30) Lj. Zivkovic, Z. Nikolic, S. Boskovic and M. Miljkovic: *J. Alloys and Compounds*, **373**, 231-236 (2004).
- 31) K. Yoshida: *J. Phys. F*, **11**, L245-L248 (1981).
- 32) K. Yoshida: *J. Phys. Soc. Jpn.* **59**, 4405-4411 (1990).
- 33) K. Yoshida and F. Nakamura: *J. Phys. Soc. Jpn.* **56**, 1297-1300 (1987).
- 34) 吉田: 日本金属学会会報「までりあ」, **33**, 133-137 (1994).
- 35) 吉田: 化学工学シンポジウムシリーズ「物質における微細構造と機能」, **54**, 1-11 (1996).
- 36) K. Yoshida, Y. Sano and Y. Tomii: *Physica C*, **206**, 127-132 (1993).
- 37) K. Yoshida: *Jpn. J. Appl. Phys.* **30**, 3482-3483 (1991).
- 38) K. Yoshida, Y. Tomii and S. Ueda: *Jpn. J. Appl. Phys.* **27**, 2224-2226 (1988).
- 39) K. Yoshida: *Fractals*, **4**, 175-180 (1996).
- 40) K. Yoshida, M. Matsukawa and K. Noto: *Materials Letters*, **36**, 7-10 (1998).
- 41) K. Yoshida, M. Matsukawa and S. Ueda: *Materi. Sci. Res. Int.* **3**, 190-191 (1997).
- 42) M. Matsukawa, F. Tatezaki, H. Ogasawara, K. Noto and K. Yoshida: *J. Phys. Soc. Jpn.* **64**, 164-169 (1995).
- 43) K. Yoshida: *Phys. Rev. B* **60**, 9325-9328 (1999).
- 44) K. Yoshida and T. Goya: *Advances in Science and Technology*, **23**, 569-575 (1999).
- 45) K. Yoshida and T. Hayasaka: *Supercond. Sci. Technol.* **15**, 1133-1139 (2002).
- 46) K. Yoshida, T. Hayasaka, K. Ota, T. Harada, K. Hachiya and E. Kojima: *Advances in Cryogenic Engineering*, **48**, 1126-1133 (2002).
- 47) K. Yoshida, K. Ota, T. Hayasaka, T. Harada, S. Ueda: *Physica C*, **388-389**, 429-430 (2003).
- 48) K. Yoshida, T. Harada and E. Kojima: *Supercond. Sci. Technol.* **16**, 720-725 (2003).
- 49) K. Yoshida: *Physica B*, **284-288**, 644-646 (2000).
- 50) 古田: 日本物理学会誌, **59**, 512 (2004).
- 51) H. E. Stanley; 相転移と臨界現象 (松野訳, 東京図書 1974).

## 大会記念講演

# アルミニウム産業の成長を支える材料技術 －現状と課題－

永田 公二\*

Material Technology Supporting The Growth of  
Aluminium Rolling Mill Industries  
—Current Status and Measures for Future—

by Koji NAGATA

## 1. はじめに

ただ今ご紹介いただきました住友軽金属の永田です。伝統のあるこの水曜会でお話させていただくのは大変名誉なことでございますので、牧先生、村上正紀先生からの講演依頼をありがとうございます。本日の話の内容は演題にございますようなアルミ業界の現状と材料技術の課題を紹介させていただくもので、学術的な話ではございませんので、どうか気楽に一時間ほどお付き合い願います。

つい先日2003年度の我国のアルミの総需要が発表されました。これによりますと2年連続で400万トン台を維持し、過去最高を記録しました。とりわけ私どもが関係しておりますアルミ圧延品は、自動車向け板・押出材、飲料缶用板等の内需製品が好調であるのに加えまして、船舶、半導体・液晶装置向け厚板が新たな需要として加わったことにより設備能力一杯の生産が続いています。なお、輸出は板材を主に24万トンでありまして、専ら国内を市場とする産業構造になっております。

国内のアルミの総需要は、図1に示しますように戦後一貫して増え続けてきました。これは年とともにこの図に付記しておりますような用途が開発されたことによりますが、特に、本日ご紹介します飲料缶、自動車熱交換器などの輸送機械部材に加えまして窓用サッシをはじめとする建築・建設部材、ルームエアコン用フィン材、印刷版、電解コンデンサー用アルミ箔等がアルミの需要を引張ってきたわけです。将来の更なる需要増大の期待を自動車のエンジンフード、フェンダー、ドア等の板材、これらを総称してボディシートと言っておりますが、の実用化に寄せており、最近の研究開発の重点も専らこの分

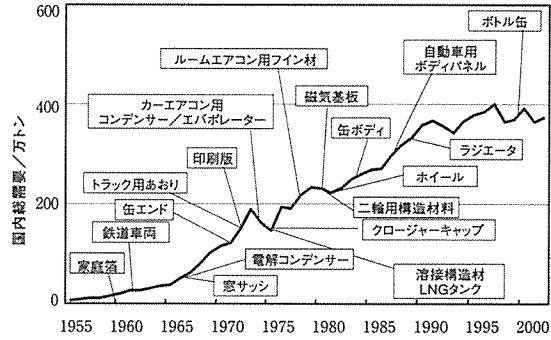


図1 国内アルミ総需要の推移と新規用途

野に集中しています。しかし、これを実現するには大変高いハードルが待ち構えておりますが、これを乗り越えない限りアルミの明るい前途はないと考えております。この辺りの事情は後ほどご紹介させていただきます。

## 2. アルミニウム産業の現状

最初にわが国のアルミニウム産業の構造をご紹介いたしますが、平成9年の本大会で佐藤史郎先輩が“アルミニウム工業の最近の話題について”と題しご講演され（平成9年度 水曜会大会 特別講演、本誌第22巻（1997）、第9号560）、続いて“日本のアルミニウム産業の現状と動向”を総説記事として書いておられます（本誌第23巻（2002）、第5号461）ので、ここでは直近の統計数字をご紹介するにとどめておきます。図2に原料から加工、製品までの流れを、図3に2002年の原料、製品数量の内訳を示しております。原料として約370万トンが投入されていますが、その半分は新地金、残りの半分が二次再生地金であります。わが国のアルミ地金の生産拠点はオイルショック後の電力料金の高騰を受け国

\*住友軽金属工業株

内から海外に移りました。そこで生産された地金は開発地金と称し輸入され、新地金全体の46%を占めています。製品は約380万トンで、本日のお話に関係します板、押出、箔よりなる圧延品が全体の65%を占め、その他はダイカスト22%、鋳物11%となっております。

圧延品の2002年の需要分野別数量を図4に示します。板製品は約130万トンで、このうち飲料缶向けの出荷が

最も多く33%，次で箔用の12%，自動車向けの9%と続いております。輸出が17%を占めておりますが缶材が主であり、これを加えますと国内で生産しているアルミ板のおおよそ半分が缶用ということになります。また、ここでいう自動車向けは、主として自動車用熱交換器用であります。ボディシート用はわずかであります。一方、押出品は約100万トンで、65%がサッシを含む建築用部材であります。自動車用が13%と大きな数量を記録しておりますが、ここには自動車用熱交換器以外に二輪車、車両用の部材も含まれております。

図5にこの25年間の圧延品の国内分野別需要量推移を示しています。板類は順調に数量を伸ばし、2000年には1975年の約3.5倍の約110万トンを記録しております。なお、直近の2003年は輸出も含めますと約140万トンになっております。このような板類需要の伸びは、缶用材料として1971年に缶蓋へ、1983年に缶胴へ適用が始まった事によっています。その結果、1990年以降缶材の占める比率が急速に高くなっています。自動車用は主として自動車熱交換器用であり、これも1990年以

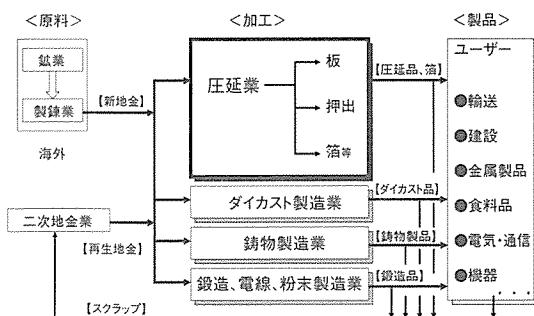


図2 国内アルミニウム産業の構造

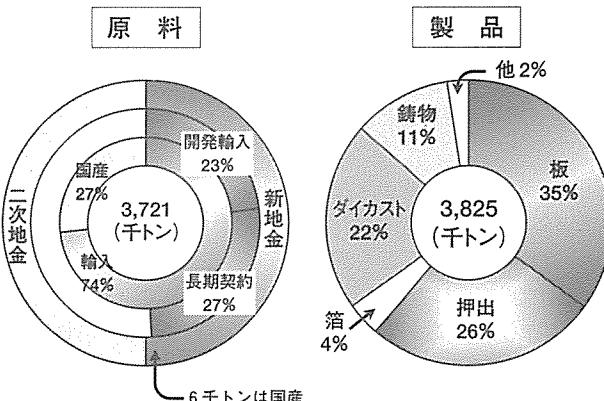


図3 アルミニウム製品の原料と品種構成 (2002年)

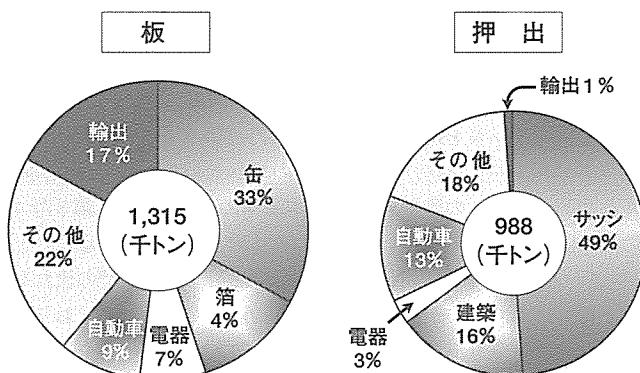


図4 アルミ圧延品の最近の需要 (2002年)

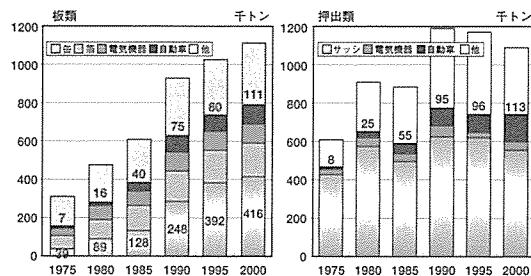


図5 アルミ圧延品の分野別需要推移(国内)

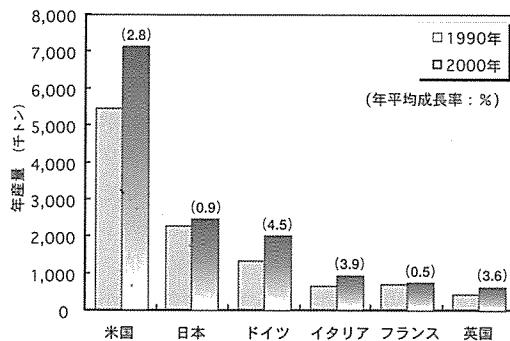


図6 主要国のアルミ圧延生産量

降の数量の増加が顕著です。1972年にカーエアコンへの適用が始まり、1989年から銅製のラジエーターに変わってアルミ製品が登場したことによります。一方、押出類は、1990年まではほぼ順調に量を伸ばしてきましたが、オイルショック後は建設・建築業界の低迷により押出材需要の約6割を占めるサッシ等が減ったため漸減傾向となり、ここ2~3年は約100万トンの水準にとどまっています。この結果、1995年以降、板類の需要(輸出も含む)が押出類を上回るようになりました。このような押出類の需要不振の中でも自動車向けは順調に量を伸ばし、2003年には過去最高の14万トンを記録しました。

さて、主要先進諸国のアルミ圧延品生産量(2000年)を図6に示します。米国が圧倒的に大きな生産量を誇り約700万トン、この10年間の年平均成長率は2.8%を記録しています。日本は第2位であります。10年間の年平均成長率は0.9%と低迷しています。なお、ロシア、中国についての正確な記録はありませんが、板類の生産量は、ロシアが20~30万トン、中国は100~120万トンと推定されます。

### 3. 主要アルミニウム圧延製品の開発動向

この30年間のアルミの成長を支えてきた代表的な圧延

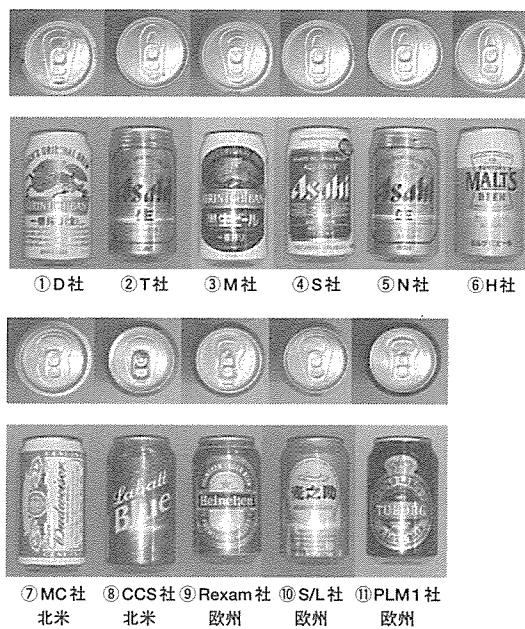


図7 アルミ飲料缶市場調査(2003年)

製品として飲料缶と自動車熱交換器の開発事例と、今後の成長の期待を一身に担っている自動車ボディパネルの研究開発状況をご紹介いたします。

#### 3.1 飲料缶

図7に2003年に市販された日本、北米、欧州のビール缶の外観を示します。我々は毎年その年に市販されます缶について、材質、缶の重量、板の厚み等を記録し、その傾向をウォッチしております。国内缶が6個並んでおりますのは、国内に缶を作るメーカーが6社あるためです。製缶メーカー、ボトラーと呼ばれる飲料メーカーとも少しでも安い容器を求めており、そのためにより少ない重量でより品質の良い軽い缶を求めています。アルミ飲料缶は、胴の部分と蓋の部分の2ピースよりなっており、DI缶と呼ばれています。これは胴の部分の作り方が絞り加工(DRAWING)としごき加工(IRONING)の組み合わせによるためです。よくご覧になるとお分かりになりますが、缶の形状は必ずしも同じではありません。蓋の部分を見ていただきますと口径が海外缶の方が小さいですし、飲み口となるスコアー開口部の形状も異なっています。胴のほうを見ていたら、肩の部分がストレートのものと段付のものがありますし、缶底の形状も若干異なります。この様な違いは缶メーカーや飲料メーカーの考え方反映されたものですが、缶用の板を供給する材料メーカー側においては、製缶上の不具合の無い板を供給するという意味で、客先である製缶メーカー毎に製造工程や品質仕様を微調整し納入しています。

缶の材質は世界中ほとんど同じで、胴は Al-Mg-Mn 系の A3004 か、不純物 Si 量の若干高い A3104 合金、蓋は Al-Mg 系の A5182 合金です。図 8 に缶の重量を比較しています。日本の缶は 15g と欧米に比べ 2g ほど重くなっています。なお、胴の重量が全体の約 8 割を占めています。図 9 は胴の底の部分と壁の部分の板厚です。缶底部の板厚は、先に説明しました胴の製造方法から、製缶する前の元板厚にはほぼ近いとみなされます。日本の缶は、底部が 0.28 mm、壁部は 108 μm と、欧米のものに比べ、いずれも少し厚いことがわかります。北米の缶と欧州の缶を比べますと、両者はほぼ同じ重量ですが、北米の缶は壁部が 97 μm と薄く、一方、欧州の缶の壁部は 105 μm と日本の缶に近い厚さになっており、その分缶底部は薄くなっています。このような缶底

と缶壁における板厚の配分の違いはそれらの国的事情を反映しているもので興味深いものです。日本の缶は底部、壁部とも厚いわけですが、その背景には薄肉化により生じる次のような不具合を避けるためです。すなわち、消費者が取り扱い時の不注意で何かに当たり、落とした場合に生じる傷、へこみであったり、成形時に缶底に生じるしわや表面の筋状模様等の外観上の見栄えであります。日本は飲料缶に限らずあらゆる製品分野で消費者の要求を大事にした物作りをしていると思いますが、消費者の声に少し過敏に反応している感が無きにもあらずと思います。これが過剰品質の高コスト商品なっているケースもありますが、信頼性の高い商品につながっていることも事実だと思います。一方、北米ではとにかくコスト最優先で材料費を最小限に抑えた容器造りがすすんでいます。その結果として、図 10 に示しますように、我国ではこの 15 年近く軽量化がストップしたままになっているのに対し、米国ではこの 20 年間で缶胴部の軽量化が着実に進んでいます。なお、米国の 1 年間のアルミ缶需要量は約 1 千億缶で、我国の約 6 倍、アルミ板使用量は約 200 万トンと膨大なものです。しかし、最近 5 年間のアルミ缶の需要は PET ボトルに押されて気味であり、アルミ缶の分野はもはや成長性の見込めない製品市場とはみなされているようです。

最近の缶の話題を 2、3 紹介します。一つはダイヤカットされた新しい形状の缶が登場し話題を集めているこ

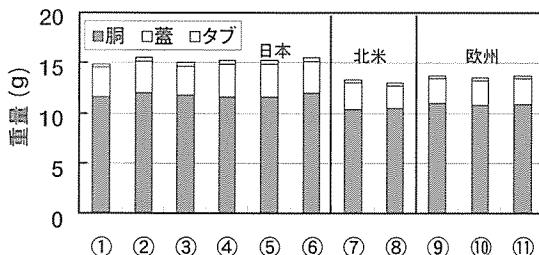


図 8 アルミニウム缶の重量比較（日本：15g、欧米：13g）

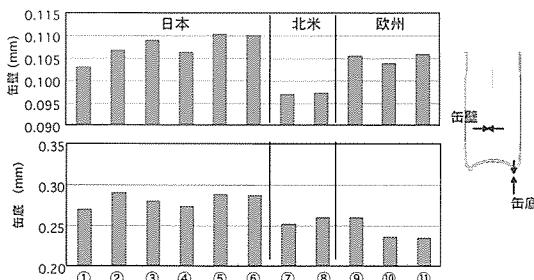


図 9 日米欧の缶ボディ板厚の比較

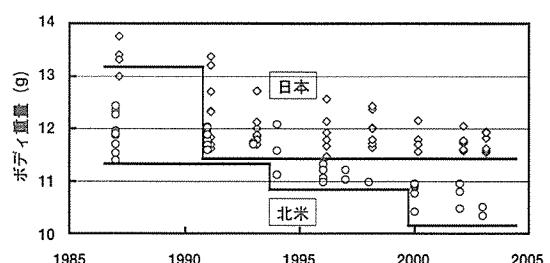
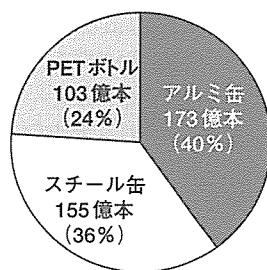
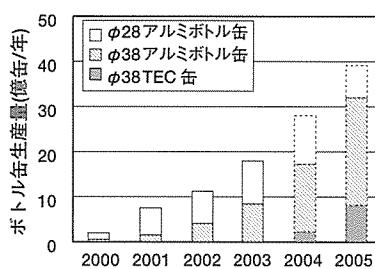


図 10 缶ボディ量の変遷



(a) 飲料容器の比率（2002年）



(b) ボトル缶の生産量推移

図 11 飲料容器の比率とボトル缶の生産量推移

とです（キリンの氷結）。内容物が美味しいことは勿論ですが缶のデザインの斬新さもあってベストセラー商品になっています。缶の形状というとアルミボトル缶の登場を上げることが出来ます。PETボトルに対抗してリサイクル性を売り物に3年前に登場しあつという間にその量を伸ばしました。図11は2002年の容器の数とボトル缶の伸びを示しています。アルミ缶、スチール缶、PETボトルと合わせた飲料容器の総数は430億缶で、そのうちアルミ缶が40%の173億缶で最も多く、スチール缶が155億缶、PETボトルが103億本と続いています。新たに登場したアルミボトル缶は現在10億缶程度ですが2005年には30億缶に迫るものと期待されます。

アルミ缶といえばリサイクル性に優れているのが特徴で、“Can to Can”，即ち、使用済み飲料缶から新しい缶への再利用、が一般的です。工場での缶胴（A3104, Al-Mg-Mn）用のスラブの原料配合例として、市中の缶くず（蓋、タブ付）を溶解铸造した二次合金（分析例：Al-1.5%Mg-1.3%Mn）が43%，工場で製造した缶材コイルのスクラップが42%，ユーザーから戻ってくる加工くずが10%，成分の調整のために新地金が5%，ということがあります。このように新地金をほとんど使用することなく胴材の成分を調整することが出来ますので、資源の有効活用という点ではアルミ缶は理想的な状況にあるといえます。技術課題として溶解時のドロスの生成が大きいこと、ドロス中の純アルミ分が多いことがあげられます。ドロス生成量の増大は、上記の原料に大量に含まれる塗装した缶胴および缶蓋を溶解した場合にアルミおよびマグネの酸化物が生成する事やアルミの窒化物が生成する事によります。溶解前に原料となる塗装した缶胴および缶蓋を400～450°Cで予熱しますと、酸化物を増やすことなく塗料を飛ばすことになりドロス生成量の削減に有効です。

### 3.2 自動車用熱交換器

エバボレーターーやコンデンサー等によるカーエアコンの部品には1982年という早い時期からアルミニウムが用いられてきました。一方、ラジエーターやヒーターといった管内面に冷却水が流れる熱交換器には、耐食性の問題もあって、伸銅品が専ら使用されてきましたが、クラッド材の使用による耐食性の確保、軽量化の要請、半田の有害性を掲げるマスコミのキャンペーン等があつて1989年以降アルミ化が始まり、今では乗用車の熱交換器の全てがアルミ製になっています。図12は1989年以降の自動車熱交換器向けアルミ圧延品の生産量の推移です。ほぼ右上がりで推移し、2003年度で板材8万トン、押出材5万トンになっています。板材はフィン、プレート式熱交部材に、押出材は以下に述べる多穴管や配管に使用されています。

図13にコンデンサーの軽量化と熱交換器管として用いられる押出多穴管の断面形状の推移を示します。コンデンサーは、ヘッダー、押出多穴管、フィンより構成され、炉中ろう付けにて熱交換器になります。この図に見られますように20年間で50%を超える軽量化が図られたわけですが、これは効率の良い機器のデザインの開発とこれを支えた材料技術（合金開発、押出技術、防食技術、ろう付け技術など）により達成されたものです。現在実用化されている押出多穴管の断面を図14に示しています。バックに写っている一円玉と比較していただくと冷媒の流れる流路（上段が19穴、下段が21穴）がいかに

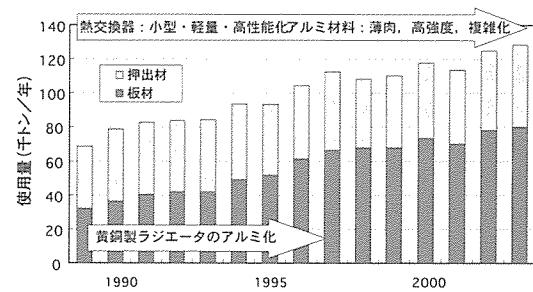


図12 自動車熱交換器用アルミ材料の生産量推移（日本）

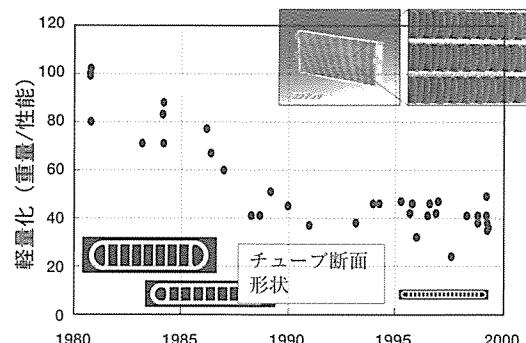


図13 コンデンサの軽量化の推移

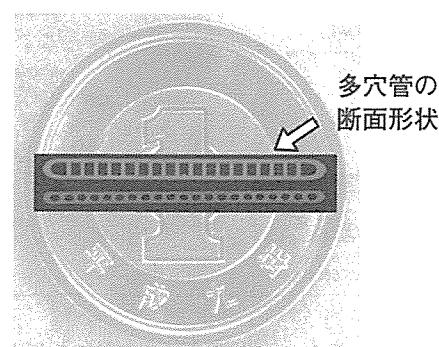


図14 コンデンサ用押出多穴管断面

微小なものかお分かりになると思います。

次に、ラジエーターのお話をします。ラジエーターの構造には、図15に示すような溶接管型とロウ付け型があり、当初は専ら前者が採用されてきました。溶接管型の場合、三層よりなるクラッド板をロールフォーミング法で扁平状に加工し、その突合せ部を高周波溶接にて接合し製品とします。三層クラッド板は、内皮材と称する犠牲陽極効果を有するAl-Zn系合金板、心材と称する強度の高いAl-Mn(Si)系合金板、ろう材と称するAl-Si系合金板より構成されています。薄肉化は主として材料の強度向上によりなされてきました。この状況を薄肉化との関連で図16に示します。溶接型材料の合金設計では、内皮材に添加した微量のMgがロウ付け時に心材に拡散し、その後の室温時効によりMg<sub>2</sub>Siとして析出硬化する現象を利用しています。しかし、薄肉化に伴いロールフォーミング加工部の突合せ精度が低下し、溶接不良を招きます。現在、溶接型における板厚の限界は約0.2mmとなっています。ロウ付け型は図15に見られるとおり中柱を有することから同じ材料強度であっても製品としての疲労強度に優れ、より薄い板を使用できると考えられ、1997年以降実用化されてきました。しかし、より薄肉化のためには高強度が必要ですが、この構造の場合、前

述の溶接管型で採用された内皮にMgを添加してMg<sub>2</sub>Siの析出によって強度アップを図るといった方法が採れません。それは、ロウ付け法が“ノコロック法”といつてフッ化物のフラックスを使用する事によります。ロウ付け型構造の場合、中柱の部分の材料から蒸発するMgがフラックスと反応しMgF<sub>2</sub>を生成しロウ付け不良を生じるためです。このため材料の強度アップの手段として、心材にAlMnSiを分散させますがそれが及ぼす効果はMg<sub>2</sub>Siには及ばず、板厚は0.20mmに留まっています。ユーザの目標値は0.15mmで、そのための材料強度は200MPa以上となっています。心材にCuを添加するのは強度向上の有力な手段ですが、ロウ付け中の内皮への拡散による内皮の犠牲陽極効果の低下という新たな問題が生じます。これを解消する手段としてロウ付け時の昇温速度を従来の数倍まで高めCuの内皮への拡散を抑制することが提案され、これを実現するための製造技術が開発されています。

このような薄肉材料の実用化は、我々材料メーカーと機器を製作するユーザーが、製品設計、材料設計、生産技術そして設備技術までを共同で開発して始めて実現できるもので、今後のグローバルな競争の中での日本のもの造りが勝ち残れる一つのモデルケースと考えています。

### 3.2 自動車ボディパネル

1986年にマツダのRX-7在我国で初めてアルミ板のエンジンフードが採用されました。以来20年近くにわたって自動車メーカーと材料メーカーが共同してアルミ板の実用化に向けた研究を重ね、約30車種の乗用車の主としてフードに採用されてきました。特に、2000年以降、各自動車会社とも中大型車を中心としてアルミ板を積極的に採用する動きが見られます。この背景には、環境に対する各種規制の実施が真近に迫ってきたことが上げられます。最近の日経新聞の一一面トップ記事に、“日産自動車、最

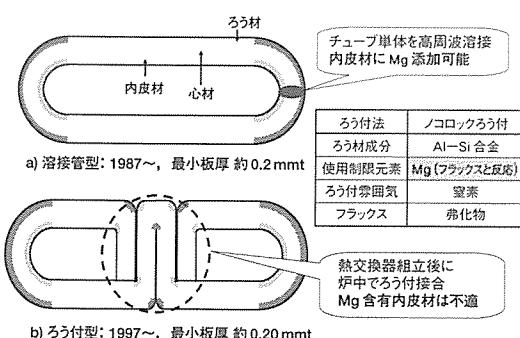


図15 ラジエータ用チューブの構造

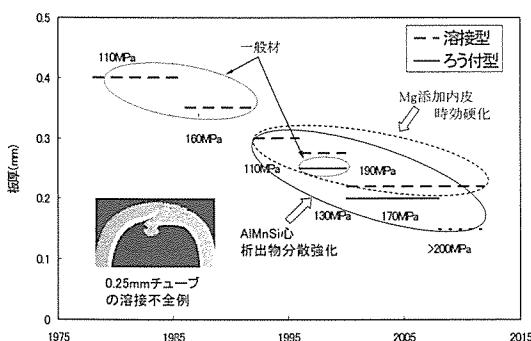


図16 ラジエータ用チューブ材の板厚と強度の変遷

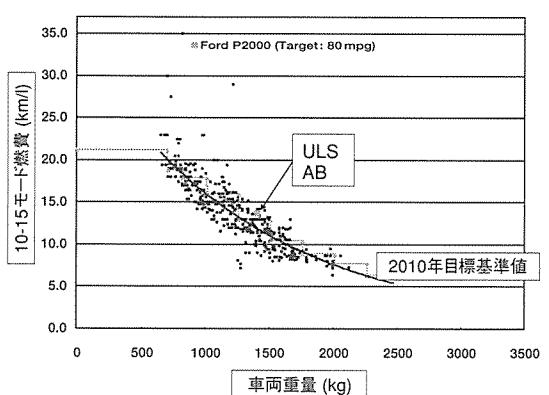


図17 車両重量と燃費の関係 (日本アルミニウム協会)

大10%の軽量化、今後5年で”という見出しが載り話題を集めました。ガソリン乗用車の燃費改善が強く求められる中でこれを軽量化によって達成しようという動きが現実味を帯びてきたわけです。図17は2001年現在市販されている乗用車の車両重量に対する10・15モード燃費を示したもので、“2010年目標基準値”を併記しています。多くの車はこの基準を下回っており、車両重量1500kg以上の大型高級車両で顕著です。このため各社ともこの基準値をクリアすべく、中大型車の軽量化に積極的に取り組み始めています。この規制に加え“2008年欧州規制”があります。ここでは車両メーカー毎に、全車種のCO<sub>2</sub>排出量の平均値を140g/km以下にすることが求められています。このため各社とも低燃費で効率の良い小型車の投入を含め車体の軽量化を検討しているわけです。欧州ではアルミの採用が活発で、例えば最近発売されたBMW5シリーズはアルミスチールハイブリッドボディ構造を採用し、フロントエンド部分が主にアルミの展延材で出来ております。車体の18%をアルミが占め、残りは深絞り用鋼板や高張力鋼板です。また、アウディA8にはアルミボディ構造（スペースフレーム構造）が採用されております。車両重量は220kgと軽量で、アルミ材の内訳は、板が37%、形材が29%、鋳物が34%です。この他のアウディ社のA6、A4、A2（アルミボディー構造）にも大量のアルミ材が使用されています。一方、わが国の乗用車には1台当り約100kgのアルミが使用されているに過ぎません。しかも、その大半はエンジンプロック等の鋳物品で、圧延品は先に紹介したラジエーター等の熱交部品、バンパー、ヒートインシュレータ、足回りの一部、そして今から紹介します少数の車種のエンジンフード等に限られており、自動車向け出荷量はアルミ板製品の全出荷量の1%にも満たない量です。しかし、各種の規制強化という追い風を受けアルミ合金板の大量使用を何とか実現したいものと研究開発を行なっている次第です。

次に、合金開発の経緯と技術課題を簡単に紹介します。最初に実用化されたボディパネル材は、成形性と強度を兼ね備えたAl-Mg系の5000系合金で、当社の開発合金“30-30合金（Al-4.5%Mg-Zn）”がマツダのRX-7採用されました。成形性を高めるためMgを5.5%まで増やした合金も開発されました。高強度、低価格の観点から、板製造時の熱間加工性に優れ、また、ユーザでの塗装焼付け時に硬化するAl-Mg-Si系の6000系合金が研究され、1990年に発売された本田のNSXに採用されました。ここで採用された6000系合金は、Al-1%Si-1%Mgの組成を有する過剰Siタイプ型で、その後さらに高強度を得られるAl-1%Si-0.5%Mgが開発され現在の標準材になっています。強度アップにより薄肉化が図られるとと

もに耐デント性が向上しました。この合金系は、当初、鋼板と同一条件（170°C、30分）で塗装焼付けした場合、十分な硬さが得られないという問題点がありました。欧州では塗装焼付け温度を200°Cまで上げて強度を確保し実用化していました。鋼板とアルミ板を同じラインで流す日本ではこのようなことは許されず、この問題を解決することが緊急の課題となり基礎研究が行なわれ、その結果、図18に示す新プロセスが開発されました。すなわち、溶体化処理後予備時効（80~120°C）を行なうか、復元処理（200~250°C）を行うものです。その結果、図19に示すように製造ラインの塗装焼付け温度である170°Cで短時間に硬化さすことに成功しました。硬化の詳細な機構は産学協同で研究中であり、完全に解明されたわけではありませんが、一応次のように考えられています。従来の熱処理プロセスでは、溶体化処理後室温保持中にSiリッチクラスターが生成し、これが本来170°C焼付け時に析出し硬化をもたらすβ相の析出を阻害し十分な硬化が得られないのに対し、新プロセスでは、予備時効あるいは復元処理中にMg-Siリッチクラ

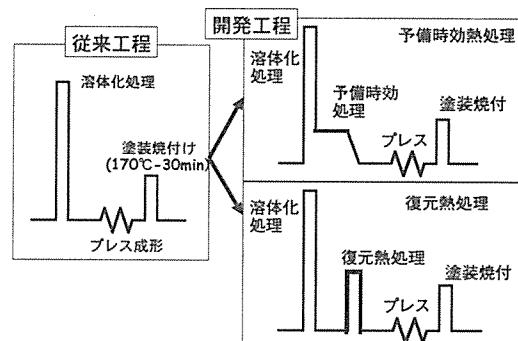


図18 塗装焼付け性を高めた6000系ボディシート材の新プロセス

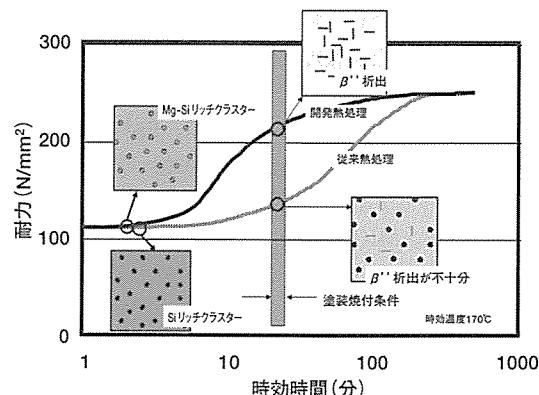


図19 新プロセスにおける塗装焼付硬化性向上の機構

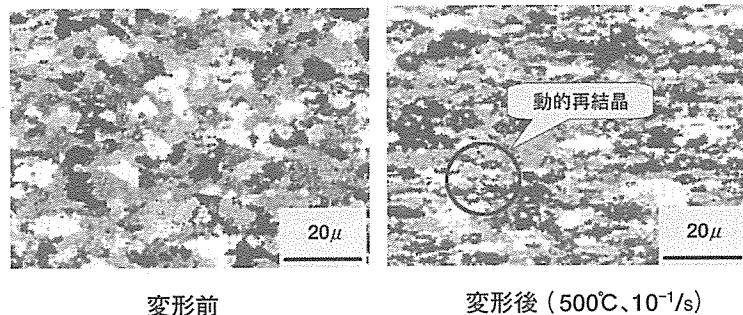


図20 A5083合金のブロー成形前後のミクロ組織

スターが生成しこれが $\beta''$ の析出核となり170°C焼付け時の析出硬化をもたらすというものです。

次に、アルミ板の自動車への実用化を加速する画期的な二つの新しい技術を紹介しておきます。一つは超塑性成形であり、他の一つはFSW（摩擦搅拌接合）の点接合です。超塑性成形は複雑なデザインや溶接線のない一体成形が可能なため近年大変注目されています。また、金型費用や小物部品の同時成形によるコストダウンが可能であることなどプレス成形に比べ生産性はかなり落ちますが、少量生産の車種には十分適用可能であり、素材費の点で不利なアルミにとってまことに好都合な加工法と考えられます。我国では2000年に発売されたホンダのスポーツカーS2000の脱着ルーフに初めて実用化されました。用いられた合金は5083合金(Al-4.5%Mg-0.8%Mn)で、500°C、10気圧のもとでブロー成形されました。500°Cでの変形前後の材料のミクロ組織を図20に示します。変形後の組織には5μm程度の微細な再結晶粒が多数生成しており、超塑性成形中に動的再結晶が生じたことを示しています。現在いくつかの車の部材にこの超塑性成形の適用が検討されています。また、米国においては大量生産の車種の主要部分にも超塑性成形が適用されたと、2004年の春のTMS年次大会で報告されました。ここでは、50気圧という超高压を用い数分で成形を終えることが報告され、従来の低生産性をも解消しています。

もうひとつの注目すべき新技术は、FSW（摩擦搅拌接合）の実用化です。これは英国溶接協（TWI）により開発され、すでに我国ではアルミ製新幹線車両の床や側板の線接合にMIGに代わって実用化されてきました。自動車ボディシートのインナーとアウターの組み立て工程では抵抗溶接による点接合が使用されていますが、アルミ合金は電気抵抗が小さいことや銅電極材への溶着が生じやすいことから既存の生産ラインでは生産性を犠牲にしながら抵抗溶接による点接合が行われてきました。この抵抗溶接に代えて、マツダでは溶接機メーカーと

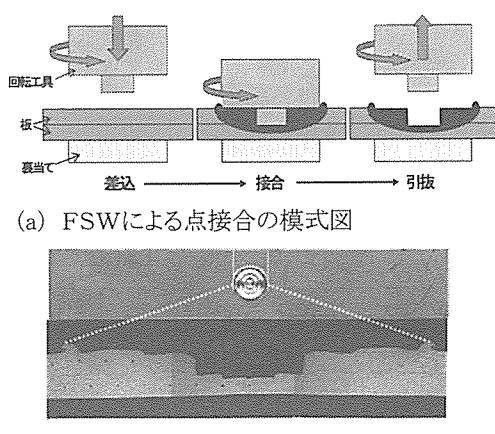


図21 FSWによる点接合の模式図と6000系ボディシート材への適用例

FSW点接合装置、技術を開発し、2003年に発売されたマツダのRX-8のドアの接合に実用化しました。図21は、6000系ボディシート材について当社で行なったFSW点接合実験の一例です。回転工具を“差し込み、抜く”といった単純作業により従来の抵抗溶接より静的強度および疲労強度の高い継ぎ手が得られます。接合時間もわずか1秒です。なお、アルミ合金板の適用が進んでいる欧州のメーカーではアルミ専用の組み立てラインでセルフピアシングリベットやレーザ溶接法による接合が実施されています。

#### 4. 課題：グローバルな競争に勝ち残るために

現在、アルミ圧延品の国内生産・需要は何十年に一度と言われるぐらいの好調さが続いており、設備稼働率は100%に近い状態です。景気の回復による自動車向け等の全般的な需要増加に加え、猛暑による飲料缶やエアコンの高水準な販売、IT関連機器の好調な販売による半導体や液晶製造装置用厚板の特需、中国や米国のお景気

による LNG 船建造に伴う厚板の特需等が集中したためです。従来は低調であった厚板の需要は、今年度に限れば 8 万トン前後と大量に見込まれ、あと数年は続くものとみなされます。しかし、将来にわたってアルミ圧延品の成長、需要を安定的に支える分野は自動車をおいては考えにくいのであります。押出製品の自動車部材への需要拡大は 1990 年以降から始まり、2000 年には需要の 10% 以上を占めるに至っており、建築・建材部門の停滞もあって今後ますます自動車分野への依存度は高くなるでしょう。一方、板製品の自動車部材への依存度は熱交換器の分野を除けば 1% 前後とまだまだ低調であり、大きな需要が期待されるボディーパネルへの採用の可否は今後の研究開発の結果次第といつても過言ではありません。如何にコスト対効果のいい、ユーザーにとって魅力的な材料が提供できるかにかかっています。

自動車分野への参入は、すなわち“グローバル”な競争に参入することを意味します。今までのアルミ圧延品のユーザは、主として日本国内で製品を生産し販売していますので、我々は国内の同業他社の動向にさえ気をつけておれば事は済みました。しかし、自動車の場合、国内と海外が競争の舞台ですから、我々の事業もこの観点から構築しなければなりません。自動車メーカーの急速なグローバル展開はご承知のとおりですが、例えば、国内主要乗用車メーカー 5 社の今年 5 月度の生産、販売実績を見ますと、生産台数は 126 万台、国内、海外の比率はおよそ半々ですが、国内の販売台数は 21% に過ぎません。日本製の車の 4 分の 3 以上は海外で使用されているわけです。また、トヨタグループは 4 極体制を標榜し、日本、北米、欧州、アジアで新しい車を同時に生産・販売することを目指しています。このうちアジア、特に中国での生産拡大が緊急の課題です。最近の新聞にも、トヨタ系部品 15 社が中国広州に一斉に工場を建設する事が報じられています。さて、このようなグローバル展開を図っている自動車メーカーや部品メーカーにアルミ材料を安定供給し、事業として収益を上げていくというのが我々の課題になってきます。そのためには競争相手となる欧米、中国のアルミメーカーの現状を知った上で我々の特徴(強み)を十分認識し生き残りの戦略を練らねばなりません。

#### 4.1 欧米のアルミ圧延業の現状

この数年、欧米アルミ圧延会社では再編成が相次ぎ現在も一部で進行中です。古くからあるアルスイス、VAW、ペシニー、レイノルズ、アルマックス等の名門企業が一部門を残して相次ぎ買収され、アルコア、アルキャン、ハイドロの三社にはほぼ集約されました。この様子を図 22 に示します。この三社による 2002 年のアルミ板出荷量は図 23 に示す通りです。アルキャン、アルコア

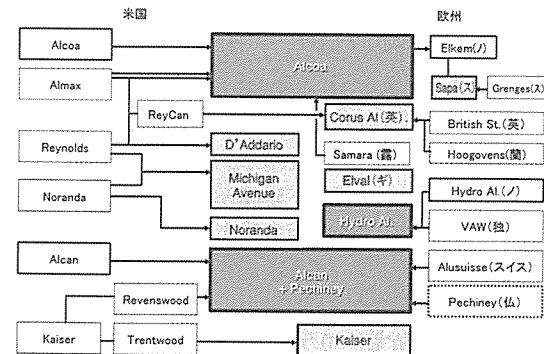


図22 世界の主要アルミ圧延メーカーのアライアンス

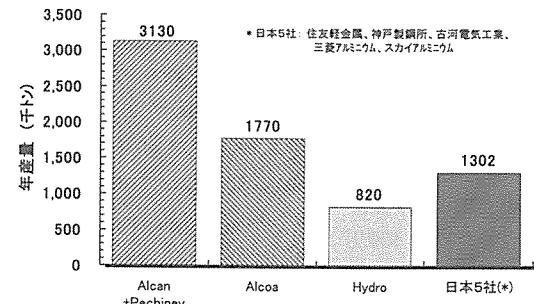


図23 海外アルミメジャの圧延品出荷量(2002年)

の出荷量は、一社だけで日本 5 社の合計量を大きく上回っています。また、この再編を通じ競争力を強化し、利益の極大化が図れる部門への事業の集中化を図っています。例えば、アルキャンは川上のアルミナ、地金部門と川下の自動車用部品へ、アルコアは自動車材に加え航空機材が事業の中核になるようです。即ち、現在最大の需要を誇る缶などの容器市場には今後の成長が期待できないとして投資を控え、自動車や航空機市場で優位に立つことを最大の狙いにしています。アルコアの自動車開発センターの設立、アルキャンの旧アルスイスの自動車研究の拠点ノイハウゼン研究所の強化、同じくハイドロによる旧 VAW 自動車材料開発拠点であるボン研究所の活用等に彼らの考えを伺うことが出来ます。このように欧米アルミ会社は、川上のアルミナ、地金精錬から川中の圧延、川下の加工部門まで手がける一貫体制を敷いておりダイナミックな事業選択が可能です。また、産官学の連携も戦略的に行われており成果を挙げています。米国においてはロードマップに基づく研究開発テーマの抽出と実行が、欧州においては EU 全体の協同研究体勢のもとでアルミの製造プロセスをシミュレーションするソ

フトの開発(バーチャルスター VIR\*と呼ばれています)が活動しています。

#### 4.2 中国のアルミ圧延業の現状

現時点では中国には近代式圧延設備が整っておらず、200社以上のメーカーのほとんどが旧式（粗圧延・仕上圧延兼用、420基）の熱間圧延機あるいはハンター式連続鋳造機（110基）で熱延板を製造している状況です。高度な品質、性能や加工性が要求される缶、印刷板、電解コンデンサー箔などは日本等から輸入しています（2003年度の板輸入総量は30万トン）。アルミ板の消費量は近年著しい伸びを示しており、2002年度は177万トンを記録し、日本を追い越し世界第二となりました。また、板の生産量も2002年には我国を追い越し150万トンを記録しました。このような旺盛な需要に応えるべく圧延設備の近代化も急ピッチで進んでおり、タンデム式熱間圧延機よりなる新規プロジェクトが5ヶ所で進行しています。すなわち、西南アルミ（四川省重慶市）、南山アルミ（山東省龍口市）、河南ミンタイアルミ（河南省鞏義市）、南海亞州アルミ（広東省海南省）、渤海アルミ（河北省秦皇島市）です。生産能力は現在の我国の総量を上回る200万トン程度と推定され、現有設備の能力と合わせると400万トンとなります。完成予定の2005年以降は世界的にみても需給のアンバランスが懸念され、我国にとっては大変な脅威となります。ただし、アルミ板圧延の経験のある会社はプロジェクト中2社に過ぎず、しかもタンデム式熱間圧延機の操業経験のあるのは西南アルミのみですので世界に通用する板が市場に出るには少し時間がかかるでしょう。押出材についてはメーカーが1000社以上、押出機は2500基もあるといわれ、旺盛な建設・建築需要を受けて2003年度の生産量は230万トンと我国の2倍量に達しています。

#### 4.3 我国のアルミ圧延事業の特徴

我国のアルミ圧延メーカーの強みは、他の素材同様徹底したユーザ志向にあります。ユーザと一緒に製品の設計段階から参画し、部品として最良の性能が確保されるように材料の作りこみを繰り返し行ないます。先に紹介しました自動車熱交部材の軽量化の達成は典型的な事例ですが、各需要分野において同様な共同開発体制がとられています。また、板の生産能力、品質は、長年にわたって培った高度な圧延技術、設備保全・保守技術に支えられ、高品質で多品種の注文に応えられます。しかし、我国のアルミ圧延業界の長年にわたる低収益体质のため設備の更新が全般的に遅れている点一大半の設備は20年から30年を経過した償却済みですのでコスト競争力はあるのですが—が気懸りです。自動車向け板生産のための新規設備への投資が必要になった場合、これに対応できるか否かも懸念材料の一つです。また、地金は

現在の商習慣では缶、印刷板等の大手ユーザからの支給によっていますが、自動車メーカー相手の場合にはどうなるか、地金のリスクは誰が負うのかといった問題もあります。こういった環境の中で自動車メーカーのグローバル化（グローバルな材料供給）にどう対応できるか、技術の優位性をどこまで維持できるのか、メーカーのR/Dの拠点はどうなるのか、ユーザはどの国の誰とパートナを組むのか等材料メーカーだけではなんともならない問題が沢山あります。現在、すでに欧米に進出しそこで“グローバルな供給”が行なわれている自動車熱交換器部材の場合には、状況に応じて次のような対応がとられています。現地への工場建設（投資額はさほど大きくはない場合）、国内あるいは既存の東南アジアプラントからの輸出、現地のアルミメーカーとの技術提携（トランスplant）、などです。

#### 5. おわりに：産学連携への期待

日本の素材産業がグローバルな競争条理の中で勝ち残るためにには、大学や各種の研究機関等との産学連携が益々重要になってきます。私が期待する産学連携の形を申し上げ本日の講演のまとめにさせていただきます。一般にイメージされています産学連携は、学の基礎研究から生まれたシーズを産にて企業化していく“オンリーワン”を目指した、いわゆる“大学発のベンチャー”です。ハイリスク・ハイリターンのこの形の連携には“市場の創成”という大きな壁が横たわっており、実用化して収益を上げ雇用を創生するといった実利にまではなかなか到達できません。ましてや、アルミニウム圧延業のような成熟した規模も大きな素材産業においてはシーズから始まるこのような形の産学連携では我々が期待する大きな効果を産業界にもたらすのは難しく、かつ、大学ではアルミをテーマにした先進的、野心的な材料開発研究はすでに行なわれておりません。ではどういう形で学の力を産に提供していただけるか、どのような産学連携が現実的であり、期待しているのか、ローリスク・ハイリターンの連携とはどんなものなのかを考えてみました。

4項で申し上げましたように日本の素材産業の強みは、いろいろな需要の場で我々素材メーカーとユーザが直接結びつき情報を共有化しながら高性能で低価格な商品を開発していることです。この輪の中に学も参加していただくことです。図24に産学連携のイメージ図を示します。自動車会社等のユーザから素材メーカーに寄せられたニーズをメーカー側で十分咀嚼した上で大学・研究機関側に提供し、現象の本質的な解明、解析・評価やシミュレーションといった基礎研究をお願いし、その成果をより高度な材料の創生に生かし、製品としてユーザに戻す、といった一連のサイクルを繰り返すやり方です。いわば、

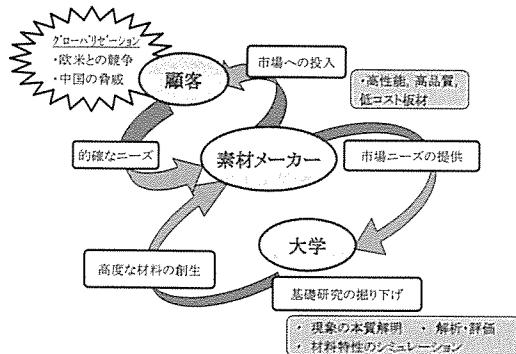


図24 素材産業において期待される産学連携の姿

オール日本としてユーザ、素材メーカ、大学・研究機関の三者が一体となってニーズを共有化しながら役割を分担し、目的のはっきりした無駄のない研究開発を行なうことです。図25は、現在、NEDO/JRCM がスポンサーになって進めているプロジェクト“自動車ボディシート用6000系合金の高性能化”的です。大学側での基礎研究により本合金系の時効初期の原子の挙動が明らかになります。これにより本合金特有の複雑な熱処理工程(図18、19)のブラックボックスが解明され、高性能、高品质な製品の安定供給が期待できます。また、産側での新圧延プロセスの研究において、温間圧延により通常では考えられない高いr値のアルミ合金板ができました。しかし、この板は異方性が大きくすぐに実用化というわけにはいきません。現在、圧延集合組織の点から基礎的解明を学側にお願いしているところです。この異方性が解決できれば画期的なアルミ合金板が出現することになり、鋼板に対し大幅に劣っていたアルミ板のプレス成形性を高めることができます。また、アルミ材を使用する際、問題となる鉄との接合に関し、FSWによる接合界

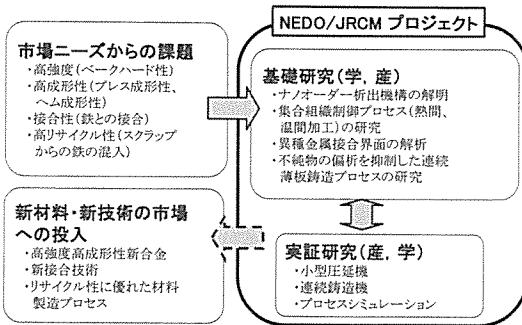


図25 産・官・学の共同研究開発例：自動車用ボディシート用6000系合金の高性能化 (NEDO/JRCM プロジェクト)

面はアモルファス状であるとの新しい知見を高分解電子顕微鏡観察から得ました。このような基礎的な観察、解析を積み上げることから実機に適用できる日本固有の異材料との接合技術が生まれることが期待できます。

以上、現在行なっている産学連携の成果の一例を紹介いたしましたが、これを実機レベルで実現して高性能なアルミ板を量産し収益に結びつけるのが我々産業界の課題です。産学連携による実質的な成果が次々にあがってくるようになればユーザの素材メーカに対する信頼性はさらに高まり、R/D の拠点は無論のこと生産拠点の海外移転、海外製品の流入も避けることができ、日本の製造業は将来にわたって確固たるものになると考えます。

御静聴ありがとうございました。

## 謝辞

本稿を執筆するに当たり下記の諸氏のご協力・ご助言を賜ったことを明記し感謝いたします。

吉田英雄、渋江和久、渡辺吉章、池田洋、  
平野清一、正路美房、宇都秀之、熊谷正樹

## 大会記念講演

# 産業災害防止のためのリスクマネジメント

小 川 輝 繁\*

**Risk Management for Industrial Safety**

by Terushige OGAWA

### 1. はじめに

天災や人為的災害および事態の急変、予定外の事象などで打撃を受けることがあるが、このような危機に備えて準備し、対処することを危機管理（リスクマネジメント）は企業等の組織にとって重要である。適切な危機管理が行われていなかったため、リスクに対する対応が悪く、組織が致命的な打撃を受け、崩壊した事例は少なくない。特に最近では組織に大きなダメージを与えるリスクが多様化しており、重要性が増している。

本稿では、産業災害防止のリスクマネジメントについて、多様なリスクを抱えている化学産業を例にとって概説する。

### 2. リスクマネジメントシステム<sup>1)</sup>

#### 2.1 リスクマネジメントシステム構築の効用

企業等の組織は、自然災害、人為災害、経済損失など組織にかかるリスクの顕在化に対して適切に対応できるシステムを構築する必要がある。なぜならば、潜在リスクの顕在化に伴う損害が当該組織にとどまらず、自国の社会経済や諸外国の利害にまで影響を及ぼすことが珍しくない。たとえば、上流側の機能性材料を製造している工場が事故等により生産を停止せざるを得なくなった場合、この機能性材料を原材料として生産を行っている下流側の業種で生産ができなくなるなど取引先の企業に多大の迷惑をかける。また、製品の供給が減少することにより社会経済に多大の影響を及ぼすことも少なくない。リスクマネジメントシステムを構築し、これを適切に運用することにより、リスクの顕在化を抑え、被害発生を未然に防止または回避でき、あるいは被害を最少化する

ことができるため、リスクによる損失を防止あるいは軽減することができる。そのほか、リスクに対する高い対応能力を取引相手に保証することによって、より有利な地位が獲得できる。リスクマネジメントシステムを構築してこれを適切に運用していることを取引相手が理解すれば、彼らは製品の供給停止等の迷惑を蒙るリスクが小さいことを評価して、より有利な条件での取引に応じるであろう。さらに、リスク対応力が評価されれば、組織の格付けが上昇し、資金調達その他の面で有利な立場が獲得できる。また、地域社会、住民、一般消費者及び政府並びに地方自治体にリスクに対する対応能力の高さを評価されれば、彼らと良好な関係を構築することはでき、組織のイメージの向上を図ることができる。

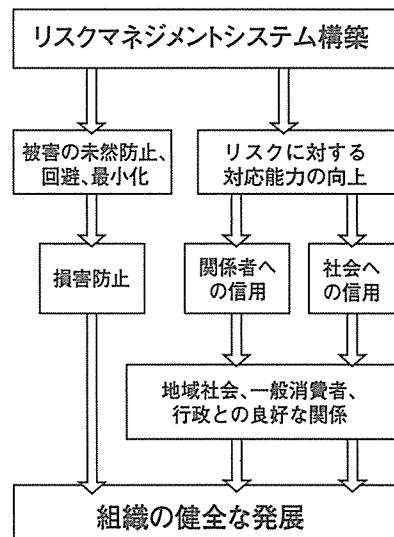


図1 リスクマネジメントの効用

\*横浜国立大学大学院工学研究院教授

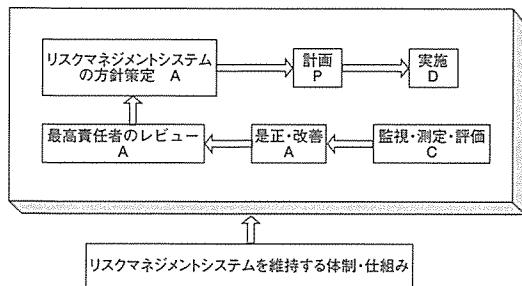


図2 リスクマネジメントシステムのフレームワーク

## 2.2 リスクマネジメントシステムのフレームワーク

リスクマネジメントシステムのメインの骨格は、リスクマネジメント方針、計画、実施、監視・測定・評価、是正・改善、最高責任者のレビューであり、この手順を繰り返してスパイラルアップしながらシステムをより適切なものに高めていく構造とする。また、これを維持するための体制と仕組みを整備することが必要である。

### 2.3 方針策定

組織の最高責任者はリスクマネジメントシステムの方針を策定して表明する必要がある。方針の内容は行動指針や基本目的などである。行動指針では次のような内容が盛り込まれることが好ましい。

- (1) 組織がリスクに適正に対応できるようになることによって、組織の名誉の保持を図るとともに構成員の生命、身体、財産、その他経営資源の保護又は保全若しくは速やかな回復を図る。
- (2) 組織がリスクに適正に対応できるようになることによって取引先、周辺住民など関係者の利益保全に対して貢献する。
- (3) リスクが顕在化した際に責任ある行動を取ることを組織の内外に明確にする。
- (4) リスクに関連する当該組織への社会的要請をリスクマネジメントに反映する。

なお、社会の価値観の変化や内外環境の変化を適切に把握して行動指針を見直す必要がある。

基本目的の中では、組織に関連するリスクに対して、リスクマネジメントの運用によってどのような到達点、又は結果を目指すのかを明確に設定する。

### 2.4 計画

リスクマネジメントの計画では、組織のリスク分析とその評価を行い、方針およびリスク評価に基づいてリスクマネジメントの目標を設定する。次に目標を達成するための対策を作成する。

リスク分析は、リスクの発見、特定および算定を行う。リスクの発見は、組織にダメージを与える可能性のある要因を網羅的に、見落としなく洗い出すことである。見

落としを防止するために、広く、多くの情報を組織内外から集める。そのためには、組織活動に直接関わる内外の事故・事件などをリスクマネジメント担当に対して報告する体制や報告されたリスクそのものの情報を統合的に分析できる体制を構築するとともに、組織の全構成員がリスク環境情報、又はリスクそのものの情報を報告する仕組みを作る。また、経済政策・金融政策の変容、法律・諸規則の改正、関連技術の動きなどリスクを変容させる要因となる“リスク環境情報”も把握する。そのほか、関係者からの要請、約束及び法的要件を考慮する。リスクを効果的に発見するには、リスクに対する感性が重要であるので、その感度を磨く努力が必要である。また、リスク情報を提供したものが、そのこと自体によって不利益を被ることがないようにする体制をもつておくことも重要である。

リスクマネジメントシステム担当責任者は、リスクの発見で得られたリスク情報を吟味して、組織にとって重大な結果を引き起こす可能性のあると考えられるリスクを定常的に特定する。組織にとって重大なリスクは、組織の重要な経営資源に重大な損害又は影響を与えるもの、組織の正常な運営に不可欠な機能に重大な障害を与えるもの、社会に重大な損害又は影響を与えるものなどである。リスクの算定は、特定されたリスクが顕在化する確からしさ（又は確率）とリスクが顕在化した場合の影響の大きさを定量的・定性的に推定することである。

評価は、リスク分析の結果に基づいて対策を実施すべきリスクを明らかにし、その優先順位を決ることである。評価には判断のためのリスク基準が必要である。また、リスクのマネジメントの達成目標を設定する、目標は現実的で、組織内外に容易に理解できるものとする。特定したリスクの中で対策が必要ないと判断した場合は、その理由とそれに対する監視方法を文書化して、監視を継続できる仕組みを作る必要がある。

リスク評価に基づいてリスク対策を策定する。リスク対策には、リスク回避、リスク移転、リスク予防・軽減、リスク保有がある。回避は、リスクの除去あるいはリスクが内在している業務を行わない等によってリスクを避けることである。リスクの移転は保険などによってリスクが顕在化した場合の損害を他に移転することである。リスクの予防・軽減は、リスクの顕在化を防止するあるいはその発生頻度を低下させ、顕在化したときの影響を小さくしてリスクレベルを軽減する対策を講じることによって組織のリスク対応力を強化することである。リスクの保有は、特に経営資源を投入しないで現状の枠内でリスク対応する対策である。

リスク対策の計画は、事前対策、緊急時対策および復旧時対策について作成する。事前のリスク対策の目的は、

リスクの顕在化の防止およびもしリスクが顕在化した場合に被害を最小化することにある。緊急時対策の目的は、被害の最小化、被害拡大防止、二次被害の防止、復旧対策の早期立ち上げなどにある。また、復旧対策の目的は、二次被害の防止、通常組織活動へ早期復旧などにある。

## 2.5 リスクマネジメントの実施

### 2.5.1 リスクマネジメント実施プログラムの策定及び実施

組織のリスクマネジメント方針に基づくリスクマネジメントの基本目的及び目標を達成するための実施プログラムを策定し、それに沿ってリスクマネジメント活動を行う。プログラムの策定に当たって次の点を留意する。

- ・プログラムを策定するための手順の適切さ
- ・プログラムの策定・実施のプロセスに参画すべきすべての責任ある関係者
- ・プログラムの定期レビューのために必要な仕組み
- ・これらの資源、責任、時期及びリスク対策の優先順位の適切さ
- ・プログラムのリスクマネジメント方針及び一般的な計画活動への対応の適切さ
- ・プログラムの監視及びレビュー手順
- ・リスク対策の主体（部署）及びその支援者（部署）を明確にする。
- ・リスク対策の内容を具体的かつ明確にする。
- ・リスク対策の実施順位を明確にする。
- ・継続的に実施できるような内容にする。

### 2.5.2 緊急時および復旧時対策の具体的手順の策定と実行組織の整備

リスクマネジメントに関する計画に示された緊急時対策についてその具体的施策の検討を行い、緊急時における対応手順を策定する。また、緊急時実行組織を整備する。緊急時実行組織には、少なくともリーダ、情報、分析・評価、対応、広報の組織の機能が必要である。緊急時実行組織の整備については次の点を留意する。

- ・緊急事態の場合の責任者を定める手順を明確にし、リスクに応じて定められた組織を手順に従って迅速に設置する。
- ・予見していない緊急事態についても、速やかに責任者を含む対応する組織の編成に関する手順を定め、事態の把握、対応方針の立案及び対処の手順を定めておく。
- ・動員計画を策定するとともに、必要要員が確保できない場合の対処についても検討する。

リスクマネジメントに関する計画に示された復旧対策について、その具体的施策の検討を行い、復旧における対応手順を策定する。復旧におけるプログラム策定においては、外部機関と復旧に関し協力関係の構築、経営資

源が不足する事態に備え、限られた経営資源の有効活用の手順の整備などに留意する必要がある。

### 2.5.3 運用管理

事前のリスク対策の実施手順、緊急時対応手順、復旧時対応手順、報告様式など付属する資料を文書化し適切に管理する。事前のリスク対策の実施手順、緊急時対応手順、復旧時対応手順などを定期的に見直す。各部署に実施手順の細目を委任した場合には、リスクマネジメント担当は、各部署がリスクマネジメントに関する計画に示された各対策の実施手順の策定状況を監督し、適切な助言を与える。緊急時組織についても、指名した要員の人事異動などの属性変更による有効性の低下を防止するために、緊急時実行組織の編成の見直しを速やかに行う。

## 2.6 監視・測定及び評価

### 2.6.1 リスクマネジメントの監視・測定

組織のリスクマネジメントの性能及び運用管理の状況を定常的に監視・測定し、評価するための手順と仕組みを確立し、維持する。

### 2.6.2 性能評価

組織が実施しているリスクマネジメントが適切に実施されているかを評価する。平常時の性能の評価には次のようなものがある。

- ・事前のリスク対策の評価
    - 事前のリスク対策における監視及び測定する対象が適切か。
    - 事前のリスク対策実施状況およびその手順が不適切な場合には是正・改善を実施する基準の設定が適切か。
    - 事前のリスク対策策定責任者が曖昧になっていないか、承認手順は適切か。
    - 事前のリスク対策実施状況に関する定期的報告が適切になされているか。
    - 組織内外の関係者へ対策が周知されているか。
  - ・情報伝達に関する手順が適切か。
  - ・教育・訓練の進捗の状況
  - ・リスクマネジメント関連の内部基準が適切か。
  - ・関連する法規制及び外部規格との整合性。
  - ・リスクコミュニケーションの実行度
- 緊急時対策の性能評価の指標は以下の通りである。
- ・緊急事態及びその変化に対して緊急時対応が適切に追従している度合い
  - ・緊急時対応はどの程度実行可能であったか。
  - ・組織の立ち上げ時間、規模、場所の適否
  - ・適切な対応要員及び資材確保の度合い
  - ・組織内関連部門及び外部機関との連携度
  - ・内部及び外部情報の一元管理、リスクコミュニケーション

ヨンが適切であったか。

復旧対策の性能評価の指標は以下の通りである。

- ・復旧対応の達成度、復旧できた時期と復旧度。
- ・復旧対応が状況変化に対して適切に追従している度合い。
- ・復旧体制の編成時期及び規模が適切であったか。
- ・適切な対策要員及び資材の確保の度合い。
- ・復旧費用の費用対効果。
- ・組織内関連部門及び外部機関との連携度。
- ・内部及び外部情報の一元管理、情報流通が適切であったか。

### 2.6.3 有効性評価

リスクマネジメントシステムの有効性を評価する。有効性の指標は、リスクマネジメント基本目的・目標の達成度である。評価の時期としては、定期的なリスクマネジメント監査結果を受けて実施される組織の最高経営者による見直しの時、リスクマネジメントシステムに疑義が生じた時、自らの組織あるいは他組織でリスクの顕在化が起こり重大な被害を受けた時などが考えられる。

## 2.7 是正・改善

リスクマネジメントの監視、測定、性能評価及び有効性評価に基づいて、必要に応じて是正・改善を継続的に実行する。是正・改善措置が徹底されなくてリスクが顕在化することを避けるために必ず実施状況を点検し、実行されていることを確認する。また、是正・改善実施後、その有効性に関する検証を関係部署に求め、その評価を行う。

## 2.8 システム維持のための仕組み

### 2.8.1 担当要因の役割と能力

リスク対策優先順位の高いリスクを担当する要員について、それぞれの役割に応じ、必要な能力及び経験を明確に定める。

### 2.8.2 教育・訓練

特定したリスクに関する組織の構成員への最低限の実施項目の周知徹底と構成員の対応能力の向上のための教育・訓練を行う。

### 2.8.3 シミュレーション

各リスクへの対応の有効性の検証するために、関係者の出席の下で、それぞれの役割を付与し、活用できる経営資源を設定した上で、特定のリスクが顕在化した状況を想定し、設定されている対応手順が、有効に機能するかどうかを実地又は机上においてシミュレーションを行う。

### 2.8.4 リスクコミュニケーション

リスクの発見、関係者との間の相互理解によるリスクの顕在化の阻止、関係者に対するリスク回避・軽減のためのリスク情報の提供などを目的としたリスクコミュニケーションを作成する。

ケーションの仕組みを作る。

### 2.8.5 リスク情報の開示

関係者に対してリスク情報を開示する。もし、開示できない場合は、リスクごとに開示できる相手の範囲と内容の範囲を明確にする。その場合、その理由を文書に明記して、記録する。なお、機密保持を理由にしたリスク情報の秘匿は、必ずしも組織のリスク回避・軽減に寄与しない場合があり、それによって新たなる責任が組織に課せられ、致命的な打撃を受けることがあるので、リスク情報は余程のことがない限り開示する。

### 2.8.6 リスク情報の監視及び分析評価

リスクの変化に影響を与える因子を特定するとともに関連する情報を収集して分析する。また、情報を収集する手順を確立し、これを維持する。

### 2.8.7 リスクマネジメントシステム監査

個別リスクに関するリスクマネジメントシステム監査プログラムと監査手順を作成して、システムの監査を行う。監査の目的は、当該システムがリスクマネジメントシステムに必要な取り決めに合致しているか否か、またマネジメントが適切に実施され、維持されているか否かを判断することである。監査の結果を組織の最高責任者に提供する。

## 2.9 組織の最高責任者によるレビュー

組織の最高責任者は、組織の全ての活動にわたって包括的にレビューする。レビューする事項は以下の通りである。

- ・リスクマネジメント方針
- ・リスクマネジメントシステムに関する計画策定内容
- ・特定したリスクとそのリスクの変化情報
- ・リスク対策の内容及び実施状況
- ・リスクマネジメントの実施状況
- ・リスクマネジメントシステムの監査及び有効性評価結果
- ・リスクマネジメントシステム（是正・改善）の計画及び実施状況
- ・リスクマネジメントシステム維持のための体制、仕組み、そのほかの要素の変更の必要性

## 3. リスクアセスメント

産業現場には災害につながる要因が数多く内在している。このような潜在危険をハザードという。産業災害を防止するためには、ハザードを把握し、それが顕在する可能性あるいは確率および顕在化した場合の被害を推定して対策を講じる必要がある。産業で取り扱われる物質には火災、爆発、急性中毒、健康障害、環境汚染などを引き起こすリスクがあるものが多い。また、重大な産業災害では、物質の危険性が顕在化することにより被害

表1 化学物質のリスク

リスクの形態	望ましくない事象
フィジカルリスク	人の死傷、急性中毒 施設、設備、機器等の損壊 原材料、製品、中間物質などの損失
人の健康リスク	発癌、健康障害
環境リスク	生物の生態系や環境への悪影響

を大きくすることが多い。ここでは、具体例として物質のフィジカルリスクを取り上げ、産業災害のリスクアセスメントの手法を紹介する。

### 3.1 物質の化学的性質によるリスク

我々は物質の化学的性質を有効に利用することにより快適で文化的な生活の基盤を整備し、現在のような高度の文明社会を築いた。一方、物質の化学的性質は、災害、人の健康障害や環境影響などのリスクの要因となる。化学物質のリスクは、表1に示すように環境や生態系に悪影響を及ぼす環境リスク、発癌性や慢性毒性のような人の健康へのリスク、火災、爆発、異常反応や急性暴露影響のようなフィジカルリスク<sup>2)</sup>の3つに大別される。本稿ではフィジカルリスクのリスクアセスメントを取り上げる。

### 3.2 リスク評価の手順

#### 3.2.1 問題の明確化

検討するリスクの対象を決め、このリスクに関係する要素を整理する。

#### 3.2.2 災害の進展シナリオの分析

リスクアセスメントでは、潜在危険が顕在化して災害になるシナリオを明らかにする必要がある。特に組織にとって重大な結果を招く虞があるシナリオについては見落としが許されないので、網羅性が要求される。災害に至るシナリオを検討する手法の代表的なものを以下に示す。

##### ①チェックリスト

あらかじめ用意された質問事項に従って危険性の検討を行う手法である。質問の構成方法が重要であり、対象としているリスクに応じた質問構成を準備することにより広範囲の対象について適用できるが、あらかじめ設定された項目の範囲内のチェックにとどまる。システムの開発の初期段階での見落とし防止が期待できる。

##### ②PRA (Preliminary Risk Analysis)

物質、設備、システム運用、運用環境における潜在危険性を初期の段階で発見し、これらが発現する原因、発現した場合の影響とその大きさを概略的に検討するものである。システムやプラント開発の初期、工場の立地やレイアウトの検討段階で適用される予備的な検討である。そのため、詳細な解析、評価ではなく、概略的な検

討にとどめられる。潜在危険を初期段階で発見し、その後のプロセス開発や詳細設計で検討すべき項目の抽出を目的とする。上記の検討結果に基づいて、事故防止対策および被害発生を防止する防護対策なども検討する

##### ③ What If 手法

「もし、・・・ならば」、「もし、・・・が起ったならば」という質問を繰り返すことにより、プロセスや運転上の問題点、危険性を発見し、その原因や対策を検討する。非常に簡単な手法であるが、組織だった手法でないでの、見落としの危険性が大きい。そのため、見落とし防止のために簡単なガイドワードを用意することもある。有能な経験者が実施すると短時間の検討でも効果的な結果が得られる。

##### ④ HAZOP (Hazard Operability Study)

化学プロセスの潜在危険性を洗い出す方法として開発されたものである。化学プロセスの1本のライン、1つの機器に着目し、流量、温度、圧力などのプロセスパラメータの正常からのずれを考え、それが生じる原因およびそれがシステムに及ぼす影響を明らかにする。さらに、それが発生したときの対策が適切であるかどうかも検討し、追加すべき。あらかじめ用意されたガイドワードを使用し、プロセスの上流から下流に向かって組織的に検討するので、見落としが少ない。

##### ⑤ FMEA (Failure Modes and Effects Analysis)

システムを構成する機器について、起こりうる潜在故障モードを取り上げ、故障モードの発生頻度、故障がシステムに与える影響を解析し、故障のリスクを明らかにして、是正措置の優先度を明確にする。詳細設計や工程計画の構想を練る段階で、システム運用時のリスクを明確にし、事故や品質問題等の問題を未然に防止するための事前管理の手法である。この手法は機械的なシステムの解析に適している。

##### ⑥ ETA (Event Tree analysis)

定量的な安全性解析手法のひとつで、重大な要因事象（プロセス異常、装置の損傷など）が起きたとして、そこから事象の進展過程を枝分かれ式（ツリー状）に展開して解析する。枝分かれしたそれぞれの事象の確率を推定により、最終事象の発生確率を推定できる。ETAは2元事象に分岐させるため、部分的な故障のようなあいまいな事象は配慮できない。プロセスやシステムのトラブルや事故による組織のダメージを防止するために、安全装置、防災設備、緊急体制、防災活動、緊急時広報活動など多重のリスク対策をETAの手法で事象の進展を分析することによって検討する手法としてLOPA (Layers of Protection Analysis) が開発されている。また、HAZOPの手法を用いて事象進展フローを検討するHAZchartが開発されている。

## ⑦ FTA (Fault Tree Analysis)

システムの中で起こってはならない事象を想定し、頂上事象とする。その事故の直接の要因事象（一次事象）を列举し、頂上事象と論理記号で結びつける。論理記号は「OR」記号（論理和）と「AND」記号（論理積）が基本である。要因事象のいずれかが起これば頂上事象が起こる場合は「OR」記号、要因事象が重なった場合に頂上事象が起こるときは「AND」記号で結ぶ。次に一次事象の原因となる二次事象を同様の手順で明らかにし、これを次々繰り返して、最終的にはシステムを構成する基本的な機器や部品のレベルまで掘り下げ（基本事象）、頂上事象が発生する原因をツリー状に表現する。基本事象の生起確率から論理演算によって頂上事象の生起確率を算出する。頂上事象の生起確率によってシステムの危険性を評価する。また、作成したツリーを分析することにより、基本事象から頂上事象に至る事象の進展シナリオを明らかにすることができる。

### 3.2.3 シナリオの事象の発生の可能性の評価（発生頻度評価）

FMEA、ETA や FTA のような定量的評価は要因事象の発生確率を使って好ましくない事象確率を求める。事象進展フローの中の欠陥事象の発生確率は、その事象を頂上事象とした FTA で算出する。この場合、基本事象の発生頻度のデータが必要であるが、大量に製造されている機器や部品の故障率のように信頼度の高いデータがある事象やヒューマンファクターのように信頼度の低い事象があるので、基本事象の信頼度を考慮して頂上事象の発生確率を評価する必要がある。

### 3.2.4 影響の大きさの評価

好ましくない欠陥事象が進展して災害となるシナリオの被害の大きさを見積もる。例として化学物質のフィジカルリスク評価について述べる。化学物質には、火災危険性、爆発危険性、毒性、反応危険性、発癌性、薬傷危険性、地球環境影響、生態系への影響など多様の危険性がある。火災、爆発、急性暴露（急性中毒、薬傷など）の危険性をフィジカルリスクと呼んでいる。化学物質のフィジカルリスクの顕在化で被害を発生させる発災事象としては、①プール火災、②ジェット火災、③ファイアボール、④フラッシュ火災と蒸気雲爆発、⑤装置内ガス爆発、⑥凝縮体爆発、⑦粉塵爆発、⑧非着火漏出である。プール火災は流出した可燃性液体や液化ガスが燃焼する火災であり、被害は火炎からの放射熱や火炎に直接曝露されることによって発生する。ジェット火災は高圧配管から噴出した可燃性ガスが火炎放射器のように燃焼する火災で、火炎に直接に曝されることにより人の死傷や機器・設備の破損、延焼などの被害が生じる。ファイアボールは可燃性の液化ガスは高温液体の容器が瞬時に大破

した時、放出された液体が気化して着火したとき大きな球状火炎が発生し、被害を発生させる主要なエネルギー形態は放射熱である。フラッシュ火災と蒸気雲爆発は漏出して滞留している可燃性ガス・蒸気と空気の混合気に着火した時発生する現象で、短時間に燃焼は完了する。滞留量が比較的小ない場合は、火炎面の乱れが少ない燃焼となり、ボッと燃えるような現象となるが、このような火災をフラッシュ火災という。一方、大量の可燃性ガス・蒸気が漏出して滞留すると、大規模の蒸気雲が形成され、これに着火すると非常に激しい爆発的な燃焼となり、爆風圧が発生することがあるが、これを蒸気雲爆発という。フラッシュ火災では火炎に直接曝露したきの火炎による被害が発生する可能性がある。蒸気雲爆発では火炎による被害もあるが、爆風圧や飛散物による被害が重要となる。装置内ガス爆発では、爆発による圧力上昇で装置が破壊した場合、爆風圧や飛散物による被害が発生する。固体、液体等の凝縮体の爆発は非常に破壊力が強く、強力な爆風圧が生じるので、爆風と飛散物による被害が発生する。粉塵爆発は可燃性の粉体が空気中に分散した状態で爆発的な燃焼を起こす現象である。粉塵爆発による被害は爆風、飛散物によるもの他に燃焼して飛散する高温粒子による被害が大きい。非着火漏出については、有毒物、高温物質および極低温物質が漏出した場合の被害が問題となる。有毒ガスや蒸気が漏出したときは急性中毒、有毒液体の漏出では薬傷、高温物質漏出では火傷、極低温物質漏出では凍傷の被害が想定される。

ETA で解析した事象進展フローの各シナリオの発災事象に対して火炎範囲、放射熱、爆風、飛散物の範囲、有毒ガス拡散など影響の強度分布を算出する。

### 3.3.5 リスクの判定

事象進展フローの各シナリオの発生頻度と影響強度からリスクを算出する。人が危害をこうむるリスクについては個人リスクと集団リスクで評価される。個人リスクと集団リスクは次のように定義されている。

- ・個人リスク：特定のハザードが顕在化したときに個人があるレベルの危害を受ける頻度
- ・集団リスク：特定のハザードが顕在化したときにあるレベルの危害をこうむる人数と頻度の関係

個人リスク分布や影響の強度分布をマップ上に表示することにより、危険領域を把握することができる。このようなマップをハザードマップといいう。

ハザードの存在する場所周辺の施設や家屋のリスクについても個別にこうむる危害の種類、大きさと頻度を求める。

算定したリスクを安全目標あるいは安全基準と比較し

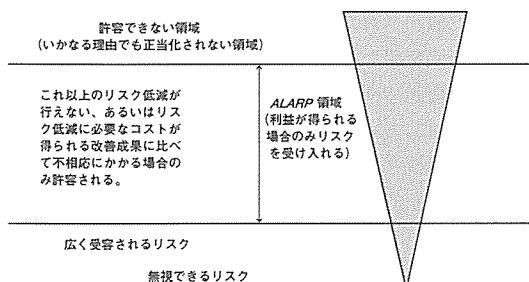


図3 ALARP

てリスク判定を行う。安全基準の考え方の代表的なものは図3に示す英国のHSE (Health and Safety Executive) の ALARP (As Low as Reasonably Practical) である。いかなる理由でも許容できないリスク水準と広く受容されるリスク水準の2つ水準を定め、その間は最大限の努力を払って達成できないかあるいはそれ以上リスク低減を行うには莫大なコストが必要で実現困難な場合のみ許容される領域である。ALARP領域では常にリスクを低減する努力が求められる。

### 3.3.6 リスク低減

リスク判定で、リスクの安全基準をクリアできない場合は、リスク低減対策を実施しなければならない。考えられるリスク低減策を検討し、コスト／ペネフィットの分析を行う。安全水準のクリア、コスト／ペネフィット分析、

有効性等を総合的にみて最適なリスク低減策を行う。

## 4. おわりに

リスクマネジメントの不備で組織が壊滅的な打撃を受けたり、一組織の損失が関係者に多大の影響を与えたり、社会的損失にまで波及する例はしばしばみられる。そのため、組織は、リスクに対して適切に対応し、リスクの減少に努め、リスクが顕在化した場合はその被害の極小化して、関係者への影響や社会的損失の発生をできる限り防止するよう努めることが求められる。そのために、リスクマネジメントを適切に実施することが重要である。また、組織のリスクは生き物のように常に変動するので、PDCAを回して常に向上を目指してスパイラルアップしなければならない。

ここでは、様々なリスクに共通なリスクマネジメントシステム構築のための原則的な事柄を紹介し、リスクマネジメントに必要なリスクアセスメント手法について化学物質のフィジカルリスクを例にして述べた。

## 参考文献

- 1) JIS Q 2001「リスクマネジメントシステム構築のための指針」(2001)
- 2) 若倉正英他、化学物質のフィジカルリスク評価システムの開発、安全工学、43, 4, pp 240-245 (2004)

## 講座

# 金属学とその研究手法の進歩 — 研究生活を顧みて [III]

村上陽太郎\*

Progress in Metal Science and Its Research Technology  
—Look Back upon My Research Life [III]

by Yotaro MURAKAMI

## 1. はじめに

第I報<sup>1)</sup>では、最初に筆者の金属学の研究生活全般の経緯を述べた後、筆者と協同研究者が行なった合金状態図の研究成果とその手法を述べ、最近の進歩した研究手法、特にCALPHAD法と計算機ソフトウェアに就いて解説した。前回第II報<sup>2)</sup>においては、アルミニウム合金の析出現象と時効硬化工合金に関して、古い時代から、進歩した現在までの、その時々に話題になった事項に就いて書いた。

第I報で述べたように、筆者は1953年（昭和28年）2月に教授に昇任した。研究室も毎年整備され、人員も多くなってきたので、上記の合金状態図と時効析出の分野から、それらの延長線上にある金属材料の分野に発展・拡大するように努力してきた。研究成果を挙げるには、研究への情熱と創意工夫の外に、優れた新しい研究手法と実験機器が重要で、特に内外の研究論文と研究者との交流から研究情報の速い取得が必要である。そのように心掛けて研究を進めて来た。幸いにも多数の優れた諸君が研究室に来て下され、多くの成果を得ることができた。本報では、(1)チタンの研究開発の初期から現在まで、(2)合金の応力腐食割れの研究、(3)アルミニウム合金の超塑性の研究、及び(4)繊維強化金属複合材料の研究に就いて述べたい。これらの分野は現在では基礎的にも実用的にも研究開発が、精緻な研究手法によって極めて深く、広く行なわれ、多数の知見が蓄積されているが、筆者はその搖籃時代から研究を始めた。古い時代の様相を主体にし、進歩の過程を述べてみたい。

## 2. チタン合金の研究開発の初期から現在まで

米国のDuPont社がKroll法によるスポンジチタン

の製造工場を建設して生産を開始し、チタンが、その「軽く、強く、錆びない」“wonder metal”として、強い一步を踏み出したのは、1948年（昭和23年）であった。翌1949年（昭和24年）には、京都大学・西村研究室（筆者の恩師の西村秀雄先生が主宰されていた）において、日本で最初の韌性チタンが板状試片として試作に成功されている。当時私は西村研究室の助教授であったが、この研究には関係していなかった。私の研究分野は

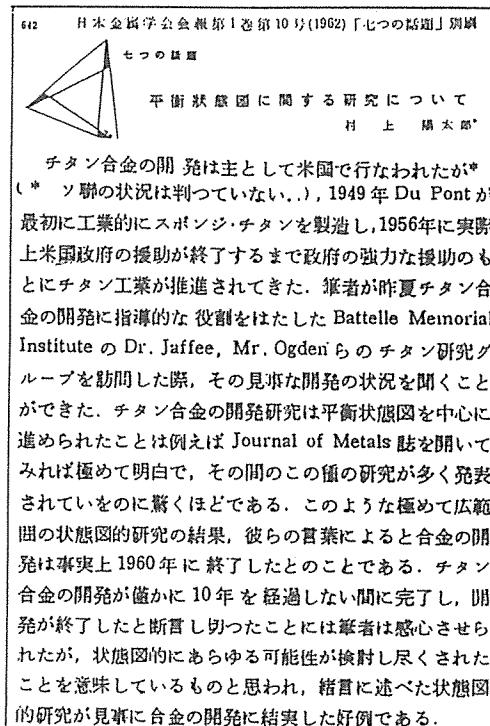


図1 チタン合金の研究開発に対する状態図研究の役割

\*京都大学名誉教授（昭和17年、冶金卒）

既に述べたようにアルミニウム合金であったが、将来は研究してみたいという願望は強かつたようだ。

**2.1 チタン合金の研究開発に果した状態図的研究：**新しい合金の研究開発には、何よりも先ず合金状態図を明らかにすることが必要で、チタン合金に対して米国でこれが実証された。図1<sup>3)</sup>は筆者が日本金属学会々報第1巻第10号(1962年)に、チタン合金の研究開発に対する状態図研究の役割を書いたものである。その前年(1961年)の夏に、Ti合金の研究開発を極めて活潑に進めていたDr. JaffeeとMr. Ogdenを、米国Ohio州のColumbusにあるBattelle Memorial Instituteに訪問した際の印象である。当時、米国から多数の2元系状態図が学会誌に発表されつゝあったことは気が付いていたが、彼等がこれ程決定的な断言をしたことは驚きであった。

Tiはhcp構造の $\alpha$ 相は、882°Cでbcc構造の $\beta$ 相に変態する。添加元素によって、変態点が変化し、ミクロ組織が変化することが予想されるので、先ず2元系状態図を確定することが必要であった。合金元素の添加によって、変態温度を上昇させて、 $\alpha$ 相領域を拡大する元素を $\alpha$ 相安定化元素、逆に変態点を降下させて $\beta$ 相領域を拡大するものを $\beta$ 相安定化元素、そのいずれにも属さないものを中性元素と呼ばれ、図2<sup>4)</sup>に模式的に示すように分類される。各模式図の下にそれらに属する元素名を示した。実用合金はこれらの合金元素を組み合わせて添加されるので、多元系状態図の知見が必要になる。上記のJaffe及びOgdenが、10年で合金開発が終了したという意味は、2元系合金状態図の確定によって、 $\alpha$ チタン合金、 $\alpha+\beta$ チタン合金及び $\beta$ チタン合金の大枠が決

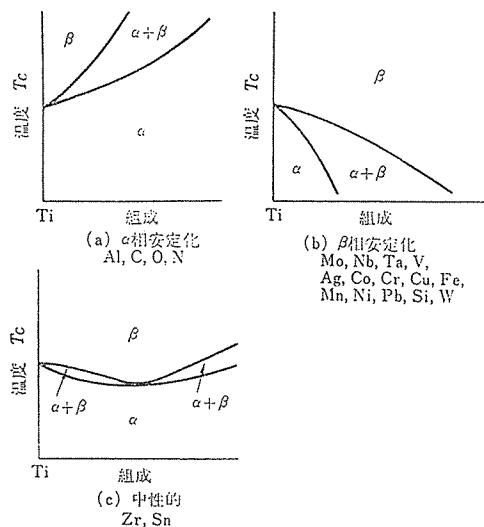


図2 チタン二元系合金状態図の分類

定され、合金の基礎が確定したことを云ったものである。チタン合金は極めて優れた性能が予想できたので、軍事的な利用の面から米国政府の大きな研究費の援助で、このように早期に研究が進展した。しかし、状態図の研究手法は第1報で述べたように極めて古典的なものであった。相律に基づいた幾何学的図学と古いマクロ的な物理冶金実験法とによって、構成相の識別と相境界の決定を行なう方法で、この時点においても20世紀初頭の方法を一歩も出るものではなかった。

**2.2 筆者の初期の研究室における3元系状態図の研究：**実用合金では少くとも3元系以上の状態図が必要になるので、教授に昇任して暫くして、3元系状態図の研究を始めた。チタンは極めて活性な元素であるので合金の溶製には、アルミナ等の耐火物の坩堝は使用できない。図3<sup>5)</sup>に示すような特殊な溶解炉を用いた。水冷した純銅製の皿状のハース上にTiスピンジと合金元素の粉末の混合物を置いて、水冷したW棒の電極の間に電弧を飛ばして溶解する。Cuハースと接触している溶湯の部分は固化しているので、数回反転させる。溶解炉の構造はガラス製の円筒を上下の金具にゴムシールドで締めつけ、W電極棒はペリリウム銅製のベローズで連結されているので、外側から観察しながら自由に動かすことができる。最初にセットした後、十分に排気後、アルゴンガスを導入し、その不活性雰囲気で溶製を行なった。この方法では、微量のWが不純物として混入するが殆んど影響がなく、評量に極めて近い組成の合金が得られる。

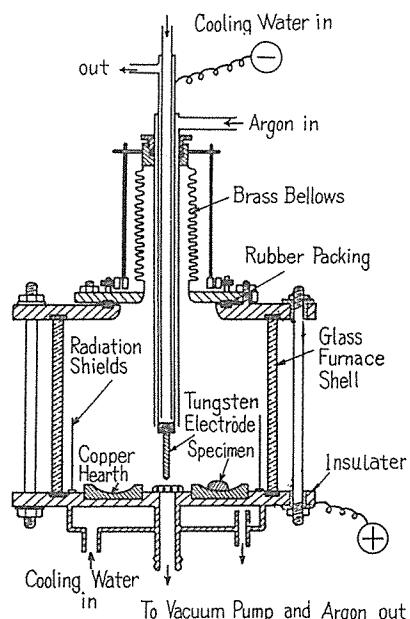


図3 銅製ハースを持つ実験用W電極アーク溶解炉の模式図

図4はこのようにして溶製した多数の合金を用いて得られたTi-Fe-Mn3元系の1000°Cの等温断面状態図<sup>6,7)</sup>である。溶融温度の測定には、図5に示す装置を用いた。Mo製の坩埚と直接通電によるヒーターを持ち、Pt-PtRh熱電対で温度測定を行なった。固相における平衡関係は示差熱分析と光学顕微鏡組織観察によって求め、平衡状態図を完成した。特に、 $\beta$ -Ti単相の各温度の相境界はX線による格子定数の変化から決定した。これらは、図4のTi隅に示してある。この研究は主として、故圓城敏男博士（阪大の溶接研究所（当時）所長に在職中に病没された）の大学院博士課程における業績である。この三元系状態図と並んで、Ti-Fe-C3元系状態図が、故木村啓造博士（当時村上研究室の助教授）と大学院修士課程の西村義雄君によって、Ti-Fe側のC約30%以下の領域の液相面と1000°Cの等温断面状態図<sup>8)</sup>が確定

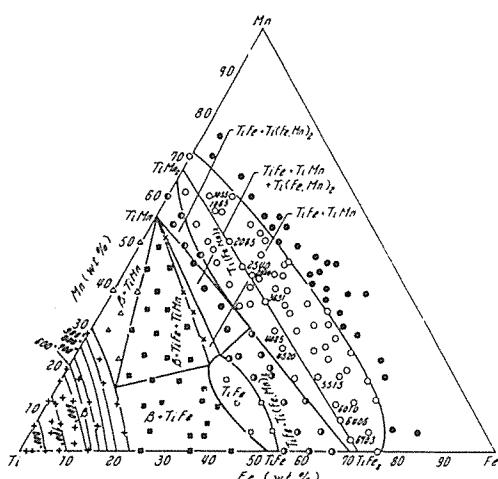


図4 Ti-Fe-Mn 3元系の1000°Cの等温断面状態図と種々の温度の $\beta$ -Ti単相領域

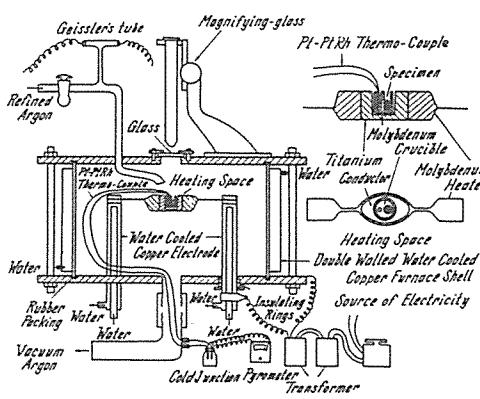


図5 Ti-Fe-Mn 3元系合金の溶融温度測定装置の模式図

されている。これらは何れも、前述の古典的な方法による実験で得られたもので、その労苦はばかり知れないものであった。現在は第1報で述べたように計算によって、もし少数の実験で熱力学的パラメーターが求められていれば、極めて正確な等温断面状態図が得られる。第1報(458頁)の図8はCALPHAD法によって求められた、Al-Cu-Mg-Si系の0.6重量%一定の460°Cの等温断面状態図で、これと対比してみると、感慨の大きなものがある。学問の進歩には驚かざるを得ない。

**2.3 チタン合金の相変態と各種添加元素の役割：**当時から世界的なチタンの国際会議として、4年毎に開催されている第10回チタン世界会議が昨年7月ドイツのハンブルグで行われ、次の第11回会議は日本金属学会の主催で、京都市の京都国際会館で行われることが決っている。第4回の会議が、1980年(昭和55年)5月に、やはり京都国際会館で行なわれているので、実に27年の間隔があいている。当時、拙宅が会議場に近いので、著名な方々を夫婦で、毎晩招待した楽しい想い出が残っている。次の第5回会議は、1984年(昭和59年)西独のミュンヘンで開催されているが、筆者は、Critical Review<sup>9)</sup>を行なった。当時はチタン合金の学問は、既に基礎的にも実用的にも十分に進歩していて、現在でも充分に通用

表1 チタン合金における相変態と生成相

	変 態	反 応 過 程
I	焼入れ中における $\beta$ 相の分解	(I) チタン、マルテンサイト： $\beta \rightarrow \alpha', \alpha''$ (II) 焼入れ $\omega$ 相： $\beta \rightarrow \omega_{\text{atm}} + \beta$
	恒温変態中における $\beta$ 相または $\alpha + \beta$ の分解	$\beta(\beta + \alpha) \rightarrow \alpha'', \alpha''_{\text{rich}}, \alpha''_{\text{lean}}$ $\beta', \beta'_{\text{rich}}, \beta'_{\text{lean}}$ Type 1 $\alpha$ , Type 2 $\alpha$
III	残留 $\beta$ 相の分解	(I) 時効 $\omega$ 相： $\beta_r \rightarrow \omega_r + \beta$ (II) 相分離： $\beta_r \rightarrow \beta' + \beta$ (III) $\alpha$ 相の生成： $\beta_r \rightarrow \alpha + \beta$ (ウイックドマンステッテン $\alpha$ 、ラーフト $\alpha$ ) (IV) 化合物の析出： $\beta_r \rightarrow$ 規則 $\alpha_2 + \beta$ , $\beta_r \rightarrow$ 規則 $\beta_2 + \beta$ (V) 応力誘起マルテンサイト (VI) 恒温(熱強性)マルテンサイト
	マルテンサイトの分解	(I) 六方晶 $\alpha'$ ( $\beta$ -アイソモルファス) $\rightarrow \alpha + \beta$ 六方晶 $\alpha'$ ( $\beta$ -共析) $\rightarrow \alpha +$ (化合物) (II) 斜方晶 $\alpha''$ ( $M_s^{\alpha''} >$ 室温) $\rightarrow \alpha + \beta$ 斜方晶 $\alpha''$ ( $M_s^{\alpha''}$ = 室温) : $\alpha'' \rightarrow \beta$
V	中間相を通しての $\alpha$ 相の生成	(I) $\beta + \omega \rightarrow \alpha + \beta$ (II) $\beta + \beta' \rightarrow \alpha + \beta$
VI	共析分解	(I) アクティブな共析：バーライト的組織成分(セル状反応) (II) 緩慢な共析：マッシュな生成物(セル状反応)
	$\alpha$ 固溶体から析出	(I) 化合物の析出 (II) $\alpha_2$ 相の析出
VII	界面相の形成	$\alpha/\beta$ 界面相が徐冷中に形成される

するので、その paper と同時期に執筆した報文<sup>10)</sup>に基いて、チタン合金の相変態と熱処理の概要を述べてみたい。

Ti は既に述べたように、低温の hcp  $\alpha$  相は、882°C で高温の bcc  $\beta$  相に相変態するので、各種元素の添加によって、多種多様の相が出現し、熱処理も多彩になる。従ってミクロ組織の制御によって、機械的性質等が大幅に向向上する。表 1<sup>10)</sup> にチタン合金における相変態とその結果生じる相を示した。熱処理に特に重要なものとして、 $\alpha'$  と  $\alpha''$  の 2 種類のマルテンサイト ( $M$  相)、焼入れ  $\omega$  と時効  $\omega$ 、 $\alpha_2$  規則相、 $\alpha/\beta$  型合金の界面相、 $\beta$  相との方位関係の異なる二つの型の  $\alpha$  相がある。(詳細な省略、著者の報文<sup>10)</sup> 参照) 一方、Ti 合金は室温のミクロ組織によって、表 2<sup>10)</sup> に示すように、 $\alpha$ 、 $\alpha+\beta$ 、及び  $\beta$  型と大別され、Near  $\alpha$  と Near  $\beta$  型が付加される。また  $\alpha$  相と  $\beta$  相の量的割合、形態、サイズ及び分散状態によって、合金の特性が大きく変化する。表中の矢印によって変化の傾向を示す。 $\alpha$  相安定化元素である Al は 7 wt%までの添加によって引張強度、弾性率、クリープ強度を著しく増大させる。しかし、それ以上の添加では、Ti-Al 2 元系状態図で示されているように規則格子構造を示す  $\alpha_2$  ( $Ti_3Al$ ) が形成され著しい脆化を示す。例え

ば、Ti-15%Al 合金を 900°C より焼入すると、 $\alpha$  相の柱面に沿うて厚さ 20~40 Å の小板状  $\alpha_2$  が生成される。Sn は  $\alpha$  安定化能は Al より弱いが、脆化相を形成しない。Zr は Ti と全率固溶体を作る弱い  $\beta$  安定化元素で、室温及び中間温度域で強度を増大させる。 $\beta$  安定化元素には、全率固溶型の Mo, V, Nb, Ta と共に析出型の Fe, Cr, Mn, Co, Ni 等があるが、後者の方が安定化能が大きい。前者は価格の安価な Mo と V が実用合金に用いられる。Si は耐熱合金に、0.1~0.5% 添加され、高温強度と耐クリープ強度を改善する。SFE を低下させ、交差辺りを抑制するためと考えられている。

**2.4  $\alpha+\beta$  型合金の熱処理** : Near  $\alpha$  及び  $\alpha+\beta$  合金の模式的な状態図を図 6<sup>10)</sup> に示した。また典型的なミクロ組織を Ti-6242 (6 Al-2 Sn-4 Zr-2 Mo) について、写真 1<sup>10)</sup> (a), (b) 及び (c) に示す。最も重要なのは、 $\beta$  Transus で、この温度以上で加熱すると、均一固溶体が得られる。 $\beta$  Transus 以上で加熱又は加工を行なった後

表 2 合金元素と組織・性質との関係

$\alpha$ 安定化元素 (Al, O, N など) 中性的 元 素 $\beta$ 安定化元素 (Sn, V, Mo, Fe, Zr, Cr, Mn など) 量増大	$\alpha$ 型	Ti Ti-5Al-2.5Sn Ti-5Al-6Sn-2Zr-1Mo-0.2Si Ti-8Al-1Mo-1V Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	比重 熱処理性 塑性加工性 ひずみ強度増大性 クリープ強度増大性 溶接性
	near $\alpha$ 型	Ti-6Al-4V Ti-6Al-6V-2Sn Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo Ti-8Mn	
	$\alpha+\beta$ 型	Ti-13V-11Cr-3Al Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr( $\beta$ C) Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn( $\beta$ III)	
$\beta$ 型			↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑

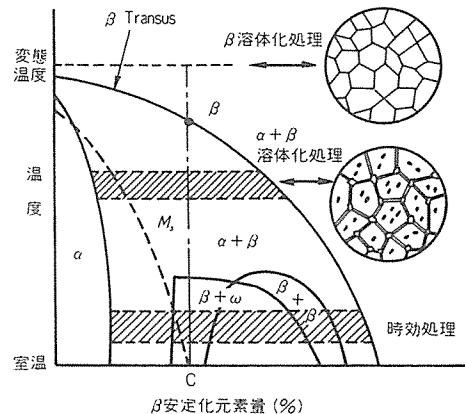
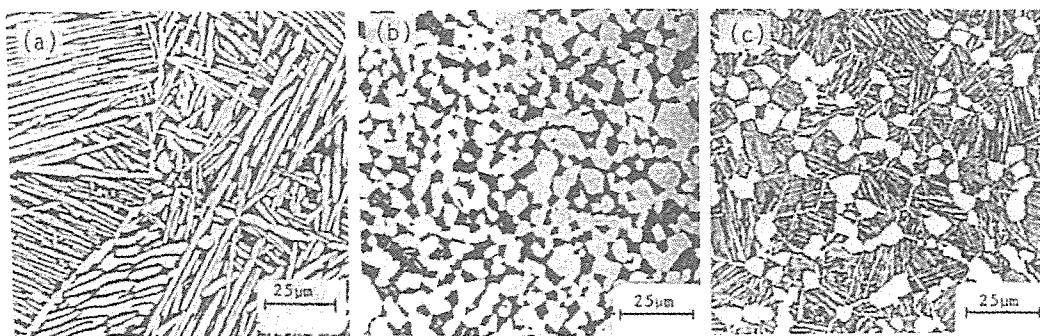


図 6  $\alpha+\beta$  合金の状態図と熱処理



(a)  $\beta$  溶体化処理 (板状組織)  
(b)  $\alpha+\beta$  域で塑性加工後  $\alpha+\beta$  域で溶体化処理 (等軸一次  $\alpha$  晶組織)  
(c)  $\alpha+\beta$  域で塑性加工後  $\beta$  ランザス直下の溶体化処理 (板状  $\alpha$  晶マトリックスに少量の等軸晶  $\alpha$ )

写真 1 Ti-6242 合金の溶体化処理温度によるミクロ組織の変化

冷却すると、(a) のような板状 $\alpha$ 組織が得られる。 $\alpha+\beta$ 域で加工後冷却すると、等軸一次 $\alpha$ 組織を生じ(b),  $\alpha+\beta$ 域で加工後、 $\beta$ Transusより少し下の温度で加熱すると、(c) のように微細な板状 $\alpha$ 相と少量の等軸 $\alpha$ 相の混合組織が得られる。写真的黒色の部分は $\beta$ 相である。 $\alpha$ 相の形態によって、機械的性質が変化する。その大凡の傾向を表3に示す。実際の処理はこの様な熱処理と加工によって、ミクロ組織の精緻な制御が行われている。

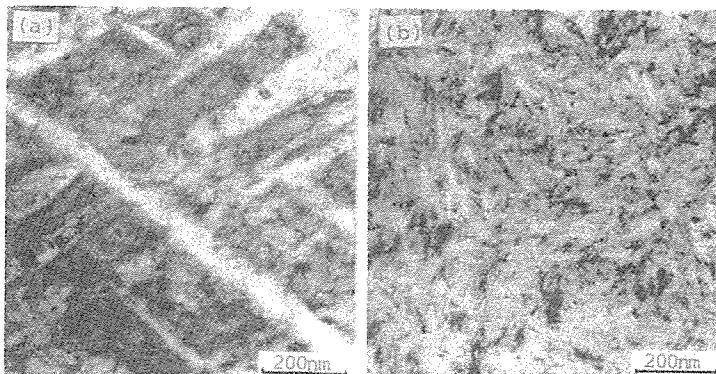
**2.5  $\beta$ 型合金の熱処理:**準安定 $\beta$ 型合金は $\alpha+\beta$ 型合金よりも冷間加工が容易で、優れた韌性と高い強度を持ち、且焼入性がよい等優れた性能を示す。 $\beta$ 相合金の熱処理は図6で説明<sup>10, 11)</sup>できる。溶体化処理と低温における時効処理からなっている。溶体化処理は等軸1次 $\alpha$ 相の容積率を制御するために、 $\beta$ transusより高い温度( $\beta$ 溶体化)または、それより低温( $\alpha+\beta$ 溶体化)で行なう。時効硬化は微細な2次的析出 $\alpha$ 相によって達成さ

れ、強化の度合いは $\alpha$ 相のサイズ、形状及び容積率によって左右される。次の二通りの方法によって、広範囲にミクロ組織を変化させることが可能である。一つは冷間又は温間加工によって導入した残留転位又は亜粒界における優先的核生成によって $\beta$ 相から直接 $\alpha$ 相を析出させる方法であり、他の方法は残留 $\beta$ 相を低温で時効後さらに高温で時効を行なう2段時効処理である。この2段階時効では、(a) (残留 $\beta_r$ ) → (溶質原子の稀薄なbcc $\beta'$ 相) → (タイプ1 $\alpha$ 及び2 $\alpha$ )と、(b) (残留 $\beta_r$ ) → (溶質原子の稀薄な六方晶 $\omega$ 相) → タイプ1 $\alpha$ 及び2 $\alpha$ )の二通りがある。残留 $\beta_r$ 相の直接時効と2段時効の差異は、筆者らがTi-15Mo-5Zr-3Al合金に対して撮った写真2で明瞭に示されている。前者では粗大 $\omega$ - $\alpha$ 相組織を示すのに対して、後者では微細に均一分散した $\alpha$ 相組織が得られ、著しい強靭化が達成できる。

**2.6 実用チタン合金とその応用分野:**表4及び5に、

表3  $\alpha+\beta$ 型チタン合金の $\alpha$ 相の形態と機械的性質

$\alpha$ 相の形態	引張強さ	引張靭性	クリープ強さ	破壊靭性	高温低サイクル疲労	耐疲労き裂開始性	耐疲労き裂伝播性
等軸 $\alpha$	少しそうい	高	低	低	高	高	低
針状 $\alpha$	少し劣る	低	高	高	低	低	高



(a) 850°C 溶体化後焼入れ,  
500°C × 30 min 時効  
(b) 850°C 溶体化後焼入れ後,  
350°C × 10<sup>4</sup> min + 500°C ×  
500 min

写真2 Ti-15Mo-5Zr-3Al合金の  
二段時効による $\alpha$ 相の微  
細化を示すTEM写真

表4 チタンの本質的特性とその応用分野

本質的特性	主要な応用分野	主要な製品
軽量性	宇宙及び航空機工業	航空機エンジン 及び機体
高比強度	自動車工業 助走昇用	コネクティング・ロッド バルブ、スプリング コンデンサー、ターピン翼
高耐食性	化学及び石油工業 建設工業	熱交換器、反応容器、ポンプ等 屋根、カーテン・ウォール
無毒性、 低剛性 人体適合性、 機械性材料	海洋関係 外科用インプラント材、 骨科用材料	海水脱塩、深海船など ヒップおよび膝ジョイント、 医療機器
	超伝導体、水素吸収合 成形記憶合金	超高磁場発生、ニッケル- Mn電池、センサー等

表5 先端構造用チタン合金

合金組成、商品名	分類	応用分野
Ti-5Al-2.5Fe Ti-Al-V-Mo-Fe, SP700	$\beta$ -rich $\beta$ -rich	生体医療用 高強度、超塑性
Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr, Beta-C Ti-5Al-2Sn-2Cr-4Mo-4Zr-1Fe, J-CEZ Ti-3Al-15Mo-2.6Nb-0.2Si, Beta-21S	metastable- $\beta$ metastable- $\beta$ metastable- $\beta$	油田用、バネ、構造用 高強度、中高温用 耐酸化性、MMC
Ti-6Al-4Sn-4Zr-7Mo-4Si, IMI834 Ti-5Al-3Sn-4Zr-4Mo-4.5Si, Ti-1100	near- $\epsilon$ near- $\epsilon$	高温用ディスク材 高温用ディスク材
Ti-25Al-10Nb-3V-1Mo, Super- $\epsilon$	$\alpha$ 2	高温高強度
Ti-48Al-2Nb-2Cr(at%) Ti-48Al-2Nb-2Mn(at%) Ti-48Al-2Nb-2Mn(at%)+TiB <sub>2</sub>	$\epsilon$ $\epsilon$ $\epsilon$ -XD	高温、耐酸化 高温、耐酸化 高温、耐エロージョン

表6 日本で最近開発されたチタン合金

合金タイプ	合金名	開発メーカー	化学成分	特徴	用途
低合金チタン	Super TiX (800,1000)	新日鐵	Ti-Fe-O-N.	・安価型、高強度、耐疵性	めがね、時計、ゴルフクラブ
	KS100, KS120	神戸製鋼	Ti-0.35O-0.35Fe, Ti-0.30-0.5Fe-0.6Si		
耐食合金	KS 50Ta	神戸製鋼	Ti-5Ta	・耐高温高濃度硝酸性 ・耐隙間腐食性	合成樹脂製造プラント 化学プラント、発電・淡水化プラント 熱交換器チューブ
	SMI-ACE	住友金属	Ti-0.5Pd-0.3Co		
	KS AKOT	神戸製鋼	Ti-0.4Ni-0.1Cr-0.03Ru-0.01Pd		
	TICOREX	日鉄金属	Ti-0.5Ni-0.5Ru		
$\alpha$ 型合金	KS6-4-4-1-1Ta	神戸製鋼	Ti-6Al-4Sn-4Zr-1Mo-1Ta	・耐熱クリープ強度 ・高耐熱温度	航空機エンジン 航空機エンジン
	DAT54	大同特殊鋼	Ti-6Al-4Sn-3.5Zr-3Mo-1Nb-0.3Si		
$(\alpha + \beta)$ 型合金	Super TiX51F	新日鐵	Ti-Fe-3.5～5.5Al	・熱間加工性、高強度 ・熱間加工性、超塑性 ・熱間加工性 ・冷間加工性(コイル) ・快削性 ・疲労き裂伝播特性	自転車部品、汎用 ゴルフクラブ、航空機部品 汎用 汎用 自動車(コンロッド、シフトノブ) 航空機エンジン
	SP-700	NKK	Ti-4.5Al-3V-2Mo-2Fe		
	KSEL-F	神戸製鋼	Ti-4.5Al-4Cr-0.5Fe-0.2C		
	KS Ti-9	神戸製鋼	Ti-2Mo-1.6V-4.5Al-0.5Fe-0.3Si-0.03C		
	DAT52F	大同特殊鋼	Ti-3Al-2V-0.2S-0.5REM		
	KS5-2-4-3-3	神戸製鋼	Ti-5Al-2Sn-4Zr-3Cr-3Mo		
$\beta$ 型合金	KS 15-5-3	神戸製鋼	Ti-15Mo-5Zr-3Al	・冷間加工性、高強度 ・冷間鍛造性 ・冷間加工性 ・高強度、高延性 ・耐摩耗性	汎用 自動車部品(バルブスプリング、バルブリーテナ) 自転車部品、時計、ゴルフクラブ、めがね ゴルフクラブヘッド 撥動部品
	KS 16-4-3-3	神戸製鋼	Ti-16V-4Sn-3Al-3Nb		
	DAT51	大同特殊鋼	Ti-22V-4Al		
	SAT-2041CF	住友金属	Ti-20V-3.5Al-1Sn		
	DAT55G	大同特殊鋼	Ti-15V-6Cr-4Al		
	SAT-64AW	住友金属	Ti-6Al-4V-10Cr-1.3C		

チタンの本質的特性とその応用分野、及び先端構造用チタン合金を又表6<sup>11)</sup>に日本で最近開発されたチタン合金を、それぞれに示す。チタンは上述のように、軽量性、高比強度及び高耐食性の3大特性によって表4に示すように、軽量性と高比強度によって、宇宙・航空用に用いられ、高耐食性の長所を利用した用途として、化学及び石油工業用、屋根及びカーテン・ウォールなどの建材、海水脱塩器用などに用いられ、更に無毒性と低剛性と特に人体適合性がよい為、外科用インプラント材、歯科用材料などに多用されるようになっている。しかし、從来から日本国内では航空宇宙分野の利用は少なく、化学分野の需要が主である。表5には米欧で航空宇宙機器に開発された先端高強度チタン合金を示したが、日本でも1990年代に入ると、これらの先端チタン合金の用途が、スポーツ、自動車などの一般民生分野に大きく展開されるようになり、高強度をベースにして熱間・冷間加工性と鍛造性、被削性、経済性に優れた新しいチタン合金が表6に示すように数多く開発されている。最近、(株)豊田中央研究所で開発された $\beta$ チタン合金“ゴムメタル”が話題になっている。またKroll法に代る連続型新製錬法として、FFC(Fray-Farthing-Chen)法とOS(小野・鈴木)法が注目されている。将来、連続型製錬法の工業化が確立して、低価格でチタンが供給されるようになれば、チタンの利用分野は大きく拡大されるだろう。

### 3. 時期割れと応力腐食割れの今昔

3.1 古い時代の話：黄銅には時期割れ(Season Cracking)という現象があり、 $\alpha$ 黄銅や $\alpha + \beta$ 黄銅の棒や管を冷間抽伸したものを大気中において置くと脆性割れが起ること。これを低温焼鈍すると防止できるが、実際に使用されている場合には、しばしば割れのトラブルが発生し、これらを完全に防止するのは非常に困難なことが古くからよく知られていた<sup>12)</sup>。金属学が発展の初期で、ミクロ組織の解明が十分にできなかった古い時代にはその機構は全く不明であった。昭和37年(1962年)頃に当時に防衛庁の艦艇に使用されていた高力黄銅(第2種の標準組成: Cu 57.0～58.5%, Fe 0.5%, Sn 0.6%, Al 1.0～1.8%, Mn 1.0～2.0%, (Pb 0.4%), Zn 残部)のボルト・ナットに多数の破損が発生し、伸銅業界で大きい問題になった。当時は既に、時期割れという語は、応力腐食割れ(Stress-corrosion Cracking, SCC)と呼ばれ、引張応力(残留又は外部)と合金に適当な腐食環境が同時に作用すると著しい脆性破壊が起る現象であり、どちらか一方のみが作用した場合には起らないこと、銅合金、アルミニウム合金、ステンレス鋼等にこの現象が起ることなどが明らかになっていた。日本伸銅協会の伸銅技術研究会に専門委員会が設立され、東工大の森永卓一教授(故人)、阪大の美馬源次郎教授(故人)と筆

者が共同研究を行った。高力黄銅棒2種及び3種について、アンモニヤ飽和蒸気中におけるSCC試験を行った<sup>13)</sup>。昭和38年度及び昭和39年度は横杆式静荷重負荷のSCC試験機を設計製作して、人工海水中で試験を行なった。実際の海水中で応力を負荷して、SCCの感受性を評価できる方法を探求するのが目的であった。しかし、今から考えると黄銅のSCCを確実に評価することは無理で、種々のデータは得られるが、実用に役立つ評価法を確立できなかったのは当然であると思う。得られた結論は、高力黄銅ボルト・ナットを船用に使用できないことが明らかになり、ステンレス鋼に代替されることになった。重要な知見として、ナットの締め方が調整できず、表面に塑性辺り帶の発生が大きな因子になるということが、次に述べる筆者らの研究で明らかになっている。黄銅では合金元素の添加でSCCは阻止できないが、既に第2報で述べたように、Al-Zn-Mg合金のSCCは、古い時代に、試行錯誤的な方法で、Cr及びMnの少量添加でSCCが防止できることが、五十嵐勇博士によって発明されたのは僥倖であったと言わねばならない。Al合金ではSCCが結晶粒界に起る現象で、黄銅のSCCよりも現象が単純であるためと考えられる。

**3.2 α黄銅単結晶によるSCCの研究：**上述のように黄銅のSCC現象は極めて複雑で、その機構は未だ完全に解明されていないが、筆者の研究室で昭和42年(1967年)頃、当時大学院に在学中の猪飼靖博士(神戸大学)によって行われた研究<sup>14)</sup>では応力の影響が明快に説明できるような成果が得られている。ブリッジマン法で調製したα黄銅(Cu 68.8%)単結晶(直径5mm、長さ100mm)を用い、28%アンモニヤ水溶液を用いて発生させたアンモニヤ雰囲気中で、図7に示した装置で、

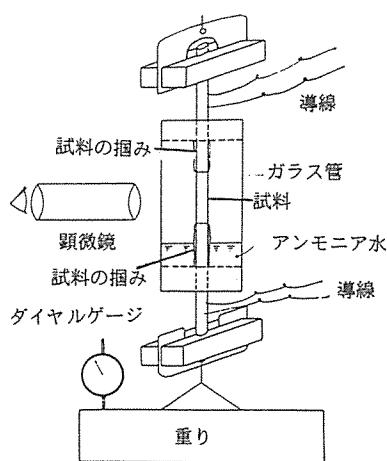


図7 単結晶のSCC試験に用いた試験機の概念図

臨界剪断応力(CRSS)の種々の%の静荷重を負荷した。試料の両端から導線を取り出して、割れの進展を知るために、電気抵抗を測定し、又伸びはダイヤル・ゲージで測った。表面に現われるslip stepと割れの状況は目視で観察した。写真3にslip stepと割れの外観を示す。表7にSCCに及ぼす負荷応力と破断までの時間及びslip stepの発生の有無を示す。得られた結果は、(1)SCCを起すに要する応力に下限が存在すること。(2)この下限は塑性変形によってslip stepを発生させる負荷応力と関係があり、CRSSの70%以下では、100日以上経過してもslip stepは観察されず、割れも発生しないこと。等が明確になり、α黄銅のアンモニヤ雰囲気

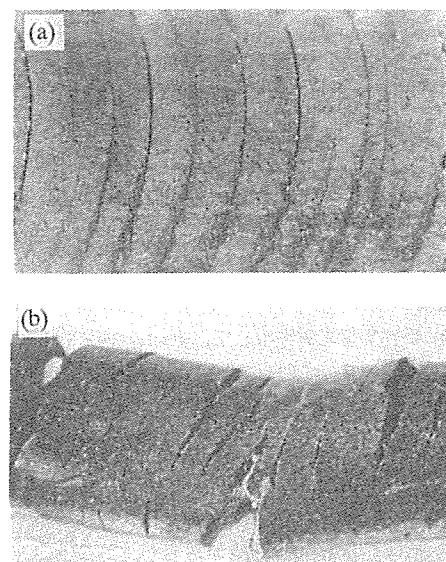


写真3 α黄銅単結晶のslip stepとSCC割れの外観(CRSSの80%の応力負荷)  
(a) slip stepからの割れの開始, ×14.4  
(b) 割れはslip stepのずれの大きい部分から開始している, ×5.75

表7 α黄銅単結晶のSCCに及ぼす負荷応力の影響

負荷応力 (臨界剪断応力に対する%)	破断までの時間	Slip Step 有無
59.6%	156日後も割れず	観察されず
70.0%	115日後も割れず	観察されず
80.0%	2h 51min 後割れ	観察される
80.0% (5.5%豫歪)	47h 25min 後割れ	観察される
95.0%	78h 9min 後割れ	観察される

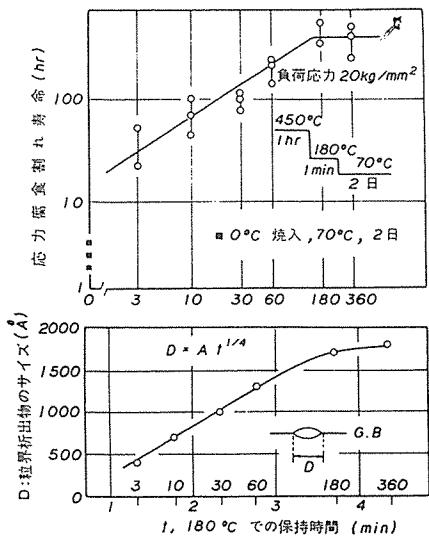


図 8 Al-4.3% Zn-1.7% Mg 合金の応力腐食割れにおよぼす粒界析出物の大きさの影響  
(宮本, 村上<sup>58</sup>)による)

中の本条件下の SCC は、静的引張荷重による slip step の発生が明確に対応し、その部分に応力集中を起こし、アンモニヤ雰囲気が作用して、表面エネルギーを低下させ、割れが伝播して破断に到ると考えられた。

**3.3 Al-Zn-Mg 系合金の SCC の定量的研究**：第 II 報で述べたように、Al-Zn-Mg 系合金の SCC は、戦前における五十嵐勇博士等による Cr, Mn の少量添加による耐 SCC 性の改善と ESD (超々ジュラルミン) の発明につながった世界的な業績であるが、其後 SCC の機構の研究も、本系合金の SCC が結晶粒界でのみ割れが発生するので、析出組織と関連して多くの研究が行われ、現在では、ほぼその全貌が解明されている（第 II 報、10.4 参照）。筆者の研究室で昭和48年（1973年）頃に行なわれた粒界構造を通して粒界析出物の影響を定量的に研究した結果<sup>59</sup>の概要を述べる。図 8 は Al-4.3%Zn-1.7%Mg 合金の多結晶試料を 180°C で一定時間保持して粒界析出物のみを成長させた後、70°C, 2 日の鋭敏化処理を行なった後、人工海水中で SCC 試験を行なった結果である。SCC 寿命は 180°C の保持時間と共に伸びており、180°C の保持時間 (t) による粒界析出物のサイズ D の変化を TEM で測定した結果、 $D = At^{1/4}$  が成立し、Speight によって理論的に導出された粒界析出物のオストワルド成長の式に一致した。また同一合金を用いて、種々の熱処理によって、粒内析出相を GP ゾーンと中間相に変化させ、又 PFZ の幅を変えて、それらの組合せて作製した種々の組織の試料に就いて SCC 試験を行なった結果、粒界析出相のサイズ (D) と寿命

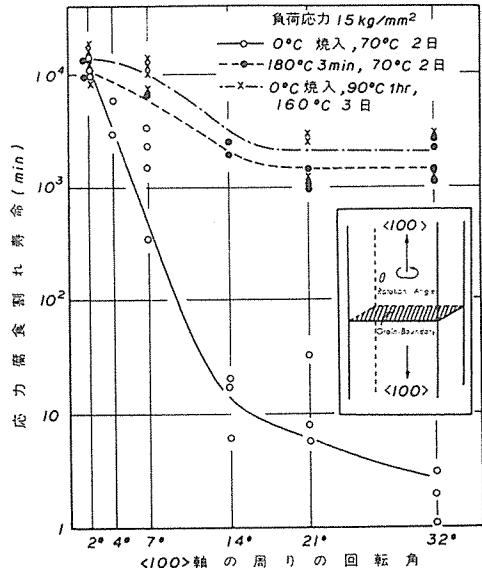


図 9 Al-5.61% Zn-1.78% Mg 合金双結晶振り粒界の回転角と熱処理と応力腐食割れ寿命との間の関係。（村上、宮本、朝日ら<sup>60</sup>による）

(L) との間に、 $\log L = k_1 D + k_2$  ( $k_1, k_2$  は定数) の関係が得られ、析出相の種類や PFZ の幅の影響は殆んど認められず、粒界析出物の大きさと分布密度が SCC に対して最も大きい効果を示すことが解明された。次に粒界構造の効果を知るために、粒界面を (100) 面とし、これに垂直な <111> 軸の周りに任意の回転角を有する振り粒界を持つ双結晶試料を調製し、SCC 寿命と回転角の関係を調べた結果<sup>59</sup>を図 9 に示す。図中に示した 3 種類の熱処理を行なったが、○印は鋭敏化処理で、粒内析出相は GP ゾーンで、この場合、回転角の影響が極めて顕著で、大きな角度で寿命が著しく短いが、7°以下の小さい角度では寿命が大きく伸びる。別に大傾角粒界に就いて、TEM 観察の結果で、●及び×印の処理は粒内析出相は夫々 GP ゾーン及び中間相であるが、粒界析出粒子は 1000 Å 程度に成長しているため、寿命が長い。以上の二つの結果から、粒界析出物が粒界構造を通して、SCC に影響を及ぼしている事が解明された。

#### 4. 微細結晶粒超塑性現象の発見から現在まで

**4.1 微細結晶粒超塑性の発見とその後の経過**：写真 4 は、C. E. Pearson が 1934 年に、Sn 43%-Bi 57% 共晶合金を室温で引張試験を行なって、1950% の全伸びを得た歴史的な写真である。この現象が本格的に研究されるようになったのは、MIT の W. A. Backofen 教授等の高温変形機構の研究の結果（1964 年）である。適当な

高温で、適当な引張速度で変形を行うと、中央部分で necking を起さずに数 100% の均一伸びが得られ、針のように細くなつて破断する現象が生じる。これを超塑性 (Superplasticity) と呼び、1970 年代になって注目されるようになった。当時筆者は Al 合金の析出現象と関連して富山大学工学部の山田正夫教授（故人）及び松木賢司助手（現教授）と Al-6%Mg 合金に Zr, Cr, Mn 等の再結晶抑制元素を添加して得られた微細結晶粒超塑性合金の共同研究を行なっていた。昭和49年（1974年）3 月中頃に、英国の Tube Investment 中央研究所の M. J. Stowell 博士が、仙台市で開催された結晶成長の国際会議に出席後、教室を訪問した。同博士は、我々と同様な手法で、Supral 100 (Al-6 Cu-0.4 Zr) 及び Supral 200 (Al-6 Cu-0.4 Zr-0.2 Mg-0.1 Ge) を開発し、製品化に成功した著名な人である。同博士との討論は筆者には極めて有意義であった。翌昭和50年（1975年）7 月には、筆

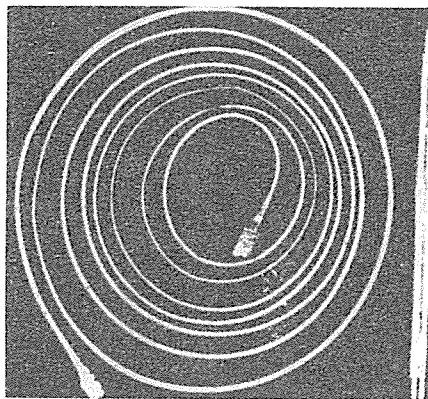


写真4 1950%の伸びを示す試料  
右側は変形前の試料 (C. E. Pearson)

者が英国の研究所に同博士を訪ね、以来親交が続いている。超塑性が起こるためには、結晶粒が数  $\mu\text{m}$  以下で、高温変形中に結晶粒成長を阻止する為に、2 相組織か微細分散粒子が存在することが必要で、変形中に結晶粒が相互に位置を変え、粒界にキャビティが出来ないようにする調整機構、即ち拡散流動、粒内辻り、粒界移動、再結晶などの何れかが働くなければならない。筆者らは調整機構に対して詳細な研究を行ない、3 篇の論文（1976年 7 月号<sup>10</sup>、1977 年 5 月号<sup>11</sup>、1979 年 11 月号<sup>12</sup>）を英国金属学会（The Institute of Metals）誌に発表した。又 Stowell 博士の推薦で、筆者は我国からは最初の同学会の編集委員会委員を委嘱された。委員は論文の査読と共に年 2 ~ 3 篇の論文投稿の義務がある。この委員は関西大学を停年退職するまで約 10 年間務め、現在の委員である平井敏雄教授（東北大金研）に引継いだ。ヨーロッパ旅行の機会を利用して、1988 年 9 月 9 日にロンドンの同学会の事務局を訪問した際、多くの著名な委員が集つて昼食会を開催して、筆者の同学会への寄与に感謝状を贈って下さった。ドイツ金属学会（現材料学会）の名誉会員に推薦されたことと共に、若い時代から多くを学んだその機関誌の編集委員を務め、感謝状を戴いたことは筆者の終生の喜びである。

**4.2 実用超塑性合金と高速超塑性 (HSRS) 合金の現状<sup>13, 20</sup>**：超塑性合金の変形応力は、 $\sigma = K \cdot \dot{\epsilon}^m$  で示される。 $m$  は歪速度感受性指数で、0.3 以上で超塑性と認定される。表 8 に実用超塑性合金の分類と諸性質を示す。実用合金では全伸びが高々数百% で十分で、成形品が得られ、健全な一般的性能が示される。超塑性合金は微細結晶粒で発現するが、Al 合金では 2 つの型に分類される。表 8 及び写真 5 に示すように 1 つは、Supral 合金のように加工熱処理法で得られる未再結晶材料が、420

表8 実用超塑性合金の分類と諸性質

超塑性発現機構による分類	合 金 名	成形温度 (°C)	流動応力 Kg/mm <sup>2</sup>	歪速度 1/s	m値	備考
微細分散粒子により結晶粒成長阻止、ITMT 处理による微細結晶組織の形成	A5083 (Mg4.5,Mn0.7,Cr0.15) Al <sub>3</sub> Zr微細分散粒子	450-530	0.1-0.3	1-5×10 <sup>-3</sup>	0.55	
	A7475 (Zn4.5,Cu1.6,Mg2.3) Al <sub>18</sub> Mg <sub>3</sub> Cr <sub>2</sub> 微細分散粒子	515+1.5	0.1-0.3	2-5×10 <sup>-4</sup>	0.73	写真 5 (右) A7475
未再結晶組織を高温で加工中に超塑性が発現	Supral (AA2004) (Cu6,Zr0.5) Al <sub>3</sub> Zr微細分散粒子	420-480		5×10 <sup>-3</sup>		写真 5 (左) Supral
α相 : β相を 1:1 にする (Ti 合金)	Ti-6Al-4V TiB242 (Al6,Sn2,Zr6,Mo2) SP-700 (Al4.4,V3,Fe2,Mo2)	890-920 900-930 750-800	0.7-1.5 0.7-1.5 0.7-1.5	2-8×10 <sup>-4</sup> 2-8×10 <sup>-4</sup> 2×10 <sup>-4</sup>	0.7 0.7	SP-700 は成形温度が低い

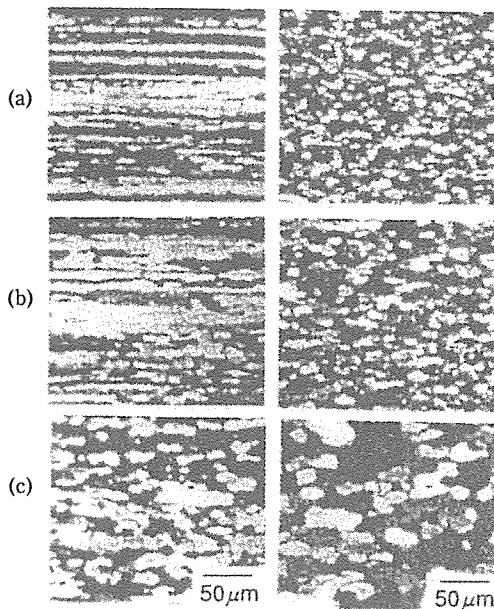


写真5 2種類の型の超塑性合金のミクロ組織  
Supral型（左）とA7475型（右）  
(a)未加工 (b)50%加工 (c)200%加工

$\sim 450^{\circ}\text{C}$ ,  $5 \times 10^{-3}\text{s}^{-1}$ で加工中に動的連続再結晶によって微細結晶粒組織が形成されるものと、他は、A7475合金のように予めITMTのような加工熱処理法で、数μm程度の結晶粒組織を形成させておくものとがある。Ti合金では、 $\alpha : \beta = 1 : 1$ の2相組織で超塑性が起る。又超塑性変形(SPF)と拡散接合(DB)を組み合せたSPF/DBが利用できる。表8に示すように、Ti-6Al-4V合金やTi6242合金が一般に用いられるが、SP700合金は合金元素の調整によって、1:1の組織形成を100°C以上も低下させ、SPF/DBも775~800°Cで可能にしたものである。

高速超塑性(HSRS,  $\dot{\epsilon} > 10^{-2}\text{s}^{-1}$ )合金が注目されている。この現象は、1981年に分散強化超微細結晶粒Ni合金で発見され、1984年にNehらがAl合金複合材料で報告している。東健司教授らは、 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 粒子強化Al-Mg-Si合金複合材料で、DSCとTEM研究から粒界液相の関与を実証した。しかし其後の多くの研究で、サブミクロンの超微細結晶粒組織で発現し、必ずしも粒界液相が必要でなく、上述の固相の調整機構で説明ができる、粒界液相は付随機構であると決着している。現在サブミクロン組織は、急速凝固法やMA法等で作ったPMルートによって調製され、Al-12%Si合金や粒子分散複合材料等で研究されている。

**4.3 超塑性成形法の動向<sup>19)</sup>**：現在は一般にガスプロセス法が用いられる。写真6に一例を示す。下方の直管を雌型に入れ、加熱下で $\text{CO}_2$ や空気のガス圧を時間の経

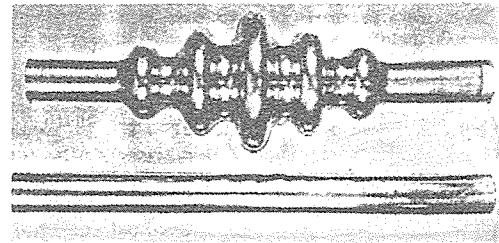


写真6 超塑性変形法の一例、下方は変形前の直管、上方は超塑性変形したコルゲート管 (Al-Naib and Duneanによる)

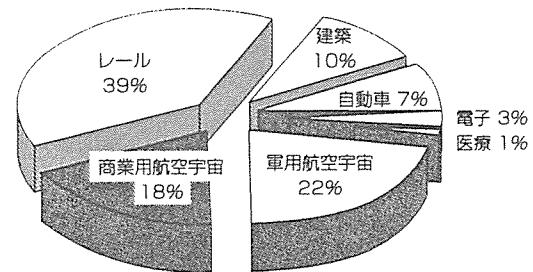


図10 超塑性加工されたアルミニウム部品の主要市場部門

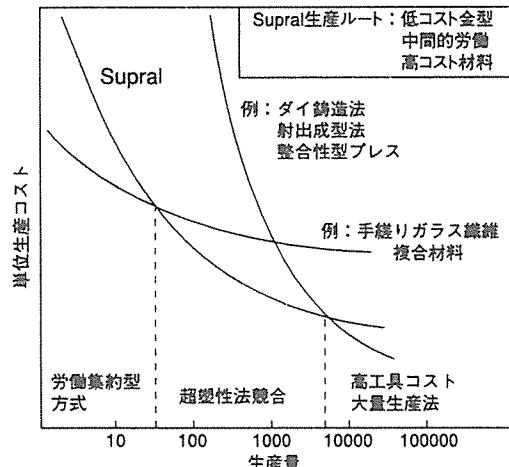


図11 超塑性合金の経済生産可能な部品数  
(1973年, Tube Investments Group)

過に対しても制御して静水圧を加えると、上方のコルゲート管が単一操作で製造ができる、雌型のこまかい部分の形状が実現される。一方HSRS合金に対して、現在の方法を用いるならば、キャビティに閉じ込めたガスの排出を短時間に行わねばならない等全く新しい考え方が必要になるだろう。また超塑性付与プロセスと成形プロセスを連続させ、多数の製品を高速で製造できる方法が必要

になり、卓抜なアイデアが求められる。

**4.4 マーケットとその潜在力<sup>19)</sup>**：超塑性合金の市場は、現在 Ti と Al 合金に開かれている。Ti 合金は低比重、高温強度及び耐食性に優れている上に、超塑性板は通常の熱処理で製造可能で、SPF/DB も利用し得るので、航空宇宙分野で市場は確立しているが、高価格の為に一般の使用は少ない。図10<sup>19)</sup>に Al 超塑性部品の市場部門別%を示す。航空宇宙部門で高い%を示している。しかし Al では図11<sup>19)</sup>に、Supral の例で示すように、その生産ルートは、金型の低成本、中間的労働及び高価格材料の組合せになるので、生産数量が 50~10,000 個の範囲で、図中に示した他の生産プロセッシングよりも単位生産コストが低く有利になる。自動車分野でもし環境対策上の軽量化で Al 部品の使用が多くなり、又 HSRS 合金の開発と成形法の革新が進み、成形費の低下が、割増しを必要とする材料費の上昇部分を補なうことが出来れば、この分野が超塑性材料に対して大きな市場なることも考えられるが、そのためには上述の幾つかのハードルがある。

## 5. 繊維強化金属複合材料（MMC）の研究の初期と研究開発の現状

**5.1 筆者の MMC との係り**：筆者は、昭和46年(1971年)3月20日に、A. Kelly 博士著 "Strong Solids"<sup>21)</sup>の訳書、"複合材料－強靭化の理論と応用"<sup>22)</sup>を、丸善㈱から発刊した。図12に、Kelly 博士のサインのある原著

の表紙（1982年11月4日の日付があるが、拙宅に来た時）と訳者序の初めの部分を示す。当時は MMC が研究対象として注目され始めた頃で、原著書が MMC の基礎を理解する上に極めて有用であること、又筆者の勉強にも有益と考えたのが翻訳の動機である。訳者序に書いてあるように、特に感銘を受けたのは、ウイスカー強化 MMC の基礎が明確に示されていることであった。しかし、30数年経過した現在もこのような実用材料は開発されていないことを残念に思っている。次節にその要点を述べる。

**5.2 ウイスカー強化 MMC の基礎<sup>23)</sup>**：今図13に示すように、長さ  $l$  の 1 本のウイスカーが、連続媒体中に埋っていて、纖維への応力伝達は界面を通じてのみ起こり、両端を通じての伝達ではないと假定して、さらに纖維の変形が弾性的で、生地のそれが塑性的な場合に簡単な計算を行うと、外部荷重  $P$  が負荷された場合に、纖維中に生じる引張応力  $\sigma$  及び界面の剪断応力  $\tau$  は、纖維端からの距離の関数として、図14のように示される。纖維が或一定の臨界長さ  $l_c$  を持つ場合には、纖維の一端からの長さ  $l_c/2$  の所で、纖維中の応力は、その破断応力  $\sigma_f$  の値に等しくなる。即ち纖維が有効な働きをする為には、少なくとも臨界長さを持つ必要がある。さらに簡単な計算によって、 $\sigma = (2\tau_y x)/r_0$  が得られる。ここで、 $\tau_y$ ：生地の剪断降伏応力、 $r_0$ ：纖維半径である。生地中の引張応力が破壊応力  $\sigma_f$  に達した時、 $\sigma = \sigma_f$  で纖維が破断する。この時の長さは  $l_c$  であるので、 $x = l_c/2$  とすれば、

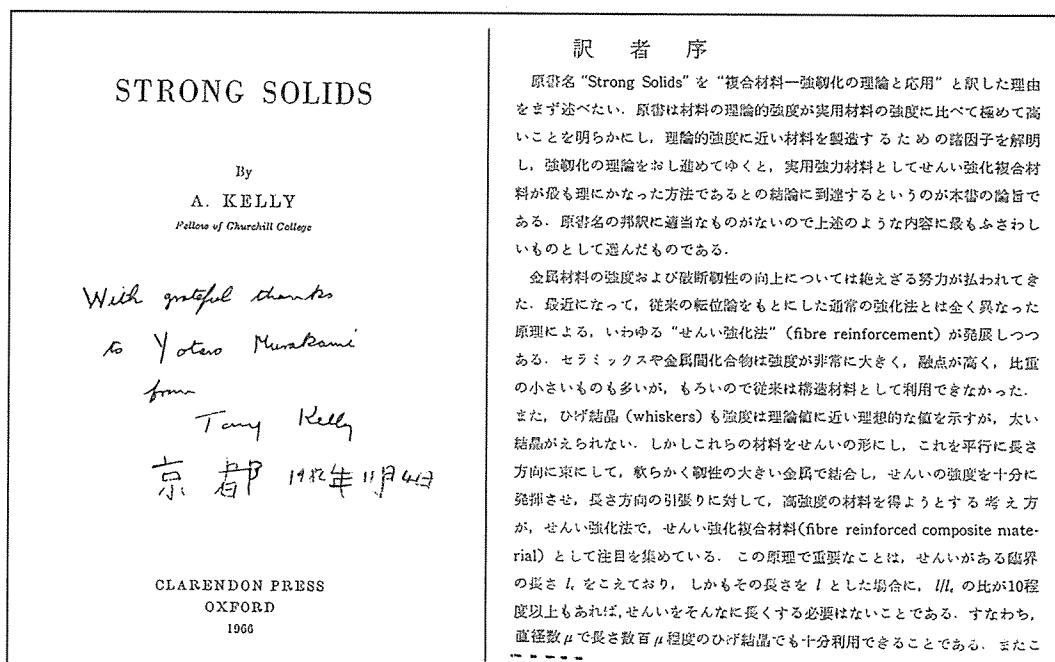


図12 Kelly のサインのある著書 "Strong Solids" の表紙と筆者の訳者序

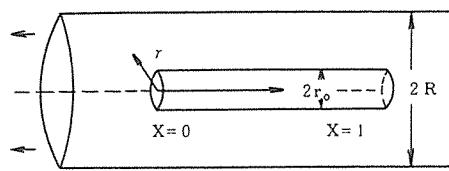


図13 長さ $l$ , 半径 $r_0$ の不連続纖維がマトリックスに埋まっている図

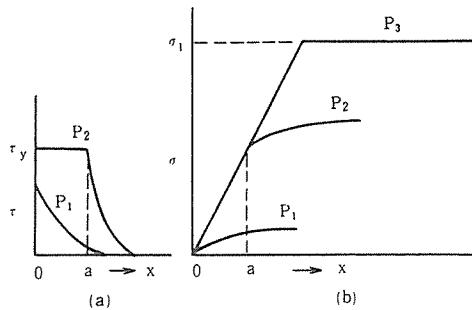


図14 (a) 繊維とマトリックスの界面におけるせん断応力の繊維の一端からの距離 $x$ に関する変化  
(b) 繊維中の引張応力の、繊維の一端からの距離 $x$ に関する変化

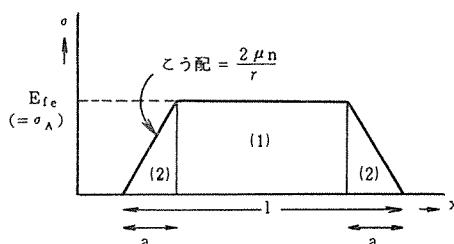


図15 長さ $l$ の繊維に副うての応力の変化

臨界アスペクト比 $l_c/d$ は、 $l_c/d = \sigma_f/2\tau_y$ で示される。短い繊維の場合、図15に示すように応力は繊維の両先端から増加していく為、 $\sigma_f$ の代りに $\bar{\sigma}$ を用いる必要がある。図15を用いて、 $\bar{\sigma} = [\int_0^l \sigma dx]/l = (1/l) \{ \text{面積 (1)} + \text{面積 (2)} \times 2 \} = (1/l) [(l - l_c) \times E_f e + ((l_c E_f e)/4) \times 2] = [(l - (l_c/2)) \sigma_f]/l \therefore \bar{\sigma} = \sigma_f [l - (l_c/2)]$ が得られる。したがってMMCの $\sigma_c$ は、 $\sigma_c = \bar{\sigma} V_f + \sigma_M (1 - V_f)$ で示される。図16はCu/W複合材料の強度と容積率 $V_f$ との関係を示す。 $\alpha = \infty$ は連続繊維、 $\alpha = 5$ は短繊維の長さ $l$ が $l_c$ の5倍の場合で、黒丸印は短繊維の実験値で、 $\alpha = 5$ 程度あれば、連続繊維と同様な複合則で計算して得られる破断強度が示されることが判る。このことは $\text{Al}_2\text{O}_3$ のウイスカーを用いて実証されている。比較的長く成長

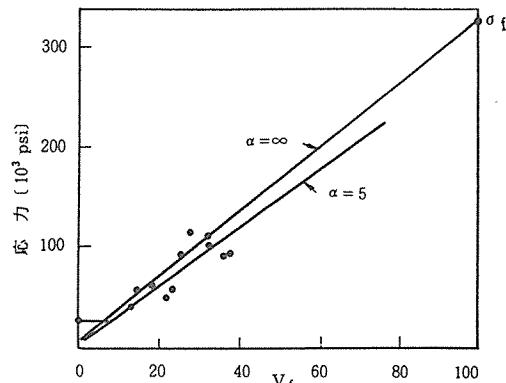


図16 直径0.005インチの連続および不連続タングステン線で強化した複合材料の最大引張応力の、容積率 $V_f$ の関数としての変化、実験点は不連続線を用いて作った複合材料に対するもののみが示してある。 $\alpha = \infty$ は連続線に対する実験的に求めた曲線である。 $\alpha = 5$ は最小二乗法によって実験点から求めた直線である。

させた $\text{Al}_2\text{O}_3$ ウイスカーの表面に白金の蒸着膜を作り、Ag粉末中にピンセットで丹念に一方向に整列させ、PM法で調製したMMCは、 $V_f = 40\%$ 、アスペクト比300（繊維の直径 $1\sim15\mu\text{m}$ ）の場合、室温の引張強度 $540\text{kgf/mm}^2$ 、Agの融点近傍でも $350\text{kgf/mm}^2$ の高い強度がえられることが発表されている。

**5.3 MMCの界面の基礎的研究<sup>23, 24</sup>**：京都大学在職中と関西大学に移った後も、多くの方々と界面の問題を中心で研究を進めた。その中で、ミクロ的なクラック伝播の条件と繊維の引張強さとの関係を明らかにする為に、図17に示すような1本の繊維とそれを取りまく脆性層（以下第2層と呼ぶ）からなる単繊維複合体の変形・破壊挙動を理論的並びに実験的に明らかにした研究を述べる。このことは、有用な強化材料である炭素繊維はAl溶湯に濡れないので種々の方法が考えられているが、その界面の問題が製造上最も重要であるからである。このモデル複合体では第2層が早期に破壊すると、繊維に円周切り欠きを導入したと同じ効果を生じ、これが複合体の強度を低下させることになる。しかし界面接着が弱く、界面で剥離が起ると、切り欠きは鈍化されることになり強度の低下は起らない。これらの定量的な導出を行なったが、ここでは要点のみを述べ、W<sub>b</sub>/Ni複合体で実証した結果を述べる。

図17に示すように、単繊維複合体の半径 $b$ 、繊維半径を $a$ 、第2層の厚さを $c$ （ $= b - a$ ）、第2層の破壊面を $z = 0$ とし、複合体及び繊維のヤング率をそれぞれ、 $E_0$ 、 $E_f$ 、繊維の容積率を $V_f$ とすると、 $z = 0$ における第2層

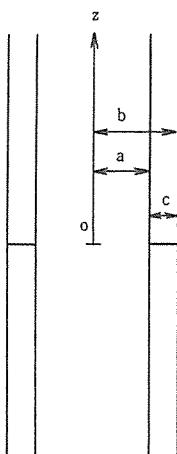


図17 単纖維モデル複合体

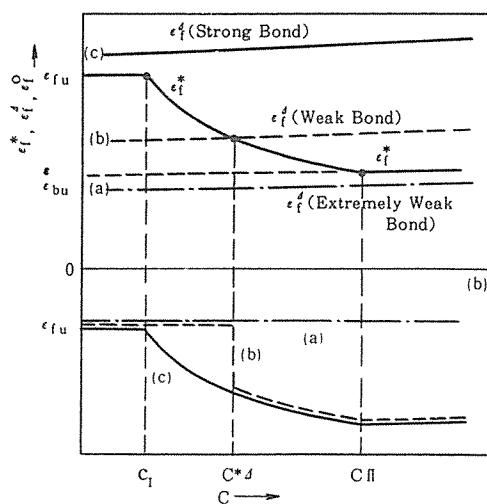


図18 種々の界面接着強さの場合における纖維の破断歪と第2層厚さの関係の図式表示

破壊直後の纖維の歪  $\varepsilon_f^0$  は、 $\varepsilon_f^0 = \varepsilon_{bu} E_c / E_f V_f$  で与えられる。またノッチが伸長する時点での  $z=0$  における纖維の歪  $\varepsilon_f^*$  は、 $\varepsilon_f^* = 1/F(a/b)\sqrt{G_c^*/E_f\pi c}$  で与えられる。さらに界面剥離が起る時の歪  $\varepsilon_f^\Delta$  は、 $\varepsilon_f^\Delta = 2E_c\tau^\Delta/aE_bV_b\sqrt{\beta}$ 、 $\beta = 2G_bE_c/E_fE_bV_b\ln(b/a)$  で与えられ、 $\tau^\Delta$  は界面剪断剥離強さを示す。ノッチが何時形成されて伸長するか、何時界面が剥離するか、また各反応層の厚さにおける複合体の強さ  $\sigma_c$  がどのような値になるか等は、図18から読みとることができる。界面接着が強い場合の複合体の強度と第2層厚さとの関係を図19に示す。これは  $\varepsilon_f^\Delta$  が  $\varepsilon_f^*$  及び  $\varepsilon_{fu}$  よりも常に大きい場合に相当する。この図で、 $c_1$  は第2層がこれ以下の厚さであれば、纖維の強さの低下が起こらない臨界値で、許容厚さとして、実用上複合

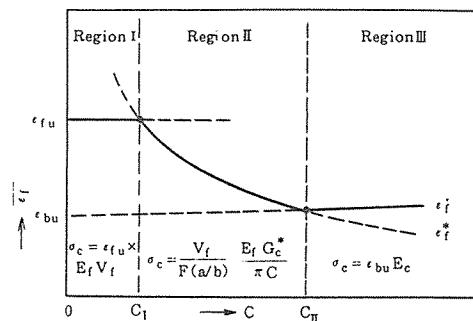
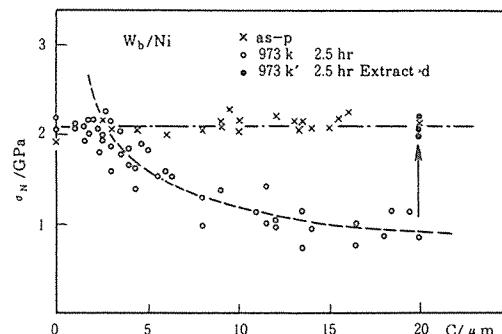


図19 界面接着強さの強い場合の纖維の破断歪と第2層厚さとの関係

図20 W<sub>b</sub>/Ni 単纖維複合体の Ni 脆性層厚さ C の関数としての纖維の引張強さ  $\sigma_{fu}$  の実測値（界面接着強さの強い場合）

材料の調製に重要な値で、 $\varepsilon_f^* = \varepsilon_{fu}$  を解くことで得られる。以上のモデルを実証するために、高温焼鈍によって脆化させたタンクステン線、W<sub>b</sub>に無電解 Ni めっきを施し、このめっき層は脆性を示すので第2層とし、界面接着の弱い電着のまま（×印）と、973 K × 2.5 h の焼鈍で界面接着を強くした場合（○印）の  $\sigma_{fu}$  と  $c$  との関係を実験的に求めた結果を図20に示す。×印は図18の（a）の場合に相当し、 $\sigma_{fu}$  は 3 μm まではほぼ一定で、 $c > 3$  μm では低下している。この低下は第2層（この場合は Ni めっき層）が早期破断をするため、形成されるノッチが伸長することが次の実験で実証できる。（i） $c = 20$  μm の界面接着力の強い試料から第2層を溶解して除去し、取り出した纖維を引張試験をすると、その強さは図20の○印のように矢印の方向に纖維固有の強さに回復する。（ii）破面観察では、強さが低下しなかった接着力の弱い場合は写真7の（a）のように第2層と纖維破断面は一致せずに、纖維は pull out を示したが、強さの低下が起った接着力の強い場合は、写真7の（b）及び（c）のように、界面剥離は生ぜず第2層と纖維の破断面は同一で、ノッチが伸長したことを示している。なお図20中

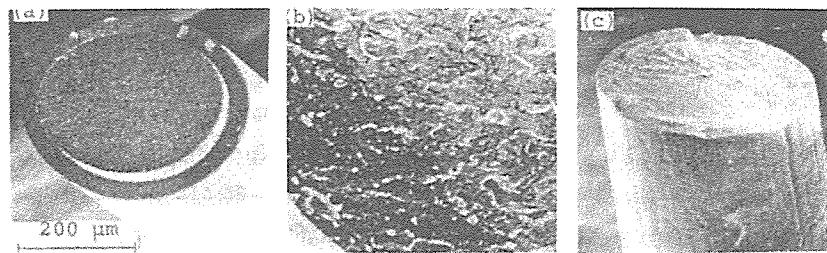


写真7 Wb/Ni 試料の破断面, (a) めっきのまま, 界面接着力の弱い場合, (b) および (c) 973 K × 2.5 br 焼鈍で, 界面接着力を強くした場合

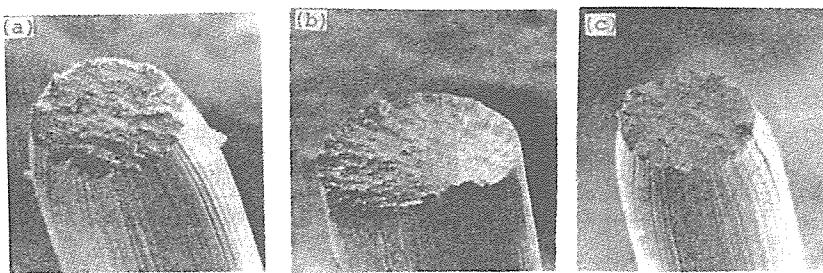


写真8 Wd/Ni 試料の破断面, (a) 市販の延性タンクステン線の破断面, ネッキング, (b) Wd/Ni 試料で焼鈍によって界面接着力を強くした場合, 脆性破断, (c) 脆性 Ni 層を除去した場合, 再びネッキングが生じる。

の破線はこの理論で求めた理論曲線である。また写真8の(a)は市販の延性W線(W<sub>d</sub>)の破断面のSEM写真で、ネッキングが生じていて、延性破断の様相を示している。この延性W<sub>d</sub>にc<sub>t</sub>以上の厚さの無電解Niめっき層を付け、前と同様に接着力を上げる熱処理をした試料を引張破断させると、(b)のように脆性破断面を示すが、Niめっき層を除去した繊維を引張ると(c)のように再びネッキング破断を示した。

**5.4 MMC の研究開発と応用の現状**: MMC は常に未来材料と言いつけられてきたが、不連続繊維強化Al(Discontinuously Reinforced Aluminium, DRA)を初め、宇宙航空用のTi MMC、その他で、技術的、経済的な成功を収め、実用の基盤が確立してきた。以下に応用の現状を述べる。

(イ) DRA の応用の現状<sup>25)</sup>: 表9にDRAの分類、製造法と特徴及び主な応用分野を示す。製造法によって三大別される。すなわち、粉末冶金法、液体金属攪拌鋳造法及び液体金属溶浸法で、それぞれによって、製品の品質と価格が異なり、用途も違ってくる。粉末冶金法は、ウイスカー、粒子の強化材を混合、加圧、焼結してビレットを製造するもので、最も広く用いられる。緻密化処理では脱ガスとAl表面酸化物被膜を破壊することが必要で、真空ホットプレス、HIP、液相焼結等が行われる。V<sub>f</sub>が自由に変えられ、70%の高いV<sub>f</sub>での強化が可能で、

更に塑性加工で強化材の三次元的な均一分布が可能になる。表10にコネクティング用P/M材の比剛性、比疲労強度(強度を比重で割った値)を他の候補材料と比較して示す。現在米国のBig Threeが自動車用に国立研究機関、大学等と共同開発している。液体金属攪拌法では、Duralcan(商品名)が有名で、Alcan社で、Al及びその合金浴湯中に低V<sub>f</sub>のSiC粒子を複合して鋳塊を製造する特殊な方法が確立されている。液体金属溶浸法は、30%の低いV<sub>f</sub>から70%までの高V<sub>f</sub>までのプリフォームを製造し、これに高圧铸造法で浴湯を溶浸させる。トヨタ自動車のピストンの頭部の強化が好例である。

(ロ) 航空機エンジン用MMCの研究開発<sup>26)</sup>: 航空エンジン用材料に対する要求は最も苛酷で、一層の軽量化、効率の増大が必要で、さらに妥当な価格が求められるが、Al及びTiのMMCが最も可能性が高い。現在ロールス・ロイスでガスターインのエンジンの約150°Cを越えないコンプレッサーの前方部分にTi合金の代替として考えられているのはSiC粒子(<~12μm)強化のDRAで、重量軽減に有効である。エンジン用のTi MMCはTi合金をSiC連続単繊維(直径約140μm)で強化したもので、DRAよりも剛性、強度の増大と高耐熱性が得られる。主な製造法は図21に示した3通りがある。マトリックス被覆繊維法は米国の3Mと英国のDERAで開発が進められている。図21の三段目に示す

表9 不連続強化アルミニウム (DRA) の分類と特徴及び応用

分類	製造法と特徴	主な応用とその要点
粉末冶金法 Powder Metallurgy (P/M)	セラミックスライスカー、一粒子を P/M 法で混合、焼結 塑性加工が可能、性能の Tailoring が可能	1) 航空機用 fan exit guide vane : 強度、剛性。損傷許容 2) 電子パッケージ用 : 軽量、熱伝導性良、低CTE 3) 自動車用コネクティング : 高サイクル疲労 (稍高溫)、直接鍛造、低価格 4) ビレット経由せず直接鍛造 : 黒間プレス、液相焼結 near net shape 製品
液体金属搅拌 铸造法 Liquid Metal Stir Casting	溶湯中に強化材を添加、搅拌、混合 (Duralcan 法、INCOプロセス) 高V合金の製造可能 net shape 製品の铸造可能	1) 自動車用ブレーキローター、ドラム : Duralcanによる net shape 鑄造 2) トランク用ドライブシャフト、 : Al-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ビレット タイヤ、スッタード より押出、鍛造 3) 耐摩耗、磨耗材 : INCOプロセス (Ni coating SiC or Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> を混合) 4) in situ processed Al-TiB <sub>2</sub> MMC : 低価格
液体金属 浸漬法 Liquid Metal Infiltration	強化材の preform を作り高压铸造法で 溶湯を溶漬させる 高 Vf 合金の製造可能 製品の部分強化可能	1) GaAs, Si, or Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> との CTE のマッチング : 電子材料 2) Toyota Piston の部分強化

表10 コネクティング用材料の比剛性と比疲労強度

材 料	比剛性 ( $\times 10^7$ mm)	比疲労強度 ( $\times 10^6$ mm)
2080/SiC/15p(P/M)	3.5	7.6
6061/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /20p(铸造)	3.5	3.8
6061	2.6	4.0
1040鋼	2.6	3.0
Ti-6Al-4V	2.5	7.0
ダクタイル鉄	2.2	7.0

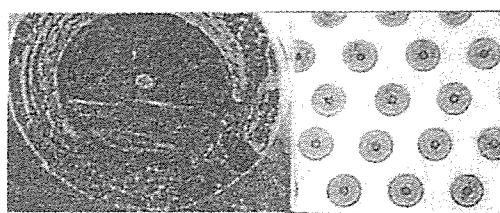
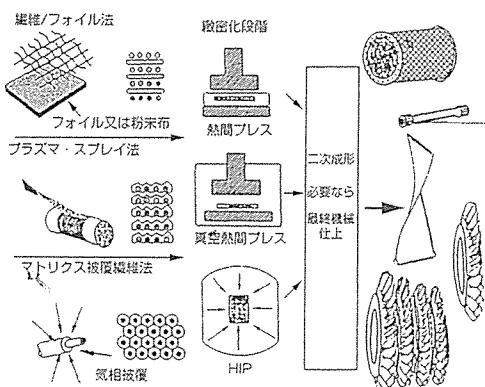
図22 左、マトリックス合金でコートしたSiC モノフィラメント、 $\times 300$ ；右、Ti MMC 中の SiC せんいの分布、 $\times 45$ 

図21 Ti-MMC の製造ルート

よう、単纖維上に電子ビーム PVD でマトリックスになる Ti 合金を被覆したプリワイヤ (図22の左) を HIP で成型する。纖維は図22の右に示すように規則正しく分散している。この方法は円形部品の製造に好適で、被覆と成型の両プロセスが自動化できて、コスト低下、プロセス制御、モニタリングに有利である。使用可能な温度はマトリックス合金によって左右され、Ti-6 Al-4 V ( $\alpha + \beta$ ) 合金では約 350°C であるが、Ti-6 Al-2 Sn-4 Zr-2 Mo

(near  $\alpha$ ) 合金では、500~550°C にも上昇できるので、コンプレッサー領域のブレード、ペイン、鋸物、ディスクへの利用が期待できる。現在、高压コンプレッサーの後端では、ディスクは Ni 基超合金が指定されているが、TiAl 金属間化合物 MMC が開発できれば、これで代替できる。DRA も Ti MMC もコストは量産とプロセスの自動化によって低下が可能になる。

## 6. おわりに

本年の夏は異常に暑かった。約束した第3報を締切の9月中旬以前に書き上げることができて、ホッとしている。引受けた時、若し途中で書けなくなったらという不安もないではなかったが、無事で有難く思っている。筆者は本年の4月7日で、数え年で88才、米寿になった。未だ活力が残っていることが実感できて、至極幸福である。又、6月12日には、京都大学と関西大学での筆者の研究室出身の皆さんと、極く親しくさせて頂いている方々が、新・都ホテルで、盛大な米寿祝賀会を開催して下さった。心から感謝している。

本報では、4項目について、古い時代と現在を書いた。

金属学の学問と研究手法、機器の発展には驚く外はない。この他に、半導体化合物の開発の初期の研究、鋳鉄の黒鉛の球状化機構、スプラット急冷 Al 合金のメスバウラー効果、非晶質合金の結晶化の X 線的研究等の研究機器が漸く発達し始めた時代の研究にも想いは盡きないが紙面の都合で割愛した。最後に、ここに書いた研究に盡力して下さった方々に心からの感謝を捧げる。

又 3 報文の水曜会誌の編集に関係された諸先生にお礼を申し上げたい。

### 参考文献

- 1) 村上陽太郎：金属学とその研究手法の進歩－研究生活を顧みて [I]. 水曜会誌, 23, [5], 451～460, (2002) 12月.
- 2) 村上陽太郎：同上 [II], 同上, 23, [6], 600～615, (2004), 1月.
- 3) 村上陽太郎：平衡状態図の研究について, 日本金属学会会報, 1, [10], 642, (1962).
- 4) 金属チタンとその応用, 草道英武, 村上陽太郎, 木村啓造, 和泉修編, 日刊工業新聞社, 昭和58年12月16日, 42.
- 5) 村上陽太郎, 圓城敏男 : Ti-Fe-Mn 3 元合金平衡状態図研究 (第 1 報/), 日本金属学会誌, 22, [5], (1958).
- 6) 村上陽太郎, 湯川安雄, 圓城敏男 : Ti-Fe-Mn 3 元合金状態図の液相面について (第 2 報), 同上.
- 7) 村上陽太郎, 圓城敏男 : 同上 (第 3 報), 同, (6), 同.
- 8) 村上陽太郎, 木村啓造, 西村義雄 : Ti-Fe-C 三元素平衡状態図の研究, 同上, 21[11, 12], (1957).
- 9) Y. Murakami, O. Izumi and T. Nishimura: Phase Transformation and Heat Treatment in Ti Alloys, Titanium Science and Technology, Proc. of the 5th International Conf. on Titanium, Sep. 10～14, Munich, 1984, 1403～1422.
- 10) 村上陽太郎 : チタン合金の相変態と熱処理, 鉄と鋼, 73, [3], (1987), 420～426.
- 11) 新倉正和 : 最近の新チタン合金開発と今後の動向, 日本チタン協会50周年記念誌, (2002), (社)日本チタン協会, 101～104.
- 12) 森永卓一 : 銅及び銅合金 : 昭和29年 1月 15日, 共立出版(株), 81, 88.
- 13) 高力黄銅棒の応力腐食割れ共同研究 : 伸銅技術研究会誌, 4, [1], 1965, 91～125.
- 14) 村上陽太郎, 猪飼靖 : 黄銅の応力腐食割れに関する基礎的研究, 伸銅技術研究会誌, 6, [1], 1967, 102～108.
- 15) T. Asahi, F. Yabasaki, K. Osamura and Y. Murakami: Studies on microstructure and stress-corrosion cracking behaviour, Proc. of 6. Internationale Leichtmetalltagung, Leoben-Wien, 1975, 64～67.
- 16) K. Matsuki, T. Uetani, M. Yamada and Y. Murakami: Superplasticity in an Al-6 wt.-%Mg alloy, Metal Science, July 1976, 235～242.
- 17) K. Matsuki, H. Morita, M. Yamada and Y. Murakami: Relative motion of grains during superplastic flow in an Al-9Zn-7 wt. %Mg alloy, ibid., May 1977, 156～163.
- 18) K. Matsuki, K. Minami, M. Tokizawa and Y. Murakami, Superplastic behaviour in nominally single-phase and two-phase Al-Cu alloys, ibid., November 1979, 619～626.
- 19) R. Grims: Superplastic forming: evolution from metallurgical curiosity to major manufacturing tool ?, Mat. Sci. and Tech., 19, [1], 2003, 3～10.
- 20) 軽金属特集号, 實用化が期待される超塑性材料・成形, 49, [8], 1999, 掲載されている多くの論文.
- 21) A. Kelly: Strong Solids, Clarendon Press, Oxford, 1966.
- 22) A. Kelly 著 Strong Solids 訳, 村上陽太郎 : 複合材料 - 強靭化の理論と応用, 丸善(株), 昭和46年3月20日発行.
- 23) S. Ochiai and Y. Murakami: Tensile strength of composites with brittle reaction zones at interfaces, J. Mat. Sci., 14, 1979, 831～840.
- 24) S. Ochiai, S. Urakawa, K. Ameyama and Y. Murakami, Experiments on Fracture Behavior of Single Fiber-Brittle Zone Model Composites, Met. Trans. A, 11A, (3), 1980, 526～530.
- 25) W. H. Hunt: Aluminum Metal Matrix Composites Today, Mat. Sci. Forum, 331～337, (2000), 71～84.
- 26) J. A. Hocker and P. J. Doorbar: Metal matrix composites for aeroengines, Mat. Sci. and Tech., 16, [7, 8], 2000, 725～731.

## 談話室

## 自己集積化分子膜

杉村博之\*

Self-Assembled Molecular Films

by Hiroyuki SUGIMURA

## はじめに

材料工学専攻材料機能学講座担任教授として、平成15年12月1日付で着任いたしました。これまで一貫して薄膜および表面に関する研究開発に従事していましたが、最近では、有機分子の自己集積化による薄膜形成とそのマイクロ／ナノ微細加工に重心を置いて研究を進めています。本稿では、着任のご挨拶を兼ねて、前任地（名古屋大学大学院工学研究科材料プロセス工学専攻）から続いている研究テーマについてご紹介させていただきます。

## 自己集積化分子膜

原子・分子・微粒子などの微小要素が自発的に集合し、規則的な配列を形作る自己組織化／自己集積化現象は、微小要素を集積化して材料を構築するボトムアップ型材料ナノテクノロジーの鍵を握っている。自己集積化を利用した材料プロセスのひとつに、有機分子の自己集積化による単層膜／多層膜形成があり、膜厚／層厚が分子レベルの超薄膜を作製するプロセス原理として注目されている<sup>1)</sup>。

ある種の有機分子が固体表面への特異な吸着現象を示すことは古くから知られていたが、近年の表面分析技術の進歩によって、吸着の過程で吸着分子同士の相互作用によって、自発的に集合体を形成し、吸着分子が緻密に集合しかつ配向が揃った分子膜が形成される場合があることが明らかになってきた。吸着分子層が一層の場合、すなわち単分子膜が形成された場合には、Self-Assembled Monolayer, SAM と名付けられている。日本語では、自己集積化单分子膜あるいは自己組織化单分子膜と呼ばれる場合が多い。完成した单分子膜の分子配列構造の観点から見れば自己組織化という表現が、分子が集合していくプロセスを中心に考えれば自己集積化という言葉が当てはまる。

SAM の形成過程を、図1に模式的に示す。SAM 構成原料である反応活性分子の溶液中に基板を浸漬すると、基板表面に到達した分子が基板と化学反応し表面に吸着する。基板と分子が反応することが吸着の必要条件であるため、反応性官能基が基板表面を向いた方向で固定化される。自己集積化する分子の多くは、長鎖アルキル基やベンゼン核を有しており、隣接する吸着分子のアルキル基鎖同士にはファンデアワールス力や疎水性相互作用が、ベンゼン核同士にはπ電子相互作用が働く。その結果、吸着分子が集合した方が熱力学的に安定になるため、分子が密に集合した单分子膜が形成される。

SAM の成長は、有機分子と基板との間の特異的な化学反応に依存するため、SAM を形成するには、基板と分子との組合せが重要となる。以下に、我々が研究を進めている2つの例を紹介する。

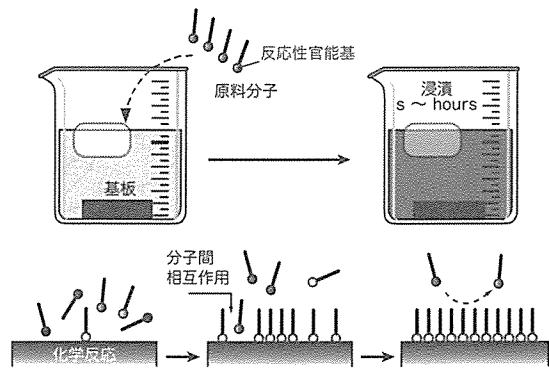


図1 Self-Assembled Monolayer の形成

### 有機シラン SAM

シリコン原子に4つの官能基がついた分子,  $\text{SiX}_4$ , をシランと言う。この4つの官能基のうち、少なくとも一つが有機分子基で置換された分子,  $\text{SiR}_n\text{X}_{4-n}$ , は有機シランと呼ばれる。有機シラン分子で酸化物の表面を処理すると、酸化物表面の水酸基と反応し、酸化物表面に有機シラン分子が共有結合によって固定化される。この反応は、シランカップリング処理として無機材料表面に有機被覆を施すために実用的に用いられてきた。反応条件を整えることによって、有機シラン被覆を単分子被膜に、すなわち SAM にすることができる。

ここでは、図2Aに示す3種類の有機シラン分子から、気相法によって SAM を作製した実験結果を示す<sup>2,3)</sup>。左から順に、炭素数18の長鎖アルキル基を有する n-octadecyltrimethoxysilane を原料分子とするアルキルシラン SAM (ここでは ODS と省略)、炭素数10のフッ化アルキル基を有する heptadecafluoro-1, 1, 2, 2-tetrahydro-decyl-1-trimethoxysilane を原料分子とするフッ化アルキルシラン SAM (ここでは FAS と省略)、アミノ基末端を有する n-(6-aminohexyl) aminopropyltrimethoxysilane を原料分子とするアミノシラン SAM (ここでは AHAPS と省略) である。図2Bは、各処理

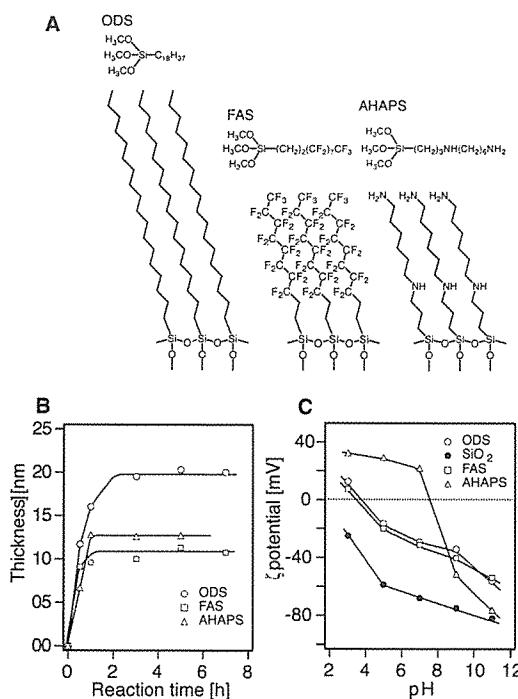


図2 有機シラン系 SAM. A) 原料分子と対応する SAM の分子構造, B) 成長時間と膜厚, C) SAM 被覆酸化シリコンのゼータ電位

時間での SAM の膜厚を示す。図2B からわかるように、時間とともに膜厚は増加し、最終的に一定となる。この段階でこれ以上有機シラン分子が吸着する余地が無くなり、SAM 被覆が完了したものと考えられる。それぞれの SAM の膜厚は原料分子の長さに対応しており、分子が長い方が膜厚が大きい。

図2Cは、HClあるいはKOHでpH調整した1mM-KCl水溶液中での、SAM 被覆基板のゼータ電位の pH 依存性を示す。●で示したのは、SAM 被覆前の基板(酸化シリコン被覆シリコン基板)のゼータ電位である。グラフを外挿すると、等電点は pH 1~2 にある。この値は、酸化シリコン粒子の等電点の値と一致する。ODS および FAS で被覆すると、ゼータ電位カーブは高 pH 側にシフトする。等電点の値は、どちらもおよそ pH 3 の位置にある。ODS および FAS 被覆基板のゼータ電位挙動は、同様な化学組成を有する高分子材料であるポリエチレン,  $-(\text{CH}_2-\text{CH}_2)_n-$ , およびポリ4フッ化エチレン,  $-(\text{CF}_2-\text{CF}_2)_n-$ , のゼータ電位挙動とほぼ同じである。SAM 被覆によってこれらの高分子材料と同じ化学的性質を無機酸化物表面に付与できることを示している。AHAPS で被覆すると、塩基性であるアミノ基で終端化され、ゼータ電位カーブはさらに高 pH 側にシフトし、等電点は pH 8 となる。有機シラン SAM の膜厚は、図2Aに示すように高々 1~2 nm である。しかし、分子が自己集積化効果によって密に配列化しているため、このような超薄膜であっても基板を環境から遮蔽する効果が高く、基板の酸化シリコンが溶液に対して露出していないことを、この結果は示している。

SAM 形成は、単分子膜が完成した時点で膜成長が自動的に止まる、自己停止型のプロセスであり、膜厚 1~2 nm という分子レベルの超薄膜を形成するのに、精密なプロセス管理による膜厚制御を必要としない。SAM の膜厚は分子の長さと傾きで決まり、分子の長さを変えることで、正確に膜厚を制御することができる。アルキル鎖のメチレンユニット ( $-\text{CH}_2-$ ) の数がひとつ増減すると、約 0.2 nm 膜厚が変化する。また、単分子膜で覆われた基板の最表面は、吸着分子の反応末端とは対末端側にある官能基で終端化される。分子種を選ぶことで、末端官能基に特有な化学的・物理的特性が表面に付与される。吸着分子が侵入できるすき間があれば、どこにでも被覆が可能であり、細孔の内壁や凹凸形状のある表面などにも、その形状に沿って单分子膜を形成することができる。

### シリコン-有機分子化学接合

半導体表面に SAM を形成することにより、有機分子と半導体が融合した新しい電子機能を生み出すための足

がかりを得ることができる。シリコン表面への SAM 被覆は、前述したシランカップリング法を用いることで可能であるが、この場合にはシリコン表面に酸化膜が存在することが必須となる。有機シラン分子をシリコン基板に固定化するためには、自然酸化膜程度、少なくとも、厚さ 1~2 nm の酸化膜でシリコン基板を被覆する必要がある。周知の通りシリコン酸化膜は優れた絶縁体であり、SAM とシリコンの間に絶縁体が挿入されているという限定された形態でしか、有機分子の電子的な機能を利用できないことになる。

酸化膜を介さずに、シリコン表面に直接 SAM を形成するには、ラジカル反応によりシリコン-炭素結合を形成し、有機分子をシリコンに接合するのが、最も基本的なプロセスである<sup>4)</sup>。反応開始剤の投入、加熱、光照射等の手法を用い、水素終端化シリコン表面から水素原子を引き抜き、シリコンラジカルを生成する。シリコンラジカルと 1-アルケンが反応する場合は(図 3A)，まず、シリコンラジカルと C=C 2重結合が反応し、Si-C 結合によって有機分子がシリコンに接合される。同時にできる炭素ラジカルが、近隣の SiH 基から水素を引き抜く

ことで、再びシリコンラジカルが生成し、連鎖反応が進む。

二重結合含有分子と水素終端化シリコンが反応すると、シリコンと有機分子接合部の分子構造は、 $\equiv\text{Si}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$ となる。完成した SAM はすべて  $\sigma$ 結合で構成されており、本質的には電気絶縁性である。三重結合含有分子と水素終端化シリコンとを反応させれば、シリコンと有機分子接合部の分子構造は、 $\equiv\text{Si}-\text{CH}=\text{CH}-$ となる。例えば、phenylacetylen (PA) と水素終端化シリコンを反応させれば、図 3B に示すように、分子全体が  $\pi$ 電子共役系で繋がった SAM ができる。

実際に、Si (111)-H 表面に PA-SAM を形成し<sup>5)</sup>、その電子特性を AFM により評価した。金被覆した AFM プローブを電極として、プローブ接触点の電流-電圧特性を測定した結果が図 3C である。PA-SAM 被覆シリコン試料は、参照試料である水素終端化シリコン表面より低電圧で電流が流れはじめめる。この結果は、PA-SAM が確かに導電性を有すること、被覆によって金シリコンの接触抵抗が減ったことを示している。

### SAM の光マイクロ加工

自己集積化はボトムアップアプローチによる材料ナノテクノロジーのキープロセスである。しかしながら、自己集積化だけで、微小機械や電子デバイスを構築することは、今のところ非現実的である。リソグラフィ技術に代表される、トップダウンアプローチに基づいた微細加工技術の援用が必要不可欠であり、トップダウンとボトムアップの両アプローチを組み合わせていくことが、今後ますます重要になる。自己集積化した有機分子薄膜を微細構造化するマイクロ～ナノパターンング技術は、トップダウンプロセスとボトムアッププロセスの融合を目指す上でのキーテクノロジーとなりうる。

微細加工技術としてマイクロ電子デバイスの製造等に広く用いられている光リソグラフィ・プロセスは、工程が複雑なうえ、強酸等の刺激性薬品を使用したり加熱や真空プロセス等を併用することも多く、有機分子系材料の微細加工には必ずしも適していない。そこで、比較的簡単に有機分子膜を微細加工できる新しい光リソグラフィ技術の開発を目指し研究を進めてきた<sup>6-8)</sup>。

波長 100~200 nm の範囲の紫外線は、真空紫外(Vacuum Ultra-Violet, VUV)と呼ばれる。大気中では酸素に吸収されるため伝搬距離が短く、通常、真空中あるいは窒素置換雰囲気中で使用する必要があるため、こう呼ばれる。われわれは、波長 172 nm の誘電体バリア放電型 Xe エキシマランプを主として用いる VUV 露光プロセスの研究を行っている。波長 172 nm の VUV 光のフォトンエネルギーは約 7 eV であり、通常の紫外光

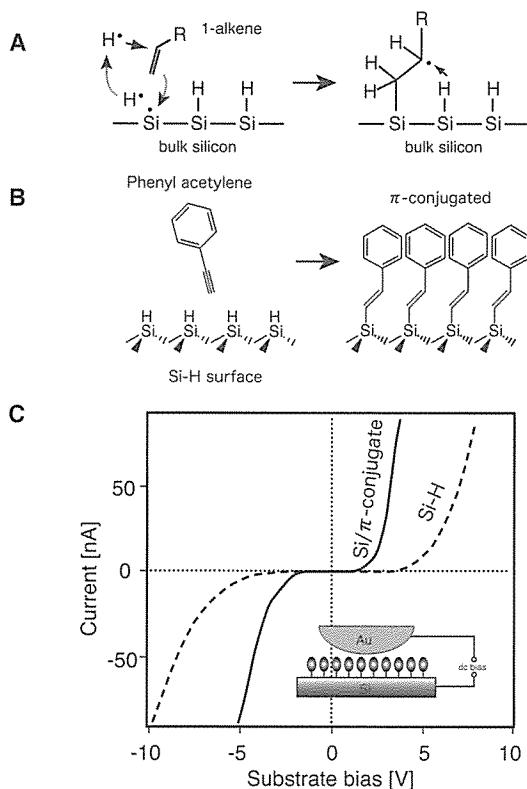


図 3 シリコン表面への有機分子の接合。A) 不飽和炭化水素とシリコンラジカルの反応、B) フェニルアセチレン SAM の形成、C) 金/SAM/シリコン接合の電流-電圧特性

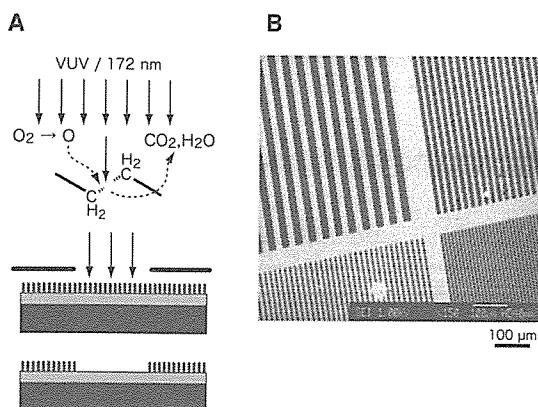


図4 VUV リソグラフィ. A) 励起による有機分子の分解と露光, B) 露光した ODS-SAM の FE-SEM 像

では励起できない有機分子の炭素骨格もある程度励起活性化することができる。さらに、反応雰囲気中に少量でも酸素分子が存在すれば、VUV 照射によって酸素分子が励起され、1重項酸素原子が発生する。1重項酸素原子は酸化力が極めて強く、活性化した有機分子を酸化し、有機分子は小さなフラグメントに分解され、最終的には揮発性酸化生成物、すなわち、 $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  となって、基板表面から除去されることになる(図4A)。図4Bは、VUV 露光した ODS 単分子膜の FE-SEM 像である。SAM が除去された露光部が暗く観察されている。フォトマスクを試料表面に置いて光照射するだけの簡単な密着露光方式でも、 $1\mu\text{m}$  弱の露光分解能が得られている。

VUV 露光は、『VUV 光による有機分子励起と 1 重項酸素原子による酸化』に基づいており、原理的には、有機シラン SAM に限定されずに、あらゆる有機分子材料の光加工／光化学処理に応用可能である。実際、われわれは有機シラン SAM 以外にも、高分子材料や Si 直接

結合 SAM のマイクロパターニング、有機－無機複合メソ構造からの有機成分の選択除去、生体材料のマイクロ構造化等にも成功している。

## おわりに

『機能構築学』という分野名は、着任後私自身で決めた名称です。『極微な部品を組み立てるように物質を集め機能を創り出す』という思いを込めて、この分野名を選びました。分野名を決めるにあたっては、材料工学専攻内はもちろん工学研究科内の他の専攻名・講座名・分野名との重複は避けるという境界条件、魅力的なキーワードやシンプルで力強い名称の多くは既にどこかで使われているという状況の下、多少の迂曲屈折もありました。なんとか意味のある分野名をつけることができたのではと考えています。今後は、分野名に相応しいアウトプットを常に出し続ける研究室になるよう奮闘していきたいと考えております。

## 参考文献

- 1) A. Ulman, *Chem. Rev.* 96 (1996) 1533.
- 2) H. Sugimura and N. Nakagiri, *J. Photopolym. Sci. Technol.*, 10 (1997) 661.
- 3) H. Sugimura, A. Hozumi, T. Kameyama and O. Takai, *Surf. Interf. Anal.* 34 (2002) 550.
- 4) J. M. Buriak, *Chem. Rev.* 102 (2002) 1272.
- 5) N. Saito, K. Hayashi, H. Sugimura, and O. Takai, *Langmuir*, 19 (2003) 10632.
- 6) H. Sugimura and N. Nakagiri, *Appl. Phys. A*, 66 (1998) S427.
- 7) H. Sugimura, T. Hanji, O. Takai, T. Masuda, and H. Misawa, *Electrochim. Acta*, 47 (2001) 103.
- 8) L. Hong, H. Sugimura, O. Takai, N. Nakagiri, and M. Okada, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 42 (2003) L394.

## 談話室

## 超軽量ポーラス金属の創製

馬渕 守\*

Processing of Super-Light Porous Metals

by Mamoru MABUCHI

## はじめに

本年3月に、独立行政法人産業技術総合研究所から転出してきました馬渕です。昭和62年3月に資源工学専攻修士課程を修了した後、民間会社、国立研究所を経て大学に戻ってきたしだいです。

前職ではアルミニウム合金やマグネシウム合金等の軽量金属材料を対象に、再結晶挙動、高温変形（超塑性）など高温の結晶塑性の研究を行ってきました。最近では、固体リサイクル、ナノ結晶材料、ポーラス金属の研究を始めています。これらの研究はいずれも新しい研究分野であり、まだよくわかっていないことが多いのですが、逆に今後大きく発展する可能性があると考えています。本稿では、ポーラス金属に関する筆者らの最近の研究成果を中心に紹介させて頂きます。

## ポーラス金属とは

低環境負荷社会を実現するためには、現在の技術体系のパラダイムシフトが不可避である。特に材に対する厳しい軽量化の要求に対応するためには、従来の組織制御による材料の高性能化だけでは限界があり、材料の抜本的な軽量化技術の開発が不可欠である。その解決法の一つが、材料のポーラス化と言えよう。

今日までにポーラス金属の研究開発は活発になされ、すでに工業化されているものもある<sup>1)</sup>。これまでのポーラス金属の多くは、鋳造法で製造されてきた。しかし、鋳造法ではポアの制御が困難であり、ポアサイズ、孔隙率の制限が厳しい。そこで、著者らはスペーサー法など粉末からポーラス金属を製造する方法に取り組ん

だ。以下に、その成果のいくつかを示す。

## スペーサー法

スペーサー法の模式図を図1に示す。金属粉末とスペーサー粉末を混合しプレス成形した後、これを焼結する。焼結の段階でスペーサーを昇華等により除去させることにより、ポーラス体が得られる。したがって、本法ではスペーサー材と焼結条件の選択が重要となる。本法では、スペーサーのサイズ、形状、量をある程度自由にコントロールできることから、得られるポーラス構造の自由度は高い。例えば、鋳造法の場合ポア径をミクロンオーダーにすることは困難であるのに対し、本法ではミクロンサイズのスペーサーを使用すればミクロンオーダーのポア径を容易に達成することできる（図2参照）。また、金属粉末とスペーサーの割合が連続的に変化している混合粉を作成すれば、気孔率が連続的に変化する傾斜材料を製造することができる。このように、ポーラス構造の制御が容易であることが本法の特徴である。

アルミニウムの場合、塩化ナトリウム（食塩）を利用してポーラスアルミニウムを創製することができる。この場合、焼結の過程で塩化ナトリウムを除去することはできないが、焼結後水に浸しておくだけで塩化ナトリウムが水に溶解し、ポーラスアルミニウムを得ることができる。

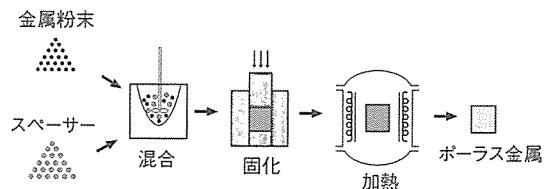


図1 スペーサー法の模式図

\*京都大学大学院エネルギー科学研究所エネルギー応用科学専攻 資源エネルギーシステム学分野

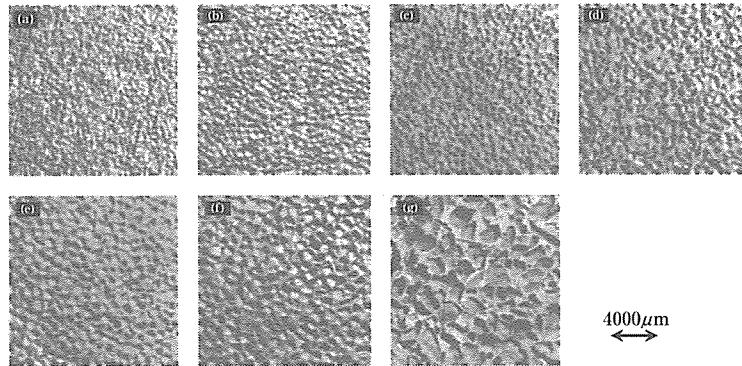


図2 塩化ナトリウムをスペーサーに用いて作成したポア径の異なるポーラスアルミニウム、(a) 200~300μm, (b) 400~500μm, (c) 500~600μm, (d) 700~800μm, (e) 800~900μm, (f) 1000~2000μm, (g) 2000~3000μm

きる。図2に、塩化ナトリウムをスペーサーに用いて作成したポア径の異なるポーラスアルミニウムを示す。本法によれば、図2に示すようにポア径を精度よくコントロールすることができる。今後スペーサー材の性質に応じて、さらに多様な製造法が開発されていくであろう。スペーサー法で開発されたポーラス体の用途の一つとして、チタン製人工骨が挙げられる。人工骨のポア径として、通常数百μmが最適とされている<sup>2)</sup>。このような微細なポアを鋳造法で製造することは困難であるが、スペーサー法であれば必要とされる気孔率において数百μmの微細なポーラス構造を有するチタンを製造することができる。スペーサー法は自由度の高い製造方法であり、今後多様な用途への展開が期待される。

### ガス膨張法

スペーサー法は粉末冶金法を利用したポーラス体製造法の一つであるが、材料の選択に制限がある。すなわち、焼結の過程で金属粉末とスペーサーが反応しない組み合わせが必要である。また、スペーサーを除去する必要があるため、オープンセル構造（気孔がお互い連結している構造）となる。一方、ガス膨張法は、材料に制限がなく、得られるポーラス体はクローズドセル構造（気孔が壁に閉まれ連絡していない構造）となる。図3(a)にガス膨張法の概略図を示す。本法では、金属粉末に不活性ガスを注入後、加圧焼結等で固化する。固化後加熱保持の過程で圧縮されたガスが膨張し、ポアが形成される。本法で作成されたポーラスアルミニウムを図3(b)に示す。この図からわかるように、ポア径は数百μmオーダーであり、スペーサー法と同様微細なポーラス構造を得ることができる。

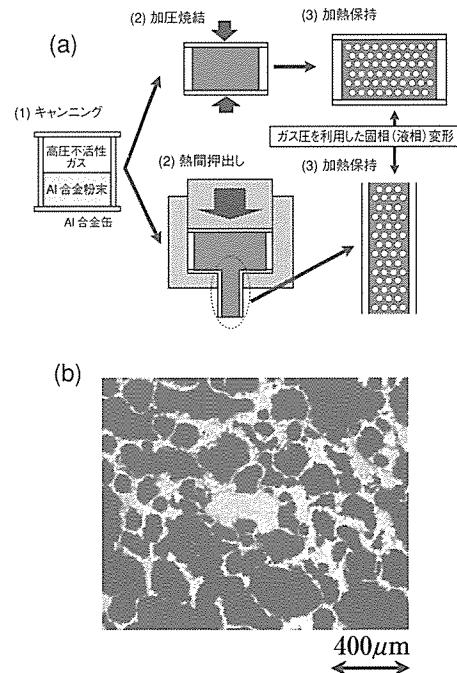


図3 ガス膨張法の概略図 (a) およびガス膨張法で作成されたポーラスアルミニウム (b)

### 自己燃焼合成を利用した方法

自己燃焼合成法は、2種類以上の物質が反応する際の生成熱を利用して化合物を合成する方法である。一般には、原料として粉末を用い、粉末混合圧粉体の一端を加熱すると反応が始まり、反応熱が生成する。この反応熱により周囲が加熱されるために、反応が連続的に伝播し、短時間で反応が終了する。このため、通常の焼結のよう

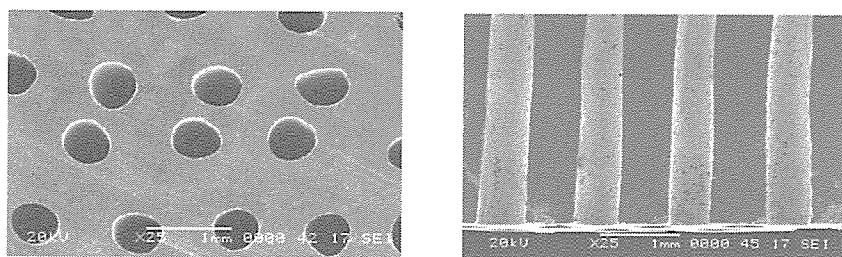


図4 自己燃焼合成を利用したプロセスで製造したロータス型ポーラス金属

に長時間の加熱を必要としないことからコスト的にも有利な方法といえる。この自己燃焼合成を利用して、ポーラス材料を作成することができる。すなわち、棒状のアルミニウムにチタン粉末を固めグリーン体を作成しこれを焼結すると、アルミニウムとチタンが自己焼結合成反応を生じ、チタン／チタンアルミのポーラス体が作成できる。棒状のアルミニウムを用いることから、ロータス型のポーラス体となる。図4に本法で作成したロータス型ポーラス体を示す。

本方法は自己燃焼合成が生じる材料の組み合わせに制限があるが、ポーラス構造の自由度が高いこと（気孔率、ボアサイズ等の制御が容易なこと）が特徴と挙げられる。

### 最後に

以上、粉末冶金法を利用したポーラス金属の創製について簡単に説明した。これらの特徴として、鋳造法では得られない微細なポーラス構造が得られることやポーラ

ス構造の自由度が高いことが挙げられる。粉末冶金法を利用した方法はまだ搖籃期の段階と言ってよく、今後の発展により今までに得られなかつたポーラス体が製造できるようになると考えられる。今後の発展に期待したい。

日本の将来は科学技術の創造に依るところが大きく、その活力の源泉は大学にあると確信している。これまで従事してきた省資源・省エネルギー指向型材料の研究やこれまでに得た様々な経験を大学の教育・研究に活かしていきたいと考えている。

水曜会の皆様方には、ご指導ご鞭撻頂けますよう宜しくお願い申し上げます。

### 参考文献

- 1) T. Miyoshi, M. Itoh, S. Akiyama and A. Kitahara: Porous and Cellular Materials for Structural Applications, MRS, 133, (1998).
- 2) 生体材料学, 日本機械学会編, 92, (1993).

## 談話室

## 社会人大学院について思うこと

松田 陽一\*

**Essay on MBA School through my experience**

by Yoichi MATSUDA

## 1. はじめに

1981年春に大学を卒業して20年以上が経過し、齢もうすぐ五十にとどこうという年齢になってきました。就職するときに、大学の専門で学んだことを放棄し（しかし、在学中に学んだことが、今「科学する」という意味で非常に助かっているのですが）、勝手に「文系転換」とか「大学の先輩の多い会社はなんとなく嫌」などと子供じみたことを友人にささやきながら就職した会社を、2001年夏に退職し、2002年春から現職（大学の教員）に転職しました。少なくとも、20数年前の卒業時には学界に就くとは想像もしなかっただけに「人の人生は本当にわからない」と考える次第です。

この職業生活における転換、あるいは中高齢者の「職業生活におけるリセット：40歳からの再挑戦」と自分で勝手に名づけているこの転職の契機に、「社会人大学院」での経験があります。最近、主に社会人を対象とした専門職大学院、具体的にはロースクールやビジネススクールの設置が全国的に増えてきています。一面これは、大学の生き残り策の一つでもあると考えられますが、私の勤務している大学もその例外ではありません。

本稿では、この転職における契機となった「社会人大学院」について、その経験から思うことを記すものです。私の在学時から、理系は「大学院に行って当たり前、文系の大学院？」というイメージがあるかもしれません、最近の「学」をめぐる話題の一つとして記すことをご容赦ください。

この水曜会には「皆入るもんだ。会費は払って当たり前」と卒業時に教えられ、以来、会費のみは毎年まじめに納めさせていただいているのですが、当時のゼミ仲間

と酒を呑む以外はとくに縁もなくこの年齢まで来てしまいました。多数の水曜会会員の中に、これから「社会人大学院へいってみようか…」とか、会社の人事関連の職に就き「うちの会社でも社会人大学院へ派遣の制度を…」とかお考えの方に、何か少しでも貢献できればと考えたのが、拙い経験ではありますがそれを基にしたこの本稿の内容であります。

## 2. 社会人大学院への入学動機

私は、1981年に旧金属加工学科、金属物理専攻を卒業しました。とくに学業の出来が良いわけでもなく、取得単位数（173、「優」は12、残りはやや「良」が多い）の多いことだけが自慢の学生でした。

そもそも、会社に勤務しながら大学院に通学しようと思った理由には、卒業後毎年サッカー部のOB会に参加していたのですが、とくに理系の後輩はその大半が「大学院卒」という学歴が普通であり、そこに「学歴コンプレックス」を感じたことがあります。また、会社に勤務しだして、約10年経過したころからともかくほとんど自分を見つめなおす時間がなかったことに気づき、「ちょっと勉強してみようか」という思いを強く感じだしていたこともあります。仕事に悩んでいたとか、上司と喧嘩していたとか、仕事に不満があつていやだったということではありません。現実は、逆でした。

それまでの10年間は、私が就職した会社は1986年ごろからのバブル景気もあってか、1ヶ月に休むのは1日、営業会議は午後11時から、などということが平常に行われている会社でした。だからといって、これに不満があったわけではありません。年齢に似合わない潤沢な交際費を会社から給料とは別に認めていただき、週に最低3日は大阪から京都の自宅へタクシーで午前2、3時ごろに自宅に帰るという生活を、本当に鼻高々と繰り返して

いました。また、自分の仕事も会社の拡大基調に併せて、相当なスピードで量・質ともに増加し、向上していった期間だったと思います。よって、学問とか勉強とかいう言葉を考えたこともなければ、頭に浮かんだことなどみじんもありませんでした。

ところが、この時期に「どうもこのままいたら自分がダメになる…」と考える日々が続くようになり、それを解消するために思いついたのが、「当時、少しづつ開設されるようになった夜間開講による社会人を対象にした大学院に通学して、久しぶりに勉強してみよう」でした。何とか自分の時間を作り、通学できるのではないかと思い、意を決し、選んだのが、神戸大学経営学研究科でした。入学は、1992年4月です。

### 3. 社会人大学院の生活（修士課程）

入学当時は、この学界のことを何も知らなかったために、「文系か…」とか「経営学？何を教えてくれんねん。現実なら数段、先にいってるし、営業や都市開発のことだったら逆にお教えしましようか」などとたかをくくつておらず、入学したものの、あまり身が入りませんでした。さらにいえば、「大学院で教えてもらうことなんかあるの。さっさと修士の学位だけくれないかなあ」と、本当に今から考えれば赤面ものではあるのですが、当時は厚顔無恥にもそのように考えており、同期生と六甲道の呑み屋で、毎晩呑んでは大学院の悪口を言い続けていました。

この大学院を選んだのは、実は大学院にいけるのならどこでも、どんな科目でも良かったのですが、①理系だと実験があって拘束時間が多分長いだろうということ（よって勤務しながら通学することは会社派遣以外は多分無理）、②私は営業職であったので、理系を選んでもあまり仕事の役には立たないだろうということ、③「経営学研究科」であれば当時管理職に成り立てぐらいだったので、少しあは役に立つだろうということ、④本を読むことは苦痛ではないし、通勤電車の中でも読めるから、授業ぐらいはついていけるだろうという理由から選択しました。

当時、同期は15名いました。後で判明したことですが、このうちの10名は会社派遣でした（会社に派遣制度があってそれに基づいて通学している）。中には、2年間の派遣ということで会社勤務を休職し、大学院の通学に専念している人が3名いました。

私の勤務していた会社には、そのような制度はありませんでした。よって、会社に申告せずに、また、経済的には自己負担で通学していましたが、それで他の同期生をうらやましいと思ったことはありませんでした。同期の中には、「会社派遣には、派遣の悩みがある」と言つ

ておりましたが、その内容についてはよくわかりません。

1年目はプロジェクト研究といって、5名1チームでひとつのプロジェクト研究を行い、その成果をワーキングペーパーとしてまとめる作業です。蛇足ですが、この成果は、海外へ行って、イギリス、ドイツ、アメリカの経営大学院で発表しています。とくに、アメリカではスタンフォード大で発表し、J. G. マーチ（私の現在の専門である組織論分野では世界的権威。共同研究者のサイモンはノーベル経済学賞の受賞者）から「very good」とお褒めをいただいた論文も何本かありました。

2年目は、各自の修士論文の作成です。後でも述べますが、これが実は非常に教育効果が高いのです。同期生も皆授業よりもこの点を指摘しています。これも蛇足ですが、私を含めた同期生のうちの13名の修士論文の概要をまとめたものは、奥林康司編『変革期の人的資源管理』中央経済社、1995年、および奥林康司編『成功する人事労務管理システムの開発』中央経済社、1994年として出版されました。

### 4. 社会人大学院の生活（続）（博士課程）

1994年3月に修士課程を修了しました。これで終わればよかったですですが、学間にちょっとある意味「新鮮さ」を覚えたものですから「何かもの足りないなあ」と感じていました。そのとき、「夜間開講による社会人大学院の博士課程を、来年（1995年）つくるから通学しないか」という電話が恩師からあり、さらに3年間、博士課程に進学することに決めました。入学したのは、1995年4月でした。

入学当時は、博士号（課程博士）を取得する意味とかその苦労などはほとんど考えていませんでした。授業による単位取得ではなく、博士論文を3年間で執筆することに専念すればよかったので修士課程時代のように、平日、毎晩、六甲台へ通うことはなくなりました。よって、経済的・肉体的負担はやや減りました。しかし、社会調査に思いのほか費用がかかることや、修士論文とは比較にならない博士論文の作成レベルにきつい3年間でした。とくに、文章を書くという点について徹底的な自己変革を要求され、また「研究する」とか「科学する」とかということを改めて考えさせられた3年間でもありました。蛇足ですが、今、私の大学院ゼミに社会人が5名通学していますが、ゼミ終了後の呑み会では、このころの話をして「またその話ですか」と指摘されています。

博士課程を修了したのが、1998年3月でした。博士論文は、『企業の組織変革行動』千倉書房、2000年、という著書にして出版することができました。恩師からこの出版を勧められた当時は、自分の駄文あるいは拙文が

「世にでるなんて…」とあまり気がすすみませんでした。しかし、出版にかかる自己負担もなく、また出版社には日経新聞の1面下にこの著書の広告を出していただき、さらに、今、全国200以上の大学および公立図書館にこの著書があると思うと不思議な気がします。

なお、2002年春に学界に来てみると、著書（とくに単著）を自己負担なしで出版することがいかに大変なことか、いやというほど見せつけられました。本当に、その意味では恩師に感謝いたしております。

博士課程の修了後、恩師のゼミや所属を勧められた学会に参加するなどはしていましたが、とくに学界にはほとんど興味ありませんでした。ましてや、1回ならともかく、15回も授業として行うなんてことは、想像だにしていませんでした。ところが、恩師から「〇〇大学に教員の職があるが、転職する気はないか？」という話を何度もかいただくようになりました。ちなみに、恩師からこのような話が何回かありましたので、妻に相談すると「会社に不服がなく、かつ、給料が下がるならそんな話は断れ」とキツイ返事をうけました。

しかし、会社での異色なキャリアを歩んだこともあってか、燃え尽き症候群ではありませんが、40歳をすぎてから「もうひとつの自分の可能性を探る」あるいは「職業生活におけるリセット」を日々強く思うようになりました。たまたま、社会人経験があって、ある程度の業績があると、わりとこの学界からのスカウトも多いときでしたので幸運にも2002年春より現職に就くことができました。

## 5. 昨今の社会人大学院生をみて思うこと（その1）

2000年秋より2001年夏にかけて、恩師から、神戸大の社会人大学院のゼミに「助言者」として毎回出席するように申しつけられました。そこでまかされたのは、ゼミ（月に2～3回、土曜日午後に5時間程度ある、ゼミ生は全部で9名、平均年齢は30歳代半ばです）に出席し、ゼミ生各自の修論の中間発表（2001年8月末提出）にコメントを加える、およびその他で恩師がフォローできない部分をフォローしていくというものです。

このとき、私の従前の経験から異なっていたことは、①ゼミ生の全員が自分の意思で何らかの明確な目的をもち、かつ会社補助・援助なしで通学していること、②文系の学問分野でありながら理系学部・院卒業（修了）生が多いこと（9名中4名）、③東京圏からわざわざ自己負担によって神戸まで通学している人がいること（これは、一つ橋大や慶應大は授業料が高く、また実践的な面に重きがおかれすぎ、自分にはあわなかったといっていました。同期の人で、東京圏通学者が他に3名いるとのことでした）でした。

上記の①については、一番多かった入学動機は、「自分の頭の中を整理したい」、「現実の経営事象・現象を統一的に理解・説明できる見方や考え方を身につけたい」、さらに「何かやらないといろいろな意味で会社の中で取り残されるような不安感を払拭したい」でした。私のときは、上述したように、自己負担・自己責任で通学している人が逆に少数でした（私を含めて15名中5名でした）。

②については、私のときはほとんどいませんでした。理系学部・院出身者は15名中、私1名だったと思います。

③については、こんな人はいませんでした。逆に会社派遣の中に、本人の意向を無視して「制度があるから、ともかく2年間行け」という命令のもと、東京から神戸の職場に転勤させられた人がいました。

その後、2003年夏に同じく神戸大学大学院経営学研究科で社会人（院生）70名を対象に集中講義をする機会をえました。授業科目名は「組織開発特殊研究II」で、3週連続の毎週土曜日9時～17時までの4コマ開講でした（最終週は、土曜日と日曜日の連続です）。上述の①～③について、このときに感じたことを述べます。

①については、もっと明確でした。「学問的な理論フレームワークを教えてほしい」、「論理実証主義に基づく社会調査の方法について聞きたい」、「現実の会社組織や人の行動を測定・分析できる次元開発やインディケータ（指標）開発はどのようにすればよいのか」等々、かなり具体的で、かつ学問的な要求が強くなつた感がありました。

②については、70名中約30名超が理系学部・院の出身者ということでした。そのうち、医学博士号および薬学博士号を取得している人が3名いました。

③については、私が知りえた限りでは、4名、東京圏以北から通学している方がいました。理由は上述と同じく、神戸大の学問的な色彩の強い授業の多いこと、および著名な業績のある先生が多いことを指摘していました。

私の以上のような経験を基にすると、以下のようなことが考えられます。

あくまで、神戸大学および経営学に限ることなのでしょうが、社会人で大学院に来る人は、即物的な知識や即効性の高い処方箋的な知識等を求めているのではなく、自己の身の周りにあり、普段、うんざりするほど直面し、悩んでいる場面を整理でき、また実践的な方向性を示すことができるような理論や学問的な見方・考え方を身につけたいと考えている人が多いということです。

例えば、社会人大学院修了者を対象にした本田由紀氏（『社会人大学院修了者の職業キャリアと大学院教育のレ

リバランス』(東京大学社会科学研究所、2003年)の調査によれば、社会人が文系の大学院において身につけた能力としてとくに高い評価をしているのは、「課題を理解し設定する力」、「情報を収集し分析する力」および「幅広い視野をもつこと」です。また、これが仕事行動に強く影響を与えていたという高い評価もあるようです。

これは、あくまで私見です。会計学や財務論あるいは金融工学のように「実践的な技術」を学ぼうとする人もいますし、昨今のように資格取得の1機関として大学院を位置づけている人もいます。

## 6. 昨今の社会人大学院生をみて思うこと（その2）

上述では、最近の社会人大学院について、特徴的だと思われることを指摘しました。別の側面からみてみたいと思います。

理系の大学院は会社派遣が多いので異なると聞いていますが、時間的にも経済的にも自己負担で通学する人が多いので老若男女にかかわらず、熱心な学生が多いようです。しかし、これもあくまで私見ですが、昨今の一般学生と同じで「本を読まない（買わない）」、「文章の書けない人」が本当に多いようです。ただし、後者については「社会科学系の学問分野において文章を書く」という意味においてです。私もそうでしたが、会社勤務時代の書類は、「短く、簡潔に」、よって「箇条書き、体言止め、図表、→（矢印）」のオンパレードでした。ともかく会議などでは、出席者にさえ理解させればよいという観点ですから、論文のように誰にでも理解してもらうように文章を書くということを意識したことがありません。しかし、実は、この点を厳しく教育することが、一番教育効果が高いようです。上述のゼミ生も「本当に研究あるいは論文と格闘する」ということを意識し出すと、ゼミの度に「すみません…。1行も書けません」という言葉ができました。理系風に言えば、長い会社経験に基づくデータ（経験知）はゴマンとあるのにもかかわらず、です。

私は、大学・院の教育の責務として、「きっちりと論文の書き方を教える」あるいは「書かせる」ということがあると思っています。しかし、この点については、大学・院あるいは、その大学・院における講座や教員によってもかなり異なっているように感じます。

大学院によっては、必ずしも修士論文を課していない大学院もあり、「では、代わりに何を教えるのだろうか?」という感をいただくこともあります。こういう大学院の教員にかぎって「社会人を教えるのは面倒くさい」、あるいは「ややこしい社会人が多すぎる。学部生が楽…」という声を発していると聞きます。

少し別な話をします。上述のゼミ生のように、昨今

社会人の大半は自己負担で通学しています。以前のように会社が経済的・物理的に何らかの形で補助・援助するということは減っています。仮に会社に制度としてあっても、それを無視してあくまで自己負担で通学している社会人が増えてきているようです。ところが、これを逆手にとって「もっと役に立つ授業をしろ」とか「その授業はつまらない」と自分のことは棚に上げて、主張する学生もいるようです。これがエスカレートすると、友人の教員が経験した例ですが「自己負担で通学しているのに、どうして学位を出さないのか」と脅し、ストーカー行為もどきをする学生もいるようです。つまり、社会人の中には、なぜ自己負担までして大学院に通学しているのかということについて、勘違いあるいは考え方違ひをしている人がいる、ということです。

10年前には、「学歴変更（学部卒から院卒）によるキャリアアップや転職の武器に」という人もいるにはいましたが、今はほとんど聞いたことがありません。しかし、上述のようにほんの小数ですが、「大学院で勉強をする、あるいは研究をする」という意味をほとんど考えずにやってくる、教員からいう「何を考えているのか。ほとんど意味不明で難儀な」学生がいるということです。

## 7. 将来、大学の教員職を望む会員の方へ

20年間勤務した会社を私がやめる際に、会社勤務を通じて懇親のできた知人からいただいた言葉の約半分は、「そんなところ（=学界）へなぜ、転職するの」、「もったいいところを紹介しようか」でした。毎日が「儲けてナンボ」とか「今月の売上数字は？」の会社でしたから、それを通じて知りえた人が言うのも納得できました。ほとんどの知人が「大学なんか無用の長物」、「大学って何をしているのか。もう少しましな学生をよこせよ…」程度のイメージしかありませんから、仕方のないことでも確かです。つまり、世間が思っているほどこの学界のイメージはよくないということだと思います。

その一方で「授業でしゃべらせろ」、「ゼミで学生にいいたいことがある」等々、申し出をする人も私の周りに多くいます。今までの会社経験で得たものをどこかで吐き出したい、学生に実務界のことを教えてやろう、ということなのだと思います。そういう意味では、一面、大学というところを評価している面もあるのかもしれません。

よく実務界の人が大学の授業でしゃべっているのを聞いたことがあります。学生にその評価を聞くと、「おもしろかった」、「ためになった」、「実務のことがよくわかった」という評価が多いようです。しかし、問題はこれが1回だけの授業だからそのような評価をしているのでは、と思われます。恩師の院生のゼミ（これは社会人で

はなく一般大学院生)に参加していたとき、何回か続けて同じゲスト(某会社の重役)の口述を聞きました。しかし、学生の反応も初回はよいのですが、日をあけて2回、3回と聞いているうちに「また、その話?」とか「また、得意の経験談?」というような反応を示します。つまり、勝手に「あなたたちは学生だから経験していないし、知っていない」と思い込んで、自分の経験や苦労談をとうとうと口述しても、最初はよいのですが、長く続かないということです。この手の勘違いをしている人が多いので、私は授業やゼミで社会人に口述していただく場合には、口述に期待する内容と「口述する側も勉強」という2点を理解してもらえるようお願いしています。

言い換れば、自分の経験をいくら口述しても誰も聞かないということだと思います。やはり、学問と現実の現象や事象が関連しているという点を明確にしなければ、授業になりえないということだと思います。この点について、私の周りだけかもしれません、勘違いしている社会人がいるということです。現実の体験談やステレオタイプ(紋切り型)的な自論の口述だけでは質の高い授業は構成できない、ということだと思います。

また、肝心なことですが給与の問題もあります。理系はどうかしりませんが、私もこの年齢で転職して、給与の低さには「目がテン」になりました。ましてや、会社勤務のときに使用できた、いわゆる「交際費」や「経費」がまったくありません。とくに給与の昇給設計が在職年数を基本にしているため、私のように中途で別の業界から転職する者にはかなり不利です。私の先輩・同期・後輩の中にも、できれば「学界に就職したい」という者が何人かいます。しかし、TVのコマーシャルではありませんが、「よお~く考えよう、お金は大事だよお~」とアドバイスしています。

## 8. おわりに

よく授業で学生に話をするのは、「文系とか理系とかという区別をする無意味さとそこから転じて広く深く物事を知る、あるいは知るように努力する。」ということです。前者は、理系、文系などという境界を引いて仕事をすることには、今日何の意味もないのだ、ということを意味しています。会社でどのような仕事をするにしても、それが理系の範疇だったら理系的知識を身につけて解決する、文系の範疇だったら同じようにするということです。大学の出身学部にこだわることの無意味さ、現実的な効果のなさを意味しているつもりです。

会社勤務の経験から思うのは、「ここまで自分の得

意領域だから私が…。でも、それはあなたの部署の担当でしょう。私は担当外で専門でもありませんから、またよく知りませんから、得意でもありませんし…」などという発言の多い本当に使えない人が大半だったということです。よって、後者の深く広く物事を知る、ということは想像がつくと思います。広く浅くではありません。例えば、ある新製品を開発するなら、市場ニーズの把握・調査分析と自社技術のマッチングという大所的な話から販売セール初日の応援社員に出す弁当はどこから取るかまで明確にしゃべれなければなりません。こういうことをできる人が案外少ないようです。会社としてもこのようなオールラウンダー的(ゼネラリストとはやや異なる意味で、私は使用しています)な社員を求めているということを、とくに研究・技術開発関係の人からよく聞きましたし、今でもよく聞きます。

また、最近よく、産官学をにぎわしている話題に「MOT」があります。私も工学部関係の人に尋ねられますが、「よくわかりませんので、営業のやり方ぐらい教えることができるでしょう」と答えています。案外、「営業」の話が軽んじられていることに気づいて、意識的にそう答えるようにしています。

あるベンチャー企業の失敗事例調査でもありました。ベンチャー企業の失敗の大きな要因に「営業力のなさ」があります。営業は経営学のなかでも、ほとんど研究がすんでいません。文献等もあるようですが、本当にできる人はそんなもの読みもしませんし、眼中にありません。そもそも、営業経験のない研究者に営業のことがわかるのか、という根本的な疑いがあります。また、営業は、会社やその業種によってもかなりその会社内の位置づけや対応が異なっています(ちなみに本田の藤沢氏とソニーの盛田氏は「営業も技術だ」とおしゃっていました)。私見ですが、「MOT」の中で、「営業」の話が話題にのぼらないのが不思議な気がします。

いろいろと、散文的に、またとりとめもなく記述し、理解に苦しまれたことかと思います。私の経験からいようと、大学院に対しては、理系は別として、社会人をうまく指導できる教員はそれほど多くはなく、社会人学生に対して再考する部分も多々あるのではないかと思います。新しい大学集客のマーケットとして、単純に考えるべきではないということです。その一方で、学生である社会人に対しては、「会社に勤務しながら大学院に通学して勉強する、および研究する」という意味について、真摯に考える必要性があることを最後に指摘して本稿を終わりたいと思います。

## 談話室

## 名字の話／熱田姓のいわれ

熱田善男\*

The Roots of My Family Name

by Yoshio ATSUTA

古希を過ぎた男の快挙です。

やっとまとまりました。熱田姓のルーツ調べです。子どもの時からの疑問。親戚以外の熱田姓の人にお目にかかることがなかったのが、生まれて半世紀、50歳を過ぎていました。たまたま乗ったタクシーの運転手さんが熱田さんでした。これがスタートになって、熱田姓のルーツ探しが現実になります。

そしてH16年（2004年）アテネ五輪の夏、20年もかかって、古希をすぎて、やっとゴールのテープを切りました。千葉県匝瑳（そうさ）郡野栄町大字野手小字内裏塚という集落にルーツがあることがわかりました。

## この「熱田」という名字

私の「名字」、姓名の「姓」の「熱田」は、「アツタ」と読むのですが、めずらしいのでしょうか。

過日、インターネット仲間から、「熱田」さんの「熱田」はどう読むのですかと私のホームページの掲示板に書き込みがありました。それを見て、「アッ」とおもいました。

今の時代、パソコン画面上で、「熱田」という漢字は目で見ても、よくある名字ではないから、「アツタ」とは読めないのが当たり前なのですね。

「熱田」を切り口にして、自分を振り返ってみますので、しばらくお付き合いください。よろしくおねがいします。

小学校の頃、多分2年生か3年生だったとおもうのですが、その日は担任の先生がお休みで、臨時に隣の組の先生がこられて、出席をとられたのですが、「ネツタ」

さんと呼ばれて、「アレッ」とおもった記憶が、私はH15年（2003年）に古希を迎えたから、小学校2～3年生というと10歳として、もう60年は経ったことになるが、いまでも鮮明に残っています。時は昭和17～18年、戦争が始まったのは昭和16年12月8日だから、現在とはまったくちがう時代背景でしたが、「熱田」が読めない先生がおられたのですね。

女の子で師範学校を出て5～6年経った方だったともいますが、当時とすれば天皇家の三種の神器の一つであると草薙の剣をご神体としている名古屋の「熱田神宮」を読めないはずはないのですが、神さまではない人間の名字としては初めてお目にかかり戸惑われたのでしょうか。

## 初めて、「熱田」姓に出会う。

成人するにつれて、「熱田」は名字としては珍しいのではないかと実感していくことになるのです。まず、親戚以外の「熱田さん」にお目にかかることが、ズーッとなかったのです。京大の工学部冶金に入つて、そこで貰った水曜会（同窓会）の名簿の中に、「熱田友二」という方がおられました。理博か工博だったと覚えています。このとき初めて親戚以外の「熱田さん」に、紙面ですがお目にかかり、奇妙な気持ちになったのでした。だから半世紀も経っているのに、この方の下の名前も覚えているし、博士だったのも頭に残っているのでしょうか。

そして、学部卒で八幡製鉄（後の新日本製鉄）に入り、八幡製鉄所勤務になりました。昭和34年です。そして、新入社員2年目だったか、同じ職場のある年配の管理職の方から、「熱田さん」というと、熱田友二さんのご親戚ですか」と名簿で知った名前を聞かれて、びっくりした覚えがあります。さすが、この時は珍しい姓だと強く感じました。

\*村上研 OB  
新日鉄 OB

## 大事件

八幡で約5年間つとめたあと、大阪府堺市にある新設間もない堺製鉄所に転勤する。ちょうど、溶鉱炉、転炉、分塊工場、圧延工場等々、鉱石から鉄製品までの一貫体制の諸工場を建設中だった。建設が終わりスタートの時に、一つの工場の責任者になる。掛長を拝命したのでした。この会社では掛長といって係長ではなかった。あまり理由は判らないのですが、掛長の方が係長より権威がある、「偉いんだヨ」と聞かされた記憶があります。

そして掛長社宅に移る。今みたいに各戸には電話が普及していない時代だったが、掛長社宅には会社が電話までつけてくれる。この電話すごい事が起こる。ほんとうに驚きました。

ある日、勤務を終えて帰宅すると、家内が興奮しているのです。「熱田さんという方から電話がかかってきました」「エッ」「それが身元調べの電話なの」。

こういうことでした。ちょうど電話帳があたらしくなったときだったので。2年に1度か3年に1度か分厚いのが配られます。ちょうどその時期だったので。堺市内に住んでおられる「熱田さん」が、電話帳の自分の隣に「熱田さん」が並んでいるので、「アレッ」と思われ、電話をかけてこられたのだった。

親戚ではないだろうかと、郷里とか出身地とかを尋ねられたようであった。けっきょく縁戚ではないことが判明したそうですが、相手も私とおなじように、たぶん、親戚以外の「熱田さん」にお会いになったことがなかったのだろうと推測したのでした。

堺製鉄所に約5年。千葉県君津市にある君津製鉄所へ転勤、ここでも約5年。そして基礎研究所へ。場所は東横線日吉で降り、徒歩で約25分、多摩丘陵の最先端の日吉台にある本社直属の研究所でした。東京の社宅に移る。世田谷区上北沢だった。中層マンション式の社宅。まわりは、巨人の長島監督が田園調布に移る前に住んでおられたお屋敷もある高級住宅地だった。中曾根さんが総理時代に監督の旧宅を借り受けた住んでおられたのでその屋敷の前には警察官の歩哨小屋があった。ちょっと話の寄り道をしましたが、堺でのことを思い出して電話帳を繰ってみたら、さすが大東京だけあって世田谷区だけで電話帳の1頁の3分の1ぐらい、「熱田さん」があったと記憶している。

ところが、別の大事件が起こる。ほんとうに大事件でした。

その大事件。ある日、「熱田」姓宛ての郵便物が届く。宛て名、姓は、確かに「熱田」でしたが、名には心当たりがない。私は「善男」、家内は「康子」、子供2人は、小学校と幼稚園で、「尚子」と「祐子」。そのどれでもな

い、違う名前でした。その郵便物には困ったのですが、社宅のお隣の方がつい以前まで、「熱田さん」が、この社宅に住んでおられたと教えて下さったので会社の名簿を調べると、「熱田さん」がおられました。持ち家を建てて引っ越しされたのでした。それにしても珍しい名字の「熱田さん」のと同じ姓の「熱田さん」が同じ社宅に入れ替わりに住むとは世間は狭いというか、偶然のワルサにびっくりしたものでした。

### 娘のクラスメートに、「熱田さん」が。

そして、今度は横浜の子会社へ出向。なるべく横浜に近い方が通勤に都合がよいと、大田区久が原、ここも高級住宅地、ここにある2階建てマンション式の社宅に移る。東急池上線で蒲田へ出て、京浜東北線で桜木町へ、ここから子会社の構内下請け会社、新日鉄からは孫会社の社長の車に便乗して、本牧地区に隣接した錦町の岸壁にある子会社へ通勤することになる。

この子会社で、すごく珍しい姓に出会う。「四十八願」さんです。輸送を担当している会社の方でした。「よいなら」と読むのです。「熱田」なんてこの方の姓から較べると震んでしまいそうですね。

そうそう、次女が入学した東京の高校に、「熱田さん」がおられました。娘は初めて親戚以外の「熱田さん」お目にかかったのである。父親より先に。

この時代に、ちょっとしたエピソードがある。久が原駅前の富士銀行で、新しい通帳を作ったのだった。女子行員が「どうお読みですか」と「熱田」の読み方をきいてきた。昭和50年頃でしたか、戦後30年も経過していたので、やはり若い子には読めなかつたのですね。「アツタと読みます。名古屋に熱田神宮というのがあるでしょう」といっても「知らない」らしく反応なし、そこで天皇家の三種の神器の講釈をしてみた。「剣と鏡とくび飾り、三つあるので三種の神器といつて天皇家の証なのです……」と、草薙の剣なんて言葉を使わずに、いわく因縁を詳しく説明したつもりだったのですが、「勉強になりました」といわれてがっかりしたことがあったと記憶している。

### ライブで、「熱田さん」に。

それから、横浜の子会社に5年ばかりいて、本社に帰り、数年後人材スカウト会社のイムカ株式会社に出向することになる。業界では有名なカリスマ社長からは、「熱田さんか、いい名前だ、縁起のよさそうな名前だ」とえらく縁起を強調されて、そういう見方もあるのかなあとおもって聞いていたら、「熱田さん、新日鉄は人が多いから、伊勢さんがいるだろうか、いないかな、探しで当社へ出向してもらおう」と言われたのには驚いたが、

さすが業界では異能の社長といわれているだけに、三種の神器のことをわかつておっしゃっていた。

このイムカ時代、仕事が人材スカウトだから、人材情報や企業情報を集めるために、いろいろの異業種交流会に顔を出していましたが、ある会で、日本系図学会の会長と自称される方から、「熱田姓」は、「熱田神宮」に発すると言われ、その縁起を書いたコピーをいただきました。それは、れっきとした文献でした。

じつは、堺製鉄所で、名古屋大学を出た後輩社員に「熱田さん」というと名古屋の人間には、熱田神宮のことと、神様の前へ出たようで、なにかかしこまった気分になる」と言われたことがあったので、その時、「名古屋に熱田さんという姓が多いのでしょうか」と聞いたところ、「ない」と聞かされていたので、その日本系図学会の会長の意見は、定説らしいが、やはり違うという気がしました。

イムカでは、外回りの仕事が多く、タクシーを使うことも再々だった。ある日、タクシーに乗って、フト運転手さんの名札に目がいった。「熱田なにがし」とあった。私はもう50歳をすぎていた。生まれて半世紀もたって、初めて、「熱田さん」にお目にかかったのだ。ライブでお目にかかったのだ。目を疑いましたね。目をこすって見直しても間違いないし。さすが、興奮しましたね。本当

に興奮しましたね。「熱田とは珍しいお名前ですね、私も、熱田です」と、「そうですね」を期待して話しかけました。ところが、「わたしの出身地には多いですよ」と期待はずれの答えだったので、「エッ」と、逆にびっくりしてしまいました。

運転手さんの出身地は、千葉県の八日市場市。そこには「熱田」が結構多いのだそうである。

「熱田さん」のルーツ探しのヒントをつかんだ気がしました。帰社してさっそく電話帳を繰った。会社が人材スカウト業ですから、関東一円の電話帳は商売道具として備えているので、すぐ調べがついた。局番毎に本数を数えて、千葉県の地図に記入しました。「わかったのです」。房総半島の、それもタクシー運転手さんの出身の八日市場市は約40本で、それに隣接している野栄町という、九十九里浜に接した、無名の町に、「あるわ、あるわ」たくさんありましたね。200本ぐらいあったと記憶しています。そこを中心にして千葉県内に、「熱田姓」が、飛び火したような分布でした。

この野栄町は、当時は人口8000人ぐらい、所帯数では2000ぐらい。200本というと、所帯数の10%だから結構高い比率です。

当時作成した分布図が出てきましたので、参考に、載せておきます。



ここが、「熱田姓」のルーツだ。間違いない。ルーツ発見に、なにか知らないが妙にワクワク興奮したのを、今でも鮮明に覚えています。

それから当分の間は、分布図を持ち歩き、友人や知人に、このルーツ発見の話を自慢げにしましたが、皆さんは、思いの外反応が鈍く、冷淡だったので、大変不満でした。

### 千葉県八千代市

イムカ勤務中に、新日鉄時代から着工していた自宅が建った。場所は八千代市。東京からは京成電鉄で成田へ行く途中になる。京成船橋から約20分のところ。逆に東京へは京成電鉄を使うが、途中の、市川真間の駅の立て看板広告に「熱田医院」というのを発見した。でも、熱田姓の分布を知った後なので、冷静に「なるほど」とおもう。

それから、次女が八千代市の地図を見ていて、「熱田神社」というのが2社あることを発見したのですね。それを聞いて、「熱田姓」のルーツに、関係があるかもしれないとおもい、現場へ行きました。八千代市内とはいえ農村部の草深いところに小さな祠が、2車線の道路をはさんで、それぞれ500メートルぐらい離れて建っていました。2社とも、ほんとうに小さなもので社務所もなく神官もおられなかった。縁起話の立て札もなく、あまり収穫はなかった。

まだ現役サラリーマンで、時間もとれないし、それ以上の調べはしなかった。しかし、「熱田」と称する神社が、自分が住む八千代市に2社も存在することを知って、なにか特別な感慨がおこりました。

八千代市に住むと銚子は意外に近いのです、銚子の黒生地区にある一山いけすという有名な料理屋によく行くようになりました。車で、銚子駅前を通過して、海べの一山いけすへ行く途中に「熱田産婦人科」がありました。これもなるほどと納得する。そしてあるとき、帰路、いつもと違う山のなかのルートを走ったところ、ある村などで、「熱田ふとん店」を見かけたこともあります。この時も納得です。

### 本当に珍しいのか

学術的には、佐久間英博士という研究家、故人ですが、日本の姓氏の研究の権威者だったそうですが、その先生の、「佐久間ランキングベスト4000」というのがあるが、それによると、多い名字は、1位から、鈴木、佐藤、田中、山本、渡辺、高橋、小林、中村、伊藤、斎藤、多い順にならぶ。熱田は、珍しいので、4000には入らないとおもっていたのですが、意外に順が上にくる。1684番目である。深津、小田山、鷹野、赤堀、吉橋、「熱田」、

長、飯泉、綾部、奥谷、西森、と、けっこうよく見かける姓に挿まれている。

終わりは、3996位から最終の4000には、笹倉、高市、深作、三堀、巻島、とあるが、これも、どこかで見ることが出来そうだ。

このように、佐久間ランキングでみると、数字の上では、「熱田」は、珍しい姓とは言い切れない気もするが、どうなんでしょうか。

イムカのあと、特許庁の外郭団体にかかり、約8年間、平成11年にちょうど40年間のサラリーマン生活を卒業する。

そして、ライブで2人目の「熱田さん」に出会う。定年後の余暇活用のネタをと、八千代市の中心部にあたる京成線八千代台駅前の文化センターを訪ねたところ、そこの女子事務員さんが「熱田さん」だった。

「熱田」姓の有名人には、成田闘争の「熱田」派のボスがおられます。それに、最近のワインブームで、ソムリエのリーダーの中の一人に「熱田」さんがおられるのを雑誌で知りました。

しかし、誰でも知っている超有名な「熱田さん」はおられないし、歴史に名を残した「熱田姓」もないようですね。

このように、「熱田姓」は周知されていないので、そんな事が、珍しい名前に入る理由かもしれませんね。ここまでまとめて、もう4~5年になりますが、その時、これは、私のホームページに掲げておきました。

### 反響

ホームページを見た何人かの知人からは、自分の姓は佐久間ランキングで何番目ですか、という質問が多かつたですね。みな自分の姓については関心が強いようでした。

ホームページを見た友人の1人は、つぎのような長い書き込みをしてくれました。

＊＊＊＊＊＊＊＊＊

大変興味深く読ませていただきました。私の増永姓も福井県以外では少なく札幌にかけて勤務していたころ、郵便局で順番が来て呼ばれ、「増永さんは福井ですか」と聞かれたことがあります。なんのことかとおもっていたところ、その局員は自分の名札を指して増永であることを示し、にこっと笑っていたのを覚えていてます。

さて熱田の地名が、沖縄県の中部、北中城（きたなかぐすく）村にあり、県都である那覇市に個人名で7軒、北中城村に隣接する宜野湾市（普天間神宮があります）に2軒あります。北中城村の熱田には、個人名はなく、熱田工業所、熱田公民館、熱田スーパー、熱田釣具店、熱田針灸院、熱田文具店、熱田地域振興会の名前が電話

帳に載っていました。ご参考に供します。

\* \* \* \* \*

また、見ず知らずですが「熱田」姓の方から、次のようなEメールをいただきました。

\* \* \* \* \*

はじめまして。

自分の結婚を機に、ふと私の生まれながらの姓「熱田」のルーツを探したくてインターネットで熱田善男さんのホームページにたどり着きました。

私は、熱田直美と申します。今年で32歳になります。父は健在で62歳となりました。家族のルーツとなるはずの祖父は、父が1～2歳の時に病死してしまい、私が知る「熱田姓」の親戚は千葉県八日市場市にいる方のみです。ルーツは千葉なのと、ちょっと残念に思っているところです。

私の実家、埼玉県春日部市では意外と我家を含めて4～5軒あります。私が小学校の頃は2～3軒だったはずなので、それぞれのお宅が分家したのでしょう。春日部に住んで30年程になりますが、親戚関係はありません。

社会人になってから、同じく埼玉県吉川市の団地に「熱田酒屋」を見つけました。

「熱田姓」で気になっているところは、やはり、「熱田神宮」との係わりです。しかしながら、インターネットで熱田神宮を調べてみても「熱田姓」にはなかなか当たらないですね。名古屋方面の方が千葉に移住し、縁かつぎのために熱田の姓を頂いてしまったと云う事なのでしょうか。

言いたい事、書き放題の大変申し訳ないメールでしたが、最後に私がであった珍しいと思われる姓は、幸路(こうじ)、高師(たかし)、高張(たかはり)、講神(こうじん)、赤荻(あかおぎ)、牛木(うしき)、西野入(にしのいり)、歩行田(かちた)と、いったところです。またホームページをのぞかせて頂きます。さようなら。  
(02.07.02. 热田直美)

\* \* \* \* \*

これには、私の気持ちと同じだなど、つい微苦笑してしまいました。

熱田神宮と熱田姓の関係が、熱田直美さんも書いておられたが、やはり知りたいですね。

八千代市内の2つの熱田神社に何か手掛かりがないかと、改めて調べてみました。市の歴史にも、この2社は記載してあるが、手掛けにはならないような簡単な記述しかない。

戦前に編まれた千葉県千葉郡誌には、1社は応永元年に創設とある。応永元年は1394年であるから結構古い。信長の桶狭間の奇襲は永禄3年だから1560年、その160年以上も前に、尾張の熱田神宮から勧請したことにな

なる。もう1社は国土地理院の5万分の1の地図による名称は熱田大明神となっているが、千葉県千葉郡誌では熱田神社となっている。しかしそこには、創設の記述はない。

この2社は、いまは、それぞれ八千代市の佐山と平戸という地名の場所にあるが、昔は佐山村と平戸村で、隣村どうしで、お互いに「熱田神社」信仰がされてきたようにおもわれます。

八千代市の場合、「熱田姓」が「熱田神社」の縁につながるものかどうか、電話帳で調べてみると、市内に、「熱田姓」は8つあるが、どれも上の佐山や平戸ではありませんでした。「熱田」という名字は、「熱田神社」には結びつかないようですね。

インターネットで調べると、名古屋の「熱田神宮」の他に、「熱田神社」というのは、全国的に、あちらこちらは存在するようですね。しかし、それが発祥になって、「熱田姓」には発展していないようですね。

### 野栄町／千葉県匝瑳郡野栄町

この話、「熱田姓」のルーツが、野栄町、正式にいうと千葉県匝瑳郡野栄町に、あるのではないかという話。このまま没にすることは惜しいのですが、決め手に欠けるので、ホームページに掲げたまま放置していました。

しかし、なにか、くわしい言い伝えか資料でもあれば、ちゃんとした結論が出せるのではないかとおもい、つい先年（平成14年／2002年）、一度、野栄町のホームページに接触を試みたのですが、まだ公式サイトはなかったのです。個人が作っておられる、野栄町のホームページを見つけたので「熱田姓」に関して掲示板に書き込みをして見ましたが、これという収穫はありませんでした。

そして、平成16年（2004年）8月、改めて検索したところ公式ホームページに行き当たりました。

「私は熱田善男といいます。いまは千葉県八千代市に住んでいますが、出身は京都です。あちらでは、珍しい姓でした。ところで、野栄町には熱田姓がおおいと知りましたが、何か特別な原因や理由があるのでしょうか」と、こんな質問を公式ホームページに記載されている町役場の企画課へEメールを送りました。

その時の気持ちは、ダメもとでした。ところが、翌日、Eメールを読んでみると、スゴイ情報が送られてきました。

### 野栄町に「熱田姓」が多い原因

発端は、現在から1300年以上さかのぼり、九十九里の地から遙か近江の国にとびます。

時は、近江王朝時代。天智天皇が亡くなり、天皇の位

を継がれた大友皇子に対して、叔父の大友皇子が大友皇子に対して兵をあげて攻めてこられました。皆様ご存知の壬申の乱です。天皇家に内紛が起こったのです。結局は、大友軍が大海人軍に敗れてしまい、大友皇子はご自害されました。白鳳元年（627年）7月23日、天皇になって僅か半年、25歳の生涯でした。

その大友皇子のご側室の皇妃であられた耳面刀自は、戦乱を逃れて、琵琶湖から川を下り難波に逃れ、そこから船で実父藤原鎌足の郷里である常陸鹿島へ落ちていかれます。

従者は、中臣英勝（右大臣連中臣金の子）を頭に僅か18名でした。結局、皇妃は、鹿島までたどり着く前に、疲れ果て病に倒れて九十九里海岸に漂着します。そこで、従者や里人たちから手厚い看護を受けたのですが、甲斐もなくお亡くなりになりました。享年20歳、夫天皇がお亡くなりになってから2カ月後の9月23日でした。

皇妃の最後を見取った従者の中に「熱田姓」の人がいたのです。

なきがらを葬ったあと、従者たちは、九十九里に土着して、半農半漁の生活をしながら、子孫代々墳墓を守っていました。そして、その墳墓は内裏塚と呼ばれました。「熱田」姓の人は内裏塚のすぐそばに住んで墓守をします。

長い年月の間に、内裏塚は地名になってしまったのですね。現在、「熱田」姓は野栄町大字野手小字内裏塚に集中しており、90%は「熱田」姓である。

従者は、全員がたまつては地元に受け入れられなかつたとみて、あちこちに分散して土着したようですね。現在の銚子市に当たる地には、越川、広田、名瀬、小浜、名雪、滑川及び泉州の各姓、現在の旭市には大林姓の人々が住んだと伝えられています。従者の頭の中臣英勝の墓所は現在の旭市の泉州の地にあります。

およそ、こういう主旨のEメールでした。

### 蛇 足

このEメールを読んで、「アッ」とおもいました。本当に、お宝を掘り当てたとおもいました。これで、「熱田姓」のルーツは決まったと言えますね。

これから余計な事を書くことになるかも知れませんね。「熱田姓」の熱田善男に免じてお許しください。

耳面刀自の最後を見取った「熱田姓」の人間は、熱田十郎兵衛と忠兵衛だと名前が残っています。多分、熱田親子か熱田兄弟なのでしょう。

注記ですが、耳面刀自は、みみものとじ、と読みます。刀自とは現在語の奥様に近い意味で、耳面の奥様というような意味。独身時代のお名前の、かんなみ姫ともお呼びしたそうです。

内裏塚は、後世いつの頃か、内裏塚古墳という名称で文献に登録されたようです。現在は、内裏塚古墳という名称は残っているのですが、現地には墳墓は消失していてかけもかたちもなく、墳形や長さが記載されている古文書もないのです。不明、不明のままです。

野栄町大字野手小字内裏塚には、内裏塚という地名と、内裏神社と名札のついた鳥居と記念碑、案内板があるだけです。この内裏神社もS41年（1966）に設けられたものなのです。

野手の内裏塚にあった内裏塚古墳は、約400年後の嘉保元年（1094年）、現在の旭市の大塚原に移設されました。その理由は、内裏塚が九十九里の海岸線から約200メートルの位置にあり、台風時には荒波に洗われることもあるので、それを避けるために、海岸線から約500メートルの大塚原に移したと言われています。しかし、約400年も経ったのに、そんな理由で、多大な費用をかけてこんな面倒なことを実行するのは疑問におもわれます。やはり、大塚原は、従者の頭だった中臣英勝の墓所の泉州の地に隣接していることから、この移設は従者達の子孫の勢力争いの結果だったと考えられます。

移設したあの内裏塚は根こそぎ解体して平地にしてしまったとおもわれます。もし、墳墓の形が残っておれば、熱田一族が保守を続けて、今に残っているはずではないでしょうか。

勢力争いに破れた熱田一族は、守るお墓がなくなったあとも、かえって強い団結のもと、内裏塚の地名に大きい誇りを持って、生きていきます。

歴史は進みます。江戸時代にはいると行政の規制は煩わしくなり、土着して半農半漁をなりわいとする人間には、姓を称えることは許されなくなります。庶民は、隠し名字を持つことになります。名字は口称だけになり、改まった席では某村のなにがしと、名字なしということになりました。

そして、明治になり、士農工商を打破して四民平等の理念から発して、新政府は平民に苗字を許す布告を出します。

布告第22号。平民苗字差シ許サレ候旨、明治3年9月19日布告候トコロ、自今必ズ苗字相唱ヘ申スベシ。尤モ祖先以来ノ苗字不分明ノ向キハ新タニ苗字ヲ設ケ候様イタスベク、コノ旨布告候コト、明治8年2月12日。

ところが、この平民苗字許可令も、戸籍をはっきりさせて、微税と徵兵のためという目的が見え見えで、庶民の人気はなかったそうです。

そんなことで、この明治8年の布告は明治3年のものが徹底しないので再度出されたようですね。

それでも、新しく苗字をつけるときに、とんでもないことが起こったのだった。当時はほとんどが文盲ですか

ら、いささか学のある庄屋や住職が名付けをしたのですが、四国のある漁村では、酔っぱらった庄屋がイタズラ半分に、鯖、鰐、鰐、鰐、鯖、大根……と、魚や野菜の名をつけてしまったのです。

鮪さんは教員になったが、生徒からタコタコとからかわれるので、会社員になるがやはりバカにされ、やがて仕事をやめ、貧困の末、行方不明。大根さんは、海軍に入るが、同僚から大根々々とからかわされて、カッとなり相手を殺して、殺人犯になったとか。

和歌山のある村では、勘七という漁師の先祖が一人で見事に鯨を捕らえたので、藩公から鯨という苗字を拝領したと、言い伝えられていた。この時ぞと、村役場へまかり出て、「鯨勘七」と名乗ったのです。この後が大変で、数ヵ月後郡役場から来た通達状には「栗良勘七殿」となっていたのです。大声で名乗ったのも訛りが強すぎて、書記役の役人が聞き違えたのでした。しかし、いつたん登記した姓を改称禁止した布告も出ていたので、といへんなことになる。このお方、県庁に陳情に行き、何度も突き返されるのですが、粘り強く、県庁の玄関の土間に座り込みをつづけて、1年とか1年半とか、とうとう鯨姓を勝ち取ったのはめでたかったのですが、冬季の座り込みが痔を誘発、とうとう生涯これに苦しんだそうです。

ちょっと道草を喰いすぎましたね。

内裏塚の熱田一族の場合は、意気揚々と、全員打ち揃って、役場へまかりでて、「熱田姓」の登記をすませたことでしょうね。

### 全国都道府県電話調査

あと、傍証がためが必要ですね。全国のどこかに、熱田姓が野栄町大字野手小字内裏塚に集中しているように、集中しているところがあるかないか。なければ、内裏塚が、唯一の「熱田姓」のルーツ。もし第二の集中地があればその調査が必要になってくるわけですね。

104.comという無料電話案内のサイトを使いました。他にも、いくつか無料電話案内のサイトはあるのですが、予備調査をしてみると、104.comが、府県単位でくくって検索できるので、目的にあってることがわかりました。ただ、これは職業電話帳で、一般的家庭用の電話は含まれていないので、そのことを割り引いて見ることが必要です。

次は、「熱田姓」と考えられる電話の本数です。

この表を見る限りは、千葉県以外には、「熱田姓」が集中している所は無いと断定できるのではないですか。やはり、ルーツは野栄町と考えられます。

愛知県は熱田神宮の関係で、11本中には、地名由來の熱田と称する電話がかなりあるようにおもいます。

千葉県	26本	長野県	2本
愛知県	11本	京都府	2本
東京都	8本	福岡県	2本
岡山県	5本	北海道	1本
島根県	5本	岐阜県	1本
埼玉県	5本	宮城県	1本
茨城県	4本	神奈川県	1本
沖縄県	3本	大阪府	1本
静岡県	3本	三重県	1本
愛媛県	3本	宮城県	1本
和歌山県	3本		

東京都は、人口を考えると意外に少ないですね。

岡山県と島根県、埼玉県は、やや多いと感じますが特別な集中現象はないようです。茨城県は利根川を挟んで千葉県に隣接しているからではないでしょうか。

沖縄県については、前に紹介した増永さんの情報のとおりでした。この表にない県は0本です。

繰り返しになりますが、この職業電話帳による調査の結論は、「熱田姓」のルーツといえるような集中現象は、千葉県野栄町の他にはないということです。

### 私のルーツは京都府綴喜郡宇治田原町

全国都道府県電話調査では、京都府は2本ですが、その一つが、私の亡父の実家です。京都府綴喜郡宇治田原町大字荒木小字西出59の「熱田工務店」です。

この場所には、小学生時代に何回も訪れています。この地は、あたりいちめん茶畑でお茶の生産地でした。地元では山城茶と称して独自ブランドを強調していますが、宇治茶ブランドが全国区で、宇治田原の山城茶も結局は宇治茶ということになってしまいます。

「熱田工務店」は当時は「熱田木材店」でした。もっと以前の事は、父から聞いた記憶によると、茶農園もやっていたようだし、茶問屋も兼ねていたようです。

私のルーツ話。ある時、「熱田姓」の人が宇治田原に現れます。それは、年若い渡り稼業の木こりでした。昔は渡りの職人は、いや渡りの小姓や侍もいたといわれています、まして渡り職人はいろいろの職種に広くいたようです。木こりも、特別な山持ち地主に雇われている人は少なく、渡りが普通で別に卑しい職業ではなかったようです。「熱田姓」の木こりは、たいへん働き者で、村人誰もが認めるほどでした。しかも、今の言葉で言えば、いけめんで、かっこよく、たいへん品があって、村の若い娘の憧れでもあったそうです。

そんな時、ある茶農園の若主人が急死されて、うら若い未亡人が残されたのです。中に立つ人がいて、その渡

りの木こりは若後家と夫婦になったのです。養子縁組でしたが、義父に当たる人が、その木こりがあまりにも気品があるので、名古屋の「熱田神宮」に縁がある貴種に違いないと、「熱田姓」を受け入れたそうです。さらに、木こりという前歴を生かすために材木店を開かせます。これが、「熱田材木店」のルーツで、私のご先祖さまです。

ながい間、お粗末さまでした。姓に関する情報があればご提供ください。ご自分の姓が佐久間ランキングの何番目かという質問も歓迎します。また、ご意見やご感想

も嬉しいです。よろしくおねがいします。

連絡先：熱田善男／E-Mail : BQZ12305@nifty.com  
〒276-0032・千葉県八千代市八千代台東 6-18-4

#### 参考文献

- ・佐久間ランキングベスト4000：歴史読本第29巻第19号
- ・明治御一新苗字騒動（神坂次郎著）：歴史読本第29巻第19号
- ・熱田姓に関する云われ：野栄町資料

## 談話室

## 最近のスター誌の中に見たロシア鉄鋼業の再生への歩み

増尾誠\*

**From the Recent Numbers of the Journal 《Сталь》 :  
Trend of Restoration of Russian Steel Industry**

by Makoto MASUO

昨年の秋に神田の書店（ナウカ）を通じてロシアの鉄鋼月間誌“スター（Сталь）”の購読を依頼した。このため、今年の初めから毎月我が家に届く。ロシア語は50過ぎから習い始めたにすぎないが、これにのめりこんで、会社退職後もモスクワから送られてくる新聞（ニザビッシャマヤ）購読と毎土曜日の会話クラスへの参加を続けていた。しかし、数年前からの全く仕事の無い生活中で、この唯一の趣味をもう少し生かすことが出来ないかと考えるようになり、少しまじめに技術論文を勉強してみようと思ったのがきっかけである。要点だけをちらちらと見て、タイトルを日本語にし、分からなくなリにもメモをとりながら全論文に目を通した。初めのうちは専門用語だらけで大変だったが、最近は少しなれてきた。と同時に私自身の見方も変ってきた。ロシアや CIS 諸国の鉄鋼企業がこれまで経てきた試練や再生・復活への動きにとても引き付けられた。ここでは、ロシア鉄鋼業界の中で何が起き、どう変わっていこうとしているのかについて、スター誌の中の記事をいくつか紹介したい。

## 1. 特集号の中に企業の歴史を見る

‘90年代の中頃のスターは使用している紙質、印刷ともとても粗悪であったが、最近ではカラー刷りが入り体裁は立派になった。さらに、同時に誌面の構成も変化して、この時期の頃から企業の特集が入るようになったよう思う。この辺の事情は2004年No.4 (p.105-107) の「2003年の編集会議の報告」を見て分かった。「(2003年の) 読者からの収入は、支出の約50%である。また、企業や団体への誌面のブロックあるいは一冊

丸ごとの貸切は、科学技術の広告と共に重要な収入源を形成している」と書かれている。今年のスターを見ても、No.4-7は明らかに企業の記念特集号を含むものになっている。

この種の特集は、最初にディレクター等による挨拶文で始まっている。例えば、No.5の「ザップシップ（西シベリア）製鉄所40周年記念特集号」では、エプラスホールディングの副会長でディレクターのモクリンスキーの「シベリアの巨大鉄鋼業の40年」(p.2-4) という題の自社の紹介で始まっている。概要は、「西シベリア・メタルコンビナート（ザップシップ）は1964年6月に出銘を開始していらい40年になる。(注：ザップシップの有るノボクズネツク市はロシアの東西のほぼ中央の西シベリア南部にある) ここは昔からシベリアおよび極東への建設資材の生産拠点と考えられていたが、銑鋼一貫体制が完成したのは1970年である。最高の生産指数は、1988-1989年に粗鋼805万t、銑鉄627万t、圧延鋼材542万tを記録したが、その後の90年代に経済危機で調停管理下に置かれ、粗鋼生産は325万t未満まで減少した。2001年の11月にエプラス・ホールディングの傘下に入り、競争力のあるザップシップ(OAO <<3CMK>>)として第2の誕生を迎えた。2003年には銑鉄490万t、粗鋼590万t、圧延鋼材530万tに達した。…」と続く。これからも90年代の生産の落ち込みがいかに激しかったかが分かる。

もう一つNo.6の「クリバロースタール・コンビナート70周年記念特集」の例を挙げよう。これは旧ソ連の主要メンバーであったウクライナの最大の鉱山製鉄コンビナートで、鉄筋と線材が主力製品で、今年70周年を迎える。理事長のサクレンコの「発展の歩み」(p.4-7) やこの後に出てくる「高炉生産の進歩」(p.14-17) の報文などから、「本製鉄所は1934年にNo.1高炉、35年に

\*昭33年冶金卒

千葉県習志野市秋津5-2-10

No. 2高炉が稼動したが、その後、41年には戦争でウラルへ疎開し完全に取り壊された。戦後再び復活し、1974年には当時世界最大の5000m<sup>3</sup>のNo. 9高炉を稼動した。78年には年間出銑量1260万tと全ソ生産量の11.2%（ウクライナの生産量の20%）を生産するに至った。このピークを迎えた後は、90年代の後半から採鉱部門が加わって、現在の鉱石採掘から始まる銑鋼一貫生産コンビナートとして発展してきた。2003年の生産量は銑鉄600万t、粗鋼710万t、鋼材630万tで、世界の粗鋼生産順位で26番目を占める」等のことが知れる。この例でも、ソ連時代の銑鉄1260万tから2003年の600万tに半減している。

90年代のこの時期に何が起きたのか？

## 2. 鉄鋼業の民営化と資本の統合プロセス

スターには「経済および新経営法」という記事分類がある。No. 6のこの蘭に掲載されたニージュニータギール製鉄所のマリーニンらの執筆による「民営化と資本の統合プロセス」の記事（p. 107-109）は、上述の疑問にぴったりの答えを与えてくれている。初めは技術誌に似つかわしくない変な記事と思いつつ読み始めたものの、その生き生きとした描写の中に、この期間に受けたロシア鉄鋼業の試練の大変さが身にしみて、最後まで読んでしまった。

少し長くなるが、民営化の大きな流れを記述した最初の部分を次ぎに示す。

「ロシアの市場経済への移行は1990年代の国有財産の民営化で始まった。財産の民営化は資本の原始的蓄財（первоначальное накопление капитала）や横領といった犯罪と結びついた。18-19世紀のイギリス、ドイツ、フランスにおける原始的蓄財の歴史は資本主義関係の厳しさの面を反映している。まさに民営化は、ロシアの市場経済の鉄鋼を含むあらゆる分野での基本的な統合であった。

ロシアの市場経済原理への準備は80年代に始まり、商品・貨幣経済関係の役割の強化、新しい経営法、市場ソーシャリズムの問題、最適管理の数理経済理論、物質刺激に関する論議が行われてきた。しかし、現実の市場経済移行に伴う資本の原始的蓄財の実行プロセスは、かつてない大規模で且つ短期間に集中して行われたことで、世界の投資家を驚かせた。まさに、資本主義先進国では10~100年かけて行われた改革が数ヶ月あるいは時には1日にして行われた。

こうして突然現れた億万長者は、一般的に巨大資本の効果的な利用に無知であった。ロシアの経済の強さや突然手に入れた富の合法性を信じることが出来ず、事業発展のための投資をしなかった。ほとんどの資金は、富の

保険目当てに資本主義先進国に流れてしまった。国有財産の民営化が、改革派に近い人、あるいは高官に買収された人などの一握りの人に占められたことで、人々の収入に天と地ほどの差ができた。現在、国民の富の90%以上が10%の人に握られている。

大多数の国民の収入が少ないと国内市場を狭め、無計画で性急な民営化は、企業の価格自由化と国の破綻と共に、巨大な経済損失、ロシア経済の制御不能化および犯罪化をもたらした。同時に、特別な為替オーケーションによる株の販売ははじめ投資家を引き付けず、大部分の大手鉄鋼金属企業の株は投機狙いのブローカーに渡った。この辺の事情は鉄鋼以外の分野でも同じであった。

90年代の中頃までは鉄鋼業の民営化はほぼ完了した。1996年の時点では、764の鉄鋼金属の企業や組織のうち571が株式化された。・・・」

さらに、鉄鋼金属産業への民営化の影響のもう少し具体的な説明が続く。

「特に深刻なのは、90年代に襲った政治・経済体制の変更による体制的な危機である。国家からの注文の消滅は国内市場を大きく変えた。情勢を著しく悪化したのは価格形成の自由化であった。これは、実質的なインフレと現実の経済局面での資金不足を招いた。鉄鋼金属企業は従来の市場の喪失にショックを受けると同時に、これまで長い間かかる築き上げてきた原料や半製品供給業者あるいは主要な需要家との結びつきを失うことになった。

新しい課題の解決や会社の業績評価の経済的基準の変更は、大部分の“赤”のディレクターの交代を招き、この分野へ若くてエネルギーのあるが経験の浅いリーダーが送り込まれてきた。新しいリーダーの最優先事項は日々の利益の追求であったために、株式会社としての早急な決算業績は求められなかった。工場、設備、研究所、団地、土地、特許、技術、学校、保養所、病院、その他の無価値として民営化された財産は、すべて二束三文で売り出された。

鉄鋼および非鉄製品の製造の低下は1991年から始まり、94年まで続いた。1995-98年は停滞した。金属産業には多数の赤字企業が出現し、設備投資が中止すると共に、破産と財産の再配分が始まった。1998年のループルのデフォルトによる財政危機の後になって、やっと輸出指向の企業にとってダイナミックな発展のインパルスが現れてきた。・・・」

このように、経済危機の下では、昔の国家企業の場所に生まれた株式会社は企業間競争にさらされ、老朽化設備の遊休化や操業中止、投資計画の縮小、残された資源のより野心的なプロジェクトへの再配分といった投資政

策の見直しを迫られた。これを行わなかった会社は深刻な財政危機に直面し、この例として著者らはクズネット製鉄所とザップシップ製鉄所をあげている。一方、大きな損害なしにこれを乗りきることができた大多数の大企業の例としては、セベルスター、マグニトゴルスク、オスカルスキー電気冶金コンビナート、ルースキー・アルミ、スアル（СУАЛ）をあげている。

次ぎに、構造改革の進展に付いては、1995-96年になると戦略計画の立案、統合の進展および金属市場関係者への株式の分配が始まり、1999-2002年の間にロシア金属産業の総合的改革のピークを迎えたと述べている。現在は、多様な形の統合構造が形成されて、内部の経済改革を実行すると共に、必要不可欠の資金を、改革、発展および国内市場の形成に集中させており、鉄鋼業の中でこれが最もうまく行っている企業として、エプラス・ホールディング、マグニトゴルスク、セベルスター、ノボリベックおよびメッシュエルの5大企業を挙げている。これについて、「これらの株式会社は活発な統合を行つたところである。統合は鉱石・石炭の採掘から鋼材や金属製品の製造まで、いやさらには機械産業、鉄道、ガス・石油採掘会社等の需要家まで及んでいる。多分、少數の金融・産業グループに組織化され、自社並びに関連会社や関連組織の経営を、相当な比率の株の所有、商業パートナーシップ契約または融資契約に基づき行うことは適切なことなのであろう」と述べている。

最後に、大規模統合の導入後の次のステップは、再構築の過程であり、国内外の市場の競争に打てるような、縦・横に統合され且つ多角化された強力な構造体を形成するべく改革を進める必要があると述べている。

### 3. 最近の鉄鋼生産の動向

スター No. 5 (p. 112-116) には、モスクワ鋼合金研究所のユーザフらによる1998-2003年のロシア鉄鋼生産活動指数の推移についての詳しい解析結果が掲載されている。これから、まず2003年の粗鋼生産量は6270万tに達していること、98-03年の5年間で生産量は、銑鉄、粗鋼および圧延鋼材が40-45%増、钢管が2.2倍、コークスと鉱石原料が26-39%増となっていることがわかる。また、外国貿易指標を見ると、鋼材の輸出は2770万tで、このうち钢管が43%を占めている。钢管は、1998年は輸出30万t／輸入70万tであったのが、2002年が輸出100万t／輸入70万t、03年が110万t／100万tとこれまでの正味の輸入国から、輸出国に仲間入りしたと報じている。

この報告で最も面白いのは、現在のロシア鉄鋼業の実力を推し量るのに当って、各企業を技術水準の高いものから三つに分類して示していることである。

[グループI] : マグニトゴルスク、セベルスター、ノボリベック

[グループII] : ザップシップ、クズネット、ニージュニータギール、ウラルスキー、メッシュエル、オスカルスキー

[グループIII] : その他の企業

このの解析結果は表1に示すように、2003年のグループIの企業の連鉄比率は89.7%とグループIIとIIIに比べ格段に高く、高い技術力を持つことが分かる。生産効率の最も高い鋼材で比較すると、この3社のロシア国内生産量に占める比率は、钢管が87%，冷延钢管が98%，ブリキおよび被覆钢管が95%に達していると記述されている。設備稼働率を見ても93.8%とグループIIIの65.7%を大きく上回っており、企業間格差がきわめて大きい。

さらにユーザフらは、2002-2003年はロシア国内企業でいくつもの重要な投資プロジェクトの完成時期に当っているとして、これらを列挙している。

(1)マグニトゴルスク：90万t/年の可逆式冷間圧延機および50万t/年の連続溶融Znめっきラインが導入された。2004年には、平炉工場への120万t/年の転炉と200万tの2基のビレット連鉄機の導入を計画しており、これにより完全連鉄化が達成される。さらに20万t/年のポリマー被覆ラインを計画。2005年は3基の条鋼圧延機を導入予定。その後は2床炉の替わりに新しい電炉を計画。

(2)セベルスター：銑鉄の脱硫装置と転炉工場への250万t/年の真空処理装置の導入、さらに電炉工場への120万t/年の連鉄の導入が行われた。2004年には、電炉工場への100万t/年の新しいΦYK C炉および取鍋炉の導入、さらにスラブ連鉄機の改造が計画されている。これが完成する2005年に

表1 2003年の企業グループ別の生産・技術指標

企業グループ (技術水準)	I (高)	II (中)	III (低)	総 計
粗 鋼 (万t)	3020	2370	880	6270
転炉比率 (%)	87.1	52.3	—	61.9
電炉 (%)	3.3	22.0	43.2	16.0
平炉 (%)	9.6	25.7	56.8	22.1
連鉄率 (%)	89.7	32.9	14.8	57.7
鋼 材 (万t)	2720	1830	550	5100
钢管比率 (%)	73.2	10.3	16.6	44.5
钢管中の冷 延板比率 (%)	37.7	1.0	19.6	33.9
設備稼働率 (%)	93.8	82.9	65.7	84.5

(О.В.Юзов и т.д.: Сталь, 2004, №5, p.112-116より)

- は平炉はすべてなくなり、また完全な連鉄体制に移行する。5000熱間圧延機の改造は継続。
- (3)ニージュニータギール：転炉工場に150万t/年の銑鉄脱硫装置が導入された。2004年はここに150万t/年のスラブ連鉄機の操業開始を予定。これにより鉄型铸造は完全に廃止される。今後の2-3年で、転炉工場を改善して生産量を500-550万tに増大予定。これにより平炉は完全に廃止される。
- (4)ザップシップ：No.2転炉工場の130万tの連鉄機の改造がすみ稼動した。現在は同転炉工場の2005年の240万t/年スラブ連鉄設備の契約が済んだ。工場改造計画では2007年までには完全連鉄化へ移行する。
- (5)メッツェル：2004年に転炉工場の100万tの連鉄機が稼動する。さらに、今年第2連鉄の建設と連鉄ビレットへの移行に伴う圧延機の改造が計画されている。
- (6)ノボクズネツクス：電炉精錬の90%が連鉄化されている。30万t/年の取鍋精錬炉が稼動した。また、品種拡大のために、No.2エСПЦの改造が進んでいる。
- (7)ノボリペック：2002-2003年に、第1転炉工場に200万t/年連鉄機と100万t/年の“仕上精錬装置（д о в о д к а）”が導入された。
- (8)オスカルスキー：2002-2003年に100万t/年の中形鋼圧延機が導入された。
- また、钢管製造工場での主要な投資プロジェクトとしては、タガンロックスキーとセペルスキー钢管工場でそれぞれ取鍋精錬炉が操業を開始したこと、ブクサ（ブイクスンスキー）では鉄道車輪製造用の真空装置が2004年に稼動予定と述べられている。なお、ブクサには1067mm径の钢管用の熱間圧延試験設備が入っており、これは将来の1420mm大径钢管製造ラインの重要な部分となる。1420mmの大径钢管の製造は2005年に始まる予定と報じている。
- これらの完全連鉄化を初めとする生産技術の進歩の一方で、市場のニーズに合った製品を供給するための製品開発も活発化しているようである。どうやら量から質への転換はすでに末端の工場まで浸透しているようで、スタイルのレポートからも、世界市場での競争力を得るために国際規格をクリアしこれを凌駕する品質の開発がターゲットになっていることがよく分かる。例えば、「シナルスキー钢管工場の70年」(No.7, p.61)を見ると、ウラルのこの工場は石油・ガス掘削用のポンプ圧縮钢管を生産しているが、1998年に作成した長期計画に基づき、ドイツの機械切削、熱処理、検査・測定および冶金の装置メーカーとパートナーシップを形成し、2000-2003年にかけて全てドイツ製の設備を持った最新の工場を建設した。この製品は、ISO、API、TUVの世界基準による品質保証システムに合致し、20%の輸出比率を保持している。高い技術水準と高品質の製品を提供することで、この工場の稼働率は、ロシアのこの部門の平均が40-50%であるのに対して、唯一95%と高い生産性を持っている。
- また、リスベンスキー冶金工場での「自動車用Znめっき鋼板の製造技術の確立」(No.7, p.39-41)では、1998-99年にインサユール社と共同で電気Znめっき鋼板の開発を始め、ロシアで唯一の高品質の自動車用Znめっき鋼板製造工場になったこと、これにより高品質鋼板の生産量は1998年の6000tから2003年には75000tに増加したことが報告されている。なお、この中で、自動車メーカーのアフトバース（А в т о В А З）社がZnめっき鋼板を採用したのが1998年であること、これ以外のメーカーではZnめっきを採用してなかったので1-2年でコスメティック腐食（さび汚れなど）が、また3-5年で穴あきが生じていたこと、2000年には防食特性として耐コスメティック腐食性が6年以上、耐穴あき性は10年以上と厳しくなったことも説明されている。鉄鋼のような素材部門の成長は関連他産業の市場の形成・熟成と密接に関連しており、钢管製造等はこれから発展する領域であろうが、この製品開発の実績にも見られるように着実に進展し始めている。
- 先の編集会議報告(No.4, p.105-107)の中でも最近は企業と研究所等との共著が多いと指摘されているが、研究所や大学との密接な関係が実を結びつつあるように思う。さらに、ヨーロッパ特にドイツの技術支援や現在の経済が好調なことも追い風となっており、今後の発展に注目していただきたい。

# 研究速報

工学研究科 社会基盤工学専攻

## 地殻工学講座 ジオフィジクス分野

本分野では、物理探査の高精度化とその資源探査及び地盤・岩盤評価、土木調査への利用に重点を置いて研究を推進している。

以下に平成15年度の主な研究タイトルと内容を示す。

### 屈折走時トモグラフィに関する研究

弾性波探査屈折法データを用いて2次元および3次元の地下浅層部を可視化するフレネルボリュームトモグラフィ手法を開発した。数値計算および実際の探査データ解析を行い、その精度や実用性を検討した。また、異なる媒質の境界である屈折面を効果的に可視化するために、2次元解析法を応用して初動走時を外挿することによる擬似3次元屈折法を開発し、激しく変化する屈折面を想定した数値モデルの可視化に成功した。さらに、3次元現場探査データの解析を行い、トモグラフィでは区別し難い屈折面を効果的に可視化することができた。

### 擬似三次元地震探査に関する研究

地下の3次元的情報を含む2次元反射法地震探査記録を利用して、従来の2次元データ処理及び3次元イメージングを行うと、トレース密度が低いことによりイメージ上に扇状の人工的ノイズが生じる。また、海上2次元地震探査ではストリーマ・ケーブルが潮流に流されるなどして、CMP（震源と受振点の中点）が探査測線外に広範囲かつ不規則に分布することが多い。その様なデータに対して、①受振記録を実際のCMP座標に配置したうえで重合し、②データの存在しないエリアについては、構造傾斜モデルに基づいて周辺トレースから擬似トレース作成・データ内挿することで、2次元地震探査記録から擬似的な3次元記録を作成することを試みた。この技術により、データ密度が是正されることで、2次元記録を用いた3次元イメージングの際に生ずる人工的ノイズを抑制できるほか、欠損のある記録や2次元探査記録などから、より詳細な地下の3次元的解釈が可能になる。

### フラクチャを伝播する弾性波のモデリングとイメージング

フラクチャを伝播する弾性波の特性を解明するためには、有限差分法を用いて数値シミュレーションを行った。フラクチャの境界条件には変位不連続理論を用いた。その結果、弾性波がフラクチャを伝播し、P波とS波が反射、透過、変換する現象を確認できた。また、リバースタイムマイグレーションを用いてフラクチャの位置のイメージングを行った。

### 電磁波を用いた物理探査手法および数値計算によるアンテナ解析

ボアホール周辺の地層を精度よく判別するために、簡

便かつ効率的なボアホールレーダのデータ処理方法を開発した。この手法の適用性を評価するために、ボアホール内での電磁波動伝播をシミュレーションする高速かつ高精度の擬スペクトル時間領域差分法アルゴリズムを開発した。その手法を用いてボアホールレーダのアンテナおよび浅層電磁探査のループアンテナから発生する電磁波の放射特性をシミュレーションし、その結果が理論によるものと一致することを確認した。本手法が新しいアンテナシステムの設計に有用であることを示した。

### 南海トラフ熊野灘における海洋MT法データの2次元インバージョン解析

南海トラフ熊野灘地域において短周期型OBEMを9台用いた海洋MT法調査を実施した。得られた海洋MT法データには、電場成分、磁場成分共に広範囲にわたりノイズの混入がみられた。そこで、ノイズの除去、リサンプリング処理の後、解析をおこなった。解析の結果、各測点ごとにコヒーレンシー、見掛け抵抗、位相などのMTパラメータが算出された。MTパラメータを入力データとしてABIC最小化法を用いた最適平滑化法の2次元インバージョンをおこなった結果、2次元の比抵抗構造断面を得た。

### 周波数領域のフルウェーブインバージョンに関する研究

パルス波はトモグラフィの震源として一般的でありデータの取得の方法が確立しており、多くの周波数成分が一度で収録できるという利点がある。パルス波を用いて時間領域で取得したデータを周波数領域のフルウェーブ・インバージョンを用いて解析する手法について数値実験、室内モデル実験による検討、および現場データの適用を行った。

### 個別要素法による地質構造形成過程のシミュレーション解析

数値シミュレーション手法の一つである個別要素法を用いて、インド-ユーラシア衝突のシミュレーション解析を行った。また、シミュレーションで用いた個別要素に関するパラメータと解析対象全体のパラメータの関係を明らかにするために、個別要素法を用いた圧縮試験のシミュレーションを行い、従来試行錯誤によって算出されることが多かった個別要素に関するパラメータを、新たな視点から評価する方法を提案した。

### 蒸気の地層圧入による地表変形の推定に関する研究

地表変化から地中内部の状態を推測するための基礎的研究としてStekette(1958)が提唱した地中の体積ひずみによって生ずる地表変形の理論を用いてシミュレーションを行い、その妥当性を検討した。また、インバージョンを用いて地表変形からの体積変化を推定する方法を検討した。

教授 芦田 譲

助教授 菅野 強

助手 真田 佳典

工学研究科 社会基盤工学専攻

地殻工学講座  
地質工学分野

### 1. 地球統計学の地質工学への適用

地球統計学的手法を用いることで汚染のモニタリングや土壤汚染分布を把握することが可能となる。また、リモートセンシングデータを利用したコクリギング法を用いることでより詳しい汚染分布を推定できる。以上二つの解析結果から、地球統計学的手法は資源開発分野で強力な解析手法になりうることが分かった。

### 2. GIS を用いた地滑り斜面安定評価に関する研究

HEM 調査で得られた比抵抗情報を GIS を用いて可視化し、これと同調査地域における地形情報を一元的に取り扱うことによって、斜面安定性評価システムを構築した。これにより、対象地域の斜面安全性を簡便かつ比較的高い精度で求めることが可能となった。

### 3. タイ浅層における 3 次元地震探査データの地形学的検討

三次元地震探査データを時間断面でスライスすると、相対的振幅差によって視覚的に河川形状を認識でき、さらにそれが時間的に連続性を持って復元できることが分かった。個々のチャンネル砂岩の規模や特性、分布パターンも判別できるので、時間経過による地形の変遷過程と併せて考察することで、石油貯留層としての砂岩体の分布を高精度に決定できた。

### 4. キャップロック型スラビング崩壊に関する研究

北海道第二白糸トンネル岩盤崩落を例に、そのメカニズムについて有限要素法解析を行った。その結果、この崩落はキャップロック型スラビング崩壊である可能性が高まった。また、岩相による物性の違いを考慮することで、その破壊面が下方において形成され、より上方に伝播する過程などを明らかにできた。

### 5. モデル実験を用いた南海トラフ付加体形成過程に関する研究

乾燥砂などのアナログ材料を用いたモデル実験の結果、南海トラフ付加体前縁部の地質構造の特徴を非常に

よく再現できた。この結果から地層流体移動の経路となる不連続面の形成過程を抽出できるため、メタンハイドレートの集積メカニズム解明に有用な成果である。

### 6. 地球統計学を用いた孔隙率分布予測に関する研究

地球統計学を応用し、二次元情報である反射法地震探査によって得られた速度情報を補助データとしてすることで、坑井物理検層による孔隙率情報を空間的に推定することが可能となった。離散的な情報を正確に空間的に拡張できるこの方法は、今後も重要性を増すであろう。

### 7. 複素変数境界要素法を用いたフラクチャ性岩盤内の流体挙動解析

複素変数境界要素法の特徴である計算速度と計算効率の高さを生かし、フラクチャなどを含む岩盤内の流体挙動を短時間に算出できた。さらに流体挙動の時間変化を追うことで、フラクチャを含む岩盤内での明確な流体移動の可視化が可能となった。

### 8. 評点方式による古期堆積岩の岩盤分類基準の開発

北海道シーパロダム基礎岩盤ボーリングコアを使用して、目的変数を岩級区分、説明変数を岩盤分類の分類要素に関する記載項目として数量化 II 類による解析を行った。さらに分類要素ごとに整数値化した評点を設定し、評点方式による岩盤分類基準を作成した結果、的中率は砂岩で 95%，泥岩で 85% であった。

教 授 松岡 俊文

助 手 山田 泰広

工学研究科 社会基盤工学専攻

**地殻工学講座  
地殻開発工学分野**

**<システムロックボルトの支保効果に関する研究>**

ロックボルト支保の設計を合理的に行うには、ロックボルトがその周辺岩盤に与える影響を明らかにし、その効果を定量化する必要がある。また、その支保効果は隣接するロックボルト間の相互作用を考慮に入れて評価されるべきものである。これまでの解析の結果、複数のロックボルトの相互作用により空洞周辺に圧縮応力帯が形成され、これが空洞の安定性に貢献していることがわかった。そこで、トンネルのような円形断面をもつ空洞に対してロックボルト1本1本の影響領域を確認し、ロックボルトの支保効果について考察を行うため、理論解から求めたロックボルトに沿うせん断力分布を外力としてFEMによる応力解析を行った。その結果、空洞周辺の岩盤に塑性領域が存在する場合に、ロックボルトによって生じる圧縮応力領域が広く、その値も大きくなることを確認することができた。この圧縮応力により塑性領域の応力状態は岩盤の破壊条件から離れ、塑性領域の拡大が抑制されるものと考えられる。

**<トンネルの覆工設計および変状対策工設計に関する研究>**

都市部トンネルの覆工設計には、地下水位の回復による水圧の作用、近接工事による影響、地震の影響等を考慮する必要がある。本研究では、開削工法より周辺への影響が少なく、シールド工法より経済的であることから採用事例が増えている都市NATMの覆工設計法について、土被り、回復水位、地盤定数、覆工厚、鉄筋量を変数としたパラメータスタディーを行い、安全で経済的な覆工設計手順を示した。また、トンネル覆工変状に対しても適切な対策工を設計しその評価を行うためには、地山の時間的な変形挙動を評価してトンネル覆工に作用する荷重の変動を考慮する必要がある。そこで、地山の強度劣化によって覆工に変状を生じている3つのトンネルに対し、地山の強度劣化モデルを適用して地山変形の時間依存性を考慮した解析を行った。解析では、トンネル内空変位のヒストリーマッチングにより強度劣化モデルに与えるパラメータの値を決定し、そのパラメータを用いて変状対策工の評価を行った。その結果、それぞれのトンネルに対して、内空変位を指標とした実務にも適用できる対策工の評価を行い、適切な対策工を示すことができた。

**<数値多孔質モデルの構築とその評価・応用に関する研究>**

近年、原油・天然ガスの開発とその地中貯蔵、温室効

果ガスの地層隔離など、岩盤の間隙流体の流動挙動と間隙構造の変形特性を連成して解く必要のある問題が重要なになってきている。計算機の能力が向上していくなかで、岩盤の間隙構造に基づく適切な数値多孔質モデルを用いて間隙流体の流動特性や間隙弾性パラメータに及ぼす間隙構造の影響を調べることは、このような問題に対する有効な研究手段の一つとなるものと考えられる。二点相関法は、このような数値多孔質モデルを構築する手法の一つである。しかし、この方法で構築されたモデルの間隙率と間隙分布の共分散関数は実多孔質体のものと一致させができるが、実多孔質体が示す間隙の貫通性(連続性)や間隙寸法の分布特性の一一致は保証されない。そこで、本研究では二点相関法によるベレア砂岩の数値多孔質モデルに対し、間隙の貫通性と間隙寸法の分布特性を調べ、その数値多孔質モデルの検証を行った。その結果、数値多孔質モデルの間隙の貫通性、実多孔質体との間隙寸法分布の類似性が確認でき、二点相関法による数値間隙モデルが妥当であることを確認することができた。今後、このモデルを用いて、間隙流体の流動特性や間隙弾性パラメータの評価を行う予定である。

**<炭酸ガスの地層貯蔵に関する研究>**

炭酸ガスの排出量を削減して地球の温暖化を防止する方法の一つとして、炭酸ガスを地中の帶水層に圧入して貯蔵する方法が有望視されている。しかし、炭酸ガスを効率的に貯蔵するために炭酸ガスの帶水層内における飽和拡散挙動を詳細に検討するとともに圧入方法についても検討しておくことが重要である。そこで、多成分系油層シミュレータを用いて(i)時間経過による炭酸ガスの飽和率分布、(ii)浸透率の違いによる炭酸ガスの飽和率分布の変化、(iii)水平圧入井の効果、(iv)水抜き井の効果、(v)帶水層内に低浸透率層がある場合の炭酸ガスの飽和拡散挙動、の5項目についてシミュレーションスタディーを行った。その結果、炭酸ガスは帶水層の上部に移動し水平方向の拡散はほとんどみられないこと、炭酸ガスの拡散は帶水層の鉛直方向浸透率に影響されること、水平井は垂直井より圧入レートを大きくできる点で有利であること、周囲が閉じた帶水層に対しては、炭酸ガス圧入に伴う圧力上昇を抑制し圧入量を増やすための手段として水抜き井を設けることが有効であること、炭酸ガスは帶水層内にある低浸透率層を回りこむようにして移動して帶水層上部に達することなどがわかった。

今後、より実際の帶水層に近いモデルに対してシミュレーションを行うことで、さらに詳細な検討を行っていく予定である。

教授 斎藤 敏明  
助教授 朝倉 俊弘  
助手 村田 澄彦

**地殻工学講座  
ジオメカトロニクス分野**

**ガイド波を利用した埋設長尺部材の超音波検査**

ロックボルトやガス管など地盤中に埋設された長尺鋼材の劣化状況を、露出された一端から導入した超音波によって検査する方法を考えた場合、導入された波動が周囲の岩盤や土などに散逸してしまうために、検査可能距離が制限されるという問題点がある。しかし、有限な断面形状を持つ長尺部材には、ガイド波と呼ばれる特徴的な波動伝播形態があり、それらには周波数と位相速度に一定の関係（速度分散特性）をもち、断面内の変位分布が異なるいくつものモードが存在する。本研究では、周波数と波動モードを選択すれば、周囲媒体への散逸ができるだけすることができ、それによって検査可能距離をかなり遠方まで伸ばすことができるとの着想の元に、埋設丸棒を伝播する超音波ガイド波について基礎的な検討を行った。まず、丸棒を伝わるガイド波の速度分散特性と断面内変位分布について理論解析を行い、合わせてレーザードップラー振動計による伝播波動の直接計測を実施して、理論解の妥当性を検証した。さらに、丸棒が埋設された場合について、ガイド波の速度分散特性と断面内変位分布を理論的に求め、周囲媒体よりも丸棒内の波動エネルギーの方が大きいと予測される波動モードと周波数の抽出を行った。また、石膏内に埋めたアルミ棒を使った実験によって、選択したモード・周波数の組み合わせが実際に周囲媒体への波動の散逸が少ないことを確認した。

**多重解像度解析にもとづく非破壊検査信号処理に関する研究**

当研究室では、近年著しい発展を見せている多重解像度解析（MRA）にもとづく非破壊検査（NDT）信号のノイズ除去、異種NDTデータの融合、NDT信号に基づく欠陥分類の3つについて、様々な手法の開発と改良を進めている。MRA理論（特に離散ウェーブレット変換）をベースとしているのは、それが信号に含まれる特徴的な情報を様々な解像度レベルに分離して抽出できるという利点をもっているからである。まず、ノイズ除去に関しては、解像度ごとのMRA係数に対して適用する新しいthresholding技術を提案した。この技術は、欠陥信号からの寄与と考えられる比較的大きな値の係数を保持し、雑音あるいは背景データから寄与と考えられる比較的低い振幅の係数を効果的に削除する手法を提示するものである。第2のデータ融合は、複数の種類の試験法によって得られた信号を、欠陥抽出における互いに相補的な情報と見なして、それらを組み合わせるもので、それぞれの試験法の利点が強調された精度よい評価結果を得ることを目標としたものである。融合方法の基本的手段としてMRAを利用すること、すなわち、それぞれのデータを解像度ごとに強調処理し、欠陥情報を優位に含んだ解像度レベルのみで融合させるという基本的処理プロセスの提案を行っている。また、欠陥分類では、MRAを特徴抽出器として利用し、それとニューラルネットワークによる分類器を組み合わせる方式を提案し

た。ここでは、入力データに含まれる有意な特徴を適切に抽出できるMRAの能力を最大限に利用しており、実験によって得られた1次元信号や2次元画像に対してこの方法を適用した結果、極めて貧弱なSN比しか持たないNDT信号に対しても十分信頼できる結果が得られることが示された。

**レーザー超音波法による面状領域の非破壊検査**

構造物壁面の剥離や亀裂などの劣化を検査するにおいては、大きな面状領域を短時間に一括して検査できるような手法の開発が望まれている。しかし、サーモグラフィーやマイクロ波を利用する方法は、その分解能において十分とはいえない。また、従来の超音波法では、対象物への超音波の導入と検出におけるカップリングの問題が避けてとおれず、広域一括検査への展開は極めて困難といわざるをえない。当研究室では、これらの問題点を完全に克服できる方法として、レーザー超音波法を用いる手法について基礎的な検討を行っている。提案している検査手法は、強力パルスレーザー光による対象物へのスポット的な超音波の励起と、レーザードップラー振動計による対象表面の波動変位の直接計測を組み合わせたものであって、完全な非接触性と波動励起・検出点のスキーリングが容易であることを特徴とするものである。本年度は、プロトタイプ的な検査システムの構築と剥離検出を目的とした実験を行った。アルミ板の背面にコンクリートを膜状に貼り付け、その一部を人為的に剥離させた試料を対象とした実験では、波動エネルギーの面状分布によって剥離部分の形状が正確に同定できることが示された。

**吊橋ハンガーロープ端末部検査のための磁歪型超音波法に関する検討**

当研究室では、本四架橋などの大型吊橋のハンガーロープに対して、その腐食劣化を非破壊的に評価できる検査法の開発に取り組んでいる。これまでに、ハンガーロープの通常部分については、全磁束法と名付けている磁気検査手法の開発・改良を重ね、すでに実用的かつ定量的な検査法との認知をうけて、実検査に利用されている。昨年度から、端末固定部など全磁束法では検査困難な箇所への適用を前提として、磁歪型超音波を用いる方法の開発に取り組んでいる。この方法は、磁歪効果を利用してワイヤロープ内に波動を非接触で発生・検出する方法で、端末部ではその反射波の性状変化にもとづいて、劣化度合を判定できるものと期待している。本年度は、磁歪超音波の基本的な特性についての実験を実施し、磁歪効果によって励起される超音波がロープ断面内にほぼ一様であっても、より構造であるがゆえに、伝播の過程における素線間での波動のやり取りのために、超音波強度が表面ほど強くなる傾向のあることを見出した。また、一部を人工的に腐食させたロープ試料によって、腐食部分を通過する際の波動エネルギーの減衰度合いが、腐食による断面積損失率と良い対応を示すことを確認した。

教授 朝倉 俊弘

助教授 塚田 和彦

助手 李 令琦

工学研究科 都市環境工学専攻

## 地殻環境工学講座

地殻環境工学、資源開発システム工学、地下開発工学を主たる専門分野とする当講座においては、地下構造物の建設と地盤環境に関する種々の研究テーマを取り上げ、研究を推進している。以下に研究速報として研究テーマ5例について、研究内容の要旨を報告する。

### 1. 岩石の破壊過程における AE とその挙動に関する研究

将来、大深度・高地圧下の岩盤内に高レベル放射性廃棄物地層処分場の建設が予定されている。高地圧下においては空洞周辺に形成される掘削影響領域と岩盤の応力変化の関連性が極めて大きいことが知られている。そのため、応力とその変化に着目した空洞の計測管理が必要となる。地下発電所のケースヒストリーより岩盤微小破壊音 (Acoustic Emission: AE) が応力変化を鋭敏に検知することが徐々に明らかになってきた。そこで本研究では AE によって応力と破壊の状態を判定するために、高剛性三軸圧縮試験を実施し、AE パラメータを分析するとともに、粒状体個別剛体要素法によるシミュレーションを行うことで破壊現象と応力・AE の関連性を検討した。

### 2. 岩盤大空洞周辺の掘削影響領域の応力変化と AE に関する研究

放射性廃棄物地層処分空洞などの大深度・高地圧下の岩盤空洞の掘削においては、周辺岩盤に形成される掘削影響領域 (EDZ) と岩盤の応力変化の関連性が極めて大きい。この場合、岩盤の応力評価に基づく EDZ の計測管理手法と高地圧下の岩盤空洞に対する新しい設計手法の構築が必要となる。本研究においては、AE 計測に基づく空洞の情報化設計・施工システムの提案を目的として、このシステムの基本となる岩盤の応力変化・AE・破壊現象の関連性を解明するために、東京電力(株) 神流川発電所本体空洞掘削時の計測結果の分析ならびに粒状体個別剛体要素法による空洞解析を行った。

### 3. TBM による大断面トンネル掘削時の 3 次元地質モデルの構築法に関する研究

近年、掘削断面積が 200 m<sup>2</sup>にも及ぶ大断面トンネルが掘削されており、延長の長いトンネルを安全かつ経済的に施工するには、TBM 導坑先進工法が適しているとされている。日本のように複雑な地質性状である場合、掘削の各段階において、切羽および切羽周辺を常に安定させることができることが求められ、地質性状に応じた補助工法や支

保工の選定が重要となる。本研究では、地質性状の予測が可能で、合理的な支保設計に有用となる力学的 3 次元地質モデルの構築法の提案を目的とし、実際に得られた地山データを用いて提案した構築法の適用性を検討した。

### 4. 高圧ガス貯留岩盤タンクに対する水封機構の設計法に関する研究

高圧液化石油ガス (LPG) 岩盤貯蔵タンク、圧縮空気エネルギー貯蔵施設 (CAES) をはじめとする高圧ガス貯蔵岩盤タンクの建設が進められているが、これらの施設では貯蔵圧が高いため、岩盤内の既存亀裂の開口および新規亀裂の発生・進展の可能性や貯蔵ガスの漏気の可能性があり、岩盤、地下水および貯蔵ガスの挙動を考慮し、空洞の力学的・水理学的安定性を検討したうえで、水封機構を設計する必要がある。本研究では、高圧ガス貯蔵岩盤タンクに対する水封機構の設計を合理的に行うため、岩盤-地下水-貯蔵ガスの相互影響を考慮した応力・浸透流連成解析手法を構築し、この解析手法を用いた水封機構の設計手法を提案することを目的として研究を行った。

### 5. 重金属汚染土壤に対する動電学的浄化技術に関する研究

近年、わが国では外資系企業による欧米式の環境リスク評価法の導入などを契機に、平成15年2月には土壤汚染対策法が施行され、土壤汚染リスクへの社会的、経済的認識が高まりを見せている。こうした状況の中で、汚染土壤対策技術の研究・開発が活発に行われている。研究開発段階の対策技術の一つに動電学的土壤浄化技術がある。同技術は、汚染土壤に微弱な直流電流を流し、界面動電現象を誘起して汚染物質の除去を行う技術である。しかし、地盤中で起こるプロセスの複雑さ故に、汚染物質や地盤特性による効果の違い、効率の良い浄化を行うための操作因子について未解明な点が多く、系統的な研究・開発が進められている段階にあるのが現状である。本研究では、電流(電位)によって発生する移流を流量(水頭)と置き換えて考える簡単な数値解析手法を提案し、この手法を用いて得られた土壤酸性化挙動から、浄化プロセスおよび効率的な浄化を行うための操作因子の検討を行った。また、重金属としてカドミウムの浄化予測解析から、動電学的土壤浄化システムの基本設計を構築した。

教授 青木 謙治

助教授 新苗 正和

助手 水戸 義忠

エネルギー科学研究所 エネルギー応用科学専攻

資源エネルギー学講座  
資源エネルギーシステム学分野

## 超軽量ポーラス金属材料の開発

環境負荷の低減および省エネルギー化の要求を受けて各種材料の革新的な軽量化が望まれる中、ポーラス金属材料は構造材、衝撃吸収材、防音材、フィルタ、医療器具等への応用が可能な新しい軽量素材として、注目を集めている。既存のポーラス金属はミリオーダーの孔径を有するが、孔径の微細化・分布制御を実現すれば、強度や衝撃吸収特性などが大幅に向上升し、ポーラス金属材料の用途拡大、ひいては環境負荷の低減・省エネルギー化に貢献すると考えられる。そこで本研究室では、マイクロメーターオーダーの微小な孔径を持ち、80%以上の高気孔率を有する超軽量ポーラス金属材料の創製を目指している。

純 Al 粉末と整粒した NaCl を十分に混合し、Al 粉末を有効に焼結できる放電プラズマ焼結 (SPS) 装置を用いて圧粉・パルス通電加熱した。加熱後の試料を温水に浸して NaCl を除去することで、NaCl の粒径に対応した孔径を持つマイクロポーラス Al を得ることに成功した。気孔率は約 80% である。現在、焼結条件（温度・圧力・通電時間・純 Al 粉末粒径）がマイクロポーラス Al の圧縮特性に与える影響を検討し、SPS による最適焼結条件を明らかにしつつある。

## 生物起源珪藻土からの機能性材料用シリカの精製

現在、新しい高純度シリカ原料として、非晶質シリカを主成分とする珪藻土が注目されている。これまでの研究により、不純物元素含有量の少ない湖成層産珪藻土から、非晶質シリカの特性を利用した湿式の高純度シリカ精製プロセスにより、99.999% 以上の高純度シリカが精製可能であることが確認されている。しかし、その精製プロセスにおいて、シリカに混入する微量元素、Al, Fe, Na, K などの溶出起源は詳細に検討されていない。そこで、大分県庄内地区における様々な品位の湖成層産珪藻土試料に対して、全量分析、X 線回折分析、EDX による元素分析を行うことにより、不純物となる微量元素の起源について検討した。その結果、Al, Na, Ca は斜長石として、Fe は酸化鉄および硫化鉄として、K, Mg は斜長石などの風化生成物である種々の粘土鉱物として、P は Al, Na, Ca, K, Mg に付随する形でそれぞれ珪藻土中に存在していることが明らかとなった。したがって、これら碎屑物と非晶質シリカからなる珪藻殻を選別することにより、効率的な不純物除去と高純度シリカ精製の可能性が示唆された。

メタンハイドレート層への CO<sub>2</sub> 貯留に関する基礎的研究

近年、既存のエネルギー資源の枯渇・地球温暖化という観点から、メタンハイドレート鉱床の開発において、メタンガスの回収とあわせて、CO<sub>2</sub> をハイドレート化し、地中に固化・貯留しようという構想がある。そこで本研究では、低温・高圧セルを用いメタンハイドレートから CO<sub>2</sub> ハイドレートへの置換現象を偏光顕微鏡下で直接かつ連続的に観察するとともに、ラマン分光測定により半定量的に評価し、ハイドレートの置換挙動に関する基礎的データの取得を試みた。

その結果、メタンハイドレート分解後に CO<sub>2</sub> ガスを圧入したところ、短時間で CO<sub>2</sub> ハイドレートが生成した。これはハイドレートの籠状構造に由来する水分子クラスターが、ハイドレート分解後も残存するため容易に CO<sub>2</sub> ハイドレートが再生成したものと考えられる。また、メタンハイドレートが安定した状態で CO<sub>2</sub> を圧入した場合でも、CO<sub>2</sub> ハイドレートの生成が確認された。これは先ほどの現象とはメカニズムが異なり、ハイドレート結晶中のゲスト分子のガス置換が行われたものと推察される。

## 岩石の破壊にともない発達するマイクロクラックの観察

地下空間を安全かつ長期的に利用するためには、地下における岩石の挙動、とくに破壊機構を解明することが重要である。岩石の破壊にはマイクロクラックの発生および成長が大きく関係していると考えられている。そこで本研究では、花崗岩試料を用いて破壊に至るまでの特徴的ないくつかの段階まで一軸圧縮試験を行い、試験片中に形成されたマイクロクラックを蛍光観察法によって可視化し、詳細な観察を行った。

その結果、載荷初期にはマイクロクラックの生成、伸長はほとんど認められなかったが、載荷が進むにつれて、黒雲母粒子の境界から周囲の石英、長石粒子を切って載荷軸方向に伸びるマイクロクラックが局所的に増加する様子が観察された。さらに、破壊した試料を観察すると、破断面付近で載荷軸方向に伸びる長いクラックが高密度で認められた。一方、それ以外の部分では未載荷の試料と比べて顕著な変化はみられなかった。これらのことから、破壊の進展は、まず黒雲母周辺で局所的にマイクロクラックが生成、伸長し、その後クラック密度が高くなることで脆弱化した領域が形成され、それらをつなぐようになに断面が形成されるものと推測された。

教 授 馬渕 守

助教授 楠田 啓

助 手 陳 友晴

エネルギー科学研究所 エネルギー応用科学専攻

**資源エネルギー学講座  
資源エネルギープロセス学分野**

**固体輸送を目的とした曲がり部分を持つエアリフトポンプの特性**

空気の浮力をを利用して液体を輸送するエアリフトポンプは、空気圧縮機以外に機械的な駆動部分を持たないため、構造が単純で、メンテナンスが比較的容易であるという長所がある。そのため、液体のみならず固体粒子の輸送にも適用が考えられている。エアリフトポンプは作動原理から考えると垂直管を使用した場合に最もポンプ効率が良い。しかし実用面から考えると、曲がり部を含む管の使用は必然であり、曲がり部をもつ管のポンプ特性に関する研究が必要不可欠である。本研究では、実験室規模の固体粒子の輸送を目的としたエアリフト装置を用いて、ポンプ特性を実験によって研究した。曲がり部内を流れる混相流の流動特性を詳細に観察し、固体粒子の輸送が可能な限界操業条件について検討を行った。

(大村 歩、現：電源開発)

**高張力鋼板の成形限界予測への延性破壊条件式の適用**

高張力鋼板の自動車部品への利用は、省エネルギーを目的とした軽量化のニーズによって増加している。高張力鋼板は従来の材料と比較して成形性が劣ることは良く知られているが、成形限界に関する基礎的なデータは不足している。また、破壊に至るくびれなどの兆候が不明瞭なため、従来の成形限界予測法が適用できない場合が多い。そこで、本研究では、数種類の高張力鋼板に対して、種々の条件で2軸張出し試験を行ない、破壊が発生する面内ひずみをプロットした成形限界線図を作成した。つぎに、成形限界線図を用いて、幾つかの延性破壊条件式を評価し、高張力鋼板に最適な式を見出した。CockcroftとLathamによって提案された式が、 $r$ 値の影響も含めて、最も実験結果と一致した。その条件式を導入して、円筒深絞りの加工プロセスを有限要素法によって解析し、成形限界を予測したところ、実験結果と良好に対応することを確認した。

(松本淳、現：日立製作所)

**固体平面に衝突する水膜噴流の実験的研究**

液体衝突噴流は衝突点近傍で非常に高い熱伝達を実現できるため、高温物体の冷却等に広く用いられている。冷却特性を高精度に予測するには、衝突噴流の流れ場お

よび温度場を十分理解することが不可欠である。本研究では、スリットノズルから鉛直下方に噴出するカーテン状の水流を滑らかな固体平面に衝突させ、その固体面上に形成される薄い水膜流の流れに着目した。流れの構造はレーザドップラ流速計による局所速度の測定および写真観察によって研究し、水量、固体平板の大きさ、噴流と固体平板面との衝突角などの因子が流れ構造に及ぼす影響を調べた。その結果、実験を行ったスリットノズル出口におけるレイノルズ数が1400から2000の範囲では、液体の粘性が固体面上の液膜内に形成される速度境界層の発達に大きな影響を与えることが明らかになった。

(川村淳一、現：国際石油開発)

教授 宅田 裕彦

助教授 藤本 仁

エネルギー科学研究所 エネルギー応用科学専攻

**資源エネルギー学講座  
宇宙資源エネルギー学分野**

宇宙開発は、人類に新たな活動領域をもたらし、有限な地球に存在する人類に限りない将来をもたらすであろう。資源エネルギー科学と宇宙工学との融合により、かけがえのない地球環境の保全を視野に入れながら、「宇宙インフラストラクチャーと宇宙環境における輸送現象」、「宇宙ステーション及び地上における非平衡電気化学プロセシング」、「“地球にやさしい”資源エネルギープロセシングとリサイクリング」等をテーマとして、宇宙資源エネルギー工学の構築・発展を目指している。

**1) 気泡と微粒子の衝突に関する数値的研究**

水質浄化や浮遊選鉱法では、浮力により液体中を上昇する気泡を利用して不純物や有用鉱物粒子を分離する方法が採用されている。気泡表面への液体あるいは固体微粒子の捕収は、大きく分けて二つのプロセスがあり、一つは気泡と微小粒子の衝突、もう一つは分子レベルの特性に関連した現象である。当研究室では、その物理的プロセスである、親水性あるいは疎水性粒子と気泡の衝突を流体力学的に理論解析を行っている。

**2) 光触媒反応を利用した環境浄化技術に関する基礎的研究**

近年、 $TiO_2$ の光触媒反応は、廃水中の微量有機物の除去、特に人体や生態系に直接的に有害な有機物を除去する方法として注目されており、様々な研究がされている。一方、それ以外の有機物は、それ自体は無害であるものの高濃度で排出すると、水溶液中の化学的酸素要求量の増加、ひいては河川・湖沼の富栄養化を招くため、閉鎖性水域における排出規制が年々厳しくなっている。したがって、希薄、濃厚に関わらず排水中に含まれる有機物の迅速で経済的な除去・分解技術の開発が望まれている。当研究室では、主として産業排水中の有機物低減化を目標とし、比較的弱い紫外線を用いた場合の $TiO_2$ 光触媒作用による有機物分解の可能性について界面化学的な見地から基礎的な検討を行っている。

**3) リサイクル要素技術**

浮遊法によるサブミクロン微粒子の濃縮、研磨屑からの研磨剤微粒子の分離回収などの研究・プロセス開発が進行中であり、多くの成果が得られている。また、電気自動車普及のための社会的条件を整備する要求の一環として、希土類一遷移金属間化合物のリサイクル設計シス

テムの基礎である晶析逆抽出法とそれに続くCa還元法を利用する金属間化合物再生プロセスに関する研究を実施中である。更に連続製錬プロセス開発を目指して、その基礎としてインジェクション操作に伴う固一気一液3相流と融体間の熱及び物質移動速度に及ぼす粒子濡れ性の影響も研究中である。

**4) 非平衡エネルギー材料プロセシング（地上実験）**

太陽電池発電や電気自動車の普及をめぐって非平衡反応場を制御して大面積エネルギー変換貯蔵デバイスの界面微細構造を創製する電気化学プロセシングに期待が集まっている。ULSI電析銅配線技術、化合物半導体誘導共析反応やLi金属負極でのデンドライト成長の現象論に関連して多成分イオン移動速度と表面吸着速度のカップリングを研究している。同様にプラズマCVDやICBなどの乾式成膜過程でも非平衡過程が複雑に絡み合い、特異な界面構造が創製されている。これらの電気化学及びプラズマプロセシングにin-situ測定やモデリング技術を導入してエネルギー変換貯蔵デバイスのための新しい非平衡成膜プロセシングの研究を行っている。本研究は次項の地上実験としての側面を併せ持っている。

**5) 宇宙ステーションでの非平衡電気化学プロセシング**

宇宙空間での非平衡電気化学界面現象の理解はスペースシャトルや国際宇宙ステーション内のエネルギー変換及びライフサイクルの維持からも重要である。落下塔に搭載したレーザー干渉計で微小重力場の電極界面現象をその場計測した。電析や陽極溶解反応などの電気化学界面現象に及ぼす重力レベルの影響が検討中である。また太陽電池一水電解一燃料電池から構成される再生型燃料電池システムの動作特性に及ぼす重力レベルの影響を調査するために、水電解電極表面を観察検討中である。落下直後から電極面上に安定気泡層領域が形成されることによりIRドロップが増大した。更に宇宙空間における太陽エネルギー変換貯蔵技術や資源エネルギー工学の融合を目指して、微小重力環境はもとより遠心力利用過重力場及び超強力磁場中の電気化学界面現象についても研究を行いつつある。

教授 石井 隆次

助教授 福中 康博

助手 日下 英史

工学研究科 材料工学専攻

**材料設計工学講座****[3d遷移金属化合物におけるL<sub>2,3</sub>-edge XANES及びXMCDの理論計算]**

3d遷移金属化合物の物性を知る上で、3d電子のキャラクタリゼーションが欠かせない。3d遷移金属L<sub>2,3</sub>-edge XANES(X-ray absorption near-edge structure)及びXMCD(X-ray magnetic circular dichroism)は遷移金属イオンの電子状態・磁気状態を与える電子分光法として広く応用されている。しかしながら、その解析は経験的パラメーターを用いた理論計算に頼っているのが現状である。本研究では、3d遷移金属L<sub>2,3</sub>-edge XANES,XMCDの第一原理計算による解析手法の確立を大きな目的としている。3d遷移金属L<sub>2,3</sub>-edge XANESに関しては、近年当研究グループで開発された相対論・多電子系電子状態計算手法により非経験的にスペクトルを計算し、解析する事が可能となっている。本研究では上記の計算手法とL<sub>2,3</sub>-edge ELNES(electron energy-loss near edge structure)とを組み合わせて、LiNiO<sub>2</sub>及びその関連化合物におけるNiの電子状態について調べた。理論スペクトルはNiの電子状態の相違に由来した実験スペクトルの相違を見事に再現し、本計算手法が、3d遷移金属L<sub>2,3</sub>-edge XANES/ELNESによる化学状態分析をする上で有用な手法である事が示された。また、3d遷移金属L<sub>2,3</sub>-edge XMCDの計算手法の構築を目的として、磁場の効果を取り入れた多電子系電子状態計算手法の開発を行った。これにより、基底状態におけるL<sub>2,3</sub>-edge XMCD、軌道角運動量、スピントル運動量の期待値が精度良く算出され、本手法の3d遷移金属L<sub>2,3</sub>-edge XMCDの非経験的な解析手法としての有用性が確認された。

**[析出核生成による自由エネルギーの第一原理計算]**

核生成は組織発展の最も初期に起こる現象であり、後に続く組織の時間変化を支配する。しかし、核生成による自由エネルギー変化の信頼できる予測は非常に困難である。従来の古典的核生成理論を用いた取り扱いでは、バルク状態の界面エネルギーを小さなクラスターに適用することによって解析を行っており、正確であるとはいえない。そこで、第一原理から直接的かつ精密に核生成による自由エネルギー変化を求める手法を開発した。古典的核生成理論では、自由エネルギー変化は駆動力と界面エネルギーの2つの項から成り、析出核が小さいと界面エネルギーが駆動力に優越し活性化過程が現れるとする。これに対し、本研究では駆動力をエンタルピーの項とエントロピーの項に分け、エンタルピーと界面エネルギーをまとめて第一原理計算で求めた。まず初めに歪が小さく、析出核が球状・整合的であると報告されているFe-Cu系に自由エネルギーの計算手法を適用した。その

結果、核生成の活性化エネルギーの山は、孤立して分散している溶質原子の凝集に伴うエントロピーのロスが原因であるという重要な知見が得られた。また、計算された臨界原子数、活性化エネルギー、界面エネルギーは、古典的な取り扱いによるものと非常に近い値となった。さらに3元系への拡張としてFe-Cu-Ni系への適用を試み、Ni添加による影響を原子レベルで調べた結果、Fe-Cu2元系の場合に比べ活性化エネルギーが減少することがわかった。これは、母相とbcc-Cuクラスターとの界面におけるNi原子の偏析に伴う界面エネルギーの減少によるものである。同様に原子空孔を導入すると、Cuクラスターの内部に原子空孔が位置することによって活性化エネルギーが減少し、Cuクラスターの析出が促進されることが明らかになった。

**[ZnO中3価ドーパントの状態解析]**

ZnOにAlやGaなどの3価元素をドープした系はn型伝導性のワイドギャップ半導体であり、透明導電性材料などとして工業的にも広く用いられている。しかし、ドーパントの局所環境についての詳細な情報はなく、試行錯誤的に物質合成を行っているのが現状である。経験則のみに頼るのではなく、的確な指針に基づいた材料設計を行うためには、ドーパント近傍の局所状態についての情報が不可欠である。本研究では、3価元素を高濃度にドープしたZnO薄膜を系統的に作製し、理論計算と実験を併用してドーパントの局所状態を理解することを目的とした。出発原料のZnO粉末中に1~10at%のドーパント元素を酸化物の形で添加したセラミックス材をターゲットとして、パルスレーザー堆積法により石英ガラスやサファイア単結晶基板上に薄膜試料を合成した。これらの試料についてX線回折法、電子線回折法、透過型電子顕微鏡法による評価を行った後に、Al-K端でのX線吸収端近傍微細構造(XANES)を分子研UVSOR-BL1Aにて測定した。一方、Al近傍の格子緩和と内殻空孔効果を取り入れた第一原理計算からXANESの理論スペクトルを求めた。X線回折実験からAl添加系ではAl濃度25at%以下、Ga添加系ではGa濃度16at%までc軸方向に優先配向したウルツ型ZnO単相となることがわかった。Al濃度25at%の薄膜についてのAl-K端XANESは、ウルツ鉱型ZnOにAlを置換固溶したモデルでの理論スペクトルと一致した。この試料について熱処理をすると、それまで膨張していた格子定数cは回復し、電子線回折によりスピネル型ZnAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>のパターンが僅かに認められた。この試料のAl-K端XANESについては、スピネル相の理論スペクトルと一致した。これらの結果より、熱処理前にZnOに過飽和固溶していたドーパントAlが、熱処理によって凝集・析出し、極めて微細なスピネル相が形成されるという知見を得た。

教授 足立 裕彦  
助教授 西谷 滋人

工学研究科 材料工学専攻

材料プロセス工学講座  
表面処理工学分野

### 電析法を用いる CdTe 化合物半導体薄膜作製とその評価

次世代半導体材料として、直接遷移型のバンド構造をもつ化合物半導体が有望視されている。CdTe 化合物半導体の禁制帯幅は、太陽光から電気エネルギーへの変換に適しており、n-CdS/p-CdTe のヘテロ接合太陽電池が実用化されている。電析法による CdTe 層の成膜には、歴史的に硫酸酸性の水溶液が用いられるが、Te (IV) イオンの溶解度が小さい欠点があり、本研究室では、これに代わるプロセスとして Te (IV) イオン濃度を高くできる塩基性の電解浴を開発した。本年度は、(1) 電析浴の予備電解による不純物の除去が得られる CdTe 薄膜における影響、(2) 接触めっきの手法を応用した新しい CdTe 成膜技術に関して研究を行った。電析 CdTe の半導体特性測定の試料は、前年度に開発した導電性基板から不導体樹脂上への転写法を用いて作製した。その結果、(1) 予備電解によって取り除かれる不純物は主として Cu であり、それによって得られる CdTe 薄膜のキャリア密度は上昇すること、(2) 接触めっきの技術を用いても外部電源を使用した場合と同様の CdTe 薄膜が得られること等が明らかとなった。

### ジメチルスルホン浴を用いるアルミニウム複合電析

水溶液から電析できないアルミニウムの電析は従来、トルエンなどの有機溶媒や NaCl-KCl などの溶融塩を用いて行われてきた。有機溶媒には毒性や引火性など取り扱いの困難さ、溶融塩には平滑な純アルミニウム皮膜を得ることの困難さなどの問題がある。当研究室で採用したジメチルスルホン浴は有機溶媒でありながら毒性や引火性が低く、また、平滑な純アルミニウム皮膜得ることが可能である。さらに、水溶液では困難な、ナノサイズの親水性微粒子の分散性のよい共析が可能という特徴もある。ジメチルスルホン浴はアルミニウム以外の金属や合金電析への適用も可能であり、多様な分散粒子との組み合わせることにより、新しい機能性薄膜創製プロセスやマイクロマシン技術など応用範囲も広く、当研究室では、多角的な応用研究を進めている。例えば、粒径 10 nm 程度の TiO<sub>2</sub> 微粒子を均一に分散性良く共析させることに成功しており、また、Al-Mn などの合金電析も可能である。現在、電析皮膜のアノード酸化による機能化も検討している。

### 新しいイミド系室温溶融塩からの金属電析に関する研究

不揮発性かつ不燃性といった特徴をもつイオン性液体はグリーンケミストリーを指向する新しい溶媒として種々の応用が検討されている。溶媒自身がイオンであるため、いくつかのイオン性液体は、誘電率の低い有機溶媒と比べて金属塩の溶解性が高く、耐還元性や耐酸化性

に優れ、広い電位窓をもつ。なかでも当研究室では、脂肪族 4 級アンモニウム陽イオンと含フッ素イミド型陰イオンからなる、電位窓 5 ボルト以上の疎水性のイオン性液体に着目し、金属の電析溶媒としての可能性を探っている。本年度は、Zn, Sn, Zn-Mg 合金等の電析挙動を詳細に調べた。一方、疎水性のイオン性液体であっても若干の水分を含有し、それが電析物に影響をおぼすことが明らかとなり、本年度はイオン性液体の種々の温度での平衡水分含量と、粘度や伝導度等の諸物性の相関を調べた。

### 塩化銅 (I) を含む電解浴からの銅の電解採取

銅の主要資源である黄銅鉱 CuFeS<sub>2</sub> の製錬は乾式法が主流であるが、SO<sub>2</sub> ガスの発生とその固定による硫酸の過剰生産の問題を孕んでいる。これに対し、黄銅鉱を Cu<sup>2+</sup> イオンや Fe<sup>3+</sup> イオンなどの弱い酸化剤で浸出し、イオウを元素状で固定する湿式法が研究開発されている。なかでも Intec 社による手法は、濃厚ハロゲン化ナトリウム水溶液を用い、Cu<sup>2+</sup> イオンによる酸化浸出と、生じた 1 個の銅イオンを含む浴からのカソード電解採取、アノードでの酸化剤 Cu<sup>2+</sup> の再生を組み合わせた優れたプロセスである。この電解採取ではスポット状のカソードを用いることで銅をデンドライト状に還元析出させて回収する。本年度の研究では、カソードの素材がデンドライト成長挙動や不純物に与える影響を系統的に調べた。

### 誘起共析型 Ni-Mo 合金めっき浴の設計とその応用

Ni-Mo 合金皮膜は、クロムめっきの代替として有用である。本研究室では、硫酸酸性の電解浴を用いる光沢 Ni-Mo 合金めっきの研究を行っており、各種スペクトルの多変量解析を用いた浴中の化学種の同定や、その際に得られるみかけの平衡定数を使った半経験的めっき浴の設計を試みてきた。現在、このめっき皮膜の応用の一つとして、酸化チタン微粒子との複合めっき（分散めっき）を行い、耐食性と環境浄化機能を兼ね備えた新しい皮膜の作製を検討している。その結果、NO<sub>2</sub> 有機物の分解活性、および色素（メチレンブルー）の分解活性を有する皮膜を得ることに成功している。

### 微小領域への無電解ニッケルめっき

無電解ニッケルめっきは、エレクトロニクス分野で重要なが、通常の還元剤はリンやホウ素など、シリコン半導体へのドーパントとして振る舞う元素を共析するため、デバイスの信頼性低下への懸念がある。本研究では Ti (III)/Ti (IV) レドックス対を用いる新しい手法により、微小部への純ニッケルの選択的な無電解めっきを調べている。

URL <http://www.mtl.kyoto-u.ac.jp/groups/awakura-g/index.html>

教 授 栗倉 泰弘  
助教授 平藤 哲司  
助 手 邑瀬 邦明

工学研究科 材料工学専攻

材料プロセス工学講座  
プロセス設計学分野

## シンクロトロン放射光を用いた蛍光X線分光

シンクロトロン放射光を用いて  $\text{BaF}_2$  から  $\text{HfF}_4$  までの F K $\alpha$  蛍光 X 線スペクトルを測定し、サテライト・ピークの入射 X 線エネルギー依存性を調べた。このサテライトは  $\text{K}\alpha_{1,2}$  の高エネルギー側に観察されるピークである。その結果、このサテライトは  $1\text{s}^{-1}2\text{p}^{-1} \rightarrow 2\text{p}^{-2}$  の遷移に基づく  $\text{K}\alpha_{1,2}$  に帰属されることが判明した。各弗化物の強度比  $I(\text{K}\alpha_{3,4})/I(\text{K}\alpha_{1,2})$  は EPMA 測定から得られた文献値と一致した。また軽希土類の弗化物で強度比が弱いのは電荷移動によると解釈できる。さらに  $\text{BaF}_2$  から  $\text{HfF}_4$  までの F K 吸収スペクトルも測定したところ、希土類弗化物のスペクトルは  $\text{BaF}_2$  と  $\text{HfF}_4$  のスペクトルに類似していた。白色線とカチオン-F 間距離との関係から、弗化物の 710~720 eV にある幅広いピークは 2 重イオン化によると解釈される。

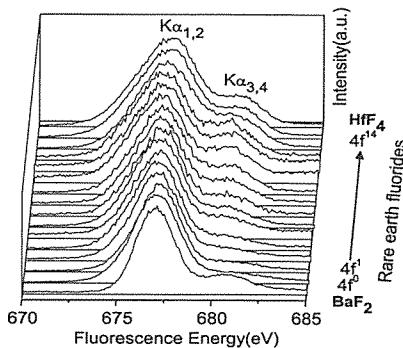


Fig. 1 F K $\alpha$  fluorescence spectra of fluorides excited by X-ray at 850 eV

## シンクロトロン放射光を用いた単一粒子の元素分析法の開発

シンクロトロン放射光を用いた蛍光 X 線分析 (SR-XRF) と走査型電子顕微鏡-エネルギー分散型 X 線分析装置 (SEM-EDX) とを組み合わせて、その場測定が可能な新しい局所元素分析法を開発した。SR-XRF 法は重金属元素等の感度がよく、極微量元素の分析に適しているが、実際に試料を観察しながら測定することができない。一方、SEM-EDX 法はその場で試料を観察しながら分析でき、軽元素の検出に適している。この新しい装置を用いて单一の黄砂エアロゾル粒子表面の分析を行った。エアロゾル单一粒子について、シンクロトロン放射光で励起した場合と電子線で励起した場合の蛍光 X 線スペクトルを比較したところ、Cr, Mn, Fe, Ni, Cu などの重金属元素は放射光励起で感度よく検出されているが、Al, Si, S などの軽元素は通常の EDX 分析にくらべ

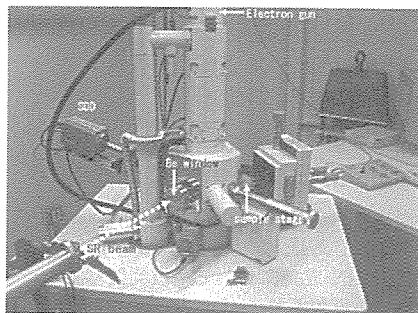


Fig. 2 Synchrotron EDX setup at SPring-8 BL37XU

てそれほど感度はよくない。

## 水素吸蔵合金の吸蔵特性の解明

水素エネルギーは新エネルギーとして今日非常に注目されているが、標準状態において気体であるので貯蔵・運搬の面で技術が要求される。水素吸蔵合金を用いると高圧水素や液体水素以上に高密度に、また安全に水素を貯蔵することができる。現在使用されている高性能水素吸蔵合金は実験的に評価されたものであり、未だ水素吸蔵機構が解明されていないことからさらに高性能の材料開発は困難となっている。そこで本研究では水素吸蔵機構解明のアプローチとして、水素吸蔵特性は合金の電子状態と相関があるとして探索を行った。手法として、実験により水素吸蔵特性が既知の希土類-白金系 2 元系水素吸蔵合金に焦点をあて、DV-X $\alpha$  法を用いて電子状態計算を行い、得られた結果と水素吸蔵特性とを比較した。比較に用いるクラスターは同一試料で計算した 5 種類のクラスターの中から適当なものを選定した。計算の結果、共有結合性を示す bond overlap population と水素化物の安定性に相関を見出すことができた。



Fig. 3 日本分析化学会「有功賞」受賞

教授 河合 潤  
助教授 田邊 晃生  
助手 石井 秀司

工学研究科 材料工学専攻

材料プロセス工学講座  
マイクロ材料学分野

**GaN 成長用導電性バッファ層の開発**

窒化ガリウム (GaN) は直接遷移型ワイドバンドギャップ半導体であり、デバイスへの更なる応用が期待されている。GaN 成長において基板間にバッファ（緩衝）層の挿入が不可欠あり、バッファ層によって GaN デバイスの特性および品質が大きく左右される。現行の GaN デバイスにはバッファ層として絶縁体 (AlN) が用いられており、複雑な横型構造を取らざるを得ない。絶縁体に代わる導電性バッファ層開発により、より単純な縦型デバイスが実現され、工程・設計の大幅な簡略化が可能である。我々は導電性バッファ層の候補として窒化チタン (TiN) 薄膜に着目した。本研究では TiN バッファ層のプロセス最適化により実デバイスに適用可能な GaN 薄膜の作製を目的とした。反応性スパッタリング法によりサファイア基板の上に TiN バッファ層を成膜し、混合ガスの Ar/N<sub>2</sub> 流量比を変化させて Ti/N 組成比の制御を行った。その後、MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) 法により GaN を成膜した。解析の結果、TiN バッファ層の Ti/N 比により GaN の基板被覆率および平坦性の顕著な変化を確認した。Ti 過剰 TiN バッファ層上の GaN は島状に成長したのに対して、N 過剰の場合には基板全面に GaN が成長した。本研究において Ti/N 比が GaN 成長に大きく影響を及ぼすことがわかり、バッファ層開発に向けた重要な指針が得られた。

**p 型 GaN に対するコンタクト材の電気特性と基板転位密度の関係**

GaN はワイドバンドギャップを有する直接遷移型化合物半導体として青色発光デバイスへの応用が進行中である。GaN の驚くべき特徴として、他の半導体に比べて高密度な格子欠陥（貫通転位）が導入されるにも関わらず実用化されている点が挙げられる。一般に半導体において転位が存在すると電極からの電流注入が困難になるが、現在デバイス用に成長させた GaN 薄膜内には高密度 ( $10^8 \text{ cm}^{-2} \sim 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ ) の貫通転位が存在する。この特有の高密度転位がデバイス性能に及ぼす影響は未だ不明であり、その関連性が注目されている。本研究では p 型 GaN 基板の転位密度とコンタクト材電気特性の関連を調べることを目的とした。まず、GaN 中に導入される転位密度を解析する手法の確立を目指し、化学エッチングにより転位を起源とするエッチピットの形成を行い、GaN 表面のエッチピット密度から貫通転位密度の測定を行った。さらにコンタクト材の形成および電気特性評価後、160～350°C の潮解 KOH によりエッチングを行い、均一なエッチングや良好なエッチピット・転位の対応が得られた。今後は電極近傍のエッチピット密度と電極パターンの電気特性を比較し、本研究の目標であるコンタクト材の電気特性に対する貫通転位密度の影響を抽出する。

**p/n 型 4 H-SiC に対する同一オーミック・コンタクト材の同時形成**

4 H-SiC 半導体は優れた特性を有することから次世代パワー・高周波デバイスへの応用が期待されており、オーミック・コンタクト材の開発はデバイスの実用化に向けて急務である。現在、4 H-SiC に対する低抵抗コンタクト材として p 型には Ti/Al コンタクト材、n 型には Ni コンタクト材が主として用いられている。一般にデバイスにおける p 型、n 型に対するコンタクト材はそれぞれ異なるプロセスで作製されるため、デバイスの集積度が上がらず工程数も増加しプロセス・コスト面から不利である。そのため p/n 型に対して同一のオーミック・コンタクト材を同一プロセスによって形成することが望ましい。本研究では p/n 型 4 H-SiC に対するオーミック・コンタクト材の同時形成を目的とした。すでに p 型に対しては Ti/Al コンタクト材をベースに、Co や Ni といった第三元素を添加したコンタクト材でのオーミック性が確認されていることから、n 型に対してオーミック性を有する Ni を含む Ni/Ti/Al コンタクト材を用いて p/n 両伝導型のオーミック・コンタクト材開発を目指した。本研究により蒸着および熱処理により作製した Ni/Ti/Al コンタクト材は p/n 両伝導型に対してオーミック特性を示した。しかし、接触抵抗率が高く、実用デバイスの要求を満足できなかった。今後、両伝導型に対するオーミック特性のメカニズムを解明し、接触抵抗率の更なる低減化を目指す。

**Si-ULSI 用 Cu 配線材合金化による自己組織拡散バリア材の開発**

近年の ULSI デバイスの高性能・高集積化に伴い、従来の Al 合金配線材に替わるより低抵抗な Cu 配線材への移行が進められている。今後の配線幅 100 nm 世代以降の超微細配線では、昨年度の研究結果から耐 Cu 拡散用バリア材の薄膜化は必要不可欠であることが示唆された。本研究では新しい拡散バリア材の薄膜化プロセスとして過飽和 Cu 合金薄膜を基板上に直接成膜し、熱処理を施することで、合金膜/基板界面に自己組織的に極薄拡散バリア層を析出・相分離させるプロセスについて検討し実験を行った。合金材には低固溶・相分離型・低融点化元素を選択する必要があり、かつ従来のバリア材の研究から耐熱性に優れた元素として Ti を選択した。実験では SiO<sub>2</sub> 基板上に Cu (2.9 at% Ti) を 300 nm 成膜し、実プロセスと同程度の熱処理 (400°C 2 時間) 後、TEM, RBS 等を用いて観察・評価を行った。結果として、合金膜の表面及び合金膜/基板界面に極薄 ( $\leq 10 \text{ nm}$ ) の Ti-rich な析出層を確認し、高いバリア性も有することがわかった。また合金膜内の粒界上には析出物は見当たらず、表・界面の効果が大きい薄膜材特有の現象であり材料学的にも非常に興味深い結果となった。本研究で開発した Cu 配線材合金化による自己組織バリア作製プロセスは ULSI デバイス用プロセスとして有効であることが示唆された。

教 授 村上 正紀

助教授 伊藤 和博

助 手 着本 享, 守山 実希

材料物性学講座  
量子材料学分野

### MnAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> の断熱温度変化の測定

磁気冷凍技術は、磁気熱量効果（外部磁場により磁性体の持つ熱量が変化する現象）を利用した冷凍法で、高効率で環境汚染物質を出さないことから現在の気体冷凍に替わる次世代冷凍技術として期待を集めている。その性能は磁気冷凍作業物質の特性に大きく依存し、磁場印加による等温磁気エントロピー変化 $\Delta S_{mag}$ 、断熱消磁（励磁）による温度変化 $\Delta T_{ad}$ が共に大きな値をとる材料が必要とされる。 $MnAs_{1-x}Sb_x$ は、Sbの置換量によって200 K～室温までの広い温度範囲で大きな $\Delta S_{mag}$ が得られ、室温付近で有効な磁気冷凍材料として注目を集めている。しかし、 $MnAs_{1-x}Sb_x$ は非常に脆いため熱的測定を行うに十分な大きさを持つ試料を得る事が難しい。そのため、断熱温度変化 $\Delta T_{ad}$ について信頼性のある評価が行われておらず、どの程度の温度変化が得られるかは未だ不明である。そこで本研究では従来の試料作製方法を見直し塊状の良質な試料を得ると共に、断熱励磁による温度変化を測定する装置を作製し、 $\Delta T_{ad}$ の評価を行うことを目的として行った。まず、大きな磁気熱量効果を示す $MnAs_{1-x}Sb_x$ のバルク状の試料を得るために、 $MnAs_{1-x}Sb_x$ の熱処理方法を検討した。そして各組成に対する最適条件を見出し、良質なバルク状の試料を得た。次に、 $MnAs_{1-x}Sb_x$ の $\Delta T_{ad}$ を直接測定するために測定装置を作製した。測定は断熱状態の試料に対し、磁場を2.5 T/minの速度で徐々に励磁した際の温度変化を温度計で直接読み取るという方法を採用した。そして $MnAs_{0.9}Sb_{0.1}$ に対して $\Delta T_{ad}$ の測定を行った。 $\Delta T_{ad}$ は一次転移温度でピークをとり、その値は0.5 Tの磁場変化に対しては9.6 K、0.2 Tの磁場変化に対しては4.6 Kに達した。磁気冷凍作業物質としての実用の目安が2 K/Tであること、永久磁石で到達可能な磁場が2 T程度であることを考えると、 $MnAs_{1-x}Sb_x$ は磁気冷凍作業物質として有効であると結論付けることができる。

### 試料引抜型磁化測定装置の製作と Ce<sub>1-x</sub>Y<sub>x</sub>Co<sub>3</sub> の磁化課程

希土類と遷移金属の化合物は無数に存在し、多彩な磁気的性質が数多く報告されているが、その中で興味深い性質として遍歴電子メタ磁性がある。遍歴電子メタ磁性転移は YCo<sub>2</sub>、YCo<sub>3</sub> や Ce(Co<sub>1-x</sub>Ni<sub>x</sub>)<sub>5</sub>などで観測されているが、本研究ではこのような転移が起こる可能性がある化合物として Ce<sub>1-x</sub>Y<sub>x</sub>Co<sub>3</sub>に着目して磁気的性質を調べた。また、このようなメタ磁性転移を観測するために強磁場での磁化測定を可能にすることが必要であるため、当研究室所有の8 T 超伝導マグネットを用いて試料引抜型磁力計の製作も合わせて行なった。

試作した試料引抜型磁化測定装置は、最大磁場8 T、温度域約1.5 K～室温付近で測定可能であり、10<sup>-6</sup> emu/Oe程度の磁化率を高い精度で測定することができる。また、この装置の測定限界は誘導起電力を検出するピックアップコイルの振動のために混入するノイズによって制限さ

れることが分かった。本研究の段階で、金属磁性体の常磁性磁化率を高精度で測定する感度を有しているが、今後ピックアップコイルを固定する方法を改良することによって更に測定感度を高めることができると考えられる。製作した装置を用いて Ce<sub>1-x</sub>Y<sub>x</sub>Co<sub>3</sub> の磁化測定を行なったところ、Y置換量の増加とともにキュリー温度、磁気モーメントが増加することが分かった。これは単位格子の体積が増加するだけでなくバンド構造が関係していると考えられる。また、CeCo<sub>3</sub>は低温で Co のモーメントが発生し、弱い強磁性体であることが確認された。パルスマグネットを用いた磁化測定では、45 Tまでの範囲で磁化が飽和に達していない弱い強磁性状態にあることが分かった。また、Ce<sub>0.6</sub>Y<sub>0.4</sub>Co<sub>3</sub>の微分磁化率が約10 T付近でプロードなピークが観測された。これは、遍歴電子メタ磁性転移であると考えられる。他の組成においてはメタ磁性転移は観測できなかったが、磁化が飽和に達していないことや Ce<sub>1-x</sub>Y<sub>x</sub>Co<sub>3</sub>のバンド構造を考えると、更に高い磁場においてメタ磁性転移が観測される可能性は高いと考えられる。

### GdMn<sub>2</sub>(Ge<sub>1-x</sub>Si<sub>x</sub>)<sub>2</sub> の磁性

希土類と遷移金属を組み合わせた RMn<sub>2</sub>Ge<sub>2</sub> (Rは希土類) は興味深い磁性を示す。この化合物では Mn 層間相互作用は格子定数  $c$  ではなく格子定数  $a$  に依存し、 $a \leq 0.403$  nm では Mn 層間相互作用は反強磁性的、 $a \geq 0.403$  nm で強磁性になる。そのため Mn 層間相互作用は R が軽希土類の場合は強磁性、重希土類の場合は反強磁性となる。特に R=Sm、Gd では格子定数  $a$  が境界値 0.403 nm に近いため、R-Mn 相互作用と競合する Mn 層間相互作用が弱くなる。結果、磁気構造が不安定になり磁場や温度による磁気転移が誘起されやすい。GdMn<sub>2</sub>Ge<sub>2</sub> の磁気構造は 95 K 以下でフェリ磁性、95 K～365 K で Mn 反強磁性、また高磁場相ではキャントフェリ磁性である。この磁気構造を変化させるため、Gd サイトを Y や Laなどを置換した研究が様々に行われてきたが、Ge サイトを他の元素で置換した研究はほとんど行われていない。そこで本研究では Ge サイトを Si で置換した GdMn<sub>2</sub>(Ge<sub>1-x</sub>Si<sub>x</sub>)<sub>2</sub> の磁性を調べた。磁化曲線では  $x \leq 0.2$  で Si 添加により転移がプロードになり、格子定数の減少により転移磁場が減少していく。 $x \geq 0.4$  になると転移は消滅した。磁化温度曲線は  $x \leq 0.2$  では Si 置換により転移温度が下がり、転移がプロードになっていく。また  $x=0.1$  では温度を下げていくと小さくプロードな磁化のピークを経て転移する。 $x \geq 0.4$  では Si 置換しても転移温度はあまり下がらず、転移はさらにプロードになり、磁化の値が増加していく。そこで GdMn<sub>2</sub>Ge<sub>2</sub> を成功を収めた分子磁場近似を用いて GdMn<sub>2</sub>(Ge<sub>1-x</sub>Si<sub>x</sub>)<sub>2</sub> の磁気構造解析を試みた。その結果、 $x \leq 0.2$  における基底状態はコリニアなフェリ磁性、高磁場ではキャントフェリ磁性であり、 $x \geq 0.4$  の基底状態はキャントフェリ磁性であることが分かった。しかし、GdMn<sub>2</sub>(Ge<sub>1-x</sub>Si<sub>x</sub>)<sub>2</sub> の磁化温度曲線、磁化磁場曲線のプロードな転移を再現することはできなかった。これは Ge の Si 置換によるランダムネスの効果が原因であると考えられる。

工学研究科 材料工学専攻

材料物性学講座  
結晶物性工学分野

### 第3元素を添加した $\text{ReSi}_{1.75}$ 基シリサイドの 結晶構造と熱電特性

$\text{ReSi}_{1.75}$  は  $E_g=0.12\text{ eV}$  (間接遷移),  $0.36\text{ eV}$  (直接遷移) という非常に小さいバンドギャップを有する縮退半導体であり、高性能な赤外線検出素子などのオプトエレクトロニクス材料、熱エネルギーと電気エネルギーを直接相互変換することを可能にする熱電変換材料としての応用が考えられる。本研究では、Re を価電子数が異なる第三元素で置換することにより作製した  $\text{ReSi}_{1.75}$  基シリサイドの結晶構造解析及び熱電特性の評価を行った。得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) Re より価電子数が多い第三元素 (Ru, Fe) を添加した試料では結晶中の Si 空孔濃度が増加する一方、Re より価電子数が少ない第三元素 (W, Cr) を添加した試料では結晶中の Si 空孔濃度が減少する。
- (2) 3 元系  $\text{ReSi}_{1.75}$  基シリサイドは次のような原子尺度の欠陥構造を有する。
  - (a) (107) C11b をシア一面とするシア構造 (Ru, Fe 添加材)
  - (b) (109) C11b をシア一面とするシア構造 (Cr 添加材)
  - (c) 2 種類のブロック層で構成されるアダプティブ構造 (W 添加材)
 同じシア構造でありながらも (a), (b) のように Si 空孔濃度の増減により異なる結晶面に沿ってシアするという特異な結晶構造変化を示す。
- (3) アダプティブ構造をとる W 添加材では、高いゼーベック係数を保ったまま双晶境界の消滅に伴い電気抵抗率が減少し、熱電特性が大きく向上する。シア構造へと変化した Ru, Fe 添加材の電気抵抗率、熱伝導率はいずれも増加する。シア構造へと変化した Cr 添加材のゼーベック係数は  $\text{ReSi}_{1.75}$  と同様に高い。

### 結晶の対掌性および極性識別のための新しい電子回折法の開発と応用

本研究では結晶学的に存在可能な全てのエナンショモルフ (対掌性) を識別するための新しい電子回折法を開発した。これは結晶学的に存在可能な全てのエナンショモルフが識別できる唯一の電子回折法である。この方法を11種類の結晶に適用し、エナンショモルフの識別に成功した。またこの方法を応用することにより、結晶のポラリティー (極性) の識別も可能である。

- (1) バイフィット対反射が対称に観察できる適切な入射方位を選べば、バイフィット対反射の位置および振幅は対称なものとの位相分布が非対称であり、動力学的効果により回折強度も非対称となる。右結晶と左結晶では位相分布が反転した関係にある

ことから回折強度も反転しエナンショモルフの識別が可能となる。このバイフィット対反射の強度の大小は直接波と多重回折波の足し合わせを振幅位相図を用いて示すことにより定性的に説明することができる。

- (2) 全てのエナンショモルフを持ち得る点群についてバイフィット対反射を対称に観察可能な入射方位を決定した。その入射方位は 2 回軸に垂直な方向であり、右結晶と左結晶を結ぶ鏡面に平行な方向である。
- (3) 今回開発した電子回折によるエナンショモルフ識別法を11種類の無機単結晶に適用し、その有用性を実証した。
- (4) 低次の晶帶軸入射で ZOLZ のフリーデル対反射の強度を比較することにより 3C-SiC および GaN の結晶の極性の識別が可能である。しかし同じ閃亜鉛鉱構造の GaAs, CdTe の場合、2 つの原子の原子番号が近くフリーデル対反射の強度差が小さくなり極性の識別は困難となる。

### 高周波マグネットロンスパッタリング法により 作製した薄膜熱電材料の物性

熱電材料の性能指数  $Z$  を向上させるには、電気伝導度 ( $\sigma$ ) とゼーベック係数 ( $S$ ) から算出した出力因子  $\sigma \cdot S^2$  を増加させ、熱伝導度 ( $\kappa$ ) を減少させる必要がある。本研究では、主に  $\kappa$  を減少させる試料の薄膜化に着目した。中温領域の熱電材料として期待される  $\beta\text{-Zn}_4\text{Sb}_3$  では、ある膜厚になると  $\sigma \cdot S^2$  を損なうことなく  $\kappa$  を低減し、薄膜試料の無次元性能指数  $ZT$  はバルク試料の 2 倍となる。しかし、これは  $\beta\text{-Zn}_4\text{Sb}_3$  に特異なことであり、CoSb<sub>3</sub> 等では薄膜化により  $\sigma$  と  $S$  が大きく低減する。 $ZT$  の向上には、 $\kappa$  の低減による効果を打ち消さない程度に  $\sigma \cdot S^2$  を維持する必要がある。このため、薄膜化による無次元性能指数の向上には、それぞれの熱電特性に影響を及ぼす薄膜特有の因子を明らかにする必要がある。そこで、本研究では、薄膜試料作製が簡単で、 $S$  が比較的大きな半金属 CoSi を用い、薄膜作製プロセスが熱電特性に及ぼす因子を調べた。得られた主な結果は以下のようである。

- (1) CoSi 薄膜の電気伝導度はバルク試料と比較して低く、300°C 以下で半導体的傾向を示し、焼鈍温度を上げることにより電気伝導度は増加する。
- (2) CoSi 薄膜のゼーベック係数の絶対値はバルク試料と比較して低く、550 K 付近より低い温度域での低減は温度が低くなるほど顕著となる。
- (3) CoSi 薄膜の熱伝導度は焼鈍温度の増加に伴い低減し、膜厚の逆数に比例して減少する。膜厚 130 nm ではバルク試料と比較して約 1/3 である。熱伝導度の低減は粒界散乱の増加に起因し、粒界散乱の増加が熱伝導度の低減に寄与するには、サブミクロンオーダーの結晶粒まで微細にする必要がある。

工学研究科 材料工学専攻

材料物性学講座  
構造物性学分野

平成11年度から5年にわたって行った特別推進研究「放射光を用いた超臨界金属流体の静的・動的構造の解明」が昨年度で終了したが、SPring-8での放射光実験はその後も引き続き行われている。今回は、流体水銀についての最近の話題を紹介する。

水銀が膨張してゆくとき、密度が  $9 \text{ gcm}^{-3}$  まで減少したとき金属から絶縁体への転移が始まる。この密度は臨界密度  $5.8 \text{ gcm}^{-3}$  より大きく、したがって金属-非金属転移は臨界点の手前の液体側で起こる。水銀における金属-非金属転移は、体積膨張に伴って s バンドと p バンドの重なりが解消することによるいわゆる Bloch-Wilson タイプの転移であると考えられてきた。しかし、事柄はそのように単純ではなくもっと内容豊かなものであることが我々の構造研究から次第に明らかになってきた。

液体から気体に至る広い密度領域での X 線回折測定によって、配位数と最近接原子間距離が体積膨張と共にどのように変化するかについての情報が得られた[1]。その結果、水銀が膨張するとき、原子間距離が増大するのではなく配位数が大きく減少すること、すなわち空孔を生成しながら不均質に膨張することが分かった。このことは、配位数の大きい密な構造から疎な構造へと連続的な構造相転移が起きていると考えることもできる。さらに重要なことは、配位数が単に減少するだけでなく、金属-非金属転移の起きる  $9 \text{ gcm}^{-3}$  近傍で、配位数のゆらぎが発生するということがわかつてきた。このことは、金属-非金属転移にミクロ構造の不安定性が深く関わり、配位数のゆらぎにより金属領域と非金属領域が混在した不均質構造が現れることを強く示唆する。

実際に、その後の X 線小角散乱測定により、金属-非金属転移に関わる密度のゆらぎを観測することができた[2]。金属-非金属転移に伴う X 線小角散乱強度は、臨界散乱に比べると非常に弱いが、温度変化や圧力変化を詳しく調べることにより臨界散乱と明確に区別することができた。Ornstein-Zernike の式を用いた解析により、平均密度からのずれの大きさを表す  $S(0)$  が 1 度程、ゆらぎの相関長が約  $10 \text{ \AA}$  という値をもつことが分かった。また、小角散乱スペクトルを Guinier の式を用いてフィットすることも可能であり、その場合も粒子半径が  $10 \text{ \AA}$  程度になる。いずれにしろ、金属-非金属転移に伴って中距離スケールのゆらぎ、金属領域と非金属領域の間のゆらぎが存在することは確かである。

さらに、X 線非弾性散乱測定の結果、金属-絶縁体転移に伴う非常に速い音速が観測された[3]。散乱ベクトル  $Q$  が小さい  $0.2\text{--}0.4 \text{ \AA}^{-1}$  の領域における分散関係から見積もった音速は  $1500 \text{ ms}^{-1}$  である。これを超音波測定による音速  $490 \text{ ms}^{-1}$  と比較すると 3 倍以上も速い。この速い音速の原因は何か、現在のところ、水銀原子の感じる二体ポテンシャルのゆらぎによるものと考えている。X 線小角散乱の実験から、金属-非金属転移領域において  $10 \text{ \AA}$  程度の相関長をもつゆらぎの存在、すなわち  $10 \text{ \AA}$  程度のスケールをもつ金属領域と非金属領域との間の空間的ゆらぎが起きていることが示唆された。これらの領域は時間的にもゆらいでおり、金属領域は非金属領域へ、非金属領域は金属領域へと時々刻々入れ替わっているであろう。これまでの解析によって、緩和時間は  $1 \text{ ps}$  程度である。ある瞬間に、金属領域の水銀は伝導電子に遮蔽されたクーロンポテンシャルを感じるが、次の瞬間には、金属でなくなった領域の中でいわば Lennard-Jones タイプのポテンシャルを感じことになるであろう。このように、速い音速は、金属-非金属転移に伴う特有のゆらぎが原因で生じたものである。

以上、X 線回折、X 線小角散乱、X 線非弾性散乱測定を横断的・相補的に行うことによって、臨界密度ゆらぎ以外のもうひとつのゆらぎを捉えることができた。それは、金属-非金属転移を引き起こすゆらぎであり、隠されていたゆらぎである。

- [1] M. Inui, X. Hong and K. Tamura, Phys. Rev. B, 68 094108 (1-9) (2003).
- [2] M. Inui, K. Matsuda, D. Ishikawa, K. Tamura, Y. Ohishi, Phys. Rev. Lett., 投稿済.
- [3] D. Ishikawa, M. Inui, K. Matsuda, K. Tamura, A. Q. R. Baron, S. Tutui, Phys. Rev. Lett., 93 097801 (1-4) (2004).

教 授 田村剛三郎

助教授 沼倉 宏

助 手 松田 和博

材料機能学講座  
材料物理学分野

### 放射光小角散乱を用いた Mg-Y 系合金の析出過程の解明

Mg-Y 合金と Mg-Y-Nd 合金における 473 K における時効初期の硬化挙動の違いを放射光小角散乱測定により調べた。Mg-Y 合金では時効初期 ( $\sim 4$  h) にほとんど硬化に寄与しない  $\beta'$  相が成長し、半径が 3.6 nm になると硬化に寄与する  $\beta''$  相に変換され始める。時効時間が 10 h になると  $\beta''$  相は全て  $\beta'$  相に変換され、 $\beta'$  相の成長に伴い、硬度が増加する。一方、Mg-Y-Nd 合金では  $\beta'$  相の核生成サイトとなりえる  $\beta''$  相の半径が 2.4 nm 程度であり、Mg-Y 合金と比べて小さいことが分かった。このために Mg-Y-Nd 合金では、極めて初期 ( $< 1$  h) から  $\beta'$  相が核生成、成長し、硬度が増加することが分かった。

### Al-Zn-Mg 合金における熱間押出し中の組織形成に与える Zr 添加の影響

Zr を添加した急冷凝固 Al 合金 (Meso 10) の熱間押出し途中の組織を高分解能 EBSP で調べることにより、Zr 添加が熱間押出し中の組織形成に与える影響を調べた。Zr 無添加材には初期粒が押出し方向に伸長することにより形成された纖維状粒が観察された。それに対し、Zr 添加合金では纖維状粒の粒界近傍に微細粒が多く形成されていた。Zr 添加材の押出し途中の組織を調べた結果、初期粒界近傍で連続的再結晶が生じることにより微細粒が形成されることが分かった。以上のことから、Zr 添加により生じた  $\text{Al}_3\text{Zr}$  粒子により動的連続再結晶を発現し、組織が微細化されることが分かった。

### Bi 2223 テープ複合超伝導体の臨界電流に及ぼす曲げ／引張変形の影響

超伝導複合体は使用時に様々な機械的応力下におかれると、それが超伝導特性に及ぼす影響は未だ明らかでない。よって、高温超伝導体である Bi 2223 テープ材について引張変形及び曲げ変形が臨界電流に及ぼす影響を調べた。Bi 2223 酸化物超伝導層の破壊モデルを考える上で、破壊がワイル分布に従って生じると仮定し、 $I_c/I_{c0}$  と引張応力曲線よりパラメータを決定し、曲げ変形の破壊を評価した。この時、試料には供給時の状態で中央部に欠陥があることを踏まえた破壊モデルを用いた。その結果と試料の断面観察結果から、曲げ変形において試料の中央部から破壊し始めることが分かった。また、曲げ／引張変形では曲げ変形と引張変形の応力の計算則が成立すると仮定すると、曲げ変形同様に中央部から破壊が始まることが分かった。

### 拡張ヒュッケル法による水素吸蔵機構の研究

拡張ヒュッケル法により水素吸蔵中の電子の動きを追跡し、次の 3 つの問題、(1) 水素吸蔵容量、(2) 水素吸蔵速度、(3) 吸蔵・放出の可逆性、に取り組み、以下のような結果を得た。1) 水素はその吸蔵過程においてそのエネルギー  $-9 \text{ eV}$  から  $-4 \text{ eV}$  の間にある軌道と相互作用するため、水素吸蔵容量は  $-9 \text{ eV}$  から  $-4 \text{ eV}$  の間にある状態密度に比例する。2) 水素吸蔵分率は時間  $t$  の次のような関数、 $f(t) = 1 - \exp\{- (r \cdot t)^n \} \cdot [1 - \exp\{- (s \cdot t)^m \}]$  で記述され、その時定数はエネルギーの揺らぎに比例する。3) 反応の可逆性は凝集エネルギーで決まる。つまり水素吸蔵状態で凝集エネルギーが大きいと反応は不可逆となり、凝集エネルギーが小さいと可逆となる。

### (Bi, Pb) 2223 超伝導線材における酸化物高抵抗層の導入

Ag/(Bi, Pb) 2223 超伝導線材実用化には、超伝導電流の交流通電時に生じる交流損失の克服が必須である。交流損失の中でも結合損失は、超伝導フィラメント間の母材を高抵抗化することが有効である。そこで本研究では線材作製時に金属の状態で Mg 層を導入し、その後の熱処理によって線材中の Mg を酸化させ MgO することで酸化物高抵抗層の導入を試みた。その結果、Mg の融解と酸化を組み合わせることで (Bi, Pb) 2223 線材中に  $10 \mu\text{m}$  程度の高抵抗 MgO 層の導入に成功した。

### PLD 法による $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 高温超伝導薄膜の作製と超伝導特性

酸化物系超伝導体は金属系超伝導体と比べ超伝導を発現させる環境がより容易に得られる、つまり金属系超伝導体ほど低温を必要としないことから液体窒素温度で動作する超伝導マグネットや超伝導ケーブルへの応用が大いに期待されている。その中でも  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (YBCO) 薄膜は磁場中で臨界電流密度が高いことから盛んに研究が行われている。YBCO は現在盛んに研究が行われているが、Y を RE (希土類元素) に置換した  $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (REBCO) は YBCO よりも有効な量子化磁束ピンニングセンターが存在し、磁場中での臨界電流密度 ( $J_c$ ) が高いことが期待されている。本研究では RE として Gd に注目した。GdBCO 薄膜をパルスレーザー蒸着法 (PLD 法) により作製し、酸素分圧や基板温度の最適化を行った。本研究で得られた臨界温度  $T_c$  の最高値は酸素圧力  $92.7 \text{ K}$  であり、 $77 \text{ K}$  における  $0 \text{ T}$  での  $J_c$  の最高値は  $6.07 \text{ MA/cm}^2$  であった。高磁場  $5 \text{ T}$  における  $J_c$  の最高値は  $0.189 \text{ MA/cm}^2$  であった。

教 授 長村 光造  
助教授 松本 要  
助教授 山本 悟  
助 手 足立 大樹

工学研究科 材料工学専攻

材料機能学講座  
材質制御学分野

本研究室では、鉄鋼・チタン合金等の構造材料の組織制御に関する基礎研究として相変態・析出・再結晶の組織学的・結晶学的研究を行うとともに、これらと密接に関係する形状記憶効果、超塑性などの機構解明や機械的性質の向上についても研究している。2003年度は主に以下のテーマについて研究した。

### 1. 鉄合金のマルテンサイト・ベイナイト組織

Fe-Mn-C 合金を用いて上部ベイナイトブロック組織の炭素量による変化を調べた。その結果、炭素量の増加に伴いラスマルテンサイト組織はパケット・ブロックとも微細になるが、上部ベイナイトではむしろ粗大化することを見出した。

Fe-Ni 合金レンズマルテンサイト組織を TEM 観察により詳細に調べた結果、その内部組織はミドリップ付近の完全双晶領域、その外側に双晶が一部成長した領域、双晶の存在しない非双晶領域からなること、非双晶領域内の組織も、成長界面に近づくに従って転位のほとんど存在しない領域から複数のらせん転位からなる領域、さらに湾曲した転位が複雑に絡み合った領域へと変化することがわかった。

また、鉄合金マルテンサイトの形態変化の支配因子として変態時の体積膨張に注目し、Fe-Ni-Co 合金で Ni 添加による Ms 点低下、Co 添加によるインバー効果を用いることで、変態温度での体積膨張を低下させた時のマルテンサイトの形態、内部組織を調べた。その結果、変態時の体積膨張を小さくすると、本来ラスマルテンサイトが生成する室温以上でもレンズマルテンサイトが生成し、周囲のオーステナイト中に塑性変形により導入される転位量が少なくなることがわかった。

### 2. マイクロアロイングによる鉄鋼の変態組織制御

オーステナイトの回復再結晶を抑制する一方で溶接部での韌性低下をまねく Nb 添加がフェライト・ベイナイト変態の kinetics・微細組織におよぼす影響を、Fe-1.5C-0.2C 鋼に Nb を 0.03% まで微量添加した合金で調べた。その結果、(1) Nb がオーステナイトに固溶すると連続冷却変態の開始温度が著しく低下するが、NbC が析出すると変態温度の低下が抑制されること、(2) Nb 添加によりベイナイト生成温度域でパーライト変態が抑制され、ベニティックフェライト生成後炭素が未変態オーステナイトに濃縮するためマルテンサイトが生成しやすくなること、がわかった。

また上記の合金で Nb 添加により加工硬化オーステナイトを得やすくした場合のオースフォームベイナイト組織の変化を調べた。その結果、Nb 無添材ではオーステナイトの加工による変態促進のためにベイナイト変態温度までの冷却中にフェライト変態が起こり粗大なフェライト粒が混在するが、Nb を添加すると焼入れ性が増し、冷却中の変態が抑制されベイナイト組織が微細化されることがわかった。

オーステナイト粒界の合金炭窒化物上核生成を利用した粒界フェライト組織の微細化を図るために、Fe-Mn-

0.2C 鋼のオーステナイト粒界に V (C, N) が析出した場合の粒界フェライトの形態・結晶方位関係におよぼす影響を調べ、以下のことを明らかにした。(1) フェライト変態前に粒界に V (C, N) が生成しない合金では、粒界からアロトリフォルムやフィルム状のフェライトが形成されるが、V (C, N) を含む合金では粒界フェライトの多くは微細イディオモルフであり、過冷度が大きくなつても粒界からワイドマンステッテンフェライトが成長しない。(2) 粒界に V (C, N) が存在すると粒界フェライトと母相との方位関係と K-S 関係からの方位差は大きくなる。

### 3. 鉄鋼中の炭窒化物の生成挙動に関する研究

Fe-M (M: Ti, V, Nb, Al) 二元合金のプラズマ窒化時の析出組織を調べた結果、Ti, V 添加材では合金-窒素クラスターの均一微細析出による大きな硬化が起り、窒化の進行にともない微細クラスターから安定相（合金窒化物）への遷移が起こるが、Nb, Al 添加材では直接鉄窒化物および安定相が生成し硬化量も小さいことがわかった。

また合金炭化物を生成しない元素 (Mn, Si, Al) を添加した場合の高炭素鋼マルテンサイトの焼もどし時の炭化物析出挙動を調べ、(1) 焼もどし時の軟化は合金元素添加により抑制され、低温焼もどしでは Si と Al、高温焼もどしでは Mn の効果が大きいこと、(2) Si は  $\varepsilon$  炭化物からセメンタイトへの炭化物の遷移およびセメンタイトからのはき出しによる成長を抑制し、Mn はセメンタイトへの濃縮による成長を抑制するため軟化抵抗を示すことがわかった。

### 4. 高温変形時の微細二相組織の形成に関する研究

高炭素鋼 (Fe-0.8C-2Mn, Fe-1.0C-1.4Cr) を用いて、 $(\alpha+\beta)$  二相域での高温変形組織におよぼす炭化物分散状態の影響について調べた。パーライト組織 ( $\alpha$ +層状  $\beta$  組織) を Al 点以下で高温圧縮すると、母相  $\alpha$  の部分的な動的再結晶および層状  $\beta$  の分断・球状化が起こり、層状  $\beta$  残存領域、サブグレイン領域、微細な等軸  $\alpha$  粒形成領域が混在した不均一な組織となる。一方、 $\alpha$ +球状  $\beta$  組織を圧縮した場合には、初期  $\alpha$  粒が圧縮軸に垂直な方向に引き伸ばされ、その内部は動的回復によりサブグレインが多数形成された組織となる。これより炭化物形状の異方性が大きい方が不均一変形が導入されやすく、大角粒界で囲まれた等軸  $\alpha$  粒の形成がより起こりやすいことがわかった。

代表的  $(\alpha+\beta)$  型チタン合金である Ti-6Al-4V 合金の  $(\alpha+\beta)$  二相域、near- $\beta$  型チタン合金である Ti-10V-2Fe-3Al 合金の  $(\alpha+\beta)$  二相域及び  $\beta$  単相域、準安定  $\beta$  型チタン合金である Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al 合金の  $\beta$  単相域における高温変形組織について詳細に調べた。チタン合金の高温変形中の動的復旧過程は  $\alpha$  相の体積率によって異なり、 $\beta$  相に関しては、 $\beta$  単相域及び  $\beta$  変態点直下では主に動的回復が起こり、 $\alpha$  相の体積率が多くなると動的連続再結晶が起こり、 $\alpha$  相に関しては  $(\alpha+\beta)$  二相域において動的連続再結晶が起こることが明らかとなった。

教授 牧 正志  
助教授 古原 忠  
助手 森戸 茂一

工学研究科 材料工学専攻

材料機能学講座  
機能構築学分野

当研究室は、平成15年12月に新しくスタートした。同年12月1日に、杉村（名古屋大学大学院工学研究科材料プロセス工学専攻より）が、翌16年2月1日付で李（名古屋大学大学院工学研究科博士課程修了）が着任した。本稿では、研究室で現在取り組みつつある研究テーマについて紹介したい。

### 自己集積化による薄膜材料の創製

分子同士が自発的に集合して分子集合体薄膜を作成する、自己集積化－セルフアセンブル（Self-Assemble）による薄膜材料形成の研究を行っている。反応環境下に固体基板を一定時間放置するという簡単なプロセスで、膜厚・層厚が1分子レベルに正確に制御された有機単分子膜（Self-Assembled Monolayer, SAM）や有機－無機積層膜を作製することができる。

特に力を入れているテーマは、SAMを積層して多層膜を形成する研究である。例えば、金属原子（ジルコニウムや亜鉛）によって有機酸分子（有機ホスホン酸やカルボン酸）をブリッジして、有機分子単層膜－金属原子単層膜－有機分子単層膜－金属原子単層膜と積み重ね多層膜を形成するプロセスを検討している。有機酸分子と金属原子との間に錯体が形成され、各層が連結される。分子が緻密に集積化しているため基板を環境から遮蔽する機能に優れています。つき回りが良く立体的な形状をもつ物体の表面にも均一に被覆できることから、防食被覆への応用を検討している。

### 有機分子と半導体材料の化学接合

代表的な半導体材料であるシリコンの表面に有機分子を化学的に固定化し、有機－半導体接合界面の物性を調べる研究を行っている。有機分子と半導体との間での電子移動という基礎的にも興味深い研究課題であるばかりでなく、半導体材料と有機分子材料を融合化した新しい電子材料へと発展するものと期待している。

具体的には、水素終端化シリコン表面の化学反応性を利用して、有機分子とシリコンを接合する。Si(111)面を希薄フッ酸でエッチングすると、Si-H基によって表面が終端化されることが知られている。Si-H基から、水素を引き抜くことで、表面にシリコンの未結合手（ダンギングボンド）が形成される。別の言い方をすれば、シリコンラジカルが生成する。水素終端化シリコン面は、大気中でも酸化されずに数時間維持されるほどの安定性を有しているが、反応開始剤の投入、光励起、熱励起などで水素を引き抜き、ラジカル化させることができる。水素を引き抜くのと同時に、不飽和炭化水素やアルコー-

ル分子と反応させることで、シリコンと有機分子が直接化学結合で繋がった单分子層ができる。これも、一種のSAMである。単に、物理的に有機薄膜を蒸着したのとは異なり、共有結合によってシリコンと有機分子が接合しているため、その電子物性は異なることが予想される。実験的側面、理論的側面の双方から、その物性を明らかにしたいと考えている。

### 真空紫外光を用いた光微細加工

光リソグラフィは、電子集積回路、マイクロマシン、バイオチップ等のマイクロデバイス製造に欠かせないキーテクノロジーであるが、高価な設備を必用とすること、フォトレジストと呼ばれる光感応性高分子材料を使用し、プロセス工程が多く簡便さに欠けるなどの欠点もある。当研究室では、実験室で簡単に微細加工ができるようになることを目指して、フォトレジストを使用せずに材料表面に直接微細パターンを転写する、新しい微細加工技術の開発に取り組んでいる。

真空紫外光とよばれる波長100～200 nmの光は、通常の紫外線よりも高いフォトンエネルギーを持ち、有機分子の炭素骨格を直接励起することができる。同時に、試料表面近傍の酸素分子を励起して、極めて酸化能力の高い一重項酸素原子を発生させる。真空紫外光を照射下ではこの二つの反応が進行し、有機分子の分解反応が進行する。ここ十年間ほどの間に、比較的低価格で光強度も十分にあるエキシマランプが広まり、真空紫外光を用いた光化学実験がやりやすくなってきた。当研究室では、波長172 nmのキセノンエキシマランプを用いた微細加工プロセスの研究を進めている。前述したSAMの微細加工が研究の中心であるが、高分子材料表面の微細加工などへも展開している。フォトマスク密着法で、線幅1 μmを若干切る程度の微細加工が実現している。

### 走査型プローブ顕微鏡による反応操作

ナノメートルスケールから原子・分子レベルの解像度で固体表面の観察を可能にしてきた走査型プローブ顕微鏡（Scanning Probe Microscope, SPM）は、一方で、微細加工技術としての側面を有する。このSPMを化学反応操作に使うナノ加工プロセスを研究している。先端の鋭いSPM探針によって、局所的に物質の表面に化学反応を誘起し、ナノメーターレベルの空間分解能で物質の表面を酸化・還元することができるようになった。さらに、このSPMナノ化学変換と既存の表面処理とを有效地に組み合わせることで、ナノメートルスケールでさまざまな物質を集積化することが可能になる。

教授 杉村 博之

助手 李 庚晃

エネルギー科学研究科 エネルギー社会・環境科学専攻

地球環境との調和について研究しています。

## 社会エネルギー科学講座 エネルギー社会工学分野

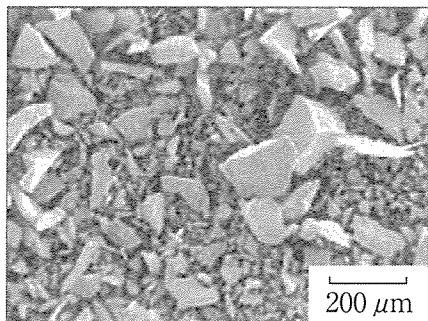
エネルギー社会工学分野では、地球環境調和型社会システムの構築を目指し、エネルギー資源の有効利用と評価システムの体系化に関する研究を行っています。具体的には、資源生産性の向上、すなわちできるだけ少ない資源（エネルギー資源、鉱物資源、土地資源など）でできるだけ豊かな暮らしを提供するためにはどうしたらよいか？を目的として、以下のような研究を進めています。

### ■材料科学からのアプローチ■

「機能性材料・新素材（エコマテリアル）の開発」と「新しいプロセス（エコプロセス）の開発」の2つを軸とし、材料という観点から地球環境に優しい資源の有効利用を研究しています。

#### 主な研究テーマ

- 酸化チタンを中心とした高機能光触媒材料の開発
- 高効率エネルギー利用を目指した窒素吸蔵合金の開発
- 磁場を利用した材料およびプロセスの高機能・高効率化
- 太陽光と酸化鉄を用いた二酸化炭素固定プロセスの開発
- 繰り返し圧縮圧延、ボールミルを用いた材料開発プロセス



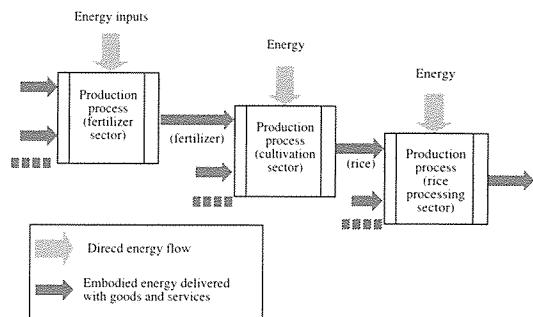
ボールミル処理を施した窒素吸蔵合金粉末のSEM（走査型電子顕微鏡）写真

### ■社会分析・評価からのアプローチ■

LCAや産業連関分析法によって既存もしくは新しい製品、プロセスおよびシステムの環境影響評価を行い、

#### 主な研究テーマ

- リサイクルを含めた環境影響評価指標の開発
- 産業連関分析法によるエネルギー生産性評価
- 京都市のモーダルシフトによる二酸化炭素排出量削減効果
- ヘドニック地価関数による原子力事故の影響評価



産業連関表を用いたエネルギー生産性の分析  
(図は直接的なエネルギーフローと隠れたエネルギーフローの概略図)

### ■教育からのアプローチ■

将来の私たちの社会においてエネルギー環境教育の果たす役割やその重要性について研究を行っています。

#### 主な研究テーマ

- アンケートと実践に基づいたエネルギー環境教育のあり方に関する研究



中学校におけるエネルギー・環境教育実践の様子

教授 石原 慶一

助教授 奥村 英之

助手 山末 英嗣

技官 藤本 正治

### 材料プロセシング分野講座

## 木材+ヘマタイト混合物及びポリエチレン+ヘマタイト混合物のガス化・還元

### 1. 緒言

本研究では、種々の混合比で混ぜた木材 (C: 48.0 wt%, H: 6.2 wt%, O: 45.8 wt%) とヘマタイト ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) の混合物及びポリエチレン ( $[\text{C}_2\text{H}_4]_n$ ) とヘマタイトの混合物を高温で熱分解し、木材・ポリエチレンのガス化特性、残留物の組成、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  が還元され金属 Fe が得られるかを調べた。

### 2. 実験方法

ペレット型に成型した木材とヘマタイトの混合物、又はポリエチレンとヘマタイトの混合物を試料とした。混合比は木材とヘマタイトの混合物中の C と O のモル比が  $\text{C}/\text{O}=0.5, 1, 1.05, 1.1$ 、ポリエチレンとヘマタイトの混合物中の C と O のモル比が  $\text{C}/\text{O}=0.5, 1, 2, 4$  となるよう定めた。Ar 霧閉気の高周波炉内で所定の温度 (1673 K~2073 K) に保持した  $\text{MgO}$  るつぼに試料を投入して熱分解し、発生ガスをガスバッジに捕集し、ガス成分濃度をガスクロマトグラフを用いて求めた。

### 3. 実験結果・考察

木材とヘマタイトの混合物を 1773 K において熱分解したときの C/O と生成物の収率及び生成ガス組成の関係を Figure 1 及び Figure 2 に示す。ここで  $\text{MgO}$  るつぼ内残留物は Residue と表記する。混合物を熱分解すると  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  が還元されて金属 Fe が得られた。混合物中に存在した C の大部分は  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  を還元し、CO ガスとして回収され、H のほぼ全量が  $\text{H}_2$  ガスとして回収された。

また混合物からの生成物をガスと  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{MgO}$  るつぼ内残留物として Fe,  $\text{FeO}$ , C のみであると仮定し、固液気相共存の熱力学平衡計算により、生成ガス組成と生成物の収率を算出した。計算結果は Figure 1 及び Figure 2 に calc と表記する。実験値と計算値は生成物収率及び生成ガス組成でともによく一致した。したがって 1773 K において木材とヘマタイト混合物の熱分解反応は急速に熱力学平衡に到達し、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  が還元され Fe が得られることがわかった。

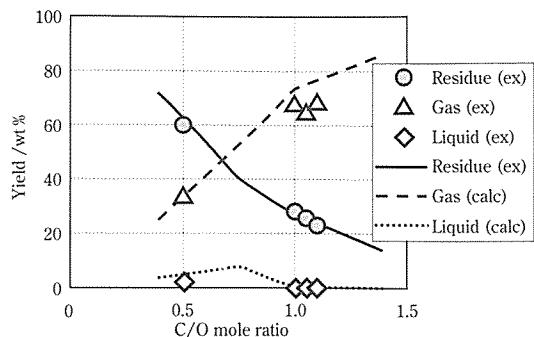


Fig. 1 Yields of decomposition products for biomass+hematite mixture at 1773 K

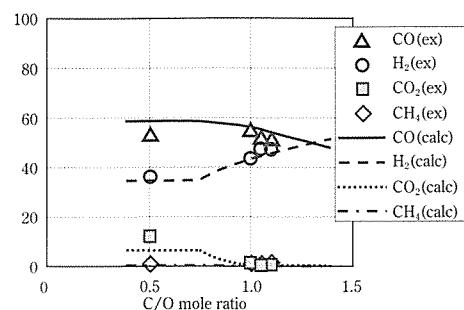


Fig. 2 Gas composition of products for biomass+hematite mixture at 1773 K

教 授 岩瀬 正則

助教授 藤原 弘康

助 手 長谷川将克

エネルギー科学研究所科 エネルギー応用科学専攻

**エネルギー応用プロセス学講座  
高温プロセス分野**

**・溶融塩化カルシウム電解法(OS法)による  
酸化チタンの還元**

金属チタンは、軽量で比強度が高く耐食性に優れ、高温強度が大きいなどの優れた特性を有する金属である。これらの特性により、これまで主に航空宇宙産業、化学工業あるいは電力エネルギー産業などの分野で利用されてきた。

本研究室では、現在工業的に実用化されているクロール法に代わる新たなチタン製造プロセスとして、近年、 $\text{CaCl}_2$ 溶融塩電解法を用いた Ca 還元法 (OS 法) を提案している。このプロセスは、クロール法の特徴である  $\text{TiO}_2$  を  $\text{TiCl}_4$  に変換する過程を経由することなく一段階の反応で金属チタンを製造し、さらに連続的に生産を行うことが可能である。この方法によれば、大幅なコスト削減と省エネルギー化を実現できると考えられる。本法の有用性は現在広く知られることとなり、多くの関係研究を巻き起こしており、2003年度の Materials and Metallurgical Transaction A&B 誌の最優秀論文に選ばれた。

一方、OS 法の問題点として、逆反応により Ca が浪費され、Ti の脱酸が不十分になることや、陽極材料としてカーボンを使用するため、生成した Ti が炭素汚染される可能性がある点が指摘されている。本年はこれらの改善的目的を絞り、その解決策として  $\text{MgO}$  粗隔膜を適用した。実験の結果、チタン中の炭素濃度値を低減することができ、酸素濃度が低減したことから、Ca の逆反応も抑制された。なお、Ca が  $\text{MgO}$  との反応で消費される可能性も判明した。

工業化に向けた今後の課題として、プロセスを繰り返して Ti を製造した場合の電解浴の特性変化や、反応容器、粗隔膜等の耐久性の調査、一ヶ所で製造できる Ti の大容量化、反応炉内を不活性雰囲気に保った状態での  $\text{TiO}_2$  の投入方法と Ti の回収方法の考案、最適な隔膜材料の模索、等に取り組んでいる。

**・水素吸蔵合金の製造プロセス提案**

現在までに多くの水素吸蔵合金が提案され、より軽量で単位重量当たりに多くの水素を吸蔵できる合金開発が進んでいるが、いずれも製造のためのエネルギー消費を考慮して設計されたものではなかった。

本研究室ではより安価に水素吸蔵合金を大量に製造できる方法に目的を絞って製造方法を中心に開発しようと考え、今水素吸蔵合金として注目される Ti-V-Cr をそれぞれの酸化物の混合体を原料とし、カルシウムによる高温

共還元を用い、一回の反応で還元と合金化を同時にを行い、製造することでプロセスの簡素化と省エネルギー化を図っている。

酸化物混合体を金属カルシウムで同時に還元し合金粉末を直接得る共還元法に副生成する  $\text{CaO}$  を溶融  $\text{CaCl}_2$  に溶解除去する方法を付け加え、30 mol% Ti-V 合金および  $\text{TiCr}_2$  化合物を例にとって本法の妥当性を実験で検討した。その結果、Ca より高い融点である酸化物同士を混合し、さらに  $\text{CaCl}_2$  と共にカルシウム共還元する方法を水素吸蔵合金の安価な製造プロセスとして提案するに至った。

**・熱電発電モジュールの基礎研究**

熱電発電とは、ゼーベック現象を利用して、熱エネルギーを直接電気エネルギーに変換する方式である。この方法は機械的な駆動部分がなく、排出物を出さない、小さな温度差からでも電力を発生させられる、といったメリットを持っており、熱源の大きさや品質を選ばずに発電が可能である。自然界に存在する、もしくは工場廃熱から生じる未利用熱源を活用した大規模熱電発電を想定した場合、熱電材料としては資源が豊富で安価な鉄基合金が適している。

本研究室では  $\text{Fe}_2\text{VAI}$  をとりあげ、これを鋳造してその特性と組成に関する基礎データを検討すると共に、この合金のゼーベック係数が組成のわずかな違いで正から負に大きく変化することを利用し、合金の一部に Al を拡散させることで、機械的接合部のない pn 一体型素子対の作製を試みている。

実験の結果、作製した合金のゼーベック係数は  $-95 \sim +100 \mu\text{V/K}$  であった。おおまかにみて合金中の  $(\text{Al} + \text{Si})$  濃度が低下するにつれ、ゼーベック係数が正から負へと変化した。Al の拡散によって接合部のない pn 一体型素子対の作製を試みた結果、873 K で 86.4 ks の熱処理後に続けて 1193 K で 86.4 ks 热処理することで、 $(\text{Fe}, \text{V}, \text{Si})_4\text{Al}_3$  と表わされる化合物を生成させることができた。本実験条件では pn 一体型熱電モジュールの作製には至らなかったものの、拡散が進行するにつれてどのような相が生成していくかが明らかとなった。今後は熱処理条件をさらに検討することで、均一な組成の合金作製を試みたい。

本研究室では他にも、酸化物から直接、超微粉末タルタルやニオブを製造する省エネルギープロセスの研究や、Ta, Mo, Fe のシリサイドの標準自由エネルギーの測定などを精力的に行っている。

詳細は当研究室のホームページ (<http://ogre.mtl.kyoto-u.ac.jp>) をご参照ください。

助教授 鈴木 亮輔

助手 植田 幸富

エネルギー科学研究所 エネルギー基礎科学専攻

**エネルギー反応学講座  
量子エネルギープロセス分野**

- 固体エネルギー機能材料を創る/調べる -

当分野では、高温でのイオン反応を利用した「ものづくり」や、X線や各種粒子線、レーザーを用いた固体エネルギー機能材料の解析を行っている。多種多様な機能を持った酸化物、炭化物、窒化物などの材料を思い通りに創り、機能を高めるための、通常では困難な化学反応でも速やかに進行させることのできる、プラズマ化学反応による材料合成、材料の機能を十分に引き出すために必要な組成、組織、構造や電子構造を調べるための材料評価法の確立、固体酸化物や光機能ガラスを対象とした光学物性の探求を研究を目的としている。

材料合成、材料評価のテーマとしては、従来より DC アークジェットプラズマを用いた材料の表面改質と物質合成に関する研究を遂行している。大電流低電圧の DC アークジェットプラズマは、プラズマガスの種類と混合比によって、超高温に熱せられ音速近傍まで加速された、化学反応性の非常に高いラディカル種ないしはイオン種を作ることが出来る。Ar 中にメタンと水素を微量添加し金属基板にプラズマジェットを吹き付けると、容易にダイヤモンドやダイヤモンドライカーボンを生成できる。また、Ar 中に水素と窒素ガスを同時に添加して、Ti 等の反応性の高い金属基板に吹き付けると、平衡ガス反応よりも桁外れに大きな速度で TiN の厚い被膜を作製することができる。

当研究室ではこの特異なプラズマジェットの性質を利用して、高機能性の厚膜合成や表面改質を試みている。特に、これらの硬膜や改質部の組成、構造、組織を原子レベルの分析技術を駆使することによって明らかにするとともに、その生成機構の材料学的な解明に取り組んでいる。

さらに Pt/C 触媒の調製過程による Pt 粒径・分散への影響に関する、プロトン導電体を電解質とする固体高分子型燃料電池における電極での白金合金触媒の性能向上を目指した透過型電子顕微鏡による研究、不等厚金属板表面に生じる微細凹凸構造の形成に関する、有限要素法による計算と応用光学実験の両面からのアプローチによる研究等が進行中である。

光/エネルギー機能材料の光学物性のテーマとしては、時効によるイットリア安定化ジルコニアの導電率低下に伴う局在電子構造からの発光変化に関する研究を遂行中である。固体酸化物型燃料電池 (SOFC) は高温作動に

よる電力変換効率の高い燃料電池であり、イットリア安定化ジルコニア (YSZ) は SOFC の高い動作温度での熱力学・化学的安定性などのきびしい諸条件を満たすもっとも代表的な固体電解質材料であるが、時効によるイオン伝導度の低下という問題を抱えている。酸素イオン伝導体である YSZ におけるイオン伝導は、酸素空孔によって左右され、これまでの EXAFS, TEM 観察と電子回折、内部摩擦等による結果からも、時効に伴って空孔の作る複合構造が大きく変化することが確かめられている。一方、YSZ をはじめとするイオン性結晶の光物性研究から、酸素空孔は局所構造に対応した多様な発光ピークを示すことが知られている。本研究では、He-Cd レーザーを用いたフォトルミネッセンス測定によるバンドギャップ内準位からの発光の解析により、時効に伴う局所構造変化を解析した。従来、導電率低下の原因として議論のあった母体／ドーパント・カチオンによる空孔トラップ効果は実は副次的であり、電子構造の変化による発光の大きな変化を生じるような歪みの異方性の緩和に伴う欠陥複合構造の変化が主であることが示唆された。

また、光誘起構造変化ガラスにおける発光疲労・回復現象に関するテーマでも成果を上げている。非晶質カルコゲナイトは、光誘起相変化現象を活かした記憶材料への応用が既に行われ、特有の光学特性を生かした光機能材料への応用が検討されている。特に、電子構造と局所的構造との相関により、多重安定性をもつ自由エネルギーの光励起にともなう変化によって、相変化にとどまらない多彩な光誘起現象を起こす。中でも代表的な、光照射による発光疲労現象メカニズムの解明にあたって、当分野では硫化物ガラスに注目し、新たな疲労・回復競合現象を見出し、光誘起による励起状態での安定/準安定構造のスイッチと熱励起による基底状態での逆方向のスイッチの競合により、この特異な現象が可能であることを示した。

さらに、光通信における優れた機能材料としての硫化物ガラスに関するテーマとして、希土類ドープ硫化物ガラスにおける母体構造による光学特性の変化に関する研究も行った。

助教授 富井 洋一

助手 蜂谷 寛

国際融合創造センター

## エレクトロニクス分野

## STMによる材料表面の原子レベル評価

## (1) 水素終端 Si (111) 1×1 表面下のドーパントの STM-BH 法による観察

急速な電子デバイスの微細化に伴い、現在最も微細化の進んだトランジスタのゲート長はナノメートルサイズになっており、このような微細なデバイスでは半導体中のドーパント原子ひとつひとつの分布の様子がデバイス全体の特性に大きな影響を与えることが知られている。本年度は昨年度に引き続き水素終端 Si (111) 表面に STM-BH (Scanning Tunneling Microscopy - Barrier Height Imaging) 法を応用することで半導体表面近傍の個々のドーパントを直接観察する研究を行った。STM-BH 法は通常の STM 観察と同時に表面近傍の静電ポテンシャルを非常に高い空間分解能で計測する手法として知られている。図 1 はボロンドープの水素終端 Si (111) 表面における STM-BH の結果で、表面下に存在するボロン原子の作る局所的な静電ポテンシャルの上昇を検出することに成功している。これまでの研究により、不純物がドナーの場合には表面近傍の静電ポテンシャルが局所的に低下することが明らかになっており、STM-BH の結果は不純物原子の帶電の符号に対応しているものと考えられる。したがって、STM-BH 法を用いることにより、STM 観察単独では難しい場合の多いドナー、アクセプターの区別を簡単に行うことが可能であると考えられる。今後は実際の p-n 接合近傍でのドーパント分布観察を目指す。

## (2) STM を用いたポテンショメトリー法の研究

STM の探針を電圧プローブとして使用し、試料に電流を流した状態で局所的な電圧降下の様子を測定するポテンショメトリーの方法を半導体-金属間のオーム的コンタクト部の評価に応用する研究を進めている。SiC, GaN といったワイドバンドギャップ化合物半導体の実用化にはデバイスに効率よく電流注入を行う低抵抗のオ

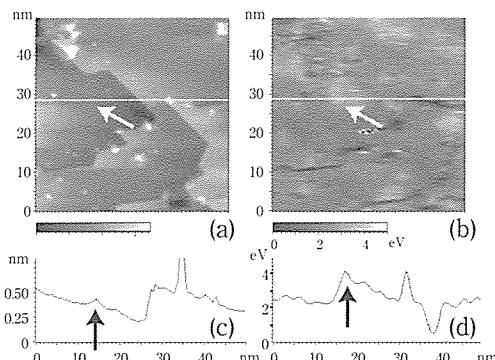


図 1 水素終端 Si (111) 表面での STM (a) と BH 像 (b)。BH 像では表面下に存在するアクセプターであるボロンによる局所的なポテンシャルの上昇が観測されている。(c), (d) はそれぞれ (a), (b) 中の白線に沿ったラインプロファイル。

ームイックコンタクトの作成が必要となるが、良好なコンタクトの作成のための指針を得るためにには実際にコンタクトに電流を流した状態で界面における局所的な電子伝導の様子を評価することが不可欠である。

本年度は Au-Pd 合金薄膜、有機单分子膜 FET を試料としてポテンショメトリー法の測定精度の向上を目指した研究を行った。我々は STM 探針を直接高入力インピーダンスの電圧計に接続することでポテンショメトリー法の高精度化を目指している。研究の結果この方法の有効性が確かめられ、現在さらに改良を行っている。

## 原子サイズ接点の研究

## (1) 貴金属ナノ接点の破断コンダクタンス

金属ナノ接点の高バイアス下における安定性は、接点をナノデバイス配線に応用する際に重要な性質である。本年度は Au, Ag, Cu の貴金属ナノ接点を対象として、これら接点の高バイアス下における破断特性を調べるために、破断直前のコンダクタンスの値—「破断コンダクタンス」—を測定する研究を行った。数 nm 以上の比較的大きな接点の場合には、破断コンダクタンスの電流依存性の解析から、貴金属ナノ接点は  $\sim 10^{11} \text{ A/cm}^2$  程度の電流密度で最も破断しやすくなることが明らかになった。この電流密度はコンダクタンスの振動搖らぎが発生する電流密度とほぼ一致しており、振動搖らぎも接点破断も同一の電流誘起不安定機構（おそらくはエレクトロマイグレーション）によって引き起こされていると考えられる。1 nm 以下の原子サイズ接点では、Au の場合には単原子接点の状態を経て破断する傾向が非常に強まり、破断コンダクタンスは単原子接点のコンダクタンス  $1 G_0$  ( $G_0$  はコンダクタンスの量子化単位) に一致するようになる。このことは Au 単原子接点が極めて安定であることを示している。一方、Ag, Cu 原子サイズ接点の場合には、電流に依存した破断と数  $G_0$  の特定の接点状態を経由した破断とが混在しており、破断の様相は複雑である。

## (2) Pd 単原子接点のコンダクタンス

我々が過去に測定した Pd 接点のコンダクタンスヒストグラムは、単原子接点に対応するピークを示していないが、他の実験では  $1 G_0$  あるいは  $0.5 G_0$  などの位置にピークが報告されている。そこで今回我々は超高真空中で新たに測定を行ったが、やはり単原子接点のピークは観測されなかった。個々の測定では単原子接点のコンダクタンスが測定されるが、その値は広く分布しており、また単原子状態の寿命も短いため、ヒストグラムにピークが形成されなかったと考えられる。

## (3) MCBJによるコンダクタンス実験

MCBJ (機械制御破断接点) は弾性板を反らして板の上に固定した金属細線を破断する装置であり、原子サイズ接点を安定に作製することができる。今回、室温でのテストを兼ねて、破断した Au 接点に単層カーボンナノチューブ (CNT) を分散させた溶液を滴下し、CNT 束が接点電極間を架橋する状態を作り出してコンダクタンス測定を行なった。これまでの測定から、コンダクタンスのバイアス依存性に関して興味深い結果が得られている。

教授 酒井 明  
助手 黒川 修

国際融合創造センター

### 材料デザイン分野

構造用複合材料、超伝導複合材料、多相金属材料、半導体を対象に、ナノ・メゾ構造と機能・特性の相関の実験と解析による解明と、それら成果をベースにしたモデル化・シミュレーション法の開発に注力し、以下の成果を得た。

#### 構造用複合材料の力学挙動

一方向凝固共晶酸化物セラミック複合材料( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}$ )の切欠材を用いた2023Kでの引張試験により、延性一脆性遷移に及ぼす変位速度の影響を明らかにした(図1)。この結果を有限要素法解析で計算した応力分布および塑性域分布から説明した。

連続繊維強化セラミック複合材料(SiC/SiC)の高温大気暴露による劣化のメカニズムを明らかにし、その結果を基に、暴露材の強度を暴露温度・時間の関数として表すことに成功した。

粒子分散アルミニウム基複合材料( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ )の腐食環境暴露材の疲労特性とき裂進展挙動を明らかにした。

図2に示す陽極酸化 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 皮膜やGA鋼板のFe-Zn金属間化合物被膜の多重破壊、引張軸と垂直方向の圧縮破壊、および界面剥離について、実験と解析から、メカニズムを明らかにするとともに、残留応力、コーティング層の圧縮強度、界面強度を求めた。

#### 超伝導複合材料の力学的挙動とその超伝導特性に及ぼす影響

超伝導複合線材は作製・使用時に機械的・電磁気学的応力場におかれる。そのため、変形・破壊挙動とその超伝導特性に及ぼす影響の把握は信頼性・安全性・耐久性の確保に向けて重要な課題となっている。本年度は高温超伝導材であるBi2223/Ag複合線材の曲げによる変形・破壊挙動とその臨界電流およびn値に及ぼす影響、およびNb<sub>3</sub>Al/Cuの繰返し応力負荷時の損傷進展速度と臨界電流の相関を調べ、モデル化をおこなった。前者では臨界電流と曲げひずみの関係、後者では臨界電流と

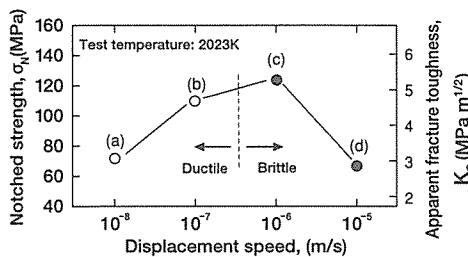


図1  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}$ 複合材の2023Kにおける切欠強度および破壊靄性の変位速度依存性

応力サイクル数の関係を、ほぼ定量的に記述できた。

#### 超伝導複合材料の内部応力状態の放射光によるその場測定

AgシースBi2223超伝導複合線材の外部負荷応力の変化に対するBi2223フィラメントの歪の変化を定量評価するため、引張試験中のBi2223相の格子定数変化を放射光を用いたその場測定によって調べた。Bi2223相の引張方向への歪は試料全体の平均歪に対し、マクロなBi2223相の破壊が認められる以前に直線関係からはずれている事が見出された。これは微小歪においても欠陥の生成が進行していることを示す。

#### 埋めこまれたGeナノドットのGI-SAXSによる構造評価

Si基板上にMBEで成長したGeナノドットをSiで被覆した材料の界面構造を調べるために、反射配置の小角散乱(GI-SAXS)実験をおこなった。成長時間の異なる2種類のドットを比較したところ、Geアイランドと上部キャップ層の界面は格子定数とほぼ同程度から2倍程度の厚さの相互拡散層を持つことが明らかとなった。

#### バルク金属ガラスの溶接材料の異常小角散乱法による構造評価

Zr基バルク金属ガラスの熱履歴と微細組織安定性の関係を調べるために、電子ビーム溶接されたZr-Cu-Ni-A14元ガラスを溶接ビートから逐次位置を変化させて小角散乱強度を測定する位置走査異常小角散乱実験を行なった。その結果、小角散乱強度に晶出起源のものと、それとは独立な微細ゆらぎが存在し、これらの散乱コントラストがZr吸収端で逆の変化をすることを実験的に見出した。

教授 落合庄治郎

助教授 奥田 浩司

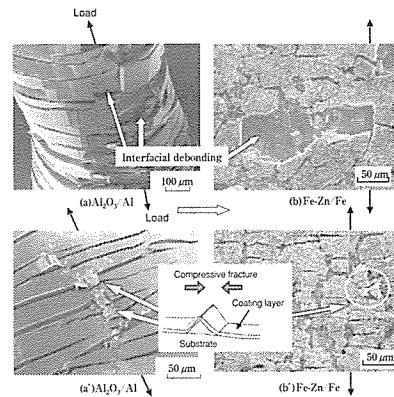


図2 矢印方向に応力を負荷した場合の、Al上の陽極酸化 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 被膜およびGA鋼板上のFe-Zn化合物被膜の多重破壊、界面剥離、圧縮破壊現象

## 会報

工学研究科教授 花崎紘一先生は定年退官された。



花崎紘一先生の御略歴

花崎紘一先生は、昭和38年3月京都大学工学部鉱山学科を卒業後、同大学院修士課程鉱山学専攻を経て、昭和40年4月に同博士課程に進学、昭和43年3月に同課程を単位取得退学され、同年6月に京都大学工学部助手（資源工学教室開発工学講座所属）に採用となられました。昭和58年4月には、講師に昇任されて同教室の応用計測学講座に配置換となられました。昭和60年4月助教授に昇任、平成6年12月に京都大学工学部教授に昇任されて、資源工学教室応用計測学講座を担当されました。平成8年4月の大学院重点化に伴い、大学院工学研究科資源工学専攻探査計測システム工学講座（計測評価工学分野）担当となられ、さらに平成15年4月の地球系改組によって社会基盤工学専攻地盤工学講座（ジオメカトロニクス分野）担当となられました。平成16年3月に定年退官され、京都大学名誉教授の称号を受けられるとともに、同年4月から福井工業大学建設工学科教授として教育研究活動を継続されておられます。

先生のご研究は、時系列として大きく3つに分けられます。第1は、大学院から助手時代になされた水圧下に

おける岩石の爆破に関する研究であります。その成果は、ちょうどその時期に建設が始まった本四架橋における橋脚基礎岩盤発破工法の計画に役立てられました。第2は、カナダ国立火薬研究所への留学を契機として始められたスラリー火薬の爆轟過程と衝撃波に関する研究であります。当時黎明期にあった大型計算機を駆使されて成された数値シミュレーションによる研究成果は、爆轟中断に起因する事故防止に対して有用な指針を与えるものがありました。第3は、講座配置換になられてから力を注がれた非破壊検査・非接触計測に関する研究であります。ワイヤロープの劣化診断を中心とした研究成果は、運輸省管理基準の改定として結実しています。

先生は、京都大学における永年にわたる学生の教育と研究者の指導を通じて、多くの人材を育成されるとともに、学外においては、日本非破壊検査協会や資源・素材学会の理事や支部長として活動されるとともに、経済産業省等の各種委員会の委員として学術行政にも貢献されました。さらに先生は、学術交流活動として、多くの国際会議に代表として出席され、また特に中国において計

測工学や非破壊検査に関する招聘講義に応じられるとともに、同国から多くの留学生を受け入れられ研究者として育成されるなど、国際交流にも積極的に尽力されました。

(塚田和彦)

### 花崎紘一先生御退官に寄せて

勝 山 邦 久

花崎先生、御定年退官、おめでとう御座います。私が4回生になり伊藤研に配属された時、花崎先生は、まだ博士課程の学生ではなかったかと思うが、丁度助手になられたときかもしれない。伊藤先生・佐々先生のご指導の元、我々は発破について研究をしていた。研究室は木造で、我々は山小屋と呼んでいた。そこで毎日パンパンと雷管を使って実験を繰り返していたのを思い出します。今でこそ計測器も進歩し、瞬間的な現象も容易に計測できるが、当時はまだプリトリガーなる手法もなく、シンクロスコープ2、3台を用いて、爆発時の歪み波形、圧力波形、変位など、失敗を繰り返しながらデータを得ていた。山小屋のすぐ隣には金属工学の立派な建物があり、1~2mしか離れていなかったのではないかだろうか。窓の近くでパンパンやるので、とうとう、雷管をはねる前にブザーか何かを鳴らして知らせてくれという苦情が来た。もっともな話である。

私が修士課程の頃、大学紛争が京大にも飛び火して来、京大の場合は逆バリケードという言葉も出た。爆発の実験は少し出来にくくなつたが、丁度この頃、京大にも大型計算機センターが出来、花崎先生たちと一緒に有限要素法のプログラムを作り上げていったのを思い出します。花崎先生のコンピュータ分野が急速に開花し、我々の研究も数値計算が主になっていき、いろいろ教えて頂いたのもこの頃です。最初はテープでプログラムを読み込む方式で、文字の修正も、孔をふさいだりあけたり、自分でしたものです。すぐ、カードでプログラムを読み込む方式になり、間違ったカードはドンドン捨てていき、米国の消費経済の最たるものだと悪口を言ったものです。

昭和48年（1973）、私も博士課程を修了し、当時の通産省の公害資源研究所に勤務しました。入ったときはまだ東京に研究所はありました。そこで工業保安なる研究に携わりました。数年して、カナダへ留学するチャンスを頂きました。東大の山口梅太郎先生、京大の佐々先生、寺田先生、花崎先生と偉い先生が続いて留学されたCANMETで、日本の通産省と同じような省、すなわちDept. of Energy, Mines and Resources所管の研究所で首都オタワにありました。花崎先生と入れ違いで、行かせて頂いたので、ベイショアのアパート、フルサイズの

自動車、家具類などほとんど引き継ぐことができ、留学の準備は簡単でした。花崎先生と一緒に研究所の方々に挨拶に行ったとき、奥さん以外は全部引き継いだと冗談を言うと、分かってくれました。5000ccを越えるエンジンは今ではあまり無いのではないでしようか。オタワのアパートで会った娘さんの陽子ちゃんが My name is Youko と英語をしゃべってくれましたが、その陽子ちゃんも先日お会いしたときは、結婚もされておられ、時間が経つのは速いものだと思ったものでした。2年の留学後帰国したとき、公資研は筑波に移っていました。筑波に行ってからの研究分野は花崎先生のお仕事とは少し分野が違いましたので、仕事上のお付き合いはあまりありませんでしたが、年に一度京都でお会いするようになりました。昔と変わらない気さくなお人柄はうらやましい限りです。今後ともご健康に留意され、ご活躍されますと共に、ご指導の程宜しくお願い申し上げます。

（愛媛大学農学部地域環境工学専門教育コース）

### In Commemoration of Prof. Hanasaki's Retirement

E. Contestable

I first met Professor Hanasaki in 1976 when he came to work at the Canadian Explosives Research Laboratory (CERL) in Canada's capital, Ottawa. How do I remember this date? Well, he decided to come to Ottawa on my wedding day! And next to my wedding meeting Professor Hanasaki and his family was also a happy occasion. Initially, it was a little difficult to communicate with him but after a while I noticed it was getting worse not better. I soon realized that he was doing research with our associate Dr. Feng who spoke better Chinese than English. Professor Hanasaki was learning to speak English with a Chinese accent! So I decided to intervene by speaking to Prof. Hanasaki every morning so that he would balance his Japanese and Chinese accent with my Italian. Then, when he would return to Japan, he would have a real Canadian accent. Heh!

During his tenure at CERL, he also learned the finer methods of how houses are built in Canada. He often visited me at my construction site where I showed him how to drive nails into wood and build your own house! He was amazed and always in awe of the size of the house. I could almost hear him thinking, "Who are these crazy Canadians". Worse still, was when his associate, Dr. Feng built a house twice as big as mine!

Yes, Canadian houses tend to be a little larger than those in Japan ! But we need space during the long winter months when we don't dare go out in the cold !

On a more serious note, Prof. Hanasaki introduced our laboratory to computer modeling and this influence still remains strong at CERL. He was always available to assist and help solve problems.

It was a pleasure to receive Prof. Hanasaki in Ottawa on other several occasions and reminisce the past. In addition, Prof. Hanasaki most recently attended the International Symposium on Fireworks in Naples, Italy, and Valencia, Spain. He was helpful with translation for me with other Japanese attendees, especially when one required medical attention. I hope that he will attend the Symposium in Japan next spring to take part in the technical program and enjoy viewing some special fireworks with us.

On his most recent visit, he relieved one of my gravest concerns. The poster for the International Symposium had been designed and it had Japanese symbols on it. Our Symposium slogan is "Discover the Fire" and is written in Greek in respect of the origin of the word "pyrotechnics" from the Greek "pyro" meaning "fire". A Greek scholar recently revealed that the Greek text did not really mean, "Discover the Fire". So when I saw the Japanese symbols I started wondering what it actually meant. Was it a correct translation or some joke ? Well, Prof. Hanasaki assured me that all was well. There were two Japanese symbols, with the first being the same as that in Prof. Hanasaki's name ! The Japanese symbols were for Hanabi ! (Hanasaki == Hanabi) Fireworks ! What a relief !

Prof. Hanasaki, we have great memories of you and your family in Canada and it is always a pleasure seeing you. May you and your family enjoy your retirement and may every day be filled with good memories and joyous bursting Hanabis !

Have a blast ! Koi !

(Canadian Explosives Res. Lab.,  
Natural Resources Canada)

#### 花崎先生の御退官によせて—「山小屋」から—

浅井 達雄

本部キャンパス、時計台の東の方角、工学部6号館の北側に接するようにして、古びた2階建ての木造の建物

があった。踏み面がすり減って丸みを帯びた階段を上るとそこが「山小屋」であった。私は、学生時代、昭和43年から昭和46年3月まで、その山小屋で花崎先生から御指導をいただいた。

2階は、一室が、中央に置かれた大きな材料棚・本棚で東西二つに区切られ、階段に近い西側は実験材料置場、東側は研究室だった。階段を上り研究室に向かうと、フロットなはずの床は心もちのぼりになっているようだった。そんな研究室の北側の窓を背に、花崎先生の机があった。しかし、先生が在席か否かは、研究室に入っても、すぐにはわからなかった。本が山と積まれていたからである。

花崎先生の前には、東側に武田さん（現舞鶴工業高等専門学校教授）、同級で日本工営に進んだ赤川君、それぞれの向かいに、勝山さん（現愛媛大学教授）そして私の机があった。山小屋での研究活動には2本の共通した柱があった。一つは、発破、もう一つはコンピュータ・シミュレーションであった。この頃、私は佐々先生の指導を受けながら花崎先生からも指導を受けていた。花崎先生には、数値計算法、プログラミング、シミュレーション法に関する指導を受け、後に勤務することになった日本IBMでもスムーズに仕事につくことができた。

奥様にも、大層、お世話になった。花崎先生の奥様に英語、中でも会話法の指導を受けた。花崎先生の御実家は大阪であるが、当時、京都岡崎に居を構えておられた。御結婚間もない頃、図々しくも同好の士と共に英会話の指導を受けに通ったのである。奥様は不出来な学生にも優しく、懇切丁寧に指導してくださった。その成果は、後の米国での2年余りの勤務ではっきりとあらわれた。

昭和46年3月、修士論文も無事通って、4月から日本IBM大阪データーセンターに勤務することになったが、適切な住居が見つからずに困っていたところ、花崎先生が大阪の御実家の別邸を貸してくださった。花崎別邸の2階の一室をお借りして、サラリーマン生活が始まった。花崎家の皆様にはことのほか親切にしていただいた。週末にはしばしば本宅での大阪のご家族一緒に食事に呼んでいただいた。お父様、お母様の笑顔、そしていつも忙しそうにしておられた弟さんの姿が今でも鮮明に思い出される。

師弟愛には、様々なものがあると思う。親子の愛にも様々な要素がある。厳しい愛を担う父と優しい愛を注ぐ母と、この二つの要素のバランスが人をはぐくむ。師弟愛にもそうした要素があるように思う。私は花崎先生ご夫妻から、師弟の愛と親子の愛と、そして家族の和をも学ぶことができた。

このことは、30余年のビジネスマン生活から大学の教壇に立ち、教え子をもつようになった私に、今、大きな

影響を及ぼしている。自らが受けた恩と恵みと愛とをわが教え子に与えることによって、花崎先生ご夫妻から受けた恩に報いたい。

(長岡技術科学大学経営情報系)

### 花崎先生のご退官に寄せて

橋 爪 清

花崎先生にはいつごろでしょうか。初めてお目にかかったのは、たぶん3年生になり、学部の授業を受けていけるのではないかと思いますが、定かではありません。ですが、4年生になり伊藤研究室にお世話になった昭和43年4月には木造の山小屋と称する古い建物におられました。私は縁あってバクテリアリーチングをテーマに選びましたが、花崎先生は学位論文として水中爆破に関する研究をしておられました。その後3年間、私は修士課程を修了するまで伊藤研究室で過ごし、火薬の会社に就職しました。それも当時研究室において爆破に関する研究が熱心に行なわれていたのを見ていたからかもしれません。

43年ころは大学紛争華やかなころでしたが、研究室でスケートに行ったり、学内の野球大会などにも学科でメンバーを集めて参加したりしました。少し薄くなりかけていますが楽しい思い出です。とほけたような飘々とした花崎先生のお若いころを思い出します。

その後、しばらくご無沙汰していましたが、私が大阪支店に転勤になり、ゴルフをお誘いしたことがありました。ゴルフの打っぱなしに同行しましたが、先生はその後、練習が過ぎて肋骨を折るようなことになり、そのころコースに出ることはできませんでしたが、10年ほどたってから、北海道で一緒しました。

平成3年に伊藤先生がお亡くなりになった後、数年してお世話いただける方がおられ、伊藤先生を偲ぶ会、若しくは奥様を囲む会が続いており、先生には毎年お目にかかることができています。長らく学生を指導しておられたからでしょうか、昔ながら好奇心旺盛で、最近の話題を提供していただいているます。

一昨年、私が山口県の厚狭工場に転勤になり、ちょうど資源素材学会が山口大学で開催され、学会の見学会で当工場をご視察いただきました。めがねの度が合わなかったのでしょうか、やはり飘々として場内を見ていただきました。

京都大学名誉教授となられ、福井工業大学に行かれましても、お元気で、ますますのご活躍をお祈りしたいと思います。又、機会を作つてゴルフのお供もさせていただきたいと思います。

最後に、私事ですが先生ご退官の直前に発破の関連の

研究で学位をいただくことになりました。厚く御礼申し上げます。かなり以前に声をかけていただいたのですが、いつまでも気にしていただいたことに改めて感謝申し上げます。

(日本化薬株式会社)

### 花崎紘一先生のご退官に寄せて

植 出 和 雄

花崎紘一先生のご退官にあたって、その研究成果に関しては他の方が記述されると思いますので、私の学生時代に触れた先生のお人柄の一端を拙文にしたることにしました。

花崎先生は、はにかみ笑いがよく似合う温厚な紳士であり怒った顔は記憶に無いということが先ず思い浮かびます。今までに何回か大学に花崎先生をお訪ねする機会がありました。得意なパソコンで作ったグラフィックを使って最近のご研究の様子などを楽しそうにお話され、また時間が有れば飲みに誘っていたこともありました。

私は青木先生に学位論文をご指導頂きました。その際に花崎先生の部屋にお寄りし学位論文等のお話を伺ったところ、数年お会いしていなかったにも拘らず快く御自分の経験など詳細なご説明を頂いたばかりか、四条川端の中華料理東華菜館でご馳走になりました。

4回生当時伊藤研で特別研究を行うことになり、そのころ「山小屋」と皆が呼んでいた木造の古い実験機材の置かれた実験室に机を頂きました。この山小屋は現在の6号館の北側にあり図書室に隣接していました。この実験室には光弾性解析などの実験機材やシンクロスコープ等が、所狭しと置かれていました。この山小屋の責任者が花崎先生でした。特段厳しい管理をされることもなく、いつもニコニコと我々を見守って頂きました。結構器用な方で、実験用の治具などを手作りされ「こんなん作ったけどどうや」などと自慢しておられたことを思い出します。また、私は特別研究として材料の破壊に関する解析をテーマにし、計算センターで花崎先生の名前をお借りしては有限要素法による計算を行っていました。当時は有限要素法解析も今のような汎用になつてないため、たかだか430要素程度の計算も収束しなくて何度も、先生にメッシュの加工や境界条件設定のご指導を頂き完成することができました。

この実験室では同期の北川君や清川君と机を並べ、いつも変わらぬ笑顔の先生に様々なことを御教示頂いたものでした。

6号館から離れた僻地的な部屋にいると仲間意識が深

まるもので、先生から言い出しあは修士の赤川さん、浅井さん達同室仲間が揃って今出川に面した居酒屋「たこ八」でくだを巻いたことも思い出されます。大学行事の中で伊藤研として模擬店のおにぎり屋を出すこととなりました。現在、愛媛大学で活躍されている稻田先生や勝山先生らも加わり、花崎先生の奥様も見えられ一緒に御握りを作りましたが、私が上手に三角御握りを作れたためにそれ以降はおにぎりの上手な植出さんと枕詞付きで覚えていただきました。

先生のご自宅に、同室仲間で招かれ奥様の手料理をご馳走になったことがありました。いまも変わらぬスリムな体型できれいな奥様でしたが、ご馳走を並べられると、花より団子の餓鬼共は皿まで食い尽くす勢いで食べきました。先生はその横で楽しそうに微笑んでいらっしゃったことが当時の雰囲気を思い起すと同時に懐かしい思い出となっております。

京都大学を退官された後もいつに変わらぬ笑顔で健康に留意され、後進にご指導賜わるとともにいつまでもスリムでお美しい奥様と共に笑顔を絶やさないおだやかな日々をお過ごしになるものと確信致しております。

(日鉄エンジニアリング株式会社)

#### 花崎紘一先生の御退官に寄せて

荻野 清

花崎先生、御退官おめでとうございます。

こと花崎先生に関しては、私にとって恩師というよりも（いや勿論恩師ではあるのですが）私にとってずっと身近であり、私がそうなりたいと思う雰囲気を持った存在です。それは私の学生時代に、先生がカナダへ留学されるまでの大学4年と大学院1年の2年間というほんのわずかな期間での先生との付き合いを感じたことがありました。「Dynamic Relaxation 法による動的構造物解析」というテーマでの研究を指導して頂いていました。毎日、夜遅くまで、当時の計算機センターの「System」に通い詰めていたことを鮮明に記憶しています。数値シミュレーションという根気と緻密さを要求される作業の中で、頑々として、あせらず、しかし正確さを内に秘めて、どっしりと落ち着いて進めていく姿や、時としてshyに反応されるところや決して前に出たがらないところが、すごく人間的だと勝手に魅力を感じていました。

この短い間に先生から得たこれらの事柄が、その後の私の社会人としての目標を示してくださったものと感謝しています。

(石油資源開発株式会社)

#### 花崎先生のご退官に寄せて

黒川 孝一

花崎先生には、昭和50年に私が3回生として資源工学科開発工学講座（伊藤研）に配属されて以来、公私にわたってお世話になりました。

花崎先生は我々の学年が4回生の秋にカナダに2年間留学されました。留学前の壮行会前夜での東寺事件やいくつかの武勇伝を諸先輩達から聞かされておりましたが、実際に親密にご指導いただいたのは留学から帰られてからであります。伊藤研と火薬メーカー各社は従来から、多くの共同研究を実施しており、その関係で、私は火薬メーカーの一つである日本油脂株式会社に就職しました。私の就職後も花崎先生は、後輩の学生をつれられて共同研究のために武豊工場に来られましたので、研究に配属された私は、卒業後も続けてご指導いただけることになりました。当時、含水爆薬の国産開発に伴って、死圧現象の研究が盛んに行われており、花崎先生がカナダで研究された連続抵抗線プローブは、死圧現象の解明およびその後の含水爆薬の実用化に大きく寄与することになりました。

その後も、先生とは、私が先生（奥様も）と大阪府立大手前高校の同窓であることもありご自宅にお邪魔させていただいたり、火薬学会や資源・素材学会の年会、リクルートのお願い、博士論文執筆等々でご指導いただきました。

数々ご指導いただいた中で特に印象に残っているのはオーストリアで開催された「第4回爆破による岩盤破碎に関する国際シンポジウム」と学会に統いて岩盤力学及び海外の地下利用実情調査のため、スイスにあるNAGRAのグリムゼル岩盤研究所を訪問した時の思い出であります。学会は、1993年7月4日～8日、オーストリアのウィーン工科大学で開催され、日本から愛媛大学の勝山邦久教授（当時工業技術院資源環境技術総合研究所勤務）とともにご一緒させていただきました。ウィーン2日の朝、喫茶店に入った時、ウィーンでザッハートルテの有名な店だということで花崎先生がご家族へのお土産として2～3個航空便で送られましたので、勝山先生も私もつられて1つずつ買ってしました。このザッハートルテ、品代は4000円でしたが送料が5000円もして高いものについてしまいました。その後もいくつかの土産屋に立ち寄ることになりますが、花崎先生の買われる土産は、例えば木彫りの壁掛けなど数万円の物をこれは奥様に、これはお嬢様にとひょいひょいひょいと買われる。私の財布の中身と先生の財布とはゼロが一桁違っていたことに後になって気づきました。私もつられていつもより出費が多くなってしまいましたが、お

かげでその時買ったカバンを今でも修理しながら大切に使っております。

ウィーンでの学会が終わり、次の目的地であるスイスのルツェルンに移動したことですが、何かの都合で時間がなくなり、切符を買って、駅構内を駆け足で行先の電光掲示板を見ながら3人とも息せき切って1番線の列車に乗り込みました。大きなシートに座って一息ついでいると車掌がやってきて、切符を見せると怪訝な顔をしている。よくよく聞いてみると、その列車はベルン行きだという。次の停車駅はどこだと聞くとベルンだとのこと、ベルンまでノンストップの超特急がありました。方向違いの列車に乗っていたのであります。車掌に事情を説明し交渉しましたが、結局、余分な出費を払う羽目になってしまいました。気の置けない団体旅行？の気の緩みのなせる業がありました。3人の珍道中？で紙面に記載できる範囲での、印象に残っていることの一部であります。

我々卒業生は、先生のことを陰ではみんな『花ちゃん、花ちゃん』と愛称で呼ばせていただいておりました。この愛称に表れていますように、先生は気さくで陽気で、接しているだけで心が和み、ホッとするお人柄がありました。私ばかりでなく、先生のそういったお人柄を享受し、楽しい学生生活を送ることができた学生は多かったと思います。

先生には大変お世話になりました。ご退官後も福井工業大学において引き続き教鞭をとられますが、今後ともご指導、ご鞭撻いただきますよう、よろしくお願ひいたします。

(日本油脂株式会社)

### Kyoto: the Start for Research

– In Commemoration of Prof. Hanasaki's Retirement –

Zheng Liu (劉 征)

It has almost been ten years since I first met Prof. Hanasaki at the campus of Beijing University of Chemical Technology in Beijing. At that time, I was still a master student. Together with some other scholars from Japan, Prof. Hanasaki attended the conference hosted by China Automation Society and gave a lecture on the wire rope testing and evaluation techniques. I was one of the audiences who were attracted by the lecture. Furthermore, our graduate school held a meeting where we were provided a chance to talk to Prof. Hanasaki and asked him the questions of our interest. Prof. Hanasaki introduced us Kyoto, an

ancient city in Japan and Kyoto University, a top leading university in the world. Fortunately, I was recommended to the student exchange program supported by Japanese Association of International Education. When I got the news that I was accepted as a special audit student by Kyoto University, I even could not find a word to describe my excitement. My dream comes to the truth.

The splendid Kansai airport reminded me a new country was in front of me. It was my surprise to see that Prof. Hanasaki himself came to the airport to pick us up together with his wife, an elegant and cultivated lady. He sent Ms. Zhao and I to Kyoto and left late in the night after everything was arranged well. As I knew, they went to the airport every time when a new foreign student came. We were not the formal graduate students, but both Prof. Hanasaki and Dr. Tsukada spent a lot of their time on supervising our study and research work, from the discussion of the research topics to the algorithm implementation, and even on how to use the computer with Japanese operating system installed. From then on, I began to learn what the "research" is and wanted to do research for my lifetime. At the end of the one-year study, I expressed my desire to continue the study for a Ph.D. degree. Prof. Hanasaki emphasized that the research ability was most important for a Ph.D. student. In the following days, I learned how to do research. Sometimes, when I talked to Prof. Hanasaki and Tsukada, I might not always be able to obtain a straightforward answer to the problems I met, but I learned the way of how to think about it, i.e. the ability of critical thinking. Even now, I often asked me a similar question to myself when I met problems or to the others at a conference on their presentations. Research is to find a problem and then find an optimal way to solve the problem. I think this is the most important thing of what I have learned.

Japanese professors and students are always conscientious and meticulous to their (research) work. No matter what the work is and how important the work is. During the study period, I had chances to attend the domestic conferences in Japan and international conferences in Korea, US, and Canada with Prof. Hanasaki. Such experience let me know the other researchers of our field around the world and what they were doing. Prof. Hanasaki checked each slides and gave his feedbacks so that the presentation was well organized and

as understandable as possible to all the audiences. He also showed his great patience on revising our journal publications and tolerance of the grammatical mistakes I made in the manuscripts. Looking at my first technical publication in English again, I realized the progresses I had made during the three years with the help of Prof. Hanasaki and Tsukada, although I should continue to improve my writing skill.

Research is not the whole of the life. When a new year was coming, Prof. Hanasaki and his families always invited our students in the laboratory to his home for a new year party. Hosts' warm welcome dispelled the chilliness of winter and the food was always delicious and unforgettable. All of us did enjoy the time with Prof. Hanasaki and his families.

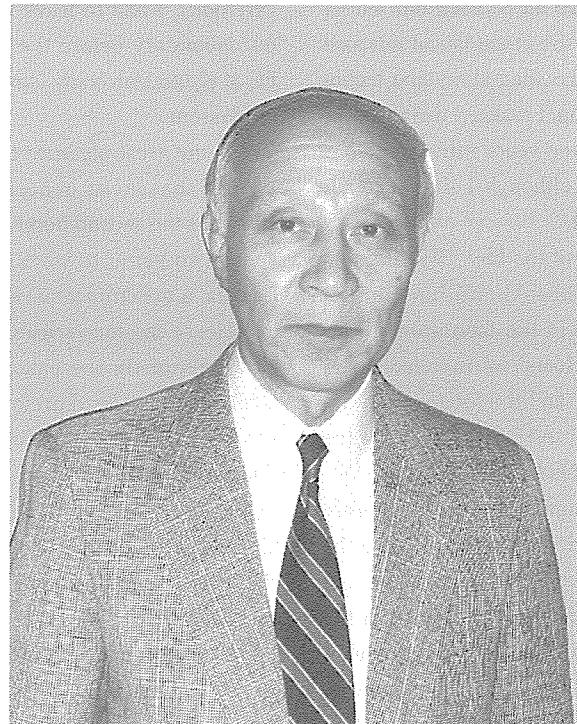
Three years is not a long time. I began to prepare for the graduation in the spring of 2000. Before the day of my oral defence, I practiced the presentation in Japanese with Prof. Hanasaki until one o'clock in the morning. He went into details about my presentation as usual and even corrected my Japanese pronunciation. However, there was no vehicle to Osaka at that

night and he had to stay in Kyoto. After graduation ceremony, I had to leave Kyoto and the professors of our laboratory before the Sakura season. The study life at Kyoto University is really transitory like the cherry blossom.

It is my great pleasure to have the chances to meet Prof. Hanasaki at conferences in North America. Ottawa is the second hometown of Prof. Hanasaki. He spent two years to work for the Nature Resources Canada, a governmental research department. Now I experience the four seasons in the small but beautiful city. People in the eastern and western world are totally different, but I prefer the philosophy of the eastern world. That is "do your best" and "work hard". The most popular saying in Japan is "頑張ってください", as every time Prof. Hanasaki told me when I met him. That is truth. The road of research is full of challenges and difficulties. Such encouragement will always accompany me. And I hope Prof. Hanasaki can enjoy the retirement life with his families.

(Institute for Aerospace Research,  
National Research Council Canada)

工学研究科教授 足立裕彦先生は定年退官された。



#### 足立裕彦先生の御略歴

- 1963年3月 京都大学理学部化学科卒業
- 1965年3月 京都大学大学院理学研究科化学専攻修了
- 1965年4月 大阪大学工学部助手
- 1969年12月 大阪大学工学博士
- 1973年7月 米国 Northwestern 大学材料科学教室  
客員研究員（1974年8月まで）
- 1981年4月 兵庫教育大学学校教育学部助教授
- 1986年5月 兵庫教育大学学校教育学部教授
- 1992年4月 京都大学工学部金属系教室教授
- 1994年4月 京都大学大学院工学研究科  
材料工学専攻教授（改組による）
- 2004年3月 停年退官
- 2004年4月 京都大学名誉教授

足立裕彦先生は、昭和三十八年京都大学理学部化学科をご卒業後永年にわたって、量子論に基づいた材料科学という新しい学問領域の構築と研究分野の開拓に尽力され、大きな功績を残されました。とくにご自身で開発された分子軌道計算法のプログラムである Discrete variational (DV) X $\alpha$  法は、表面科学、金属科学、半導体科学、セラミックス科学、原子・分子科学、分光科学等、材料・物質科学に横断的に広く応用されています。先生は、このプログラムを早い時期から広く世界に公開し、それに立脚した量子材料科学の人材育成に努めてこられました。平成四年には、幅広い分野での産官学の研究者や技術者の横断的な研究討論を活性化するための学会として新しく DVX $\alpha$  研究協会を設立され、爾来会長を務めておられます。さらには日本金属学会評議員、日本金属学会・鉄鋼協会関西支部評議員、常任理事、兵庫県先端金属材料推進委員等を務め、学術行政に御尽力されました。近年では、文部科学省科学研究費の特定領域研究「局在量子構造に基づいた新しい材料機能創出技術の構築」において、研究代表者の重責を担っておられます。この研究は、格子欠陥や粒界等の局在量子構造の機能について、理論計算と実験が密接に連携して解明し、その成果をもとに新しい機能材料を創出するという独創的なアイデアに基づくものであり、その成果は国際的に高く評価されています。

## 足立裕彦先生のご退官に寄せて

松 永 克 志

足立先生に初めてお会いしたのは、私が大学院修士課程に進学した時でした。当時足立先生も京都大学に赴任されたばかりということもあり、研究室の立ち上げの時期でした。午前中の授業を終了した後、午後から先生の指揮の下、学生全員で研究室内の整備・清掃を行ったことが懐かしく思い出されます。若い学生といえども毎日のように研究室内清掃が続くと体力的にも大変でしたが、清掃後ヘトヘトになった学生に先生からビールやお酒を差し入れしていただき、盃を交わしながら先生の研究や趣味などのいろいろなお話を聞かせていただきました。先生は量子力学を基礎とした理論研究をされていると聞かされていたので、どこか気難しいお人柄ではないかという先入観を当時持っていましたが、陶芸品の収集からマラソンランナーとして的一面、酒豪であることなど、その多趣味には驚かされるほどでした。先生のお人柄や研究に対するお考えに触れることができた非常に良い機会がありました。

ようやく研究室内環境も落ち着いた頃のある日、研究室に一台のワークステーションが設置されました。学生数人がそれを取り囲み、もの珍しそうに様子を伺っていたところ、「この計算機で電子状態を明らかにすれば物質の全ての物性を理解・予測できる」と先生が自信満々の表情で学生を見渡しておられました。これは我々の好奇心を刺激する非常に印象的なお言葉であり、私と「計算材料設計学」との出会いであったような気がします。早速その日からUNIXを勉強し始め、複数の学生が交代で一台のワークステーションと格闘する日々が続きました。私などは、曲がりなりにも結果が出るものそれらをどのように解析・解釈したらよいかわからず、先生の部屋に押しかけては量子力学や群論の基礎などを教えていただきました。今思うと、自分の不勉強を棚に上げたようなところもありましたが、懲りずにわかりやすく説明して頂き、適宜、代表的な成書を紹介して頂いたことが印象に残っています。このとき学んだことや苦労したことは今でも自らの研究の基礎となることばかりで、足立先生に手ほどきをして頂いたことに非常に感謝している次第です。

一方、私は博士課程に進み、足立先生のご指導の下、無機材料における格子欠陥の電子構造についての研究を行いました。学会での研究発表や学術雑誌への論文投稿の際、非常に厳しい指摘を受け意氣消沈したときもありました。しかしその度に先生から「君が研究していることは基礎的なものであるが、近い将来その重要性が認識されるはず」と励ましていただきました。実際、「計算

材料設計学」は Materials Scienceにおいて必須の研究分野として認識されるようになってきました。私は現在も計算材料学に関わる研究を行っており、先生の切り開いたこの道の恩恵を大いに受けている一人であります。足立先生がご退官されるにあたり、これからは先生の門下生である我々がさらに飛躍的発展を目指し、世界をリードすべき立場にならねばと身の引き締まる思いであります。

私自身は教育者・研究者として足立先生にはまだまだ遠く及びませんが、先生にご教示いただいたことを糧に努力して参りたいと思います。先生には今後も我々を叱咤激励していただきますようお願いするとともに、益々のご健勝を心よりお祈り申し上げます。

(東京大学工学系研究科総合研究機構)

## 足立裕彦先生のご退官によせて

巽 一 嶽

「まあ、何度も繰り返し勉強してたら、だんだん判ってきます。」確か学部4回生の『量子材料化学』の講義で、先生は学生の理解の浅さを嘆いてか、このようなことをおっしゃられていたと記憶しています。材料を化学結合論の立場から解説する・・研究室配属の時この言葉は魅惑的に響きましたが、材料のことも電子論のこともほとんど判っていない私にとっては、その目標はハードルの高いものでした。博士課程に進むときには、「計算も（確かな結果を得るには）経験や」と私におっしゃられました。経験を積むことでセンスがつき、そうすれば、化学結合論の立場からうまく議論ができるようになる、ということと受け止めております。振り返って、そのような経験を積み、研究のセンスを磨く場であった足立研究室は、非常に貴重なものであったと身にしみて感じております。

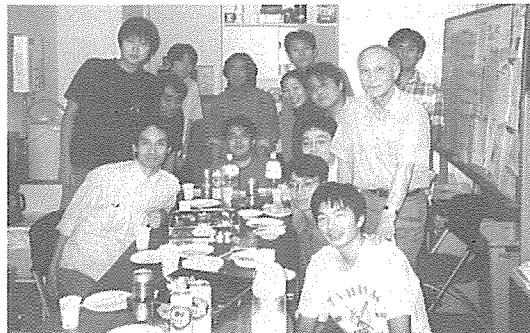
私が先生の研究室に入った時には、博士の学位をとり研究のプロとして活躍されている先輩もあり、博士課程で日夜研究に打ち込む先輩も数多くおられ、研究室の大きな基礎が出来上がっているときでした。そのような恵まれた研究室に幸いにも自分は居たのですが、学生として居る折には、学生が自由に研究活動を行えるよう先生が計らっていただいた多くのことに盲目であったと恥じております。例えば、平成11年に研究室を新しい校舎に引っ越したときなど、先生は「どうや、今度の研究室は」と私どもに尋ねておられました。「ええ、まあ、いいですね」等と曖昧に当時は答えておりましたが、学生が何不自由なく研究活動が行え活発な議論ができる理想的な研究空間を作りだすのに非常な苦心を払われておられたのだと、自分も大学で研究室を作っていく（学生も勿論本当は作っていく人間なのですが）人間になった今にな

って痛感する次第です。

冒頭の言葉からも窺えますが、京都大学の自由の学風ゆえか、先生は学生に事細かに課題を与え指導されるようなことはなく、学生の自主性を重んじておられました。先生の電子論についてのセンスや知識は、研究室のセミナーや学会で先生がされる質問や、お茶やお酒を飲んでいる折りの雑談から、多少なりとも私は吸収してきたつもりであります。特に、博士課程進学や卒業した折りに、先生のお宅でご馳走をいただきましたが、私に自分がやろうとする一つ大きなことを持つようになりなさい、と強い口調でおっしゃられました。このことは、自分の資質を鑑みても、非常に大切なことであると考えております。研究者として自分でしかできぬ武器を身に付けるべく、今後努力して参りたいと思っております。

ご退官後も、京都大学福井謙一記念センターで先生は仕事をされておられます。「研究はこれからの人々に託し、教育に力を入れていく」とおっしゃられていたと伺っております。先生の持つておられる膨大な知識や優れた研究者としてのセンスを、私のような若手研究者や学生に叩き込んで頂けるものと期待し、今後とものご活躍を心より願っております。

(名古屋大学工学研究科マテリアル理工学専攻)



研究室の飲み会のひとコマ

### 足立裕彦先生のご退官に寄せて

大 場 史 康

約9年前、私は足立先生の材料設計工学研究室に配属され、学士論文研究についてご指導を仰ぐこととなりました。私の学年には学部4回生になるまで先生ご担当の講義の配当は無く、その当時、実は先生のお人柄やご研究内容について全く存じ上げておりませんでした。「コンピュータを駆使した新世代の材料研究」という魅力的なフレーズにひとえに惹かれ、配属を希望したこと覚えております。その後、幸運にも希望通り足立先生の研究室に配置されることが決まり、先生と初めてお話しする機会をいただきました。私を含め配属された同期生

が取るに足らない質問、時には大変失礼な質問を物怖じなくするのに対し、先生は微笑みを浮かべられながらも真剣にお答えくださいました。穏やかで優しくお心の広いお方という第一印象でした。研究室での先生のご指導方針は、学生の主体性に任せること、まさに京大の学風そのものでした。しかし、それまで研究というものを全く知らなかった私や同期生にとってこれはたいへん厳しいもので、何をすればよいのかわからず右往左往することも多々ありました。そんな時、先生は、「もがきながら自ら切り開いていくのが学問である」と暗におっしゃっているかのように漠然と励ましてくださるだけでしたが、本当に大切な場面では的確にご助言くださいました。研究室のゼミや学会発表の練習会等では、厳しいご質問やご批評もいただきました。私共の理解が不十分な場合には厳しく叱咤を受け、時には怒鳴られることもありました。普段は大変穏やかな先生から叱咤いただくことは痛烈であり、自身の不勉強を認識するとともに、いつか先生と対等に議論できるようになりたいという向学心を掻き立てられました。私は先生と同じく教育者・研究者としての道を辿らせていただきましたが、課題を自分で設定し自分なりに展開していくことの大切さを、未熟ながらも学部生時代から勉強させていただいたことは大きな糧となっております。

また、飲み会等を通じて足立先生の人生観に触れさせていただく機会も多くいただきました。先生は誰もがご存じのように大のお酒好きです。新入生の歓迎会や追い出しコンパの恒例行事はもとより、研究室の大掃除の後などには必ずと言っていいほどお酒を振る舞ってくださいました。先生の飲みっぷりは相当なもので、酒豪と自負する学生でも先生のペースにはなかなか付いて行けず、時には撃沈する者も出ました。また、年に一度学生全員を先生のご自宅にご招待くださいり、奥様とともに作られたおいしい手料理をご馳走していただきました。先生は市販のお酒ではご満足できない様子で、自家製のビールを作つておられ、おいしい日本酒を求めて醸造所に自ら足を運ばれるそうです。学間に限らず、先生の本質に対する妥協の無さを感じました。このようなお酒の席では、先生のこれまでのご経験について多くのお話を聞かせいただき、今に至られるまでに大変なご苦労をなさっていることを知りました。主觀的な解釈かもしれません、実は先生のご指導方針は、自分の道は自分で切り開くという、まさに先生の生き方そのものであると感じております。学術的な面に限らず、足立先生には本当に多くのことをご教授賜りました。今後も引き続き私共門下生にご指導ご鞭撻くださいますことを心より願っております。

(京都大学工学研究科材料工学専攻)

工学研究科教授 山口正治先生は定年退官された。



山口正治先生の御略歴

山口正治先生は、昭和38年3月大阪大学工学部冶金学科を卒業後、大阪大学大学院工学研究科修士課程冶金専攻を修了、同40年4月大阪大学工学部助手に採用されました。昭和44年9月には大阪大学より工学博士の学位を授与されています。その後、同48年7月大阪大学工学部助教授、同62年4月京都大学工学部教授に昇任され、工学部金属加工学科結晶塑性学講座を担当されました。平成6年4月には大学院重点化に伴い、京都大学大学院工学研究科材料工学専攻材料物性学講座結晶物性工学分野を担当されました。平成15年3月に定年退官され、同年4月に京都大学名誉教授になられています。

先生は構造用金属間化合物材料の実験研究の分野において、我が国のみならず世界のリーダーとして多くの優れた研究を行われました。なかでも、Ti-Al系金属間化合物の結晶塑性と組織制御に関する研究では、世界に先駆けて Al<sub>3</sub>Ti の変形能の評価とその改善指針の提起を行い、その後活況を呈する金属間化合物研究の世界的な潮流を決定付け、実用化が期待される TiAl 基合金の層状組織の低延性問題に研究対象を移されてからは、層状組織の変形機構を系統的に解明されるとともに、TiAl 相自体は十分変形能を有し、TiAl 基合金には十分な開発の余地があることを明らかにされ、TiAl

基合金の開発研究に大きなインパクトを与えられました。これらの研究は、この研究のために育成した“PST crystal”の名称の認知とともに、国際的に高く評価されています。

先生は、この間学内においては学生の教育と研究者の指導にあたられ多くの人材を育成され、学外においては文部省科学研究費重点領域研究、NEDO 国際共同研究、日本学術振興会未来開拓学術研究の代表者を務められ、日本金属学会副会長、同会長や文部省学術審議会専門委員、同省大学設置学校法人審議会専門委員、総理府科学技術会議専門委員など多数の審議会、調査会の委員として学術行政に尽力されました。また国際学術誌 *Intermetallics* の創刊にも尽くされ、編集長として金属間化合物研究の国際的な発展に力を注がれました。国際会議でも日本代表として多数に出席されるとともに、その大半において組織委員あるいは委員長として開催にも尽力されました。これらの研究活動により、日本金属学会功績賞、日本鉄鋼協会西山記念賞、日本金属学会谷川ハリス賞、谷川熱技術振興基金熱技術賞、日本金属学会功労賞、THERMEC 2000 Award 等を受賞され、ASM Fellow としても名を連ねられています。

(乾 晴行)

## MASAHARU YAMAGUCHI

V. Vitek

Masaharu Yamaguchi has retired ? I just can not imagine Masaharu as a pensioner going fishing, playing golf and doing all these things the retired people are supposed to do. I always see him as the most active and prolific researcher who is thriving to move to new scientific endeavors. I am sure that we shall still hear from him in the future, as we always heard in the past, new interesting ideas and discussions of new research directions. Simply, it's impossible to conceive that studies of intermetallics will be advancing without Masaharu at the helm.

Anyway, I am saying all this since we were friends and collaborators for more than thirty years and thus I was privileged to follow Masaharu's professional advancement at every step. We first met in 1970 when he came as a British Council Scholar to work with Professor Jack Christian to Oxford. I had been at this time a member of Jack's group for more than two years and when this young Japanese fellow arrived, Jack asked me to find for him an interesting research topic. I proposed modeling of dislocations and while Masaharu did not carry out any theoretical work prior to coming to Oxford, he enthusiastically embarked on this project and several seminal studies of dislocations in bcc metals resulted from this collaboration. Oxford time was not, of course, only work but many interesting social endeavors often connected either with his college Linacre or with my College Wolfson. I only learned much later how hard time he had eating after dinners in Wolfson the 'smelly' Camembert cheese which all of us enjoyed. Well, this part of the foreign experience was certainly also important and I am sure that by now Masaharu enjoys these French and generally European specialties as much as we do.

After his return to Japan Masaharu became Associate Professor at Osaka University and that's where his rapid rise in the scientific world really took off. I visited him with my wife in 1976. This was when we met first time his charming wife Hiroko and got to know both of them really well. We were actually staying in their beautiful house in Nara. The memory of this visit remains one of our best experiences of visits to far distant lands. Masaharu and Hiroko really did everything possible so that we would see and comprehend

the Japanese way of life. This included long train journeys from Nara to Osaka, which at this time Masaharu did every day. Remembering again some culinary experiences, all the dishes, for us often unusual, served by Hiroko and Masaharu were great. The only one which I did not take to was Masaharu's favorite breakfast, rice with the green tea.

Soon after I moved to the University of Pennsylvania, we arranged that Masaharu would spend his sabbatical leave in our Department of Materials Science. Indeed, he joined us in 1980 and I believe that both Masaharu and Hiroko enjoyed their American year very much, in particular since their apartment was in our beautiful Swarthmore. During this time we developed extensive collaboration on atomistic studies of dislocations in intermetallics. This work laid ground for many theoretical studies of plastic behavior, in particular anomalies, in L1<sub>2</sub> compounds, in particular Ni<sub>3</sub>Al. This was also time when we were joined by Vaclav Paidar from Prague who also developed extensive collaboration with Masaharu that has lasted until now.

Nevertheless, during Masaharu's and Hiroko's stay in America we did not only solve problems of dislocations. We made several grand trips, usually connected with conferences. The most memorable were the trips to the west, including Grand Canyon, and to Florida. In the latter case we went together to the Disney World and enjoyed it at least as much as modeling of the dislocation cores. One somewhat unusual event happened not long after Masaharu joined us at the University of Pennsylvania. He traveled from Swarthmore to Philadelphia by the Septa trains every day. One day both Masaharu and Hiroko were on the train to Philadelphia when the train collided with another one. There were quite a few injuries and we were worried if they were not hurt as well. Fortunately, nothing serious happened to them. Nevertheless, the Septa Company compensated their distress by small sum money, which Masaharu very generously spent by inviting the whole research group for a marvelous dinner. One more memorable occasion was our celebration of the New Year in a restaurant in Media (a small town near Philadelphia). It was a very happy event and I guess the very first time Masaharu was dancing to rock music. I do not know whether this was also the last time but he certainly did well in this activity.

When Masaharu moved to Kyoto we all knew that

many great scientific achievements would follow. Indeed, our expectations were in fact much surpassed. He became the leading figure in the studies of mechanical behavior of intermetallic compounds, recognized worldwide. His notion of polysynthetically twinned crystals became the household term in titanium-aluminum alloys with the lamellar structure. During the Kyoto years Masaharu published many seminal papers, excellent reviews and became the teacher of the generation of new scientists. Just to mention two extremely promising young scientists who matured in Masaharu's group, Haruyuki Inui and Kazuhiro Ito, both of whom are now attaining world wide recognition. Of course, from the Osaka time one must not forget another Masaharu's former student, Yukichi Umakoshi, who by now is also one of the leaders in materials research.

I have, of course, visited Masaharu several times in Kyoto and this was always time of excellent scientific discussions as well as social occasions often connected with Japanese specialties which I could never find, or would not dare to order, if I were visiting just of my own. Memorable are also several scientific meetings Masaharu organized in Kyoto. Again, they were most stimulating for all of us involved in studies of intermetallics and at the same time connected with unforgettable social gatherings.

In conclusion I have to repeat how I started. While I am sure that Masaharu, with his wife Hiroko, will enjoy some additional free time, in particular in Hawaii, which they both love, I am sure that Masaharu will not disappear from the scientific community and will soon bring some new exciting ideas into the studies of materials. It's just inconceivable to imagine that Masaharu would not participate in science any more and people would stop asking, "What does Yamaguchi think of this idea".

(Department of Materials Science and Engineering,  
University of Pennsylvania, Philadelphia,  
PA 19104, U. S. A.)

### 山口先生有難うございます

馬 越 佑 吉

昭和40年秋、私が3回生の頃、卒論のテーマ探しに工学部の東野田学舎の高純と呼ばれる平屋で古びた建物の美馬研究室を訪問した際、「よう、頑張れよ」と声をかけられ、握手をしたのが山口先生との最初の出会いであ

る。随分大きい手で、冶金はやはり土方のような仕事をしないといけないのか、と多少不安であった。しかし、理路整然と研究のおもしろさ、材料の将来像を語る姿は、今流に言えば「かっこよく」、先生にあこがれて研究室に入った。大学院では Al-Zn 合金の高温時効、特にスピノーダル分解について指導戴いたが、当時の設備が貧弱なせいもあり、なかなか結果がでない。さすがに見かねたのか「馬越テーマを変えるか?」と聞かれたが、卒論で応力腐食割れを行ったがうまくいかず、今回撤退すれば2度目になる。なんとしても続けて結果を出したいと言うと、「そうか、自然是意地悪だ、いい結果は隠れていてすぐには姿を見せない。きっといい研究結果が待っているから頑張れ」と励まされた。以来、困難に直面した折にはこの言葉を思い出し努力することにしている。

先生がオックスフォード大学より体心立方金属中の転位芯構造に関する計算機ミュレーション結果を持ち帰り、実験的に検証したいとのことであった。しかし、当時の研究室には材料のいい高純化設備がなく、ならば不純物の影響が少ない体心立型金属間化合物 CuZn で塑性変形挙動を調べ、転位芯構造の計算結果の妥当性を検証しようと話し合い、これが金属間化合物の塑性変形を系統的に研究するきっかけとなった。CuZn に限定した学術上のさしたる理由はなく、当時の手作りの装置で単結晶作りが可能な比較的低融点合金を選択した。すべり系を正確に解析するには円柱状の試料に加工する必要があり、現在のような放電加工機はなかったので、十三近くの家電メーカーの小さな下請け工場にある手回しの小型旋盤を二人で見学し、これを導入した。カタログのみでは機械の性能はわからなく、我々の目的に合致するか否か試す必要があるとの、山口先生の考えに基づいてある。それ以来、装置を導入する折は、テストするのみならずその製造工場を見学することにしている。カタログでいかに性能が良くても、その工場に工具が散乱していたり、社員が無気力な場合は購入しないことにしてい

る。その脆さゆえに金属材料の鬼っ子として忌み嫌われていた金属間化合物を、材料の檜舞台に出し、経験と勘に頼っていた材料開発を学問の域に押し出したのは、山口先生なくしてはなし得なかった。国内外の学会、講演会では、最前列で質問する研究に対する真摯な姿に、絶えず勇気づけられた。国際会議で日本人離れした流暢な英語で渡りあう姿は痛快である。オックスフォード大学の2年間の留学生活がそれを可能にしたと思われがちである。しかし、論文でしゃれた記述を見つけると、それをアルファベット順に整理して記載し、論文執筆の際には絶えずそのノートを参照していたことはあまり知られていない。たゆまぬ努力の必要性を改めて知らされた。研

究者は、背中で教育すると言われるが、正にその研究姿勢で研究の何たるかを教えられた気がする。

私が教授になって間もない頃、研究室は先代からの赤字を抱えその運営に苦慮していた。東京からの帰路、研究室の実状を話すと、即座に「秘書をやめさせろ」と言わされた。それはかわいそうだと言うと、そうかお前は優しいからな、しかし研究費が2千万円に達しなくなつたら切れ、非生産部門にそれだけの経費をかけるのは、研究室統括者として失格だ、との内容に近いことを言われた。組織運営の何たるかをこの時教えられた。幸い研究費バブルもあり、秘書に悲しい思いをさせることなく今日に至っているのは、この時の助言のお蔭と感謝している。このように、研究はもとより組織運営など全ての面において絶えずご教授頂いた。ご退官に当たり改めて感謝申し上げるとともに、先生の新たな出発をお祝い申し上げます。最後に、奥様には学生時代から弁当の差し入れ、娘の洋服の仕立てなど、大変お世話になりました。この場を借りてお礼申し上げます。

(大阪大学 理事・副学長)

### 山口正治先生のご退官に寄せて

鉄井利光

山口先生に初めてお会いしたのは平成元年頃であり、まだバブルの影響もあり、重厚長大産業でも新素材の研究が華やかしり時代でした。私もその年に、三菱重工の製造部門から基礎研究所に転勤になったため、新素材に係わる研究テーマを何か新たに決める必要がありました。当時、会社から言われたことは、金属間化合物がお前の研究テーマであり、後は自分で探すようにと言うことでした。今では考えられないことですが、当時は私のようなアマチュア的な研究者でも自由に研究をさせようと言う風潮がありました。

研究テーマを探すためには、やっぱりその分野の権威の先生に話しを伺うのが一番と思い、山口先生にコンタクトしたところ、私が卒業後、先生が京大に移られたことから、当時全く面識がないにもかかわらず、また、先生にとっては得るところのない、煩わしい訪問であったのにも係わらず、快くお会いいただきました。その面談の際、明確に言われたことは、現在色々な金属間化合物が研究されているが、可能性が最も高いのはTiAlであり、企業の研究としてはそれに集中するのが一番、と言うことでした。

当時、TiAlの研究が最も華やかりし時代であり、国内でも多分野の企業がTiAlの研究を行っていました。そこで、私としては、今更後発でTiAlに参加するよりは、他の新規な誰も研究していないような金属間化合物

の研究をすべきであり、その新しい化合物を教えにもらいに行ったつもりだったのですが、企業の研究としての金属間化合物の成立性を十分考慮された上でのご助言であったと思います。そのご助言もあって、それからの私の研究テーマとしてTiAlの実用化を選定し、それが現在まで続いております。

その間、紆余曲折がありましたが、結果的にTiAlの実用製品(ターボチャージャ)を市場に送り出すことができ、またその結果を学位論文にまとめることができました。この経験を通じてアマチュア研究者から、独立立ちできる研究者に成長できたと思います。これもひとえに山口先生のご指導、ご助力のおかげと感謝しております。

TiAlに関し、これまで多くの企業が撤退しましたが、それでも現在国内では特殊鋼メーカーと重工メーカーの数社が未だ研究開発中であり、少なくとも諸外国に比べれば活性度は高い状態です。これらのメーカーはいずれも、途中途中で山口先生のご指導や励ましを得ながら、研究を継続していたものと思われます。

TiAlの学問ならびに工業の発展にもたらした山口先生の寄与があまりにも巨大であったため、今その不在の大きさを改めて感じる次第です。これまでの先生のご厚誼に感謝するとともに、これからも先生の益々のご健勝を心よりお祈り申し上げます。

(東北大学 金属材料研究所)

### 山口正治先生のご退官に寄せて

白井泰治

京都大学工学部金属加工学科結晶塑性学講座は、高村仁一先生が1984年4月にご退官になったあと、吉川弘三先生(助教授)、中村藤伸先生(助手)、私(助手)岸洋子さん(教務技官)の4人の教職員となりました。その後吉川先生がご病気のためお亡くなりになりましたが、1987年4月に山口正治先生が、新進気鋭の教授として大阪大学から京都大学に赴任して来られることになりました。私は、それ以前から格子欠陥の研究会等で、馴染とした山口先生のお姿を拝見しておりましたせいか、なぜか不安を感じることはませんでした。

その後、中村藤伸先生(現 中島製作所取締役社長)が、以前からの求めに応じて岳父の会社を引き継ぐために京都大学を辞され、代わりに西谷滋人さん(現 関西学院大学教授)が、山口研究室の助手として加わりました。さらに、少し遅れて大阪大学から乾晴行さん(現 京都大学助教授)が助手として加わり、山口研究室の陣容がほぼ整いました。

山口先生は、当時すでに金属間化合物の大家として有

名で、教授ご就任後、あちこちから次々と多くの研究資金を獲得してこられました。そのうちもっとも重要なものは、文部科学省の重点領域研究「金属間化合物」を、その領域代表として立ち上げられたことと存じます。このプロジェクトを契機に、国内ばかりではなく、世界中に Intermetallics 研究ブームを巻き起こし、実用軽量耐熱材料として金属間化合物 TiAl を世に送り出され、さらに学術雑誌 INTERMETALLICS を創刊されました。

山口先生の多額の研究資金獲得が、その高い学術的評価によることに疑いの余地はありませんが、もう一つの大きな要素として、申請書に現れる山口先生の高い文学的才能に負うと感じるのは、私だけではないと思います。常々そう感じておりましころ、その後大阪大学工学部に移りましてから、山口先生と住吉高校の同級生である後藤誠一教授（現 大阪大学名誉教授）から、山口先生は高校時代から文学的素養にあふれ、むしろ文系に進むと思っていたというお話を伺い、大いに納得いたしました。

山口研究室創成期は、先生が獲得された資金で、つぎつぎと新しい実験装置を導入してゆく過程でした。しかし、当初から金属間化合物の結晶塑性研究に集中していたわけではありませんでした。あるとき、学内から大きなコンデンサーバンクを貰い受ける話を山口先生から相談されました。レールガンの電源として利用し、超高速変形の実験をしようというわけです。私もその類の話は大好きなので、すぐにその方向で検討を始めましたが、文献を調べるうちに、容量的に無理があることが分かりました。そこで、レールガンはあきらめ、代わりに火薬

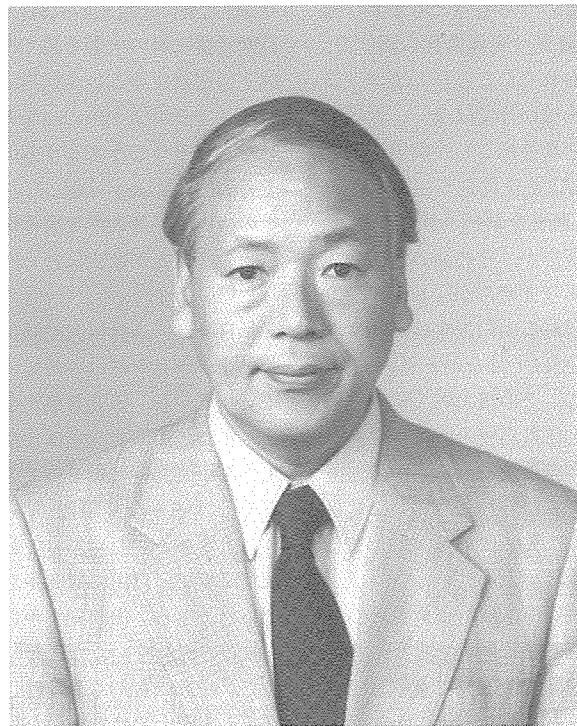
銃を用いて超高速変形をやってみようということになりました。研究室に密封式の大砲のような装置を導入しました。毎回結構な量の火薬を装てんし、点火時には念のため廊下に退避するという代物でした。超高速変形、化合物合成、アモルファスのバルク化等、様々な実験を行いましたが、そういううちに研究室が手狭になりました。桐谷先生らがその後広島工業大学で高速変形に没頭されました。山口研究室の方が歴史は古く、変形速度も圧倒的に速かったです。

私自身は、高村研究室時代からの陽電子消滅による格子欠陥の研究を続けさせていただき、さらに山口研究室になってから、研究対象が金属間化合物にも広がりました。また、山口研究室は大変人気があり、毎年優秀な学生さんが研究室に集まってきた。そのような学生さんを分け隔てなく陽電子消滅グループにも配属いただき、大変ありがとうございました。このような恵まれた環境で、自由に研究生活を送らせてもらいましたところ、山口先生から、ご出身の大阪大学の講座の教授のお話をいただきました。大変光栄なお話でしたので、一も二も無くお受けし、おかげさまで平成8年2月から大阪大学に勤務いたします。

恩師山口先生には、今後ますますお元気で、第2の人生を奥様ともども末永く楽しまれますようお祈り申し上げます。また、時々は私たち後進に、厳しいアドバイスをよろしく願い申しあげます。

（大阪大学大学院工学研究科 教授）

エネルギー科学研究所教授 吉田起國先生は定年退官された。



#### 吉田起國先生の御略歴

吉田起國先生は、昭和40年3月京都大学工学部金属加工学科を卒業後、京都大学大学院工学研究科修士課程金属加工学専攻修了を経て、同45年3月京都大学大学院工学研究科博士課程金属加工学専攻を単位取得の上退学しました。同年4月京都大学工学研究所助手に採用され、同58年6月京都大学原子エネルギー研究所助教授に、平成8年4月京都大学原子エネルギー研究所教授に昇進しました。その後、京都大学大学院エネルギー科学研究所の創設に伴い、平成8年5月同研究科エネルギー基礎科学専攻エネルギー反応学講座の教授に着任し、量子エネルギープロセス分野を担当しました。平成16年3月に定年退官され、同年4月に京都大学名誉教授になられました。なお、昭和54年4月には東京大学より理学博士の学位を授与されました。

この間永年にわたって学内においては、学生の教育と研究者の指導にあたり、多くの人材を育成し、京都大学の基本理念検討委員、京都大学附属図書館商議委員、京都大学国際教育プログラム（KUINEP）委員などを務めました。学外においては、日本学術振興会特別研究員等専門審査会委員、日本金属学会評議員、日

本鉄鋼協会・日本金属学会関西支部常任理事、同関西支部理事および材料セミナー運営委員長を務め、その他、京大会館楽友会評議委員や名古屋工業大学非常勤講師などを務めるなど、学術行政に尽力し、今日に至っています。海外においても、多くの国際会議等に出席し、また外国の大学における特別講演や外国学会からの招請による招待講演などを行ないました。

研究の方面では、これまで、半金属における電子構造と電流磁気効果およびその不均一系の電磁流体的挙動に関する研究、不均質構造におけるパーコレーション現象と複合材料の物性に関する研究、高温超伝導銅酸化物における不均質ナノ構造と伝導機能、カルコゲナイトガラスの物性に関する研究など、材料科学と固体物理の分野において業績をあげられました。特に、不規則不均質材料の構造と物性の相関の問題について、有効媒質理論の統一的理論やパーコレーション現象の材料学的実証と応用の研究に尽力し、その成果は国内外に広く知られ、現在、ナノ構造半導体薄膜や金属－セラミックス複合材料などの様々な機能性材料の評価・開発に活用されています。

## 吉田起國先生のご退官によせて

山本 雅博

旧原子エネルギー研究所は、いわゆる A1 研といふことで厳しい批判にさらされたが、しかし、そこで育った学生・院生・若い研究者にとっては工学部内の異分野（金属、工業化学、化学工学、電気・電子、原子核、衛生）の方々と、学問上の基本的なことから最先端（あるいは細かいノウハウまで）について話を聞くことができたので、Curiosity-driven science を行うにはよい環境であったように思う。吉田起國先生と私は、研究所内の部門・出身の分野も違っていたが、私の恩師である端野朝康先生、内藤静雄先生が「遷移金属中の水素」や「遷移金属と軽元素の表面科学」についての研究を行っていた関係で、金属物理がご専門の吉田先生と親しくして頂いた。その後の改組で、吉田先生はエネルギー科学研究所に移られ、研究所はエネルギー理工学研究所に改組され、私自身は工学研究科に移ったが、吉田先生は会議等で吉田キャンパスに頻繁にお見えになっていたようで、しばしば生協等でお会いした。

年月の流れははやいもので、本年の年賀状で「今年で退官します。」との連絡を頂いた。サイエンスや大学をめぐる状況等のお話を聞きしようと、本年3月に宇治の吉田先生の研究室にご挨拶に伺った。久しぶりの訪問であったが、原子エネルギー研究所時代にフラッシュバックしたような感覚で理工研の木下と3人で話ができる。研究室の伝票等の処理を最後までご自身でされてきたこと、また3月末ぎりぎりまでプロジェクトの報告書もまとめておられるとで、まったく頭が下がる想いであつた。

その時は仕事の話はあまりお聞きできなかつたが、吉田先生の最終講義「物性における個と全体-組織構造と物性の相関-」が久しぶりにサイエンスのお話を聞きする機会となつた。私にとっては、先生の最初のお仕事で半金属Biの電流磁気測定における不均一電流効果の話は特に印象的であった。というのは、最終講義の直前に「Au (111)面上の Bi のアンダーポテンシャル電析の第一原理計算による理論解析」というテーマについて、Biの電子状態について若干の計算を行つたからである。(特定の) 金属物性を量子力学の第一原理から理論的に求める近似的な方法は現在では確立されていて実験ともよく合つし、実験に先立つて予測した例もある。固体物理の知識があればPC上でも計算できるようになっている。(口の悪い人には“brute force”的だと言われる。) A7構造のBiの第一原理計算による全エネルギー・原子間力・電子状態の計算は800 CPU秒で計算可能である。すなわち金属物性における要素還元論のもつ

とも下のレベルでは、容易に解けてしまう状況がある。物質構成の階層の下のレベルでは存在しなかつた特性が、上のレベルで出現(創発)することがある。吉田先生が明らかにされた一見“負の抵抗”と思える現象が、下のレベルから来るものではなく、試料の有限のサイズ効果(Bi中のキャリアーの平均自由行程は低温でサブミリに達する。)による創発であることを示された。この現象は、結果だけ話されれば「ああそうか」と思ってしまうが、結論に至るまでは相当のご苦労があったことと思う。事実、博士論文の公聴会で統計力学の大家久保亮五先生に徹底的に絞られたとお聞きしている。この研究が、おそらくは先生のその後の“物性における個と全体”につながって行かれたことは想像に難くない。一方、自らをかえりみて、自分自身が“物理してない”(化学系用語では科学してないと言わないとまずいようだ。)ことを強く反省することしきりである。吉田先生は御退官後も研究を続けていかれるとのこと。今後も何かとご指導頂けるような機会があればと願うものである。

(京都大学工学研究科物質エネルギー化学専攻)

## 吉田起國先生のご退官によせて

松川倫明

吉田先生とは、1993年に米国・オレゴン大学で開催された低温物理学国際会議(LT-20)で知り合った機会を得て以来、銅酸化物セラミックス超伝導材料のパーコレーション伝導機構などのテーマで今日まで有益な共同研究をさせて頂きました。平成7年に原子エネルギー研究所(現エネルギー理工学研究所)の客員助教授として、先生の研究室(宇治キャンパス)に盛岡から一年間通わせて頂き、私の研究生活において大変楽しく有意義な時間を過ごすことができ感謝しております。

その当時先生からは系全体のマクロな挙動を把握するという視点からの材料物性の解析手法をご教授頂き、要素主義的なミクロな観点からの分析手法に偏りがちな私にとって大変参考になりました。また、絶縁相と金属相を含む複合材料の伝導現象をより統一的記述するために、先生によって考案された有効媒質近似を統一したモデルは、今日までPhys. Rev. Lett.誌などの国際的な論文誌に数多く引用されており、その独創性には京都学派に通じるものがあると思われます。

先生は、専門分野以外にも幅広い知識をもつ教養人であり、その学識の深さには驚かされることしばしばありました。また、お酒の席などでは、他人の模倣や再生産などではなく、独創性に富んだ質の高い研究を心がけるように叱咤激励を受けました。その背景には、ビス

マスアンチモン半金属における異常な輸送現象の機構解明の独創的な研究によって学位を東京大学から授与されたときの先生の御仕事があるようです。学位論文の審査員には、統計力学の世界的な大家である久保亮五先生がおられ、公聴会での質疑応答で冷や汗をかかれたという話もきいております。先生の薰陶をうけて、私もオリジナリティのある仕事をすることを常日頃心がけています。

改組によりエネルギー科学研究所に移られてからは、学内外の様々な要職にあり難用に忙殺されながらも大学院生の指導に情熱を傾けられている先生の姿は教育者として的一面も見受けられる次第です。特に、学生の個性に応じたきめ細かい研究指導には、大変共感するものがありました。

3年前、「不均一系の伝導現象とパーコレーション過程」という演題で講演にいらして頂いた時に、講演時間を大幅に過ぎても丁寧に質疑応答に答えられる先生の真摯な姿勢が印象的でした。退官後は、材料科学者向けのパーコレーション関連の教科書をまとめ構想があると伺っておりますので、実現されることを切に期待しております。

最後に、先生のご健康と今後の発展を心よりお祈り申し上げます。

(岩手大学工学部)

### 吉田起國先生のご退官に寄せて

呉屋智浩

吉田先生には平成8～9年度の2年間、エネルギー科学研究所修習課程において指導教官としてご指導いただきました。エネルギー科学研究所は平成8年度設立なので、私は「新生」吉田研究室第1期生ということになります。

当時、吉田研究室のメンバー（宇治キャンパス）は、同研究科修習課程へ入学したばかりの河合賢君と私の学生2名しかおらず、しかも2人とも実験系ではなく理論系出身、さらに学外入学なので右も左もわからない状況だったため、研究室の運営には大変ご苦労があったことと思われます。しかし、私にとってこの状況はとても幸運でした。なぜなら、研究を始めとして先生から直接ご指導いただく多くの機会に恵まれたからです。

私の修士論文テーマは「Pr添加Y系高温酸化物超伝導体における乱れた構造と超伝導特性」で、常伝導超伝導の相転移現象を理論（パーコレーション理論等）で説明するための基礎となる実験を主としたものでした。学生実験程度の知識・技量しかない私に、試料作製を始め、X線解析、自動計測、液体ヘリウムの取り扱いなど、

実験のイロハについて先生から直接手ほどきを受け、その結果、初めて作製した試料が期待どおり綺麗な超伝導性を示したときには涙が出るほど感激したことを今でも鮮明に覚えています。後日伺ったところ、実は先生ご自身もBi系超伝導体の作製経験はあったもののY系の作製は初めてだった、と記憶しております。初めての試みにもかかわらず成功した要因は、先生のこれまでの豊富な経験に加え、先生自らの事前の周到な調査・準備の賜物だったのです。またご存知のとおり、高温酸化物型超伝導体の試料作製には、試料混合を始め、地道で細かい気配りと手先の器用さが要求される作業が多いのですが、純A型人間の私には大変性に合っておりました。出会って間もない私の性格や特性を鋭い洞察力で見抜いた上で、最適な研究テーマを与えていただいたのだと思います。

また、ゼミにおいても厳しく鍛えていただきました。学部時代に物性物理を一応かじっていた私ですが、（私の記憶が確かならば）あえて東大物理系で博士号を取得されたという吉田先生にとって当然私は赤子のようなもので、よく「それでいいのか？」と先生独特のゆったりとした口調で、しかし厳しく鋭い指摘をよく受けたものです。

このように学問・研究に対して真摯で厳しい一方、持ち前の温かさで学生とのコミュニケーションも大切にしておられました。2年目に児島君、田村君が加わったことで研究室も一層賑やかになり、教授室でよく鍋を囲み夜遅くまでいろいろな話に花を咲かせたこともよい想い出です。このような他愛のない場でも、先生のお話は、先生がお書きになる知性薫るスマートな論文や文章のごとく、哲学的で含蓄ある大変ありがたいお話が数多くありました。今振り返ると、このような場でも学生ひとりひとりの特徴を鋭く観察し、人生について教育いただいたのだなと思います。

先生の人望厚き面は、この4月に円山公園にて門下生が一堂に会した場でも伺い知ることができました。このように現役生・卒業生ほぼ全員が集合する研究室はそう多くはないと思います。また私事で恐縮ですが、遠く離れた沖縄にもかかわらず私の結婚式へ奥様とともにご出席いただき祝辞まで頂戴しました。いずれも、学生ひとりひとりを大切に思う先生のお人柄ゆえのことだと思います。「尊敬」について議論を交わしたことを覚えておりますが、吉田先生は私の尊敬する大切な恩師です。

最後になりましたが、この4月に名誉教授の称号を授与されたとのこと、誠におめでとうございます。特に近年は研究・教育と同時にエネ科のためにご尽力され、多忙な日々をもつと伺っております。先生のこれまでのご功績とご尽力に対して深く尊敬と感謝の意を表すと

とともに、これからも健康にご留意いただき、時には「創造の休暇」を十分お取りいただきながら、益々のご活躍を心からお祈り申し上げます。

(沖縄電力(株), H9年度エネ科修士課程修了)

### 吉田起國先生のご退官に寄せて

原田 琢也

“研究の素晴らしさ、そして楽しさを理解してもらうことが私の目標です”これが私が初めて吉田先生にお会いした時に先生がおっしゃった言葉です。当時はちょうど物理工学科の学部4回生で、将来の研究の進路についてとても悩んでいた時でした。学部から大学院へ進学するにあたり、既に発見された事実の“学習”的段階から、未知の領域に立ち入って新しい事実を発見していく“研究”的段階へと移行していく中で、どのように自分の道を築いていけばいいのか分からなかったのです。そんな時、研究室を訪問させて頂き、初めてお会いした吉田先生がおっしゃったメッセージがこの言葉だったので。すぐに私の迷いは消え、是非こんな先生の下で研究をやっていきたいという思いを強く心に感じたことを、今でも鮮明に覚えています。それほど先生は魅力的な先生でした。以降私は、大学院の修士課程、博士課程と計5年間にわたって、吉田先生に御世話になることになったわけです。

先生の御専門は固体物性学全般に渡り広範囲におよびますが、その中でも特に力を注ぎになっていた内容が、乱れた構造を持つ系における“パーコレーション現象”的理解に関するものであったと思います。このパーコレーション現象とは、系のマクロな物性が、ミクロな個々の要素間のつながりと、そのつながりによって形成されるクラスターの振る舞いによって決定される系において見られる現象で、ある閾値を境に急激にマクロな物性が変化するという特徴を持った臨界挙動のことを意味します。先生は、この分野の多くの研究者が用いる計算機による数値シミュレーションのみならず、より現実の系に近い実在の物質系における実験的研究にも従事され、学術的に貴重な多くの成果を残されました。中でもパーコレーションクラスター形成に関して先生の発表された“吉田モデル”は、その一般性が世界的にも大いに評価されるところとなっております。私は、先生の下で、高温超伝導体・絶縁体混合系における微細構造と物性の相関に関する基礎研究、さらにはその知見をふまえて超伝導臨界電流特性に関する応用研究を行ってきました。それら一連の研究を行う中で、このパーコレーション現象の重要性そして普遍性を深く認識いたしました。そしてさらに、それは研究内容における物理的な話だけではな

く、一般社会生活における様々な事象、例えば人間が行う物事の理解や認知も、このようなパーコレーション現象によって支配されているということも学びました。このことは私の人生においても非常に貴重な知見となりました。

吉田研究室に所属した5年間、何かことあるごとに飲み会が行われ、また研究室での旅行も何度か催されました。そこで楽しいひとときも先生との思い出の一つです。先生は科学技術の分野のみならず文化や歴史に関しても非常に博学であられ、この飲み会や旅行の宴の席では、いつも興味深い話を教えて頂いたこと今でも覚えております。特に、漢詩の句を中国語で教えて頂いたことはとても印象に残っております。

私は卒業とともに先生の下をはなれ、民間企業へと所属を変えることとなりましたが、それからも先生からは様々な機会にいろいろなアドバイスや励ましを頂いております。そのことは本当にうれしくそして感謝すべきことであると思っております。私は先生から研究の素晴らしさ、そして楽しさを教えていただきました。このことを私のこれから的人生に役立てるとともに、また今度は、自らの後輩へと、この思いを受け継いでいきたいと思っております。先生は京都大学を退官後、主に執筆活動に注力されているとお聞きしております。先生が蓄積された豊富で貴重な知見そして鋭い洞察が、文章として残されていくことは本当に素晴らしいことだと思います。そしてそれらを通して、私もまた様々なことを勉強させていただきたいと思っております。これからも先生の益々の御健勝を心からお祈りいたします。

(古河電工(株))



研究室旅行での一コマ

## 平成16年度水曜会大会

●日 時 平成16年6月12日（土曜）12：00－16：00

●会 場 京大会館

平成16年度水曜会大会は6月12日(土)に京大会館において開催され、懇親会、記念撮影、総会および特別講演会が行われた。本大会の参加者は約70名であった。

懇親会は、京大会館101号室にて12時00分よりおよそ1時間開催された。芦田譲教授の司会のもと、まず齋藤敏明教授の開会の挨拶があり、次いで村上陽太郎名誉教授の音頭で乾杯が行われた。会は終始和やかな雰囲気であった。

懇親会時には小雨模様の天候であったが、幸いにも懇親会終了頃には雨も上がり京大会館前にて恒例の記念撮影が行われた。その後、会場を210号室に移し、13：30より総会が開かれた。総会は田中功教授の司会で議事が進められ、まず、齋藤敏明会長から平成15年度の事業報告がなされた。次いで青木謙治会計幹事から会計報告、栗倉泰弘会計監事から監査報告がなされ、いずれも承認された。続いて次期会長の推挙がなされ、新会長に牧正志教授が選出された。牧新会長から就任の挨拶と抱負が語られ、13：55に総会は終了した。

引き続き、特別講演会が開催された。本年度は次の2つの講演が行われた。

「アルミニウム産業の成長を支える材料技術 一現状と課題一」

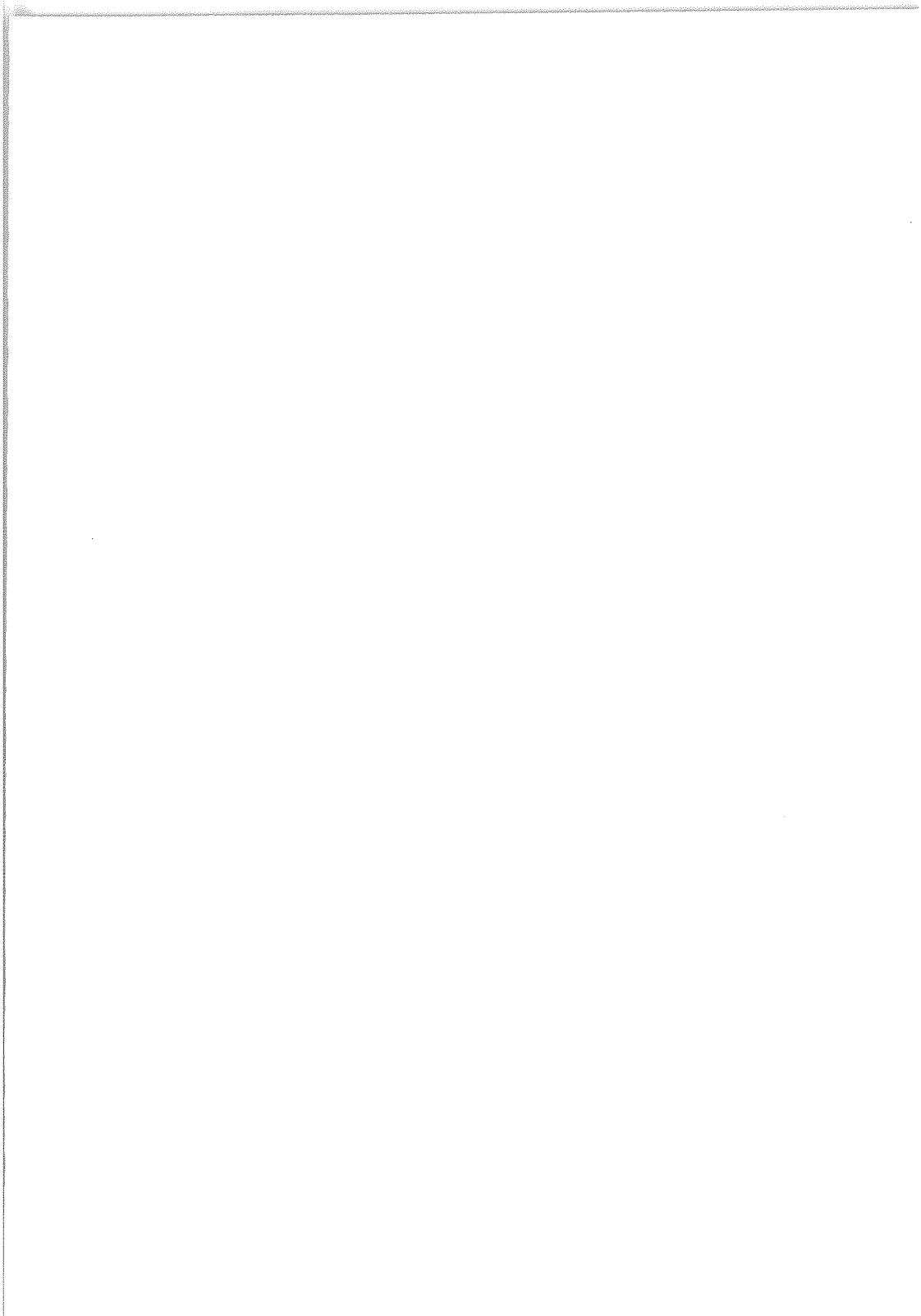
住友軽金属工業(株) 専務取締役 永田公二 氏

「事故災害防止のためのリスクマネジメント」

横浜国立大学 教授 小川輝繁 氏

これらは記念講演として本誌に掲載されているが、永田氏は近年アルミニウム産業が成長してい要因として、アルミ缶の急増、自動車の熱交換器、ボンネットなどの自動車パネルが銅や鉄からアルミニウムに転換されてきていることを挙げられた。また、顧客のニーズの厳しい日本のアルミニウム企業がダイナミックな事業戦略でグローバルな展開を図っている欧米のアルミニウム企業や今後近代化により成長の激しい中国のアルミニウム企業との競争に打ち勝つためには、技術の優位性を保つことが重要であり、そのためには産学連携をさらに機能的に行うことが重要であることを強調された。また、小川氏は事故災害防止のリスクマネジメントとして、リスクの特定、算定、評価、対策が適切に行われる必要があり、これまでの経験に基づく問題発生対策型のリスクマネジメントから理論に基づく問題発見型のリスクマネジメントに転換する必要性を説かれた。これらの講演はいずれも、非常に興味深く、参加者は熱心に傾聴した。平成16年度水曜会大会は、この講演終了後、午後4時過ぎに閉会した。





## 平成15年度水曜会会計報告

平成16年3月31日現在

取入	支出
前年度繰越金 10,010,667円	会誌印刷代（製版・郵送料込）
会費 3,880,130	23巻5号残り 12,075円
会報広告掲載料（製版代込）	23巻6号 2,339,267
23巻5号残り 261,300	印刷代（封筒他） 31,500
23巻6号 741,325	水曜会大会経費（15年6月14日）
会誌論文別刷代 25,200	親睦会費 271,908
名簿売上 17,220	諸経費 1,034,654
会誌売上 7,500	水曜会東京大会経費（15年11月22日）
水曜会大会懇親会費 260,000	懇親会費 739,200
水曜会東京大会参加費 445,000	写真代 68,313
水曜会東京大会写真代 66,000	諸経費 977,023
預金利息 1,452	名簿発行費残り（平成14年版） 910
	編集委員会経費 100,283
	会誌原稿料 192,000
	役員会経費 30,000
	通信費 55,709
	事務人件費 483,220
	文具、コピー代等 39,491
	弔慰費 63,000
収入合計 15,715,794円	小計 6,438,553円
上記の通り会計報告致します。 平成16年6月12日 会計幹事 青木謙治 以上の通り相違ございません。 会計監事 粟倉泰弘	次年度への繰越金 9,277,241円 内訳 銀行普通預金 619,808 銀行定期預金 8,000,000 郵便振替預金 639,646 手持現金 17,787
	支出合計 15,715,794円

## 会員消息

### 昭和24年冶金学科卒業クラス会

第二次大戦後、最初の入学、ペン先やインクも、ノートも不足がち、化学分析の試薬は調達不可能、運動靴も闇市でしか入手できずスポーツは裸足が普通というような時代、それでも卒業頃になるとアメリカの影響で社交ダンスが流行しはじめました。

この年の冶金学科は、入学時は12人（募集は20人、しかし戦時中、学徒動員などで勉強不可能状態だったため、あまりにも入試成績悪く入学許可はこれだけ）、しかし、海外の日系大学からの引揚編入などで、卒業同窓は22人ばかりになっていました。その内9人が他界しました。

今回は8人が神戸の舞子に集いました。眼前の世界一の吊り橋、明石大橋のメインケーブルとワイヤーロープは、同窓の奥谷君が神鋼鋼線工業（株）に在職時に製造されたものが大半を占めています。舞子ビラの一室で夜遅くまで語り合いました。その折、奥川君が自作の詩を吟じ、みんな、胸にせまる思いでした。

翌日、青木、塩川、奈古屋、鷹取の4人は淡路島観光、タクシー1台をチャーター、代わり番ごとに席を代わり合い和気藹々、昼は讃岐うどんに舌鼓を打ちました。

出席は、関東より青木、酒井、奈古屋、関西は奥川、奥谷、塩川、鷹取、村田でした。80才前後の年齢でもみんな元気でまた来年もということで散会しました。

(鷹取記)



上段 左より 奥谷、村田、塩川、酒井  
下段 ゆ 鷹取、青木、奈古屋、奥川

學友集舞子

滔滔五十五春秋

學友今宵舞子頭

餘生我是恣閑遊

唯慨幾人黃土客

甲申五月

耕畠作

(奥川作、吟)

にくまれ会 滋賀県開催の記  
(昭和29年冶金学科卒クラス会)

にくまれ会は一昨年の別府に続いて、今年は滋賀県で開きました。

集合は5月12日午後5時、雄琴温泉の琵琶湖グランドホテルです。

集まったのは会員29名中写真の14名です。昨年久保忠明君が病気でなくなりましたが、その他は欠席者達を含め大きな変動はありませんでした。

午後5時半からの宴会では、近況報告、思い出話、健康問題など大いに沸きましたが、今年は他に話題がありました。

それは1月20日にNHKテレビで放送された番組『プロジェクトX、挑戦者たち』、副題「日米ブルドーザー対決」に我らが信枝潤吉郎君が主要メンバーの一人として登場したことです。粗筋を申しますと、彼の在籍していた小松製作所では戦後の復興事業のため、細々とブルドーザーを作っていましたが、昭和36年貿易が自由化され、アメリカからキャタピラー社の製品が輸入されることになりました。同社は当時世界需要の60%を賄っており、小松の製品とは格段の性能、寿命の差がありました。小松はとても太刀打ちできない。会社が潰れるか



NHK番組 プロジェクトXより



琵琶湖グランドホテルにて

左より 泉、榎本、信枝、小島、田中、横田、川島、三浦、山之内、村瀬、河野、松岡、小森、岩鶴

も知れないとまで言われました。

その時結成されたのがこのプロジェクトです。数々の苦難を乗り越え、3年後にはキャタピラー社を凌ぐ製品を作り上げ、アメリカへの逆上陸も果しました。放送されたのはその当時の苦心談です。

約3000種ある構成部品の中、最重要なのがエンジンの動力を無限軌道に伝える巨大歯車です。寿命を5倍以上に延ばす必要がありました。これの決め手となったのは、伝統の一歯焼き入れを止めて、一発焼き入れに切り替え、その設備を導入し、成功させたのが熱処理担当の信枝君でした。

翌日はバス観光旅行に出かけました。まず雄琴から奥比叡ドライブウェーを通って延暦寺の根本中堂に参拝しました。伝教大使・最澄自作の秘仏薬師如来がまつられ、前には「不滅の法灯」が1200年灯り続けているのを拝観しました。

次は名神高速を通って湖東三山に向かいました。時雨れ模様でしたが、返って空いており、交通も参觀も順調でした。湖東三山とは、琵琶湖東岸(彦根市付近)に位置する西明寺、金剛輪寺、百濟寺の総称で、いずれも天台宗の名刹です。

西明寺は平安時代初期の834年に建立され、本堂は鎌倉時代の代表的な建造物で信長の焼き打ちを免れ、国宝第1号に指定されたそうです。

金剛輪寺は741年に聖武天皇と行基菩薩により開山されたもので、本堂は国宝です。堂内には秘仏本尊聖観、阿弥陀如来像、十一面觀音像等が安置されています。

百濟寺606年推古天皇、聖徳太子によって創建された近江の最古刹で、信長に焼き打ちされるまでは塔頭300余坊を擁し、天台別院と称される大寺院だったそうです。

拝観を終えて夕刻京都駅で解散しました。次回は再来年関東地区で集まる予定です。

幹事：小森記

27会城崎大会  
(昭和27年鉱山学科卒クラス会)

昭和47年、卒業20周年を記念して発足した27会は、4回目から夫婦同伴の会となり、年と共に開催間隔も縮まってきた。11回目に当たる今年は、兵庫在住の2人が幹事で城崎温泉に設定した。平成16年10月13日（水）、8組の夫婦と5名が集まった。

一昨年の春から始めた“回し文”が3巡目に入っているので、現存21名の動静は解っているものの、やはり直

接語り合えるのは嬉しい。宴會後も、一室に集まって夜の更けるのも忘れて話し込んだ。

また、夫々ご当地の外湯めぐりで温泉を満喫し、偶然にお祭り初日の賑わいを見ることもできた。有志はタクシーで15分程の玄武洞を訪ね、六画柱状節理の見事な景観に見惚れていた。

幸い2日間とも天気に恵まれ、来年の再会を約して、2時半過ぎに城崎駅で解散した。

(幹事 青山、入江)



集合写真 後列左から、小林、高林、谷口、松岡各夫人、松岡、小林、高林、谷口、入江  
中列左から、寺田、砂田、入江各夫人、岡村、大西、砂田  
前列左から、青山婦人、青山、寺田、中永、堀池、辻

昭和49年卒業 資源・金属合同同窓会

平成16年6月12日（平成16年度水曜会大会の日）に、卒業30周年を記念して、昭和49年資源工学科卒・金属系学科卒合同の同窓会が、ウェスティン都ホテル京都において開催された。日程を合わせはしたが、水曜会大会への出席者は少なく、同窓会のみ出席した者が大半で、昔ながらのエスキイプ体質に変わりはないようである。海外赴任者の出席もあり、大いに昔話に盛り上がったが、

途中からは病気自慢、薬自慢に花が咲き、互いの年齢を実感した。出席者は以下のとおりである。

資源工学科：朝倉俊弘、柏井善夫、加納雅彦、後藤康幸、加来裕生（5名）

金属加工学科：池本忠司、磯上勝行、梅本利明、小野寺秀博、岸田良朗、北沢保良、日下部雅行、小西延明、清水道、白井泰治、高椋晴三、富永基夫、盛岡幹雄（13名）

（朝倉俊弘、白井泰治 記）



**昭和33年冶金学科卒同窓会  
(東北旅行)**

松島を八十島かけて船めぐり廻り来たりて嵯峨渓を見つ  
み仏は輝きいます光堂みちのく山に黄金咲くごと  
猊鼻渓水面しづけき谿谷に秋を深むか船頭の一ふし

松本岳舟(洋祐) 水曜会同窓会東北紀行七首から

今年平成16年の同窓会は東北旅行を行った。わがクラスの歌詠み松本洋祐(号岳舟)がその主な訪問地の印象を詠んだ旅詠からの歌三首を先ず挙げて、旅の印象を紹介する。

昨年は、九州在住の里見、高橋両幹事が呼子から名護屋城址を巡りはるかに壱岐を望むという好企画で参加者15名、引き続き有志で平戸を探訪というスケジュールで一年ぶりの旧交を温めると共に西九州の爽秋を満喫した。

その折、今年は東北地方での開催が決まり、東京在住の松本洋祐、松本善文両名が幹事で、お世話役となつた。

東北は、九州に劣らず、観光名所と温泉の宝庫であるので、いささか強行軍であるが、9月27日から29日の2泊3日の旅行を設定した。参加者は11名。周遊先は、諸兄曾遊の地も多かったが、気心の知れた同期の仲間とわいわい言いながら廻るのもまた別の面白さありということで、例年よりやや少な目の人数ながら、よい旅を楽しんだ。

旅程は、松島→鳴子温泉→平泉・猊鼻渓舟下り→矢びつ温泉→角館、と東北新幹線と定期観光バスを最大限に活用して代表的な観光地と名湯巡りで、台風21号接近の余波で曇天続きながら東北の初秋を味わった。

初日は、午前11時、松島海岸駅集合、観光船で奥松島まで巡り日本三大溪の一つである嵯峨渓の佳景を眺めた後、瑞巌寺などを拝観。直通バスで移動して東北地方の代表的な名湯鳴子温泉泊まり。夜の宴会は、幹事からの不参加の仲間たちの動静を伝えた後、各自の近況報告。何よりも嬉しかったのは、この1年も同期の仲間は全員変わりなく、昨年体調が芳しくないと伝えてきた仲間たちも回復基調という報せを紹介できたことである。参加した大方の諸兄も、一年ぶりの再会で話が弾んだ。流石に年と共に酒量も減り、飲み放題でセットした酒類も余り気味。宴の締めくくりは、例年どおり、川口の音頭で、「紅燃ゆる」と「琵琶湖周航歌」の合唱。引き続き一同なお余力を残しカラオケルームに移動して日頃鍛えた美声(?)の競演でまだまだお若いところを披露。

翌日は、陸羽東線と東北新幹線を乗り継いで一ノ関へ。一日コースの観光バスで、巖美渓の奇景を眺め、毛越寺ではその遺構に嘗ての壮大な寺院を偲んだ後、昼食は一ノ関地方のもてなし料理という「力餅定食」に舌鼓。中尊寺では藤原三代の栄華を象徴する金色堂に目を瞑る。山上から衣川あたりを見下ろして悲運の武将義経に思いを馳せる。この日の締めくくりは、今回の旅のハイライトでもあった猊鼻渓の舟下り。これまた日本三大溪の一つであるが、その名に違わぬ絶景に加え、一同が乗った舟下りの船頭が素敵だった。朴訥な言葉ながら駄洒落を交えた案内は、絶妙な間と機智に溢れた語り口で一同腹爆笑。そこらのお笑い芸人よりもはるかに面白かったとの全員の評。その上、売り物のげいび追分がまたなかなかの美声。加えもう一ふし民謡のサービスもあってなお一層満悦気分を味わった。

この日の泊りは、栗駒山に近い一軒宿(といっても建物はホテル風)の矢びつ温泉。このところ羊頭狗肉の多

い温泉にあって、番頭さんの言によると「正真正銘」の「100%流し湯」とのこと。この夜は宴会なしとして、一献傾けながらのゆっくりした夕食後、部屋に戻り、幹事準備の盛岡の銘酒「七福神」を酌み交わしながら、深更に至るまでダベリング。卒業以来およそ半世紀、枯淡の境地(?)に入ったのか、すでに時効となったと覚えたか、学生時代のさまざまな裏話や思い出の女性たちの話、時にはしんみりと亡き友たちの思い出話、さらには未だに向学心旺盛な所を見せてパソコン運用の情報交換、里見の熱い体験的健康談義などなど、話は尽きなかった。

最終日、旅の第3日は、青春回帰を求めて半世紀ぶりにそれぞれに思い出の地を再訪しようという梶川・里見と一ノ関駅で別れ、残りは東北新幹線・秋田新幹線を乗り継いで角館へ。

最近評判になった時代劇映画のロケ地として使われたこと也有って、さらに有名度を増した角館であるが、あ

らためて町を歩くと、時が江戸時代そのままで止まって現代に甦ってきたような印象を受けた。幾つかの屋敷を訪ねてみて、往時の中堅武士のつましい暮らしが窺われた。これらの家屋敷は個人の所有物ではなく藩から貸与されているものであることなどは現代の社宅を連想させ興味を覚えた。小雨の中の散策数時間、江戸時代から抜け出して、角館駅で名古屋へ秋田空港から帰郷する馬場を見送り、秋田新幹線で帰路に就いたのは、午後3時前であった。

まるで観光案内の如き同窓会報告になったが、ことは左様に印象深い東北旅行であった。

来年度の幹事は、関西在住組。さらなる好企画の同窓会が開催され、同期の仲間一同が元気に顔を合わせることを望みつつ報告を終わる。

(平成16年11月2日 記; 松本善文)



鳴子温泉 鳴子観光ホテル前にて  
左から 川口宜人、田中孝一、高橋延幸、里見祥明、馬場義雄、堀 啓一、松本善文  
向坂邦夫、谷井 充、松本洋祐、梶川脩二

#### 昭和31年冶金学科卒業同窓会

昭和31年冶金学科卒業以来39年後の平成7年に初の同窓会を浜松で開きましたが、平成16年10月14・15日に、第6回同窓会を、「信州の秋を楽しむ」をテーマに北アルプスの山々に抱かれた安曇野の北部にある美しい田園の町穂高にて開催しました。31年卒は27名、既に4名が鬼籍入り、今回の参加者は15名。

同窓会の前夜、有志4名は、赤松林の中にたたずむ住友重機械穂高山荘に宿泊、翌日、赤松、唐松、白樺などの樹海に包まれた名門穂高のカントリークラブで快晴の下ゴルフコンペ。ゴルフ不参者は、10月14日夕刻JR穂高駅集合、ホテル送迎バスでアルプスを見渡す場所にある穂高ビューホテル入り。湯量豊富な弱アルカリ天然温泉で体を癒した後、懇親会、宴さ中、各自3分の持ち時間で近況報告、質疑応答活発で、瞬く間に予定の2時間

終了。席をロビーラウンジに移し、夜遅くまで二次会。

翌日は、常念岳（2,857 m）に初冠雪の報に接し、秋も深まりつつある快晴の信州をマイクロバスで観光しました。先ず、道祖神で下車。ドライバーがガイド役も務めてくれました。道祖神は、村の守り神として多くは村の中心、道の辻、三叉路にたっており、村人たちが五穀豊穣、無病息災、子孫繁栄を祈願する最も身近な神で男女像を安曇人独特の知性とユーモアで造り上げたもので、安曇野は道祖神の宝庫と言われているとのこと。次に、日本アルプスの総鎮守として交通安全の守神として信仰を集めている穗高神社参拝。

次いで、安曇野の代表的美術館である穂山美術館を訪ね芸術鑑賞。同美術館は、この地で生まれ日本近代彫刻の先覚者として知られる荻原穂山の作品が、キリスト教に傾倒した穂山を象徴する教会風建物に展示され、新館には穂山と関係が深かった高村光太郎などの作品が陳列され、日本近代彫刻の流れを概観。緑の木々に囲まれ、紺碧の空をバックに、鳶がからまるレンガ造りの教会風建物は、言うに言われぬ情緒あり。

穂高には個性的な美術館が点在しているが、割愛し、次は、日本一の広さを誇る大王わさび農場へ。穂高町のわさびは、豊富な湧水を利用したわさび畑で栽培され

ている。河岸に広がり、北アルプス連峰を背にアカシヤとポプラ並木に囲まれた農場には、見学用の道や橋などが設けられていて、約1時間散策。黒澤明監督の映画「夢」のロケ地となった水車小屋は、澄んだせせらぎとともに風情のあるただずまいであった。

予定の時間となり、バスを国宝松本城へ走らせた。黒塗りの松本城を背景に写真撮影。同天守閣は現存する天守閣では国内最古。1人しか通れぬ急勾配で蹴上げが高い階段を難儀しながら上って五重六階の大天守閣へ。展望スペースから、東に美ヶ原高原、西に北アルプスと安曇野、南に松本市街地、北に国重要文化財旧開智学校を一望。その後、城郭内の日本民俗資料館に立ち寄り古式鉄砲などを観覧した。

昼食会場は、松本城の庭と言われる程近くの「しづか」。建物は大正時代に建てられたもので昔ながらの面影を残し、信州の郷土料理を楽しめる食事処。馬刺しなどを貢味しながら懐旧談に花を咲かせました。

次回同窓会は、木村・倉井両君の幹事で、卒業50周年を記念して平成18年春に開催することになり、会場は京都又は十和田湖などが候補地として話し合われ、再会を約し、一同名残を惜しみながら14時に散会した。

(幹事:鈴木・藤田)



(後列左から) 藤田、田畠、長澤、河内、竹内、野村、国井、石井  
(前列左から) 鈴木、倉井、木村、菊川、荒木、海田 (池田は懇親会のみに参加)

二八会旅情記  
(S 28年冶金学科卒)

二八会は毎年日本各地を巡回し同窓会を行う事になっているが、今年は異国情緒漂う横浜で行われる事になった。東京へ行く用事はあっても横浜は素通りされ、案外知らない人が多いのが実情で適切な選択であると思う。

台風21号が西日本へ上陸し開催が危惧されたが、天候が回復し9月30日(木)午後5時30分ローズホテル横浜のロビーに総計15名(含夫人3名)が参集した。松村君が杖をつきながら遙々京都より参加したのが印象的である。懇親会場の重慶飯店別館まで中華街を通り関帝廟を見学し徒歩15分で到着する。横浜の中華街は有名であるが、華麗さとスケールの大きさを再認識する。

定刻6時開宴。本場の四川料理の美味を歓談しながら満喫する。森田君より欠席の町田君の病状について説明する。元気だった彼の闘病生活に心が痛む。最後に町田君の快癒と故舛村君の冥福を祈り(共に四高出身)寮歌“北の都”を齊唱して閉会した。

その後ホテルに帰り二次会を開く。百家争鳴賑やかな事この上ない。貿易センタービルに使用の鉄板は新日鉄製である事、自動車用鉄板は極限まで薄くされている等優秀な技術が披露された。又老齢故健康談議も盛に行われた。大学時代の“遊び”が将来の社会生活に役立ったという結論で就寝した。

翌10月1日9時半ホテルを出発、横浜散策を開始する。台風一過絶好の秋晴れに恵まれ、最初外人墓地に向う。墓地は横浜港に面した丘陵地帯に広がり、4500人の外人が眠っている。墓碑銘に“KILLED IN ACTION”と刻まれているのは、明治維新で犠牲になった人と思われ、歴史の生々しい厳しさが実感される。資料館には古き横浜の姿の写真が展示されている。港の見える丘公園に向う。ベイブリッジを右手に横浜港の全貌が一望の下に俯瞰される素晴らしい場所である。終戦後流行した演歌“港の見える丘”の歌碑の前で遠い昔を懐かしみながら一同口ずさむ。往事茫然たるものを感じる。港を見下ろ

しながら漫歩する事数十分で山下公園に着く。港とビルの狭間にある細長い公園で、行交う船を見ながら散歩するには好適なロマンティックな公園である。ここで観光船シーバスに乗船、湾内を巡回しみなどみらいプラリーランド橋に着く。ヨコハマグランドインター・コンチネルタルホテル、国立国際会議場、クイーンモール橋を通って横浜ランドマークタワーに到着する。高さ296mの日本一を誇る建造物で近代都市観光横浜の目玉商品である。この五階ロイヤルフードコートで昼食をする。日本食、西洋食、中華食のあらゆる種類の食事が可能で近くのビジネスマンで充満している。昼食後最寄りのJR桜木駅で解散横浜ツアーは終った。

殆んど知らないと言ってよい程の横浜、近代主義とエキゾチズムが渾然一体と融合した横浜を発見した事は大きな収穫であった。更に絶好の秋晴れが錦上花を添え素晴らしい旅となった。これを企画実行された渡辺、川島兩君に心から感謝の意を表したい。感謝感激。

今年は体調を崩す人もいて総計15名が参加したが、少し淋しい人数である。我々二八会員の残された人生も限られたものとなっているが、これも自然の理法で避け難いものである。しかしこの余生を前向きに豊穣に充実し、友情を温めるよですがには二八会は掛け替えのないものとなっている。二八会は死なず消えず最後の一人になる迄続けたいと思うし、続けなければならない。今後の同会の運営については京都と他の場所で交互に行う事になった。来年は京洛の地で会いましょう。

(松浦記)

(出席者)

青木司郎、川島 禮・文野、川村一俊、城戸敬一・敏、高野重雄、田山 昭、津田伊三郎、西村山治、舛村登美子、松浦菊男、松村嘉高、森田雄次、渡辺勝彦

(P.S.)

今回写真は原稿投稿の締切日に間に合わず掲載されません。不悪御諒恕の程を。

## 会員通信欄

平成16年度水曜会への返信はがきには、会員の方々から多くのお言葉や近況報告を頂きました。ここにその一部を掲載致します。なお、文章を損なわない程度に表現を変えた部分もあることをお断りいたします。

公荘 惟成（採鉱、昭13）御陰様で夫婦とも羨なく過ごしています。法事でときどき舞鶴に参りますが京都に立ち寄らず失礼しています。腰痛で毎日、昔のような距離の散歩はできませんし、速度も1/3位になりました。

高嶋 宏（冶金、昭15）幸い元気でおりますが、京都へは年に2-3回は行く機会がありますが、水曜会大会には日程の関係で都合がつきません、ご盛会を祈ります。私はもと鉄冶金の権威の沢村宏先生の門下生でした。

成瀬 一郎（採鉱、昭16（3月））大過なく暮しておりますが、86才と高令のため遠距離の歩行は自重しております。

松原 啓成（冶金、昭16）一応元気です。

広瀬 輝夫（冶金、昭16）84才になり、週に1回近所のプールで泳いでいます。散歩や読書などして元気です。趣味として、太陽グラビトンを受信して振巾増巾減少を頭の中で考えています。

足立 正雄（冶金、昭17）色々とお世話になり有難うございます。85才になり永年喫煙の為 COPD（慢性閉胞性肺疾患）になり外出も無理になりました。

中尾智三郎（冶金、昭17）案内有難うございます。元気に過して居ります。東京水曜会は概ね出席させて頂いて居りますが京都の方はこの所失礼させて頂いて居ります。御盛会を祈ります。

村上陽太郎（冶金、昭17）お陰で健康で元気です。適当に仕事もでき、感謝しながら毎日を送っています。

盛 利貞（冶金、昭17）加齢のため外出が困難になりました。（当日御出席の皆様に何とぞよろしくお伝え下さい。

久芳 正義（冶金、昭18）ヘルニヤ、大腸ガン、心臓病等で4年近く入退院を余儀なくせられましたがやっと健康を取り戻しました。今後は水曜会にも出られる様自重して頑張りたいと思っています。

斎藤 康（冶金、昭18）本年2月より、ディサービスセンター「それいゆ」に現在週3日、行っています。最初は、週1日、次ぎに週2日、段階を踏んで参りました。

寺前 章（冶金、昭18）恙なく消光したしております。

加藤 三郎（冶金、昭19）遠出は中止して居ます。

菅沼 常生（冶金、昭19）終戦を期に教育界へ転身し、今も現役（校長）です。54年間公・私の高校勤務です。

前野 貞男（鉱、昭20）病気ではありませんが、何分にも高齢のため、遠くへの外出は不可能となりました。皆様にどうぞよろしくお伝え下さい。

荒川 武二（冶金、昭20）御盛会を祈ります。歳相応に無理がきかなくなってきたが、お陰で無難に過ごしております。

太田 豊彦（冶金、昭20）JFE好調の様子 喜んで居ります。

山本 剛男（冶金、昭20）まづまづ元気にやっています。

佐伯 博蔵（鉱山、昭21）健康にきをつけ、趣味などいかしつつ、心ゆたかな人生をおくりたいと思っています。

武中 俊三（鉱山、昭21）80才を越して元気に暮らしています。原子力開発の第一線で20有余年（動燃）過して参りましたので今でもエネルギー問題についてはいつも関心を持っています。一月の横浜での講演会も拝聴いたしました。

和邇 博（鉱山、昭22）京大時計台の改築、旧三高本館の建替え、桂キャンパスへの移転など京大の新しい顔が見られる環境に住んでいて幸いな昨今、元気にしています。

田辺 精三（冶金、昭22）年の割りには元気だと自負しています。東京での大会には出席させて頂きます。

寺井 士郎（冶金、昭22）100記念大会に出席以来、欠席が続いているますが、まづまづ元気にして居ります。同期の諸君との年1回の会合を楽しみにして居ります。本会の益々のご発展を。

中島 朗（鉱山、昭23）I am now attained an Advanced age, but enjoying life (oversea trip et cetera).

三谷 文夫（鉱山、昭23）第三の人生をリタイヤして8年が経ちました。好きな事をして毎日気ままに過ごしております。月1回、ビールを呑む会に顔を出していますが、京大出身者が多いので、それなりに楽しくやっております。

泉田 春樹（冶金、昭23）俳句結社を主宰し、大変過酷な毎日であります。

岡田 明（冶金、昭23）昭23年卒冶金科同窓会（金友会）は年1度出席者多数で楽しんでいます。

谷口 利廣（冶金、昭23）NPO 法人きずな東羽衣デイハウスで元気なお年寄りのパソコンライフ、デジカメ撮影等の支援をしています。

石田 巖（鉱山、昭24）残りの人生を可能な限り山登り（実は山歩き）を楽したいと思っております。過去ふり返るとまあ本当によく我慢して勝手なことをして……悔は遊びそこなったことだけ。

永野 啓（鉱山、昭24）足が弱って歩行困難。

鹿取 精一（冶金、昭24）浦島太郎には、学校の様子がさっぱり判りません。

岡本 隆（鉱山、昭25）京都工織大定年退官後福山大学へ、平成12年辞任後、リズムが狂ったのか体調不十分、ゆっくりと生活中。

石田 泰一（冶金、昭25）足、腰が弱くなってきました。

小西 恭三（冶金、昭25）年を重ねるにつれて色々病気が出て参りますが、通院することが運動になると思うようにして頑張っています。皆々様の一層の御健康を祈念申しております。

木村 治（鉱山、昭26）ご盛会を祈ります。お陰で、程程に元気です。

二宮 僕（鉱山、昭26）それなりに加齢。腰椎損傷で行動に制約のある中で適当に楽しんでいます。水曜会の益ますの発展を心から祈り上げます。

山村 和男（鉱山、昭26）悠々自適の日々を送っています。

田中 誠一（冶金、昭26）元気に過ごしております。

田辺 定男（冶金、昭26）2週間ごとに病院で治療を続けていますが、快方に向かっておりまあまあ元気です。

荒川 次郎（冶金、昭26）趣味の写真（ネイチャーフォト）に努力、熱中して居ります。健康管理に努め、毎日を有意義にして居ります。

森 嘉紀（冶金、昭26）元気で毎日を楽しんで居ます。81才を過ぎました。

青山三樹男（鉱山、昭27）元気でやっています。相談役の他に明石工業会会长、国際ロータリー2680地区（兵庫県）のガバナー補佐として社会奉仕をやっています。

杉本 和夫（鉱山、昭27）いつもお世話様です。身体不自由で失礼申し上げます。

辻 慶次郎（鉱山、昭27）御陰様にて元気で毎日趣味の畠碁を楽しんでいます。

寺田 孝（鉱山、昭27）のんびりと老後の生活を楽しんでおります。

中永 久光（鉱山、昭27）お陰様で趣味に旅行に楽しく元気に過ごしております。ご盛会を祈ります。

松岡 秀夫（鉱山、昭27）年齢相応の心身の衰えは否めません。何とか日常生活に支障なく、書、俳句、表装等趣味の活動を続けております。毎年恒例となった27会（クラス会）への参加が楽しみです。

笹栗 弘喬（鉱山、昭28）お陰様で尚元気にしております。

空地 公二（鉱山、昭28）皆さんによろしく。

浅井 浩実（冶金、昭28）会社生活をリタイヤーして既に10年、年令並に元気に暮らしています。御盛会をお祈りいたします。

岩田 徳重（冶金、昭28）この頃では、いつ何が起るか分からんと思いつながら無事に過ごしています。桂キャンパス内を一度覗いてみたいですね。皆様のご健勝を祈っています。

倉知 三夫（冶金、昭28）お陰様で毎日元気に過ごさせていただいております。ご盛会を祈り申し上げます。

多田剛太郎（冶金、昭28）病気療養中にて歩けません。

田山 昭（冶金、昭28）エッセイ同好会を作って、エッセイを書いたり、好天にはゴルフを楽しみ、まあまあ生活を楽しんでいます。

町田 朗（冶金、昭28）只今入院中で何時退院出来るかわかりません。

江崎 潤（冶金、昭29）年相応に色々と不都合なケ所も出てきておりますが、マアマア元気で人生を楽しんでいます。

菅野 齋（冶金、昭29）旧制姫路高等学校同窓会本部の留守居役として、余生を楽しんでいます。

田中 功（冶金、昭29）今年は卒業50周年。琵琶湖グランドホテルで開催される「にくまれ会」を楽しみにしています。JICA関連で、発展途上国研修生に「製鋼・連鉄技術」および「クリーナープロダクション技術」を講義しています。

小島 勢一（冶金、昭29）鉄作り企業の現場や経営から完全に訣別して、一己の人間に立ち戻ってすでに5年。思うこと、「この世の中の出来ごとや問題の根源のすべては、大自然の作用か、さもなくば人間の諸業に帰着する」。目下「人間を考える」を大テーマに、身についた「物事を根本から考える習性」が頼りの人生です。

信枝潤吉郎（冶金、昭29）元気で暮らして居ます。

松岡 英夫（冶金、昭29）卒業して50年。この間、急速に進歩しつづけた科学、技術をみてきました。これからどうなるのと思いをめぐらしているこの頃です。

井上 瑞城（鉱山、昭30）元気で暮しています。

清滝昌三郎（鉱山、昭30）相変わらず乍ら元気にやってます。先日久方振りに在京同期会を開催しましたが一応皆

健康な日々を送り懐旧の念で一しおでした。

栗山 隆勝（鉱山、昭30）72才を過ぎて今の処元気でいます。知的障害者の為のボランティア活動に精を出しています。当日の盛会を祈ります。

赤澤 正久（冶金、昭30）昨年3月で専任教員を定年退職し、非常勤講師として「工業英語」を講義しています。

1クラス100名を2回/週やることはリフレッシュになります。ドイツ語を教えたのですが、第2外国語としては必修ではなく、この教員は文系学部が選考するのでドイツ文学研究者しかなれないです。

太田 奕（冶金、昭30）鉄鋼製品輸出関係の検査会社に勤務しています。

佐藤 史郎（冶金、昭30）相変わらず、銅（IWCCなど）とアルミ（JLWAなど）に関係しています。6月にINALCO（アルミ溶接・構造）、USA、に出席予定です。塩出 啓典（冶金、昭30）家内と二人だけですが、元気です。水曜会中国大会も、時折はやってほしいと思います。

米津栄次郎（鉱山、昭31）専ら地域の活性化に努めています。

荒木 泰治（冶金、昭31）元気にてスポーツ、囲碁、読書を楽しんでいます。当日は婦人囲碁クラブの指導あり欠席します。

武智 弘（冶金、昭31）先日久し振りに大学に牧教授を訪問しました。時計台や法経1番教室などすっかり變ったのに驚きました。法人化をバネに更に発展される事をお祈り致します。

吹田 俊一（冶金、昭31）第2の会社も退職し、今は完全にフリーな年金生活です。健康の方は今の処何とか日常生活に支障なく元気でいます。横浜に安住し中々京都に行く機会がなく、大会にはいつも失礼しています。

長澤 元夫（冶金、昭31）昨年6月末で会社生活を卒業目下自適にやっております。

田村 敬二（冶金、昭32）卓球と俳句やってます。

成松 幸俊（鉱山、昭33）元気に過しています。大会係の御尽力に感謝します。

本間 良治（鉱山、昭33）72才になりますが、まだ現役でがんばっています。

松本 善文（冶金、昭33）元気です。今秋の東北地方での同期会の幹事を、松本洋祐君と共に承り、楽しい旅を企画に腐心しています。盛会を祈っております。

尾竹 嘉三（鉱山、昭34）元氣で剣神社に奉仕しています。

兒玉 幸夫（鉱山、昭34）人生はまだ解りません。ある人が最後は0か100である。その中間はないと云いました。

高橋 克隋（鉱山、昭34）相変わらずなんとかやっていますが、近頃は身体に故障が出るようになりました。午前中はラジオ講座で語学の勉強、午後は読書、CDでクラシックをきいたり、俳句をつくったり、夜はTVをみて寝ると言った日々です。そうそう時には畠仕事をしています。

八木 貞勲（鉱山、昭34）年金生活にてつゝがなく過ごさせていただいています。

熱田 善男（鉱山、昭34）①昭和34年冶金卒の発言広場をネット上に開設して、管理人をしています。②約60人の孫に勉強を教えています。③メルマガを2紙発行しています。④松下幸之助の経営哲学の研究と普及（講演）活動をしています。⑤元気に生きています。

小泉 俊（鉱山、昭35）最近は趣味中心の生活に移りつつあります。

西田 米治（鉱山、昭35）ついこの前と思いながら、昨年の会員通信欄を見ています。昭12卒の向井先生から平15卒の方々の近況。興味深く再拜見、マンネリになりやすく、今のことに対応しようと反省しているところです。

柳沢 恒雄（鉱山、昭35）日本の石油工業の資料集めを始めてます。

足立 隆彦（冶金、昭35）マラソンランナーです。Golden WeekにはNewzealandでfullマラソンを走りました。

阿部 光延（冶金、昭35）新日鐵を退職してから4年、依頼原稿執筆などをこなしながら元気に過しております。

山田 武弘（冶金、昭35）故郷に帰り、今までとは全く違った仕事を楽しんでおります。

植田 義（鉱山、昭36）おかげ様で、元気にしております。

北神 康司（鉱山、昭36）中部地区の中小企業の活性化のため支援している毎日です。

赤井 慎一（冶金、昭36）新宮先生が代表の京都エネルギー・環境研究協会の会合に参加したり、たまのゴルフの他は晴耕雨読のエコライフを元気にエンジョイしています。

岩崎 滋（冶金、昭36）最近、ソフト開発・特許出願に精出しております。

森定 祝雄（冶金、昭36）H16年5月からH17年4月まで、金光教学院で勉強（修業）しています。

山本 隆造（冶金、昭36）自治会活動、民生委活動、ボランティア等で忙しい毎日を送っています。

井手 謙三（鉱山、昭37）アラビア石油を定年退職して5年半、毎日スポーツ（テニス 卓球等）を楽しんでおります。

秦 瑛（冶金、昭37）相変わらず元気にやっております。東京一小田原間のJR東海道線の沿線風景には、若干の変化も見られます。

田村 祥（鉱山、昭38）パソコン（Excel）の勉強をし乍らこれを生かせる職場を探索中です。夕食後は大好きなプロ野球の観戦です。今年は投手力の強い中日が楽しみです。（まだ予想は早いが）

長田 修次（冶金、昭38）定年退職後、リフレッシュしています。

福井 利安（冶金、昭38）術後2年を経過しましたが、まだ十分ではありませんので欠席させて頂きます。会員皆様のご健勝を祈念し水曜会大会の盛況を祈ります。

北尾 盛功（鉱山、昭39）2003.12.31付で日本化薬（株）を退職致しました。今後ともよろしく。

澤田 進（冶金、昭39）ようやく一線を退き、外資系数社の顧問をしながら毎日をゴルフ、グルメ、ワインなどで楽しんでおります。

岡田 和彦（資源工、昭40）年甲斐もなく思い切って引越しました。広くなりましたが来年の愛知国際博にお越しの際はお寄り下さい（泊まって下さってもOK）。会場から車で15分位の所です。

木下 舜（鉱山、昭40）4年前にリタイア、週末園芸とドライブに励んでいます。

木村 篤良（資源工、昭40）健康維持のため上記会社に就職しました。男子プロ開幕戦のC.C.ですので、水曜会メンバーの方々も是非一度御利用下さい。きっと満足いただけます。

望月 志郎（資源工、昭40）スクラップ価格の変動、資源インフレの中、電炉業で汗をかいています。

三浦 義明（資源工、昭40）日本とインドネシアを往復しています。来月は日本にいません。

佐伯 俊秀（冶金、昭40）米国、タイでマツダ・フォード合弁会社の経営に15年間たずさわり、昨年春から自動車用プレス金型メーカーの（株）オギハラに転じております。

吉田 興一（冶金、昭40）おかげで健康にめぐまれ、東大阪市の特許事務所で毎日勤務しています。時間がとれれば特別講演会は静かに聴講させてもらおうと思っていますが…

森 邦彦（冶金、昭41）4/1付で長浜工場勤務を終り、本社に戻りました。三年振りの自宅通勤となりました。

村上 秀樹（資源、42）JST プレベンチャー事業で起業をめざしてあと一息というところです。

速水 弘之（冶金、昭42）昨年8月末に定年退職となり、その後雇用延長をしてもらいましたが、現在は会社の技術本部とコンサルタント契約を結び非常勤になっております。あっという間に定年となった感じであり、お陰様

で充実したエンジニア人生であったことに感謝しております。

矢田 昌宏（冶金、昭42）現役で元気にやっています。

湯浅 光行（金属加工、42）“ものづくり”技術は発展の一途をますます加速する一方。“心づくり”がある面では退行していくことに危機感を持っています。そのため、最近は、心理学系の先生等と研究グループをつくり、勉強しております。盛会を祈念いたします。

廣澤 克（資源工、昭43）コマツでの定年まで後1年。起業した鉄道事業を後任に引継ぐべく指導に頑張っています。

森田 常路（資源工、昭43）沖縄県において（単身赴任）なかなか、動きがとりにくく状況です。

黒木 正純（冶金、昭43）中国からの追い風を背に海運・造船の好調とともに舶用工業メーカーとして超多忙の毎日。三年間は操業度心配無し。原材料と為替の行方が損益を左右しそう。素形材の品質もコストに直結と頑張る日々です。

中川 正義（冶金、昭43）約6年前に NKK（現 JFE）を早期退職し、ISO関係の業務（審査、コンサルティング）を自営にて行っています。

福田 隆（金加、昭43）当社も中国向需要の好調さに支えられ業績回復しております。これを機会に来年こそは京大卒業生を獲得いたしたくよろしくお願いします。

浅井 達雄（資源工、昭44）大学では経営システム工学講座を担当、情報システム計画研究室をあずかっています。学外では、新潟地方裁判所民事調停委員、同裁判所専門委員など司法関係の仕事も担っています。

中野 勇男（冶金、昭44）勤務地は岐阜羽島近く、新幹線沿いに「ソーラーアーク」の見える反対の北側の技術開発棟で、半導体デバイスの開発に従事しています。

中村 元（資源工、昭46）環境と保安を担当するようになって、以前にも増して多忙な毎日です。

山田 範保（資源工、昭46）昨夏官界を辞し、池袋のサンシャインシティにある通称ミプロと呼ばれる財団に勤務し、製入の先にある対日投資誘致を手掛けています。

水原 誠（冶金、昭47）毎日バタバタしていますが元気に頑張っています。皆様によろしくお伝え下さい。

上田 依孝（金属加工、昭47）グループ会社に移籍して2年経ちました。鉄鋼業界も昨年JFEスチールが発足しましたが我がグループ会社も本年4月に社名も変わりました。

福井 康司（金属加工、昭48）アルミ箔やパウダーの新製品、新技術の開発を担当しています。

朝倉 俊弘（資源工、昭49）5月1日付けで社会基盤工学専攻地盤工学講座ジオメカトロニクス分野の担当となりました。

柏井 善夫（資源工，昭49）技術研究所で光ファイバ－計測を担当していますが、今年は1月末からなぜか岡山で落石対策関連業務をしております。

加納 雅彦（資源，昭49）ゼネコンとして新分野である環境関連工事に従事しています。

楠井 潤（金属加工，昭51）自動電、家電関係のシルバー・カラー・ブームで、塗料顔料用アルミニウムフレーク粉の売れ行きが好調です。

辻本 崇史（資源，昭52）リマ駐在も2年目に入りました。

増田 剛志（資源，昭52）中国の伸銅業が大巾に伸びています。日本は細々とやっています。

向井 孝（金属系，昭52）冶金研究所にて、特殊鋼の精鍊、鋳造、凝固の研究をしています。

福角 幸生（金属，昭53）平穏無事。

宮下 卓也（金属加工，昭53）Speing-8での実験を担当しています。

宮脇 新也（金属加工，昭53）相変わらずの製鉄所づとめで特殊鋼線材と棒鋼を作っています。

北村 公亮（資源，昭55）お客様の声のむこう側に我が社の未来があると信じ、悪戦苦闘の毎日です。

須川 壮己（資源工，昭55）元気にやっています。出向先でM&Aを担当することになりました。

道本 龍彦（冶金，昭55）4月から関西大学大学院工学研究科（材料工学専攻）社会人博士後期課程に入学しました。大石先生の研究室で御世話になっています。

阿部 達彦（金属，昭57）22年間勤務した会社を辞し、特許事務所に再就職致しました。

小松原 実（冶金，昭57）最近は教育工学方面でネットワーク技術の応用などをやっています。

濱 万寿男（金属系，昭58）金属系学科や研究室にお世話になった頃もっと勉強しておけばよかったと今更身にしみて感じながらも、日々楽しく元気に頑張ってます。鉄はおもしろいです。

吉留 良史（資源工，昭58）苫小牧の天然ガス田で働いています。最近は、イラク戦争の影響で、セキュリティの強化が最近の目標です。

竹岡 広信（資源工，昭59）英語教師としてがんばっております。5月20日に英作文の本を出します。

山本 保（金属系，昭60）昨年末に異動があり、HDDへのヘッド加工を担当することになりました。

上西 啓介（金属加工，昭61）4月より新設の阪大・工学研究科ビジネスエンジニアリング専攻へ異動しました。

木村 得敏（金属加工，昭61）マレーシアから帰国して早や1年。コネクターのプレス及びめっきにかかわっています。おかげ様で大忙しです。

田中 章夫（金属加工，昭61）Z会向けの原稿執筆が一

段落したところです。

齋 康彦（資源，昭62）4月より会社変わりました。元気にやっています。

中澤 裕（資源工，昭62）やっと台湾新幹線の第一編成が出て行きました。（5/18）

大森 直也（冶金，昭62）超硬工具の仕事をずっと続けています。

奥村 英之（金属加工，昭62）日本の食べ物はおいしいですね。現在京大で楽しく仕事をさせてもらっています。

古澤 光一（金属加工，昭62）現在オムロンにて、ブロードバンドのための光ファイバ通信デバイスの開発を行っています。

長谷川玉絵（資源，昭63）オーストラリア在住。元気に暮らしています。

中島 俊明（金属系，昭63）相変わらずです。

高濱 義行（冶金，平1）元気です。

山本 健一（金属系，平1）元気にしております。仕事で忙しくしております。

中野 博志（資源工，平2）会社に入り、丸13年がすぎ、14年目に突入しました。元気で頑張っています。

正木 潤（資源，平4）大手鉄鋼会社の技術職から転職して現在は公認会計士・補として頑張っています。

石橋 良（金属系，平4）元気で頑張っています。

西 孝文（資源工，平7）日本アイ・ビー・エム株式会社より転職して1年以上経ち、新しい環境にて忙しく働いております。

川上 俊之（材料工，平7）元気に仕事ができています。

小西 陽子（資源，平8）7月まで米国に居る予定です。

栗田 信明（工修，平10）今年2月からベルギーに海外赴任しています。

金山 貴宏（資源工，平9）島根に戻り、地元の会社でSEをしています。

辻上 博司（資源工，平10）液体水素ステーション普及にむけて、国家プロジェクトの一研究員として液体水素の安全性に関する研究開発に従事しております。

古田 慶太（地球工，平15）先生方には大変お世話になりました。元気です。また再び勉強しながらおしています。

梶原 正嗣（地球工，平16）配属が9月なのでまだどこの部署にも所属していません。5～8月と工場・販売店での現場研修をしています。

中尾 晃大（物理工，平16）元気に研修に励んでおります。

萩原 壮一（物理工，平16）修士一回生をがんばっております。

園部 太郎（工修、平16）（平14に入る）エネ科 タイ  
はそろそろ雨季とのこと おかげ様で5/14到着 これからです。今後共よろしく御指導賜りますようお願いします。（園部哲夫）  
奥 健夫（元教官、1996）マイペースでゆっくりとやっております。皆様のご多幸をお祈り申し上げます。  
段野 勝（元教官）朝のテレビ体操が1日の始まりで、年2回の旅行と囲碁を楽しんでいます。  
港 種雄（元教官）脚・腰がいたく失礼します。ご盛

会を祈っています。

宮谷 義六（元教官、工博、昭14.3、京都薬科大学）日々を何とか元気で、食後は散歩をしています。

森 英嗣（材料工学専攻、平10退職（元教官））こちらでは産業廃棄ガラスのリサイクルプロセスの研究を行っています。お陰様で発表出来る機会も増えまして更に新しい成果も出てきました。皆様とまたお会い出来る日を楽しみにしております。

## 平成16年3月卒業者名簿

## 旧資源系

## 学部卒業者

氏名	研究論文題目	就職先
<b>ジオフィジクス分野</b>		
加 覧 武 志	反射法地震探査を用いた送電線鉄塔基礎調査の2次元モデリングとイメージングに関する研究	京都大学大学院
徳 永 裕 之	反射法地震探査における表面波抑制手法に関する研究	京都大学大学院
西 内 卓 也	弾性波トモグラフィによるエアスページング効果判定に関する研究	京都大学大学院
毛 利 昂 彦	アンテナ近傍の電磁波シミュレーション解析に関する研究	京都大学大学院
安 井 利 尚	個別要素法による不連続面を伝播する波動シミュレーション	京都大学大学院
<b>地質工学分野</b>		
石 川 慶 彦	キャップロック型スラビング崩壊に関する研究	京都大学大学院
兼 田 心	モデル実験を用いた南海トラフ付加体形成過程に関する研究	京都大学大学院
堀 内 悠	複素変数境界要素法を用いたフラクチャ性岩盤内の流体挙動解析	京都大学大学院
南 防 陽 輔	評点方式による古期堆積岩の岩盤分類基準の開発	京都大学大学院
細 川 幸太郎	地球統計学を用いた孔隙率分布予測に関する研究	東京大学大学院
澤 田 明 人	軟岩からなる水際斜面のスラビング崩壊に関する研究	UFJ銀行
佐々木 求	動的貫入で発生する弾性波振幅とN値の関係	(株)山海堂
<b>地殻開発工学分野</b>		
有 馬 謙 二	地山と支保剛性の時間依存性を考慮したトンネル掘進解析	日本航空
田 中 洋 行	採掘に伴う露天掘り斜面周辺の3次元応力変形解析	京都大学大学院工学研究科
谷 健 吾	2点相関法による数値多孔質媒体モデルの評価	京都大学大学院工学研究科
早 川 明 伸	シミュレーションによる帶水層を対象とした炭酸ガス圧入法の検討	京都大学大学院エネルギー科学研究所
早 川 和 弘	地すべりによるトンネル覆工変状に関する二次元的検討	鉄道情報システム(株)
西 田 佳 弘	光ファイバーによるトンネル変状検知システムの検討	(株)富士通ビー・エス・シー
<b>ジオメカトロニクス分野</b>		
織 田 浩 成	応力関数を用いた2円孔周辺の応力解析による岩石破壊設計法の研究	最上インクス
梶 原 正 翔	複数円孔周辺の応力解析による静的岩石破碎工法の研究	トヨタ自動車(株)
北 川 博 基	磁歪超音波を利用した吊橋ハンガーロープ端末定着部の検査について	京都大学大学院エネルギー科学研究所
並 河 昌 平	2次元半無限領域の電気インピーダンス・トモグラフィー	東京大学工学系研究科
丸 岡 龍 也	ガイド波を利用した円筒形状長尺部材の超音波検査に関する基礎的研究	京都大学大学院エネルギー科学研究所

氏 名	研究論文題目	就職先
<b>地盤環境工学講座</b>		
井 上 祐 輔	動的注入工法における注入メカニズムに関する理論的・実験的検討	京都大学大学院
岡 村 武	岩盤大空洞周辺の掘削影響領域における亀裂の発生・進展過程について	京都大学大学院
近 藤 大 介	高圧ガス貯蔵岩盤タンクに対する岩盤の変形-浸透流連成解析手法の適用	京都大学大学院
山 本 健 太	拘束圧に依存した岩石の破壊過程とAEの挙動について	京都大学大学院
<b>資源エネルギーシステム学分野</b>		
古 田 哲 晴	加熱処理した珪藻土の溶解挙動と高純度シリカ精製への応用	京都大学大学院エネルギー科学研究所
西 田 治 朗	一軸圧縮試験によって発達する花崗岩中のマイクロクラック	京都大学大学院エネルギー科学研究所
吉 井 宗 太	メタンハイドレート層へのCO <sub>2</sub> 貯留に関する基礎的研究	京都大学大学院エネルギー科学研究所
<b>資源エネルギープロセス学分野</b>		
大 西 正 展	AZ31マグネシウム合金板の冷間および温間での変形特性とミクロ組織	京都大学大学院エネルギー科学研究所
永 谷 卓 也	S字管内を流れる固気液3相流の流動特性	京都大学大学院エネルギー科学研究所
堀 端 裕 司	固体平面に衝突するカーテン水膜噴流の流れ	京都大学大学院エネルギー科学研究所
丸 山 寿 徳	有限要素解析を用いた超高張力鋼板の成形限界予測	京都大学大学院エネルギー科学研究所
<b>宇宙資源エネルギー学分野</b>		
飯 田 孝 美	強磁場による燃料電池性能向上のための基礎的研究	京都大学大学院エネルギー科学研究所
川 合 俊 輔	疎水性固体表面上を流れる流体の速度滑りに関する研究	京都大学大学院エネルギー科学研究所
羽 田 圭 寛	水中の色素の酸化チタン光触媒分解に関する基礎的研究	京都大学大学院エネルギー科学研究所
馬 島 渉	宇宙環境利用アルカリ燃料電池の3相界面現象	京都大学大学院エネルギー科学研究所
若 月 孝 夫	電気化学プロセッシングによるAg結晶成長過程に及ぼす重力レベルの影響	京都大学大学院エネルギー科学研究所
<b>修士課程修了者</b>		
氏 名	研究論文題目	就職先
<b>ジオフィジクス分野</b>		
大 開 孝 文	蒸気の地層圧入による地表変形の推定に関する研究	サイバネットシステム(株)
桐 山 愛 世	フラクチャを伝播する弾性波のモデリングとイメージング	(株)CRCソリューションズ
白 石 和 也	擬似三次元化による反射法地震探査データの高精度化に関する研究	京都大学大学院
田 中 篤 史	個別要素法による地質構造形成過程に関するシミュレーション解析	住鉱コンサルタント(株)
秦 央 彦	周波数領域のフルウェーブインバージョンに関する研究	日本総合研究所

氏名	研究論文題目	就職先
<b>地質工学分野</b>		
岡田明哲	地球統計学の地質工学への適用 ～平城京跡の浅部S波速度構造および遼河油田における土壤汚染分布解析～	岡山県庁
角軒雅彦 佃十宏	GISを用いた地滑り斜面安定評価に関する研究 タイ浅層における3次元地震探査データの地形学的検討	大阪ガス(株) 大日本コンサルタント(株)
<b>地殻開発工学分野</b>		
高原	都市部における山岳工法トンネルの覆工設計法に関する研究	(株)小松製作所
<b>ジオメカトロニクス分野</b>		
久野天平	レーザーを用いた面状領域の非接触超音波検査に関する研究	三井住友銀行
<b>地殻環境工学講座</b>		
池田雄 小倉永輔 松岡哲也 三木隆行 安田岳之	岩石の破壊過程におけるAEとその挙動に関する研究 TBMによる大断面トンネル掘削時の3次元地質モデルの構築法に関する研究 高圧ガス貯蔵岩盤タンクに対する水封機構の設計法に関する研究 岩盤大空洞周辺の掘削影響領域の応力変化とAEに関する研究 重金属汚染土壤に対する動電学的浄化技術に関する研究	住友商事 東邦ガス(株) (株)三井住友銀行 NTT西日本電信電話(株) テス・エンジニアリング(株)
<b>資源エネルギーシステム学分野</b>		
佐藤吉宣 塩見洋志 袴田昌高 前川良太	メタンハイドレートからCO <sub>2</sub> ハイドレートへの置換に関する基礎的研究 珪藻土からの高純度シリカ精製に関する基礎的研究 珪藻土から精製されたシリカの炭素還元反応 Microcrack distribution in granite subjected to triaxial compression test (三軸圧縮試験により形成された花崗岩中のマイクロクラック分布)	日立マクセル 石川島播磨重工業 京都大学大学院エネルギー科学研究所 三井金属鉱業(株)
<b>資源エネルギープロセス学分野</b>		
大村歩 松本淳 川村淳一	Pump performance of locally bent air-lift system for transporting solid particles The application of ductile fracture criteria to the prediction of forming limit of high-strength steel sheets Experimental study of a planar water jet impinging on a solid substrate, 国際石油開発	電源開発 日立製作所 国際石油開発
<b>宇宙資源エネルギー学分野</b>		
石田直子 西川慶 堀之内浩嗣 本山宗主	Effect of n-Dodecane on the Rheological Properties and Interparticle Forces in Concentrated Titania Suspension Electrodeposition and Electrochemical Dissolution of Li Metal in LiClO <sub>4</sub> -PC Electrolyte Solutions 酸化物超微粒子の液-液抽出法に関する基礎的研究 Electrochemical Processing for Ni Nanowire and Nanotube Arrays in a Magnetic Field	住友ゴム工業(株) 京都大学大学院エネルギー科学研究所 昭和電工(株) 京都大学大学院エネルギー科学研究所

## 博士後期課程修了者

氏名	研究論文題目	就職先
ジオフィジクス分野 荒井英一	時間領域電磁探査法のインバージョンと探査能力に関する研究	(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構
地殻開発工学分野 笛尾春夫	トンネルの切羽周辺の支保設計に関する研究	鉄建建設㈱
ジオメカトロニクス分野 程 樊	Studies on NDT Image Denoising by Wavelet and Self-Organizing Maps (ウェーブレット変換と自己組織化マップにもとづく非破壊検査画像強調に関する研究)	未定

## 博士学位授与者 課程博士

氏名	研究論文題目	主査	取得年月日	備考
ジオフィジクス分野 荒井英一	時間領域電磁探査法のインバージョンと探査能力に関する研究	芦田 譲	平成16年3月23日	
地殻開発工学分野 笛尾春夫	トンネルの切羽周辺の支保設計に関する研究	齋藤 敏明	平成15年11月25日	
ジオメカトロニクス分野 李令琦	Studies on Advanced Signal Processing in the Field of Nondestructive Testing Based on Multiresolution Analysis (多重解像度解析に基づく非破壊検査信号処理に関する研究)	花崎 紘一	平成16年1月23日	
程 樊	Studies on NDT Image Denoising by Wavelet and Self-Organizing Maps (ウェーブレット変換と自己組織化マップにもとづく非破壊検査画像強調に関する研究)	花崎 紘一	平成16年3月23日	

## 博士学位授与者 論文博士

氏名	研究論文題目	主査	取得年月日	備考
ジオフィジクス分野 多田良平	他孔質媒質の孔隙内媒質に依存した弾性波伝播速度に関する研究	芦田 譲	平成16年1月23日	昭和50年3月秋田大学鉱山学部卒業
朝倉繁明	低比抵抗貯留層における頁岩の分布モデルと水飽和式に関する研究	芦田 譲	平成16年3月23日	昭和51年3月京都大学工学部卒業
高倉伸一	高密度電気・電磁探査法による比抵抗構造の調査と解釈に関する研究	芦田 譲	平成16年3月23日	昭和59年3月京都大学工学部卒業 昭和60年3月京都大学大学院工学研究科修士課程退学
地殻開発工学分野 前原雅幸	グラウトミルクの流動性を考慮したグラウチング工法の合理化に関する研究	齋藤 敏明	平成16年1月23日	昭和51年3月東京大学工部卒業

氏名	研究論文題目	主査	取得年月日	備考
ジオメカトロニクス分野 守 谷 敏 之	構造用ワイヤロープの経年腐食劣化の非破壊評価に関する研究	花崎 紘一	平成16年1月23日	京都大学工学部資源工学科卒業 昭和59年3月
増 田 信 行	Study on Exploration and Evaluation Systems for Mineral Resources Development (鉱物資源開発のための探査及び評価システムに関する研究)	花崎 紘一	平成16年1月23日	京都大学工学部資源工学科卒業 昭和49年3月 京都大学大学院工学研究科 昭和51年3月
橋 爪 清	精密起爆装置を用いた火薬類の爆轟現象の解明とその応用	花崎 紘一	平成16年3月23日	京都大学工学部資源工学科卒業 昭和44年3月 京都大学大学院工学研究科 昭和46年3月
木 梨 秀 雄	長尺鏡ボルト工法の開発とその作用効果に関する研究	花崎 紘一	平成16年3月23日	埼玉大学工学部建設基礎工学科 昭和62年3月 埼玉大学大学院工学研究科 平成元年3月
地殻環境工学講座 山 本 拓 治	トンネルの情報化施工における統合地質評価システムの構築に関する研究	青木 謙治	平成15年7月23日	豊橋技術科学大学大学院修士課程昭和59年修了

## 旧金属系

## 学部卒業者

氏名	研究論文題目	就職先
材料設計工学講座		
宇 杉 健 一	Cu母相中におけるCoクラスターの局所的磁性に関する第一原理計算からの解析	京都大学大学院工学研究科
重 岡 裕 海	遷移金属酸化物のX線吸収スペクトルの理論計算	未定
二 宮 健 生	新規 $ABO_3$ 型複酸化物系イオン伝導体の合成と電気伝導度特性	京都大学大学院工学研究科
村瀬 功	Al-Cu合金のCu時効析出についての第一原理計算	京都大学大学院工学研究科
六 角 広 介	岩塩型ZnO薄膜の作製のためのCoO buffer layerの成膜	京都大学大学院工学研究科
表面処理工学分野		
今宿 晋	塩基性水溶液からのCdTeの電解成膜におよぼす予備電解の影響	京都大学大学院
大 西 利 武	脂肪族4級アンモニウムイミド系のイオン性液体の物性におよぼす水分含量の影響	京都大学大学院
玉 川 宏 平	塩化銅(I)を含むハロゲン化ナトリウム濃厚水溶液からの銅の電解採取	東京大学大学院
萩 原 壮 一	ガルバニック析出法による塩基性水溶液からのCdTe成膜	京都大学大学院
浜 口 達 史	ジメチルスルホン浴からのAl-Mn合金電析	京都大学大学院

氏 名	研究論文題目	就職先
<b>プロセス設計学分野</b>		
伊藤順一 佐藤直樹	Mo 及び Ru 化合物における蛍光 X 線化学シフトの研究 ポータブル X 線分析装置による蛍光 X 線簡易分析の研究	東京大学大学院 ニチコン(株)
田中大策 谷口祐司	XAFS 法による黄砂粒子吸着硫化物の化学状態分析 アジア工業都市における黄砂エアロゾル粒子の化学組成と性状	東京大学大学院 神戸製鋼所
<b>マイクロ材料学講座</b>		
可部達也 中尾晃大 橋村征 牧野健三 溝谷健太郎	p 型 InGaN 用オーミック・コンタクト材に関する研究 サファイア基板上エピタキシャル Cu 膜を用いた表面散乱に着目した抵抗率に関する研究 p 型 SiC 用 TiAl 基オーミック・コンタクト材に形成した Ti <sub>3</sub> SiC <sub>2</sub> の表面被覆率とコンタクト抵抗率の関係 Ga N 用導電性バッファ層としてのスパッタ TiN 膜の作製 第二元素添加による ULSI 用 Cu 配線材の合金化に関する研究	京都大学大学院 豊田合成(株) 京都大学大学院 東京大学大学院 京都大学大学院
<b>量子材料学分野</b>		
多治見直雅 田尻亮人 野口明男 舟場千絵 宮村宏之	(Gd <sub>1-x</sub> R <sub>x</sub> ) <sub>5</sub> Si <sub>4</sub> (R=Y, Ho, Dy) の磁気熱量効果 Co(S <sub>1-x</sub> Sex) <sub>2</sub> の磁気熱量効果 La(Fe <sub>0.88</sub> Si <sub>0.12</sub> Al <sub>x</sub> ) <sub>13</sub> の磁性 MnAs <sub>1-x</sub> Sb <sub>x</sub> の磁性の熱処理効果 RTSi <sub>n</sub> (R:希土類元素, T:遷移金属) の低温比熱	京都大学大学院 東京大学大学院 司法修習生 (株)リコー 東京大学大学院
<b>結晶物性工学分野</b>		
鈴木良 高元美紗子 寺田英司 中野貴博 林良典 藤尾諭志	規則配列したナノチューブの形状制御とその組織上へ蒸着した金薄膜の評価 Mo <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> の特性に見られる結晶異方性に及ぼす置換元素の影響 Re シリサイドの構造と熱電特性に及ぼす Ce 添加効果 Ba-Ga-Ge 系クラスレート化合物単結晶の物理的性質 Ru <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> 単結晶の熱電特性 新しい CBED 法による遷移金属シリサイドのキラリティ識別	京都大学大学院 京都大学大学院 京都大学大学院 京都大学大学院 東京大学大学院 京都大学大学院
<b>構造物性学分野</b>		
上地尚徳 内田誠 米谷亮平 菅惠子	L1 <sub>2</sub> 型規則構造結晶におけるミクロな拡散過程 超高温材料 Ir <sub>3</sub> Nb における拡散 液体 Li-Na 合金の濃度ゆらぎの研究 規則合金微粒子の規則度	大阪ガス(株) - 東京大学大学院進学 宇宙航空研究開発機構
<b>材料物理学分野</b>		
石本学 高原大樹 棚橋拓也 堤大輔 和田直之	Bi2223 テープ線材の機械的性質及びその臨界電流に及ぼす影響 PLD 法による GdBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>y</sub> 高温超伝導薄膜の作製と超伝導特性 Al-Zn-Mg 合金の熱間押出し加工における動的回復及び再結晶過程の観察 低ヤング率 Al 合金の探索 (Bi,Pb)2223 超伝導線材における酸化物高抵抗層の導入	京都大学大学院工学研究科材料工学専攻 京都大学大学院工学研究科材料工学専攻 京都大学大学院エネルギー科学研究所 サクラフューチャーズ 京都大学大学院工学研究科材料工学専攻

氏名	研究論文題目	就職先
<b>材質制御学分野</b>		
佐野 光	低炭素鋼のオースフォームドペイナイト組織におよぼすNb添加の影響	京都大学大学院
田中友規	鉄合金の上部ペイナイト組織におよぼす炭素量の影響	日世(株)
富尾 悠索	Fe-M (M=Ti,V,Nb,Al) 2元合金のプラズマ窒化組織	京都大学大学院
名古秀徳	低炭素鋼の拡散変態組織におよぼすNb添加の影響	京都大学大学院
山口拓人	高炭素鋼の高温変形組織におよぼす炭化物分散状態の影響	京都大学大学院
米澤 裕之	Fe-Ni-Co3元合金のマルテンサイト変態におよぼす合金組成の影響	京都大学大学院
<b>エネルギー社会工学分野</b>		
入江耕平	Fe-Ca系窒素吸蔵合金の開発	京都大学大学院エネルギー科学研究科修士課程
榎本洋祐	SiC粉末試料の光触媒特性に関する研究	京都大学大学院エネルギー科学研究科修士課程
久保文枝	磁場影響下における水の分光特性及びメチレンブルーの分解	京都大学大学院エネルギー科学研究科修士課程
後藤弘行	SiO <sub>2</sub> 添加がTiO <sub>2</sub> 光触媒活性に与える影響について	京都大学大学院エネルギー科学研究科修士課程
森本剛嘉	ジルコニアのメカニカル・ミリング及び光触媒特性について	京都大学大学院エネルギー科学研究科修士課程
諸富芳徳	メカニカル・アロイングによるCa-Co系合金の窒素吸蔵特性	京都大学大学院エネルギー科学研究科修士課程
<b>材料プロセシング分野</b>		
池村亮吉	バイオマスによる酸化鉄の還元	京都大学大学院エネルギー科学研究科
中井陽子	溶融スラグ中の塩素溶解度	京都大学大学院エネルギー科学研究科
中嶋剛司	溶融塩用酸素センサー	京都大学大学院エネルギー科学研究科
平野慎一郎	石灰石, 廃ガラス, 製鋼スラグの利用による人工骨材の製造	京都大学大学院エネルギー科学研究科
松田樹人	廃プラスチックによる酸化鉄の還元	京都大学大学院エネルギー科学研究科
<b>高温プロセス分野</b>		
有井一哉	起電力法によるモリブデンシリサイドの標準生成自由エネルギー測定	京都大学大学院エネルギー科学研究科
永座伸彦	酸化ニオブのナトリウム還元	京都大学大学院エネルギー科学研究科
北川仁史	Ca共還元法によるTiCr <sub>2</sub> 水素吸蔵合金の製造	京都大学大学院理学研究科
塚本祐也	円筒形熱電発電システムの最適設計	京都大学大学院情報学研究科
松岡良憲	ZrO <sub>2</sub> 隔壁を用いた溶融CaCl <sub>2</sub> 電解による酸化物還元	京都大学大学院エネルギー科学研究科
<b>エレクトロニクス研究室</b>		
小川哲平	水素終端Si(111)表面の容量特性	京都大学大学院
武田匡史	Pd原子サイズ接点のコンダクタンス測定	京都大学大学院
藤田潤平	定電流条件下における原子サイズ接点の安定性	京都大学大学院エネルギー科学研究科
三ツ谷翔太	単層カーボンナノチューブの量子化コンダクタンス	京都大学大学院
森本康平	ReSi <sub>1.75</sub> 界面のSTM観察	東京大学大学院

氏名	研究論文題目	就職先
<b>材料デザイン分野</b>		
池田 進一郎	MGC の破壊靭性値の測定と残留応力解析	京都大学大学院エネルギー科学研究所
石田 友信	Bi2223 酸化物超伝導体モノフィラメントの破壊挙動	京都大学大学院エネルギー科学研究所
岩本 壮平	GA 鋼板の引張変形におけるコーティング層応力分布の FEM 解析	京都大学大学院材料工学専攻
黒崎 良一	エックス線異常小角散乱法によるバルクアモルファス溶接材の構造解析	京都大学大学院材料工学専攻
丹羽 創	Si/Ge/Si ナノドットの空間分布解析	京都大学大学院材料工学専攻
北條 美穂	酸化による SiC 織維の劣化機構	京都大学大学院材料工学専攻
<b>修士課程修了者</b>		
氏名	研究論文題目	就職先
<b>材料設計工学講座</b>		
池野 豪一	3d 遷移金属化合物における $L_{2,3}$ -edge XANES 及び XMCD の理論計算	京都大学大学院工学研究科博士後期課程
世古 敦人	析出核生成による自由エネルギーの第一原理計算	京都大学大学院工学研究科博士後期課程
吉岡 聰	ZnO 中 3 倍ドーパントの状態解析	京都大学大学院工学研究科博士後期課程
<b>表面処理工学分野</b>		
石田 雅人	複合めっき法による $TiO_2$ 分散 Ni-Mo 合金皮膜の作成と評価	トヨタ自動車(株)
上山 正樹	アルミニウム複合電析物の光触媒活性評価	住友金属工業(株)
篠原伸樹	脂肪族 4 級アンモニウムイミド型イオン性液体を用いる金属および合金電析	トヨタ自動車(株)
八木 俊介	$Ti(III)/Ti(IV)$ 系レドックス対を用いるニッケルおよびその合金の無電解めっき	京都大学大学院
<b>プロセス設計学分野</b>		
貝淵 和喜	Soft X-ray $K\alpha$ fluorescence spectroscopy on Ba-, Rare Earth-, and Hf-fluorides using a synchrotron radiation (シンクロトロン放射光を用いた Ba-, Rare earth-, Hf-fluorides の蛍光 X 線分光)	本田技研工業(株)
古謝 裕介	希土類 - 遷移金属系化合物の水素吸蔵特性と電子状態との相関	トヨタ自動車(株)
豊田 仁寿	Development of local elemental analysis method with simultaneous measurement using synchrotron radiation and scanning electron microscope (X 線顕微鏡と走査型電子顕微鏡の同時測定による局所分析法の開発)	住友金属工業(株)
<b>マイクロ材料学講座</b>		
酒井 智弘	SiC 半導体に対するオーミック・コンタクト材形成プロセスの開発	旭硝子(株)
島田 雅博	Si-ULSI 用超微細 Cu 配線材の電気抵抗率に関する研究	全日本空輸(ANA)(株)
関根 務	低障壁中間層作製による p 型 GaN 半導体に対するオーミック・コンタクト材の開発	アイシン精機(株)
古田 成生	Si-ULSI 用めっき Cu 薄膜の結晶粒成長に対するシード層の影響	船井電機(株)

氏名	研究論文題目	就職先
<b>量子材料学分野</b>		
浅野哲也	MnAs <sub>1-x</sub> Sb <sub>x</sub> の断熱温度変化の測定	University of Southern California
羽柴淳	GdMn <sub>2</sub> (Ge <sub>1-x</sub> Si <sub>x</sub> ) <sub>2</sub> の磁気構造解析	日本IBM(株)
森川貴博	試料引抜型磁化測定装置の製作とCe <sub>1-x</sub> Y <sub>x</sub> Co <sub>3</sub> の磁化過程	(株)日立製作所
<b>結晶物性工学分野</b>		
足立克之	高周波マグネットロンスパッタリング法により作製した薄膜熱電材料の物性	東芝
坂巻陽平	第三元素を添加したReSi <sub>1.75</sub> 基シリサイドの結晶構造と熱電特性	NTT研究所
坂本宙樹	結晶の対掌性および極性識別のための新しい電子回折法の開発と応用	村田製作所
<b>構造物性学分野</b>		
草刈美里	放射光を用いた流体ルビジウムのX線回折実験	住友電気工業(株)
佐藤江平	超臨界流体セレンのX線小角散乱実験	(株)豊田自動織機
松原慶明	液体As <sub>2</sub> Se <sub>3</sub> のX線小角散乱実験	ローム(株)
三船耕平	放射光を用いた超臨界流体セレンのX線回折実験	関西電力(株)
<b>材料物理学分野</b>		
有賀亮平	拡張Hukel法による水素吸蔵機構の研究	P & D ビジネス
磯谷潤也	放射光小角散乱測定法によるMg-Y系合金における析出過程の解明	プラザー工業
伊藤浩平	Bi2223複合超伝導線材の臨界電流における曲げ／引張変形の影響	トヨタ自動車
<b>材質制御学分野</b>		
阿部裕志	チタン合金の動的再結晶	トヨタ自動車(株)
カントイ	高炭素鋼マルテンサイトの焼もどしによる炭化物析出挙動	インドネシアに帰国
斎藤勇人	低炭素鋼における粒界フェライトの形態および結晶	JFEスチール(株)
柴田暁伸	Fe-Ni合金におけるレンズマルテンサイトの内部微視組織	京都大学大学院博士後期課程
<b>エネルギー社会工学分野</b>		
石川史朗	LaNi <sub>5</sub> を用いた窒素吸蔵合金の開発	米国ユニバーシティ オブ サザンカリifornia留学
高井亨	ヘドニック地価関数による原子力事故の影響評価	未定
野島理一郎	京都市の運輸部門におけるCO <sub>2</sub> 排出量削減のための政策について ～乗用車から二輪車への乗り換えを中心とした検討～	NTTデータ
古本仁	酸化チタンの光触媒能の向上と湿度の影響に関する研究	ローム
<b>材料プロセッシング分野</b>		
石割正敏	溶融塩用酸素センサーの開発	JFEスチール(株)
曾根英彰	環境調和型高温プロセスルテニウム処理とフッ素レス精錬	新日本製鐵(株)
戒田裕亮	CaO-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -FeO系スラグの熱力学	JFEスチール(株)
武川将也	Production of Iron and Hydrogen through Gasification of Biomass and Waste Plastic	トヨタ自動車(株)

氏名	研究論文題目	就職先		
高温プロセス分野 近藤恒幾 立本海 吉田政幹	Fe <sub>2</sub> VAl合金を用いた熱電発電モジュールの基礎研究 酸化物を原料とした水素吸蔵合金の作製法の開発 CaCl <sub>2</sub> 溶融塩電解による TiO <sub>2</sub> の直接還元	川崎重工㈱ 日鉄金属㈱ 松下電器産業㈱		
量子エネルギープロセス分野 奥秀樹 北川昌明 園部太郎 森原伸夫	イットリア安定化ジルコニアの時効による導電率低下メカニズムに関する研究 銅酸化物超伝導体 Y-123 系の臨界電流に及ぼす Cu サイト Li 置換効果 銅酸化物 Pr-123 系における Sr 添加による相変化と伝導特性 The Joint Graduate School of Energy & Environment 銅酸化物超伝導体 Gd-123 系の臨界電流と伝導特性に及ぼす Pr 添加効果	松下電器産業㈱ 京都大学大学院(理・D) King Mongkut's Univ. of Tech. Thonburi (D) 株島津製作所		
エレクトロニクス分野 藤井昭宏 松本良太	金属原子サイズ接点の電流誘起不安定性に関する研究 STP 法による薄膜の局所伝導特性評価	日本 IBM キャノン		
材料デザイン分野 中村登代充 森下浩平	GA 鋼板表面コーティング層の破壊・はく離挙動に関する研究 SiC/SiC 複合材料の高温大気環境劣化メカニズムに関する研究	住友金属 京都大学大学院材料工学専攻		
博士学位授与者 論文博士				
氏名	研究論文題目	主査	取得年月日	備考
材料設計工学講座 幾原裕美	Processing and microstructure of functional oxide ceramics with oriented structure (配向構造を有する機能性酸化物セラミックスの合成と微細構造に関する研究)	足立裕彦	平成16年3月23日	米国ケースウェスタンリザーブ大学材料科学専攻修士課程修了/平成5年10月
表面処理工学分野 野口裕臣	環境調和型の塩化亜鉛-塩化カリウム系防錆亜鉛めっき浴に関する研究	栗倉泰弘	平成16年3月23日	愛知県産業技術研究所
結晶物性工学分野 井頭賢一郎	Si-M-C-O 繊維強化 SiC 複合材料のガスバーナ燃焼器ライナへの適用に関する研究	山口正治	平成15年10月23日	大阪大学大学院修士課程平成4年3月修了
川浦宏之	TiAl 基合金の自動車用ターボチャージャへの応用に関する研究	山口正治	平成15年10月23日	京都大学大学院修士課程昭和61年3月修了
川村昌志	産業用ガスバーナエンジン部品に対する遮熱皮膜の耐久性評価技術に関する研究	山口正治	平成16年3月23日	平成3年3月修了

### 水曜会誌卒業年次幹事制の導入について

先の水曜会大会におきまして、下記のような付則が採択され卒業年次幹事を委嘱することになりました。年次幹事は卒業の年次ごとに金属系、資源系より各1名の年次幹事を定め、各系同年次会員の連絡先の掌握や同年次会員を代表して水曜会運営への協力をお願いすることになります。既に委嘱の手続きを開始しておりますが、各年次が揃いましたらご報告いたします。年次幹事にご就任頂く会員の方々には、水曜会の活動をより充実したものとするため、何卒ご協力の程お願いいたします。

#### 水曜会年次幹事に関する付則

##### (目的)

第1条 水曜会の円滑な運営のため年次幹事を定め、水曜会会长は次の任務を依頼する。

1. 同年次会員の連絡先の掌握,

2. 同年次会員を代表して水曜会運営への協力

##### (定期員)

第2条 年次幹事を各卒業年次ごとに旧資源系（鉱山）1名、旧金属系（冶金）1名を定めるものとする。

##### (任期)

第3条 任期は2年とし、重任は妨げないものとする。

##### (委嘱)

第4条 年次幹事の選任は、同年次会員の推薦により会長が委嘱するものとする。

この付則は平成15年6月14日より施行する。

#### 逝去会員

平成15年12月12日	伊賀 久矩	昭30・治
平成16年1月17日	林 明夫	昭34・治
平成15年8月5日	田部 忠行	昭28・鉱
平成15年12月23日	田中 俊夫	昭 9
逝去日不明	武部 三郎	昭12
平成16年5月28日	新持喜一郎	昭12
平成15年10月14日	喜多 新男	昭14
平成16年5月3日	小山田 進	昭21・鉱
平成15年5月27日	深松 貞夫	昭23・鉱
平成16年4月30日	松本悌二郎	昭28・治
平成12年	安田 達	昭28・治
平成14年9月25日	糸川 冬郎	昭31・鉱
平成16年4月24日	松田 昭一	昭36・治
平成16年6月6日	山場 良太	昭42・治
平成15年5月23日	木下 泰介	昭17・治
平成16年6月3日	岡本 隆	昭25・鉱
平成14年	村上 幸雄	昭22・治
平成16年6月3日	渡辺 昭	昭31・鉱
平成16年4月24日	深海 六郎	昭18・鉱
平成13年8月	池上 杏平	昭27・鉱
平成16年1月5日	岩崎 泰夫	昭19・鉱
平成13年12月13日	湯川 安雄	昭20・治
平成16年9月27日	白井 博樹	昭42・資
平成16年8月24日	蜂須賀武治	昭28・新治

#### 教室報告

教員人事			
<旧資源系>			
平成16年3月1日	馬渕 守	教授に任官	
平成16年3月31日	花崎紘一	定年退官	
平成16年4月1日	平野 勇	(獨)土木研究所に転出	
平成16年5月1日	朝倉俊弘	教授に昇任	
平成16年10月1日	三ヶ田均	講師に採用	
平成16年10月1日	濱 孝之	助手に採用	
平成16年11月1日	村田澄彦	助教授に昇任	
<旧金属系>			
平成15年12月1日	田中 功	教授に昇任	
平成15年12月1日	杉村博之	教授に任官	
平成16年2月1日	李 庚晃	助手に任官	
平成16年2月1日	大場史康	助手に任官	
平成16年3月31日	足立裕彦	定年退官	
平成16年3月31日	山口正治	定年退官	
平成16年3月31日	吉田起國	定年退官	
平成16年4月1日	西谷滋人	関西学院大学に転出	
平成16年4月1日	永園 充	Univ. Hamburg に転出	
平成16年4月1日	伊藤和博	助教授に昇任	
平成16年4月1日	黒川 修	助教授に昇任	
平成16年4月1日	奥村英之	助教授に採用	
平成16年4月1日	桑原彰秀	助手に採用	
平成16年5月1日	守山実希	豊田合成(株)に転出	
平成16年10月1日	和田裕文	九州大学に転出	
平成16年11月1日	乾 晴行	教授に昇任	
平成16年11月1日	邑瀬邦明	助教授に昇任	

## 水曜会誌の企画と投稿のお願い

水曜会誌編集委員会

本委員会では、会員の皆様の近況や展望など幅広い内容記事を紹介する『談話室』を設け、投稿を募っております。『談話室』は、会員各位の意見・情報交換の場としてご利用頂くことを目的としたもので、投稿規定の分類では『各種記事』に相当します。

具体的には、

- 第一線で活躍中の会員の幅広い展望・随想
- 各企業の研究所の紹介（特殊機器や意外な研究内容など）
- 研究についてのトピックス（形式は問わない）
- 国際会議や海外出張の紹介・こぼれ話
- 種々の分野でご活躍の会員の特異な体験記事
- 新教官の自己紹介や抱負など
- 水曜会の活動における歴史的こぼれ話

などを企画しております。掲載分には薄謝を進呈いたします。奮ってご投稿下さい。また、他に取り上げるべき企画などご意見がありましたら編集委員会までお知らせ下さい。さらに、投稿規定に従い、論文・講座・総説などにつきましても投稿を随時受け付けております。

次号の発刊に向け、常時、会員の皆様からの投稿をお待ち致しておりますので、奮ってご応募くださるようお願い致します。投稿を予定されて今回、間に合わなかった原稿につきましても、引き続きお待ちしておりますので、どうぞよろしくお願い致します。

### 平成16年度水曜会誌編集委員

委員長	松岡俊文					
幹事	新苗正和（編集）	田中功（広告）				
委員	安達毅	石原慶一	岡田孝夫	岡部徹		
	落合庄治郎	澤井隆	竹島康志	武田啓三		
	田中義和	田辺晃生	谷口裕一	西山佳孝		
	福井久智	松谷哲也	山田雅行			

平成16年12月20日 印刷	平成16年12月25日 発行	
編集兼 発行者	牧 正志	
印刷者	小林生男	
日本印刷出版株式会社		
553-0006 大阪市福島区吉野1丁目2番7号		
電話 大阪 (6441) 6594 (代)		
FAX 大阪 (6443) 5815		
発行所 京都大学工学部 水曜会		
606-8501 京都市左京区吉田本町		
振替口座 京都 01090-8-26568 電話 (075) 753-7531 (大代表)		
銀行口座 みずほ銀行百万辻支店		
普通 476-1242526 水曜会		

# 水曜会誌投稿規定

(昭和62年4月23日改訂)

## 1. 投稿要領

- (1) 投稿原稿の著者（連名の場合は1名以上）は水曜会員でなければならない。ただし、水曜会誌編集委員会（以下編集委員会という）で認めた場合はこの限りではない。
- (2) 投稿原稿は論文、報告、総説、講座、資料、会員消息などとし、分類指定がない場合には編集委員会が判定する。
- (3) 投稿原稿の分類はつぎの基準にしたがうものとする。
- a. 論文 他の刊行物の未発表のもので、独創性をもつ著者の基礎研究または応用研究の成果、技術の開発改良などを内容とするもの。
  - b. 報告 現場の操業報告などに類するもので、学術的に価値があると認められるもの。
  - c. 総説 特定の問題について普遍的に広い視野から解説し、その推移を知るうえに役立つもの。
  - d. 講座 特定の問題について掘り下げて解説し、会員の啓蒙、再教育に役立つもの。
  - e. 資料 学問的あるいは技術的に価値のある内容を含み、会員の参考資料として役立つもの。
- (4) 論文、報告には英文表題のほかに100字前後の英文概要を添付されたい。
- (5) 原稿の長さは必要な図・表を含めて次表に示すとおりとし、これを超える場合は必要経費を負担されたい。但し依頼原稿についてはその限りではない。なお、会誌1頁は図表のないときには2,400字（25字×48行×2列）であり、表題および英文概要是刷上り1/4頁～1/2頁を要することを考慮されたい。

分類	制限ページ数
論文	会誌刷上り 6頁以内
報告	会誌刷上り 6頁以内
総説	会誌刷上り 10頁以内
講座	会誌刷上り 10頁以内
資料	会誌刷上り 4頁以内
各種記事	会誌刷上り 4頁以内

- (6) 投稿に際しては本会規定の原稿用紙を使用し、原稿整理カードを添付されたい。
- (7) 原稿の送付先はつぎのとおりとする。  
〒606-8501 京都市左京区吉田本町  
京都大学大学院工学研究科資源工学・材料工学  
専攻 エネルギー科学研究科 内  
水曜会誌編集委員会宛

- (8) 原稿は水曜会誌編集委員会が受理した日をもって受理日とする。
- (9) 投稿原稿に対し、編集委員会は査読を行って掲載の可否を決定する。また、査読結果に基づき編集委員会は投稿原稿に対して問合わせ、または内容の修正を求めることがある。
- (10) 編集委員会は、用語ならびに体裁統一のため編集係によって文意を変えない程度に投稿原稿の字句の修正をすることがある。
- (11) 初校は著者にて行ない、第2校以降は編集委員が行う。初校における原文訂正の必要のないようとくに留意されたい。
- (12) 別刷については実費を負担されたい。著者は、著者校正と同時に別刷必要部数を申し出るものとする。

## 2. 原稿の書き方

- (1) 章・節などの区分はポイント・システムによる。すなわち、章に相当する1・緒言などは中央に2行分をとり、節に相当する1・1実験方法などは左端に書き、つぎの行より本文を書くようとする。また、項や目に相当する(1)試料などは左端に書き、2字分あけて本文をつづける。
- (2) 図面は鮮明なものであること。刷上り図面の大きさは横幅でもって指定するものとするが、横幅は1段（65mm以内）または2段通し（140mm以内）のいずれかとなることを考慮されたい。原図は刷上り図面の少なくとも2倍に書かれたい。この際図面の縮尺を考慮して作図し、とくに図中の文字の大きさについては十分に注意を払われたい。また、原図の左下隅に著者名、論文名、図表番号などを必ず明記されたい。
- (3) 単位は国際単位系（SI単位系）によることが望ましい。
- (4) 参考のため文献を記す場合には本文の肩に1)、2)などを付し、論文末尾につぎの形式で書き加えること。
- 1) 大塚一雄、宮城 宏：日鉱誌, 87, [1001], 521-525, (1971)
  - 2) M.R. Taylor, R. S. Fidler and R. W. Smith: Metallurgical Trans., AIME, 2, [7], 1793-1798, (1971)

[注] 原稿用紙などは編集委員会までご請求下さい。

鉄づくりをコアに、時代環境の変化に柔軟に対応

ONWARD UPWARD

◆住友金属

〒104-6111 東京都中央区晴海1丁目8番11号

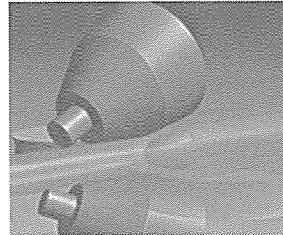
(トリトンスクエアオフィスタワーY)

連絡先：人事労政部人事室 宮川／阿部

TEL：03-4416-6160

HP：<http://www.sumitomometals.co.jp/>

Eメール：[recruit@sumitomometals.co.jp](mailto:recruit@sumitomometals.co.jp)



SEI

素敵な未来を奏でたい。

パッドの上で指が踊り、美しい音色が心に響く。

それは全てのパッドが役割を果たしてこそ心に届くもの。

このフルートのように、一世紀の間に蓄積した技術で心に響く未来を創る、

それが住友電工なのです。

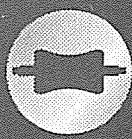
- ・エネルギー
- ・情報通信
- ・電機・電子部品
- ・システムエレクトロニクス
- ・オートモーティブプロダクツ
- ・ニューマテリアル
- ・エンジニアリング

明日を素敵に創りたい

◆住友電工

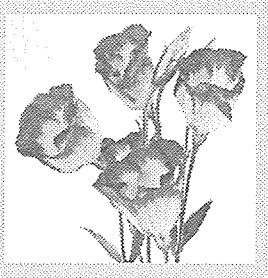
MICRO FINE

● ミクロファイン鋼 ●



KD11S

NIPPON KOSHUHA STEEL CO., LTD.



抜群の加工性を誇る汎用冷間ダイス鋼。

金型用鋼の高周波  
KOSHUHA



KD11Sの特長

KD11Sは、被削性を驚異的に向上させた新しいタイプの汎用冷間ダイス鋼です。

1

抜群の加工性。

- 工具寿命の延長と、加工能率改善が可能です。
- 仕上切削加工面がとても綺麗です。
- 熱処理後の切削加工が可能です。

2

優れた金型寿命。

- 満足のいく金型寿命、品質向上が得られます。
- 冷間ダイス鋼としてハイテン材の曲げ、絞りにも対応します。



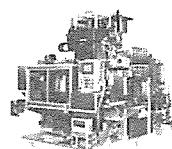
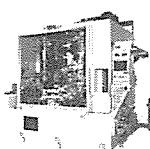
日本高周波鋼業株式会社

<http://www.koshuha.co.jp>

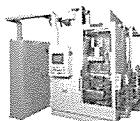
ネツレン 誘導加熱のハイオニア

各種高周波焼入・焼戻装置

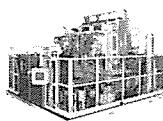
ネツレンは、創業以来50余年誘導加熱のハイオニアとして常に最先端技術の研究・開発に力を注いでまいりました。これからも顧客のニーズに対応した小型・省エネ・高信頼性で生産性の高い高周波焼入装置を提供してまいります。



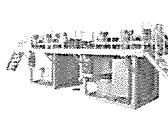
カムシャフト焼入焼戻装置



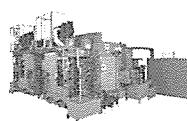
緊型汎用焼入装置



大型シュー／レース／ギア焼入装置



チェーン焼入焼戻装置



クランクシャフト焼入焼戻装置

**NETUREN**

<http://www.k-neturen.co.jp>

ネツレン

高周波熱鍊株式会社

●本社 〒141-8639 東京都品川区東五反田2-17-1 TEL 03(3443)5441 FAX 03(3449)3969

オーバレコード大崎マークウエスト

●営業部 〒254-0013 神奈川県平塚市田村七丁目4番10号 TEL 0463(55)1552 FAX 0463(55)4238

●名古屋営業所 〒470-1101 愛知県豊明市沓掛町八幡前77-41 TEL 0562(92)8338 FAX 0562(92)8666

# Suiyōkwai-Shi

TRANSACTIONS OF THE MINING AND METALLURGICAL  
ASSOCIATION  
KYOTO

## CONTENTS

### Retirement Memorial Lectures

Reminiscences of My 45 Years at Kyoto University .....	Koichi HANASAKI .....	707
Mandala of Quantum Materials Science .....	Hirohiko ADACHI .....	713
Studies of Intermetallic Compounds .....	Masaharu YAMAGUCHI .....	721
Individuals and the Whole in Constitution of Materials – Correlation between Fields and Flows in Inhomogeneous Systems – .....	Katsukuni YOSHIDA .....	726

### Memorial Lecture in the Annual Meeting of Suiyōkwai

Material Technology Supporting The Growth of Aluminium Rolling Mill Industries – Current Status and Measures for Future – .....	Koji NAGATA .....	737
Risk Management for Industrial Safety .....	Terushige OGAWA .....	748

### Lecture

Progress in Metal Science and Its Research Technology – Look Back upon My Research Life [III] .....	Yotaro MURAKAMI .....	755
--	-----------------------	-----

### Forum

Self-Assembled Molecular Films .....	Hiroyuki SUGIMURA .....	771
Processing of Super-Light Porous Metals .....	Mamoru MABUCHI .....	775
Essay on MBA School through my experience .....	Yoichi MATSUDA .....	778
The Roots of My Family Name .....	Yoshio ATSUTA .....	783
From the Recent Numbers of the Journal 《С т а л ь》: Trend of Restoration of Russian Steel Industry .....	Makoto MASUO .....	791

### Current Studies in Laboratories .....

### Suiyōkwai Information .....

### Letters to Editor .....

Kyoto University

Japan