

# 水曜會誌

## 第24卷 第2号

### 目 次

|                                      |                 |
|--------------------------------------|-----------------|
| 退職記念講演                               |                 |
| 材料プロセスと実験.....                       | 粟倉 泰弘 ..... 159 |
| 大会記念講演                               |                 |
| 鉄鋼業における地球環境への取り組み－住友金属の事例－.....      | 友野 宏 ..... 176  |
| 分からないことが分からない－不思議な岩盤の世界－.....        | 日比野 敏 ..... 193 |
| 談話室                                  |                 |
| 超微細結晶粒金属材料に関する研究.....                | 辻 伸泰 ..... 206  |
| 地下の姿を追い求めて.....                      | 後藤 忠徳 ..... 213 |
| イオン結晶中のポジトロニウムの動力学.....              | 井上 耕治 ..... 218 |
| 第一原理計算によるリチウムイオン電池正極活物質の研究.....      | 小山 幸典 ..... 221 |
| 多結晶金属材料でみられる不均一変形の画像処理を利用した定量測定..... | 寺田 大将 ..... 226 |
| 歌をめぐる物語－琵琶湖周航の歌，琵琶湖哀歌，七里ヶ浜哀歌－.....   | 小岩 昌宏 ..... 232 |
| 松下幸之助に学ぶその金銭哲学.....                  | 熱田 善男 ..... 240 |
| 自然を愛する豊かな人間を育てる北東北の自然環境.....         | 杉村健太郎 ..... 245 |
| 研究速報.....                            | 250             |
| 会 報.....                             | 273             |
| 卒業者名簿.....                           | 316             |

平成21年10月30日発行

京 都 大 学

水 曜 会



あなたの、そばに。

[www.furukawa-sky.co.jp](http://www.furukawa-sky.co.jp)

「アルミニウム」は、どんな夢を見せてくれるんだろう。

軽量で、リサイクル性に優れたアルミニウム。

私たち古河スカイは日本最大のアルミ圧延メーカーとして、アルミニウムのもつ無限の可能性を拡大しながら地球時代にふさわしい循環型社会づくりに貢献しています。

 **古河スカイ株式会社**

〒101-8970 東京都千代田区外神田4丁目14番1号 秋葉原UDX12階 TEL.03-5295-3800(代) FAX.03-5295-3760

創業以来70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 鑄造加工

耐摩耗性銅基合金 (OMアロイ)  
超電導用ブロンズ及び各種青銅  
真空溶解による鑄造品



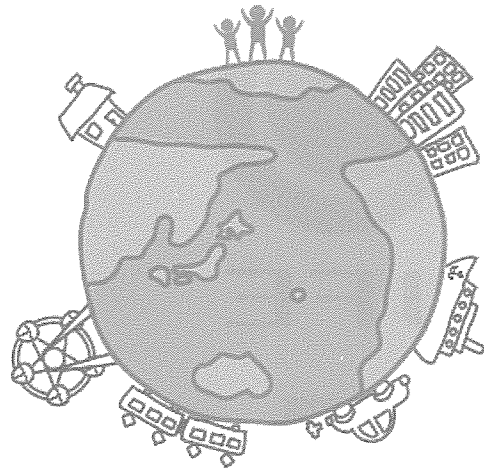
株式 大阪合金工業所  
会社

代表取締役会長 水田 泰次

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  
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

**SUMITOMO METALS**

地球で生きる。  
世界で生きる。



自動車・電機製品・船・橋・鉄道・高層ビルなど、わたしたちの生活をしっかりと支えている鉄。  
鉄鋼製品を通じて、世界中の人とつながる企業、それが住友金属です。

**住友金属工業株式会社**

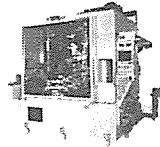
お問合せ先 人事労政部人事室 採用担当

本社：〒104-6111 東京都中央区晴海1-8-11 トリトンスクエア/オフィスタワーY  
TEL: 03-4416-6160 FAX: 03-4416-6794  
URL: <http://www.sumitomometals.co.jp> E-mail: [recruit@sumitomometals.co.jp](mailto:recruit@sumitomometals.co.jp)

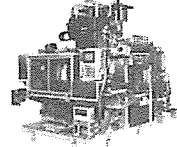


# ネットレン 誘導加熱のハイオニア 各種高周波焼入・焼戻装置

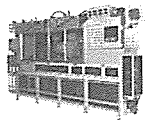
ネットレンは、創業以来60余年誘導加熱のハイオニアとして常に最先端技術の研究・開発に力を注いでまいりました。これからも顧客のニーズに対応した小型・省エネ・高信頼性で生産性の高い高周波焼入装置を提供してまいります。



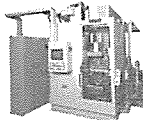
等速ジョイント焼入焼戻装置



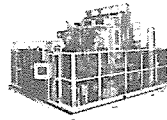
ドライブシャフト焼入焼戻装置



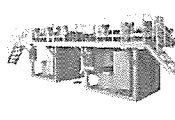
カムシャフト焼入焼戻装置



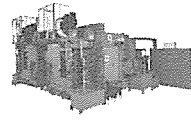
鋳型汎用焼入装置



大型シュールース/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>

**ネットレン**

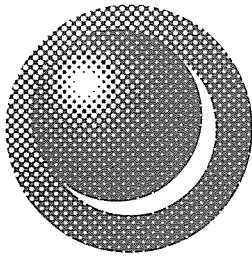
高周波熱錬株式会社

本社

I H 事業部営業部・東部営業所  
・中部営業所  
・西部営業所  
・海外営業課

〒141-8639 東京都品川区東五反田2-17-1  
オーバルコート大崎マークウエスト  
〒254-0013 神奈川県平塚市田村7-4-10  
〒448-0006 愛知県刈谷市西境町広見97-2  
〒660-0095 尼崎市大浜町2-28-8  
〒254-0013 神奈川県平塚市田村7-4-10

TEL.03-3443-5441 (代) FAX.03-3449-3969  
TEL.0463-55-1552 FAX.0463-55-4238  
TEL.0566-26-1415 FAX.0556-26-1114  
TEL.06-6412-2211 FAX.06-6412-2171  
TEL.0463-55-1552 FAX.0463-55-4238



**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>

# 新日鉄の高品質を全世界へ。

NIPPON STEEL

いま日本で生産している、新日鉄の鉄。それは、先進技術による高品質なプロダクト。海外のマーケットが求める鉄でもあります。世界中のいたるところへ、新日鉄の高品質をそのまま届けたい。そのために私たちは、世界の有力鉄鋼メーカーと提携・合併。世界主要地域をカバーする生産・供給ネットワークを築きました。その一つの成果として、すでに高級自動車鋼板の現地生産拠点を確立し、新日鉄品質を全世界に提供しはじめています。さらには、地球環境問題への取り組みなど、世界の鉄鋼業をリードし、新たな価値を生み出します。夢のスケールに、限りはありません。

ひろがる、鉄の  
グローバルサプライ  
ネットワーク。



先進のその先へ、新日鉄

[www.nsc.co.jp](http://www.nsc.co.jp)

# 楽々E倶楽部<sup>®</sup>

もう9時から5時までといわせない  
Webを利用した24時間稼働する

バージョンアップ「一発エクセル」登場!

## 予約サービス

ASPで費用削減

当社の受付予約サービスの導入で「3つの削減・3つの満足」を実現。

### うれしいサービス1

残席表示で  
不要な問合せから  
解放されます。



倶楽部講習会  
あなたの  
受付番号は  
50番です。

### うれしいサービス2

受付番号の自動表示。  
会費納入期日等も自動化。  
申込者の不安を解消。



削減

・時間  
・経費  
・事務負担

満足

・残席表示  
・受付番号発行  
・エクセルデータ

### うれしいサービス3

即、エクセルデータ  
取出。事務合理化。

安心

・日本ベリサイン加盟  
(お客様の情報を守ります)

### うれしいサービス4

安さの秘密は汎用性。  
プランにあわせて  
時間貸し、期間貸し。

画面はプリントアウトできます。受付票・  
申込確認書として利用して下さい。郵送料ゼロを実現。

詳しくはホームページをご覧ください

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

<https://jpp.jp/demo/> (デモ版)

デモ版  
あります

日本印刷出版株式会社

お問い合わせ先  
〒553-0006 大阪市福島区吉野1-2-7  
TEL 06(6441)0076 E倶楽部係 FAX 06(6443)5815

真空の  
極限を



目ざして...

ULVACグループ代理店

株式会社 京都タカオシン

本社 〒606-8395 京都市左京区川端丸太町東入ル (075) 751-7755(代)

FAX (075) 751-0294

滋賀営業所 〒523-0056 滋賀県近江八幡市古川町 1180-12 (0748) 36-6682

FAX (0748) 36-6683

# 資源循環をテーマに、 産業と地球環境に貢献する。

DOWAは、非鉄製錬技術を活かして、  
他に例のない循環型のビジネスモデルを確立。  
情報通信、自動車関連、環境など、さまざまな分野で事業を展開することで、  
産業と地球環境に貢献しています。

## DOWA

回収

分離・製錬

無害化

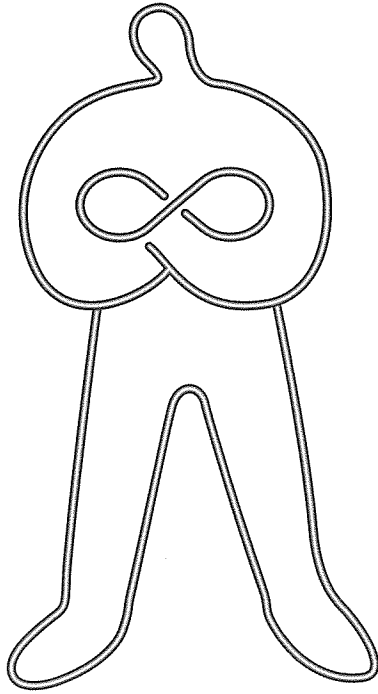
加工

高機能化

**DOWAホールディングス株式会社**

東京都千代田区外神田四丁目14番1号 秋葉原UDXビル 22階  
TEL:03-6847-1102 FAX:03-6847-1121

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



メタルスタイリスト

*METAL STYLIST*

.....  
**FUKUDA**

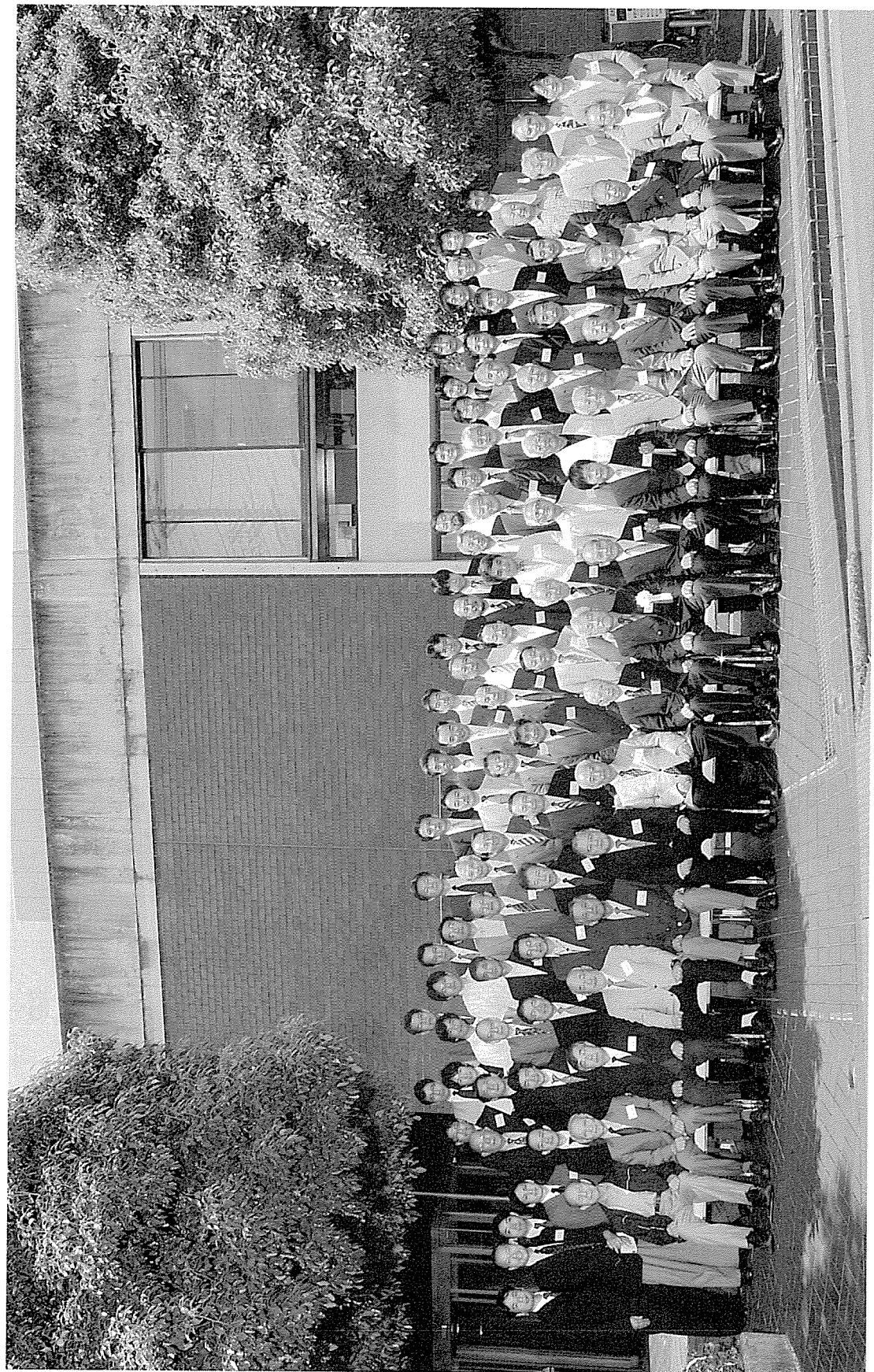
FUKUDA METAL FOIL & POWDER CO.,LTD.



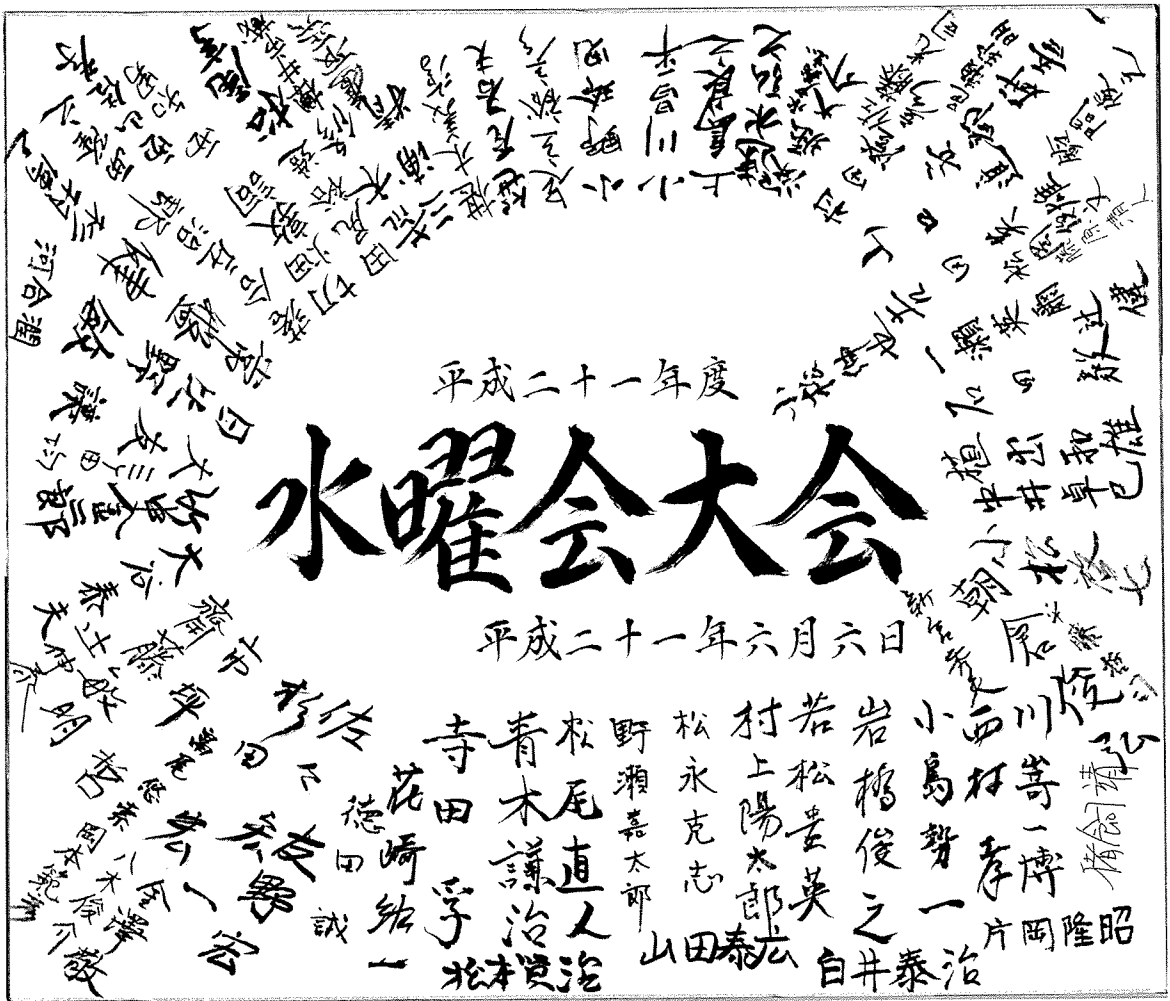
**福田金属箔粉工業株式会社**

本社・京都工場 〒607-8305 京都市山科区西野山中臣町20番地  
TEL(075)581-2161 FAX(075)581-7271  
東京支店/名古屋支店/関西支店(京都)/滋賀工場  
<http://www.fukuda-kyoto.co.jp>





平成21年度 水曜会大会 記念写真（平成21年6月6日 京大会館にて）



平成21年度 水曜会大会 懇親会寄せ書

## 退職記念講演

## 材料プロセスと実験

粟 倉 泰 弘\*

## Materials Processing and Experiments

by Yasuhiro AWAKURA

## 1. はじめに

専攻長から最終講義をという話をいただきまして、何を話そうかなといういろいろ考えました。昭和39年4月に京都大学工学部冶金学科に入学してから、かれこれ44年間大学生活を送ってきました。その間、専門分野が冶金学・材料工学ということで実験に携わる機会が多かったです。実験というのは単に試料を準備し、装置にかけるとデータが取れて終了というわけにはいきません。例えば、温度一つ測るにしても、測りたい場所の温度を測っているのか？熱電対はちゃんと働いているのか？など、いくつかの点を自分でチェックしないと後で困るのは自分であるということがよくわかりましたので、そのような体験を分かっていたらこうと思って、本日の最終講義のタイトルを決めました。

本題に入る前に、若干私の経歴を述べさせていただきます。昭和43年春に工学部冶金学科を卒業しました。卒業論では「流動層の伝熱特性」という熱移動に関する実験をしました。その後、大学院修士課程に進学し「固相-固相反応の速度論」に関する実験をやって、昭和45年春に修士課程を修了し新日本製鐵株式会社に入りました。しばらく会社に籍を置いていたのですが、再び大学に戻って博士課程に入り、昭和50年に博士後期課程を単位修得退学しました。その頃は物質移動の研究をやっていました。つまり、大学の助手になる前は冶金の中の化学工学的な分野の実験・研究に携わっていたということです。

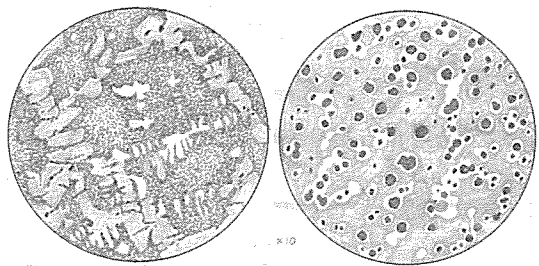
その後、助手になって給料をもらえるようになってからは湿式製錬の分野で熱力学や電気化学を背景とする仕事に15年間ほど携わってきました。移動現象論と熱力学

の周辺のことをやったことが、後にもものを作る仕事に携わったとき一番役に立ちました。これは講義でもあまり教わらないことですが、一番大切であると思いました。先ほども、この講義室の後ろに立っている人に、前の席が空いていますよと誘っても、人が移動するのに20秒も30秒も時間がかかるんですネ。これがものを作るときも一番問題になります。ものを作るとき反応物質がどのくらいの速度で、反応場所にやってくるのかということ把握しておかないと、ピーカーの中では出来るが産業プロセスになるとうまくいかないことがしばしば起こることになります。

40年前の学生時代のことで印象に残っていることを、少し話してみます。当時は3回生になって専門教育が始まると多くの学生実験がありました。それらの中でも金属試料の顕微鏡組織観察をみっちりやらされました。様々な金属試料を研磨し、研磨面を腐食液でエッチングし、それを光学顕微鏡で観察しスケッチするのです。図1は私が3回生の学生実験で描いた顕微鏡観察のスケッチです。左は共晶状黒鉛鑄鉄で、右側は球状黒鉛鑄鉄で

共晶状黒鉛鑄鉄

球状黒鉛鑄鉄

鑄鉄浴をTiO<sub>2</sub>を含む溶滓で処理

鑄鉄浴にマグネシウムを添加(0.069%)

図1 学生実験における金属顕微鏡組織観察のスケッチ

\*昭和43年冶金卒，京都大学名誉教授

す。特に鑄鉄にマグネシウムを添加すると黒鉛が球状に析出すること。そうすると応力集中がないので鑄物が大変粘り強くなるという話を聞きました。その他、鑄鋼やアルミニウムとシリコンの合金などの組織も顕微鏡観察とスケッチを通して学びました。当時は、実物に触れる機会の多い学生実験であったことは、今の学生諸君と少し違う点だと思えます。

昭和40年当初は冶金学教室と金属加工学教室が金属系教室として一体運営されていました。講座名も鉄冶金、非鉄冶金、電気冶金、・・・、結晶塑性、金属組織、特殊鋼学・・・のように今ではなつかしい名前です。これらの講座名から予想されるように講義の内容には現象論が多く、結晶塑性や金属内の拡散などで原子論に基づく内容を少し教わりました。僅かに金属物理学で電子論に基づく磁石の話がありました。これが材料工学分野に電子論のやってきた最初だと記憶しています。今の材料科学コースのカリキュラムと比較していただくと良くわかると思いますが、原子論・電子論に関係する講義が多く、ずいぶん様子が変わってきていると思えます。

## 2. 不均一反応と物質移動

本日の最終講義で何を話そうかと考えていたのですが、最近の仕事の話はすべて論文に成っていますし、研究室の若い先生達がいろいろなところで発表し、お聞き及びのことも多々あると思えましたので、今日はそれ以前のあまり話をしたことがない、私自身の博士後期課程の話をしたいと思えます。

具体的には電気分解しているときの電極近くの物質移動の話です。金属製錬には多くは不均一反応が使われています。固体と液体、固体と気体、液体と固体などの界面での反応です。このような反応の特徴の一つは反応物質が反応界面に絶え間なく供給されないと、反応が継続しないことです。従って、1) 反応界面への反応物質の移動、2) 反応界面における化学反応、3) 反応界面からの生成物の移動、に関する過程が重要になります。当時私は冶金反応操作という講座に所属していましたので、物質移動過程に興味を持って、それに関する研究を行っていました。

銅の電解精製も不均一反応の一つです。図2の漫画絵に示したように、硫酸銅水溶液を満した電解槽に浸漬した二つの銅電極に電圧をかけると、電気が流れアノードでは銅の溶解、カソードでは銅の析出が進行します。この時、電極近くをよく見ると電解液の流れが生じているのがわかります。カソード近くでは銅イオンの還元析出により、その濃度が低くなり、その結果上向きの自然対流が発生します。電極の近くの濃度が低くなると電解液の密度が下がり、軽くなって陽炎のように電解液が上

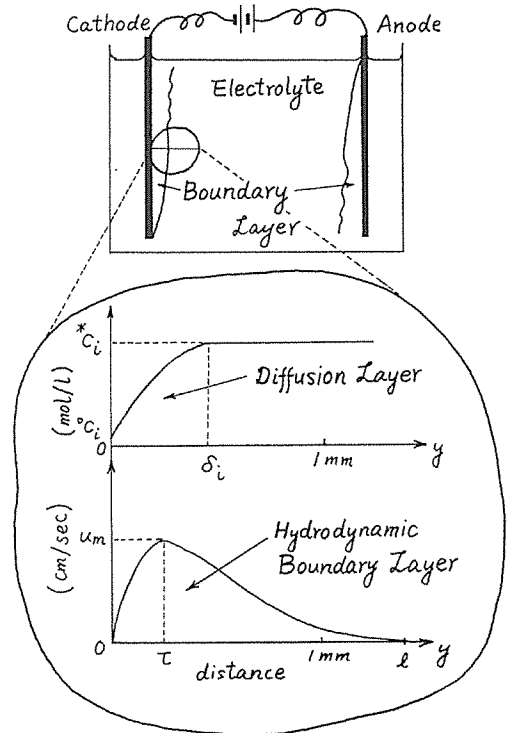


図2 電気分解と電極近くの境界層

へ向かって流れるわけです。アノードではその逆で、銅がイオンとして溶け出す結果、電解液の密度が高くなり、下向きの流れが生じます。漫画絵には電極の近くに流体力学的な境界層があり、その中の流れの速度分布はこのようになりますということが描かれています。さらに、電極表面での銅イオンの消費速度と溶液本体からの供給速度のバランスから、電極近傍には硫酸銅濃度プロファイルのある濃度境界層がありますよ、というのが教科書的な説明です。実は当時この流体力学的境界層や濃度境界層の中の、自然対流の速度分布や濃度分布を実測したいと思った訳です。

自然対流の流速分布は比較的簡単に測定できます。何故かというと、電解液の流れは電極表面から15mm程度の沖合にまでおよぶので、その観測はそれほど難しくはない。電解液中にそれと密度がほぼ同じ直径数10 $\mu$ mの固体粒子を懸濁させ、電解中そこへ斜めから光を当てて、粒子の陰の軌跡をムービーで撮影するのです。あとはフィルムを現像した後、1秒ごとのフレームの静止画像を調べて、各粒子の移動速度を算出するわけです。面倒な実験ですが丹念にやれば図3のような実験結果が出てきます<sup>1)</sup>。

今日、皆さんにお話ししようと考えているのは電気分解をやっている時に、電解開始後5分間ぐらい良く観察

すると、注意深い人ならカソード表面にスーと色の違う層ができることに気がつきます（図4の左参照）。何故かという、先ほどお話したように電極近傍の硫酸銅濃度が下がったため、色の違いが人間の目にはわかるのです。また同時に溶液の屈折率も変化しますから、一種のメニスカス効果が生じて、人間の目にはわかりません。実は、この薄い溶液層中の濃度分布を定量しようというのが私の目標で、光の干渉計を使ってそれを行いました。図4の右に示したのは干渉計を使って測定した結果<sup>3)</sup>ですが、濃度変化の生じる領域はだいたい500 $\mu\text{m}$ 程度、つまり1mm以下の領域です。光の干渉計を使ったのは、電極の近くの電解液の濃度が変わると、溶液の屈折率が変る、ですからその屈折率の変化を干渉計で定量する、という筋書きです。

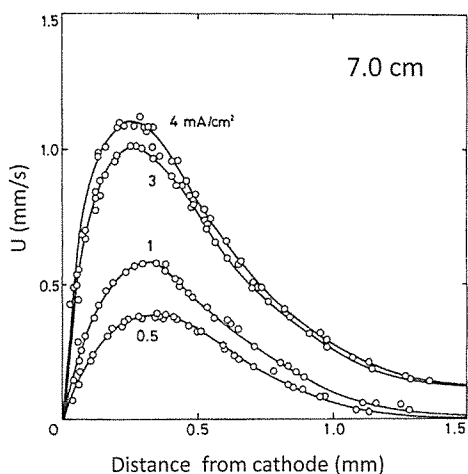


図3 カソード近傍の自然対流の速度分布

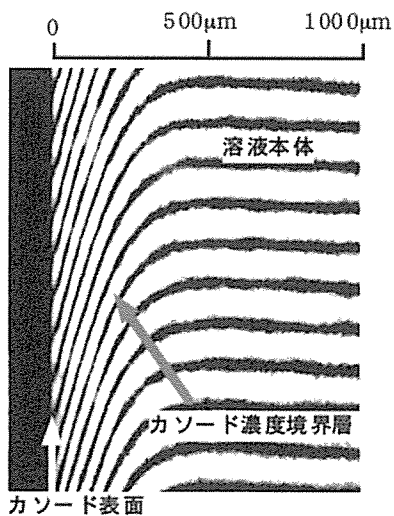
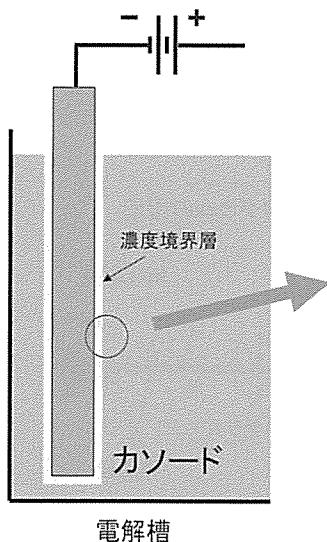


図4 干渉縞で見るカソード近傍の濃度境界層

### 3. 古典的干渉計とホログラフィック干渉計

光の干渉計をご存じない方も結構おられますので、図を使って少し説明したいと思います。昔から幾つかの干渉計が報告されていますが、中でも図5に示したMach-Zehndar干渉計<sup>3)</sup>は良く知られています。この場合、調べたい実験試料とそれと全く同じ参照試料を準備します。そして光源から来る光を二つに分割し、それぞれ実験試料と参照試料を透過させ、その後二つの光を重ね合わせ光の干渉を観測するという方法です。そのとき実験試料に変化が生じると、それは干渉縞の変化として現れます。干渉縞については、高等学校の物理は次のように教えています。波には重ね合わせの原理が成立するので、もし二つの光の波が同位相で重なり合うと、二つの波はお互いに強め合い、合成波の振幅はそれぞれの波のたし算になります。一方、逆位相の二つの波が重なり合うと、互いに二つの波は打ち消し合って、引き算の波しか観測されません。例えば二つの波の振幅、つまり強

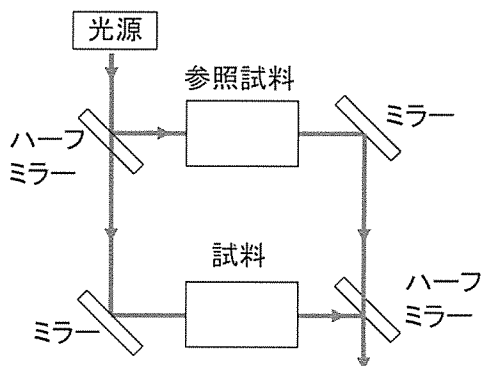


図5 Mach-Zehndar 干渉計の光学配置

度が同じですと、打ち消し合った結果、合成波の振幅は零に成りますから、光は消滅し、真っ暗になります。一つの波についての説明を、ここに描いたような平面波に拡張します。平面波というのは多くの波がそろっていて、各波の山あるいは谷の位置を空間的に繋げると平面になる波のことです。この波は広がらず、何処までも直進します。レーザーの光は発生の仕組み上、平面波になっています。またこの波は空間的コヒーレンスがあると言われます。

さて、図6に示すように二つの平面波がある角度で写真乾板に入射したとします。また平面波の進行方向に垂直な直線は波の山の部分の軌跡だとします。そうすると写真乾板の表面で波の山と山、谷と谷が重なり合った場所、言い換えると光が同位相で写真乾板に入ったところは、感光乳剤が強く反応し現像の結果、黒い銀の析出が認められます。一方、平面波の山と谷、谷と山が重なり合った場所は、感光せず現像すると白く抜けます。従って、このような実験の後、写真乾板を現像すると、図6の写真に示したような縞模様が得られます。この時、実

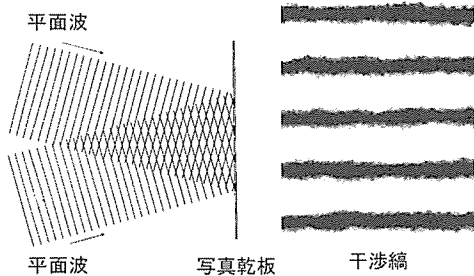


図6 平面波と平面波の作る干渉縞

験試料の中に変化が起きると、そこを通る光の平面波は、光学的ひずみとして、その変化を拾いだします。その結果、この写真に示した平行で等間隔な干渉縞に変化が現れることになります。例えば、試料である電極の近傍を通過した光が参照試料を通過した光と平行で等間隔な干渉縞をつくるように、実験前に光学系を調整しておきます。その状態で電解を開始すると電極近くを通った光は濃度変化により光学的位相差に変化を生ずるため、平行で等間隔な干渉縞に変化が現れるというわけです。これが、実際に干渉縞を利用し濃度変化を検出する仕組みの簡単な説明です。

この方法の問題点は実験試料と参照試料が光学的にほとんど同じでなくてはいけないということです。そうでないと実験開始前に二つの行路を通ってきた光に差が生じて平行で等間隔な干渉縞ではなく、湾曲し間隔の変化した干渉縞になります。ですから約35年前でも、一個30万円くらいする電解セルを二個用意する必要がありました。そんな時、光学機器メーカーの人から、「新しい干渉法がありますよ!」ということを目にしました。1972年頃のことです。今日、出席の方の中にご存知の方もおられると思いますが、ホログラフィック干渉法と呼ばれるものです。ホログラムというのは現在皆さんが使っているDVDやCDへの情報の書き込み、読み出しに利用されています。ホログラフィーは1947年にD. Gaborによって発見された新しい写真技術です<sup>9)</sup>。レーザーのような干渉性の良い光源のなかった時代に、電子顕微鏡像の改良の研究の中で発見し、レーザーが発明された後、1971年にノーベル物理学賞を単独で受賞しています。

その方法を、図7を使って簡単に説明します。上の図

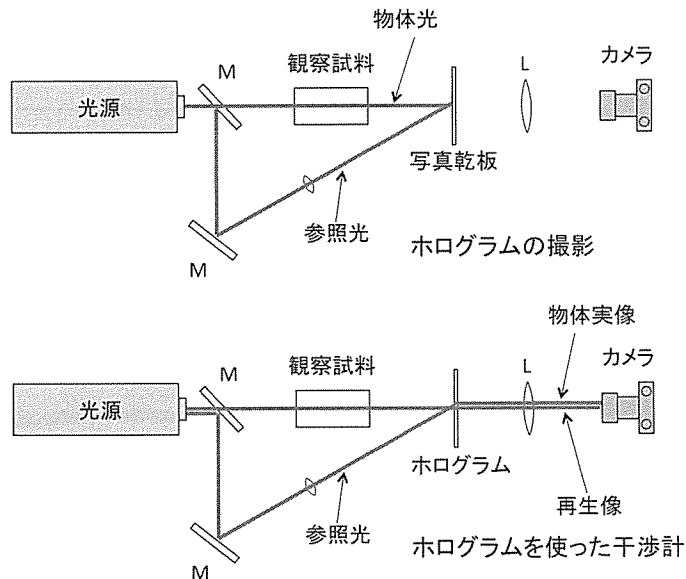


図7 ホログラムの撮影とそれを使った干渉計

の左にあるレーザー光源からでた可干渉な光は観察物に入射し、透過光はそのまま右側に配置した写真乾板に入ります。この時、レンズ系は使用しませんので結像するということはありません。その代わりに光源からの光の一部をハーフ・ミラーで分割し、鏡で反射した後、同じ写真乾板に入射させます。先ほどの観察物を通った光のことを物体光、ハーフ・ミラーで迂回した光を参照光と呼んでいます。このように写真乾板は二つの光で二重に露光されます。この露光した写真乾板を現像したものをホログラムと呼びます。ホログラムの意味は「全てのもの」という意味です。何が「全てのもの」なのかはしばらくしたらおわかりいただけると思います。図7の下の図のようにホログラムを写真乾板ホルダーに戻し、参照光だけをこのホログラムに照射すると、このカメラの位置で観察物の再生像が見えます。つまり、先ほどホログラムを作った時に観察物を通過してきた物体光の再生像が見えるのです。さらに再生像を観察している時、観察物へも物体光を照射し、その実像も同時にカメラに入れると、観察物の再生像と実像が干渉し、カメラのスクリーン上には干渉縞が見えます。

古典的な Mach-Zehndar 干渉計と何が違うのかというと、古典的な干渉計では同一時刻に空間の異なる行路を通過してきた光同士の干渉です。ホログラフィック干渉計はそうではなく、異なる時刻に空間の同じ行路を走ってきた光同士の干渉ということになります。この意味の違いがわかりますか？空間の異なる行路を通った光を干渉させると、二つの行路に実験以外に差があると、実験前からその差が干渉縞に雑音として入ってくるということです。それを避けるため光学的精度の高い、電解セルを準備する必要があり、実験費用がかかるということです。

#### 4. ホログラフィーの原理

それではホログラフィーの原理について簡単に紹介しましょう。これまでの説明でおわかりいただけたように、ホログラムの作成には二つの可干渉な光、つまり物体光と参照光を使用します。観察物の光学情報を運ぶ物体光は写真乾板上で参照光と重ね合わされ、光学情報は大変細かい干渉縞からなるホログラムとしてそこに記録されます。このホログラムに参照光だけを照射するとホログラムを撮影した時刻の物体光が再生されます。再生像はもちろん肉眼で見えることもカメラで撮影することもできます。

それではなぜこのようなことが可能なのでしょうか？皆さんは高等学校の物理で教わったように、二つの平面波がある角度をなして重なり合うと、例えば写真乾板に入射すると、現像後の乾板の上に、先ほど図6で示した

平行で等間隔な干渉縞を得ます。別の表現をすると格子縞ができます。一方、この格子縞に、この格子縞を作ったときの参照光を照射すると、通過する光以外に、この格子縞は対称的な方向に、二つの回折波を作ります。実はこの回折波の一方は格子縞を作る時に用いた平面波である物体光と同じ物です（図8参照）。

これは何をしているのかというと、物体光という平面波が参照光という平面波と重ね合わされることにより、参照光が物体光によって変調されて写真乾板上に記録されているということです。例えば周波数 1114 kHz の KBS ラジオ放送というのはこの周波数を搬送波に使った放送のことです。つまり、ここで言う参照光の周波数のことです。それに音声信号をのせると搬送波は変調されます。普通、変調されるのは搬送波の振幅で、周波数が変調される方法もあります。皆さんはそれぞれ AM 放送、FM 放送ということでご存知だと思います。このようにして変調された搬送波を皆さんはラジオ受信機で同調して、変調を解除し、フィルターをつかって音声信号だけを取り出してスピーカーで音を再生しているわけです。それと同じで、ホログラムというのは物体光が持っている光学情報、この場合は単純な平面波情報ですが、これが搬送波に相当する参照光を変調します。その結果を写真乾板の銀塩の上に記録・固定する訳です。ですから、そこに平面波を入れてやると、変調が解かれて、最初の音声信号に相当する平面波が再生します。1970年代にはこのような方法でホログラムの記録・再生を行っていますが、現在では写真乾板の代わりに光感応素子であるホトマルを使って情報を集積し、再生には電子計算機処理を行っているようです。つまりデジタル処理です。

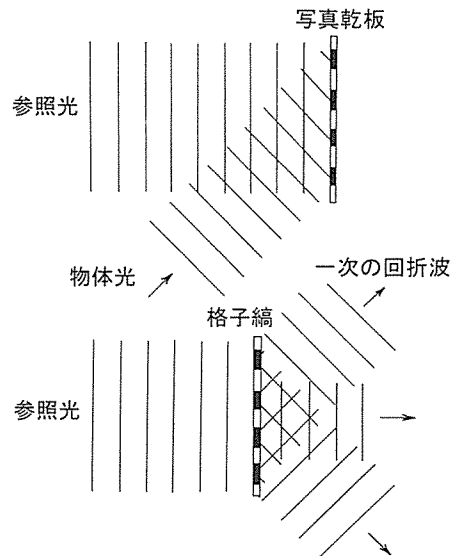


図8 平面波のホログラム

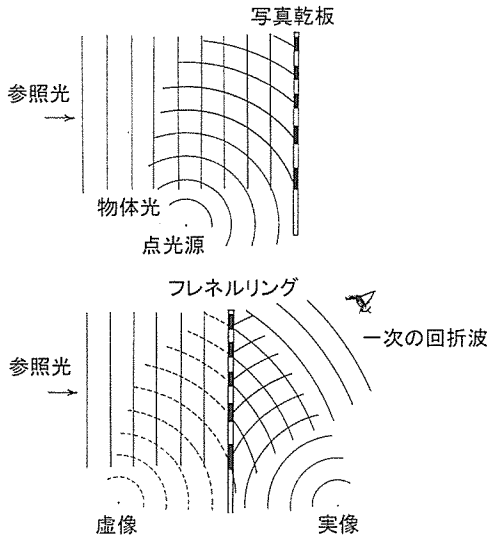


図9 球面波のホログラム

その意味では昔の方法はアナログ処理に相当します。

まとめますと物体からやってくる光情報は参照光の変調という形で写真乾板に記録され、参照光を照射して再生されるということです。この状況はラジオ放送や受信・音声再生と同じであると言えます。

簡単のため物体光を平面波でお話ししましたが、これを球面波に置き換えると図9のようになります。球面波というのは空間の一点から四方八方へと広がる波で、ある特定の波の山の包絡面を描くと球面になるものです。次々の波の山を描くと同心球になります。このような球面波と参照光を一緒に写真乾板に入射し、参照光を変調して記録すると、今度は平行で等間隔な格子縞ではなく、フレネルリングと呼ばれる同心円の縞模様が記録されます。皆さんの中には平板レンズとして世の中に出回っているフレネルレンズをご存知の方も多いと思います。レンズというと真ん中が周辺より厚みのあるガラスを想像しますが、このフレネルレンズは薄い平板です。普通のレンズはガラスの屈折率と厚みを利用して光を集光するデバイスですが、フレネルレンズは同心円の縞模様の作る回折効果を利用した集光デバイスです。従って、平面波と球面波を写真乾板に入射した後、現像して作成したホログラムに、参照光である平面波を入射すると、フレネルリングからなるホログラムから二つの回折波が生じます。それらは互いに曲率は同じですが符号の違う球面波です。一方は元々の実像球面波の光源の位置と写真乾板に関して対称な位置に収束する球面波で、これはその位置にタバコの煙の入った透明な箱を設けると、その中の輝点として観測できます。他方は曲率の符号が逆で空間に発散していくような球面波で、これはホログラムの

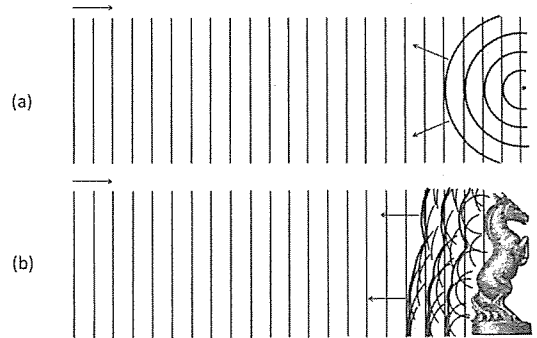


図10 平面波による点および三次元物体からの反射波面

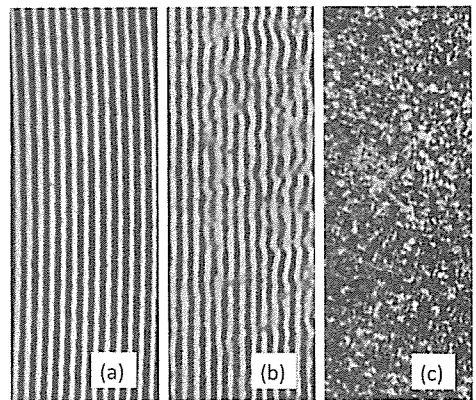


図11 ホログラムを構成する干渉縞

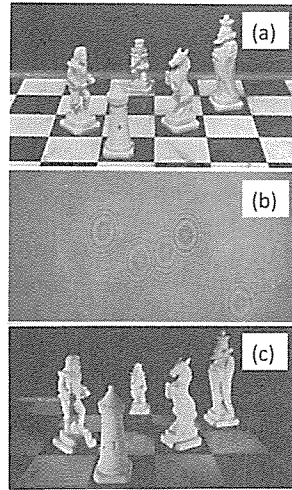
作成時に点光源から発散していった、球面波の再生波に相当します。皆さんがホログラムの光源と反対側からこれを観測すると、ホログラムの向こう側に球面波の点光源として観測できます。このようにして点光源から発散していく球面波も同様に記録・再生できることがわかります。

そうすると実際の物体はどうなるのかというと、この話の延長線上にあります。図10に示すように平面波をある点状の小さな物体に当てると、そこからの反射波は球面波となって伝搬していきます。物体が三次元の形状を持つ複雑な物だと、表面の各点、各点が点状の小さな物体として働き、平面波の照射に対して、各点各点が球面波を伝搬させますので、ホイヘンスの原理によれば、そのような物体からの反射波は無数の球面波の包絡面に成ります。ですから三次元物体表面の各点各点からの球面波が、それぞれ独立に参照光である平面波を変調して写真乾板に記録されることに成ります。従ってそのときのホログラムには大変複雑で、細かい干渉縞の形で三次元物体からの光学情報が閉じ込められていることとなります。図11に示すように、平面波同士でホログラムを作る





ホログラム撮影に使用される光学系



(a) 被写体 (b) ホログラム (c) ホログラムによる再生像

図12 ホログラムの撮影と再生ホログラム撮影に使用される光学系

と、(a)の写真のようにそれは簡単な格子縞のような干渉縞になりますし、物体光が少し歪んでいると(b)のようにホログラムは少し複雑になり、三次元物体表面からの反射光の場合には、(c)のように干渉縞の連続性もなくなり大変複雑な形のホログラムになります<sup>9)</sup>。

それでは実際に三次元物体のホログラムの作成法と再生法、また再生像の特徴について話を進めたいと思います。図12は40年ほど前に出版された本から引用した写真です<sup>9)</sup>。当時、レーザーが世の中で市民権を得たところで、米国で出版されていた雑誌 Scientific American に掲載されていた、レーザー関係の読み物を、翻訳した本<sup>9)</sup>に収録されていた写真を使って話を進めます。西洋のチェス盤の上におかれた駒に、レーザー光源と鏡を使って光を照射します。反射光は写真乾板に結像されることなく入射します。ここでは二つの方向からチェスの駒を照らす方法を採用しています。一方、同じ光源の光をハーフ・ミラーで一部分割し参照光として直接、写真乾板に入射させます。その後乾板を現像するとホログラムが出来あがります。図12の右側の真ん中に示したのがホログラムの写真です。レンズ系を使用して結像しませんので、ホログラムは灰色がかかったシミと同心円の模様のある乾板です。顕微鏡で拡大しても同じような状態です。上に示した写真は被写体のチェスの駒を普通のカメラで撮影した写真です。一方、このホログラムを再生して得られる再生像をカメラで撮影したのが下の写真です。再生時にはホログラムを写真乾板の位置に戻し、参照光のみを照射します。そうして後方からホログラムを覗くと、再生像を見ることができると、このように写真に撮ること

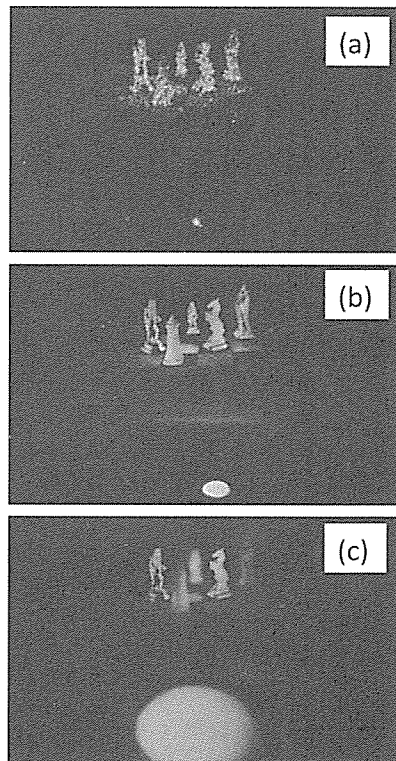


図13 ホログラムの再生像の解像度

もできます。

ホログラムによる再生像の特徴を、図13を使って、説明します。例えば4cm x 6cm くらいの大サイズの写真乾板で作製したホログラムに、直径1mm ぐらいの細い

レーザー・ビームを照射しても (a) の写真のように再生像は得られます。ただ、解像力に欠けるだけです。情報量が少なければこれで十分なこともあるでしょう。少し大きなホログラムの面積を照射すると、(b) の写真のように少し解像度が高い像が再生されます。さらに、照射面積を大きくすると、(c) のように解像度のさらに高い

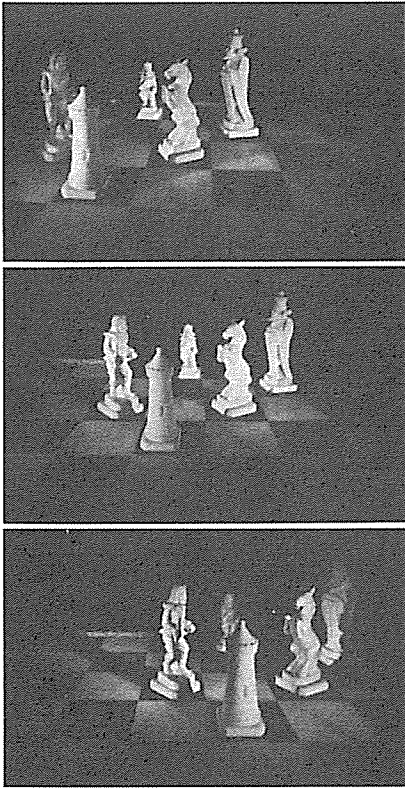


図14 再生像の持つ視差

像、より情報量の多い像が再生されます。この図の写真を見ると「本当に解像度が高いのですか？」と質問されそうです。しかし、この写真は五つの駒のなかで、真ん中の二つの駒に焦点を合わせて撮影したもので、この写真の手前の駒に焦点を合わせて撮影することも、一番奥に配置された二つの駒に焦点を合わせて撮影することも可能です。すなわちチェスの駒から発せられる光の位相情報も記録・生成できるという意味で情報量が多いと申し上げているわけです。また、ホログラムの小さな領域の光照射でも全体像が再生できるということは、乾板が破壊されたとしても、僅かな小片から情報を再生できることを意味しています。この特徴が機密書類の保管に最適であると、ホログラムの開発当初いわれたものです。

もう一つの特徴について話しますと、一つのホログラムに対して、次の三つの操作；(a) ホログラムの位置を少し動かす、(b) 撮影カメラの位置を動かす、(c) 参照光の方向を少し動かす、のどれかをやると、再生像が三次元像の特徴である視差を示すことがわかります。図14の写真はホログラムの面積で許される限りの異なる位置から再生像を撮影した結果を示しています。同じ効果は参照光の照射方向を変えても得られます。

### 5. ホログラフィック干渉計を組上げるまでの実験的工夫

このようにホログラムを使うと観測物体、私の場合ですと電気分解におけるカソード近傍の電解質水溶液であり、透明体なのですが、その透明体の光学情報を写真乾板の上に記録できるし、任意の時間に再生できることがわかります。それではこの手段を使ってどのようにしてカソード近傍の濃度境界層の観測を行ったかについて説明します。図15は私が作り上げたホログラフィック干渉

### 光学定盤 徐振台 砂箱、タイヤ、ゴム板

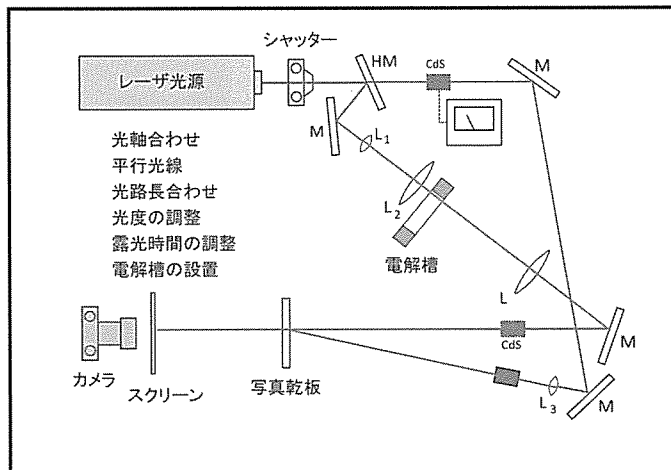


図15 ホログラフィック干渉計の光学配置

計の漫画絵です。光源からのレーザー光をハーフ・ミラーで二つにわけ、一方はレンズ系で拡大し電解槽のカソード近くを通過させます。この透過光は鏡で反射させた後写真乾板に入射させます。一方の光は参照光として使用しますので、電解槽の配置された行路とは関係なく、鏡で方向を変えるだけで、同じ乾板に入り、先ほどからの話のように、写真乾板を現像するとホログラムができます。

### 5.1 光軸合わせ

光学定盤の上に配置された光学素子の漫画絵を描くのは簡単ですが、実際にこれを実現するのは難しいものです。それにはいくつかの点に注意を払う必要があります。例えば光軸合わせです。光源から出てくるレーザー・ビームの直径は当時 1 mm か 1.5 mm です。それを正確にレンズの真ん中を、しかもレンズ面に垂直に通過させるように調整する必要があります。図15に示した光学配置では、顕微鏡の対物レンズを使用して、レーザー・ビームを一度絞ってから、別のレンズで拡大した平行光線束にしてカソード近くの電解液に通過させました。このような平行光線束をどのようにして作るのか？ということです。使用した顕微鏡の先玉、つまり対物レンズの直径は高々 5 mm 程度です。さらに複数個のレンズが使用されています。このようなレンズの中心を光がレンズ面に垂直に通過したかどうかをどのように確認するのか？ということが問題になります。光線が中心を外れると光は折れ曲がります。レンズ面に斜めに入ると、透過光は斜めに出て行きます。このような時にどうするかは参考書に直接は書いていない。ところが皆さんは習っているんですネ！顕微鏡の対物レンズの光源側にピン・ホールのあるスクリーンを配置し、そこを通過した光を顕微鏡の対物レンズに入れると、レーザーは大変干渉性の良い光なのでレンズの表面・裏面から反射した光がスクリーンの上にニュートン・リングを作ります。レーザー・ビームがレンズの中心にレンズ面に垂直に入った場合には、このようなニュートン・リングはピン・ホールを中心に同心円状に生じます。このような判定基準で調べると、顕微鏡の対物レンズは複数枚あり、それらが上に述べたような意味での光学精度を持つようには組み立てられていないことがわかりました。従って、私の実験では、顕微鏡の対物レンズを装着している部分の微動ネジを使ってレンズのアオリ・ネジレ・高さを調節し、ニュートン・リングがスクリーンのピン・ホールを中心にできるだけ同心円にくるように、顕微鏡の対物レンズを自分の光学定盤の上に配置・設定しました。次に、いったん絞った光を使ってレンズで平行光線束を作る必要があります。私はタバコが好きで、タバコの煙をこの辺りに吐くと、レーザーの光がきれいに絞られ、そのあと広がって

いる様子を肉眼で見ることができます。使用する大きいレンズの焦点距離はわかっていますから、光軸をそろえた後、物差しを使ってレンズを光が絞られた位置の後方、焦点距離だけはなれた位置に固定すれば良いことはわかります。問題はそれで平行光線が獲得できたかどうかを確認することです。鏡を使用してその光線が約 5 m 走った後にも、光線束の直径がほとんど変わらないことを、スクリーンに投影して確認しました。このように自分で確認することが大切なことです。このことに大した理屈がある訳ではありませんが、学会で調整方法について疑問を投げかけられても、「5 m くらい光が走って光線束の直径が変化しない程度であれば、私の使用するカソード幅は約 5 mm ですから、その幅を走る間は平行光線と見なしてよいと考えました」と返答するつもりでした。最近は測定装置が良くなっていますが、学生さんや若い研究者の皆さんが、自分で確認して、自分なりに理解して実験を行うことが大切であると言いたくて、この話をしています。

### 5.2 物体光と参照光の光学行路長合わせと光度比の調整

次にホログラムの作成時に、光源と写真乾板までの物体光と参照光の光学行路長をほぼ同じにする必要があります。なぜならホログラムは物体光と参照光の作る細かい干渉縞で構成されます。これは電解槽のカソード近傍の濃度変化を測定するための干渉縞のことを言っているわけではありません。物体光により参照光が変調されることを言っているのです。ホログラムを構成している微細干渉縞をこの写真乾板で記録しなくてはいけないのです。その時、光源にレーザーを使用している場合、分割後の物体光と参照光の写真乾板までの幾何学的長さが大きく異なると干渉性が失われるということです。これは二つの行路の光学行路長の差に依存します。私の使用していた当時の出力 10 mW の He-Ne ガス・レーザーの場合、5 cm 以内でそれらの長さをそろえる必要がありました。これはレーザーの時間的コヒーレンシーに関係しており、質の良いレーザー光源なら光学行路差はもっと大きくてもかまいません。

さらに物体光と参照光の強度比の調整も必要です。ラジオ放送の搬送波に相当する参照光の強度は、信号波に相当する物体光より強くなくてはなりません。従って、どんな強度比で良いホログラムができるのかは自分で決めなくてはなりません。そのためには光度計が必要ですが、当時買えば30万円くらいはします。そんなお金がなければ作るより仕方ありません。そこで、硫化カドミウムの受光素子を手に入れ自作しました。光が当たると電気抵抗が変化するこの素子を京呉服の反物を巻く紙の筒の端に固定し、その素子の端子間に乾電池で電圧をか

け、回路の電流を測る簡単な装置を作りました。一方、会社から一日だけ光度計を貸していただいて、それを使って自作の硫化カドミウム光度計を較正する訳です。これで自分の実験には十分使えました。次に必要なことは、ホログラム作成時の物体光と参照光の写真乾板への露光時間の調整です。ホログラムは細かい干渉縞で構成されているので、それを記録するには ASA 感度 100 あるいは 400 程度の写真乾板を使用できません。もっと感度の低い、言い換えれば解像力の大きな写真乾板が必要です。ASA が 1 以下のドイツのアグファ-ゲバルト社製の乾板を使用しました。その場合、露出時間は 1 秒以上になります。そこで古いカメラのレンズを砕き、ボデーの後ろに穴をあけ、シャッター機構だけを利用して露出時間の制御をすることにしました。

### 5.3 除振台の準備と電解電源装置の自作

レンズ、鏡などの光学素子はすべて光学定盤上に配置しますが、先ほどのホログラム撮影時の露出時間からわかるように、これらすべては除振台の上に設置する必要があります。当時、実験台の四隅に除振用の空気バネを購入するには 400 万円程度の費用がかかりました。従って、これもなんとか自作するよりしかたありません。図 15 にも描いているように、砂箱、ゴムタイヤ、ゴム板を用いてできるだけの工夫をしました。二個の鉄製の箱に砂を充填し、砂の上にレンガを二つずつおきます。自動車の車体のように H 型をした鉄製の土台の四つの端に一輪車のゴムタイヤを一個ずつ取り付け、砂の上の四つのレンガの上に置きます。さらに、四つのタイヤの上に、鉄製アングルで作った実験台を置き、その上面にゴム板、鉄板、ゴム板、鉄板、・・・を三重に重ね、最後に光学定盤を置きました。これで除振は大丈夫かどうかですが、それは自分で決めるのです！自分の実験目的に合えば十分なのです。他人が保証してくれるものではないのです。私の場合はこれでホログラムを撮影できたので、十分だったと思っています。ちなみに、実験中にそばで大きく足踏みをすると、後に示す濃度境界層の干渉縞が揺れるのは観察できます。従って、大きな足踏みをするとだめなことは良くわかりました。しかし人が歩くくらいの振動は除去できることは確認しました。でもこれは後でわかることです。ですから自分でできることはすべてやって、あとはそれが実験の目的に合うかどうかということです。ですから沢山のお金で購入した装置が必ずしも良い訳ではないのです。その時に教えてもらったような気がします。

このような調整が終わると、電解槽をこの定盤上の所定の位置にセットします。電解槽は高さ 10 cm、横幅 12 cm、厚み 5 mm の矩形ガラス容器です (図 22 参照)。この中で電気分解をしながらカソード近傍の濃度境界層

を観測するわけです。昭和 45 年頃の冶金学教室には電気分解をするためのポテンシヨ-ガルバノ-スタットが一台しかなく、しかも真空管方式の応答速度の遅いものでした。そこで友達に電気回路を教わり、自分でポテンシヨ-スタットを自作しました。アルミのシャーシ、オペアンプ、変圧器、トランジスタ、ダイオード、コンデンサー、・・・を京都市四条寺町下ルにあったヒエン堂や、あるいは東京都秋葉原の専門店に手紙を出して、部品を集め、あれやこれやで出力電流の違う装置を 5 台くらい作製して電気分解の実験に使いました。

## 6. ホログラフィック干渉計の操作と試運転

### 6.1 ホログラフィック干渉計の操作

これで実験の道具立ては全ておわかりいただきましたが、それではどのように実験を行ったのかということですが、図 16 からわかるように光源から出たレーザー・ビームはハーフ・ミラー HM と鏡 M で反射され、レンズ  $L_1$  と  $L_2$  で直径約 6 cm の平行光線束になり、電解槽カソード近傍を通過した後、鏡で反射され、物体光 (信号波) として写真乾板に入射します。同時にレーザー・ビームの一部は、このハーフ・ミラー HM を透過し、鏡で反射されて方向を変えた後、レンズ  $L_3$  で発散光 (搬送波) となり参照光として同じ写真乾板に入射します。この時、参照光の行路に挿入した偏光板を使ってその光度を調節し、参照光と物体光の強度比を所定の値に調節しました。このようにして露光した写真乾板を現像し、それを乾板ホルダーの同じ位置に戻します。その状態で、参照光だけをこのホログラムに入射すると、ホログラムを撮影した時の電極近傍を通過してきた物体光 (信号波) が再生されます。その様子はカメラのファインダーを通して観測できるし、撮影もできます。それと同時に、電解槽のカソード近傍に光を通し、現在の物体光 (信号波)

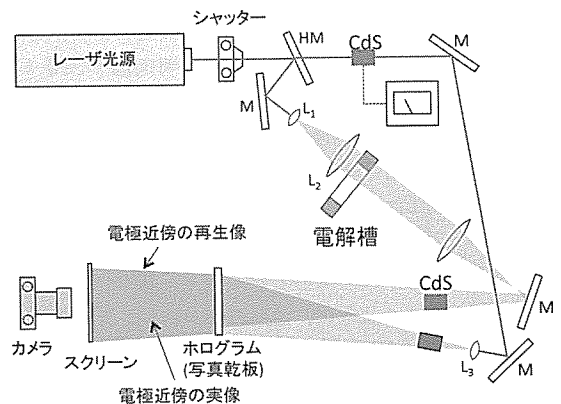


図 16 ホログラフィック干渉計による濃度境界層の観察

をそのまま、鏡で反射させ、ホログラムを通過させスクリーンに入射すると、この電極近傍の実像と、ホログラムによる再生像が干渉し、カメラのファインダーには垂直なカソードの陰と電解液のある領域に干渉縞が見えます。つまり、時刻は異なるが、空間の同じ場所を通ってきた光同士の干渉の観察が可能であることがわかります。

時刻の異なるカソード近傍の実像と再生像が全くずれなく重なり合うと干渉縞はできません、電解液の部分は全面真っ白かあるいは真っ黒になります。しかし、ホログラムを撮影時と同じ位置に正確に戻すことは不可能ですから、再生像と実像は若干ずれ、ネジレあるいはアオリの位置にありますので、何らかの干渉縞が電解液の領域に観察されます。図24の左側の写真に示したような平行で等間隔な干渉縞は偶然にはできませんが、光学系のレンズ  $L_3$  の微動ネジを使って、参照光のアオリ、ネジレ等を少し変更することにより、干渉縞の水平となす角度や干渉縞の間隔等をかなり自在に調節可能です。水平で等間隔な干渉縞は電解前の電解槽内の至る所で組成が均一なことを示す特徴的なもので、電解を開始してカソード近傍の硫酸銅濃度に変化が起ると、干渉縞にそれに対応する変化が起きることになります。

### 6.2 ホログラフィック干渉計の試運転

この実験の次の目標は厚さ  $500\mu\text{m}$  くらいの薄い境界層内の濃度変化の定量が可能かどうかということです。そこで、もう少し空間解像度が低くても良い実験で自信をつける為の試運転をすることにしました。つまり  $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$  の領域ではなく  $50\text{mm} \times 50\text{mm}$  程度の領域に生じた濃度変化を定量できるかどうかということです。この試験に選んだのが「モアレ法による拡散係数の測定」実験です。装置の概要を図17に示しました<sup>9)</sup>。光源からの光、この場合は  $1\text{mW}$  の He-Ne ガス・レーザ

ーから直径  $60\text{mm}$  程度の平行光線束をつくり、それを両側面にガラス窓のついた恒温水槽中に懸垂した拡散セル中に入射し、濃度変化に基づく光学情報を持った透過光を後方で写真撮影し、そこから拡散係数を決定する方法です。この時、恒温水槽の側面のガラス窓の前にはガラス板表面に密度  $100\text{本/インチ}$  のカーボン線を引いた格子を、互いに少しねじって配置しておきます。カーボン線の間隔は  $250\mu\text{m}$  に成ります。この二つの格子縞が小さい角度で振じれていると、その二つの格子縞のレーザー光による陰は、図17の中の写真に示すように、いわゆるモアレ模様を作ります。縦方向に見える畳の目のような模様は二つの格子縞の交点の軌跡に相当します。私は歩くことが好きで、大学から祇園町を歩いて京阪七条駅まで歩きますが、祇園新橋や宮川町の置屋の軒先に吊るされた日よけの簾が重なる時、同じモアレ模様が見られます。一度試してください。この状態で、拡散セル中で拡散が始まると、縦方向に濃度の不均一な領域ができ、つまり屈折率の変化した領域ができ、そこへ光が入ってくることになります。光は一般に屈折率の大きな領域へ曲がろうとする性質があります。従って、モアレ模様の実験では光源側の格子縞の陰の間隔が等間隔でなく、拡散のない時に比べて、その位置を偏倚させることになります。図18に示したモアレ模様は拡散実験中に観測したものです。

この実験で使用した拡散セルは厚さ  $6\text{mm}$ 、幅  $40\text{mm}$ 、高さ  $60\text{mm}$  の矩形ガラス製容器で、セル中央部に垂直方向に階段状濃度プロファイルを作り、拡散実験を開始させます。そのような初期条件は次のようにして準備します。最初拡散セルの半分の高さまで、例えば水で満たします。一方、右側の液溜めには所定濃度の硫酸銅水溶液を入れます。拡散セルと液溜めの間は、下部

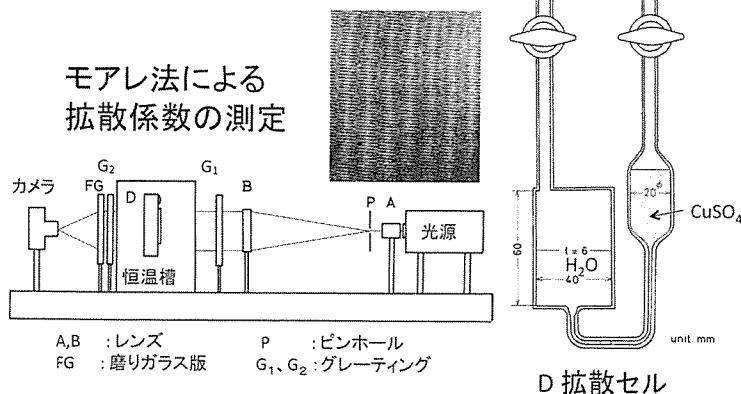


図 17 モアレ法による拡散係数測定装置と拡散セル

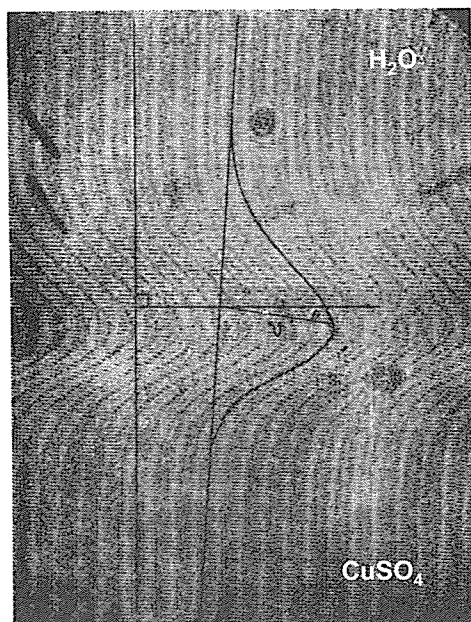


図 18 拡散実験中のモアレ模様

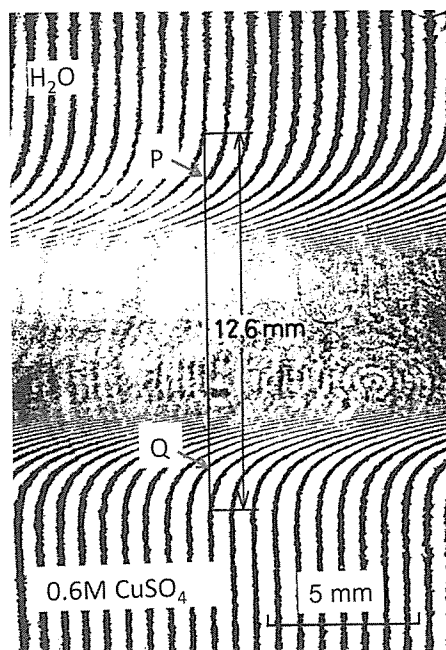


図 20 拡散セル内の干渉縞

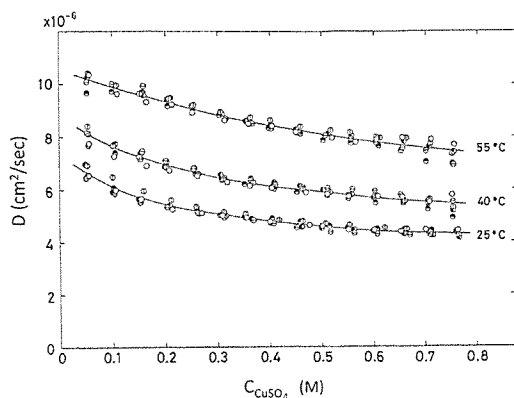


図 19 硫酸銅水溶液中の硫酸銅の拡散係数

で毛細管により連結されていますが、操作上そこに小さな気泡が必ず紛れ込み、これが二液の接触を妨げてくれます。このような状況で上方にある二つのガラス栓を開放すると、右側の硫酸銅水溶液が静水圧差により左の拡散セル底部から侵入し、拡散セルの中央に階段状の濃度プロファイルを形成します。その時、拡散セルの中央部にはキラキラと輝く硫酸銅水溶液と水の界面が観測され、見事な階段状濃度プロファイルができたように感じます。要するに、界面近傍では屈折率が急激に変化している、言い換えると屈折率勾配が大変大きいということです。これで拡散は開始しているわけですから、この拡散セルを慎重に恒温水槽中に静置し、30,000秒から

60,000秒の拡散実験を行ない、適時モアレ模様の変化を撮影します。モアレ模様の解析については詳しく申し上げますが、図18に示したように拡散実験中のモアレ模様は濃度変化のない領域の縦の直線から、濃度変化のある領域に入ると直線からずれ始め、最大のずれを示した後、ずれ量を減少させ、再び濃度変化のない領域に入ると元の縦の直線の延長上に戻ります。この写真には、モアレ模様を作っている、密度100本/インチのカーボン線の影が見えていますが、全てのカーボン線に沿ってモアレ模様のずれ量を読み取ります。その結果を計算機処理して、拡散セルの中の拡散溶質の濃度プロファイルを計算します。この実験では階段状の濃度プロファイルを初期条件とする非定常拡散方程式に基づいて、それぞれの拡散時刻の濃度プロファイルを説明できるように、溶質の拡散係数を決定します。図19は硫酸銅水溶液における拡散係数の温度依存性を示したものです<sup>9)</sup>。各温度について幾つかの拡散時刻のモアレ模様から計算した拡散係数が異なる記号で示してあります。本来ならどの拡散時刻のモアレ模様から計算した拡散係数も同じでなくてはなりません。データのバラツキは許容できますが、偏りはだめです。

この図は上手くいった実験結果ですから、拡散時刻の異なる結果に偏りはありません。しかし、この実験を開始した頃には、結果に偏りがありました。何が起きているのかというと、一番考えなくちゃいけないのは、拡散実験開始時の階段状の濃度プロファイル、いわゆる初

期条件が上手く実現していないことが考えられます。そこで、皆さんも良く知っている方法でそれを調べました。図20は拡散開始後4,800秒経過した時点の拡散セルの中央部を、自分で作ったホログラフィック干渉計で観測したものです。拡散セルは干渉実験のために作成されたものではありませんが、セルの縦方向に走る等間隔の干渉縞を容易に作ることができました。干渉計は一般にモアレ模様より解像度が良いため、濃度勾配のある領域の干渉縞の密度が高く、一本一本の変化がわからなくなっていますが、モアレ模様は感度が悪いので全ての領域で、その変化を観測できました。しかし、ここで知りたいのは、濃度プロファイルのある領域内の一定濃度差のある二点間の距離が時間とともにどのように変化していくかということです。その為には、例えば、図20において上の干渉縞が縞一本分偏倚する位置 P と下の干渉縞が同じシフトをする位置 Q の間隔 PQ の時間変化を調べることで、つまり上の位置は干渉縞一本分に相当するだけ水より屈折率の高い水溶液、ある濃度の硫酸銅水溶液の位置ということです。下の位置は干渉一本分に相当するだけ0.6M  $\text{CuSO}_4$  水溶液より濃度の低い所に相当します。一方、皆さんは拡散の講義で、「拡散過程における一定濃度の間隔は拡散時刻の平方根に比例する」と教わりますよネ。あるいは「拡散距離と拡散時間の平方根との比に相当する、新しい変数；ボルツマン定数を導入すると、偏微分方程式である Fick の第2法則が常微分方程式に変換できる」ことを知っていますよネ。このことをチェックする訳です。つまり、拡散実験中のいくつかの時刻で得られる、図20に示された間隔 PQ を、それぞれの拡散時刻の平方根に対してプロットします。そして得られる直線が原点を通過するかどうかを調べます。その結果、直線の横軸の切片は-5,000秒から-6,000秒の間の値に成りました。これは拡散セルのガラス栓を開放し、二液の界面ができた時が拡散開始時刻と思っていたのですが、それより一時間以上前に拡散が始まっていることを示しています。すなわち実験開始時に何らかの混合があったということです。これでは実験として都合が悪いので、拡散セルの上のガラス栓の先に長さ約500mm、内径0.3mmの毛細管を接続して、空気の流れに抵抗をつけ、二液の界面生成をゆっくりと行わせるようにしました。

このような手段で界面作成が上手くできているかどうか、図21に示すように、拡散セル全体を同じホログラフィック干渉計で観測して調べました。図の一番上の写真は水面に黒い半月が観測されることから、水と硫酸銅水溶液の接触開始時であることがわかります。これは実験開始前に二液の接触を妨げていた毛細管内の小さな気泡が、拡散セルの水の中を通り抜け水面に到達し、まさ

### 拡散実験開始直後

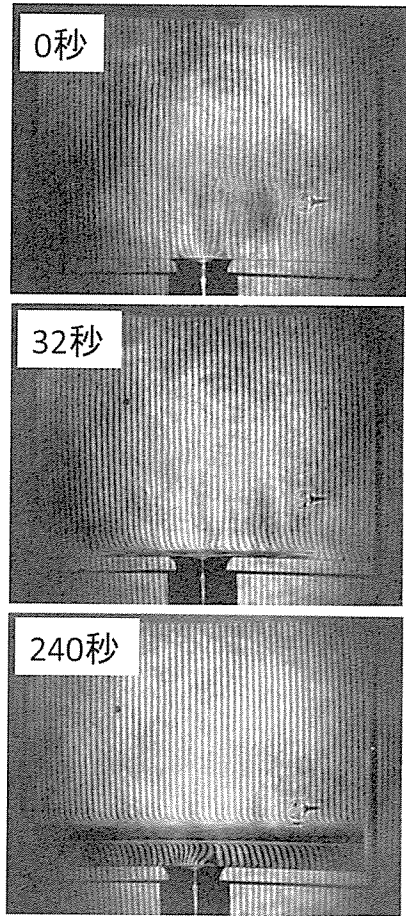


図21 拡散実験開始直後の拡散セルのホログラフィック干渉計による観察

に破裂して消滅する直前の状態が撮影されています。32秒経過した真ん中の写真から、硫酸銅水溶液が拡散セルの底部から左右に広がるように侵入してくるようすがわかります。上に述べた毛細管抵抗をつけないと、水で満たされた拡散セルへ硫酸銅水溶液が噴水のように侵入します。240秒経過後には、ある幅の濃度プロファイルの領域ができ、拡散が開始していることが確認できます。このような状況で高さ約60mmの拡散セルの中央部に濃度プロファイルを作るのに約20分かかりました。さらに実験終了後、先ほどお話しした拡散距離と拡散時刻の平方根のプロットから横軸の切片を調べると、拡散開始時刻は-300秒程度になり、対策をとる前と比べると大幅に減少しました。この程度の実験開始時刻のずれは30,000秒から60,000秒の拡散実験においては無視してよいだろうということで、実験を進めました。その結果、異なる拡散時刻のモアレ模様からもバラツキはありますが偏りのない拡散係数の濃度依存性を示す結果が得られ

ました。このように、少し大きめの領域で起こる拡散実験の予備実験でホログラフィック干渉計の試運転を行い、ある程度の自信を得て、私の本実験である電解中のカソード近傍の濃度変化の定量に進みました。

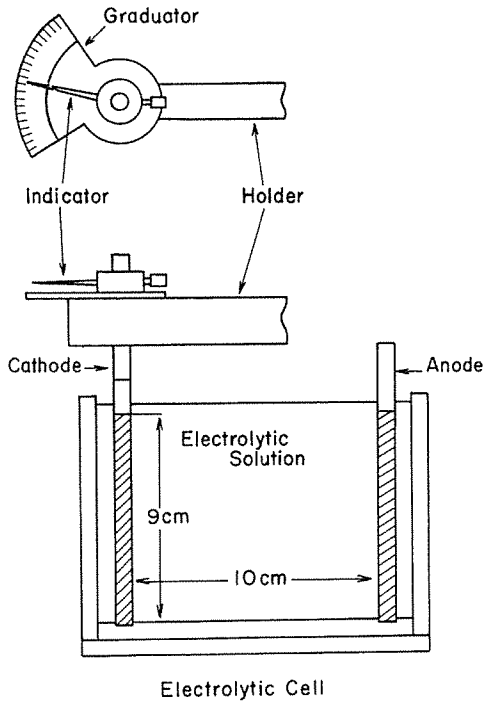


図 22 ガラス製矩形電解層と電極回転機構

### 7. カソード近傍の濃度分布の定量と光学的ひずみの補正

図22は先ほど説明したガラス製矩形電解槽です。左側の電極の上部には電極を、垂直軸の周りに、回転できる工夫が施されています。これはあらかじめ予測していた危惧を解消するためのものです。私の実験目標はレーザーの平行光線束を電極表面に平行に通過させ、そのときの光の位相変化を検出することです。「光を電極面に平行に通過させる」ことを実験的にどのように保証するのか？ということです。この問題がまだ残っているのです。そこで次のようなことを考えました。図23の左側の写真は、図16のカメラの位置で撮影した電極近傍の像で、電極は黒い陰、シルエットとして判別できます。一番上の写真1は電極の光源側のエッジの陰に焦点を合わせたもので、電極を少し回転して、そのような位置に設定したものです。電極を逆方向に少し回転し、カメラ側のエッジの陰に焦点が合うように設定することも可能で、それは一番下の写真10に相当します。ここにある写真2~9は二つの状態の間で撮影したものです。電極の回転位置は電極上部に配置した分度器と木綿針で読み取ることができます。またそれぞれの写真の電極エッジの陰の位置は、各写真の上部に写っているスケールの特定の位置を基準にして、そこからの距離を読み取ることにより決まります。この結果をプロットしたのが右のグラフです。このグラフから「電極の陰が最も後退した回転位置にあるとき、平行光線束が電極表面に平行に通過した」と納得できます。この図においては角度8°くらいの時に、

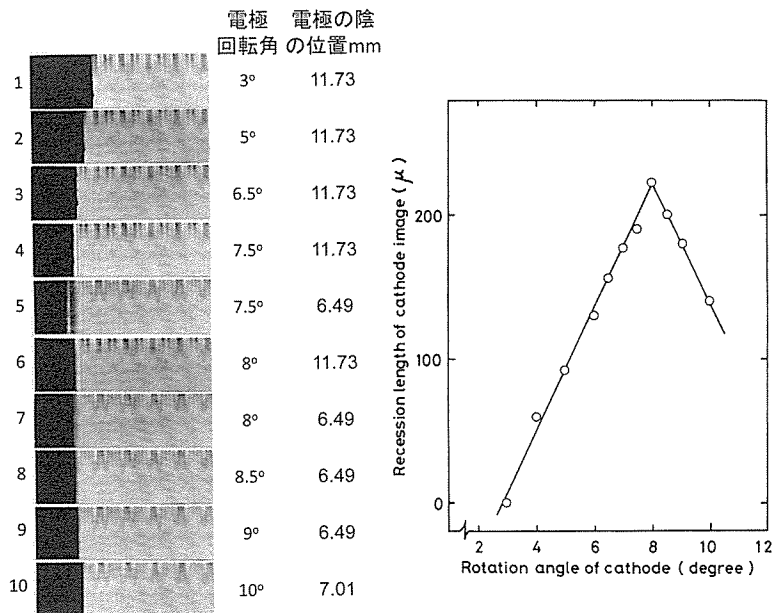


図 23 カソード回転角とカソード・シルエット位置の関係



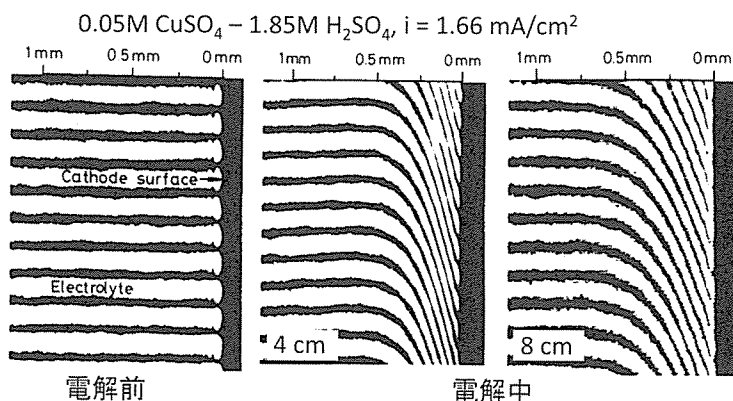


図24 ホログラフィック干渉計により観察したカソード濃度境界層

平行光線は電極面に平行に入射していると判断できません。一度この状態がわかると、そのときの電極表面の陰は特徴的ですから、以後の実験では容易にこの状態を再現できます。

以上のように実験装置の調整や試験運転を終えると、実際の電解実験を行うこととなります。図24は電解中のカソード近傍の干渉縞の写真です。左の写真は電解前のカソード表面に垂直で平行等間隔な干渉縞を示しています。電解を開始しカソード近傍の硫酸銅濃度が減少する結果、溶液の屈折率が変化します。すると、カソード近傍の実像に位相変化が生じ、干渉条件が電解前と変化するため、このように干渉縞が湾曲します。電解開始後約3分を経過すると、カソード近傍の流体力学的境界層もほぼ定常状態に到達し、濃度境界層も定常になりますので、干渉縞の変化も停止します。

図24の真ん中の写真はカソード下端から4cmの位置で観測した結果です。干渉縞の湾曲は濃度プロファイルに相当しますから、濃度境界層厚さは500μm以下であることがわかります。右の写真は8cmの位置のもので、二つの写真の干渉縞の湾曲を比較するとカソード下端からの距離が増すほど、つまり自然対流の下流ほど濃度プロファイルの生じる拡散層厚さが増すことが容易にわかります。

この干渉縞の曲がりを解析すると、拡散層内の濃度プロファイルを求めることができます。その原理を簡単に説明します。図24の右の写真に示すように、一本の干渉縞に沿って溶液沖合からカソード表面に向かって水平に移動すると、白いところを通過して次の黒いところ、つまり一本上から曲がってきた干渉縞に出くわします。さらにカソード表面へ向かって水平に移動すると、同じように白いところと黒いところを交互に通過します。この時、一本の黒い干渉縞と次の黒い干渉縞の位置は何か違

うのかというと、それらの位置の間には使用している光の一波長に相当する光学行路差があるということです。次の黒い干渉縞との間には二波長分の光学行路差があります。このことを干渉条件として表現すると次式の通りです；

$$\frac{(n^*-n)d}{\lambda} = N$$

ここで、 $d$ は光が通過する方向のカソードの幅で本実験の場合0.47cm、 $\lambda$ は使用したHe-Neガス・レーザーの波長で632.8nm、また $n^*$ は電解質水溶液本体の屈折率です。これはアッペの屈折率計を用いて測定できます。従って、境界層中のある位置の屈折率 $n$ は、その位置が電解液本体から干渉縞を何本隔てたところかを示す $N$ の値を上式の代入すれば分かるということです。別の実験で、電解質水溶液の濃度と屈折率の関係を測定しておけば、その結果を濃度に変換することは容易です。

これでおしまいなのですが、最後にもう一つ越えなくてはならない難関があります。それは何かというと、電極表面に平行に電解槽へ入射したレーザーは屈折率の均一な水溶液中を真っすぐに通過しますが、拡散層のように溶質濃度に変化し、その結果屈折率勾配のあるところでは、前にも述べたように、屈折率の高い方に進行方向を変えろということ。これは通常、光学的ひずみ(distortion)といわれます。従って、拡散層に入射した光は真っすぐに通過するのではなく、図25に示すように湾曲して通過します。本実験では光が $d=0.47$ cmの幅を通過すると考えていますが、その行路長も異なることに成ります。言い換えると、干渉計で得られる光学情報は入射点 $y_i$ を真っすぐに走って得た情報ではなく、入射点 $y_i$ と出口点 $y_o$ の間の平均情報を運んできていますと理解すべきです。問題は実験で得られる情報から何がわ

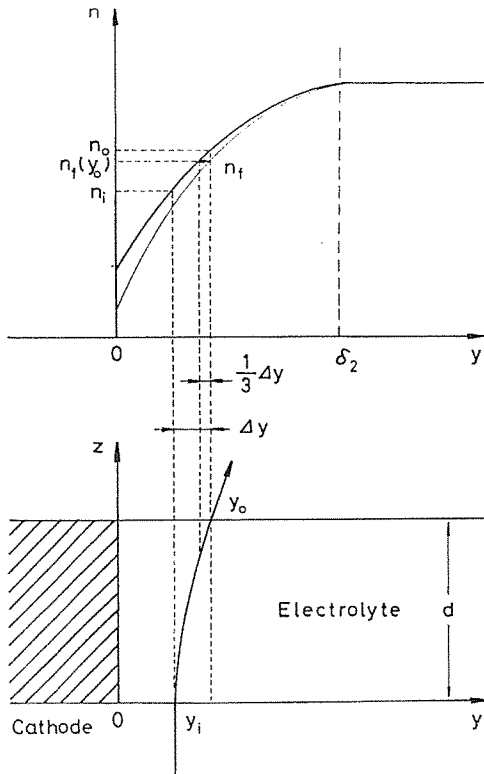


図 25 濃度境界層内の屈折率分布と光学的ひずみ

かるのかということです。

図25には、干渉縞から直接計算される見かけの屈折率プロファイル  $n_f$  と光学的ひずみを補正して得られる真の屈折率プロファイル  $n$  の定性的な相対的關係を示しました。さらに、見かけの  $n_f$  を使って光学的ひずみはどの程度か、どの程度光は曲がるのかを概算してみました。その結果、光の曲がり幅  $\Delta y = y_0 - y_i$  は最大  $50 \mu\text{m}$  程度であることがわかりました。一方、光は電解槽の中を約  $4700 \mu\text{m}$  走る訳です。そこで気がついたのは曲がり幅に対して約 100 倍の距離を走るのなら、この湾曲している光の道筋はほぼ直線と考えても良いのではないかと思います。さらに、この曲がり幅  $\Delta y = y_0 - y_i$  の領域では溶液の真の屈折率は直線的に変化していると考えても良いということです。そうすると最終的に干渉計で得られる光学情報は、光の入り口と出口の中間の位置を真つすぐ通過してきた光の情報と見なせるのではないかと思います。ここまでくると問題は 80% くらい解決です。あとはこの処理を幾何光学の微分方程式に基づいて丹念に計算するだけです。詳しいことは省きますが、最終的に光の出口から曲がり幅の三分の一だけバックした位置を真つすぐ通過したと考えれば良いということがわかります。つまり入り口から曲がり幅の三分の二

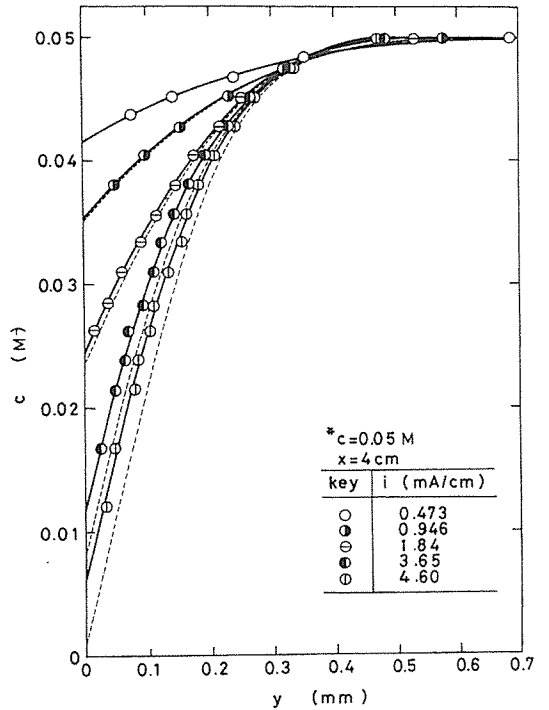


図 26 カソード濃度境界層内の硫酸銅の濃度分布

だけ溶液本体の方移動した点を真つすぐ通過したと考えて処理すれば良いことがわかりました。

このような光学的ひずみに対する補正を行った屈折率分布から得たカソード境界層の濃度分布を図26に示します。この実験結果は濃度 0.05 M の硫酸銅水溶液を使って、いくつかの電流密度で電解を行ったときの、カソード下端から 4 cm のところで観測した定常状態の干渉縞の変化から求めたものです。点線は見かけの屈折率から計算した結果、実線は光学的ひずみを補正したものです。電流密度  $4.6 \text{ mA/cm}^2$  は、この条件では拡散限界電流条件に近い値ですが、私の講義でよく説明しているように、その時の電気化学的に活性な硫酸銅濃度がカソード表面でほぼ零に減少していることがお解りいただけると思います。

細かいことをたくさん述べましたが、36年の歳月が経過しても、自分で考えて実行したことは昨日のこのように思い出されます。最近の傾向として、たくさんの外部資金が入り良い装置が使えるようになって、どんな上等な装置でも自分の思い通りの実験試料ができていいのか？装置の中の適切な位置にセットされているのか？等に思いを向ける姿勢がないと、実験データはいくらでも出てきますが、使えるかどうかわからない。そんなとき頼りになるのは自分の感覚です。チェックする方法は大学の講義でほとんど教わっていることです。それを総

動員するしかないのです。特にもの作りに関わる人はそれが重要です。そうしないと誰でもできることしかできなくなると思います。この辺のところを若い人は考えてほしいと思います。先輩が一週間で出したと思われるデータには、その裏に半年くらいの格闘が隠れているのです。そういうことが解るようになっていただきたい。そのような意味を込めて本日は材料プロセスと実験という題目で話をさせていただきました。ご静聴ありがとうございました。

#### 参 考 文 献

1) Y. Awakura, Y. Takenaka and Y. Kondo,

- Electrochimica Acta*, 1976, vol. 21, pp. 789-797.
- 2) Y. Awakura and Y. Kondo, *J. Electrochem. Soc.*, 1976, vol. 123, NO. 8, pp. 1184-1198.
- 3) A. Weissberger and B.W. Rossiter, "Physical Methods of Chemistry", Wiley-Interscience, New York (1971).
- 4) “レーザー II -レーザー光の性質と応用-”, 柏木 寛 訳, 藤岡由夫 監修, 共立出版 (1973).
- 5) D. Gabor, *Nature*, 1948, vol. 161, p. 777.
- 6) Y. Awakura, A. Ebata, M. Morita and Y. Kondo, *Denki Kagaku*, 1975, vol. 43, No. 10, pp. 569-577.

## 大会記念講演

## 鉄鋼業における地球環境への取り組み

－住友金属の事例－

友 野 宏\*

The measures for conservation of global environment  
in steel industry –In the case of Sumitomo Metals–

by Hiroshi TOMONO

現在最もホットな話題の一つに地球環境問題がある。これについては鉄鋼業も大変深く関わっており、当社においても積極的な取り組みが進められている。ここでは、その内容について事例を紹介しながら、この問題について改めて考えたいと思う。

## I. 地球環境問題の概況と鉄鋼業の役割

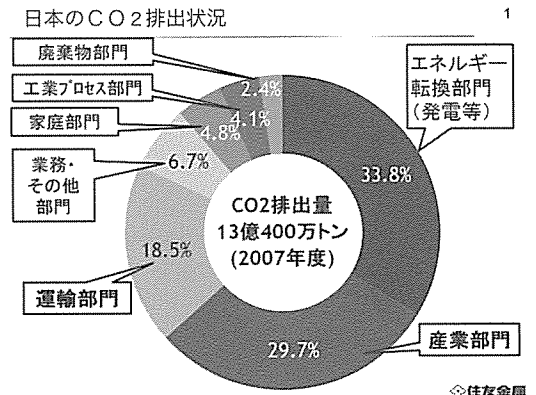
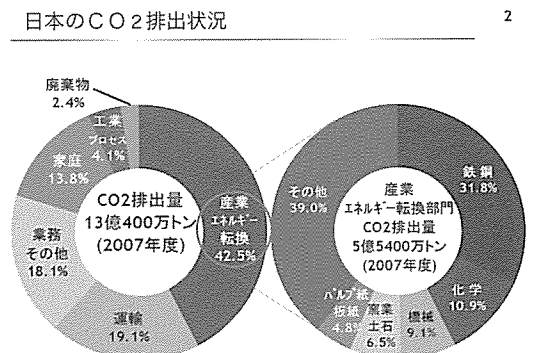
まずは地球環境問題とりわけ CO<sub>2</sub> 排出問題について世界・日本といった視点から概況を見てみると、世界全体では CO<sub>2</sub> は 266 億トン排出されている。このうち、全世界の鉄鋼業で 20 億トン、日本全体では 13 億トン、日本鉄鋼業で約 2 億トン、内住友金属が 0.3 億トンといった構成になっている。日本の排出量 13 億トンの内訳は、発電等のエネルギー転換部門が三分の一、産業部門が三分の一を占め、このほかに運輸、業務、そして家庭も相当量を排出している（図 1）。エネルギー転換部門については、電力等を実際に使用している部門に振り分け、更に産業部門を業種別に分類しなおすと、まず鉄鋼がその 3 割を占め、次いで、化学、機械、そしてセメントといった順番となる（図 2）。

従い、CO<sub>2</sub> 排出削減にあたっては、電力部門と並び、直接に CO<sub>2</sub> を排出している鉄鋼が非常に大事な役割を果たすこととなる。尤も、CO<sub>2</sub> と地球温暖化の因果関係については様々な議論があり、CO<sub>2</sub> 排出削減だけで地球温暖化が解決するとは思えないが、ここでは取ってその点に触れずにおくこととする。

## II. 日本鉄鋼業の取り組みの概況

日本鉄鋼業は、従前より省エネルギーの取り組みを通

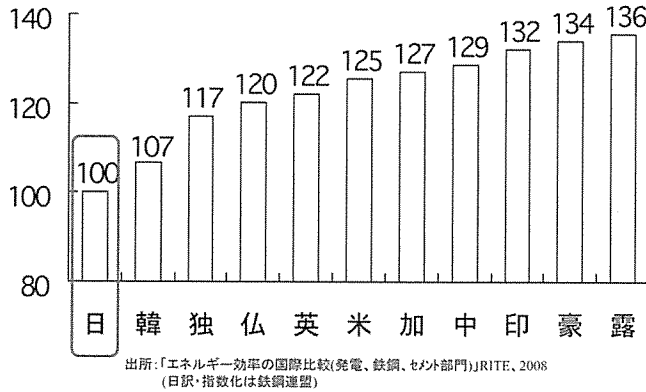
して CO<sub>2</sub> 排出削減の役割を果たしてきた。まずは、エネルギー効率を指標にして日本鉄鋼業の実力を測ってみることとする。日本鉄鋼業が粗鋼を 1 トン生産する時に使用するエネルギーを 100 とした場合、韓国が 107、ついでドイツ、それ以外の国々は、日本の 1.2 倍以上のエ

図 1 日本の CO<sub>2</sub> 排出状況図 2 日本の CO<sub>2</sub> 排出状況

\*住友金属工業株式会社 代表取締役社長  
社団法人日本鉄鋼協会 会長

エネルギー効率に優れた日本鉄鋼業

3

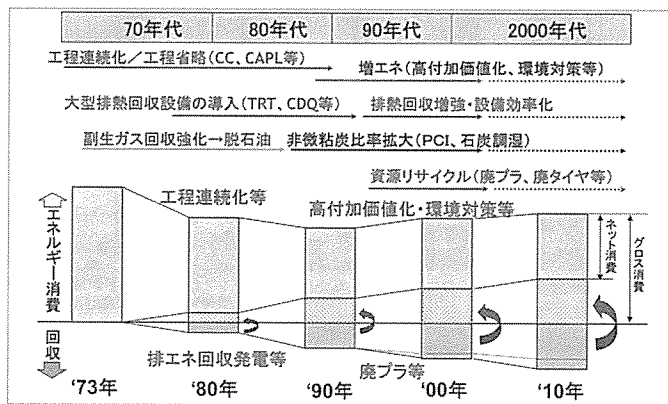


住友金属

図3 エネルギー効率に優れた日本鉄鋼業

省エネルギーへの取組の推移：鉄連自主行動計画

4



住友金属

図4 省エネルギーへの取組の推移：鉄連自主行動計画

エネルギーを使用している(図3)。近年、最も鉄鋼生産の伸びが高い中国が約130の水準である。中国の場合は、新鋭の大規模製鉄所のエネルギー効率は悪くないものの、それ以外の500を超えるといわれている中小の製鉄所が大量のCO<sub>2</sub>を排出しているため、中国全体を平均すると130の水準になっている。今後の伸びが予想されるインドのエネルギー効率は、更に悪い。また、意外であるが、欧米の先進諸国の水準も芳しくない。

この様に日本鉄鋼業が世界で最もエネルギー効率が良いことがご理解いただけたと思うが、日本鉄鋼業がこの40年間に如何にエネルギー効率向上に努めてきたかについて見てみると、70年代以降の傾向は大まかに二つの

期間に分けられる(図4)。70年代から80年代にかけて日本鉄鋼業におけるエネルギー消費量は通減し、回収量が増えることにより、ネットのエネルギー消費量は相当減少している。この期間のエネルギー節減の手法としては、パッチ処理だった工程を連続化して、連続铸造機や連続焼鈍を導入するというものであった。また、エネルギー回収にも着手し、例えば、高炉の炉頂から出る排ガスや排熱を利用してタービンを回転させて発電を行ったり、コークスを冷却するときに水を掛けていたものを不活性ガスで冷却して、そのエネルギーで、発電するようなことも行うようになった。加えて、ガスの回収を強化して石油を使わないようにする、あるいは微粉炭を高

炉に吹き込むといったことも行って来た。ところが、90年以降になるとグロスのエネルギー消費量は、寧ろ増加傾向に転じている。理由としては、これ以降の約20年間にわたって、日本鉄鋼業は、自動車用鋼材で適用が広がっているハイテンのような高付加価値品、ハイエンド品に非常に注力しており、製造プロセス的には手間を掛けエネルギーをより多く使う方向にあるからである。このエネルギー消費の絶対量の増加に対しては、さらなる回収などの努力でネットのエネルギー消費量を減少させている。リサイクルという観点では、廃車で不要になったタイヤ等を熱源として利用するようなことをやっている。これが日本鉄鋼業の省エネルギーへの取り組みのマクロイメージである。

このように日本鉄鋼業は、様々な考えられる限りの省エネルギー技術・設備を全て導入しているが、世界の鉄鋼業全体での普及は遅れている(図5)。EU、アメリカ、

中国などの普及率は日本を大きく下回っている。これが、おおよそ世界鉄鋼業の実情である。

### III. 当社の取り組み

さて次に、本題である当社の取り組みについて述べる。その視点を箇条書きにまとめると、

- ・鉄鋼製造工程におけるCO<sub>2</sub>削減
- ・鉄鋼製品による低炭素社会貢献

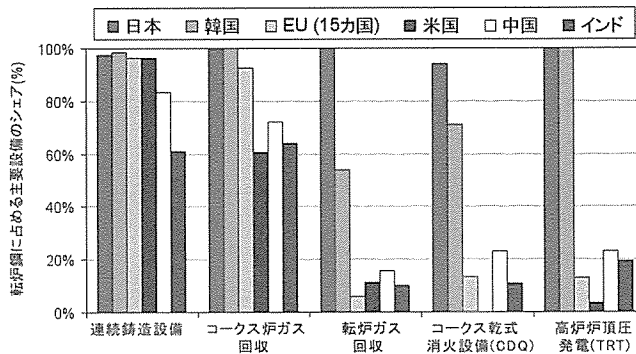
となる。また、将来に向けた試みも紹介する。さらに次章では当社の取り組みの原点でもある住友の精神・住友の歴史からの教訓に基づき昨今のCO<sub>2</sub>排出削減議論の論点を俯瞰してみたい。

#### (1) 鉄鋼製造工程におけるCO<sub>2</sub>削減

当社は、この25年間にエネルギー原単位を約20%改善している。他の日本の大手高炉も、ほぼ同じようなプロセスをたどってきた(図6)。この間に、粗鋼量が増

5

### 主要エネルギー回収設備装備状況



出所：Diffusion of energy efficient technologies and CO<sub>2</sub> emission reductions in iron and steel sector (Oda et al. Energy Economics, Vol.29, No.4, pp.868-888, 2007) (日訳は(社)日本鉄鋼連盟)



図5 主要エネルギー回収設備装備状況

6

### 当社のエネルギー原単位とCO<sub>2</sub>排出量

鉄鋼業は、一貫してエネルギー効率の改善に努力し続けて来た。当社の例を挙げると、粗鋼一トンあたり生産に必要なエネルギーは、1990年から20%低減されている。

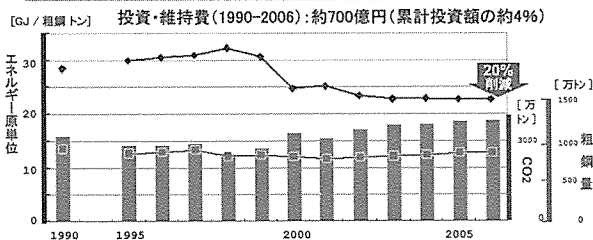


図6 当社のエネルギー原単位とCO<sub>2</sub>排出量

加し、品種構成も比較的エネルギーを消費する高付加価値品比率が増えているが、各社ともエネルギー原単位の改善を達成している。

その手法について、当社の和歌山製鉄所での具体的な事例を二つご紹介する。一つが新しい製鋼プロセス、もう一つがパイプを作る新しいプロセスで、各々大河内記念生産技術特賞と大河内記念生産賞を頂いた技術開発である。

① 革新的な新製鋼プロセス

まず、新製鋼プロセスが開発された背景である。私が入社した1970年前後、日本の一貫製鉄所群が成立した時代には、鋼に含まれるPは、どんなに下げても、凡そ数百ppmというのが精一杯というところだった。ところが、その後、品質要求が厳しくなり、現在では凡そ10ppmのオーダーまで低減することが求められる。Sに至っては、数ppmの水準を満たさねばならない。このような顧客からの要請に応える為、既に来上が

った製鉄所の中で、新しいプロセスを次々と追加していった。顧客からの要求レベルが上がるに従いそれに対応するプロセスや設備が完成していくということ自体は素晴らしいことで、結果として日本の鉄鋼技術が世界をリードできるまで向上する事となった。

しかし、一方で、転炉の役割を既存のままとして、その前後の工程にそれを補完するプロセスを追加する対応は、工程を時間と手間のかかる複雑なものとし、製造プロセスの効率を下げる結果を招くこととなった。例えば、和歌山製鉄所の製鋼工場の工場長であった当時のことを振り返ると、転炉と造塊設備しかない工場だったのが、連続铸造機の設置、溶銑予備処理等、SやPを事前に除去するプロセスの追加、更に転炉から出鋼した後に再度Sを除去したり、あるいは脱ガス工程も加えるなど、求められる溶鋼成分に応じて既設の建屋の中の限られた空きスペースに様々なプロセスが詰め込まれた状態になっていた(図7)。このプロセスで数十ppmのレベル

従来型製鋼工場のレイアウト

7

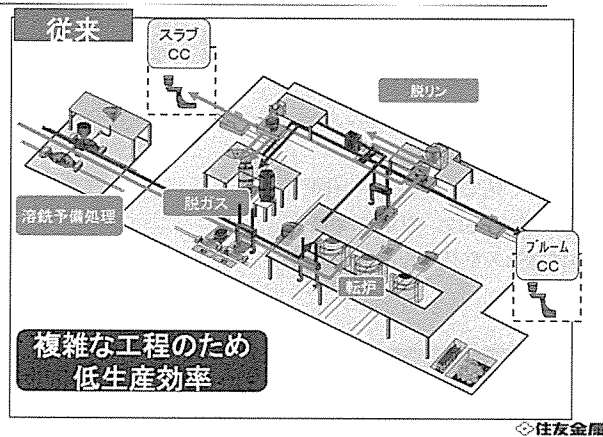


図7 従来型製鋼工場のレイアウト

次世代製鋼工場

8

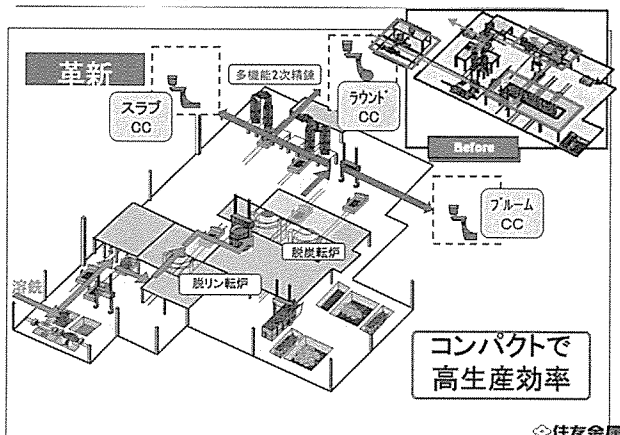


図8 次世代製鋼工場

までPの除去を行っていたが、プロセスの能力を最大限に引き出すために技術スタッフが徹夜で立会い製造条件を管理しながら何とか精錬できたものである。しかし、長時間処理の間、溶鋼を必要な温度に維持するため精錬中の温度低下を補償するなど、大きなエネルギーロスが発生していた。また、これらの追加された設備は、少量のハイエンドの要求の品種にのみ使われたため、その固定費の回収はハイエンド品種のコストを圧迫した。ハイエンド品種の製造は可能であったもののコスト競争力を低下させ、結果として、これらの設備を使わないようにしてプロセスを省略して製造する努力をするという悪循環をも惹起した。いずれの一貫製鉄所も、これと似たような歴史をたどったものと思われる。

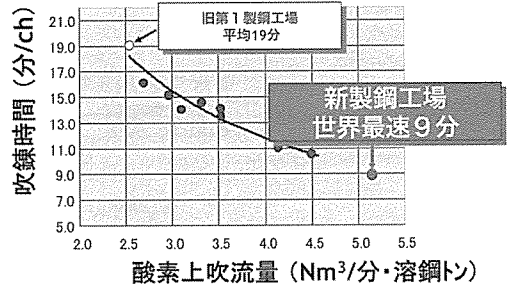
以上の状況の下、当社は、ハイエンド品種からミドル品種、汎用品種まで、全ての鋼種を同一の工程で製造するという革新的な発想を行った(図8)。まず、従来一つの転炉で脱Pと脱炭をおこなっていたものを、脱P専用転炉と脱炭専用転炉の二つの転炉で別々におこなうこととした。一見無駄に見えるこのやり方は、精錬の機能をそれぞれ専用化することで飛躍的な精錬効率の向上を生み出した。これを全ての品種に適用した。さらには、その後のプロセスも全ての品種を処理することとし、スラブCCとブルームCCで铸造するというように、工程を完全に同一にしたのである。

製造工程の新旧比較の図を改めて見てもらいたい(図9)。従来は、既存の能力の転炉を中心に、専用のプロセスが追加され、それぞれのプロセスを必要な品種にの

み適用していた。一見賢い方法に思えるこのやり方は、工場内の物流を複雑にし、生産能力を低下させ、多くの設備を非効率に使うことになった。一方、新しい方法は、高い精錬機能を有する一つの工程で高効率に全てをまかっている。その結果、従来は、同じ約400万トン/年の鋼を製造するにあたり製鋼工場が二つ必要であったのが、一つの製鋼工場の中で、ほぼ半分の基数の炉しか使わず、シンプルに製造可能となった。

この革新的な改善の基盤を成す脱P・脱炭転炉について、効率向上を具体的に解説すると、転炉の一回の吹錬に要する時間は、平均的に凡そ15分、和歌山では19分必要だったものが、当プロセス導入後は9分に短縮され、世界最速となった(図10)。これは、他社を含めたほか

生産効率の飛躍的向上



酸素上吹流量 (Nm<sup>3</sup>/分・溶鋼トン)

図10 生産効率の飛躍的向上

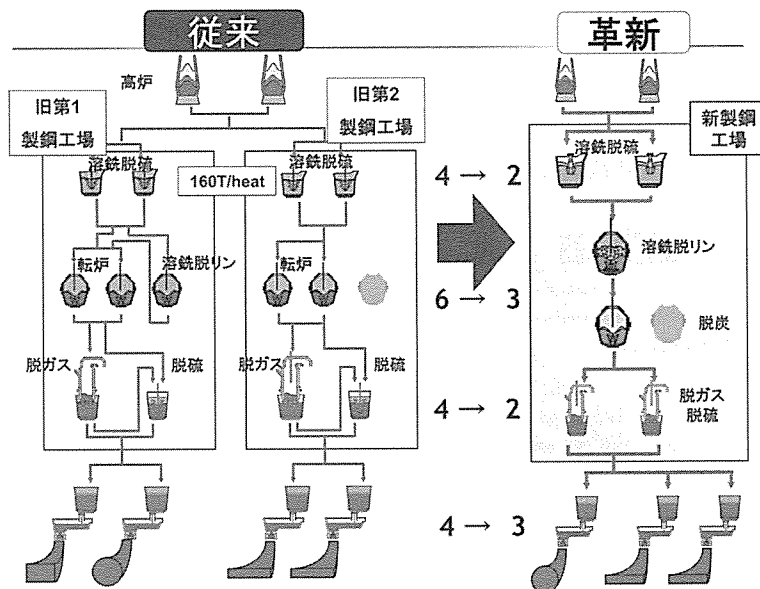


図9



の従来の転炉工場と比べても、ほぼ2倍と目覚ましい生産効率の改善である(図11)。

1970年代に完成したものの、その後の設備追加で複雑になったプロセスも、知恵の限りを尽くせば、シンプルな工程に変革できるという一つの事例である。

付言すれば、これは非常に誇るべきことであるが、このベーシックな研究を行い、プロセスを考案し、実際に立ち上げ、動かしているのは、水曜会のメンバーである。

② 革新的な鋼管製造プロセス

次に新たなパイプの製造プロセスをご紹介します。この新プロセスにおける非常に大きな革新は、連続铸造機と鋼管製造ラインが直結されたことである(図12)。従来は連続铸造機は鋼管製造ラインと別の場所にあったこと、また、鑄片の品質も不安定であったことから、冷却後に検査して欠陥部分を削り、再度、加熱炉で昇温して鋼管製造ラインで製管・圧延を行っていた。また、圧延後のパイプはほとんど焼入れ・焼戻しといった熱処理を行うが、それは別棟に運搬して行っていた。今回の新プ

ロセスによって、これらを直結化し連続して製造することが可能となった。その背景には、それぞれのプロセスで完璧に造り込むことにより、欠陥が発生しなくなり、一旦冷やして手入れすること無く、高温のまま圧延できるようになったという品質改善がある。我々は、1マイル工場(1 mile shop)と呼んでいるが、世界で初めて約1.6kmの中に全てのラインをおさめることが可能となった。また、ラインの直結化、高交叉角穿孔技術、マンドレルミルとサイザー、インライン熱処理などの革新的な技術を組み合わせることにより、良品率も飛躍的に向上した。

日本の一貫製鉄所の特徴であるが、製鉄所の建設期に日本の高度経済成長を経験したような製鉄所は、後から逐次プロセスを追加した結果、製鉄所内の物流ルートが複雑になる。和歌山製鉄所のシームレスパイプの場合、高炉からの出銑以降、製鋼工場、圧延ラインを経て出荷するルートは、実に20km以上に及んでいた。これが今回の革新的プロセスの導入により、総移動距離は約8km、主要な工程は1マイル工場の中に入ることになった。これも知恵の限りを尽くせば、相当経年した製鉄所においても、大幅な効率改善が完遂できる事例である。

この結果、和歌山製鉄所の実例におけるエネルギー原単位、ならびにCO<sub>2</sub>排出量は、運用開始時で22%削減可能となった。その後、更なる操業技術の改善を行い、CO<sub>2</sub>排出の削減率は34%に達している(図13)。

以上が、鉄鋼の製造過程で発生するCO<sub>2</sub>の抑制に対する取り組みの事例である。

(2) 鉄鋼製品による低炭素社会貢献

次に、当社が製造した鉄鋼製品を通じたCO<sub>2</sub>削減への貢献を説明する。

鉄鋼業ではCO<sub>2</sub>削減、即ち低炭素社会に向けた研究

世界一高効率生産の実現

11

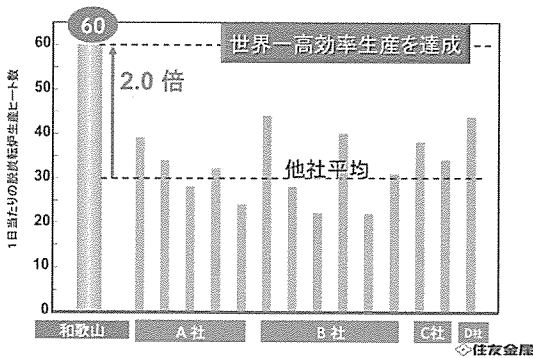


図11 世界一高効率生産の実現

連続铸造と中径継目無製管の工程直結化

12

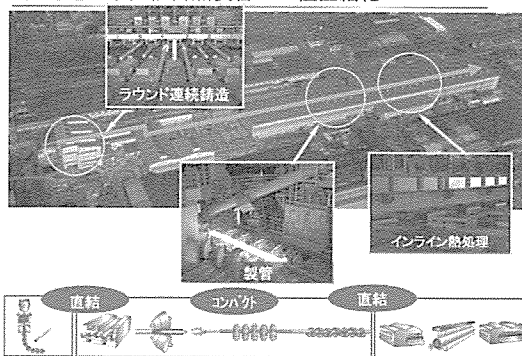


図12 連続铸造と中径継目無製管の工程直結化

和歌山製鉄所のエネルギー原単位の大幅低減

13

粗鋼生産規模:年間400万トン

|                              | 従来(1996) | 革新(2000) | 改善代     | %    |
|------------------------------|----------|----------|---------|------|
| 粗鋼生産トン当たりエネルギー原単位            | 31.6 GJ  | 24.7 GJ  | 6.9 GJ  | ▲22% |
| 粗鋼生産トン当たりCO <sub>2</sub> 排出量 | 2.76 トン  | 2.16 トン  | 0.61 トン | ▲22% |

|  | 2007    | 改善代  | %    |
|--|---------|------|------|
|  | 1.83 トン | 0.93 | ▲34% |

図13 和歌山製鉄所のエネルギー原単位の大幅低減

開発費を大きく増加させているが、当社の場合、新商品開発に関わる研究開発費の約8割を低炭素社会に繋がる自動車ならびにエネルギー用途に振り向けている。その成果として開発されたCO<sub>2</sub>削減に寄与する製品・技術について代表的なものとして

- ・超々臨界圧石炭火力発電用ステンレスボイラーチューブ
- ・超高強度耐サワー低合金油井管
- ・原子力発電用蒸気発生器用伝熱管
- ・ハイドロフォーミング技術と熱間プレス技術
- ・V型クランクシャフト
- ・高性能電磁鋼板

等々多くの事例があるが、ここでは紙面の都合上、3

つの新製品を紹介する。

① 超々臨界圧石炭火力発電用ステンレスボイラーチューブ

最初に紹介するのはボイラーチューブである。これも大河内記念生産特賞を頂戴した。ボイラーチューブはボイラーの内部で使用される鋼管であるが、ボイラーは蒸気の圧力と温度を上昇させると発電効率が上がる。しかし、高温・高圧の環境に対応できる材料が出来なかった為に、この約30年は570℃・24MPaの超臨界圧のレベルで留まり、発電効率も過去に比べれば向上したものの、40%程度水準で止まっていた。それを今回、様々な工夫を重ねて600℃・25MPaの超々臨界圧に対応した

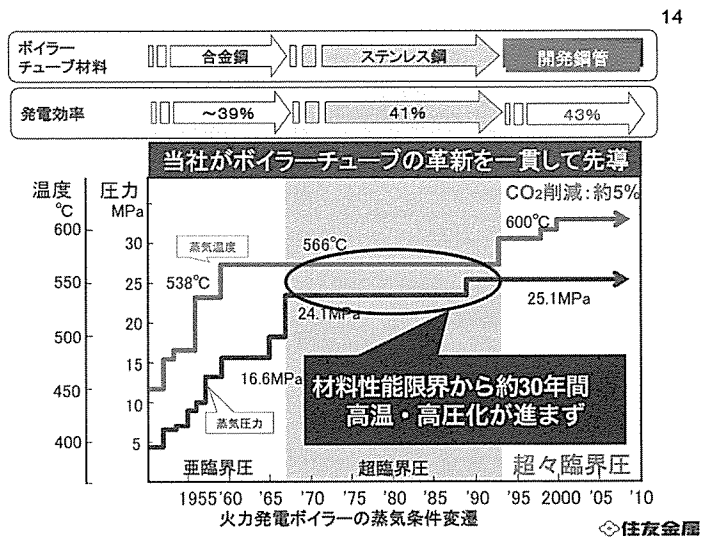


図 14 火力発電ボイラーの蒸気条件変遷

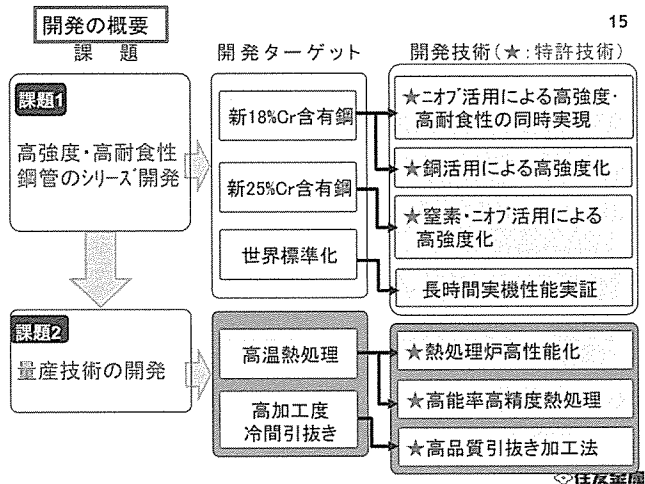


図 15 開発の概要

パイプの製造が可能となった(図14)。この開発は、第一に研究所等で種々の検討を行って素材を創り出す、そして第二にその素材を量産可能とする、という二つの要素で成立した(図15)。オーステナイト系でCrベースのステンレス鋼に従来に無いNbの活用や材料の特性に悪影響を与えるとされるCuを適正に添加したり、あるいはNを活用することにより全く新しい成分系をつくったこと、その製造にあたり高い性能を有する設備開発の裏付けも行ったということである。

現在、世界経済の発展に伴い、電力の供給能力の増強のため火力発電所は数多く建設されており、世界全体で約200基の超々臨界圧ボイラーが使われている。特に中国は短期間に電力供給を増やす場合は石炭火力を利用しており、最大の利用国である。これら超々臨界圧ボイラーで使用されるパイプの中で当社のシェアは約80%に達している。

CO<sub>2</sub>削減の観点であるが、当社パイプの使用で発電効率が向上することにより、石炭の使用量が約2800万トン減少し、排出されるCO<sub>2</sub>も約6600万トン減る。これは日本が排出しているCO<sub>2</sub>の約1/20、換言すればポルトガル一国が排出しているCO<sub>2</sub>を削減する規模に相当する。この様に、超々臨界圧ボイラーに適用できる鋼の成分系を開発することによって、世界のCO<sub>2</sub>削減に大きく貢献できた訳であるが、これも鉄鋼業の大きな役割、やりがいの一つと考えている。

この開発におけるキーテクノロジーであるが、一言でいうと高温強度と高耐食性の両立である(図16)。ボイラーチューブは、その内部を高温・高圧の水蒸気が通過する。このときボイラーチューブの内面は、水蒸気酸化でダメージを受けるので、これに耐える耐食性が要求される。一方、発電効率の向上のため、より高温・高圧での環境に耐える高温強度が必要である。ところが、高

温強度と耐食性はトレードオフの関係にあり、高温に強い鋼は耐食性が低い。これをブレイクスルーした開発の内容を多少詳しく言及する。

一般にステンレス鋼の高温強度を上げるには、冷間加工後の熱処理工程で高温で炭化物を固溶させ、使用温度で再び微細に析出させる析出強化が用いられるが、高温での固溶化熱処理により結晶粒は粗大化してしまう。一方ステンレス鋼の耐食性を担うCr酸化物の皮膜は結晶粒界をCrが拡散移動し表面に供給されることで形成する。従い結晶粒が細かいほどCrの供給が促進され安定したCr酸化物皮膜が形成され耐食性が向上する。今までの研究では、このトレードオフの関係から抜け出せなかった。

今回の開発では、Nb炭化物が他の炭化物に比べて高温まで安定した細粒組織を保つ性質に着目し、製造プロセスを見直した。即ち、冷間加工前に従来より高温に保持しNb炭化物をここで完全に固溶させてしまう。その後高加工度の冷間引拔を施す。そうすると加工後の熱処理工程で逆にNb炭化物が微細析出し、さらに高加工による加工ひずみが再結晶の核を増加させ細粒化を促進する。

このような析出物を制御した加工熱処理技術により、トレードオフの関係から大きく飛び出して、高温強度と耐水蒸気酸化性を同時に実現できる成分系を開発することができた。

加えて、使用される条件においては適正量添加のCuがナノレベルで微細均一析出し高温強度を著しく向上させることも見出した。一般的にCuは鋼の破断延性を低下させる不純物であるが、先に述べたNb炭化物を利用した細粒組織により破断延性の低下を防ぐことにも成功した。

このようにして、新18%クロム鋼が生まれた。

また、より広範囲な使用条件に対応する品揃えを目指し、18%クロム鋼より著しく耐食性に優れた25%クロ

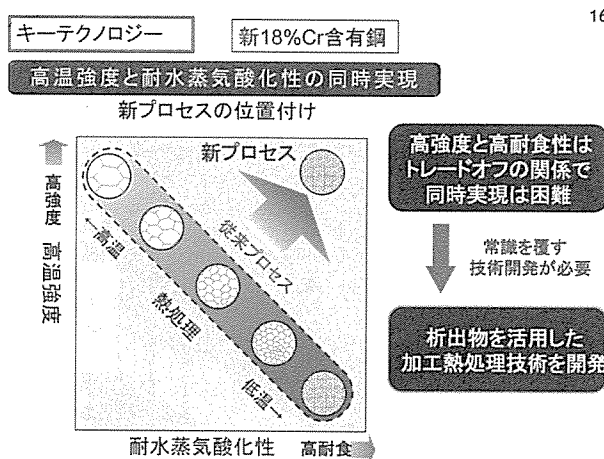


図 16

ム含有の高クロム鋼にも取り組んだ。この材質は使用される温度において Fe と Cr の金属間化合物が析出し強度が劣化してしまい実用にはなっていなかったが、N 添加による金属間化合物析出の抑制および N と Nb の複合添加による窒化物の析出強化でこれを解決した。これが新 25% クロム鋼である (図17)。

火力発電所での高温環境下での使用条件については、高温を耐えるべき条件と考えるか、または、それを熱処理のチャンスと捉えるかが、大きな分かれ目であった。当社は、これを熱処理の大きなチャンスだと判断し、使用中に炭化物の析出分布が変化していくということも視野に入れることにより、このような新しい鋼を開発するこ

とができた。

② 超高強度耐サワー低合金油井管

次に超高強度耐サワー低合金油井管を紹介する。油井管とは、石油や天然ガスを地下から掘り出す際に使用されるパイプであるが、今後開発される井戸は、益々、掘削環境が悪くなり、硫化水素を含むような酸性の井戸が増加していることから、これに耐えられるパイプを製造する必要がでてきた。そのような井戸は、海底から凡 4000 m～6500 m の深度のガス層まで掘削する訳であるが、そのガス層に多くの硫化水素が含有されている。

海洋油井、ガス井開発といった場合、海上に浮かぶブ

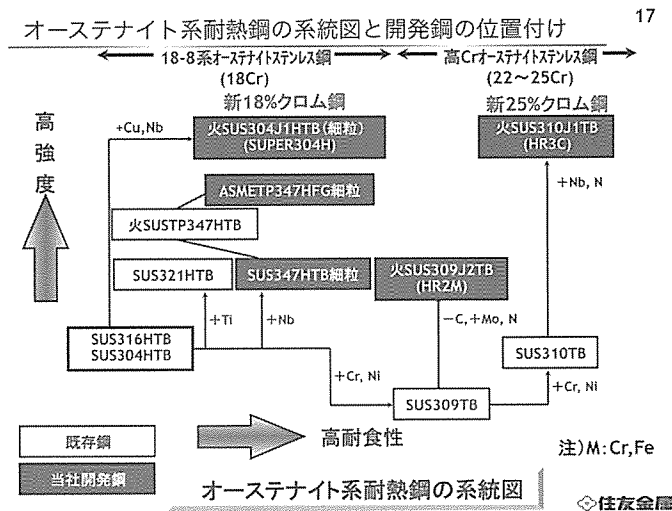


図 17 オーステナイト系耐熱鋼の系統図と開発鋼の位置付け

海洋油井・ガス井開発の模式図

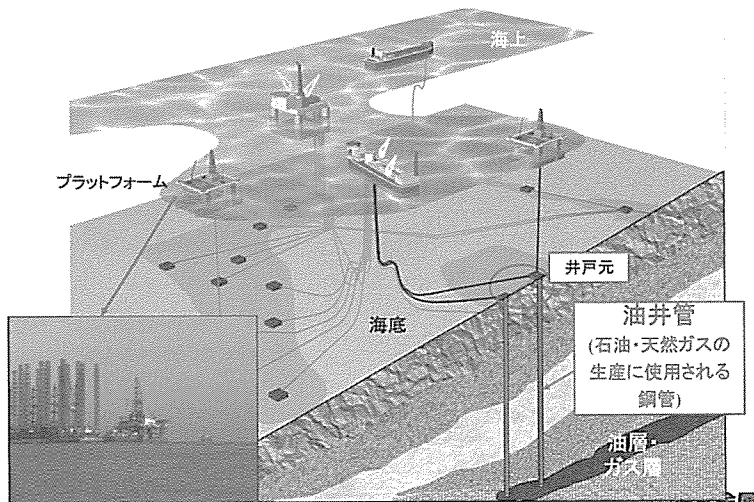


図 18 海洋油井・ガス井開発の模式図

ラットフォームがイメージされるが、その下の海中にはパイプが海底までぶら下がっており、更に、海底から4000 m 以上地層を掘削して油層やガス層に届く構図になっている (図18).

現在、世界のエネルギー利用の潮流の一つとして、石油からクリーンかつ CO<sub>2</sub> 排出量の少ない天然ガスに切り替わる方向にある (図19). ところが、天然ガスは石油よりも深い深度 4000 m 以上の場所に豊富に存在する. 従い、今後の天然ガス開発にあたっては、条件がより過酷な井戸が増加する状況が予測される. しかし、当社が開発したパイプを使用すれば、この様な条件の悪い

井戸の開発も可能になり、石油から天然ガスへの転換によって、現時点で年間 800 万トン、将来の天然ガス使用増を見込めば、年間4000万トンもの CO<sub>2</sub> が削減できる.

この開発でも水曜会の先輩である研究者が非常に面白いことを考えてくれた. 鋼管が破壊されるのは、鋼中の Al-Ca 系酸硫化物が起点になり、大深度に豊富にある硫化水素に起因する水素がそこに入ってきて空隙ができ、割れに至るからであるが、この Al-Ca 系酸硫化物の周囲を Ti-Nb 系炭窒化物で大福の餅のようにうまく包んで、これが悪戯しないようにするといった鮮やかな手口を考案したのである (図20). これにより、孔食や

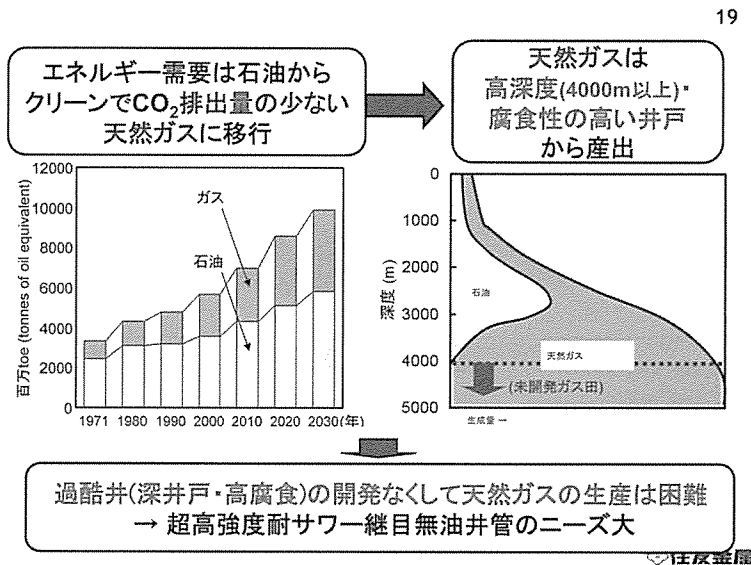
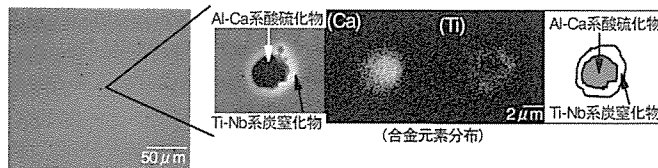


図 19

キーテクノロジー

鋼中介在物の低減・微細化

・異種介在物の複合化による  
介在物微細分散技術の開発  
→ 孔食・SSCを抑制



内核:Al-Ca系酸硫化物, 外核:Ti-Nb系炭窒化物からなる複合微細介在物

図 20

酸化硫化物起因の割れを見事に抑制できる新しい成分系のパイプが開発できた。

により開発ができた事例である。

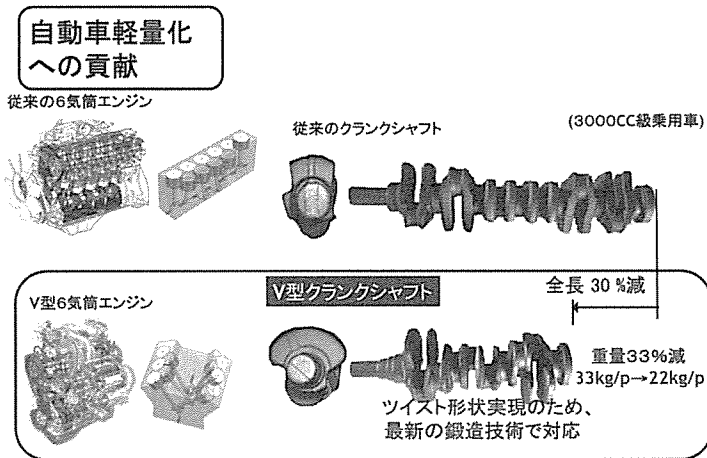
③V型クランクシャフト

エンジンの重要部品であるクランクシャフトであるが、従来の6気筒エンジンでは直列にシリンダーが並んでいくところを、これを工夫してひねるような形にするツイストという技術で対応することにより、長さで30%、重量でも30%減少させることが可能となった(図21)。これらは塑性加工の技術とコンピューターシミュレーションの技術を組み合わせで金型を設計すること

以上のように鉄鋼業における地球温暖化への取り組みについてまとめると、もの造りの面で継続的な努力を行うもののCO<sub>2</sub>排出はゼロには出来ないといった中で、製品でCO<sub>2</sub>排出を削減する努力を営々と行っているということである。当社の事例では、自社の製造工程で発生するCO<sub>2</sub>の7倍程度の量を、当社の製品をお使い頂くことによって削減している(図22)。このような努力が、今後、日本鉄鋼業が世界のCO<sub>2</sub>削減に貢献できる一つのキーワードではないかと考えている。

自動車軽量への貢献－V型クランクシャフト

21



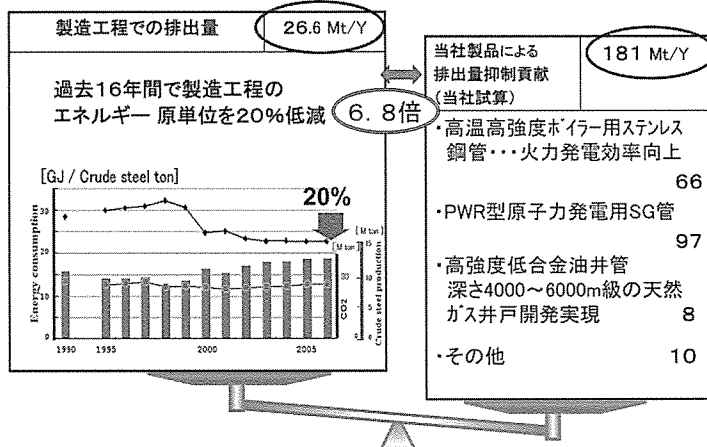
住友金属

図21 自動車軽量への貢献－V型クランクシャフト

当社のCO<sub>2</sub>バランス

22

－製造工程での排出 対 製品による排出削減貢献



住友金属

図22 当社のCO<sub>2</sub>バランス

(3) 将来に向けた取り組み

さて、将来におけるCO<sub>2</sub>削減への取り組みであるが、一つの面白い解をご紹介します。それは、当社がブラジルで建設している年産100万トンの高炉一貫製鉄所の事例である(図23)。従来であると石炭からコークスをつくり、このコークスを高炉に装入してCO<sub>2</sub>が発生するといった仕組みの中で、CO<sub>2</sub>を如何に減らすかということに注力してきた。しかし、今回は、ユーカリの木を植えて木炭を製造し、この木炭を高炉に入れて銑鉄をつくることにした。結果、高炉でCO<sub>2</sub>は発生するのであるが、このCO<sub>2</sub>はユーカリが生長する際に全て吸収してしまうということでオフセットできるというプロセスを取り入れることにしたのである。また、今回利用するユーカリは、バイオテクノロジーで生長を揃え、更に生長を促進させ、5~7年で成木として利用できるようにし

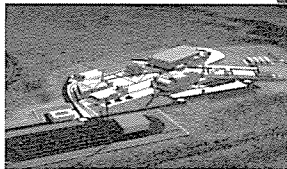
た。加えて、その伐採後の根から、再び芽が出て、3回は利用できる。ちょうど大阪の環状線の内側の約25倍分の面積を管理し、7年経過すると順番に木炭として利用するといった運用を行っている。

また、もう一つの解として、多少先の話であるが、日本鉄鋼業界が協力して2050年を目標としたCOURSE50という計画を進めている(図24)。高炉をベースにしながら、CO<sub>2</sub>排出量を3割減少させようという技術開発である。高炉の炉頂から出てくるCOおよびCO<sub>2</sub>等を含む高炉ガスについて、まずCOとCO<sub>2</sub>を分離、次にCOは再び高炉に戻して還元剤として利用、CO<sub>2</sub>については地中に埋める。このCO<sub>2</sub>を地中に閉じ込めてしまおうというアイデアは、Carbon Capture and Storage、略してCCSと呼んでいる。一方、コークス炉から排出されるCH<sub>4</sub>については、コークス炉の排熱を利用して水素とCOとに分解し、水素は高炉で還元剤として利用する。これらの各部分の要素技術は成功しているので、後はこれらを如何にしてトータルのシステムの中に組み込んでいくかという段階にまで進捗している。

以上のように、鉄鋼業においては、製品によるCO<sub>2</sub>削減で努力する、ブラジルの事例のようにユーカリ木炭剤のような新しい還元剤を試みる、あるいは思い切った新しいプロセスを導入してCO<sub>2</sub>を削減するといったような方策で取り組んでいる。

ブラジル高炉一貫シームレスパイプミルの建設 <sup>23</sup>

仏パローレック社と  
高級シームレスパイプ  
製造合弁会社設立  
粗鋼100万トンの  
製鉄所新設



住友金属

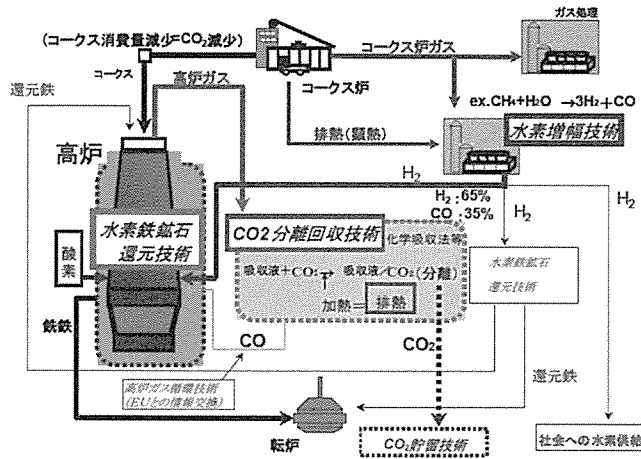
図23 ブラジル高炉一貫シームレスパイプミルの建設

IV. 昨今のCO<sub>2</sub>排出削減議論

さて、足許のホットな問題である地球温暖化防止、CO<sub>2</sub>削減についての最も注目される議論は、キャップアンドトレードによる排出量取引か、セクター別アプロー

環境調和型製鉄プロセス技術開発 (COURSE 50) <sup>24</sup>

— 2050年CO<sub>2</sub>排出量30%削減を目指して —



住友金属

図24 環境調和型製鉄プロセス技術開発 (COURSE 50)

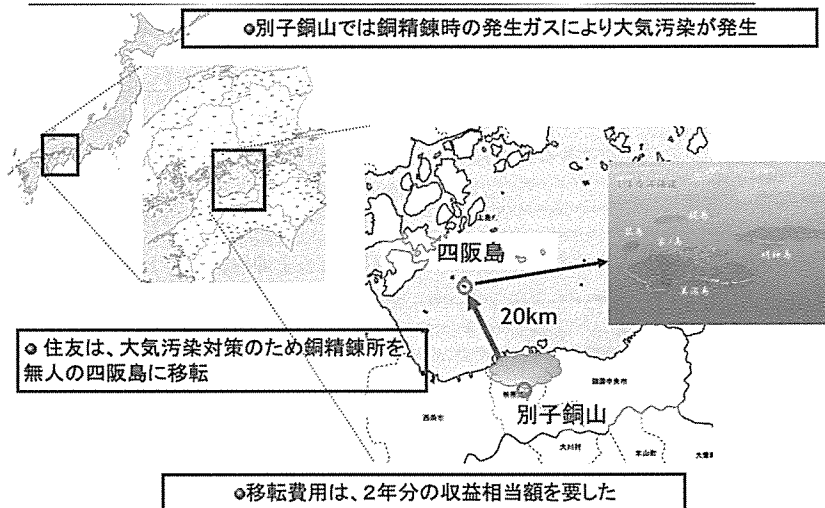
チかという点である。この点については、キャップアンドトレードよりセクター別アプローチの方が適切であると考えているが、その背景について別子銅山における住友の教訓を例示したい。

住友グループの源流は銅の採鉱冶金事業であった。昔の銅の精錬は、採掘した銅鉱石を積み上げて、下から木炭で熱するという製法であったが、原鉱が硫化銅の為、

亜硫酸ガスが大量に発生することになり、銅山の周囲の樹木が枯れて荒廃してしまった。住友が企業の社会的責任 CSR に言及する際には、この荒廃した山地に植林して元の青々とした姿に戻したことがよく謳われているが、私の考えでは当然の対応である。より本質的な点は、銅山の足許で精錬し煙害を発生させたので、銅山のある新居浜から、その沖合の四阪島という無人島に、精錬に

## 別子銅山の大气汚染対策

25



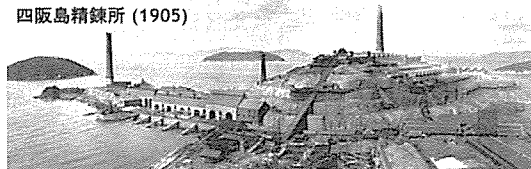
住友金属

図 25 別子銅山の大气汚染対策

## しかし、移転は大気汚染対策にはならなかった

26

四阪島精錬所 (1905)



- 四阪島で発生の大気汚染は四国本島に流入
- 住友は、次の対応を実施

地元農家への補償

精錬操業の制約



住友金属

図 26 しかし、大気汚染対策にはならなかった



関わる工場設備の全てを移設したということである（図25）。ここは、電気も水もない島だったので、それらを配管やケーブルで引き込み、当時の住友の二年分の収益をつぎ込んで、インフラ一式を揃えた。高い煙突をもったプラントを建設し、港や学校も建設した。ところが、皮肉なことに、風向きが悪く亜硫酸ガスが四国側に流れ戻ってくることになり、結局は地元の農家への補償や生産制限を行うことによって、自らのビジネスのチャンスをつぶす結果となった（図26）。これらの問題への最終的な解になったのは、脱硫設備や脱硫ガス中和設備の導入であった（図27）。即ち、ここで示されたのは、技術開発で初めて大気汚染問題が解決できたという事実であ

る。

この別子銅山の史実とキャップアンドトレードの類似点を指摘したい（図28）。キャップアンドトレードとは、第三者が国や企業のCO<sub>2</sub>の排出枠を決め、実際の排出量が枠を下回れば、余った枠を不足している国等に売却することを認める仕組みである。つまり、排出枠の売買でもって、CO<sub>2</sub>の排出量を統制していこうというアイデアである。しかし、これには問題が二つあり、一つはキャップ即ちCO<sub>2</sub>の排出量上限目標を誰がどのように決定するかということ、もう一つは、この点が住友の教訓であるが、あるところで排出されていたCO<sub>2</sub>が別のところに移転するだけの話であって、制約を受けない地域

### 対策の決め手：革新技術の導入

27

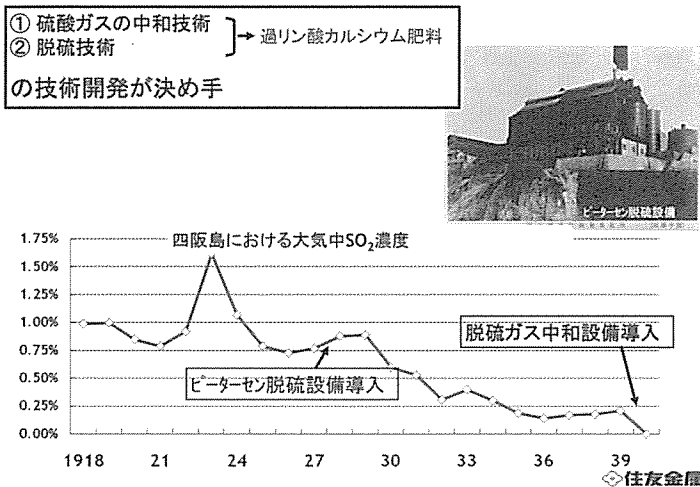


図 27 対策の決め手：革新技術の導入

### 住友の経験とCAP&TRADEのアナロジー

28

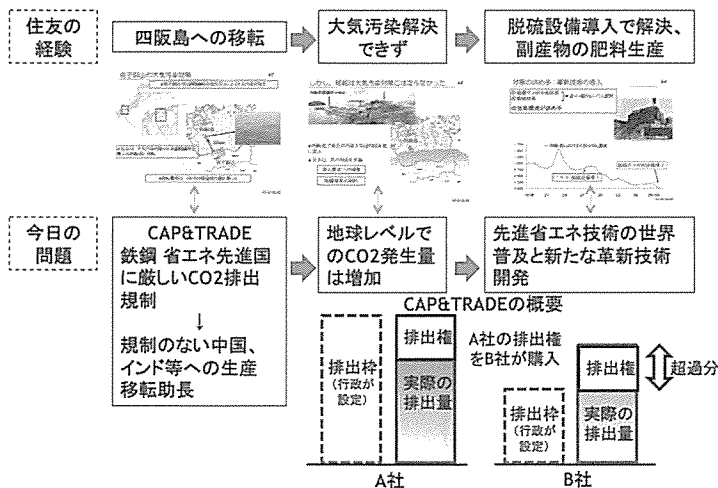


図 28 住友の経験とCAP & TRADEのアナロジー

住友金属

に CO<sub>2</sub> の排出が移動（漏洩）するだけのカーボンリーケージとなることである。住友は、四阪島に膨大な費用をかけて、排出源を移転したものの問題の解決にならず、最後は技術開発でもって対処するしかなかった。キャップアンドトレードも先進国に厳しいキャップを設け、一方で規制のないインドや中国は際限なく排出できる仕組みとなり、結局、地球レベルでは CO<sub>2</sub> が増加する結果しか生まない可能性が高いのである。この点を日本鉄鋼業は、リーダーシップをとって、キャップアンドトレードでは CO<sub>2</sub> 削減に効果がないと、一所懸命に世界に働きかけた。その結果、キャップアンドトレードはカーボ

ンリーケージとなる欠点があり、一方各々の産業単位で CO<sub>2</sub> 削減に取り組むセクター別アプローチが CO<sub>2</sub> 削減には有効だという理解が漸く深まり、そして、地球温暖化問題のキは技術であるという流れができてつある。

この潮流の中で、私どもは、世界の鉄鋼業の中で最もエネルギー効率が良い日本鉄鋼業の技術を他の国々に移転するという課題に取り組んでいる。現在の鋼材消費の増加が継続する前提のもと、これが達成された場合のシミュレーションを行うと、日本の進んだ設備や技術を移転するだけで、2020年時点では、EU の鉄鋼業全体の CO<sub>2</sub> 排出量に相当する、3 億トンの CO<sub>2</sub> 排出を削減できる見込みである。その取り組みの一環として、中国に日本鉄鋼業の環境技術を移転する目的で、日中連携での交流会が創設され、実務レベルでの作業が始まっている。

一方、ポスト京都をどうするかという議論が始まっているが、鉄鋼生産量で見ると、京都議定書がカバーしている国々は 40% に過ぎず、中国、米国といった大口の CO<sub>2</sub> 排出国は削減義務を負っていない。この事態を憂慮して、環太平洋諸国即ち APP という概念で、クリーン開発と気候変動に関して議論する場が設立された。鉄鋼分野の APP は日本が議長国であり、大口の中国と米国が参加、更にこれから成長するインドもこの枠組みに加わったことにより、世界の粗鋼生産の 60% をカバーできるようになった（図29）。京都議定書の締結国があり、

世界の粗鋼生産と京都議定書及びAPPのスキーム 29

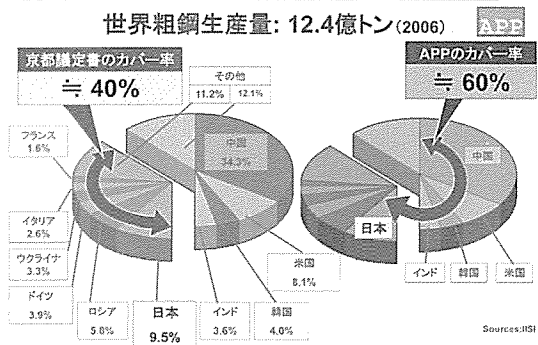


図 29 世界の粗鋼生産と京都議定書及び APP のスキーム

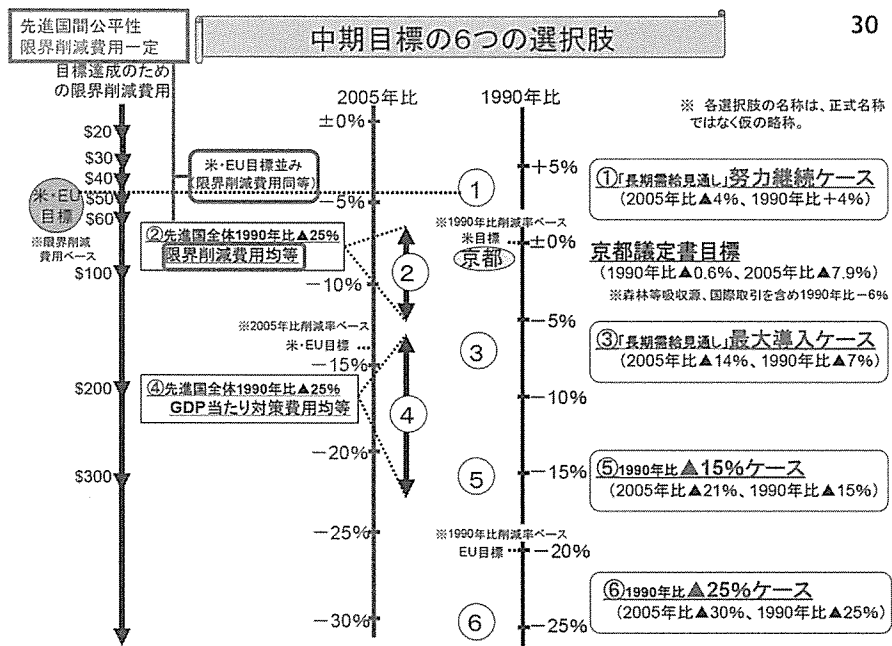


図 30 中期目標の 6 つの選択肢

また APP の国々も議論に加わることによって、漸く頭の整理が進み、ポスト京都を今後どのように設定していくかという話になってきている。

最後に、現在、マスコミでもよく取り上げられる日本政府が検討中の我が国の地球温暖化対策中期目標についてご紹介したい(図30)。これには、様々な論点があるが、一つは温暖化ガス削減率算定の基準とする年を2005年とするのか、1990年にするのかというポイントである。同じ施策を行っても、基準年によって表現される削減率が異なってくる。もう一つの論点は、日本政府が提示している6ケースの削減数値目標について、国としてどれを選択、決定するかということである。6月10日には、総理大臣が6 選択肢のいずれかを選ぶことになっている。産業界、経済界は05年比▲4%を主張し、環境派は90年比▲25%を主張するなど、議論は真二つに分かれている中で、政治家は中間地点にランディングを狙っているというのが、最近の新聞の論調である。産業界・経済界の主張するラインは、日本が現在行っている努力を継続するという前提で05年対比▲4%であるが、90年対比でみると+4%と増加する目標になってしまっている。これに対して、環境派の皆さんは、京都議定書において90年排出量でCO<sub>2</sub>を抑制しようとしていたのに、増加する目標を打ち出すのは問題であるという点を反対

の主たる論拠としている。一方で京都議定書にそもそも問題があるという議論もあり、それをリセットして改めて考えようという主張もある。その様な議論を整理する為に、限界削減費用という概念が出てきている。これは、CO<sub>2</sub>を1トン削減するのに必要なコストを先進国については同じ負担にしようという考えである。米国は05年対比▲14%を主張しており、一方の日本が▲4%を主張すると、CO<sub>2</sub>削減率の数字上は日本の旗色が悪くなるのだが、限界費用を同じにするという考えに基づくと、米国が14%削減する際のコストと日本が4%削減する際のコストが等しいことから、日本の▲4%目標が許容されることになる。これは、日本が過去に環境対策を相当実施し尽くしてきたことから、そこから更に1トンのCO<sub>2</sub>を削減しようとする、かなりの費用が必要となる一方で、米国のように、日本ほど環境対策を実施していないところは、低コストで大きな削減率を達成できるということである。いずれ日本の目標値が決定されるが、技術と政治と国際パワーバランスの3つが複雑に絡んだ話となっており、選ばれる選択肢により、日本経済に与えるインパクトが非常に大きくなると予想される。

これらの目標に対する具体的な対策であるが、05年比▲4%の場合、現在行っている努力を継続する前提であることから、太陽光発電は現状の4倍、次世代自動車は

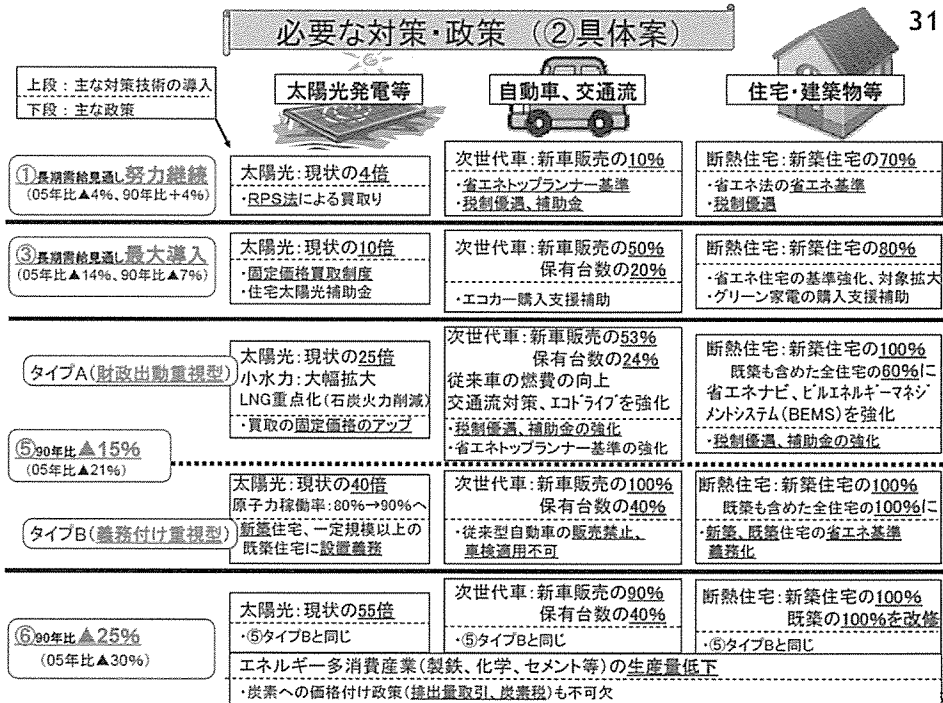


図 31 必要な対策・政策 (②具体案)

新車販売の10%、新築住宅に占める断熱性を向上させた住宅の割合は7割とするという内容になる(図31)。90年比▲25%のケースでは、太陽光は現状の55倍、次世代自動車は新車販売の90%、保有台数ベースでは40%、新築住宅は全て断熱住宅となる。ここで問題になるのは、誰がこれに関わる費用を負担するかということであるが、その点が余り議論されないままに、目標値の議論だけが二つの極論の間で交わされているというのが現状であり、このような中で来週目標値が決まる見込みである<sup>1)</sup>。

#### V. 最 後 に

以上のように、日本の鉄鋼業、そして住友金属の事例

をご紹介してきたが、地球温暖化に対する解は、やはり技術である。そして、我々が技術開発に取り組んでいく上での王道というのは、研究者、技術者の熱意であり情熱だと私は考えている。

<sup>1)</sup>：本講演の4日後、6月10日に麻生首相(当時)により、日本の地球温暖化中期目標は2005年対比で▲15%と打ち出された。更に政権交代後の、9月22日の国際連合気候変動首脳会合において、鳩山首相が、1990年対比で▲25%の目標値を表明している。

大会記念講演

分からないことが分からない

—不思議な岩盤の世界—

日 比 野 敏\*

One can not reveal what one does not see  
- the mysterious world of rock mass -

by Satoshi HIBINO

1. はじめに

岩盤工学は工学と言っても、橋梁工学や建築工学と比較してその内容が大きく異なる。対象が違うのは当然であるが、扱う「材料」の性質と作用する「外力（荷重）」の大きさが橋梁工学などでは明確であるのに対して、岩盤工学では不明確なところがあるのが大きな違いである。

岩盤工学で扱う材料の主たるものは「岩盤」であり、主な荷重は「地圧」である。岩盤の特性は天然の産物ゆえにバラツキがあり、さらには節理などの不連続面を有しているので材料特性の把握が容易ではない。また、地圧は岩盤の重量に起因するのみならずプレート運動の影響を受けており地球規模の問題であり簡単には計測できない。

このように、「材料」特性と「荷重」の大きさの双方に不確実性を含んだ状態で、トンネルや大空洞を建設してゆくところに橋梁工学などと違う岩盤工学独特の難しさがあり、それが同時に挑戦する楽しみともなっている。

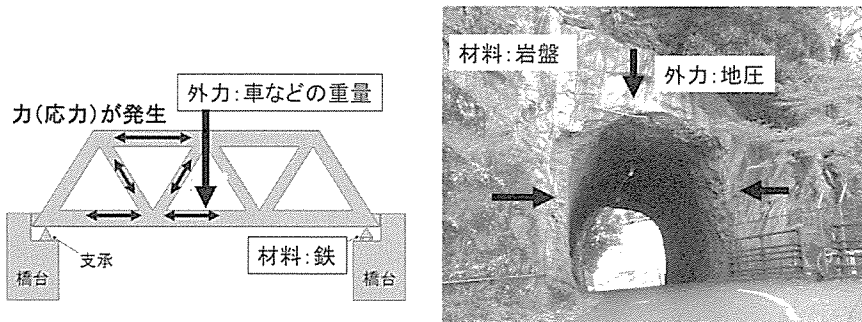
この講演では、岩盤工学での「材料」と「荷重」が橋梁工学などで扱う人工材料の鉄などと比べてどのような

特徴をもっているか、岩盤挙動の特徴は何か、などを中心にして行う。

2. 橋とトンネルはどう違うか

構造物を作る場合、「材料」特性としての弾性係数や強度などと、その構造物に作用する「荷重（外力）」の大きさが必要である。鉄橋を造る場合（図1a）の材料は人工材料である鉄材であり、弾性係数は210 GPa（210万 kg/cm<sup>2</sup>）、強度は500 MPa（5000 kg/cm<sup>2</sup>）などと明確で、荷重の大きさは列車とか自動車などの重量でこれもまた明確である。したがって、橋梁の部材に発生する応力の大きさも明らかで、その応力が鋼材の強度を超えないように部材の形状などを決めて作ることになる。

一方、トンネルを作る場合、掘ったままの素掘りトンネル（図1b）を例に考えてみると、その主たる材料は岩盤であり、外力（荷重）は岩盤の自重などによる荷重や地殻変動による応力（地圧と呼ぶ）である。材料と荷重が不可分という特徴を有し、さらに天然材料の岩盤特性にはバラツキなどが伴い、荷重となる地圧の測定は容易で



(a) 鉄橋の材料と外力

(b) 素掘りトンネルの材料と外力

図1 材料は何か、作用する外力は何か

\* (財) 電力中央研究所 名誉特別顧問

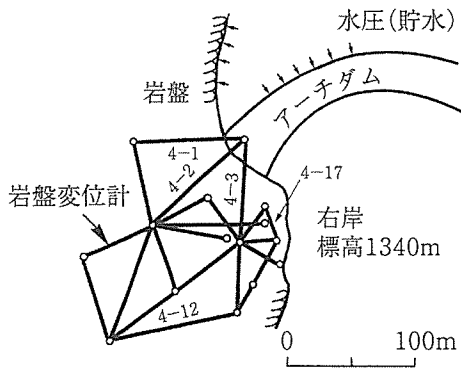


図2 貯水による岩盤の変形を計測する岩盤変位計の配置例（黒部第四ダム）<sup>1)</sup>

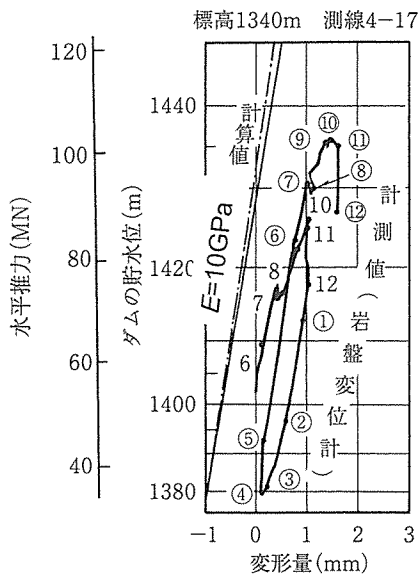


図3 貯水の変化に伴う岩盤変形の実測例<sup>1)</sup>

はない。材料特性と外力の大きさの両方に不確かさがあるのが第二の特徴である。つまり、構造物を作るという点では同じであるが、その内容では大きく異なってくる。以下に岩盤特性、地圧の大きさなどについて述べる。

### 3. 「材料」となる岩盤はどんな性質か

#### (1) 岩盤の弾性係数 $E$ は不定（サイズ効果）？

黒部第四ダムの建設時に岩盤の中に岩盤変位計を埋設しておき（図2）、貯水とともにダム岩盤がどのように変形するか調べられた。その計測結果から岩盤の弾性係数を求めることができ、約 10 GPa (10万 kg/cm<sup>2</sup>) という値が得られた（図3）。一方、建設に先立って行われた平板載荷試験（図4）では、弾性係数の値としては 2.4～3.0 GPa (2.4～3.0万 kg/cm<sup>2</sup>) が得られている。両者のあいだには 3～4 倍の違いがある。平板載荷試験で

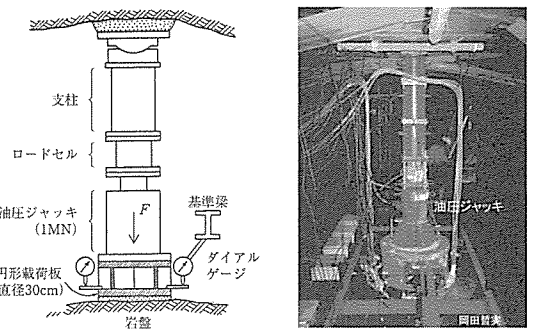


図4 平板載荷試験（載荷面積：0.07 m<sup>2</sup>）の概念と現場写真

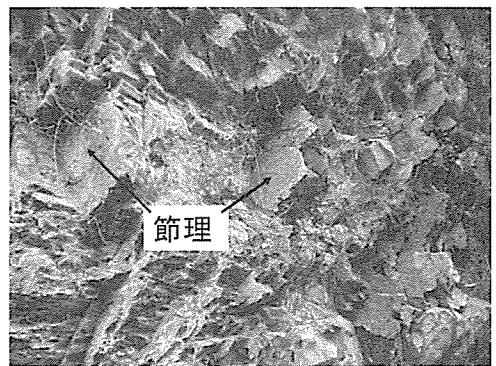


図5 道路沿いの岩盤斜面の節理（キレット）

は直径 30 cm 程度の載荷板で岩盤表面を油圧ジャッキで押しつけ、その時の岩盤の変形量とジャッキの荷重の大きさから岩盤の弾性係数を求める。載荷板の面積は約 0.07 m<sup>2</sup> である。一方、先述のダム基盤の岩盤変形を考えると、ダムが岩盤に接する面は 1000 m<sup>2</sup> 単位の面積である。したがって、両者の弾性係数の違いは「載荷する面積の大きさ」によって異なったものと考えられる。この現象はサイズ効果と呼ばれ、その原因としては岩盤の有する節理やき裂の影響が考えられている。

節理の一例を図5に示す。節理は岩盤の生成時や地殻変動時などに自然に生じたキレットである。掘削時の発破などでできた人工的なキレットは節理とは呼ばない。節理の大きさは数 cm から約 1 m 程度などと様々で、岩盤の表面のみならず岩盤の内部にわたっても存在している。つまり、岩盤は連続してはいるが鉄材などのような完全な連続体ではなく、「不完全な連続体」である。

岩盤の弾性係数はサイズ効果があるため、岩盤構造物をつくるときにはその構造物の大きさに見合った規模の載荷試験から弾性係数を求める必要がある。しかしながら、ダムの場合などのように、大きな規模の構造物に匹敵する載荷試験で弾性係数を求めることは通常は困難で、先述の簡便な平板載荷試験を行っているのが現状で

ある。この場合弾性係数は小さめの値が得られるので、設計としては安全側の設計となる。

(2) 山は流れる

平板載荷試験で岩盤に油圧ジャッキで荷重をかける瞬間的に岩盤が変形する（その変形が弾性変形で  $We$  で表す）。荷重をそのまま一定に保持すると、岩盤は時間の経過とともに変形がさらに増大し、この現象をクリープ現象という（その変形をクリープ変形  $Wc$  という）。クリープによって生じた  $Wc$  の値と弾性変形  $We$  との

比 ( $Wc/We$ ) をクリープ係数  $a$  と呼ぶ。岩盤の種類によって  $a$  の値は異なるが、これまでの計測結果では 0.1 ~ 1.0 程度である。1.0 というのは、弾性変形してからさらにクリープで弾性変形量と同じ程度の変形が進行することを意味している。掘削すると構造物に外力（荷重）が作用するが、そのあとで時間とともに荷重が増加することがあり、この現象を「あと荷」が作用するという。このあと荷の現象が起こる要因の大きなものの一つがクリープ変形であり、このクリープ変形を岩盤構造物の設計では見落とさないことが重要である。

クリープ現象の実験を30年間という超長期間実施した例が図6である。花崗岩のビーム（長さ215cm、幅12.3cm、厚さ6.8cm）を2本横たえて、1本には中央に約221N（22kg）の荷重をかけ、もう1本には荷重をかけないで、たわみによるクリープ変形を観察した。

図7がその結果で、30年経っても変形は収束していない。この結果から花崗岩はごく小さな荷重で流動（粘性流動）するという結論が得られた。このことは、現在山となっている岩盤も長時間経てば流動して平らになろうとするわけで、山も流れることになる。逆に、わずかな力が岩盤に作用すれば、岩盤は長時間経てば褶曲して、その結果を我々は道路際などで岩盤褶曲として見ることになる

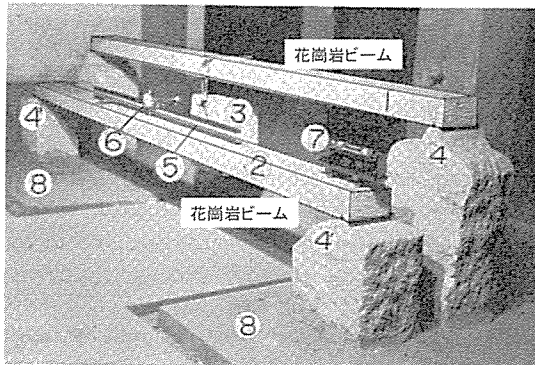


図6 30年にわたる花崗岩ビームのクリープ実験<sup>3)</sup>

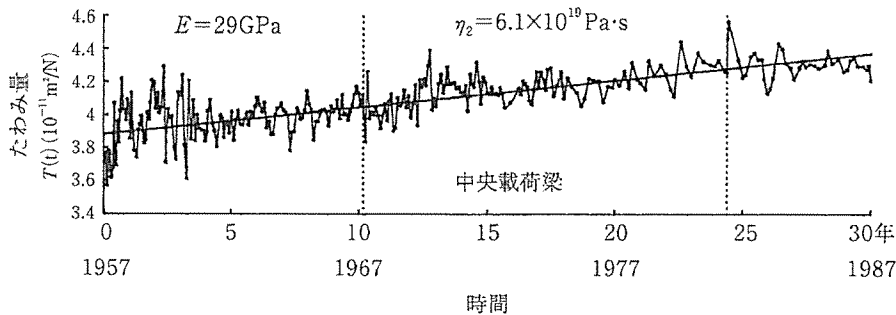


図7 30年にわたるクリープ実験の結果<sup>3)</sup>

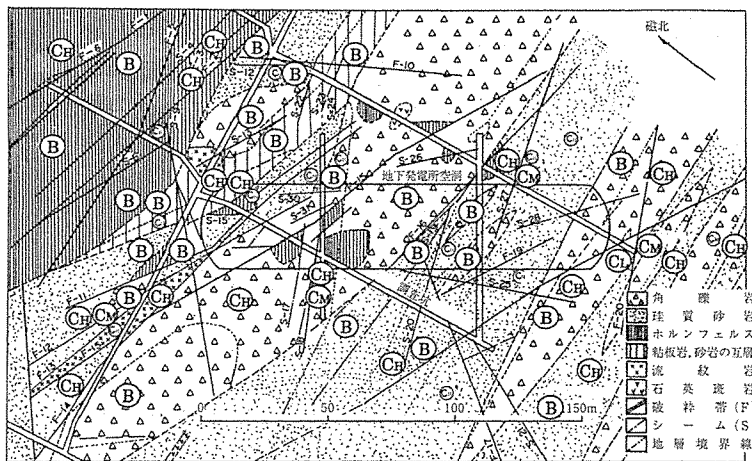


図8 地下発電所空洞周辺の地質平面図<sup>4)</sup>

し、積みも積もってヒマラヤ山脈を形成することになる。

(3) 日本の岩盤はモザイク模様

図8は揚水地下発電所空洞周辺の地質平面図である。地質図は岩盤がどのような種類の岩盤でできており、岩盤の風化度の程度や断層などの有無などを示したもので、岩盤構造物を作るときの基本資料である。

電力の使用量は昼間がピークで夜間は少ない。そこで昼間に高いところにあるダムから水を落として水車で発電機を回して発電して供給し、夜間には、余った電力を逆に発電所へ送って発電機をモーターとして水車を逆回転させ、低いところにあるダムの水を高いところのダムへ汲み上げておくのが揚水地下発電所である(図20参照)。この発電所は山中の地下空洞の中に作られる。

図8を見ると岩盤の種類としては、角礫岩、珪質砂岩、ホルンフェルス、などと6種類の岩盤がある。図中丸印の中にB、C<sub>H</sub>、C<sub>M</sub>などの記号があるが、これらは岩盤の風化度を示しており、B、C<sub>H</sub>、C<sub>M</sub>の順により風化が進んでいることを意味する。この図から、わずか約200m四方の領域であるにもかかわらず、6種類の岩盤、

風化度では3種類、したがって、弾性係数でみれば約18種類も違う岩盤から構成されていることになる。さらに破砕帯や断層が何本もある。したがって、全体の岩盤は非常に不均質で、まさに「モザイク模様」になっていることが分かる。地下発電所空洞は、このように不均質な岩盤の中に建設されることになる。

日本の岩盤はこれまでの活発な地殻変動で非常に複雑で変化に富んでおり、岩盤構造物の建設を困難なものとしている。一方、鉄橋の材料となる鉄などは弾性係数は一種類である。

(4) 等方性の中の異方性

木材や竹などは繊維の方向と直交する方向で弾性係数が異なり、異方性を有すると言われる(図9)。岩盤も砂岩などの堆積岩では、堆積した粒子が層状となっており、そのために層の方向と直交する方向とで弾性係数が異なり、異方性を示す。お墓の墓石にはみかげ石とも呼ばれる花崗岩がよく使われているが、この花崗岩は長石、石英や雲母などの結晶が均等に混ざって、一見等方性に見えるが、場合によっては節理のために異方性を示すのでややこしい。

墓石は寸法が小さいので節理を含んでいないが、空洞などを建設する場合には領域が大きいため、花崗岩の岩盤の中にも節理がたくさんある(図10 図中、節理は強調して表現)。節理が仮に200個ある場合に、その内の180個は節理の方向がまったくランダム(図10b)だったとすると、これらの節理の影響は岩盤の弾性係数や強度の低下として作用する。残りの20個の節理(図10c)が同じ方向を向いて場合、それらは卓越節理と呼ばれ、 $20/200=0.1$ で卓越度は10%であるという。この卓越節理が原因となって花崗岩に異方性が生じることがある。

図10に示す岩盤の場合、この岩盤が異方性を示すか否かは岩盤構造物の規模との関係で決まる。つまり岩盤構造物が十分に大きくて、その構造物を作ったために周辺岩盤が変形する領域(掘削影響領域と呼ぶ)の中にある卓越節理の個数が統計的に有意な場合にはじめて異方性が生じる。空洞A(例えば断面積が1000m<sup>2</sup>にもなる巨

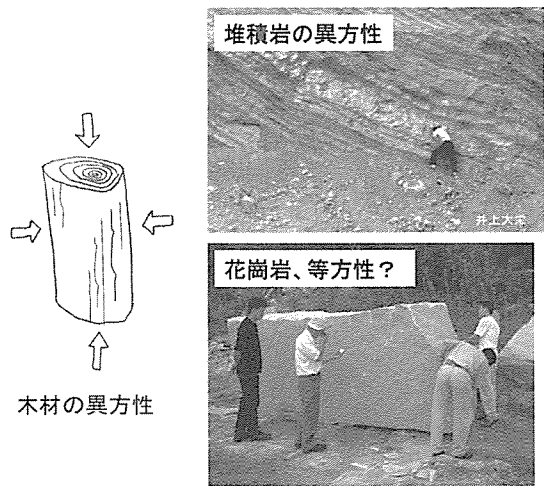


図9 異方性材料，花崗岩は一見等方性に見える

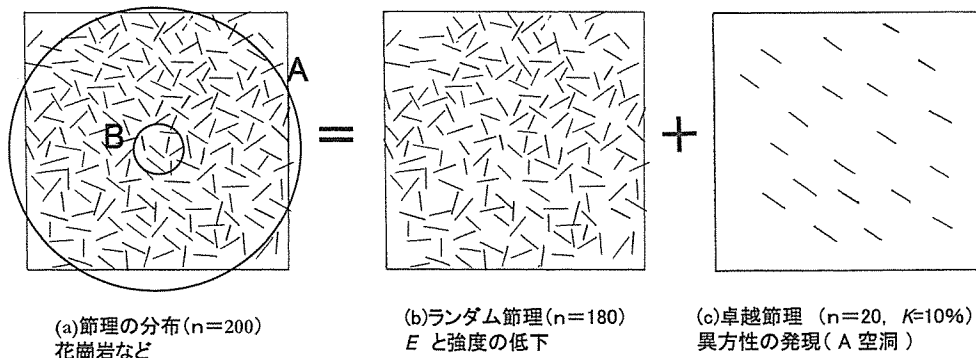


図10 卓越節理があると、花崗岩などは場合によって異方性を示す



大な地下発電所空洞などを掘削する場合に、掘削影響領域が大きいのでその領域に含まれる卓越節理の個数が統計的に有意となり、空洞の変形は岩盤の異方性の影響を受けることになる。他方、その同じ岩盤に小さな空洞B（例えば断面が100m<sup>2</sup>程度のトンネルなど）を掘削しても岩盤は異方性を示さないことがある。つまり、空洞Bを掘る場合にその掘削影響領域は小さく、その領域に含まれる卓越節理の個数は少なくなり、ランダムな節理と同等となるので空洞Bを掘削しても岩盤は等方性として挙動する。同様な理由で、図10aの岩盤の弾性係数を平板載荷試験によって求めると、載荷板で変形する領域は非常に小さいので、方向を変えて試験しても岩盤の異方性は検知できない。

節理の卓越度が大きいと岩盤の異方性も大きくなるものと思われるが、その関係はほとんど調べられていない。ただ、これまでの経験から判断すると、節理の卓越度が10%程度で異方性の大きさは2程度、つまり、卓越節理の方向と直交する方向とで弾性係数は2倍程度異なる。したがって、花崗岩など節理の発達した結晶質系の岩盤で空洞を掘る場合には、空洞の配置と卓越節理の方向に注意を払う必要がある。そこで、卓越節理のために岩盤が異方的な挙動を示した例をつぎに示す。

岩盤が等方性の場合には、外力（地圧）の作用する方向を考慮して空洞の配置を決める。図11の空洞Aの場合、岩盤が等方性ならば空洞の壁面に作用する地圧は1.0σ<sub>0</sub>である。空洞Bの場合は壁面に2.0σ<sub>0</sub>が作用するので空洞Aよりも力学的に不利である。つぎに、岩盤が先述の花崗岩などの場合のように卓越節理がある場合には、地圧以外にこの卓越節理の方向を考慮する必要がある。

卓越節理が図11に示すような方向をしている場合（図では卓越節理のみを強調して示しており、ランダムな節理は省略している）、空洞Aの場合壁面に作用する外力は1.0σ<sub>0</sub>であるが、壁面が変形する方向の弾性係数は0.5E<sub>0</sub>である。一方、空洞Bの場合、壁面に作用する外力は2.0σ<sub>0</sub>であるが、壁面が変形する方向の弾性係数は1.0E<sub>0</sub>である。外力と弾性係数が相殺し合って空洞AとBとで違いが無いように思われるが、卓越節理が強度などにも影響するのか、卓越節理の影響は予想外に大きい

ことが次の実測結果から分かる。

図12には同じ種類の花崗岩の二つの地点で建設した空洞変形の計測結果を示す。No.8地点では地圧の作用方向を中心に考えて空洞を配置しており、卓越節理の方向と空洞壁面の交角が3度で、ほぼ平行になっていた。壁面に作用する地圧はσ<sub>30</sub>=7.5MPa（75kg/cm<sup>2</sup>）で、掘削によって生じた壁面の水平方向の岩盤変位は18~50mmであった。違う標高の壁面では場所によっては120mm程度も変形するところもあり、掘削中は空洞の安定性にヤキモキしたが、空洞掘削は無事終了した。

そのあと三年後にNo.14地点で空洞を掘ることになった。この地点でも作用する地圧を中心に考えたので、空洞壁面と卓越節理の方向が同じような方向を向いて当初計画されていた。そこで、No.8地点の経験を生かして空洞の方角を20°程度変更して配置を決め、交角は63°となった。空洞掘削終了時の岩盤変形は図に示すように、壁面の岩盤変形では7~30mmであった。壁面に作用する地圧はσ<sub>30</sub>=18.5MPa（185kg/cm<sup>2</sup>）とNo.8地点の場合に比較して約2.5倍、弾性係数は17.9GPa（17.9万kg/cm<sup>2</sup>）でNo.8地点の7.5GPa（7.5万kg/cm<sup>2</sup>）の2.4倍あった。最大変形で比較すると30/50=0.6で4割減となり、卓越節理の影響は非常に大きいことが分かる。

先述したように、平板載荷試験ではこのマクロな異方性は検知できないので、岩盤の広範囲な領域にわたって

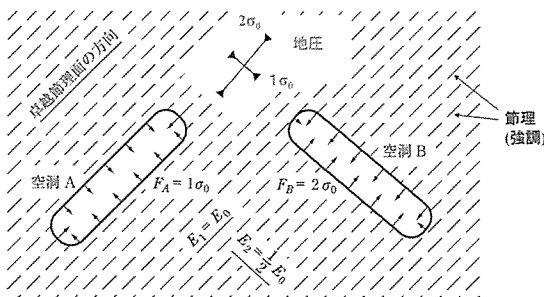


図11 空洞配置と卓越節理・地圧との関係（平面図）

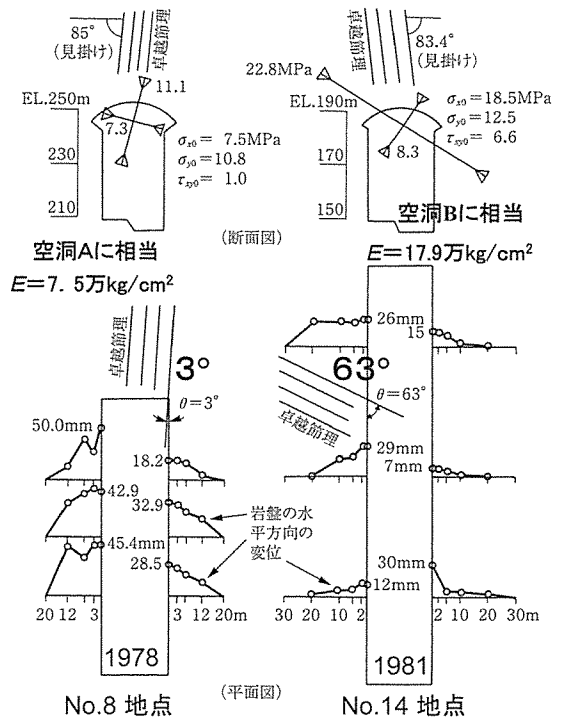


図12 岩盤の異方的な変形挙動：卓越節理の方向と空洞壁面との交角により壁面の変形が大きく異なる

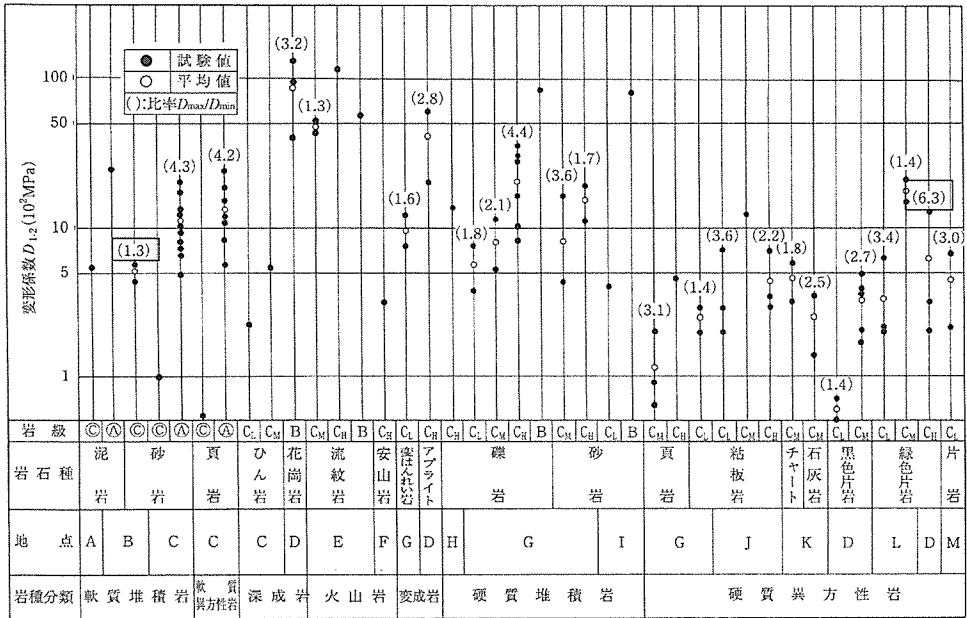


図13 岩盤の変形係数のバラツキ<sup>5)</sup>

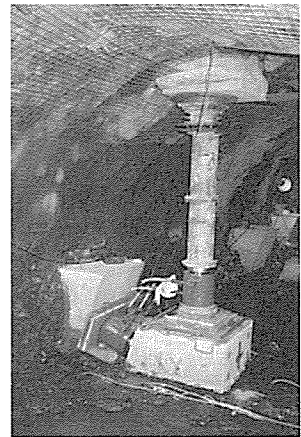
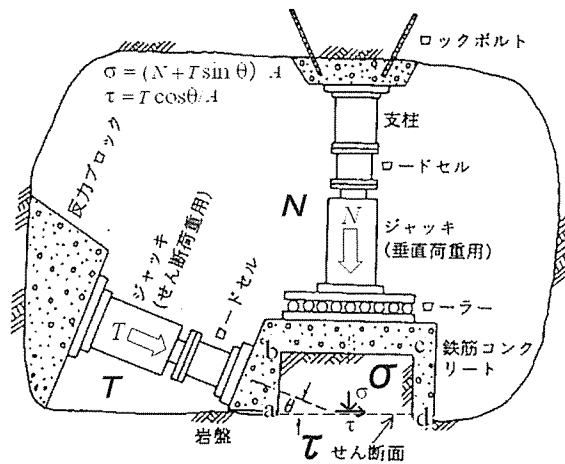


図14 岩盤せん断試験の概念と現場での写真

節理調査を行い、卓越節理があるか否か、あればその卓越度は如何ほどかを事前に調べておくことが肝要となる。  
(5) 岩盤の不確定性—大きなバラツキ

岩盤は天然の産物であるので常にバラツキがついてまわる。平板載荷試験で弾性係数を求めても必ずバラツキがある。バラツキというと標準偏差はいくつかなどと通常なるが、平板載荷試験では一種類の岩盤について位置を変えて3~5点程度しか行わないので、標準偏差などを求めることができない。そこで、同一岩盤で得られた変形係数(平板載荷試験で、荷重を階段状に増大していった時の荷重-変形曲線の包絡線から求めた係数)の最大値と最小値との比を調べてみる。図13の( )内の数

字がその比率を示している。小さいもので1.3、最大では6.3、平均で2.8程度となっている。通常は平板載荷試験で得られた値の平均値を設計に用いるが、バラツキが大きい場合には、そのバラツキを考慮して設計する必要がある。

(6) 岩盤はどれだけ強い—強度を求める

岩盤の強度を求めるには、現場で岩盤せん断試験を行う。図14に示すように60cm四方で高さ40cm程度の岩盤(abcd)を切り出して、回りを鉄筋コンクリートで保護し、鉛直荷重Nをかけた後にせん断荷重Tを作用させて、根元のところ(図中ad面)でせん断破壊させて強度を求める。この試験の欠点は図15に示すようにせん断面の応力が均一でないことである。せん断荷重T

を作用させる側の応力が高く、そこから破壊が逐次進行することになり、実際の強度よりも過小評価することになる。せん断強度という基本特性を知るためには、せん断面の応力が均一であることが必要である。岩盤三軸試験を行えば破壊面の応力は均一となり理想的であるが、岩盤せん断試験に比べて費用が高く、通常は岩盤せん断試験で済ませることが多い。この場合岩盤強度を過小評価することになるので設計としては安全側となる。

4. 「外力」となる“地圧”はどんな特徴があるのか

岩盤のある一点Pを考えると、上下方向にはP点より上方の岩盤の重さが作用し、これが鉛直地圧となる。鉛直地圧のために岩盤は上下方向に変形するとともに水平方向にも変形しようとするが、周辺の岩盤に拘束されているので水平方向に押し合い状態となり水平地圧を生

じる。このP点にトンネルを掘ると、トンネルには鉛直地圧と水平地圧が外力として作用する。さらに地殻が地球規模で変動しておりそのために主として水平方向に発生した地圧が加わることになる。

(1) 強い者は耐えねばならぬ

青函トンネル調査坑のB9で地圧測定が行われた(図16)。測定した場所は図に示す点線の円形部分でせいぜい20m四方の狭い範囲であったにもかかわらず、測定された地圧の値にはバラツキが大きかった。その原因を種々調べた結果、測定した位置の岩盤の固さがバラツキの原因であることが判明した(図17)。狭い範囲の測定ではあったが岩盤の固さが変化しており、整理し直すと硬質岩盤のところで測定した地圧は約8MPa(80kg/cm<sup>2</sup>)であり、軟質岩盤のところでは約4MPa(40kg/cm<sup>2</sup>)の値が得られた。固い岩盤では、強いがために軟らかい岩盤の部分の地圧までも耐えて頑張るため

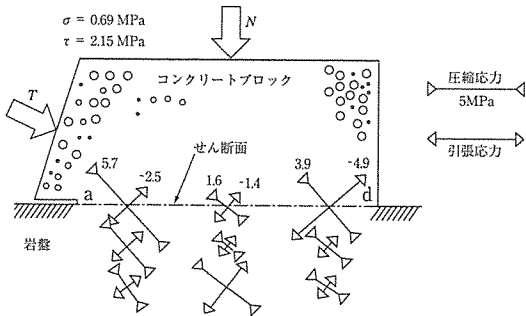


図15 せん断面上の応力は一様になっていない<sup>6)</sup>

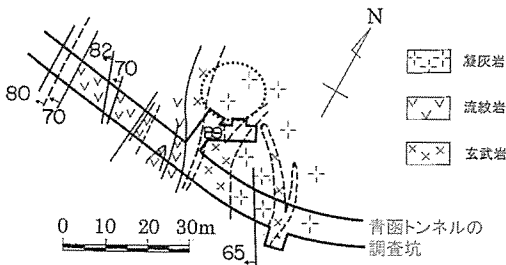


図16 地圧の測定位置B9(青函トンネル調査坑)<sup>7)</sup>

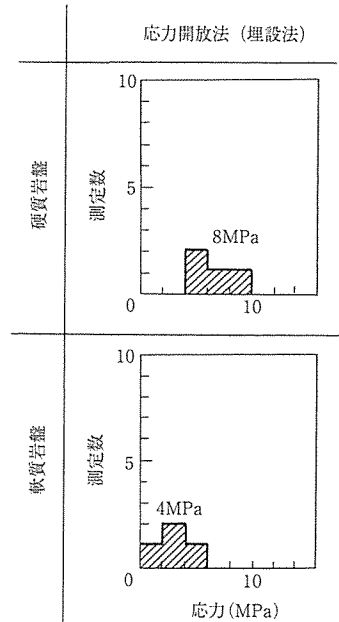


図17 岩盤の硬軟により地圧の大きさが異なる<sup>7)</sup>

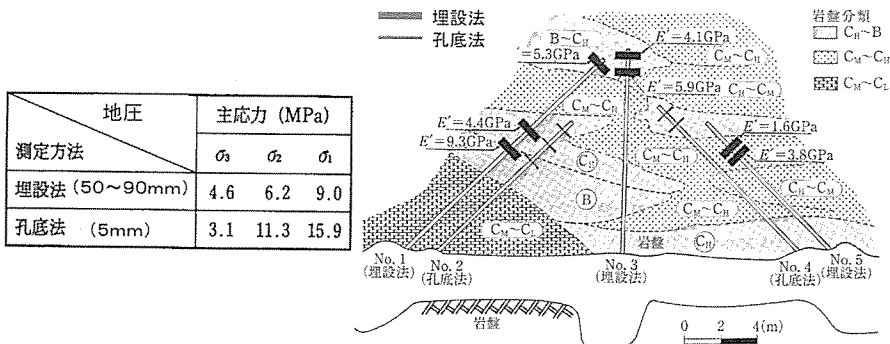


図18 地圧測定に用いるゲージの大きさが地圧の大きさが異なる<sup>7)</sup>

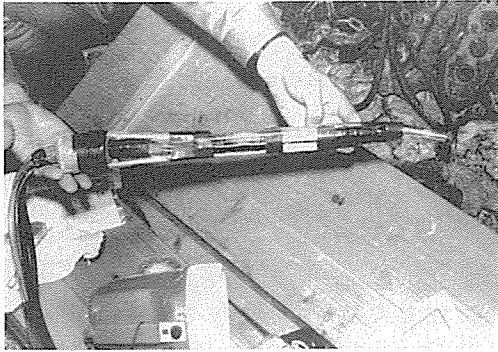


図19 埋設法で用いるひずみ計の外観

に、このような現象が起こったものと考えられる。日本の岩盤はモザイク模様と先ほど述べたが、モザイク模様の岩盤では地圧の大きさもモザイク模様に変化して分布していることになる。

#### (2) ゲージの大きさで地圧が異なる (サイズ効果)

図18は別の地点での地圧の計測位置を示している。この地点では地圧計測に埋設法と孔底法が用いられた。埋設法ではひずみゲージをボーリング孔の中にモルタルなどで埋設し、孔底法ではボーリング孔の孔底にゲージを添付して地圧を計測する。その結果は図18に示すように、最大地圧  $\sigma_1$  で比較すると、埋設法では 9.0 MPa (90 kg/cm<sup>2</sup>)、孔底法では 15.9 MPa (159 kg/cm<sup>2</sup>) となった。同じ位置で測ったにもかかわらず計測法の違いによって約 1.8 倍の違いがある。このように同じ位置で違う手法により地圧を測って比較した例は極めて少なく、今後さらにデータを集めて検討する必要があるが、この相違の原因の一つは使用するゲージの大きさが影響しているのではないかと考えられる。図19には埋設法で用いるひずみ計の外観を示している。このひずみ計では、軸方向には 90 mm の長さのゲージを、半径方向には 50 mm のゲージを使用している。一方孔底法で用いているゲージの長さは 5 mm である。岩盤の中にはいたるところに節理があり、埋設法ではゲージの長さが大きいために節理を含んだ状態での岩盤の地圧を測る可能性が大きいのにに対し、孔底法では節理の影響がより少ない岩盤の地圧を測っている可能性がある。いわば 'ゲージのサイズ効果' の影響ではないかと考えられるが、詳細については今後の研究を待つ必要がある。

これまで述べてきた材料としての岩盤と、外力としての地圧の特徴を、まとめると表1のようになる。岩盤はモザイク状の非均質で、節理等のために不完全な連続体である。弾性係数は試験時の載荷面積の大きさで変化するサイズ効果を示し、さらに得られた結果はバラツキが大きい。花崗岩は一見等方性に見えるが、節理が卓越していると掘削する空洞が大きい場合には異方的に挙動する。しかし空洞の規模が小さいと同じ岩盤なのに等方性

表1 トンネルと鉄橋の材料と外力の違い

|       | トンネル   | 鉄橋                      |
|-------|--|-------------------------|
| 材料:   | 岩盤(天然)                                       | 鉄(人工)                   |
|       | 非均質(モザイク模様)<br>不完全な連続体(節理、断層など)<br>異方性       | 均質<br>完全な連続体<br>等方性     |
| 弾性係数: | サイズ効果(3~4倍)<br>クリープ係数(0.1~1.0)<br>バラツキ(2~3倍) | 一定(サイズ効果なし)<br>ない<br>ない |
| 強度:   | 過小評価 バラツキ                                    | ない                      |
| 外力:   | 地圧(天然)                                       | 車両などの重量(人工)             |
|       | 不確か<br>硬軟、サイズ効果(2~3倍)<br>あと荷                 | 明確<br>ない<br>ない          |

として挙動するのでややこしい。岩盤の強度は通常用いられる岩盤せん断試験では実際の値より過小評価をしている。それに対し、鉄橋の場合には材料としての鋼材は人工材料であるため弾性係数は一つ、強度も正確に求め、バラツキなども無いのが特徴である。

外力も岩盤の場合には岩盤の硬軟により地圧は変化し、用いるゲージの大きさでも異なった値となる。橋梁の場合にはその外力は列車などの重量で明確である。

以上で見たように、岩盤の材料特性および外力となる地圧の値の両方が不明確な状態で、トンネルや空洞を掘削して地下構造物を建設してゆくことになる。

### 5. 岩盤はどのように動くか

図20には揚水地下発電所空洞の建設中の写真と揚水発電の概念などを示す。写真中の人の大きさと比較すると空洞の大きさがよく分かるが、高さは約 50 m、幅は 25~30 m、奥行きは 50~200 m である。新幹線の複線断面のトンネルは直径が約 10 m で、断面で見ると地下発電所空洞は新幹線複線トンネルの約 20 倍の大きさである。このような規模の空洞が北は北海道から南は九州にわたって 20 個以上建設されている。これら空洞を掘削するときに観察された岩盤挙動の特徴を以下に示す。

#### (1) 連続の中の不連続

地下発電所空洞を掘削するとき空洞周辺岩盤がどのような挙動をするのかを No.6 地点 (図20, 右下図参照) で調べた。図21に示すように、空洞掘削開始まえに周辺の排水坑から予定空洞壁面までボーリング孔 (図中 A, B 間) を削孔しておいて、ボアホールテレビ (BTV) でボアホール孔の壁面を観察した。BTV は胃カメラみたいな小型の TV カメラで、孔壁を観察する装置である。そして、空洞掘削の進行とともに岩盤の中の既存の節理が開く現象が観察された (図21右の BTV による孔壁写真)。さらに閉じていた節理あるいは新しく節理が発生して開くことも分かった。これらの節理が開くと岩盤は水平方向にも変形するので、空洞壁面が水平方向に変形することになる。そこで開口した節理の水平方

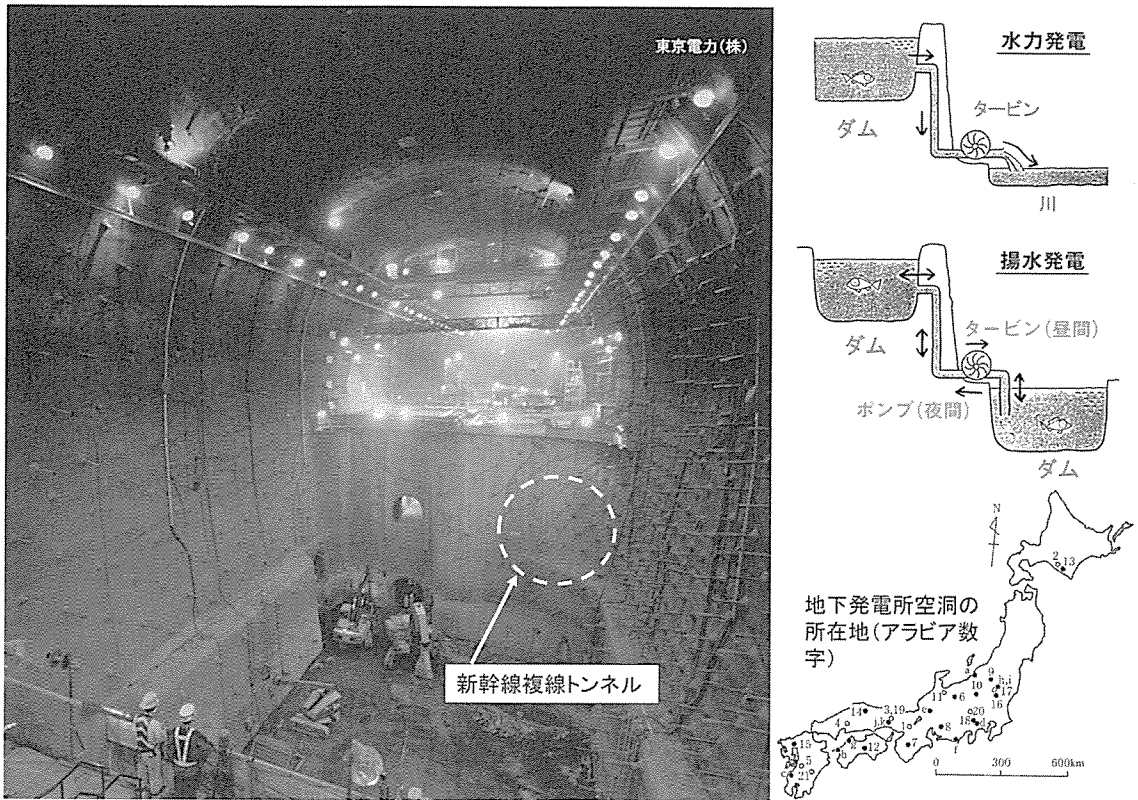


図20 揚水発電の概念, 地下発電所地下空洞の規模と所在地

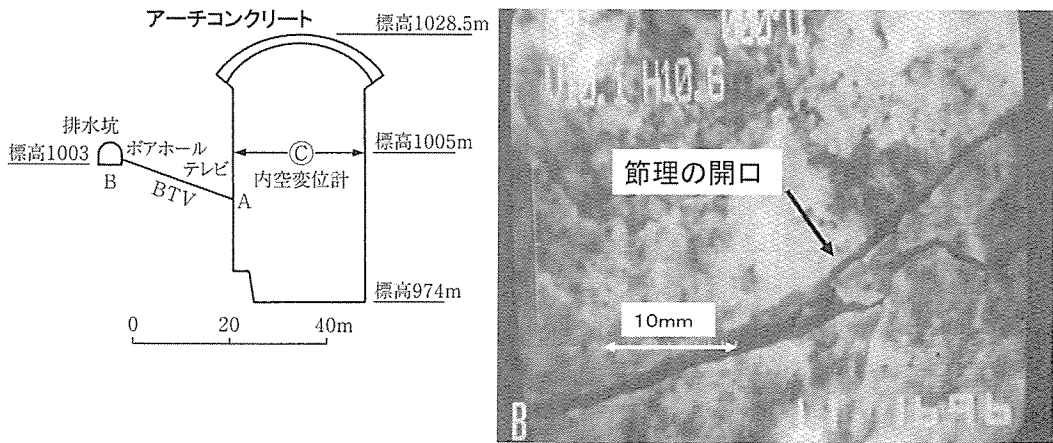


図21 ボアホール TV による岩盤内部の観察と節理の開口 (No.6 地点)

向成分の累計値を調べてみると、掘削終了時でボーリング孔 AB の間で 24 mm であった。岩盤の変形については図21に示すように、BTB とほぼ同じ標高に内空変位計◎を設置して壁面の水平方向の岩盤変位を測っていた。その内空変位計で測った岩盤の水平変位は 37 mm であった。岩盤の変形は排水坑よりも遠い位置でも生じている可能性があるが、その量は小さいと考えられる。したがって、 $37 - 24 = 13 \text{ mm}$  は掘削にともなう岩盤応力

の変化によるひずみ変化で生じた変位ということになる。

上記の計測と観察から、岩盤の変形は外見上は連続に見えるが、詳細に見ると、開口変位とひずみ変位からなっていることが分かる。つまり、

「岩盤の全変位」=「開口変位」+「ひずみ変位」。

岩盤が崩壊し始めればクラックが発生して開口変位が生ずることは十分考えられるが、空洞が安定している状況でもこのような開口変位が発生するとは予想外であった。

開口変位と全変位との比率（開口変位/全変位）を開口変位率  $k$  と呼ぶと、この No. 6 地点では  $24/37=0.65$  となり、開口変位の方がひずみ変位よりも大きいことが分かる。この比率  $k$  を他地点の地下発電所空洞について調べてみると、表 2 の結果が得られた。花崗岩や花崗閃緑岩などの結晶質岩系の地点では 0.6 以上と大きくなるのに対し、堆積岩系の岩盤では 0.2 程度と小さい。測定データが少なく、今後データを増やしてさらに検討をする必要があるが、結晶質岩系の岩盤ではもともと節理が発達し易いのに対し堆積岩系の岩盤では節理が比較的少ないために、このような違いが出たのではないかと考えられる。

(2) 岩盤の種類により構造物に発生する応力が違う

図 22 は地下発電所空洞のアーチコンクリート（図 21 の空洞天井部をアーチと呼び、そこに打設したコンクリートをアーチコンクリートという）の平均応力と空洞の長さとの関係を示している。図 22 の丸印の中の数字は地点番号（図 20 右下図参照）である。空洞掘削に伴い増大するアーチコンクリートの応力を計測する目的で、アーチコンクリートには 3~5 断面に、一断面で約 10 個程度の応力を測定するゲージが埋設されている。それら 30~50 個のゲージの空洞掘削により生じた応力の平均値を丸印は示している。結晶質岩系の岩盤地点での結果は白丸印で、堆積岩系の地点は黒丸印で示されている。この図より岩盤の種類によって傾向が大きく異なることが分かる。つまり、結晶質岩系の岩盤地点の応力は堆積岩系の岩盤の地点に比べて、2~3 倍の応力が生じていることが分かる。

地点毎に岩盤の弾性係数、地圧の大きさなどが違いー

表 2 開口変位率  $k$  は結晶質岩系で大きく、堆積岩系で小さい

| 地点     | 岩盤の成因区分     | 岩盤変位 (mm) | 開口変位 (mm) | 開口変位率 $k$ |
|--------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| 6 STS  | 結晶質岩(花崗岩)   | 37        | 24        | 65%       |
| 21 OMG | 結晶質岩(花崗閃緑岩) | 59.4      | 36        | 61%       |
| 7 OYN  | 堆積岩 (頁岩、砂岩) | 20        | 4.5       | 23%       |

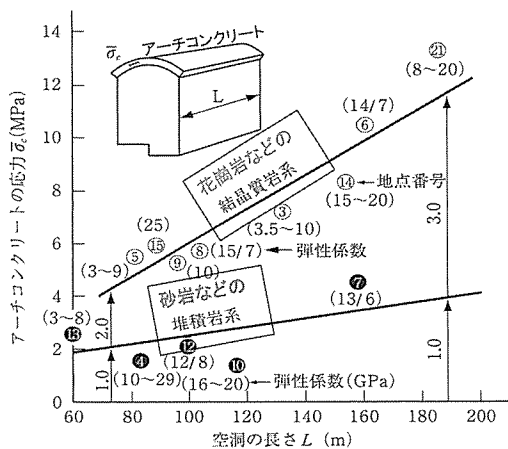


図 22 岩盤の種類により構造物に発生する応力が違う

概には言えないが、この原因は表 2 に示した開口変位率  $k$  の違いであろうと考えられる。つまり、結晶質岩の開口変位率は堆積岩系の場合の約 3 倍の値となっており、この違いがアーチコンクリートの応力の違いになったものと考えられる。このことは、大規模な空洞を建設する場合、弾性係数や地圧がほぼ同じ地点があるならば、結晶質系の岩盤よりも堆積系岩盤の地点に建設した方が空洞の安定性は優れていることを意味していると考えられる。

(3) 岩盤構造物の設計は「応力」ではなく、「変形」に基づいて設計

図 23 は図 22 のデータを岩盤変位との関係で整理し直したものである。アーチコンクリート直下の岩盤の水平変位とアーチコンクリート応力とはきれいな比例関係を示している。このことは、周辺岩盤が空洞掘削によって水平方向に変形するためにアーチコンクリートの応力が生じることを意味している。むかしから地中構造物を設計するときは、応力よりは変形を中心に設計する必要がある、と言われてきたが、この図はまさにそのことを示している。

ともすれば応力中心で考えたいが、それは応力ーひずみが線形関係にある弾性体の世界での話、「山が流れる」、「あと荷」が作用するような世界では変形がまずありき、ということになる。

## 6. 分からないことが分からない？

### ー情報化設計施工ー

天然材料の岩盤、その岩盤の自重や地殻変動に起因する地圧、これまた天然現象。自然を相手とする地下空間、地下構造物の構築等々、長年関わってきても分からないことが多いが、その分からないことにも二種類あるように思われる。つまり、

「分からないこと」=

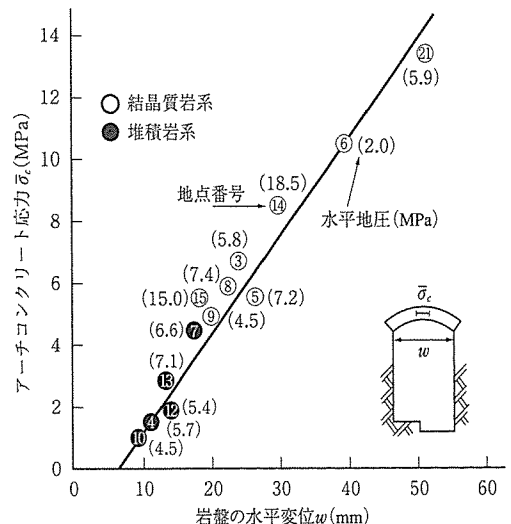


図 23 岩盤構造物の設計は「応力」よりは「変形」に基づいて行う



基礎岩盤の安全率  $f = 4.0$



堤体の安全率  $f = 1.2$

図24 コンクリート重力ダムとロックフィルダム<sup>8)</sup>

「分からないことが分かっている部分①」 +  
「分からないことが分からない部分②」.

前半の分からないことが分かっている部分は、分からないことが分かっているのだから、研究などによってそれを明らかにすることができる。完全に解明できない場合には「安全率」を大きくすることにより、危険性を小さくすることもできる。ただし、日本語の特性上、人工材料と天然材料とは同じ安全率の意味合いが大きく異なるので注意を要する。

つぎに、後半の分からないことが分かっている部分は、その存在が我々には分からないのだから、手の施しようが無い。ではどうしてその存在がわかるかという、ひとつには、事故などが起こってはじめてそのことが分かる。その一例として土木関係ではマルパッセダムの崩壊が、航空機関係ではコメット機の空中分解などがある。

(1) 安全率3は2よりも安全か

図24はコンクリート重力ダムとロックフィルダムの写真である。重力ダムを支える基礎岩盤の安全率は4.0と規定されており、石と土を突き固めて作るロックフィルダムの堤体の安全率は1.2とダム設計基準に書かれている。単純に考えると重力ダムの方がロックフィルダムより安全なように思われるが本当にそうだろうか。

日本語は四季折々豊かな自然にはぐくまれた美しい言葉だと思いが、ややもすれば情緒を重んじるばかりに曖昧さが残る。ここでの安全率という言葉も、その一つではないだろうか。

ダムの基礎岩盤にしる、フィルダムの堤体にしる、ともに天然材料であり、バラツキが伴う。このバラツキをどれだけ少なくできるかの違いが4.0と1.2の違いではないかと思われる。つまり、フィルダム堤体の材料となる石や土は採取する場所によりその材料が悪ければより良いものとブレンドして品質を一定にし、バラツキを小さくすることができる。一方、ダムの基礎岩盤はモザイク状に不均質である。弱部があればコンクリートで置き換えるなどして改良することができるが、フィルダム材料

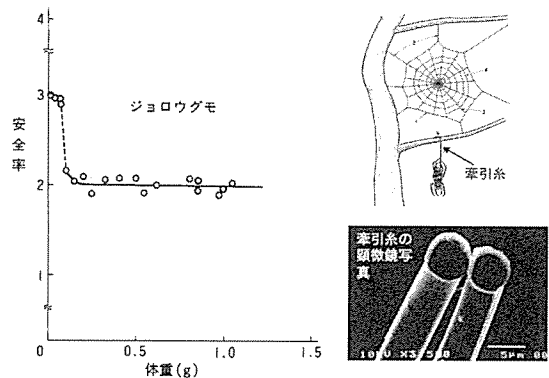


図25 クモも安全率を知っている<sup>9)</sup>

に比べれば岩盤の深部や広がりなどを考えると均質化はむづかしく、「不確かさ」が残る。この違いが4.0と1.2の違いとなって表れたものと思われる。この不確かさにはバラツキ以外に節理や不連続面の影響なども入ってくる。

工業材料の場合、人工材料であるのでバラツキは天然材料に比べて極めて小さくできるので

人工材料（スチール等）の安全率 = 材料の強さ/応力であり、エレベータをつり下げる重量の5倍の強度を持つワイヤーで設計すれば安全率は5となる。しかし、天然材料の場合には、そのバラツキなどの不確かさを考慮せざるをえなく

天然材料（岩盤など）の安全率 =

(材料の強さ + 不確かさ) / 応力

となっていると考えられる。この場合、安全率という言葉は適切ではない。ある文献で安全率の代わりに「無知率」という用語を用いたいという主張を見たことがあるが、日本語の雰囲気として無知率は受け入れられそうにない。安全率というよりは「所要係数」などと呼ぶ方が適していると思うがどうだろうか。

クモの糸は天然材料だが、人間の世界と違ってその安全率は本物である。クモは巣を張って獲物を捕らえるが、

自分がぶら下がる糸を牽引糸という。その安全率は図25に見るように2となっている。牽引糸が細ければちぎれて自分が地面に落ちてしまうし、太くして安全率を大きくすれば体力が消耗する。その丁度いい頃合いが安全率2と思われるが、まず2というきれいな整数であるのに驚きを感じる。さらに、小さい子供の頃はヤンチャでムチャをするからか、安全率を3にしておき、長じては2にするとほ！ 自然界の精緻な仕組みに感嘆の言葉もない。さすが4億年の歴史を持つクモだけはある。高々700万年の歴史しかない人間世界のダムの奇妙な安全率に比べてなんと素晴らしいことか。

#### (2) マルパッセダムの崩壊

図26はフランスのマルパッセダムの写真で、大変スレンダーで美しいダムである。設計者はアンドレ・コイン氏、彼はダム設計の天才と言われた人である。このダムが昭和29（1954）年に竣工し、昭和34（1959）年に崩壊した（図27）。この崩壊で421名の方々が亡くなられた。崩壊の原因はダム基盤にあった断層である。現在ならダム基盤に断層があれば危険であることはスグ分かるが、当時はそのことが分かっていなかった。動かざること巖のごとし、とも言われるように、断層が無ければ丈夫な岩盤も、場合によっては危険であるということに思いが及ばなかった。さらに昭和38（1963）年には、イタリアのバイヨントダム上流側の斜面が崩壊してダム貯水池に滑落した。ダム自体は壊れなかったがダムを越波した水は高さ70mの洪水波となって下流の町村を壊滅させ、死者2600人をだし、社会的問題となった。これらの事故の原因には岩盤が関係しており、これらの事故を契機として岩盤を学問的に研究しようという機運が生じた。岩盤工学はしたがって誕生後まだ約50～60年という非常に若い学問分野である。

#### (3) コメット機の空中分解

昭和29（1954）年の1月にイタリアエルバ島沖で英政府が主導して開発したジェット旅客機が空中分解をした。続いて同年4月に再びストポントリ島沖で2回目の

空中分解事故が起きた。時のチャーチル首相は「イングランド銀行の金庫が空っぽになっても事故原因を究明せよ」と指示した。潜水夫が海底深くまで潜って飛行機の破片を拾い集め調査した結果、その原因は「金属疲労」であることが分かった。地上から飛び立った飛行機は上空で気圧が小さくなり機体が膨らみ、着陸で地上に降り立つと機体はしぼむ。これを離着陸の度毎に繰り返し、金属疲労を起こして空中分解をした。現在ならばよく知られた現象だが、当時はこの現象に理解がたりなかった。分からないことが分からなかったわけである。

「事故が学問を進歩させる」というと不穏な表現であるが、事故は「分からないことが分からない部分」をわれわれに教えてくれる貴重な機会である。だから事故原因は徹底的に解明することが肝要で、事故の再発防止にも不可欠で、チャーチルはこの点でも優れた人物だと思う。しかし、日本の実情を見ると、事故が起きると調査団が派遣されても報告書が作られなかったり、作ってもおどろきな場合が多く、彼我の違いに残念な思いをする。

#### (4) 岩盤の世界では情報化設計施工

地下発電所空洞の掘削途中で空洞壁面が崩壊したこと

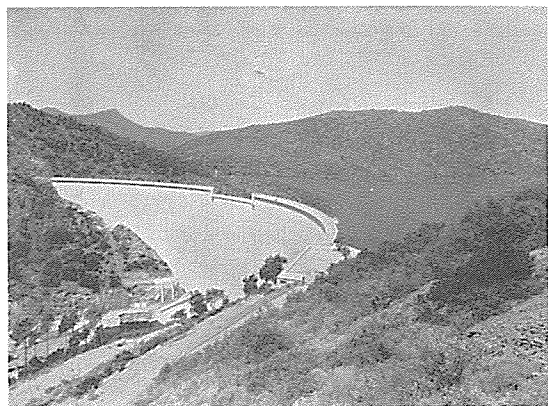


図26 マルパッセダム（1954（昭和29）年竣工）の写真<sup>10</sup>



マルパッセダム崩壊後の全景

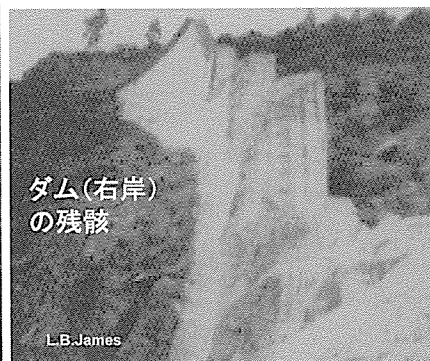


図27 マルパッセダムの崩壊（1959（昭和34）年）岩盤工学の端緒



がある。3箇所崩壊し、大きいところでは高さ23m程度、深さ7m程度、容積にして1600m<sup>3</sup>程度の規模であった。幸い人身事故はなかったが、掘削工事は中断し修復には多大な時間と費用を要した。原因はごく小さなシームであった。空洞建設に際しては当然詳細な地質調査を実施するが完璧は期しがたい。相手が天然材料の岩盤ゆえ、どこかに未知が残されている可能性がある。天然材料(岩盤)ゆえの「未知との遭遇」があるならば、いかに早くキャッチするかが重要になる。そこで考え出されたのが「情報化設計施工」である。

地下構造物を構築するときに、岩盤を掘削しつつ地質の変化・岩盤の変形量の変化・湧水量の変化・等々の情報を常に集め、それらの情報に異常があれば施工方法や設計までも建設途中に変更するという「情報化設計施工」は、人工材料を主体とする建築や橋梁工学の分野にはない、天然材料を主体とする土木独特のユニークな手法である。

## 7. ま と め

岩盤工学が扱う材料は「岩盤」であり、作用する外力の主たるものは「地圧」である。岩盤は天然材料であるためにその特性の把握は容易ではなく、不確さを伴う。また外力となる地圧も測定が容易ではなく、これまた不確さを伴う。材料特性と外力の大きさの双方に「不確かさ」を伴った状態で地下構造物を設計・建設してゆくの岩盤工学の特徴で、難しくもあるが挑戦しがいのあるところでもある。

- (1) 岩盤の特性：日本の岩盤は多種多様な岩盤が入り交じってモザイク模様となっており、①きわめて非均質である。さらに節理などの不連続面のために、②不完全な連続体となっている。このような岩盤の弾性係数を求めようとすると、試験時の載荷板の大きさにより、③サイズ効果で試験方法により3～4倍の違いがある。そして、同じ試験方法を用いても求まる値には④バラツキが大きく、平均でも3倍程度の違いがある。さらに、あと荷などの原因ともなる⑤クリープ特性を有す。クリープ係数は大きいものでは1.0にもなり、設計で考慮するのが肝要である。また、節理が発達した岩盤の場合、⑥等方性岩盤が異方性岩盤となることがある。つまり、小さなトンネルを掘る場合には等方性なのに、巨大な空洞を掘ると岩盤が異方的に変形挙動をする(掘削影響領域の概念が重要)ことがあり、注意を要する。
- (2) 地圧の特性：①岩盤の硬軟により地圧の値が2倍程度異なる。したがって、モザイク状の日本の岩盤では地圧測定の位置選定にも注意を要する。また、②地圧測定に用いるゲージの大きさによっても測定される地圧の大きさは変化する(ゲージのサイズ効果)
- (3) 岩盤挙動の特徴：①連続の中に不連続がある。岩盤の変形は見かけ上は連続に見えるが、詳細に見ると、「岩盤の全変位」＝「ひずみ変位」＋「開口変位」とな

- っている。開口変位は節理などの開口による変位である。②開口変位率(開口変位/全変位)の値は、花崗岩などの結晶質岩系の岩盤では0.6にもなるが、砂岩などの堆積岩系岩盤では0.2程度である。③この開口変位率が異なるために、岩盤の種類が違っていると岩盤構造物に発生する応力も異なる。④地下構造物に発生する応力は周辺岩盤の変形によって発生するので、応力よりは変形に基づいて設計する必要がある。
- (4) 人工材料を対象にする場合、安全率という用語は適切である。しかし、バラツキなどの「不確かさ」を伴う天然材料の岩盤などを対象とする場合、現在の安全率の用法は不適切で、所要係数などの方が適切である。
  - (5) 「分からないこと」は「分からないことが分かっている部分①」と「分からないことが分かっていない部分②」からなる。前者①は研究などにより明らかにすることができるが、後者②は事故などが起きて始めてその存在が明らかになる。岩盤工学の世界は天然材料の岩盤や地圧を対象にしており、詳細な調査をしてもどこかに未知なる部分が残される。その未知との遭遇をできるだけ早く見つけ、後者②による事故等を防ぐという手法の一つが情報化設計施工である。

## 参 考 文 献

講演の全体内容は拙著「技術者に必要な岩盤の知識 鹿島出版会」に基づいている。本稿で引用している図表の文献は以下のとおりである。

- 1) 色部誠：黒部第四ダムの岩盤変形についての考察，電力中央研究所(以下略して電中研)報告No.65144, pp.33～37, 1966.
- 2) 熊谷直一・伊藤英文：花コウ岩大型ビームの長期たわみ実験の10年間の実験結果とその解析，材料, 17巻181号, pp.80～81, 1968.
- 3) 伊藤英文・熊谷直一：岩石長期クリープ実験の結果について，第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.211～216, 1990.
- 4) 北野晃一・久野春彦：今市揚水地点地質調査報告書(その5)，電中研依頼報告書, U92518, 1993.
- 5) 赤司六哉・永津忠治・溝上健・古賀善雄：岩石および岩盤の工学的諸性質，九州電力(株)総合研究所，研究報告, No.86004, p.62, 1986.
- 6) 斎藤孝三・白江建造：現位置岩盤せん断時における岩盤内ひずみ測定，土木技術資料, Vol.23, pp.15～20, 1981.
- 7) 石田毅・金川忠：地殻応力測定結果にみられる岩盤の不均一性の影響，地震, 第2輯, 第40巻, 3号, pp.329～339, 1987.
- 8) 土木学会：土木モニュメント見て歩き，土木学会誌, 76巻, 第13号付録, p.52, p.106, 1991.
- 9) 大崎茂芳：クモの糸のミステリー，中公新書, pp.159～176, 2000.
- 10) 国際大ダム会議日本国内委員会：コンクリートダムの発達，大ダム, 第6号, p.12, 1958.

## 談 話 室

## 超微細結晶粒金属材料に関する研究

辻 伸 泰\*

## Ultrafine Grained Metallic Materials

by Nobuhiro TSUJI

## 1. はじめに

私は、平成21年3月1日付で、材料工学専攻材料物性学講座構造物性学分野の教授に着任いたしました。これまでの経歴を簡単に述べますと、平成元年3月に京都大学工学部金属系学科を卒業した後、大学院金属加工学専攻に進学し、平成3年3月に修士課程修了、平成6年3月に博士後期課程を修了し、博士（工学）の学位を取得いたしました。学部・大学院を通じて、指導教員は牧 正志先生（現・名誉教授）でした。平成6年4月に、大阪大学工学部材料物性工学科（のちに大学院工学研究科マテリアル科学専攻に改組）に助手として採用され、平成12年4月からは、大学院重点化により新設された大阪大学大学院工学研究科知能・機能創成工学専攻で助教授（平成19年度から准教授に職名変更）として勤務いたしました。この間、一貫して構造用金属材料の組織と力学特性の相関とマイクロ組織形成原理の解明に関する研究に携わってきました。様々な材料、プロセス、現象を取り扱ってきましたが、本稿では、現在に至るまでの過去数年間特に力を入れて研究してきた、超微細結晶粒金属に関する話題をご紹介します。よろしくお願いいたします。

## 2. 超微細粒金属材料研究の面白さ

鉄鋼材料、アルミニウム合金、銅合金、チタン合金、マグネシウム合金等々、我々の社会では多種多様な金属材料が、それぞれの元素の特徴を生かしながら使用されています。金属材料は様々な機能を有しま

すが、実用に供されている金属・合金の多くは、モノの形を保ったり重量を支えたりする力学的機能を、それが主眼でない場合であっても果たしています。従って、力学特性とそれを支配する内部微視組織に関する研究は、金属材料学において非常に重要な根幹的分野であると考えています。

我々が用いているバルク金属材料のほとんどは、多数の結晶粒からなる多結晶体です。多結晶体金属の結晶粒径を細かくすると、強度が増加したり、靱性が向上したりすることが経験的に知られており、結晶粒微細化は、古くから金属・合金の組織制御の目標の一つであり続けています。しかしながら、通常の加工と再結晶、あるいは相変態を利用した従来の加工熱処理法では、バルク金属材料の平均結晶粒径をせいぜい10 $\mu\text{m}$ までしか微細化することができませんでした。それに対して最近、少なくとも実験室レベルでは、平均粒径1 $\mu\text{m}$ 以下の超微細粒金属や、場合によっては粒径数十nmのナノ結晶金属が、バルク体で実現できるようになりました<sup>1)</sup>。

单相多結晶体における多数の結晶粒は、結晶構造や化学組成は同一ですが、結晶方位のみが互いに異なっています。隣接結晶粒間の境界である結晶粒界では、結合が保たれているものの、金属原子の周期的配列が乱れ、微小な自由体積も存在すると考えられます。いま、原子の配列が乱れた粒界近傍領域の厚さを1nmと仮定します。近年の高分解能電子顕微鏡観察結果や、分子動力学計算結果からも、これは悪くない仮定です。そうすると、多結晶体中における粒界領域の体積率を、平均粒径の関数として簡単に計算することができます。その結果が図1です<sup>2,3)</sup>。粒界の体積率は、粒径が細かくなるとともに増加します。ここでまず注目していただきたいのは、粒径

\*京都大学大学院工学研究科 材料工学専攻 教授

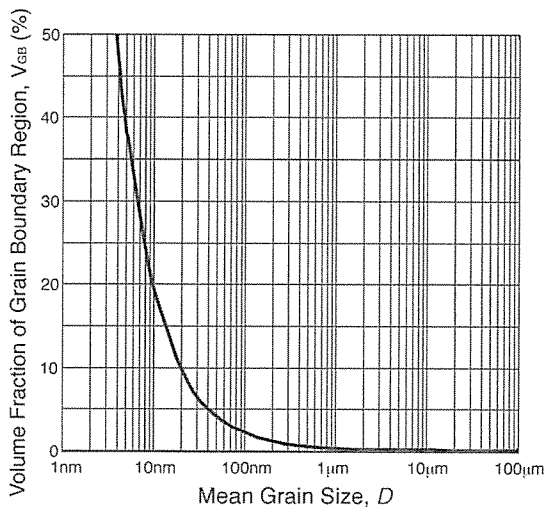


図1 粒界領域の体積率と平均粒径の関係

10 µm以上では、粒界の体積率がほぼ0%であることです。すなわち、我々が現在に至るまで用いてきた多結晶金属は、「粒界のほとんどない」多結晶体であったのです。一方、平均粒径が1 µm以下になると、粒界の体積率は急激に増加し、無視できない割合となります。すなわち、超微細粒材料・ナノ結晶材料は、「粒界だらけの材料」であるということができるとのことです。そのような材料においては、我々のこれまでの常識を覆すような特性・物性の発現が期待でき、実際、後に示すように、力学特性のみをとっていても、様々な興味深い現象が見出され始めています。こうした面白さを動機として、我々のグループでは超微細粒金属材料の研究を進めて参りました。

### 3. 超微細粒金属をどのようにして作り出すか

超微細粒・ナノ結晶金属の興味深い特性・物性が期待できたとしても、そうした組織を有する材料を実現しなければ、研究することもできません。ナノ組織金属を作製できる方法として、蒸着、電析、粉末のメカニカルアロイングなどの方法が従来知られていました。しかしこれらの方法で製造できるナノ組織金属は、薄膜や粉末といった形状であり、バルク体を得ることは困難でした。これに対して、金属材料に極めて大きな塑性変形を加えると、粒径1 µm以下の超微細粒組織がバルク形状のまま得られることが、1990年ごろ見出されました<sup>1)</sup>。しかし、圧延、鍛造、押出といった従来の金属加工法で与えることのできる塑性ひずみには限界があります。そこで、非常に大きな塑性ひずみを実現することのできる、特徴的な種々の巨大ひずみ加工法が考案されました。

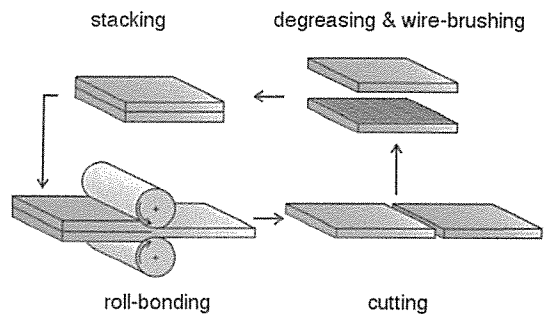


図2 ARB法の原理図

ECAE (Equal Channel Angular Extrusion) 法、HPT (High Pressure Torsion) 法、CEC (Cyclic Extrusion and Compression) 法などです<sup>4,5)</sup>。これらは実際に超微細粒組織やナノ結晶組織を作り出すことができ、世界的に極めて盛んに、ナノ組織金属の研究が行われるようになりました。

私が超微細粒金属の研究を開始したのは、1997年ごろです。当時私は、大阪大学の塑性加工の研究室の助手でした。当時既に、ECAE法やHPT法による結晶粒超微細化に関する論文が報告され始めていました。巨大ひずみ加工と超微細粒金属は大変興味深い研究対象でしたが、ひとの研究の単純な後追いや二番煎じをするのはいやでした。また、ECAEやHPTは、研究室レベルでは優れた方法ですが、いずれも小さな試験片を対象としたパッチプロセスであり、将来の実用化が難しいのではないかという考えもありました。既存のプロセスが全て、ロシアを中心とした外国で開発された方法であることに対する意地のようなものもありました。そこで、当時の所属研究室の担当教授である齋藤好弘先生（現・大阪大学名誉教授）とともに考案したのが、次に述べるARB (Accumulative Roll Bonding: 繰り返し重ね合わせ圧延) 法<sup>4,7)</sup>という巨大ひずみ加工プロセスでした。

図2に、ARB法の概念図を示します。圧延は、厚板、薄板、棒線材といった大型バルク材の連続製造に最も適した塑性加工法です。しかし例えば板圧延の場合、全圧下率の増加に伴い材料の厚みが減少するため、実際に付与できる塑性ひずみには限界があります。それに対してARB法では、例えば厚さ2 mmの板を50%圧延し、厚さが1 mm、長さがほぼ倍になったものを、長手方向に二等分します。これを重ね合わせれば、見かけ上圧延前の寸法に戻りますので、これをまた50%圧延し、切断、積層を繰り返せば、原理的には永久に同じ寸法のまま圧延を繰り返すことができます。ここで、一体化した材料を得るため

に、ARBにおける圧延は、接合を兼ねた接合圧延 (roll-bonding) とします。良好な接合を達成するために、板表面には脱脂やワイヤブラッシングといった表面処理を施し、材料の種類に応じた適切な接合圧延条件を選択する必要があります。接合圧延は、実用的にも異種金属クラッド材の製造に用いられている技術です。また、巨大ひずみ加工と超微細粒組織の形成を目的としたものではないものの、京大・金属の新宮秀夫先生 (現・名誉教授) や菊池潮美先生 (現・滋賀県立大学) らが、異種金属の折り畳みプレス・圧延<sup>9)</sup>を、バルクメカニカルアロイングや人工格子の製造プロセスとして試みておられたことを学生時代から見知っておりましたので、これも大きなヒントになりました。しかし、ARBは多量の格子欠陥の蓄積と、それによる超微細粒組織の形成を目的としていましたので、高温での拡散接合による一体化を用いることはできず、またプロセス全体も、再結晶温度以下の低温で行なう必要がありました。そうした点を克服するための種々の細かな技術の開発・習得の必要はありましたが、ARBによる巨大ひずみ加工は大変うまく行き、圧延が可能なるほどの金属・合金において超微細粒バルク材を得ることができました。ARB法は我々の基盤技術として、超微細粒研究に大いに貢献してくれています。

少し余談になりますが、私が助手として着任した研究室 (齋藤研) は、塑性加工の研究室でした。材料学科内とはいえ、研究内容や文化の違いに最初は戸惑い、悩んだこともありましたが、しかし、上記のARBは、圧延の専門家であった齋藤先生と、材料組織屋であった私がともに仕事をしたために実現できたものと自負しています。毎日のように齋藤教授室に通い、長時間議論したことを今でも鮮やかに覚えています。ARBプロセスの開発に関する研究は、異分野間の連携により大きな研究展開がはかれることを学んだ経験であり、その後の私自身の共同研究に対する姿勢に反映されています。また、材料研究におけるプロセスの重要性を認識したのも助手時代でした。工学的観点からは、材料が実用化されるためには、効率的なプロセスの確立が不可欠です。また、新しいプロセスの開発が、新しい材料・素材を実現し、それによって技術 (technology) だけでなく、科学 (science) も発展するという事はしばしばあり得ると思います。研究展開を図る場合、自前で試料を作製できるというのは大きな強みです。幸いにもARB法は、私の知る限り海外30カ国以上で超微細粒材を製造するための研究手法として用いられており、ARBに関する最初の報告<sup>6,7)</sup>は、世界中から多数の引

用をいただいています。また、超微細粒金属大型バルク材の実用化にはまだ時間がかかりそうですが、ARBの原理を一部利用した超微細粒ステンレス鋼長尺薄帯 (厚さ約0.1mm) の製造が、国内のリロールメーカーにより最近実現されています<sup>9)</sup>。

#### 4. 巨大ひずみ加工により作製される超微細粒組織

巨大ひずみ加工により超微細粒組織が得られるということ、当然のようにお話ししてきましたが、これはよく考えると大変奇妙なことです。従来、微細粒組織は、塑性変形後の焼鈍熱処理により生じる再結晶現象を利用して実現されていました。しかし巨大ひずみ加工の場合には、室温等の低温での加工ままで、熱処理なしに超微細粒組織が得られるのです。私は学生時代、鉄鋼材料の再結晶に関する研究を行なっていたので、巨大ひずみ加工に伴う超微細粒組織の形成機構は、超微細粒研究を始めるにあたっての重要な研究対象でありました。

図3に、ARB法により相当ひずみ4.8まで巨大ひずみ加工された、工業用純アルミニウムの組織を示します。(a)は、ARB板をTD (transverse direction) 方向から観察したTEM明視野像です。圧延方向に伸長した微細な組織が観察されます。伸長領域の平均厚さは $0.2\mu\text{m}$ です。この視野中の各領域から菊池線

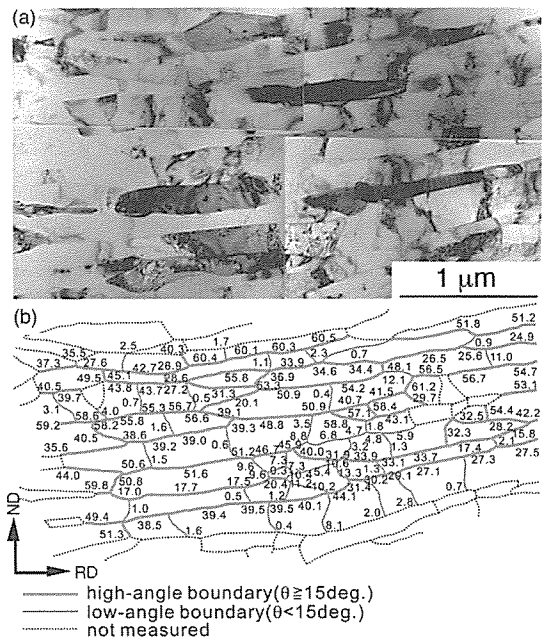


図3 6サイクルのARB (相当ひずみ4.8) により巨大ひずみ加工された工業用純アルミニウムの(a) TEM組織と(b)バウンダリーマップ。

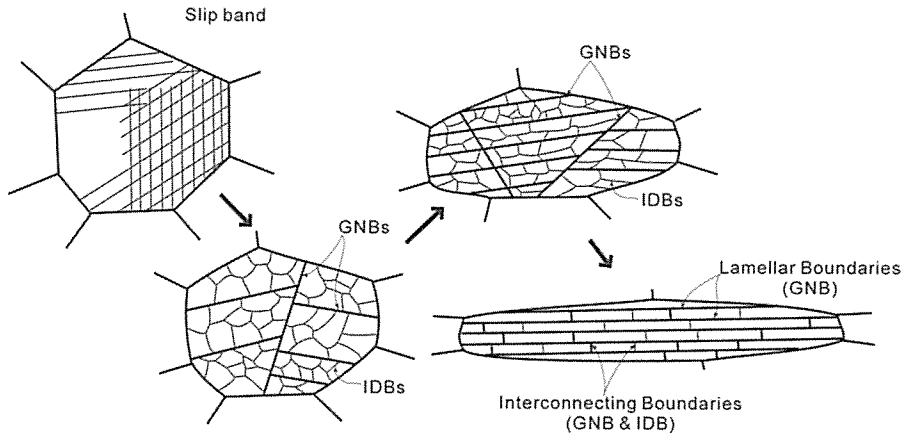


図4 塑性変形に伴うGrain Subdivisionの進行を示す模式図

回折図形を採取し、結晶方位を正確に同定した上で、隣接領域間の方位差を求めました。その結果を、(b)に示しています。伸長微小領域は、互いに大きな方位差を有していることがわかります。すなわち、大きな方位差を持っているという点からは、これらは確かに超微細結晶「粒」であると言えます。しかし同時に、これら超微細粒は、圧延方向に伸長した形態を持ち、また粒内に転位やサブバウンダリー（小角粒界）を有しています。すなわち、この組織は、本質的には変形組織（加工組織）です。

こうした詳細な組織解析を種々のひずみ段階で行なった結果、巨大ひずみ加工に伴う超微細粒組織の形成は、図4に模式的に示す過程で理解できることが分かりました。金属の塑性変形は、転位のすべり運動により担われます。このとき、同一粒内であっても隣接領域間で活動したすべり系の種類や量に違い（不均一）が生じると、隣接領域毎に結晶方位回転が異なり、方位差ができます。そうした方位差を担うために、幾何学的に必要な境界（geometrically necessary boundary: GNB）が導入されます。また、活動転位の一部は結晶中に残存しますが、これらは内部応力場を低減した低エネルギー状態をできるだけとろうとし、セル壁やサブバウンダリー（incidental dislocation boundary: IDB）を形成します。これらの転位境界により結晶が分断されて行く過程を、grain subdivisionといい、FCC金属の通常変形過程において実証されています<sup>10,11)</sup>。非常に大きな塑性変形を施すことにより、上記のGNBが非常に高密度に導入され、結晶を分断します。また、大きなひずみの後には、GNBの多くは大角化しています。このようにして形成されたのが、図3に示す超微細粒組織

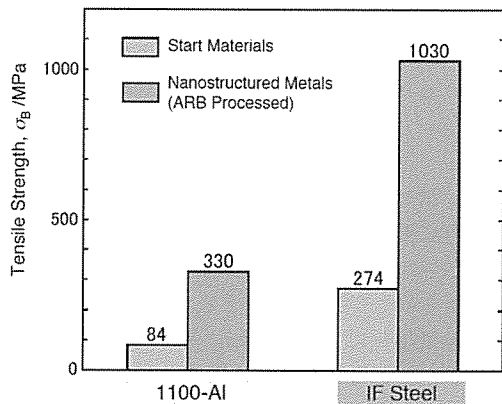


図5 工業用純アルミニウムおよび極低炭素IF鋼の通常粒径材（出発材）と超微細粒材（ARB）材の引張強度

です。すなわち、巨大ひずみ加工による超微細粒組織の形成機構は、従来の再結晶とは異なり、塑性変形に伴う結晶内の格子欠陥の自己組織化の延長線上にあると言えます<sup>12-14)</sup>。なお、巨大ひずみ加工材を焼鈍すると、巨大ひずみ加工のままの組織は本質的には加工組織ですから、回復・再結晶・粒成長を起こします。ただし、通常加工材とは異なり、大角粒界が高密度に導入された巨大ひずみ加工材の焼鈍過程は、通常の再結晶とは大きく異なる場合があります。これについては参考文献<sup>13,14)</sup>をご参照ください。

### 5. 超微細粒金属の特異な力学特性

「粒界だらけ」の超微細粒材は、種々の特異な力学挙動を示します。まず第一に、超微細粒材は非常に高い強度を示します。図5は、工業用純アルミニウ

ムと極低炭素IF (interstitial free) 鋼の、通常粒径材 (平均粒径数十  $\mu\text{m}$ ) と超微細粒材 (ARB材; 平均伸長粒厚さ0.2  $\mu\text{m}$ ) の引張強さを比較したものです。工業用純アルミニウム (JIS 1100) の通常強度は約80MPaですが、結晶粒超微細化により、約4倍の330MPaもの強度を示すようになります。これは、実用鋼であるIF鋼の通常強度 (280MPa) よりも高い強度です。すなわち、結晶粒超微細化により、純アルミニウムが鉄鋼並みの強度を持つようになります。ただしこうした強度の上昇は、他の材料においても同様で、IF鋼の強度も、結晶粒超微細化により1 GPa以上になります。

結晶粒超微細化による高強度化は、驚くに足ることではないと考えられるかもしれません。我々は、多結晶体の強度 ( $\sigma$ ) と結晶粒径 ( $d$ ) の間に、次に示すHall-Petchの関係が成り立つことを経験的に知っているからです。

$$\sigma = \sigma_0 + k d^{1/2} \quad (1)$$

$\sigma_0, k$ : 材料ごとの定数

しかし、我々の検討の結果、純アルミニウムやIF鋼は、平均粒径が2~4  $\mu\text{m}$ 以下になると、従来粗大粒材で確立されてきたHall-Petch曲線を逸脱し、より大きな強度を示すことが明らかとなりました<sup>15)</sup>。これは、結晶粒超微細化により粒内転位源が無力化され、転位増殖が困難となるためであろうと、我々は考えています。その結果、超微細粒材の場合には、純アルミニウムであってもリユース変形を伴う降伏点降下現象が現れます<sup>15,16)</sup>。また、図6に示すような興

味深い現象も生じます。図6は、ARBにより巨大ひずみ加工された純アルミニウムの応力ひずみ曲線です。(a)の曲線1は、ARB加工のままの試料です。この試料に150℃という低温焼鈍を施すと、曲線2のように、焼鈍したにも関わらず、降伏強度が上昇し、引張延性が低下しました。この150℃熱処理材に対し、15%の冷間圧延を施した試料の応力ひずみ曲線が、(b)の曲線3です。加工を施したにもかかわらず、加工硬化せず、逆に変形応力は低下し、伸びが増加しています。これに再度150℃焼鈍を施すと、曲線4のように硬化と延性低下が生じ、それに圧延を施すとまたもや、曲線5のように軟化と延性の増加が観測されました。こうした現象を我々は、Hardening by Annealing, Softening by Deformationと名付けました<sup>17)</sup>。塑性変形すれば加工硬化し、焼鈍すれば軟化するという冶金学の常識からすれば、全く逆の現象です。Hardening by Annealingは、ARBまま材に存在する可動転位 (図3(a)) や転位源が焼鈍により消滅したためであり、それに圧延による加工を施してやることにより、自由転位が導入されるとともに転位源が活性化されて変形応力 (特に降伏応力) が低下した (Softening by Deformation) と考えれば、一連の異常な現象を理解することができます。もちろんこうした現象は、粒界が高密度に存在する超微細粒・ナノ結晶組織でのみ生じるものです<sup>17)</sup>。

## 6. 超微細粒研究の今後の展開

前節で一例を示したように、超微細粒金属は、種々の特異な力学特性を示します。今回紹介したもののほかにも、室温におけるひずみ速度依存変形や、変

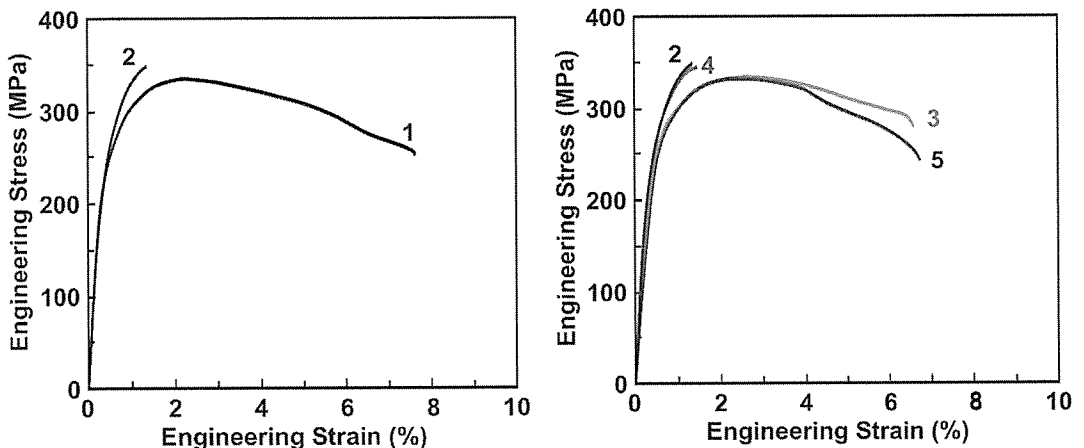


図6 巨大ひずみ加工 (ARB) により得られた超微細粒アルミニウムにおけるHardening by Annealing, Softening by Deformation現象

形誘起低温粒成長, また異常な相変態挙動等が, 次々と見出されつつあります。力学特性に限らず, 「粒界だらけ」の超微細粒・ナノ結晶金属は, 種々の特異な特性・物性を示す可能性が高いと思われます。超微細粒組織からの相変態・析出挙動は, 冶金学的にも大変興味深い研究対象です。そもそも冒頭で述べたように, 我々が手にしてきた粒径 $10\mu\text{m}$ 以上の多結晶体は, 「粒界がほとんどない」材料だった訳ですから, これまでの金属材料学・冶金学は, 高密度に粒界を内包した本当の(?)多結晶体のことを何も知らなかったと言えるかもしれません。我々は今後さらに, ナノ組織金属の物性・特性に関する研究を深化させて行きたいと考えています。その際, 種々の特徴的な手法・得意分野を持った内外の他グループと積極的に共同研究を行なっていくことも重要だと思います。

一方, 超微細粒研究の現在の主な対象は構造用金属材料ですから, 実社会での応用に対する課題もいくつか存在します。第一には, 大型超微細粒材をどのようにして製造するのかという点です。大型化, 連続化を目指して我々はARB法を開発しましたが, 現在の大規模素材産業への適用を考えた場合, 巨大ひずみ加工のハードルはまだ高いようです。一方, 我々のグループでは, 巨大ひずみ加工を必要としない超微細粒組織の形成法をいくつか提案しています<sup>18, 19)</sup>。特にマトリクスが種々の相変態を起こしうる鉄鋼材料の場合には, 加工と相変態の組合せによって, 種々の簡便な超微細粒組織の作製プロセスがあり得そうです<sup>20)</sup>。

また, 超微細粒材料は図5に示したように大変高い強度を示しますが, 往々にして引張延性が限られます。我々は, これが塑性不安定の早期発現によるものであることを明らかにしました<sup>16)</sup>。すなわち, 結晶粒超微細化に伴う降伏応力の増大と, 加工硬化能の低下によって, 塑性不安定(引張試験におけるくびれの発展)が早期に達成されてしまう結果, 均一伸びが低下するのです。なお, これは決して材料の塑性(plasticity, ductility)が失われ, 脆性(brittle)になったということの意味するものではありません。実際, 超微細粒材料は圧縮, 圧延や曲げ変形に対しては, 非常に大きな塑性を示します。ただし, いずれにせよ, 塑性不安定の早期発現により, 単相超微細粒材料に大きな引張延性を望むことはできないようです。しかしながら, 微細析出物を粒内に分散させて加工硬化能を増加させる等, 複相化を図ることによって, 高い強度と十分な延性(加工性)を両立させることが可能であることが, 近年明らかになり

つつあります<sup>21)</sup>。

構造材料は, 高い信頼性と安全性が必要とされるため, 実用化までには10年以上の長い期間が必要で。現在の大学を含む世の中の雰囲気は, そうした長期的な研究開発をなかなか容易には許してはくれませんが, 粘り強く研究を行なっていくことが必要だと思います。超微細粒金属に限りませんが, 強く, 粘くて寿命の長い金属材料は, 持続可能な社会の構築に寄与することができると思っています。

## 7. おわりに

京大で勤務するようになり, 半年が過ぎました。幸いにも素晴らしいスタッフと学生さんたちに恵まれ, 研究室の立ち上げは順調に進んでおります。また, 内外からの高い期待を肌身に感じ, プレッシャーではありますが, 大変ありがたく思っています。思いがけず母校で奉職できることになり, 日々, 楽しく張り合いを持って仕事をさせていただいております。一方, 卒業後15年の間に, 大学院重点化と独立行政法人化が進行し, 組織も建物も人も大きく変化していて, 浦島太郎のような気持ちになることもしばしばです。そもそも, 京大には学生として所属してただけであり, 職員として勤務するのは初めてです。また, 同じ国立大学であっても, 大学ごとに数多くの流儀や文化のの違いがあると感じています。京都大学で教授として勤務することの重さと責任を, 日々増して感じ取る半年でもありました。

本稿では, 過去数年間集中して研究を行ってきた, 超微細粒金属材料に関する研究内容のみを紹介させていただきました。おかげさまでこれらの内容に対して, 本年3月に日本学術振興会賞<sup>22)</sup>という分不相応な賞を, 金属材料分野からは初めていただくことができました。しかし, これに満足することなく, また狭い領域に拘泥することなく, 金属材料学のより幅広い学問的基盤を自分のものとするよう, そして世界のトップレベルの研究室を構築できるよう, 精進して行きたいと考えております。何よりも, 預かった潜在能力の高い学生さんたちを大きく伸ばし, 自立した優れた人材を輩出することが, これまで支えていただいた皆様, 私を受入れてくれた京都大学, そして社会への恩返しになると思います。研究室の活動に関しては, ホームページ<sup>23)</sup>をご覧ください。未熟な部分も多々ございますが, 叱咤激励とご指導ご鞭撻をお願いして, 本稿を終わらせていただきます。

## 参 考 文 献

- 1) "Bulk Nanostructured Materials", Edited by

- Michael J.Zehtbauer, Yuntian T.Zhu, Wiley-VCH, Weinheim (2009)
- 2) 辻 伸泰：鉄と鋼, 88 (2002), No.7, pp.359-369.
  - 3) N.Tsuji: J. of Nanoscience and Nanotechnology, Vol.7, No.11 (2007), pp.3765-3770.
  - 4) "SEVERE PLASTIC DEFORMATION: Towards Bulk Production of Nanostructured Materials", edited by B.S.Altan, I.Miskioglu, G.Purcek, R.R.Mulyukov and R.Artan, NOVA Science Publishers, NY, (2006)
  - 5) N.Tsuji, Y.Saito, S.H.Lee and Y.Minamino: Advanced Engineering Materials, 5 (2003), No.5, pp.338-344.
  - 6) Y.Saito, N.Tsuji, H.Utsunomiya, T.Sakai and R.G.Hong : Scripta Mater., 39 (1998), pp.1221-1227.
  - 7) Y.Saito, H.Utsunomiya, N.Tsuji and T.Sakai : Acta Mater., 47 (1999), pp.579-583.
  - 8) P.H.Shingu, K.N.Ishihara, A.Otsuki and I.Daigo: Mater. Sci. Eng. A, 304-306 (2001), pp.399-402.
  - 9) 鉄鋼新聞, 2008年5月26日記事
  - 10) N.Hansen and D.Juul Jensen: Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, 357 (1999), pp.1447-1469.
  - 11) N.Hansen: Metall. Mater. Trans. A, 32A (2001), pp.2917-2935.
  - 12) 辻 伸泰：まてりあ, 43 (2004), No.5, pp.405-410.
  - 13) 辻 伸泰：溶接学会誌, 74 (2005), No.2, pp.92-96.
  - 14) 辻 伸泰：鉄と鋼, Vol.94, No.12 (2008), pp.582-589.
  - 15) N.Kamikawa, X.Huang, N.Tsuji and N.Hansen: Acta Mater., Vol.57, Issue14 (2009), pp.4198-4208.
  - 16) N.Tsuji, Y.Ito, Y.Saito and Y.Minamino : Scripta Mater., 47 (2002), No.12, pp.893-899.
  - 17) X.Huang, N.Hansen and N.Tsuji: Science, April 14, 2006, Vol.312, No.5771 (2006), pp.249-251.
  - 18) R.Ueji, N.Tsuji, Y.Minamino and Y.Koizumi: Acta Mater., 50 (2002), pp.4177-4189.
  - 19) Y.Okitsu, N.Takata and N.Tsuji: Scripta Mater., Vol.60, Issue 2, January (2009), pp.76-79.
  - 20) N.Tsuji and T.Maki: Scripta Mater., Vol.60, Issue 12 (2009), pp.1044-1049.
  - 21) N.Tsuji, N.Kamikawa, R.Ueji, N.Takata, H.Koyama and D.Terada: ISIJ International, Vol.48, No.8 (2008), pp.1114-1121.
  - 22) <http://www.jsps.go.jp/jsps-prize/index.html>
  - 23) <http://www.tsujilab.mtl.kyoto-u.ac.jp/>



## 談 話 室

## 地下の姿を追い求めて

後 藤 忠 徳\*

For explorations of the underground world

by Tadanori GOTO

## はじめに

平成20年10月に、京都大学大学院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の准教授に着任いたしました。どうぞよろしく申し上げます。専門分野は物理探査学・地球電磁気学・海底物理学です。特に電磁探査を用いて、光の届かない地下を“照らしだし”、防災対策・資源探査・地下水調査等に役立つべく研究・開発を進めています。本稿では私自身の研究内容である電磁探査について紹介させて頂くとともに、電磁探査の将来像についても若干触れさせて頂きます。

## 地下に魅せられて

本稿を書くにあたり、私自身が地下探査や地球科学に初めて興味を持ったのはいつのことだったか、改めて考えてみました…がハッキリとしません。よく覚えているのは小学校の頃、プラネタリウムを見た後に星座早見板を自作してしまったことです（今もモノづくりは好きですが、この頃の名残かもしれません）。初めは星に興味があり、加えて高校生の頃には物理の法則が面白かったので、大学では天文などを学びたいと思っておりましたが、いつしか地球が興味の対象になりました。その理由は「自分の星なのだから、調べたこと・分かったことを自分の目で確かめられるだろう」でしたが、実はその当時は「プレートテクトニクス」ブームで、ヒマラヤ山脈の形成や日本列島の折れ曲がりなどを扱ったTV番組・雑誌の影響が大きかったようです。結果として、地殻変動の激しい地域などを物理法則を利用して調査し、

地球の成り立ちや人間と地球の関わり合いを考えたいと思うようになり、神戸大学理学部へ入学、そこで電磁探査と出会い、同大学院を経て京都大学大学院理学研究科へと進学いたしました。

## 陸上での電磁探査と活断層

さて電磁探査のお話に戻りますが、1980年代になり、電磁探査法の一つである地磁気地電流法（Magnetotelluric法：MT法）が日本や世界で盛んに行われるようになっていました。MT法の特徴は、自然の電磁場を用いるため安価であることと、電気探査に比べて容易に大深度探査ができることです。特に日本では活断層調査の面で注目が集まっていました。岩石の比抵抗は含水率が高いほど低くなることが知られており、室内実験からは水を含む岩石は破壊しやすいことが分かっていましたので、地震発生過程の理解や予測を目的とした活断層の電磁探査が1980年代終わりには盛んになりつつありました。

私自身も大学院修士課程・博士課程を通じて、いくつかの活断層周辺で地下比抵抗構造調査を行い、その結果、地震発生過程に関連すると思われる地下構造を検出することができました。一例として、岐阜・富山県境を東西に走る横ずれ断層である跡津川断層周辺での探査結果をご紹介します（Goto et al., 2005）。この断層はユニークで、断層の西端部や東端部では断層沿いに多くの微小地震が発生するのですが、断層中央部では地震活動が極端に低く、その理由は分かっていませんでした。そこで跡津川断層の西端部・中央部をそれぞれ横切る2測線沿いにMT探査を行って、同じ活断層を横切る2つの地殻比抵抗断面を比較してみると（図1）、両者がかなり異なることが分かりました。これらは地震波速度構造ともよく対応していますので（図1の白い点線）、MT探査

\*京都大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻 准教授

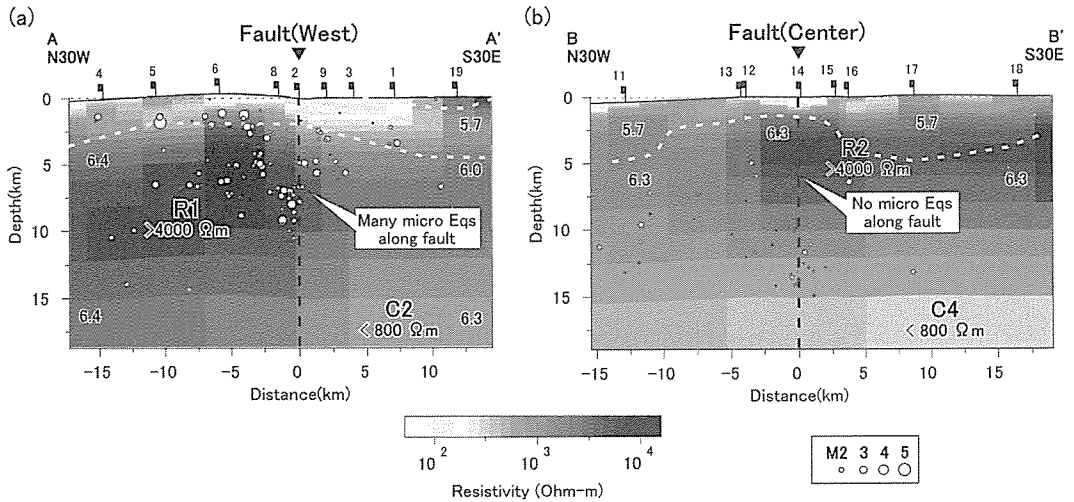


図1 跡津川断層の西端部(a;地震多)・中央部(b;地震少)をそれぞれ横切る地殻比抵抗構造断面(Goto et al., 2005). 旗=観測点, 黒点線=跡津川断層, 白丸=震源, 白点線および数字=地震波速度構造.

によるこの断面図は信頼性が高いと言えます。

跡津川断層の断面図をよく見ると、地震活動の盛んな西端部(図1(a))と、盛んではない中央部(図1(b))では地震活動に対応した違いが認められます。例えば図1(a)の断層直下(黒点線)やその周辺の地下0~3km程度に低比抵抗帯が認められますが、図1(b)ではあまり認められません。これらは、地震活動の高い跡津川断層西端部沿いには主断層やそれに平行な小断層の破碎帯が発達しており、そこには間隙水(地下流体)が多く含まれていることを示唆しています。また深さ3~10kmに注目すると、図1(a)では断層の北側のみ高比抵抗ブロックが認められますが(R1)、図1(b)では断層をまたぐようにして高比抵抗ブロック(R2)が認められており、R2内部では地震はほとんど起きていません。このような高比抵抗ブロックは地下流体をあまり含んでおらず、おそらくは高剛性ブロックであると考えられます。これらを総合すると、跡津川断層の中央部では高比抵抗・高剛性ブロック(R2)が断層運動を妨げていて、そのために断層沿いの微小地震活動も低いままであり、地表付近の断層破碎帯も発達していないのではないかと解釈することができます。ただし地表の断層トレースは明瞭ですので、断層中央部もいずれはすべり、おそらくは大きめの地震を起こすであろうと予測されます。

活断層に伴う巨大地震の際に、地震波エネルギーを放出する高速破壊すべりを起こす部分は「アスペリティ」と呼ばれており、アスペリティは断層面上のいつも決まった場所に固定されていくのではないかとという仮説が地震の観測結果から近年提案されています。つまり、巨大地震を起こす活断層の場所は普段は小さな地震やすべ

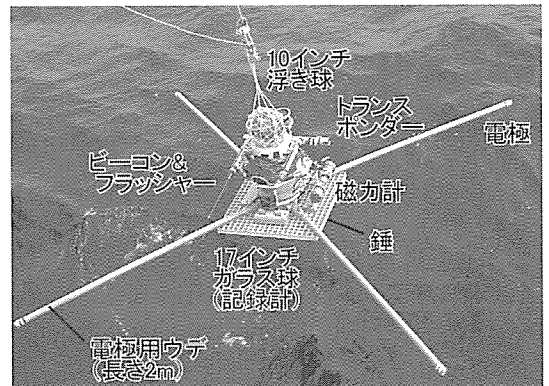


図2 自己浮上式海底電位差磁力計(OBEM)。調査船から海中へ投入直前の様子。

りをあまり起こさず、大地震の時に一気に滑るのではないかとというわけです。上記の活断層を横切る電磁探査の結果からは、活断層を横切る高比抵抗ブロックと、アスペリティ形成との関連性が示唆されます。

#### 海底での電磁探査とプレート境界断層

陸上でのMT探査の成功と並行して、海底での電磁探査も進歩を遂げています。1970年頃にアメリカで海底磁力計や海底電位差計を用いた海底電磁気観測が開始されたのを契機として、海に囲まれた日本でも1980年頃から海底電位差磁力計(OBEM)を用いた海底電磁観測が開始されています。開発当初は大型であったOBEMも、いまでは小型化・高性能化が進みました(例えばKasaya and Goto, 2009; 図2)。現在日本では計30台程度、アメリカでは計50~100台程度のOBEMが研究

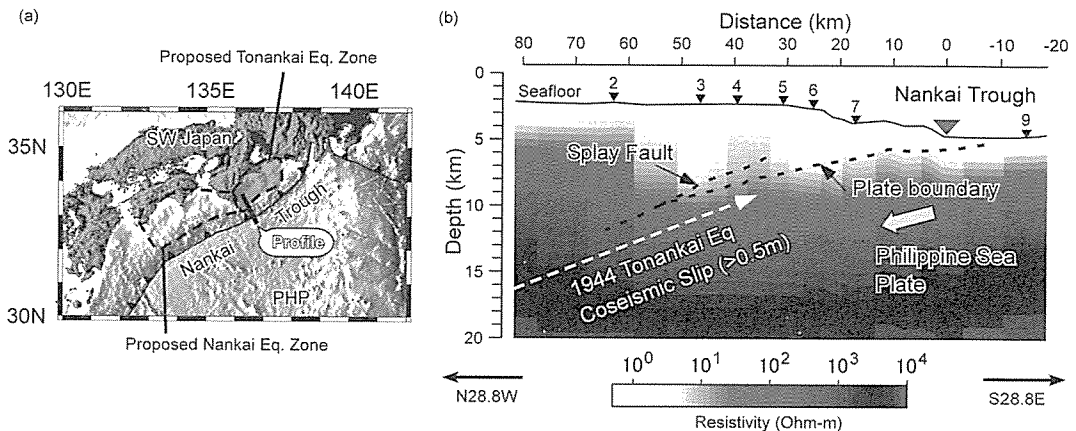


図3 南海トラフ沈み込み帯 (a) における地殻比抵抗構造断面 (b; 木村ほか, 2005). (b) 中の黒点線は主な地震波反射面, 白点線は高速破壊域を示す. ▼は海底観測点.

目的で使用されており, 電磁探査による海底下の地殻〜マントル構造調査が盛んにおこなわれています.

海底電磁探査の結果の一例として, 前任地の海洋研究開発機構時代に行った, 南海トラフ沈み込み帯における海洋 MT 探査の例を紹介し (木村ほか, 2005). 西南日本沖合の南海トラフではフィリピン海プレートが沈み込んでおり, 東南海地震・南海地震などを引き起こしてきましたし, 今後も同様の巨大地震発生が予測されています (図 3(a)). そこでアスペリティ周辺の地殻構造を調査するために, 1944年に東南海地震 (M 7.9) の高速破壊すべり域の上 (図 3(a)) に OBEM など計11台を海底へ設置して, 2週間〜半年間の海底電磁場データを取得し, 地下比抵抗構造を求めました.

海洋 MT 探査の結果, 南海トラフ沈み込み帯においても, 巨大地震時の高速すべり域の周辺は, 相対的に高い比抵抗を示すことが分かりました. 解析された地下比抵抗構造を図 3(b) に示しました. 図中には, ほぼ同測線での反射法地震探査によって得られた, 主な地下不連続面も示しています. これを見ると, 地下深くに行くに従って比抵抗が増加している様子が分かります. 特にフィリピン海プレート上部は, 沈み込む前は 1Ωm 程度の低い値を示しますが, 地下へ沈み込むに従って徐々に高くなり, 地下 10 km に達する頃には数 10Ωm まで上昇します. そしてこれよりも比抵抗が高い地下深部側に, 1944年の東南海地震の高速破壊すべりの領域は存在しています. すなわち陸上の活断層と同様に, 海底下のプレート境界断層でも, 巨大地震のアスペリティは高比抵抗なブロックを横切っていることが示されました. 地温を考慮すれば, 南海トラフの例でも比抵抗構造は含水率の大小を反映していますので, 地殻内の流体の量と地殻の剛性や巨大地震発生には関連性があると考えられます.

同様の成果は, 東海沖や三陸沖などの海域でも得られつつあります.

ただし未解決の問題は山積です. 例えば, 断層破碎帯は一般に数 10 m 以下の狭い幅を持ち, その強度は周辺の地殻と比べると極端に弱いようです. このような断層のすべり強度に対して, 上記の例のように断層周辺に広く分布する高比抵抗ブロックがどのように関与するのかが分かっていません. また定性的には高比抵抗がアスペリティに相当するようですが, いくら以上の値であればアスペリティ形成に関与しうるのか, その定量化はできていません. このような地下構造, 地下流体, 地震・地殻変動の三者の関係を定量的に議論するためには, 電磁探査事例を増やすだけでなく, 岩石や地殻変形の数値シミュレーションを用いた地下構造の定量的解釈が有効だと考えています. このような議論は, 地すべり等の自然災害予防や堤防等構造物の堅牢性チェックといった土木技術への適用も可能かと思えます.

### 海底電磁探査による資源探査

近年は海底油田・ガス田の開発・生産が盛んであり, これらの事前調査や生産開始後の時間変化検出を目的とした海上・海底物理探査が行われています. 特に石油・ガス・メタンハイドレートなどは通常海底堆積物に比べると比抵抗が高いため, 2000年以降は海底電磁探査に世界の注目が集まっています. ただし, 前章で紹介した海洋 MT 探査は自然の電磁場信号を用いており探査深度が深いのがメリットですが, 逆に海底下数 km という浅いところの調査には不向きです. そこで人工電流源を用いた海底電磁探査が近年盛んにおこなわれています.

その一例として, 日本海上越沖のメタンハイドレート

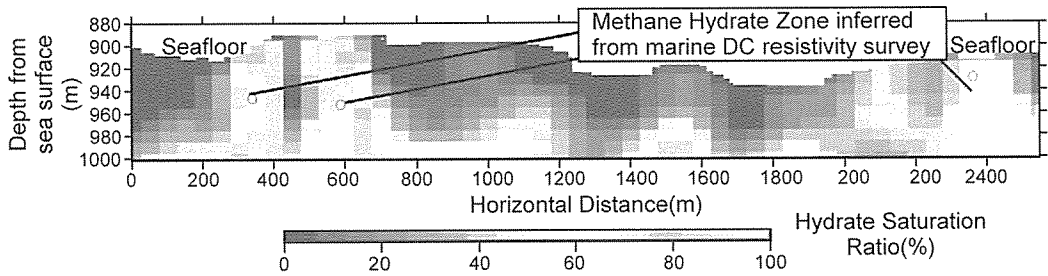


図4 日本海上越沖における海底下メタンハイドレート分布 (後藤ほか, 2009より). 海底電気探査による推定値.

分布域における海底電気探査の結果をご紹介します (Goto et al., 2008; 後藤ほか, 2009). この海域では、海底下のメタンハイドレートの一部が海底面に露出していることが知られていましたが、その海底下の分布形態については明らかではありませんでした. そこでメタンハイドレート探査のために、人工電流送受信装置および送受信電極を取り付けた長さ 160 m のケーブルから成る、深海曳航式の海底電気探査システムを新たに開発しました. 上越沖において、海底近傍でこのシステムを曳航して海底電気探査を実施したところ、海底の随所で  $0.6\Omega$  m を超える高い見掛け比抵抗が得られました. この値は通常の堆積物では説明できないため、含水率が低く比抵抗が高い物質が海底下に存在することが示唆されました.

海底電気探査によって得られた見掛け比抵抗に基づいて、地下比抵抗構造をモデル化し、さらに間隙中のメタンハイドレートが見掛けの間隙率を低下させて比抵抗を変化させていると仮定して、アーチーの式に基づいて海底下のメタンハイドレート飽和率を求めました. その結果、高比抵抗でメタンハイドレート飽和率が高いと推定される地域が海底下に広がっていることが分かりました (図4). 特に、水平位置 600 m 付近と 2400 m 付近では、高比抵抗・高飽和率の地域が海底直下まで伸びています. 実際にこれらの地域では、海底のカメラ映像や堆積物サンプリングによって海底面や海底直下にメタンハイドレートが存在することが確認されています. 従って、海底下の高比抵抗体の間隙中にはメタンハイドレートが存在しているとした仮定は妥当であり、海底電気探査を用いたメタンハイドレート分布のイメージングに成功したと考えられます.

このような人工電流源を用いた海底電磁探査による海底下の資源調査の事例は今後ますます増えると予想されます. ただし探査手法についてはより高度化がなされねばなりません. 例えば電磁探査単体では、シャープな地層境界をイメージすることは困難であるため、地震波探査との統合解析を行い、層中 (地震波反射面間) の比抵

抗をより精度よく求める技術が必要です. このような探査技術の高度化と並行して、メタンハイドレート以外の資源探査ターゲット (石油・天然ガス・熱水金属鉱床) へ向けての適用について技術開発を行っていく予定です.

#### おわりに

本稿では、陸上や海底での電磁探査と、それによって明らかとなった活断層や巨大地震発生帯の姿、あるいは海底下メタンハイドレートの詳細分布について紹介しました. その結果、地下流体を媒介として、比抵抗構造から地震発生帯の理解や資源量評価を行うことが可能であることが示されました. 言い換えれば、地震発生や資源賦存層形成が地下流体と深い関わり合いを持つようです. 従って、今後は地下流体の分布だけでなく、移動に関する情報取得が重要です. 例えば、地下流体の移動解明には地下構造のモニタリング技術の開発は欠かせません. モニタリング技術は、油ガス層の生産段階や  $\text{CO}_2$  の地中処分などでも必要な技術であり世界的にも注目されています. また地下の水理学的物性をよりよく知るために、地震波・電磁場など複数の物理探査の統合解析技術の開発が必要です. 当ジオフィジクス分野は、海陸問わず様々な物理探査法に挑戦を続けてきた研究室ですので、このようなモニタリングや統合解析の新技術はまさにこの研究室から生まれうると確信しておりますし、そのために努力したいと思っています. 当研究室のみならず、京都大学大学院工学研究科のスタッフ・学生の皆様は非常に明るく積極的であり、教育・研究活動を通じて共に諸問題を解き明かすことができるのは大変楽しみです. さらにご卒業された諸先輩方からも厳しいご指導・ご意見を頂けることも喜びです. 皆さまのお力添えに負けぬよう邁進させていただき、かつて魅了された地下の姿をこれからも追い求め、石油・天然ガス・メタンハイドレート・海底熱水鉱床・地震・活断層・地下水など人間社会と密接なこれらのターゲットの様子を明らかにしていきたいと考えております. 今後ともどうかよろ

しくお願いいたします。

### 謝 辞

本稿中の研究成果は、筆者が京都大学防災研究所地震予知センター、海洋研究開発機構などに在籍時に実施したものであり、多くの関係研究者・職員の方々のご協力によっております。また文中の南海トラフの研究成果は、京都大学ジオフィジクス分野との共同研究（当時）によるものです。改めて御礼申し上げます。

### 参 考 文 献

- Goto, T., Y. Wada, N. Oshiman and N. Sumitomo, Resistivity structure of a seismic gap along the Atotsugawa Fault, Japan, *Phys. Earth. Planet. Int.*, 148, 55-72, 2005.
- Goto, T., T. Kasaya, H. Machiyama, R. Takagi, R. Matsumoto, Y. Okuda, M. Satoh, T.

Watanabe, N. Seama, H. Mikada, Y. Sanada and M. Kinoshita, Marine deep-towed DC resistivity survey in a methane hydrate area, Japan Sea, *Exploration Geophysics*, 39, 52-59; *Butsuri-Tansa*, 61, 52-59; *Mulli-Tamsa*, 11, 52-59, 2008.

後藤忠徳・桜井紀旭・高木亮・笠谷貴史, 海底電磁探査による海底下メタンハイドレートの検出, *地学雑誌*, 投稿中, 2009.

Kasaya, T. and T. Goto, A small ocean bottom electromagnetometer and ocean bottom electrometer system with an arm-folding mechanism, *Exploration Geophysics* 40, 41-48; *Butsuri-Tansa*, 62, 41-48; *Mulli-Tamsa*, 12, 41-48, 2009.

木村俊則・芦田讓・後藤忠徳・笠谷貴史・三ヶ田均・真田佳典・渡辺俊樹・山根一修, 南海トラフ沈みこみ帯の地殻比抵抗構造, *物理探査*, 58, 251-262, 2005.

## 談 話 室

## イオン結晶中のポジトロニウムの動力学

井 上 耕 治\*

## Dynamics of positronium in ionic crystals

by Koji INOUE

平成21年3月1日付けで材料工学専攻マイクロ材料科学分野（白井泰治教授）の助教に着任し、同年8月1日付けで講師に昇任いたしました。東京育ちの小生にとって、ここ最近の京都のジメジメした暑さには参っています。その話を地元出身の人にすると、まだ本当の京都の夏を知らないのねと笑われます。「せっかく京都に来たのだから寺社巡りして」と思っていました。最近はこのジメジメ暑さでしようとも思いません。

簡単に経歴を紹介しますと、大学院生の時からずっと陽電子消滅の実験をしています。東京大学の兵頭俊夫研究室でイオン結晶中のポジトロニウム（陽電子・電子の束縛状態）の基礎物理学的研究をし、その後、東北大学金属材料研究所の長谷川雅幸研究室で、ポジトロニウムをプローブに用いたガラス材料の研究や、陽電子をプローブとした半導体中の欠陥、鉄中の銅析出物の研究を行い（この金研時代に3次元アトムプローブによる半導体デバイス中のドーバント分布の研究もする）、そして陽電子業界を支えてきた白井泰治先生のところに流れ着いた次第です。

陽電子が電子の反粒子であることは知っているも、陽電子を使って材料や物性研究しているということは一般的にはなかなか知られておりません。ポジトロニウムにいたっては、名前すら聞いたことないと言われるかもしれません。そんなポジトロニウムですが、イオン結晶中ではポジトロニウム格子相互作用によって、励起子同様さまざまな表情を見せてくれます。ここでは、そんなポジトロニウム的一端を紹介します。

ポジトロニウムは陽電子と電子の水素原子類似の束縛状態であり、正孔と電子の束縛状態である励起子の“親戚”という見方ができます。いくつかのイオン結晶中で

はポジトロニウムにとって2つの状態が存在する場合があります。ひとつはポジトロニウムの波動関数が結晶全体に広がった非局在（ブロッホ）状態、そしてもうひとつは、格子間位置にちょっと周囲の原子をどかして局在した自己束縛状態です。どちらの状態がエネルギー的に安定かはおおざっぱに言えばバンド組んで安定化するエネルギーと格子緩和を起こして安定化するエネルギーの大小関係で決まります。図1は格子変位したときの自己束縛状態を表しています。図1(a)は非局在状態Fが安定状態、自己束縛状態Sが準安定状態であり、(b)はその逆の場合である。非局在状態と自己束縛状態のどちらの状態からポジトロニウムが消滅するかは、占有している状態数で決まります。もちろん統計力学の教えるところにより、準安定状態には、安定状態と準安定状態のエネルギー差 $\varepsilon$ に対応するボルツマン因子の $\exp(-\varepsilon/k_B T)$ が掛かります。

数種類のアリカリハライド中で、ポジトロニウムの状

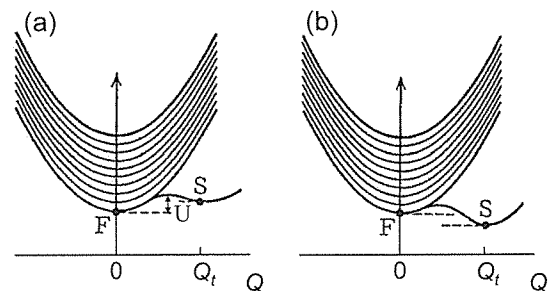


図1 ポジトロニウムの自己束縛に関する配位座標ダイヤグラム。自己束縛状態Sが配位座標 $Q=Q_t$ に対応する格子歪を伴うことを表す。(a) Sが非局在状態のバンドの底Fに比べて準安定な場合。(b) Sが非局在状態のバンドの底Fに比べて安定な場合。

態が、低温では非局在状態で温度が高くなると自己束縛状態になる現象は1970年代後半から1980年代前半に発見されました。ポジトロニウムは消滅（陽電子と電子が対消滅）して2本の511 keVの $\gamma$ 線になります。その時、エネルギー保存則と運動量保存則を満たすので、2本の $\gamma$ 線を同時に検出して調べてやると、消滅直前のポジトロニウムの運動量情報がわかります。この時用いたのは、陽電子消滅2光子1次元角相関法という1次元運動量分布を調べる手法です。非局在状態では、ポジトロニウムの波動関数は結晶全体に広がっており、実空間と運動量空間はフーリエ変換の関係で結びついているので、運動量分布としては、運動量  $p=0$  と逆格子点に対応する運動量にピークを持つような運動量分布になります（ブロッホ状態なので、波動関数を逆格子の平面波で展開できるので、逆格子点に対応する運動量のところに、展開係数に対応する成分を持つといったほうがわかりやすいかもしれません）。一方、自己束縛状態は、実空間では局在しているので、運動量空間ではやや広がった分布になります。アルカリハライドの1つである KCl 単結晶に

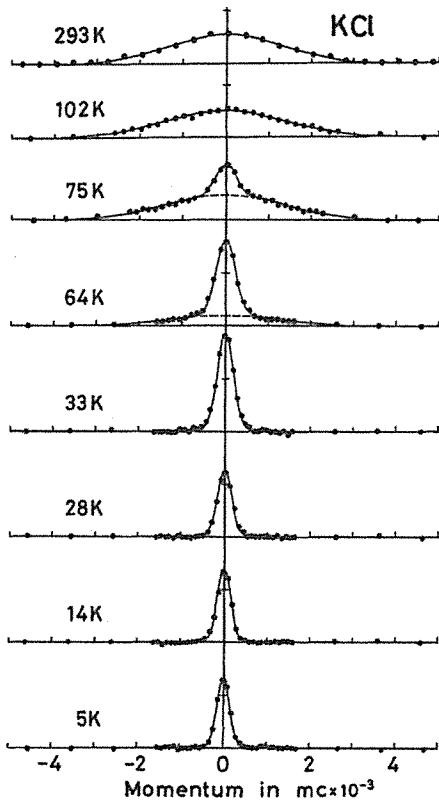


図2 KCl中のポジトロニウムの運動量分布の温度依存性。(破線は自己束縛ポジトロニウムの運動量分布)

おけるポジトロニウムの1次元運動量分布の温度依存性を図2に示します。低温で鋭かった運動量分布が温度上昇とともに、幅広い運動量分布成分が出現します。これは、低温ではポジトロニウムはバンドの底にいますが、温度が高くなると、非局在状態と自己束縛状態との間に存在するポテンシャル障壁  $U$  を熱的に乗り越えたり、または量子力学的なトンネル効果で、自己束縛状態へ移るからです（図1(a)の場合に対応）。ポジトロニウム全体に対する自己束縛状態の割合の温度依存性（図3）を見ると、ある温度から急に非局在状態から自己束縛状態へ転移していることが見て取れます。自己束縛状態のほうが、エネルギー的には準安定状態なのですが、状態数が非常に多く（自己束縛状態は、格子間位置に周囲の原子位置をちょっとずらして局在した状態なので、単位格子数程度（アドガドロ数個程度））存在するので、ボルツマン因子が掛かるのが、非局在状態よりも自己束縛状態の占有状態数が圧倒的に多いので、全部自己束縛状態から消滅します。

さて、低温では非局在状態で温度が高くなると自己束縛状態に転移する現象が見つかって、20年以上経ってもその逆の現象（低温では自己束縛状態で温度が高くなると非局在状態へ転移する現象）は観測されませんでした。すでに述べたように、自己束縛状態数が多いから、わざわざエネルギー的に準安定状態から消滅するわけで、自己束縛状態がエネルギー的に安定だったら、低温から全部自己束縛状態で消滅して、非局在状態からの消滅は観測されないことになります。しかし、私が大学院生の時に、アルカリ土類フッ化物の  $SrF_2$  と  $CaF_2$  単結晶中におけるポジトロニウムの状態が、低温では自己束縛状態であり温度上昇すると自己束縛状態から非局在状態へ転

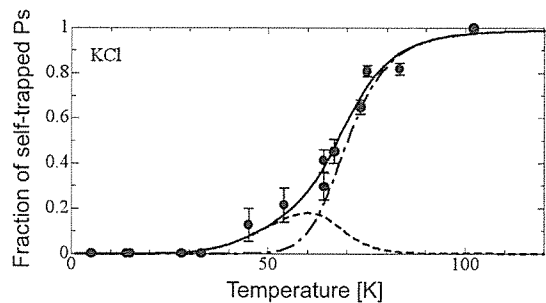


図3 自己束縛ポジトロニウム成分割合の温度依存性。実線は自己束縛状態の準位が非局在状態の準位より0.03 eV高く、障壁の高さが  $U=0.09$  eV、トンネル過程による遷移確率が  $8.2 \times 10^7 s^{-1}$  である時の理論曲線。トンネル過程による成分を破線で、熱的過程を一点鎖線で示す。低温でトンネル過程による寄与が大きいことがわかる。

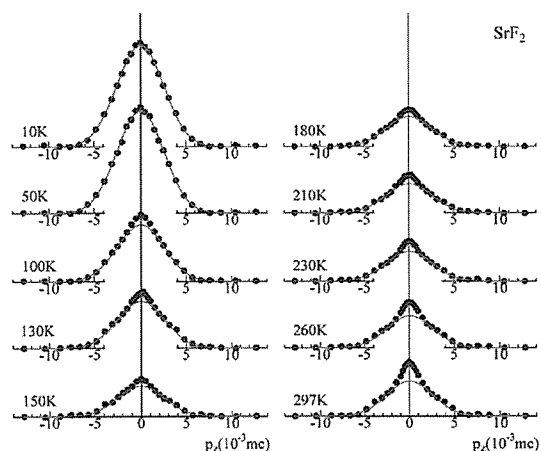


図4 SrF<sub>2</sub>中のポジトロニウムの運動量分布の温度依存性。(実線が自己束縛ポジトロニウムの運動量分布)

移していく現象を発見しました。図4はSrF<sub>2</sub>中のポジトロニウムの運動量分布の温度依存性ですが、温度が高くなると幅の狭い成分が出現して、図4では自己束縛成分の運動量分布に埋もれてわかりませんが、逆格子点に対応する運動量にサイドピークも観測できましたので、非局在状態へ転移していることがわかりました。さて、なぜ自己束縛→非局在転移が観測されたかという点、非局在ポジトロニウムの有効質量  $M^*$  がアルカリハライドよりも1桁程度重く、非局在状態数が多い(簡単なモデルでは非局在状態数は  $M^*$  の1.5乗に比例) ことがあげられます。そして自己束縛状態とバンドの底とのエネルギー準位差が小さく、温度が高くなると非局在状態からの消滅が観測できたのでした。非局在状態ポジトロニウムの割合の温度依存性(図5)からエネルギー準位差

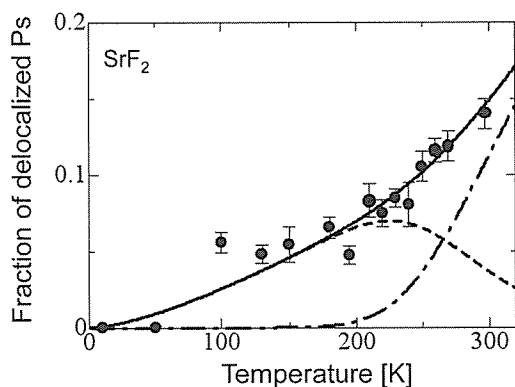


図5 非局在ポジトロニウム成分割合の温度依存性。実線は自己束縛状態の準位が非局在状態の準位より0.035 meV 低く、障壁の高さが  $U=0.18$  eV、トンネル過程による遷移確率が  $8.6 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$  である時の理論曲線。トンネル過程による成分を破線で、熱的過程を一点鎖線で示す。

やポテンシャル障壁の高さ、トンネル過程による遷移確率等が明らかになり、当時、自分では大発見! と思っていました。しかし、研究会、国際会議とかで発表しても、(ほんのごく一部のマニアを除いて) 冷ややかな反応しか得られず、非常にながかりしたのを覚えています。(ポジトロニウムの物理自体に興味のある人がほとんどいなかった。)

最後に、本研究室における研究対象、例えば陽電子消滅法を用いての材料中の転位挙動は、今までの行ってきた研究と比べると、少しテクニカル的には解析が難しいものですが、今までの色々な物質で陽電子消滅法を使って研究してきた経験を活かしてやっつけようと思っています。



## 談 話 室

第一原理計算によるリチウムイオン電池  
正極活物質の研究

小 山 幸 典\*

First-Principles Study on Positive Electrode Materials  
of Lithium-Ion Batteries

by Yukinori KOYAMA

## はじめに

平成20年4月1日付けで材料工学専攻材料物性学講座量子材料学分野の特定助教に着任いたしました小山幸典と申します。この場を借りてご挨拶を申し上げるとともに、これまでの略歴と最近の研究成果の一部を紹介させていただきます。私は平成9年3月に京都大学工学部冶金学科を卒業し、京都大学大学院工学研究科材料工学専攻にて足立裕彦教授（現京都大学名誉教授）の指導の下、平成14年3月に博士（工学）の学位を取得しました。その後、日本学術研究会特別研究員、米国マサチューセッツ工科大学博士研究員、京都大学国際融合創造センター（現産官学連携センター）産学官連携助手を経て現職に至っております。学位論文の題は「Electronic Study on Electrochemical Properties of Electrode Materials for Lithium Batteries（リチウム電池用電極材料の電気化学的特性に関する電子論的研究）」でありましたが、学位取得後もリチウムイオン電池や燃料電池などの電極活物質や固体電解質として使われる固体イオニクス材料について、その物性発現メカニズムを局所構造や電子状態の観点から解明することを主要な研究テーマとしてきました。本稿では、リチウムイオン電池の新規な正極活物質の特性を、非経験的な電子状態計算手法である第一原理計算を用いて調べた研究を紹介させていただきます。

## リチウムイオン電池

リチウムイオン電池は1991年に商用化された新しい蓄電池ですが、今日ではラップトップ PC や携帯電話とい

った携帯型情報機器の電源として広く利用されていることは周知の通りです。図1にリチウムイオン電池の動作原理を模式的に示しますが、正極活物質にはコバルト酸リチウム ( $\text{LiCoO}_2$ )、負極活物質には黒鉛、電解液にはリチウム塩を溶解させた有機溶媒が一般に用いられています。リチウムイオン電池を充電すると Li イオンが  $\text{LiCoO}_2$  から引き抜かれ、電解液を通過して黒鉛へ挿入されます。一方、放電時には Li イオンが黒鉛から  $\text{LiCoO}_2$  へ移動し、このとき、 $\text{LiCoO}_2$  と黒鉛における Li の化学ポテンシャルの差が電気エネルギーとして得られます。リチウムイオン電池は作動電圧が約 4V と高いことから、実用化されている蓄電池の中で最も大きな重量当たりのエネルギー密度を持っています。また、体積当たりのエネルギー密度も最大クラスであり、この大きなエネルギー密度が携帯型情報機器の電源としてリチウムイオン電池が用いられている大きな理由です。最近では、太陽光発電や風力発電など自然エネルギー発電における蓄電システムや、電気自動車やハイブリッド自動車といった電動車両の主電源・補助電源など、従来の応

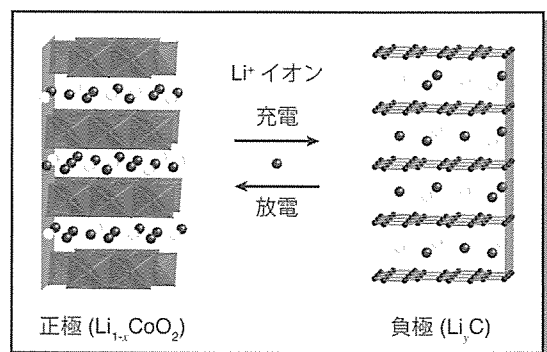


図1 リチウムイオン電池の模式図。

\*京都大学大学院工学研究科 材料工学専攻 特定助教  
(産官学連携)

用分野とは全く異なる分野からも熱い注目を集めています。このような新規な分野への応用を考えた場合、エネルギー密度のより一層の向上が期待されていることはもちろんのこと、安全性や繰り返し寿命の向上など多くの技術課題を解決する必要があり、電極や電解液、電池システムといった様々な観点からの開発研究が世界的に精力的に進められています。既に述べたように、従来のリチウムイオン電池の正極活物質には  $\text{LiCoO}_2$  が一般に用いられていますが、コバルトは資源埋蔵量が少ない希少元素であるため、自然エネルギー発電の蓄電システムや電動車両の電源のような大規模な利用には適していません。そのため、資源量が豊富な鉄やマンガンを主要な元素とする新規な正極活物質の研究開発が盛んに行われています。本稿では、リチウムイオン電池の新規な正極活物質である  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  と  $\text{LiFeBO}_3$  について、その特性を第一原理計算により調べた研究の一部を紹介しします。

### 充電による $\text{Li}_2\text{MnO}_3$ の電子状態変化

リチウムイオン電池の正極活物質として一般に用いられている  $\text{LiCoO}_2$  と本稿で取り上げる  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  の結晶構造を図2に示しますが、両者は類似の層状構造を有しています。相違点は  $\text{LiCoO}_2$  では Co イオンのみからなる層が  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  では Li イオンと Mn イオンが 1:2 の比で規則的に配列している点であり、このため  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  はしばしば  $\text{Li}(\text{Li}_{1/3}\text{Mn}_{2/3})\text{O}_2$  と表記されます。  $\text{LiCoO}_2$  を正極活物質として用いた場合、充電により  $\text{LiCoO}_2$  から Li イオンが取り出されますが、このとき Li イオンの電荷を補償するために Co イオンが +3 価から +4 価に酸化されます。一方  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  においては Mn イオンの価数は +4 価であり、この +4 価の Mn イオンは電気化学的にはそれ以上酸化することはできない、したがって  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  は正極活物質としては不活性であると考えられていました。しかし、  $\text{LiMO}_2$  (M = Co, Ni など) と  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  の固溶体において  $\text{LiMO}_2$  の量から想定される容量を上回る電気容量が報告され<sup>1-3)</sup>、

近年では、従来不活性と考えられていた  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  自体も充放電が可能であるという報告がなされています<sup>4-6)</sup>。この充放電の反応メカニズムとしていくつかの提案がなされていますが<sup>2,7-9)</sup>、未だ明確にはわかっていません。そこで  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  の充放電反応に関する知見を得るために、第一原理計算を用いて電子状態の変化を調べました。

充電状態における  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  の結晶構造は不明ですが、少なくとも充電初期においては  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  の層状の結晶構造を保ったままリチウムイオンが取り出されると仮定して、一部の Li イオンを取り除いた状態を考えました。  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  中の Li イオンのサイトとして、Li イオンのみの層（以下 Li 層）と Mn イオンと Li イオンの両者からなる層（以下 MnLi 層）の2種類のサイトが存在します。そこで、Li イオンを4分の1だけ取り出した  $\text{Li}_{1.5}\text{MnO}_3$  について、Li イオンがそれぞれのサイトから取り出された構造のエネルギーを比較したところ、Li イオンは Li 層から取り出された方が 1 化学式当たり 0.07 eV 安定であり、充電初期において Li イオンは Li 層から取り出されることがわかりました。一方、Li イオンをさらに取り出した  $\text{Li}_{1.0}\text{MnO}_3$  について Li イオンがどのサイトから取り出されるかを同様に調べたところ、  $\text{Li}_{1.5}\text{MnO}_3$  から  $\text{Li}_{1.0}\text{MnO}_3$  にかけては Li イオンが Li 層からではなく MnLi 層から取り出される方が 0.07 eV 安定であることがわかりました。既報の研究では、  $\text{LiCoO}_2$  と類似の層状構造であることから  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  でも Li 層のみから Li イオンが取り出されると暗黙の仮定を置いて議論されることが少なくありませんでしたが、これは誤りであると言えます。

以上のような充電反応における Li イオンの電荷補償メカニズムを明らかにするために、  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  の電子状態を調べました。図3に  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$ 、  $\text{Li}_{1.5}\text{MnO}_3$ 、  $\text{Li}_{1.0}\text{MnO}_3$  の状態密度を示します。なお、計算ではスピン分極を考慮しており、上向きのスピンと下向きスピンの状態をそれぞれ上半分、下半分に図示してあります。

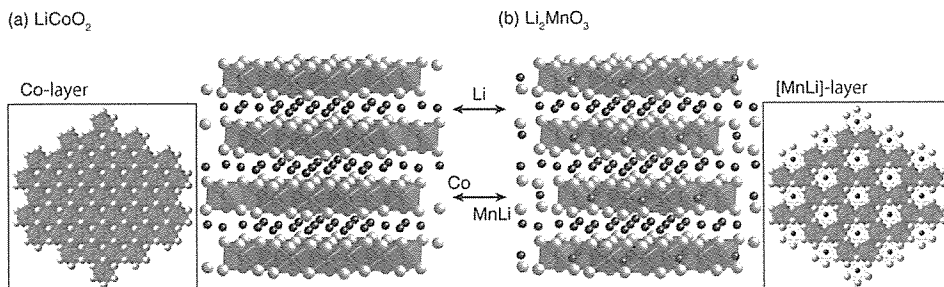


図2 (a)  $\text{LiCoO}_2$  と (b)  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  の結晶構造。Co イオンおよび Mn イオンは、それぞれ ( $\text{CoO}_6$ ) および ( $\text{MnO}_6$ ) 八面体で図示している。

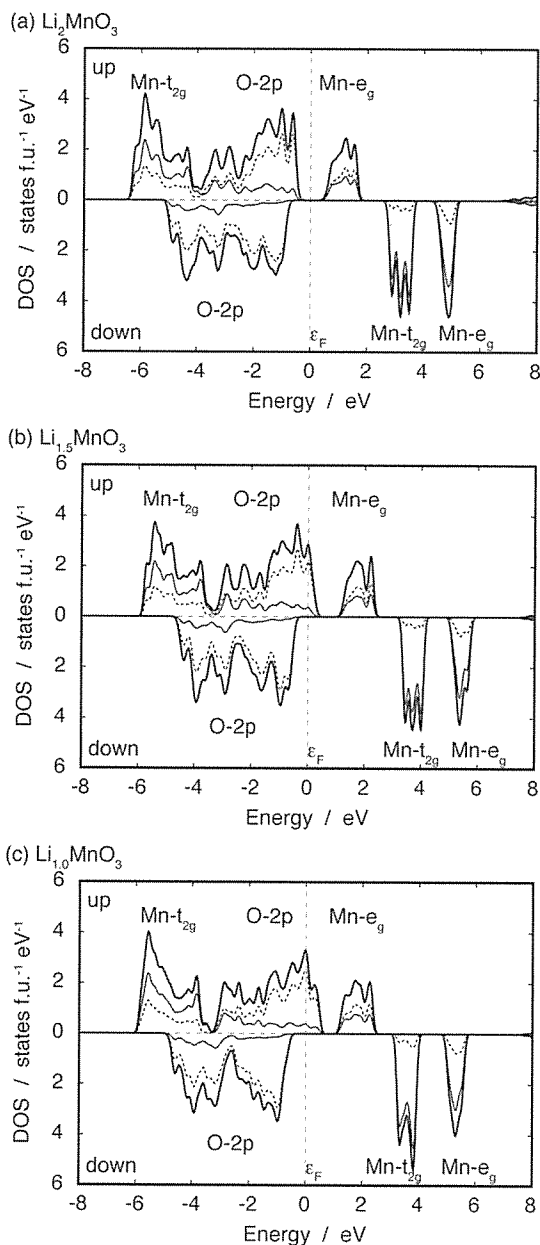


図3 (a)  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$ , (b)  $\text{Li}_{1.5}\text{MnO}_3$ , (c)  $\text{Li}_{1.0}\text{MnO}_3$  の状態密度。上向きおよび下向きスピンの状態をそれぞれ上下に、横軸はフェルミ単位が0となるように図示している。また、Mn および O の部分状態密度を細い実線および点線で示す。

また、横軸はフェルミ単位を0としてあります。 $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  の電子状態を見ると、Mn の3d軌道では上向きスピンの  $t_{2g}$  バンドのみが占有されており、典型的な+4価のMnイオンの電子状態です。このとき、価電子帯上端は主に酸素の2p軌道から構成されていました。このため、Liが取り除かれた  $\text{Li}_{1.5}\text{MnO}_3$  や

$\text{Li}_{1.0}\text{MnO}_3$  でもMnの電子状態は+4価のままと定性的には変化せず、代わりに酸素2p軌道の電子の一部が取り除かれていることがわかりました。このように、 $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  を充電しても4価のMnイオンはそれ以上酸化させることはできないということは従来の考えと一致する結果でしたが、一方で酸素が酸化されるという通常では起こらない反応がおこっていることが示唆されました。

このような「酸素の酸化反応」が現実的に起こりうるかどうかを調べるために、充電反応の電位を評価しました。 $\text{Li}_{x_1}\text{MnO}_3$  と  $\text{Li}_{x_2}\text{MnO}_3$  ( $x_1 < x_2$ ) の組成範囲における平均電位  $V_{\text{ave}}$  はリチウム金属を基準として

$$V_{\text{ave}} = -\frac{G[\text{Li}_{x_2}\text{MnO}_3] - G[\text{Li}_{x_1}\text{MnO}_3]}{(x_2 - x_1)e} \quad (1)$$

となります。ここで、 $G$  は1化学式当たりのギブスの自由エネルギー、 $e$  は電荷素量です。ギブスの自由エネルギー  $G$  を第一原理計算で求めたエネルギー  $E$  で近似することにより、充放電電位を非経験的に評価することができます。式(1)を用いて  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  から  $\text{Li}_{1.0}\text{MnO}_3$  の平均電位を計算すると4.6Vでした。一方実験では、初回充電時の4.5~4.6Vにおいて  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  系に特有の電位平坦部が観測されています。両者の電位はよく一致しており、このことから、初回充電時の4.5~4.6Vの電位平坦部において  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  からLiイオンが取り出され、このときの電荷補償は酸素が酸化されることによってなされているということが示唆されました。もちろん酸素が酸化された酸化物が化学的に安定とは思えなく、事実、初回充電とその後の放電で電気化学的な挙動が大きく異なるという実験結果が得られています。したがって、充電によりLiイオンが取り出された後に起こる副反応の解明が、 $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  およびその固溶体の正極活物質としての可能性を検討する上での課題となります。

### LiFeBO<sub>3</sub> の構造

近年、リチウム鉄リン酸塩  $\text{LiFePO}_4$  が大型リチウムイオン電池の正極活物質として注目を集めています。これは、資源が豊富な鉄を主要な元素としているという元素戦略的な意味に加え、 $\text{LiFePO}_4$  は充電状態における熱的・化学的安定性に優れているという特徴があるためです。通常正極活物質では、充電によりLiイオンが取り出されるときに電荷補償のため遷移金属元素が酸化されます。そして、高価数状態の遷移金属元素は高温・還元雰囲気下で安定性を失い、酸素を放出しやすくなるという問題があり、これはリチウムイオン電池の安全性の観点からも重要な技術課題となっています。一方、

LiFePO<sub>4</sub>においては全ての酸素原子がリン酸イオン(PO<sub>4</sub>)の構成原子として存在し、このP-Oの共有結合が強固であるために比較的高温においても酸素を放出しにくく、優れた熱的・化学的安定性が得られていると考えられています。このアイデアに基づき、リン酸塩やケイ酸塩といったいわゆるポリアニオン化合物が新規な正極活物質として近年盛んに研究されています。ポリアニオンの中ではホウ酸イオン(BO<sub>3</sub>)が最も小さな式量をもつことから、ホウ酸塩は重量当たりの電気容量の観点で有望であると考えられます。しかし、リチウムと遷移金属元素を含むホウ酸塩LiMBO<sub>3</sub>(M=Mn, Fe, Coなど)の結晶構造は知られているものの、リチウムイオン電池の正極活物質としての研究はほとんどありません<sup>10, 11)</sup>。そこで、充放電反応を理解する上で重要な知見となるLiイオンが取り除かれた状態の構造を系統的な第一原理計算により調べました。

LiFeBO<sub>3</sub>の結晶構造を図4に示します。Feイオンは5つの酸素原子からなる三角両錘の中心に位置しており、この(FeO<sub>5</sub>)三角両錘同士が隣共有により(10-1)方向に鎖状に連なっています。一方、Bイオンは酸素原子が三角形に3配位したホウ酸イオン(BO<sub>3</sub>)を形成しており、これが前述した鎖状の(FeO<sub>5</sub>)同士を連結しています。そして、Liイオンは(FeO<sub>5</sub>)鎖同士の隙間にある4つの酸素原子からなる四面体の中心に位置しています。本研究では、LiFeBO<sub>3</sub>の結晶構造のフレームワークとなるFeBO<sub>3</sub>の構造を保ったままLiイオンが取り出される、いわゆるトポタクティックな酸化還元反応を仮定し、Liイオンの一部もしくは全てを取り除いた構造のエネルギーを評価しました。なお、LiFeBO<sub>3</sub>の単位格子は8分子から構成されており、単位格子中でこのようなLiイオンの配列は2<sup>8</sup>=256通りあります。そして、この中から対称性により等価なものを除外すると46通りの配列があります。図5にこれら46

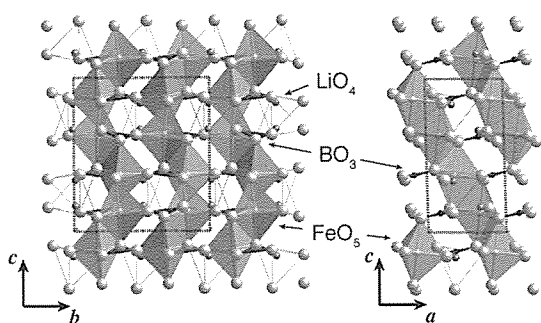


図4 LiFeBO<sub>3</sub>の結晶構造。(FeO<sub>5</sub>)三角両錘は灰色の多面体、(BO<sub>3</sub>)は黒色の三角形で図示している。

通りの配列について計算したエネルギーを、LiFeBO<sub>3</sub>とFeBO<sub>3</sub>のエネルギーを基準とする相対エネルギー

$$E_{\text{rel}}[\text{Li}_x\text{FeBO}_3] = E[\text{Li}_x\text{FeBO}_3] - x E[\text{LiFeBO}_3] - (1-x) E[\text{FeBO}_3], \quad (2)$$

として示してあります。この図で明らかのように、Liイオンが部分的に抜けた構造の多くは相対エネルギーが負であり、LiFeBO<sub>3</sub>とFeBO<sub>3</sub>の混合状態に比べて安定であるということがわかります。中でもLiイオンが半分だけ取り出されたLi<sub>1/2</sub>FeBO<sub>3</sub>や、4分の1だけ取り出されたLi<sub>3/4</sub>FeBO<sub>3</sub>は安定なLiイオンの配列でした。ここではLiイオンの配列を単位格子の範囲内でのみ検討しており、より長周期の配列や乱れた配列は含まれていませんが、Li組成に対する相の安定性をおおよそ議論することができます。まず、Li組成が1/2以上の組成では広い組成範囲をもつ固相が存在すると考えられ、単一相Li<sub>x</sub>FeBO<sub>3</sub>を保ったまま充放電が行われると考えられます。一方、Li組成が1/2以下の組成ではFeBO<sub>3</sub>とLi<sub>1/2</sub>FeBO<sub>3</sub>の混合状態よりも安定なLiイオンの配列は見つかりませんでした。このことから、充電が進んだLi組成が1/2以下の状態ではLi<sub>1/2</sub>FeBO<sub>3</sub>とFeBO<sub>3</sub>の2相に分離して充放電が行われると考えられます。充放電が単相で進行するか2相共存下で進行するかにより電気化学的な挙動は大きく異なりますので、LiFeBO<sub>3</sub>の正極活物質としての性能を最適化していく上で、今回の第一原理計算の結果は有用な情報となります。

また、LiFeBO<sub>3</sub>の酸化還元電位を式(1)により評価したところ、Li組成が1から1/2の範囲では2.9V、1/2から0の範囲では3.2Vとなりました。この電位はLiFePO<sub>4</sub>の3.4Vと比べると0.5Vから0.2V低く、エネルギー密度としては不利になります。しかし、LiFeBO<sub>3</sub>の全てのLiイオンを充放電に利用することが

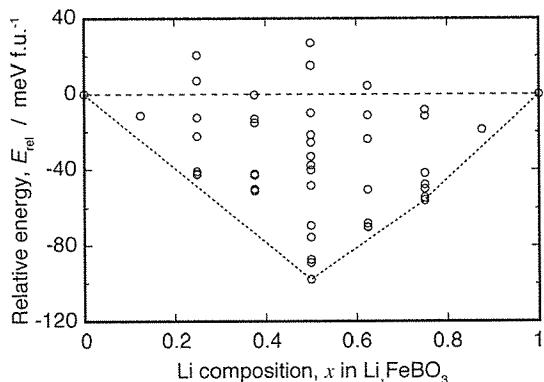


図5 Li<sub>x</sub>FeBO<sub>3</sub>の相対エネルギー。各点が一つのLiイオンの配列を表す。

できれば、その重量当たりの理論電気容量は 220 mAh  $g^{-1}$  と  $LiFePO_4$  よりも 30% 大きいことから、エネルギー密度としては  $LiFePO_4$  を上回ることができそうです。残念ながら、今日の段階では  $LiFeBO_3$  の研究はほとんどなされておらず、可逆的な電気容量は理論値の半分程度しか得られていません。そこで、Li 組成により相の安定性が異なること、特に Li 組成が 1/2 以下では  $Li_{1/2}FeBO_3$  と  $FeBO_3$  の 2 相共存となること、そして Li 組成が 1/2 以下になると充放電電位が上昇することなど、第一原理計算で得られた知見を基に  $LiFeBO_3$  の性能向上を学外のグループとの共同研究にて試みています。

### お わ り に

本稿では第一原理計算を用いたリチウムイオン電池の新たな正極活物質に関する最近の研究の一部を紹介させていただきました。しかし、 $Li_2MnO_3$  や  $LiFeBO_3$  を正極活物質として実用化していくためには様々な物性の検討や問題の克服が必要であり、本稿で紹介した内容で研究が終わるのではなく、むしろ、これから発展させていく段階です。私は材料研究において第一原理計算などの理論計算が今後ますます重要になると考えています。もちろん、理論計算が実験を完全に置き換えられるとは考えておらず、それよりも、実験により「見る」ことが困難なものを「見る」ための新しい道具として、実験と理

論計算を上手く組み合わせていくことが今後の材料研究の鍵となると信じています。これからもより一層精進していく所存ですので、今後ともご指導、ご鞭撻を賜りますよう、よろしくお願い申し上げます。

### 参 考 文 献

- 1) M. Tabuchi, *et al.*, *J. Electrochem. Soc.*, 149, A509-A524 (2002).
- 2) Z. H. Lu, *et al.*, *J. Electrochem. Soc.*, 149, A779-A791 (2002).
- 3) C. S. Johnson, *et al.*, *Electrochem. Commun.*, 6, 1085-1091 (2004).
- 4) A. D. Robertson and P. G. Bruce, *Chem. Commun.*, 2002, 2790-2791 (2002).
- 5) C. S. Johnson, *et al.*, *Electrochem. Commun.*, 6, 1085-1091 (2004).
- 6) D. Y. W. Yu, *et al.*, *J. Electrochem. Soc.*, 156, A417-A424 (2009).
- 7) J.-S. Kim, *et al.*, *Chem. Mater.*, 16, 1996-2006 (2004).
- 8) A. D. Robertson and P. G. Bruce, *Chem. Mater.*, 15, 1984-1992 (2003).
- 9) D. Pasero, *et al.*, *Chem. Mater.*, 17, 345-348 (2005).
- 10) V. Legagneur, *et al.*, *Solid State Ionics*, 139, 37-46 (2001).
- 11) Y. Z. Dong, *et al.*, *J. Alloy. Compd.*, 461, 585-590 (2008).

## 談 話 室

多結晶金属材料でみられる不均一変形の  
画像処理を利用した定量測定

寺 田 大 将\*

Quantitative image analysis of inhomogeneous  
deformation in polycrystalline metals

by Daisuke TERADA

## 1. はじめに

私は、平成21年4月1日付で、材料工学専攻材料構造物性学分野（辻伸泰教授）の助教に着任いたしました。これまでの経歴を簡単に述べますと、平成16年3月に九州大学大学院総合理工学府物質理工学専攻を修了し、博士（工学）の学位を取得しました。九州大学時代には、阿部弘教授、中島英治助教授のご指導の下、高Crフェライト系耐熱鋼のクリープ変形と組織変化について研究を行いました。学位取得後、平成16年4月より九州大学産学連携センターで学術研究員として、車載用イットリア添加ジルコニウム基 NOx センサ検知極の組織に関する研究を行いました。その後、平成18年2月より大阪大学大学院工学研究科知能・機能創成工学専攻の特任助手、平成19年4月より同専攻の助教として勤務いたしました。大阪大学では、辻伸泰先生のもと、巨大ひずみ加工法を利用して作製した平均結晶粒径  $1\mu\text{m}$  以下の超微細粒材料を中心に組織と力学特性に関する研究を行いました。今回は、組織と力学特性に関する研究の中で、最近も続けて取り組んでいる多結晶金属材料の不均一変形の定量測定システムの構築と実際の材料に適用した例について、ご紹介しようと思います。

## 2. 多結晶金属の不均一変形

多結晶金属材料の変形は、さまざまなスケールで本質的に不均一です。金属結晶材料の塑性変形の素過程である転位の運動に着目すると、転位のすべり運動は特定の結晶面上で生じますが、結晶中のすべてのすべり面上で均等な数の転位が運動しているわけではありません。同一結晶粒内であっても場所によって活動するすべり系の

組み合わせやすべり量が異なってきます。多結晶体の場合には、結晶方位の異なる結晶粒が隣り合っており、粒界における変位の連続性を保つために、同一結晶粒内での不均一性はさらに助長されると考えられます。さらに、マクロな視点からも変形の不均一は生じます。例えば、引張試験では、上記のようなミクロな不均一変形を内在しながらも試験片は初めにマクロには均一に変形が進行します。ある程度の引張ひずみ以上では、試験片にくびれが生じ、マクロにも不均一な変形が進行するようになります。

引張試験等で測定されるマクロな強度や延性は、結晶粒径などの組織パラメータが大きく影響していることは、従来からよく知られています。マクロな強度や延性が材料組織とどのような関係を有しているか、その本質的な理解のためには、例えば個々の結晶粒のミクロな変形挙動を定量的に測定し、その重ねあわせである強度や延性と関連付けて議論する必要があります。また、マクロな延性は、くびれ発生により決定付けられるため、マクロな不均一変形挙動について定量的に評価することも重要です。しかしながら、引張試験等の一般的に用いられている力学試験のほとんどは、変形は均一であるという前提でマクロな強度や延性のみを測定しています。くびれ現象などのマクロな不均一変形であっても、その詳細を正確に測定するのは困難です。

ところで、近年、画像処理を利用して局所的なひずみを定量的に求める手法が提案されています。これらの手法を利用することで、上記の不均一変形について定量的に測定できると考えられます。そこで、引張試験中の試験片に対して、画像処理を利用したひずみ測定をおこない、マクロおよびミクロな不均一変形挙動について、詳細を調べることを目的としました。まずは、解析手法について以下に説明します。

\*京都大学大学院工学研究科 材料工学専攻 助教

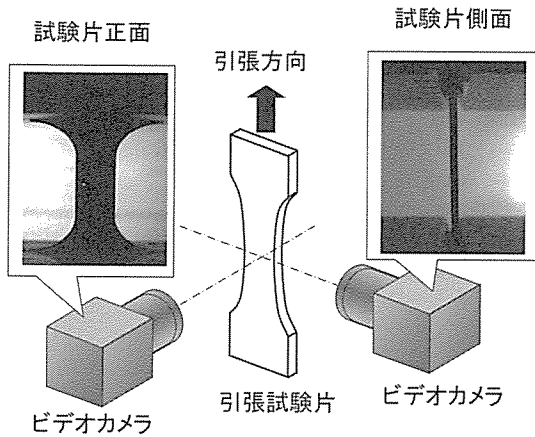


図1 試験片画像記録システムの模式図。試験片と2台のビデオカメラの位置関係と実際に撮影された動画の一例

### 3. 不均一変形の解析手法

#### 3.1 マクロな不均一変形の定量測定

引張試験中に生じるくびれ等のマクロな不均一変形挙動を調べるためには、引張試験中の試験片の外形変化を記録する必要があります。そこで、本研究では、平板引張試験片の形状変化をデジタルビデオカメラを用いて引張試験中の試験片外形を連続的に記録しました。図1に示すように、直行する2台のビデオカメラを用いて、平板試験片正面方向と側面方向の2方向から撮影を行いました。記録した動画から任意の試験時間におけるモノクロデジタル画像を作成し、その静止画像から試験片のエッジを画像処理により検出しました。モノクロのデジタル画像を構成する個々のピクセルは256階調の輝度値を持っており、試験片と背景の境界で輝度値は大きく変化します。この輝度値が大きく変化する画像中の座標を試験片のエッジとして検出することで、引張試験中の任意の試験時間における試験片形状の数値化された正確なトレースを得ることができます。正面と側面の2方向からのトレースを得ることで、試験片の外形を三次元的に捉えることができ、局所的な形状変化を捉えることが可能となります。

#### 3.2 ミクロな不均一変形の定量測定

個々の結晶粒の変形挙動といったミクロな変形挙動を測定するために、光学的全視野ひずみ計測法を用いました。光学的全視野ひずみ計測法とは、光学的な測定手段により得られた情報をもとに、観察視野の全領域に対して局所的なひずみを計測する方法のことで、モアレ法<sup>1)</sup>、スペckル干渉法<sup>2)</sup>、デジタル画像相関法<sup>3-5)</sup>など種々の光学的手法を利用した方法が提案されています。ここで

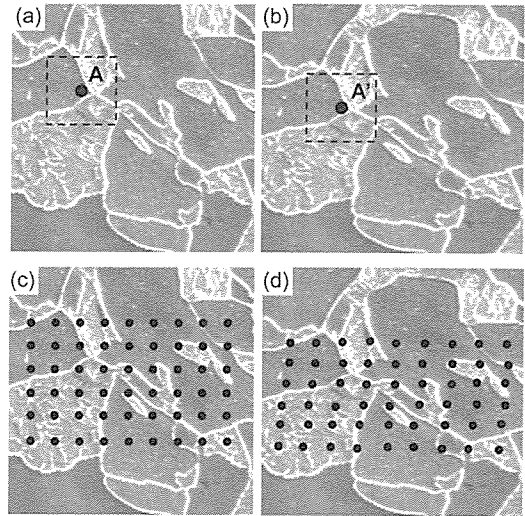


図2 画像相関法を利用した光学的全視野ひずみ計測法の手順を示した模式図。(a)および(c)は変形前の組織、(b)および(d)は変形後の組織。

は、材料の変形前後での材料組織の画像の比較から局所ひずみを測定するデジタル画像相関法について説明します。図2にデジタル画像相関法による光学的全視野ひずみ計測法の手順を模式的に示します。同一視野の変形前の組織(図2(a))と変形後の組織(図2(b))があるとします。(a)中の任意の点Aが、変形後の(b)中でどこに移動したのかわかれば、点Aの変位を求めることができます。変形前の点Aが変形後の組織中のどこに対応するのか調べるために、デジタル画像相関法を利用します。まず、点Aを中心として、例えば10ピクセル四方の四角形の領域を考え(図2(a)中の破線の四角形)、領域内の各ピクセルの輝度値の比較より、変形前の四角形の領域内のパターンと類似したパターンを持つ領域を変形後の組織中から探索することで点Aの移動先点A'を知ることができます(図2(b)中の破線の四角形が、図2(a)中の四角形と類似したパターンを持つ領域であり、その中心点を点A'とみなすことができます)。このような変位を求める測定点を変形前の組織に対して、図2(c)に示すように格子点状に視野全体に複数設定すれば、図2(d)に示すように変形後にそれぞれの点がどのような方向へどれだけ動いたのかわかることができ、全視野での変位の分布が得られます。さらに、得られた変位をもとに、二次元のひずみテンソルを計算することができます。

### 4. 実際の材料への応用

#### 4.1 マクロな不均一変形の解析

平均結晶粒径が1 $\mu$ m以下の超微細粒材料は、粒径数

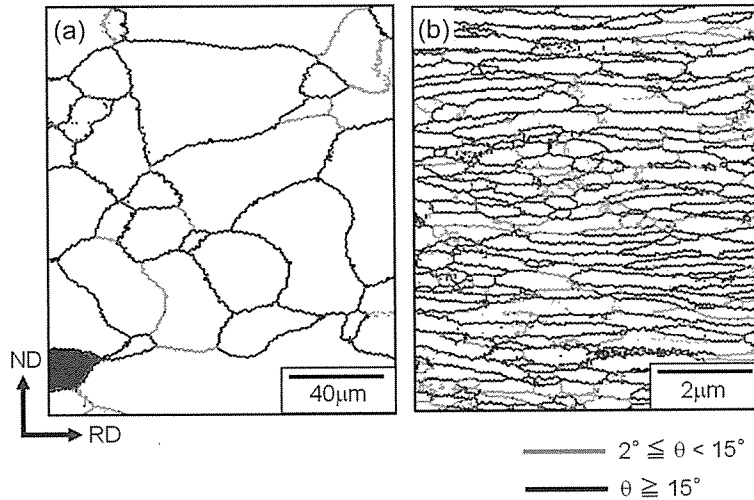


図3 EBSD測定により得られた(a)粗大結晶粒Alと(b)超微細粒Alの粒界マップ。图中、黒線は方位差 $15^\circ$ 以上の大角粒界、灰色線は $2^\circ$ から $15^\circ$ 未満の小角粒界を示す。

十 $\mu\text{m}$ の粗大粒材料の数倍の強度を示しますが、単相材料の超微細粒材料では、引張試験で全伸びが10%以下と引張延性に乏しいことが知られています。この低い延性は、引張試験初期に塑性不安定を起こして、初期にくびれが生じるためと考えられています。したがって、くびれの発生について詳細を知ることが重要ですが、組織の違いによってくびれ発生がどのように変化するか、十分な理解は得られていません。そこで、粗大な結晶粒を有するアルミニウムと超微細粒アルミニウムについて、引張試験中の試験片外形変化について詳細を調べました。

試料として、工業用純アルミニウム(A1100, 純度99%)を用いました。平均結晶粒径 $24\mu\text{m}$ の完全再結晶組織を有する試料と巨大ひずみ加工法のひとつである繰返し重ね合わせ接合圧延(ARB: Accumulative Roll-bonding)法<sup>9</sup>を利用して作製した平均結晶粒厚さ $220\text{nm}$ の超微細粒アルミニウムを作製し、引張試験に供しました。図3にEBSD測定により得られた粗大結晶粒Al(a)と超微細粒Al(b)の粒界マップを示します。图中、黒線は方位差 $15^\circ$ 以上の大角粒界、灰色線は $2^\circ$ から $15^\circ$ 未満の小角粒界を示しています。図より求めた結晶粒の平均厚さは、それぞれ、粗大結晶粒で $24\mu\text{m}$ 、超微細粒材料で $0.22\mu\text{m}$ でした。試験片は、JIS5号引張試験片の1/5の大きさ(平行部長さ $10\text{mm}$ 、平行部幅 $5\text{mm}$ )とし、室温で初期ひずみ速度 $8.3 \times 10^{-4}\text{s}^{-1}$ の条件で引張試験を行いました。

引張試験中に、試験片の形状変化を試験片正面と側面の直行する二方向からビデオカメラにより動画として連

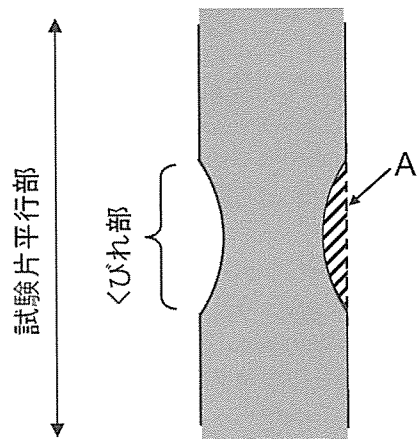


図4 くびれが発生した試験片平行部を模式的に示した図

続的に記録し、平板試験片の正面方向、側面方向それぞれについて、数値化された試験片外形のトレースを作成しました。得られたトレースをもとにくびれ開始点の解析を行いました。引張試験片がマクロに均一変形している間は平行部のエッジは直線を保ったまま変形が進行しますが、くびれが生じると、平行部の直線性は崩れ、くびれ近傍でのみ不均一な変形が進行します。したがって、平行部のエッジが直線からどれだけずれたのかを調べることで、くびれの発生を調べることができます。図4は、平行部にくびれが発生したときの模式図を示しており、エッジの直線からのずれとして図4中の斜線の部分の面



積  $A$  を求めました。ただし、面積  $A$  は、平行部長さによっても変化するため、 $A$  を平行部長さのピクセル数で割って規格化した面積  $\Delta A$  を求めました。ひずみに対して  $\Delta A$  をプロットし、 $\Delta A$  が急激に増加し始めるひずみ量を求め、くびれの発生点としました。さらに、試験片外形の二方向のトレースから、試験片平行部の最小の局所断面積（くびれ部の断面積）を求めることができます。引張試験の荷重をくびれ部の断面積で除することで、くびれ発生以降の真応力を求めました。

次に得られた実験結果を示します。図5に、記録した画像より得られた公称ひずみ 2.5% 毎の引張試験片正面の試験片のトレースを示します。トレースの上下で大きく弧を描いている部分は、試験片の肩部です。引張試験が進むと、図中の縦軸約 750 pixel の位置でくびれが発生し、くびれが進展している様子わかります。

図5のトレースより求めた  $\Delta A$  の公称ひずみに対するプロットを図6に示します。図中の四角と丸のプロット点は、試験片の左右のエッジに対してそれぞれ求めたものを示しており、四角と丸のプロット点ともに、矢印で示す公称ひずみ 31% のところで  $\Delta A$  の傾きが変化していました。したがって、ここでくびれが開始したことがわかります。同様の解析を試験片側面方向からも行った結果、試験片の板厚方向のくびれは、ひずみ 39% で開始していることがわかりました。

図7に粗大結晶粒 Al の公称応力-公称ひずみ曲線を示します。公称応力-公称ひずみ曲線は連続降伏を示し、公称ひずみ 33% で引張強さ 84 MPa を示した後、公称応力は低下しています。また、応力-ひずみ曲線から加工硬化率を求め、塑性不安定条件を満たすひずみを求めたところ、33% と引張強さを示すひずみと一致してい

ました。この引張強さや塑性不安定条件を満たすひずみは、試験片のトレースよりもとめた板幅方向のくびれ開始点とほぼ一致していることがわかります。以上のことより、今回の平板引張試験においては、塑性不安定条件を満たしたときに板幅方向でくびれが生じ、板幅方向のくびれが進展した後、板厚方向のくびれが生じることがわかりました。

さらに、試験片外形の2方向からのトレースに基づいて、くびれ部における最小の局所断面積を求めて計算した真応力を、図7中に点線で示します。図より、くびれ発生以降、公称応力は低下しているのに対し、真応力はくびれ発生以降に大きく増加しているのがわかります。これは、くびれが発生し、くびれ部で変形が進行している間、くびれ部は加工硬化していることを示唆しています。

同じ解析を、超微細粒 Al に対して行った結果を次に示します。図8に公称応力-公称ひずみ曲線（実線）とくびれ部における最小の局所断面積を求めて計算した真応力（破線）を示しています。また、図中の矢印 a, b, c

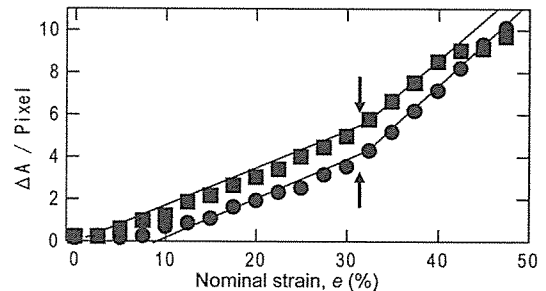


図6 図5のトレース像よりもとめた  $\Delta A$  をひずみに対してプロットしたグラフ

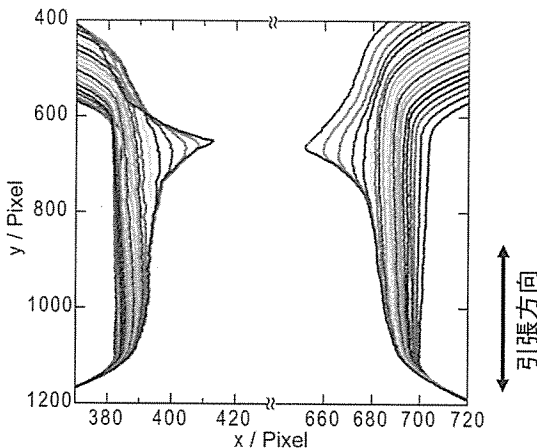


図5 記録した画像より得られた公称ひずみ 2.5% 毎の引張試験片正面の試験片のトレース

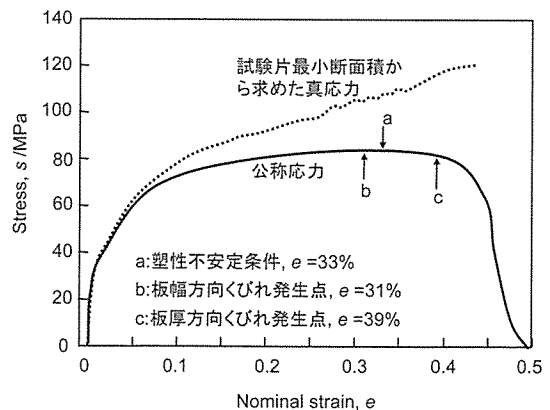


図7 粗大結晶粒 Al の公称応力-公称ひずみ曲線とくびれ発生点、および引張試験中の試験片最小断面積からもとめた真応力-公称ひずみ曲線

は、それぞれ、塑性不安定条件、板幅方向のくびれ発生点、板厚方向のくびれ発生点を示しています。塑性不安定条件と板幅方向のくびれ発生点はほぼ一致しており、板厚方向のくびれ発生点はそれらよりも大きいひずみを示しています。これは、粗大結晶粒 A1 と同じ結果です。一方で、真応力の曲線を見ると、粗大結晶粒 A1 の場合と異なり、板幅方向のくびれ発生後、真応力が低下しています。この結果は、くびれ部で加工軟化している可能性を示唆しています。

以上のように、ビデオカメラを用いて試験片の形状変化を記録した動画をもとに解析を行うことで、くびれ進展の様子やくびれ開始点の特定、くびれ部での不均一変形を考慮した真応力を求めることができました。さらに、超微細粒材料では、くびれ部分での加工軟化という特異

な現象が生じている可能性を示唆する結果が得られました。

#### 4.2 ミクロな不均一変形解析の応用例

構造材料に求められる力学特性である強度と延性はトレードオフの関係にあると考えられています。高強度化にともなう延性の低下は克服しなければならない課題です。ところで、フェライト+マルテンサイト二相 (DP: Dual Phase) 鋼に代表される硬質相と軟質相により構成された複相組織において、高強度と高延性を両立できることが知られています。この高強度と高延性を両立について、これまでは、硬質相が強度を担い、軟質相が延性を担うという複合材料的な説明がされてきました。しかしながら、軟質相と硬質相は強度が異なるため、変形中の変形挙動は異なり、相界面での変位の連続性を保つために変形中に相互作用しながら変形しているものと考えられますが、その詳細は明らかになっていません。そこで、二相鋼中の個々の結晶粒の局所変形について解析を行いました。

試料として、極低炭素鋼 (Fe-0.087C-0.79Si-1.77Mn-0.009P-0.002S-0.02Cr-0.01Mo-0.003N (mass%)) を用い、二相域温度である 790℃ で 1.8ks 保持した後、氷水焼入れを施すことでフェライト+マルテンサイトの二相組織 (マルテンサイトの体積率: 45%) を得ました。この試料から平板引張試験片を切り出し、室温で塑性ひずみ 6.4% まで引張変形 (初期ひずみ速度:  $8.3 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ ) させ、除荷後に試験機から取り外しました。引張試験片の平行部について、引張試験前後に同一視野の SEM 組織観察を行い、得られた変形前後の同一視野 SEM 像に光学的全視野ひずみ計測法を適用し、局所ひずみ量を求めました。

続いて、得られた結果について示します。図 9(a) に、

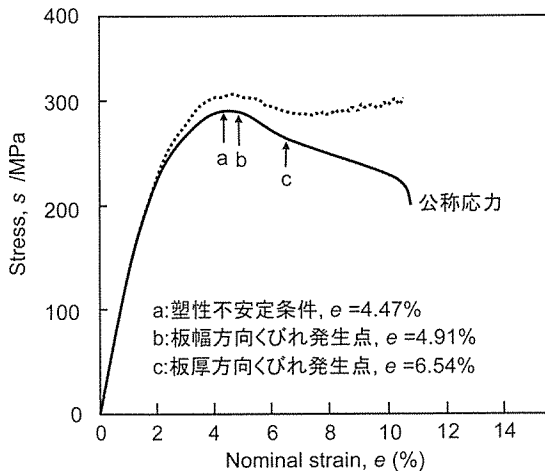


図 8 超微細粒 Al の公称応力-公称ひずみ曲線とくびれ発生点、および引張試験中の試験片最小断面積からもとめた真応力-公称ひずみ曲線

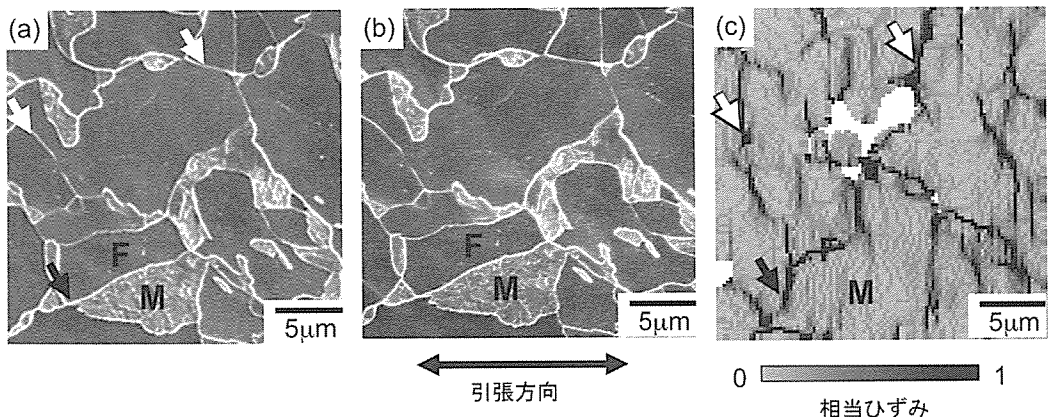


図 9 (a) 変形前の SEM 像、(b) 塑性ひずみ 6.4% 引張変形後、除荷した試料の SEM 像および (c) 画像相関法を利用した光学的全視野ひずみ測定法で得られた相当ひずみの分布。

フェライト+マルテンサイト二相鋼の引張試験片平行部の変形前のSEM像を示します。図中の黒い結晶粒はフェライト相であり、白い結晶粒はマルテンサイト相です。図より、粒径約 $10\mu\text{m}$ のフェライト結晶粒と数 $\mu\text{m}$ のマルテンサイト結晶粒で構成されているのがわかります。図9(b)は、塑性ひずみ6.4%まで引張変形し除荷した試料の図9(a)と同一視野のSEM像を示しています。図9(a)と(b)から、光学的全視野ひずみ計測法を用いて局所ひずみを求めました。解析では、変形前のFig.8(a)中に $100\times 100$ 個の測定点を設定し、各領域の局所ひずみを求めました。観察領域の相当ひずみの二次元分布を図9(c)に示します。図は、x方向とy方向の垂直ひずみ $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ と、せん断ひずみ $\gamma_{xy}$ を用いて、相当ひずみ $\varepsilon = [2/3\{\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + 1/2(\gamma_{xy}^2)\}]^{1/2}$ の二次元分布を示しています。図中のコントラストが相当ひずみの大小を示しており、最小値0を灰色、最大値1を黒とし、色が灰色に近いほど相当ひずみが小さく、黒に近いほど大きいことを示します。また、図中で白い部分は、光学的全視野ひずみ計測でひずみ量を測定ができなかった領域です。図9(c)より、ひずみの分布は一様ではなく非常に不均一であることがわかります。特に相当ひずみが大きい黒色の領域は、筋状に分布しているのがわかります。このような筋状のひずみの高い領域は、フェライト粒内のみを観察され、マルテンサイト粒内ではほとんど見られませんでした。このことから、二相鋼では、硬質相であるマルテンサイト粒よりも軟質相のフェライト粒に変形が集中していることがわかりました。また、筋状の高ひずみ領域の分布は、結晶粒界で途切れず、隣接する結晶粒へと連続してつながっていました。(図9(a)と(c)中の白矢印で示した部分)。その筋状の高ひずみ領域のつながり方に着目すると、マルテンサイト粒を迂回して、フェライト粒からフェライト粒へとつながっているように見えます(図9(a)と(c)中の黒矢印で示した部分)。以上の結果は、二相鋼の塑性ひずみ6.4%での塑性変形では、軟質相であるフェライト結晶粒が塑性ひずみを大きく担っていることが示唆されます。以上のような二相鋼中のマイクロな不均一変形は、マクロな強度や延性に大きく影響していると考えられます。今後、二相鋼組織でみられたマイクロな不均一変形が高強度・高延性の

両立にどのように寄与しているのか、さらに検討を重ねていく予定です。

## 5. ま と め

今回は、多結晶金属材料の不均一変形の定量測定システムの構築と実際の材料に適用した例について紹介させていただきました。マクロな不均一変形解析により、くびれが発生するひずみ量の特定制や、組織の超微細粒化により、くびれ部での変形挙動が変化することを示唆する結果が得られました。今後は、さらにマクロな不均一変形挙動に対する結晶粒径の影響について詳細を調べていこうと考えています。また、マイクロな不均一変形の解析により、フェライト+マルテンサイト二相鋼中の個々の結晶粒の局所変形について調べた結果、結晶粒の変形が非常に不均一であること、軟質相であるフェライトが変形を大きく担っていること、さらに、硬質相であるマルテンサイトを迂回するように高ひずみ領域がフェライト粒内に分布していることなどが明らかとなりました。このようなひずみ分布の不均一性がマクロな力学特性にどのように影響しているのか、さらなる検討を重ねていく予定です。

これまで均一変形を仮定して評価されてきたマクロな力学特性について、マイクロな不均一変形の重ねあわせとしてマクロな力学特性を捉えることで、また、マクロに生じる不均一変形も考慮した定量測定を行うと、組織と力学特性の関係についてより詳細を明らかにしていきたいと思っています。

## 参 考 文 献

- 1) D. Post, *Exp Mech* 31 (1991), pp. 276-280.
- 2) N. Deng and I. Yamaguchi, *Appl Opt* 29 (1990), pp. 296-303.
- 3) T.C. Chu, W.F. Ranson, M.A. Sutton and W.H. Peters, *Exp Mech* 25 (1985), pp. 232-244.
- 4) S.R. Mcneill, W.H. Peters and M.A. Sutton, *Eng Fract Mech* 28 (1987), pp. 101-112.
- 5) J. Kang, D.S. Wilkinson, M. Jain, J.D. Embury, A.J. Beudoin and S. Kim et al., *Acta Mater* 54 (2006), pp. 209-218.
- 6) N. Tsuji, Y. Saito, S.H. Lee, Y. Minamino, *2003 Adv. Eng. Mater.* 5 (2003), pp. 338-344.

## 談 話 室

## 歌をめぐる物語

—琵琶湖周航の歌、琵琶湖哀歌、七里ヶ浜哀歌—

小 岩 昌 宏\*

A revisit to songs of “Lake Biwa Rowing Song (Biwako Shuko no Uta)”  
and of Mt. Fuji Entirely Covered with Snow

by Masahiro KOIWA

滋賀県に住んで20年余、毎日琵琶湖を眺めて暮らしている。以前は自宅の2階からも見えたのだが、木が生い茂り、あとから建った市営アパートが視界をさえぎった。しかし、車で5分の場所に借り受けた畑からは、ほぼ真正面の対岸には琵琶湖博物館の風車（風力発電機）も望め、晴れ渡った日の瑠璃色の湖面、灯ともしごろからの夜景は目を楽しませてくれる。

「琵琶湖周航の歌」は高校生のときに初めて耳にしたように思う。昭和27年に開局した文化放送は関東圏を対象圏としていたが、私が住んでいた愛知県でも5球スーパー受信機なら電波を捉えることができた。夏休みのアルバイトで稼いだ金で部品を買い集め、組み立てたラジオで旺文社提供の大学受験ラジオ講座を聴いた。1時間に2コマの講義の間の休憩時間に、寮歌・学生歌が流された。その折に初めて聴いたのだと思う。

大学2年の頃、琵琶湖湖畔 堅田の旅館に泊まったことがある。大学入試模擬試験の打ち合わせのためであった。当時は予備校など受験産業もまだ全国展開をしておらず、諸大学の学生がアルバイト団体を組織し、各地の高校の教室を借用して模擬試験を実施していた。そのような団体の全国的な協議会有り、年に1、2回は統一問題を作成し、全国学力コンクールと銘打って全国一斉の模擬試験を行っていたのである。私は、東京大学学生文化指導会の数学問題作成担当の一人として、堅田の会議に参加した。その夜、京大生のバイト仲間とボートに乗ったとき、彼と一緒に「琵琶湖周航の歌」を歌った。思いがけず、堅田の近くに住むことになったのだが、浜大津-近江今津間を運行していた江若鉄道線は1969年に廃止になり、当時とはすっかり様子が変わっている。

「歌に思い出が寄り添い、思い出に歌は語りかけ、そ

のようにして歳月は静かに流れていきます。」(NHK っぽんのメロディ、中西 龍) まさしく、「琵琶湖周航の歌」は私にとってそのような歌である。琵琶湖の畔に林住期を送る今、この歌、およびこの歌と曲調、曲想の似ている「琵琶湖哀歌」、「七里ヶ浜哀歌」にまつわる話を綴ってみたい。

## 1. 琵琶湖周航の歌

琵琶湖疎水の取水口に突き出た三保ヶ崎に「われは湖の子」記念碑と歌碑がある。周航開始80年を記念して昭和48年（1973）に三高同窓生が建設したもので、記念碑には建碑の由来が記されている。

「……明治25年水上運動部を創設して、琵琶湖に漕艇を開き、翌26年4月有志21名初めて周航の業をなす。尔来80年、競漕は年々隆盛に赴き、周航は琵琶湖漕艇の神髄となり、湖上に艇を操るもの皆この岬より出でてこの岬に還える。或る時は力漕よく漕技を練り、或る時は湖上風物に詩情を養い、沿岸の史跡を訪ね人情を探り、艇を友にする者友情流露して心友堅く相結ぶ。

……小口太郎君等琵琶湖周航の歌を創るや、学生好んでこれを唱し、遂に一世を風靡して今日に至る……」

## 歌の誕生

大正6年6月、小口太郎ら一行は学年末（当時7月卒業）の慣例によって琵琶湖周航に出た。周航は小口が友人に送ったはがきから、次のような日程で行われたことが明らかになっている（写真1）。

第1日 琵琶湖南端の大津三保ヶ崎を出発後、西岸沿いに北上し、雄松で宿泊。

第2日 北上して今津で宿泊。

第3日 今津から東進し竹生島を経て、東岸の長浜で

\*京都大学名誉教授（昭和34年 東大工冶金 卒）

昼食。南下して彦根で宿泊。

第4日 彦根を出発して、長命寺で昼食ののち、南下して大津に至る。

「琵琶湖周航の歌」の原形ができたのは、2日目の今津の宿でのことである。小口太郎が作った詩を見て感心した中安治郎がクルーに紹介し、三高の音楽グループ“桜楽会”が当時よく歌っていた『ひつじぐさ』のメロディで歌って見たところ、歌詞にピッタリと合った。このとき、何番まで書かれていたかは明かではないが、今津滞在中ということからすれば3番まで、あるいは翌日の行程である竹生島のことを考えると4番まで完成していたのかもしれない。今日歌われている6番までの歌詞ができあがったのは、翌大正7年(1918)で、友人の助言も考慮して小口太郎が仕上げたと伝えられている。

ところで、歌詞の6番には「西国十番長命寺」と歌われているが、十番札所は宇治の三室戸寺で、長命寺は三十一番札所である。三十一番では歌にくいので、事実より語感を重んじて十番としたものらしい。長命寺港棧

橋の後方にある歌碑には「黄金の波にいざ漕がん 語れ我が友 熱き心」とだけ書かれている。

「琵琶湖周航の歌」は三高生たちの間で歌われてきたが、一般にはあまり知られていなかった。しかし、加藤登紀子が 昭和46年4月、「知られざる叙情歌」を集めて「日本哀歌集」というアルバムを発表、同年5月、そのなかから「琵琶湖周航の歌」と「知床旅情」をシングルカットして発売したのをきっかけに広く歌われるようになった。

作詞者 小口太郎 (写真2)

明治30年(1897)8月30日、信州諏訪湖西岸の湊村(現岡谷市湊)で生まれ、旧制諏訪中学(現諏訪清陵高校)に入学した。その人柄について、諏訪中学の同級生であった小口大次は次のように語っている。

「容姿は端麗、優雅、女性的であり、しもぶくれの顔立ちで両眼は細く、笑った時には糸を引いた様になり、両頬には可愛らしい笑窪が出来た。性格は温和、従順で、他と争う様なことは絶無であったが、胸中に自己の堅い

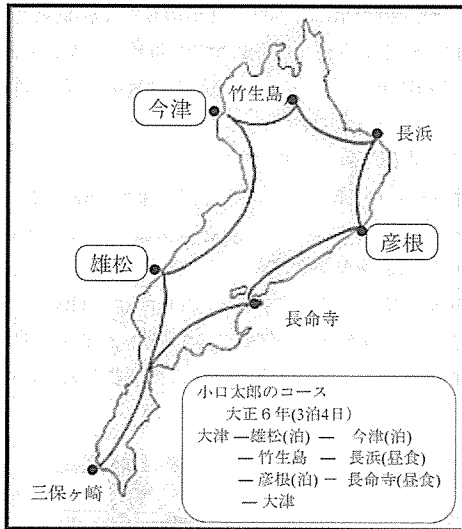


写真1 琵琶湖周航の歌のコース



写真2 小口 太郎

|   |          |   |  |                         |                                     |  |  |
|---|----------|---|--|-------------------------|-------------------------------------|--|--|
| 6   | 5        | 4                                       | 3  | 2                       | 1                                   | <b>琵琶湖周航の歌</b><br>作詩 小口 太郎<br>作曲 吉田 千秋 |  |
| 汚れの現世遠く去りて<br>黄金の波にいざ漕がん<br>語れ我が友 熱き心                     | 西国十番 長命寺 | 夏草しげき 堀のあと<br>古城にひとり 佇めば<br>比良も伊吹も 夢のごと | 矢の根は深く 埋もれて<br>眠れ乙女に やすらけく<br>仙の御手に 抱かれて | 琉璃の花園 珊瑚の宮<br>古い伝えの 竹生島 | 波のまにまに 漂えば<br>赤い泊火 懐かしみ<br>行方定めぬ 波枕 |  | 雄松が里の 乙女子は<br>赤い椿の 森陰に<br>はかない恋に 泣くとかや |
| われは湖の子 さすらいの<br>旅にすれば しみじみと<br>昇る狭霧や さざなみの<br>滋賀の都よ いざさらば |          |   |  |                         |                                     |  |  |
|   |          |   |  |                         |                                     |  |  |
|   |          |   |  |                         |                                     |  |  |
|   |          |   |  |                         |                                     |  |  |

信念らしきものを持っていた様に思われる」

大正5年(1916)9月、旧制三高の二部乙(理工農進学コースのドイツ語クラス)に入学、卒業後は東京帝国大学理学部物理学科に進んだ。長岡半太郎、田丸卓郎など教官7名、学生17名の集合写真が残されている。在学中に「有線及び無線多重電信電話法」を発明し数か国の特許を得た。特許42787号の明細書の「発明の性質及び目的ノ要領」には以下の様に記されている<sup>1</sup>。

「本発明ハ多数ノ送話機ヨリ同時ニ来ル多数ノ電信電流ヲ『ドップレル』効果ニヨリテ調子ヲ高メ以テ波形ヲ凝縮シ一箇ノ金属線回路或ハ一對ノ無線電話装置ヲ通シテ順次迅速ニ断片的ニ送り再ヒ同一ノ効果ヲ適用シテ波形ヲ膨張セシメ原振動ヲ再現スルノ操作ヲ同周期的ニ繰返シ以テ多数ノ原音声ヲ連続シテ同時ニ聞ク所ノ有線及ヒ無線多重電信電話法ニ係リ其目的トスル所ハ一箇ノ金属線回路或ハ一對ノ無線電話装置ニヨリテ同時ニ多数ノ電信電話ノ受送話ヲ行フニアリ」

大正11年(1922)年卒業と同時に、田丸卓郎教授の勧めで同大学の航空研究所に研究業務嘱託として入所する。徴兵延期を望んで「医学部へ再入学し細菌学を専攻する」と生家への手紙に記しているが、航空研へ入所することによっても徴兵を避けられると考えたらしい。しかし、12年5月の徴兵検査では甲種合格で、12月には松本連隊に入隊することになり、6月30日付で航空研究所を辞職する。この頃、光学顕微鏡の分解能を上げる研究に没頭し精神的、肉体的に疲弊していた。郷里に戻り近

<sup>1</sup>この「発明」について情報通信に造詣の深い友人、甘利俊一氏の意見を求めたところ、次のような返事をいただいた。

「小口さんの提案についてはまったく知りませんでした。なるほど、この時代に時分割通信を提案したのはたいした見識です。しかし、技術はいろいろな要件がそろわないと実現しない。ひとつは、ドップレラ効果で早回し効率的にできるかという問題ですが、もっと本質的には早回しをすれば、無限の個数の通信を送れるということです。これは、何かがおかしい。これが何であるのか、これはShannonの情報理論を待たなければ解決できなかった。Shannonの情報理論以降、時分割方式が脚光を浴びてきます。時分割と対になる、周波数分割をいち早く実用化されましたが、これは電波の周波数を変えることで、無線やラジオで使われたわけですが、時分割には、やはり技術手段として早回しではなくて、符号化が実用には不可欠であったわけです。このような着想を喜びますが、そこからさらに一歩で、通信の本質と早回しという技術の関係を考察する必要があった。それがないと、単なる思い付きで終わってしまうわけです。でも、着想はすばらしい。」

くの寺で静養がてら研究を続けた後、東京の精神科病院に入院し、大正13年(1924)5月16日、26歳の若さで亡くなった。表向きは死因は脳溢血とされているけれど、実際は自殺であった。兵役を苦にしてうつ病を発症したと推測されている

生家には、父・銀之助宛に寄せられた太郎の夭折を悼む便りが残され、その中には、航空研究所での指導者であった寺田寅彦の手紙もある。

「拜復 御子息様御永眠の御報に接しまして謹で哀悼の微意を表し度と存じます。此やうな事を申上げて宜敷かどうか分かりませんが、誠に珍しい有為の材をいだかれて御早世なさいました事は、吾々に取っても痛惜の至で御座いますが、何共致方次第で御座います。御一統様御愁傷御落胆の程如何計りかと拝察致します。右御見舞のみ申上げます。不悪御賢察を祈ります。不尽」—寺田寅彦 十三・五・二十一—

作曲者は誰か？

寮歌集をはじめとする歌集には、「琵琶湖周航の歌」は作詞・作曲とも小口太郎、あるいは作曲者不詳と記されていた。昭和46年(1971)に加藤登紀子が歌って全国的に知られるようになり、改めて作曲者探しが行われた。旧三高OB堀準一、安田保雄らの調査の結果、吉田千秋という人物が作曲者であることが判明した。

作曲者 吉田千秋(写真3)

明治28年(1895)2月18日、吉田東伍の次男として、新潟県小合(こあい)村(現在は新潟市)で生まれた。吉田東伍は歴史地理学者で、『大日本地名辞書』などの著作により知られている。千秋は明治40年(1907)4月、東京府立第四中学校(現都立戸山高校)へ進学、明治45年(1912)3月、同校卒業とともに東京農業大学に進む。



写真3 吉田 千秋

| Water Lilies   | ひつじぐさ   |
|--|---|
|  | 訳詩 吉田千秋   |
| Misty moonlight, faintly falling<br>O'er the lake at eventide,<br>Shows a thousand gleaming lilies<br>On the rippling waters wide.                   | おぼろつきよの 月あかり<br>かすかに池の おもにおち<br>波間にうかぶ かずしらぬ<br>ひつじぐさをぞ てらすなる     |
| White as snow, the circling petals<br>Cluster round each golden star,<br>rising, falling with the waters,<br>Moving, yet at rest they are.           | 雪かとまがふ はなびらは<br>こがねの蕊を とりまきつ<br>なみのまにまに ゆるげども<br>はなの心は なみだたず      |
| Winds may blow, and skies may darken,<br>Rain may pour, and waves may swell;<br>Deep beneath the changeful eddies<br>Lilies roots are fastened well. | かぜふかばふけ そらくもれ<br>あめふれなみたて さりながら<br>あだなみのした そこふかく<br>もえいでたりぬ ひつじぐさ |

しかし、翌年、結核に罹患し休学、ほどなく退学した。大正4年(1915)6月、祖父母のいる小合村に帰り療養生活を送る。この間、動物、植物、天文学、方言学、文学と、さまざまなことに関心を示した。また、近くの教会の集会に参加し、聖書や賛美歌に親しんだ。歌が好きで幾つかの楽器をひき、作曲の技術を独学で習得した。大正8年(1919)、24歳の誕生日を迎えて間もない2月24日に亡くなった。

千秋は、明治43年に『英語青年』誌で紹介された英詩「Water Lilies」<sup>11</sup>を訳し、大正2年に雑誌『ローマ字世界』に“Hitsuji-Gusa (ひつじぐさ)”として投稿した。そして、2年後、この詩に曲をつけ月刊雑誌『音楽界』の大正4年(1915)の8月号に発表した。

<sup>11</sup>詩Water Liliesは英国の童謡集“Songs for our Little Friends”(Frederick Warne & Co.London,1875)作者は(E.R.B)とイニシアルのみが知られている。英語学者 石川林四郎もこの詩を訳し、タイトルを“睡蓮”として明治43年に雑誌『英語世界』に発表した。ひつじぐさ(未草)の名前の由来は、未の刻(14時頃)に花を開くからといわれている。

<sup>12</sup>「比良八講」毎年3月26日に行われる湖国近江の伝統行事で、比叡山延暦寺の衆僧や山伏が「ほら貝」などを吹きながら、浜大津港まで練り歩き船で浜大津港から近江舞子を目指し、湖上では水難者の回向法要、浄水祈願が行われる。また近江舞子では琵琶湖の一大水源である比良山に対する、報恩感謝の護摩供養が行われる。この時期に比良山から吹き降ろす季節風(比良おろし)を「比良八講」と呼び「比良八荒」とも書く。その後は穏やかな春が到来するので、「比良八講荒れ仕舞い」と言われる。このため比良八講は、奈良の二月堂のお水取りとともに春を告げる季節行事とされている。

## 2. 琵琶湖哀歌

第四高等学校(現金沢大学)漕艇部は、琵琶湖瀬田川コースで開催されるインターハイ(全国高校大会)の強豪であった。昭和16年度も第14回大会に備え瀬田川合宿を行い、最後の仕上げとして4月6日に恒例の今津~大津間60km遠漕の途についた。ところが高島町沖合約1kmのところ突風「比良おろし」に遭遇し、11名(漕艇班選手8名とOBの京大生ら3名)全員が湖底に消えた。全員の遺体収容に約2ヶ月かかった。突風は琵琶湖地方特有の比良八講(荒)である<sup>12</sup>。

「琵琶湖哀歌」はこの遭難事故を悼んで作られた歌(作詞奥野椰子夫、作曲菊池博)で東海林太郎、小笠原美都子が歌った(昭和16年6月テイチクレコード)<sup>13</sup>。なお、次のサイトで原盤の歌を聴くことができる。<http://jp.youtube.com/watch?v=DQlyJdf8nko>

なお、第四高等学校では四高漕艇班遭難追悼歌「思ひ出づる」が作られ、同校の寮歌のひとつとして歌い継がれている。<http://www.kanazawa-u.ac.jp/grad/ryouka.htm>

遭難事故の翌年の一周忌には、妙琳寺で追悼法要が営

<sup>13</sup>レコードの発売の時期からすると、まだ遺体の捜索が続いていたさなかに、レコード会社はせっせと制作に励んでいたことになる。その歌詞については「近江八景や滋賀県の名勝をつまみ食いして並べ、キーワードを詰め込んだだけの安直な歌詞である。『七里ヶ浜の哀歌』の歌詞の崇高さとはほど遠い。また四高生により作詞作曲された本当の鎮魂歌である『四高漕艇班遭難追悼歌』とは比べるまでもない」と酷評する向きもある。(琵琶湖哀歌の成立過程 参考文献[4])

## 琵琶湖哀歌

作詩 奥野椰子夫  
作曲 菊地博

1 遠くかすむは 彦根城  
波に暮れゆく 竹生島  
三井の晩鐘 音絶えて  
なにすすり泣く 浜千鳥

2 瀬田の唐橋 漕ぎぬけて  
夕陽の湖に 出で行きし  
雄々しき姿よ 今いずこ  
ああ青春の 唄のこえ

3 比良の白雪 溶けるとも  
風まだ寒き 志賀の浦  
オールそろえて さらばぞと  
しぶきに消えし 若人よ

4 君は湖の子 かねてより  
覚悟は胸の 波まくら  
小松ヶ原の 紅椿  
御霊を守れ 湖の上

## 四高漕艇班遭難追悼歌

## 思ひ出づる

昭和十六年 第四高等学校

1 思ひ出づる調べも哀し  
春浅く水藻漂ふ志賀のうみ  
かの日風立ち雲たれて  
呼び応ふこだまのゆき  
たそがれに流れいゆきぬ

2 はるばると今に帰さむすべもなき  
此の愁ひはたこの嘆き  
さゝなみさやぐ志賀のうみ  
ますらをの青春の日を  
沈めしとうつゝなりや

3 あゝ在りし日のいさをしゆゑに  
嘆かひはいよゝはげしく  
たくましますらを男の子の  
思ひ出にめぐり来る春の日の  
新たなる涙つきせず

4 沖の島に春の陽てりて  
ほのぼのと霞み渡れり  
岸近くさまよひゆきて砂にぎり  
砂握りしめ夕なみに  
いまはなき友を偲びぬ

5 さあれ見よ今よみがへりゆく  
若き児の夢とのぞみよ  
空青く水青き所再ゆかむ  
ゆく春の血潮にそみて  
夕陽ちるかの潮路を

まれ、四高関係者と地元大溝の者が協力して湖岸に千本の桜の苗（ソメイヨシノ）を植え、高島町（現高島市）菰の浜の入口の一角に「四高桜」と銘した石碑が建てられた。「四高桜」は年を経て老木となり枯死が進んできた。県道の約 800 m の区間を拡幅する計画が平成16年秋からすすめられ、その区間にある 177 本の四高桜のうち 112 本は新設された「菰の浜公園」に移植された。これを機に平成16年（2004）2月に「四高桜を守り育てる会」が発足し、四高桜の枝をヤマザクラに接ぎ木して鉢植えを作り、会員が自宅で育てて現地に移植する運動が進められている。

作詞者 奥野椰子夫（写真4）

奥野椰子夫は慶応大学を卒業後、都新聞学芸部記者として勤務したのち、昭和14年（1939）、作詞家としてコロムビア・レコードに入社した。滋賀県堅田の出身で、浮御堂近くの「湖族の郷資料館」（大津市本堅田）（077-574-1685）に肖像などの資料が展示されている。また、近辺には彼の顕彰の碑が建てられ、「琵琶湖哀歌」の一番の歌詞が刻まれている。彼が作詞した歌でよく知られているのは、「夜のプラットホーム」である。戦後の混沌とした世相を思い出させ、かなわぬ男女の恋の切なさを偲ばせる。しかし、この歌は奥野がコロムビア・レコ



写真4 奥野 椰子夫

ードに入社直後に作ったもので1939年（昭和14年）公開の映画「東京の女性」（主演：原節子）の挿入歌として淡谷のり子が吹き込んだものである。このレコードは、戦時下の時代情勢にそぐわないと検閲に引っかかり、同年に発禁処分を受けた。事実、奥野の脳裏には新橋駅で目にした出征兵士を見送る情景－歎呼の声を上げる群衆から離れて、夫とおぼしき兵士を柱の影から見送る若



|   |  |  |                                  |
|---|--|--|----------------------------------|
| 3   | 2  | 1  | 夜のプラットホーム<br>作詩 奥野椰子夫<br>作曲 服部良一 |
| 窓に残した<br>泣かないで<br>泣かないで<br>涙にやきつく<br>さよなら | 君いつ帰る<br>さよなら<br>さようなら<br>ただひとり<br>いつまでも<br>いつまでも<br>たたずむわたし | 星はまたたき<br>なりわたる<br>プラットホームの<br>さよなら<br>君いつ帰る |                                  |
| あのことば<br>泣かないで<br>さみしい笑顔<br>さようなら         |  | 夜ふかく<br>なりわたる<br>別れのベルよ<br>さようなら             |                                  |

妻-があった。レコードは発売禁止になったが、作曲した服部良一はあきらめきれず、詞を英訳し『I'm waiting』というタイトルで、作曲者名は服部良一をもじった R. Hatter と洋楽盤にカムフラージュして発売した。敗戦から1年半後の昭和22年（1947）2月、「夜のプラットホーム」は恋の歌として蘇えり、歌手は淡谷から二葉あき子に変わり、大ヒット曲となった。

奥野椰子夫が作詞した歌には、「僚機よさらば」（昭和12年）、「赤城ブルース」（昭和15年）、「涙の紅バラ」（昭和25年）、「渋谷音頭」（昭和53年）などがある。

### 3. 七里ヶ浜哀歌

逗子開成中学の生徒の遭難事故を悼んで作られた歌で、「真白き富士の嶺（根）」とも呼ばれる。

#### 遭難事故

事件は1910年（明治43年）1月23日の昼下がり起こった。逗子開成中学の生徒ら12名が悪天候の中、江の島を目指してボートを漕ぎ出し転覆し全員が死亡した。7人乗りであるのに12人も乗りこみ、校則に反して無許可でボートを出し、禁止区域へ漕ぎ出した生徒への批判こそあれ、学校当局の責任を問う声は聞かれなかった。しかし、横須賀鎮守府の「吹雪」「靄」の2隻の駆逐艦が捜索に当たったこと、葉山御用邸に滞在中の皇太子（のちの大正天皇）が遺体捜索状況を視察に訪れたことが新聞報道される中で、風向きが変わって行った。遭難者全員の遺体が収容されたのは事故発生から丸4日後であった。徳田 兄（勝治、中学5年生、19歳）は弟（武三、小

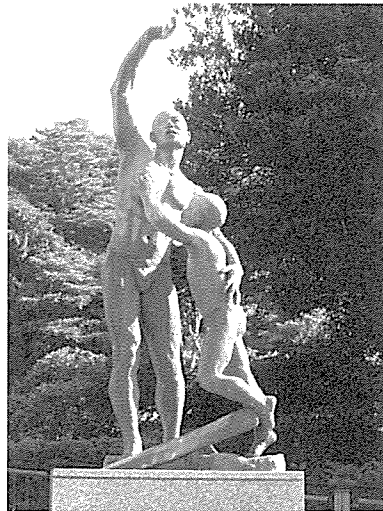


写真5 ボート遭難の碑（稲村ガ崎）

学高等科2年生、10歳）を堅く抱きしめた姿で収容され、人々の涙を誘った。後年、稲村ガ崎に建てられた遭難記念像（写真5）は徳田兄弟の姿を像ったものである。

#### 慰霊祭

2月6日、逗子開成中学校校庭で営まれた合同慰霊祭（写真6）には、同校教職員生徒はじめ遺族、県知事、海軍将校など来賓合わせて千余名、式場周辺には4千名を超える会葬者が参集した。その追弔大法会の大導師は東京芝増上寺住職の横尾大僧正がつとめ、京都紫野大徳寺の僧正はじめとする高僧、県下および近県から150名余の寺僧が衆僧として参加するなど盛大に執り行われた。姉妹校の鎌倉女学校上級生徒70余名が黒紋付、黒袴姿で祭壇の前に整列し、三角錫子（みすみ・すずこ）教諭（写真7）のオルガン伴奏で“哀歌”を歌った。数学教諭であった三角が作詞したもので、賛美歌「When We Arrive at Home」（ジェレミー・インガルス作）の曲による\*。

\*アメリカの作曲家ジェレミー・インガルス Jeremiah Ingalls (1764~1828) はかつて自分が作った Garden Hymn という歌を元に When We Arrived at Home を作り、それを示すために楽譜の右肩に Garden と記した。それが誤解され、作曲者は長く「ガーデン」と記されてきた。

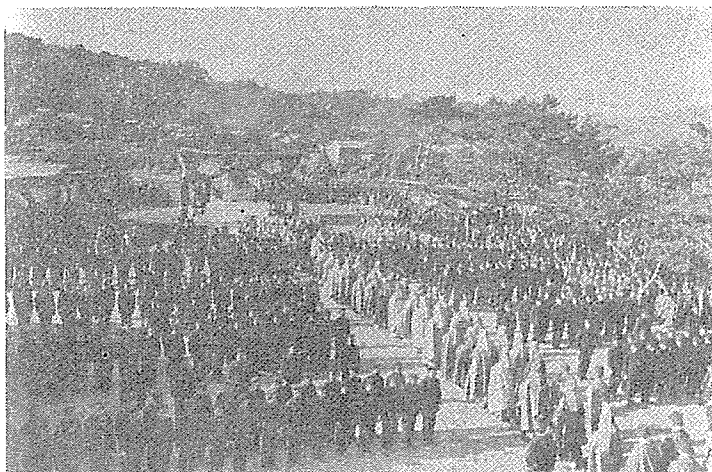


写真6 遭難生徒追弔大法会 明治43年2月6日 逗子開成中学校校庭

## 七里ヶ浜哀歌

(真白き富士の根)

作詞 三角 錫子

- 1 真白き富士の根 緑の江ノ島  
仰ぎ見るも 今は涙  
帰らぬ十二の雄々しき魂に  
捧げまつる 胸と心
- 2 ポートは沈みぬ 千尋の海原  
風も浪も 小さき腕に  
力もつきはて呼ぶ名は父母  
恨みは深し 七里ヶ浜
- 3 み雪はむせびぬ 風さえ騒ぎて  
月も星も 影をひそめ  
み魂よ何処に迷いておわすか  
帰れ早く 母の胸に
- 4 み空に輝く 朝日のみ光  
暗にすずむ 親の心  
黄金も宝も何しに集めん  
神よ早く我も召せよ
- 5 雲間に昇りし きのうの月影  
今は見えぬ 人の姿  
悲しき余りて寝られぬ枕に  
響く波の音も高し
- 6 帰らぬ波路に 友よぶ千鳥  
われも恋し 失せし人よ  
尽きせぬ恨みに泣くねは共ども  
きょうも明日も 斯くて永久に

## 真白き富士の根

大正4年(1915)8月、この歌のレコードが発売されたことから、全国で歌われるようになった。原題は「七里ヶ浜の哀歌」であるが、歌い出しのフレーズをとって「真白き富士の根」と呼ぶのが定着した。

昭和10年(1935)に松竹が、同29年(1954)に大映が事件を映画化した。この大映版のタイトルが「真白き富士の嶺(根)」となっていたことから、このように表記されることもある。もともと、「根」は誤記であって「嶺」とすべきであったという指摘もあるが、岩波古語辞典には、

【ね】嶺ネ[根]と同根。大地にしっかり食い込んで位置を占めているものの意。

とあるから、「富士の根」は「裾広く、頂き高い富士山の全容を、大地にしっかりと食い込んでいる山」と捉えた表記と考えてよいとする意見もある。

## 逗子開成中学校

明治36年(1903)、東京にある開成中学校の分校第二開成中学校として設立された。海軍軍人が多く住



写真7 三角 錫子

んでいた横須賀線沿線に、自宅から子弟を通学させることができる中学校を - - - という海軍の要請に、当時海兵合格率が高いことで知られていた開成中学

が応じたものであった。学業についていけない者、体が弱く療養が必要だとされた者が第二開成中学校に一時的に転校させられたケースも多かったという。1909年、独立組織となり逗子開成中学校に改名した。遭難したボートは海軍から払い下げを受けたものであり、遭難生徒の捜索に横浜鎮守府の駆逐艦などが出動したことも海軍との浅からぬ関係によるものである。ボートで遭難した生徒の中には、21歳、20歳、19歳（3名）など、中学生としては年長のもが多く、他の中学で事件を起こし転校してきた問題児も含まれている。しかし、校則を破った生徒らは「帰らぬ十二の雄々しき魂」と美化され、学校当局の責任を問う声が強まり、直接の監督責任を負うべきとされた寄宿舎舎監 石塚巳三郎教諭は自発的に退職の道を選んだ\*\*。

#### 宮内寒弥と小説「七里ヶ浜」

事件後70年にもなろうとする昭和53年、宮内寒弥はこの事件を題材に小説「七里ヶ浜」(写真8)を発表した。三角との間に進みかけていた縁談が遭難事件により破れるなど、事故の責任を負わされた若い教師 石塚の数奇な運命が描かれている。宮内は石塚の遺児で、生前語る事がなかった父の人生を辿り、この小説を執筆したのである。

#### 4. お わ り に

本稿で取り上げた3つの歌を年代順に並べてみると、以下ようになる。

|              | 作詞者   | 作曲者     |
|--------------|-------|---------|
| 1910 七里ヶ浜哀歌  | 三角 錫子 | (賛美歌の曲) |
| 1917 琵琶湖周航の歌 | 小口 太郎 | 吉田 千秋   |
| 1941 琵琶湖哀歌   | 奥野椰子夫 | 菊地 博    |

\*\*「学校に手落ちがあったとは思えないのだが、…学校側は多額の賠償金を支払うために姉妹校だった鎌倉女学校の中学校専用校舎の土地を手放すことになった。海軍関係からの圧力により、不祥事を誤魔化して美談にすり替える情報操作が行われた可能性が高い」という話もある(参考文献[4])。日本音楽センター発行『美しき歌 心の歌』の歌詞集の解題に、「…事件後83年間、同校で演奏することはタブーになっていましたが、平成5年4月18日、PTAコーラスたつての願いで演奏されました。」とあるのは、学校当局の複雑な心情をうかがわせる。

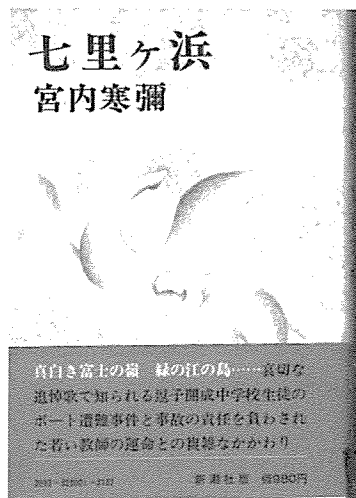


写真8 宮内寒弥著「七里ヶ浜」

これら3つの曲のメロディはよく似通っている。「琵琶湖周航の歌」の曲となった「ひつじぐさ」が作曲された時期には「七里ヶ浜哀歌」が大流行していたので、吉田千秋がその影響を受けたことは否定できないであろう。また、「ひつじぐさ」の曲のルーツは英国の賛美歌、スコットランドの民謡にあるとも言われるが、似た感じのものはあっても特定はできないようである。

JR 湖西線今津駅から徒歩4分、湖岸よりの場所に「琵琶湖周航の歌資料館」(TEL: 0740-22-2108)があり、「琵琶湖周航の歌」の英語版CDなどが販売されている。一度のぞいてみることをお勧めしたい。

本稿を執筆するに際して、参考にした文献を挙げておく。とくに飯田忠義氏の著作、逗子開成ホームページに多く拠っていることを記し、謝意を表する。

#### 参 考 文 献

- 1) 小菅宏：琵琶湖周航の歌 誕生の謎 (作曲者・吉田千秋の遺言), NHK 出版, 2004.
- 2) 飯田忠義：琵琶湖周航の歌 小口太郎と吉田千秋の青春, (自費出版, 京都新聞出版センター制作), 2007.
- 3) 真白き富士の根 (逗子開成ホームページ) (<http://www.zushi-kaisei.ac.jp/history/fujinone/fujinone.html>) 2004年.
- 4) 琵琶湖哀歌の成立過程 (三文楽士の音楽室), ([http://music.geocities.jp/japan\\_mellophone\\_alliance/biwako/melody2.htm](http://music.geocities.jp/japan_mellophone_alliance/biwako/melody2.htm)) 2009年.
- 5) 宮内寒弥：七里ヶ浜, 新潮社, 昭和53年.

## 談話室

## 松下幸之助に学ぶその金銭哲学

熱田善男\*

The Money Philosophies of Mr. Kounosuke Matsusita

by Yoshio ATSUTA

ある講演会で、講師は松下幸之助を「銭餓鬼」と決めつけました。

松下グループの人でも「オヤジは、金の話になると蛇の目にかわる」と悪くいう人もいます。

本当はどうだったのでしょうか。

## 会社は社会のもの

松下幸之助は「企業は公器」であると主張する。法律的には、個人や株主のものかもしれないが、経営者が社会からお預かりして、経営しているのだ、と言います。

## 土地と株は「禁」

幸之助は、明治27年生まれ、9歳の時、和歌山を出て、大阪へ丁稚奉公に出てきました。そして長い長い人生を終え、平成元年に94歳で亡くなりました。

遺産は2449億円、国内史上最高でした。ほとんどが松下グループの株式。

値上がり目当ての土地には手を出していなかった。

また、他社の株式を買って、値上がりで儲けようという気持ちもありませんでした。

土地は必要な人が使うものだという信念を持っていました。松下グループでは、日本各地に工場を建設してきました。「ついでに、工場の隣接地も買っておけば、松下グループが出るのだから、値上がりで儲かるに決まっている」と土地ころがしを勧める人もいたが、毅然として断ってきました。

財テクとしての株式売買も絶対にやらなかった。株の値上がりや値下がりですべて儲けるのは、社会に何の貢献もし

ない、それは「悪」と嫌っていました。

## 転職と独立

丁稚奉公先は「宮田さん」という堺筋の火鉢屋さんでした。しかし、ここは3ヶ月間で、仕事の都合で丁稚がいらなくなります。

次の奉公先は「五代商会」という自転車屋。当時の自転車は、今の自動車より、もっと高値で高嶺の花。時代の最先端をいく高級商品でした。場所は船場、生き馬の目を抜く商いの町でした。ここで10歳から15歳まで、商いの修行でした。

その頃、大阪市内に電車が走り出す。大きい電車が電気の力で動くのをみて「これからは、電気の時代、電気の仕事がやりたい」と。

主人には本当のことがいえず、友人に「ハハビョウキ」と、ニセ電報を打ってもらい、主人の家をとびだす。

やがて、「大阪電灯(株)」に内線工事見習工として入社。15歳の時である。熱心で優秀だったので、16歳で担当者に昇格する。

年上の見習いをつれて工事に出かけていた。20歳で結婚。22歳の春、検査員に昇格する。

検査員の中では最年少であった。大正6年でした。

ところが、すぐに「大阪電灯」を依願退職して、独立をはかる。いとも簡単に収入の安定した会社勤めを捨てているのだ。

退職の理由は、①検査員の仕事は時間的に楽で充実感がなかった。②亡父の言葉「商売で身を立てよ」、③改良ソケットの提案「これなら便利になると」試作品を作り、会社に提案するのだが認めてくれない。それなら自分で作ろうとおもう。

このように、転職の理由と独立の動機は、は金銭のた

\*村上研 OB, 新日鉄 OB, 元・文教学院大

めでなく、時代を求め、充実を求めたためだった。

### 五銭玉（五銭白銅貨）

「宮田さん」時代。1日と15日、月に2回、「これ給料や」と、丁寧に給料、五銭白銅貨を1枚あたえられた。和歌山では、小学校からかえると、お母さんが、一厘（一厘が10枚で一銭）貨幣を1枚くれた。駄菓子屋へとんでいくと、これでおやつのアメ玉が2つ買ったのだ。

つまり五銭玉は、貰ったことも、見たこともない大金だった。こんなにたくさんもらえるかと、非常にうれしかった。

幸之助はこのエピソードを何度も何度も語っている。「ニュートンがリングが落ちるのを見て万有引力を発見したように、9歳の子供が五銭玉を初めてもらってお金と人生の関係」を悟ったのだった。

同じく「宮田さん」時代。親方の赤ちゃんを背負いながら、近所の子供らとバイ（ベイゴマ）遊びをする。バイ回しに力をいれたハズミに、背中の赤ちゃんが仰向きになり頭を地面に打ちつけて、ワーッと泣きだした。あわててバイを捨て、抱き上げてアヤしても泣きやまず、かえって火がついたように泣きわめく。進退きわまって、無意識に付近の菓子屋に飛び込んで饅頭を一つ買ってあげた。ところが饅頭をもらった赤ちゃんは泣きやんで食べはじめたのだった。

駄菓子屋でなく高級菓子屋だったので、饅頭一つ大枚一銭もして、3日分の給料がとんでしまった。

高級な饅頭がかえたのは、お金の威力、お金の価値を体得した貴重な体験でした。

「これが才覚だと知った」と幸之助は後年述懐している。

### 煙 草

「五代商会」時代のエピソード。

自転車屋だから、修理場で修理中に、店にこられたお客に、よく煙草を買ってきてくれと頼まれた。

修理を中断して、汚れた手を洗い、買いに走るのだから時間の無駄。そこで、たくさん買い置きしておき、いわれた時に、それを渡すようにしたのだ。当時は、20箱買えば1箱まけてくれたので、その分が利益になる。

「あの子は、末は偉くなる」と、お得意さんからも言われた。

しかし、これは、同僚が、いろいろ言いだしたので、あっさり止めてしまう。

同僚との折り合いも考える、そんな人でもある。

### 結婚生活の金銭設計

大阪電灯時代の大正4年、幸之助20歳のとき、井植む

めのさん19歳と、5月に見合い。9月に挙式。

給料20円で、下宿代は賄い付きで7円で、7～8円使っても、5円ぐらいい残せたが、貯金すると同僚の受けが悪いので、全部使って貯金はなかった。しかたがないので、結婚資金は、親戚から借金してあてた。

1ヶ月の予算は、家賃3円、米代3円、新聞雑誌等1円、風呂雑費2円、電灯薪炭代1円、副食物4円、小遣2円、貯金2円、支出合計18円。収入、約20円。余裕約2円。となっていた。

病氣しない限りは、堂々とはいかないまでも、結婚生活はできるという勘定だった。

### 独立資金と最初の利益

大阪電灯をやめて、独立するのだが、スタートはどうだったか。

退職慰労金33円20銭（日給83銭の40日分）、会社の積立金42円、貯金20円あまり。

100円に満たないので、プレス1台買っても、型1つ作っても、100円は必要なので、冷静に考えれば、独立できるような資本ではない。無謀ともいえた。

しかし、当時は、前途の光明で身体中が震えている状態、であった。

100円では足りないので、友人の友人に100円借りる。全部で200円の元手だった。

7月から改良ソケットの製造を始める。

工場は、工場といっても、住んでいた借家、4畳半と2畳の2部屋、その4畳半の畳を落として土間にして、そこを工場にした。

幸之助と奥さん、それに奥さんの弟15歳の井植歳男を郷里の淡路島から呼び寄せて、3人で始めた。大阪電灯時代の同僚が2人、手つだってくれたが、改良ソケットが売れないので、給料が払えない。それぞれ、自活の道を見つけて、去っていく。

資金も底をつき、奥さんが嫁入りに持ってきた着物なども質に入れて、凌いでいるときに、幸運が舞い込んできた。

練物（ねりもの）で、碇板（がいはん）が作れないかと、ある電気商会から打診があった。2000枚を見本として注文したいと、押し迫った12月に入るのであった。

練物とは、ソケットの胴体を作るプラスチック状の素材のこと。アスファルトに石綿や石粉などの添加物を加えて加熱練製する。

碇子は読者も知っておられるが、送電線を電柱に支持する絶縁体である。碇板は板状の絶縁体で、電気機器の内部に装着して内部配線の絶縁をはかるもの。このときは扇風機用だった。

陶器製を使っていたが、重くて割れやすいので、練物で試作してほしいということでした。

15歳の井植歳男と幸之助、それに妻のむめの、の3人で、夜遅くまでかかって全力生産して、年内に納品をたして、160円の現金を、大晦日に手にした。

原価は1個約8銭かかり、80円ほどの利益を得たのだった。

次の年も碍板の注文は引き続き、その後の発展に大きく役立ったのだ。

それこそ幸運にも、ソケットの練物づくりが生きてきたのだった。

20日たらずで儲けた80円は、幸之助に事業で儲ける醍醐味を覚えさせたはずである。

### 工場の拡張

工場もてぜまになり、大正7年、2階建ての借家に移る。上が2部屋下が3部屋。下を全部土間にして、ここを工場にする。

ソケットも売れない旧型をやめ、別のソケットを売り出し販売が伸びだす。

さらに、大正9年には隣家があいたのを借りて工場にする。

### どケチ精神

大正8年頃の話。大阪で松下の商品は評判もよく知名度もあがりだした。そこで17歳になった井植歳男を東京に駐在させ、東京での販路開拓にあたらせる。

井植歳男からの手紙「夏になり蚊が出るので、蚊帳を買った。麻の蚊帳が安売りで3円だったので買いました」

幸之助の返事「理由のいかんにかかわらず、3円もだして麻の蚊帳を買うのはぜいたくでけしからぬ。いまの松下電器の状況では、1円前後の木綿の蚊帳で十分としなければならない」

これぞ、どケチ金銭哲学。

### その後の発展

大きく飛躍。

大正11年、敷地100坪を借りて、工場45坪、事務所と住居に25坪、計70坪の工場を建設。自己資金4500円、月賦返済分2500円、合計7000円でした。

幸之助「私はこの工場の前途にどれだけ望もったか、それは言葉に言い表せない強いものがあつた。なにせ、9つの年からこの27歳まで、18年のあいだ、小僧生活よりはじめて、ようやくここに工場を自力にて建設できるようになったのだから、また過去の努力がようやく形をなしたのである」、その力強い喜びも無理ではなかった

のだろう。

順調に伸びる。

昭和2年、歴史的に有名な自転車用のナショナルランブの大ヒット。

ナショナル商標が全国のすみずみにまで浸透して、松下の経営基盤を確立した。

昭和8年、門真に新工場。

昭和10年、株式会社に改組。

昭和10年、2874人だった従業員が、昭和20年には26832人と、10年間で10倍増であった。

### 戦後の道程

日本の敗戦。

幸之助は戦争協力者として、追放処分。軍からの要請で飛行機、素材がなく、木製の飛行機を作ったことが祟った。しかも金はもらえず、個人財産は、2千万円までたまっていたのが、清算すると、借金が7百万円になってしまった。

友人に借金をして、生活費に当てていたそうだ。

昭和24年、物品税の滞納王としてマスコミをにぎあわす。追放のため、昭和25年までは、たいへん不自由な目にあつた。

昭和25年、追放は解かれる。

昭和30年、所得番付で、初の日本一となる。60歳。

その後、ほぼ連続して、所得番付1位を占め続ける。

昭和36年、社長を退任、会長になる。66歳。

昭和48年、会長を引退。相談役。78歳。

### 工場買収

企業買収について「私には、ずっと昔、こんな体験がある」と、松下幸之助は自著で述べている。以下にその主旨を引用する。

ソケットの材料、ベークライト工場がほしいと考えていたとき、あるベークライト工場を「買収してくれないか」と、話もちこまれた。

経営がいきづまっており、時間がたてば倒産するかもしれない弱い立場にある。松下電器が、たたいて安く買っても、相手も世間も納得する状況だった。しかし、ベークライトの工場を一から始めるとなると、研究開発や工場建設、人員の確保など、大変なお金がかかる。

その値打ちを認めて買うのが正しい。幸之助はこう決心して、「安く買ってはいけない」と指示した。

相手も、こちら、双方が納得して、無理なくすすめるのが、正しい商取引だという考えによる。

### もう一つの買収

久保田権四郎氏は明治3年生まれ、15歳のとき大阪へ

出て、鋳物工場で働き、20歳で独立。以後、鋳鉄管の製造と改良に取り組み、久保田鉄工を築き上げた創業者。

幸之助より、24歳年上。関西経済界の先輩に当たる。

幸之助が大阪電灯時代、久保田鉄工の工場へ電線の架設工事に行ったことがあり、その工場が大きいので「たいしたもんやなあ」と、その時の印象が強く、松下電器を起こしてから、久保田鉄工の堅実経営とその成功を、幸之助は心の師匠としていた。しかし、2人は、会合で顔を合わせ、挨拶程度はすることはあっても、直接の付き合いはなかった。

昭和27年のこと。

久保田権四郎氏が、甥の中川機械社長の中川懐春氏を連れて、突然、松下電器の門真の本社へ訪問された。

久保田「この中川は、駐留米軍から冷蔵庫の注文ももらってやってきた。講和で注文も減り、一般用の冷蔵庫をやりたいというので、相談にきたんや。松下さん引き受けてやってもらえんか」

幸之助「ぼつぼつ冷蔵庫をやろうと、手配中なので、話によっては、引き受けて販売してもいいですよ」

ここで凄いやりとりがあった。

久保田「中川には、無条件買取でも受ける覚悟があるのなら紹介するといつて連れてきたのだ」

幸之助「結構ですな、やりましょう」と、その場で決まった。

工場も見ず帳簿（金）もみず、その場で決まった。

この工場が松下冷凍庫株式会社である。後に中川懐春氏は、幸之助の眼鏡にかない、松下電器の副社長に栄進した。

### 金に関しては厳しい質問

今では故人ですが、住友生命の名誉会長の新井正明氏は、昭和49年以降、松下電器の監査役をつとめておられました。

この新井さんが、「役員会における松下さんの質問は、いつも鋭く、そして的確でした。とくに、数字に関しては厳しい質問をされていた」と、ある対談で語っておられた。

ここでいう数字とは、お金のこと。

### カンでわかる

お金を見る目は天才ではなかったでしょうか。

郵便局の窓口会計機の開発現場を見にきて、いきなりグッと持ち上げて、「きみ、これ何キロあるんや」「27キロです」「それで42万円か。これは、よっぽどうまいことやらんと、赤字がでるで」

こんな人でした。

### 現状にとらわれず

トヨタ自動車からカーラジオの納入価格を20%の値

引き要請をうけた。

ただでさえ利益は3%しかないのに、差引17%の赤字になる。技術者たちは「不可能」だとした。

幸之助は、「コストを5%下げるのは大変やろ。だけど20%ならできるはずや」と示唆する。つまり、まったく原点に戻って、発想を改めて設計からやりなさい、ということだった。

ついに新製品が完成して、20%値下げしても、10%も利益がでるようになった。

### PHP 総合研究所

月刊誌 PHP は駅の売店には必ず見かける。1冊190円。150万部売れてると言われている。海外の日本人にも読まれている。

これは PHP 総合研究所の活動の一つなのですが、この研究所は、昭和21年11月、第二次世界大戦直後の混乱のさ中、幸之助によって設立された。

「人間は本来、繁栄、平和、幸福への道が開かれているはずだ。その道を衆知を集めて研究していきたい」という強い願いのもとづくものでした。

以来、今日まで、研究活動をはじめ、研修、出版、普及等、さまざまな活動を展開してきている。

PHP は、「Peace and Happiness through Prosperity」のことで、物心両面の豊かさによって平和と幸福をもたらそうとする意味です。

### 赤字でも仕方がない

英文 PHP の元編集長、ロバート・ワーゴ氏に、部下の外人スタッフたちが、「人間が大事だ、社会のためだと言いつつ、いつも赤字についてうるさく言う。社会のためにやっているのだから、赤字になっても仕方がないと思うのに、どうして黒字にこだわるのか。矛盾があるじゃないか。人間大事社会のためは建て前だけで、本音は利益をあげることではないか」と、怒って訴えるのだった。

ロバート・ワーゴ氏は、この葛藤に悩まされる。

彼は、幸之助との仕事を通じて、次の結論に達する。

### 赤字は犯罪

松下幸之助のもの見方考え方には、合理的な性格と人道的（人間的）な性格が共存している。

「会社は儲けなければならない」と言うが、なぜ儲けなければならないかと言うと、松下はまず「会社は公器である」という視点に立つ。

会社は、社会からさまざまなものの提供を受けて成り立っている。

松下の表現を借りれば「天下の金、天下の人、天下の

土地」を借りて事業を営んでいるのである。

私企業であっても、その本質は、社会公共のものであり社会の公器であると言う。この視点からは、会社は利益をあげ所定額を税金として社会に還元するのが当然の義務で、社会のためとはいえ英文の PHP の出版でも例外ではない。

したがって、会社を経営していて儲からない、利益が出ないということは、本来社会に返すべきものを返していない姿であって許されることではない。

まして、倒産ということにでもなれば、人々の職場が失われて多大な迷惑を及ぼすことになるし、会社自体も社会のお世話になることになる。

そんなことから松下は、「赤字経営しかできない経営者は犯罪人であって牢屋に入れるべきである」という非常に強い表現までしている。

半分は冗談であるが、半分は本当にそう考えていた。西洋においては、そこまで言う人はまずいない。

#### お金も人間性も

「儲けなければならない」という彼の信念は、もの造り、例えばテレビの製造では、造るからには当然売れて儲けを出す。そのためには、品質が良いことが必要だが、良いからといって値段が高ければ誰も買わない。だから

多くの人に買ってもらうためにはコストを下げねばならない。ではコストを下げるにはどうするか。しかし、安いために、故障が多いものでは、誰も買ってくれないから、儲からない。だから、そうならないように、別の工夫がさらに必要で、そうした創意工夫が総合的に生かされて、初めて、儲けの出るテレビができあがる。

それを、何としてでもやりとげねばならないと言うのが、松下の考え方であり、行き方であった。

しかし、黒字を出しておれば、それでいいのではないのである。

仕事に携わる人が、仕事に喜びを持ち、さらに育っていくことを究極の願いとしていたのである。

ロバート・ワーゴ氏は、松下幸之助の経営の本質を「Rational Humanistic Management」と定義する。

日本語に訳すと、「合理的・人道的経営」である。

「人道主義なしの合理主義は、合理主義でない」

「合理主義のない人道主義は、人道主義でない」

以上。

連絡先：262-0001 千葉市花見川区横戸町 1-71

メール：y.atsuta@water.ocn.ne.jp

ご意見があれば、よろしくおねがいします。



## 談 話 室

## 自然を愛する豊かな人間を育てる北東北の自然環境

杉 村 健 太 郎\*

Natural Environment of Northeastern Tohoku, a Symbol that Fosters  
a Well-rounded Being with a Heart that Relishes the Mother Nature

by Kentaro SUGIMURA

## 概要

北秋田には、美しい自然の代表として奥羽山脈とその周辺の山々がある。

奥羽山脈の代表的な山として、最北の八甲田山、岩手の岩手山、早池峰山、秋田・岩手にまたがる八幡平、秋田の森吉山、駒ヶ岳がある。南は焼石岳、真昼岳、栗駒山へとつながり、南東北になる。

奥羽山脈から少し離れたところには、独立峰とも言える鳥海山、早池峰山が美しい山容を見せている。また西には世界遺産の白神山地がある。

秋田看護福祉大学は、西の世界自然遺産の白神山地と東の奥羽山脈北部の山々にかこまれた自然豊かな大館市にある。

大館市は人口75,000人（H21現在市町村合併により85,000人）の秋田県の中核市で、北東北の山岳自然に親しむには絶好の場所に位置している。

この地で勉学をしながら、時にはこれらの山々に親しみ、自然を愛する思考回路を持った人間に育つ良い環境といえる。

これらの自然のなかで、本学から最も近い八幡平の美しい姿のほんの一部をまとめてみた。

2005年の春から夏にかけて、八幡平を調査し地元の北鹿新聞に投稿した記事をもとに報告する。

〈報告1〉2005/5/26付け

今年の八幡平の雪景色はいつもと違う……

標高1500mの大深沢展望台付近からの森吉山の美しい残雪姿。八幡平から西50kmに位置する森吉山、青森ト

ドマツに覆われ樹水も美しい。

〈報告2〉2005/6/30付け

今年は久しぶりに高山植物の「当り」年になりそう

6月の八幡平は初夏で、蒸けの湯の大谷地、玉川の大場谷地の湿地の花が満開となる。湿地の中の池は乾燥傾向が進み、年々少なくなってきている。

〈報告3〉2005/7/25付け

今年はやはり高山植物の当たり年か……

八幡平頂上付近の田代平（標高1500m）のやぶのなかや、草草がやっと春を迎える。

〈報告4〉2005/8/15付け

いま、八幡平の花は真っ盛り……

八幡平頂上の八幡沼（標高1550m）付近は夏最盛期となり、高山植物のニッコウキスゲ、チングルマが満開となる。

これらの調査記事は春、夏のみだが、秋、冬の美しい自然も見ごたえがある。

最近はなくなったが、かつては、高山植物の「盗掘」が横行した。植物の大切さを多くの人々が理解し、美しさに共感したからだろう。

学生たちが、恵まれた美しい北東北の自然環境に親しみ大切にしたい気持ちになってくれれば幸いである。

〈報告1〉：2005/05/26

今年の八幡平の雪景色はいつもと違う……

春の八幡平はいつも気がかりだ。低温注意報が明けた、5月21日に登ってみた。

この時期はいつもクロスカントリースキーで山を歩く。もう雪も消えてだめかな……と半ば諦めていた。

ところが、例年の5月連休直後の雪の状態と同じではないか。標高1500mにある「大深沢展望台」から蒸の湯方面に少し下がった地点にいつも雪の「回廊」ができる。その遠景に森吉山が浮かぶのだが、高山性のガスに阻ま

\*京都大学工学部鉱山学科（昭和36年卒）

秋田看護福祉大学地域総合研究所 研究所報 総合第1号（2006年）

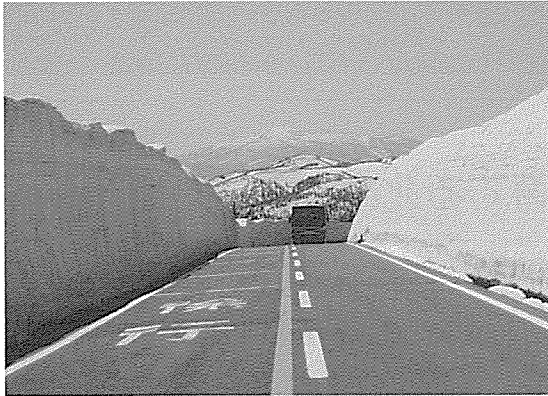


写真1 八幡平の標高1500mの大深展望台の少し蒸けの湯に下がった地点から見える雪の回廊に浮かぶ森吉山

れ滅多に顔を見せてくれない。

もうせん峠の上に美しい森吉山がしっかりみえる、とっておきのポイント。この時期は見える確立が高いとは言うものの、それにしてもラッキーだ(写真1)。

花輪高校の選手が「大深沢展望台」横の雪原で繰り返しプリント練習に励んでいるのを横目で見ながら、1530m高地三角点と1604m高地三角点に「会う」ことができたすばらしい一日になった。

H14/5/16記

〈報告2〉：2005/06/30

今年は久しぶりに高山植物の「当り」年になりそう

6月23日、八幡平ふけの湯の大谷地(標高1080m)、26日玉川大場谷地(標高980m)を覗いてみた。

5月中旬ここにきたときは一面の雪原のためスキーをはいて歩いた。たった1ヶ月で春も通り過ぎ早くも初夏。

大谷地では通常、ミズバショウ、ショウジョウバカマからワタスゲ、タチギボウシ、サワギキョウ……と花期が進む。しかし、ワタスゲだけは毎年多量に花があるとは限らない。なぜか「当り」年があるようだ。今年はその「当り」年ではないか。巨大な耳かきのような美しい白い花が一面に咲き、ふわふわと風に揺られている。この白い「花」はカヤツリゲサ科の実で本当の花は雪融けとともに10cmほどの小さな草丈の灰色の花(写真2, 3, 4)。

この花が咲けば夏本番。大谷地にはもう一つ美しいレンゲツツジの大きな花株があるはず。その花株が、今年は鮮やかな花を咲かせているのではないか(写真5)。

大谷地付近には、岳樺とぶなの森林が広がっている。これらの新緑と風にシャラシャラと鳴る葉音がなんとも心地よい。

ぶな林の間に細々と続く山道にサンカヨウの花も元気な姿をみせてくれており、池とうには夏の植物であるミツガシワがすでに咲いていた。



写真2 咲き始めたコバイケイソウ。いつもならとっくに散っているタムシバが林の奥に咲いている。



写真3 白くてかれんなコバイケイソウのつぼみ。

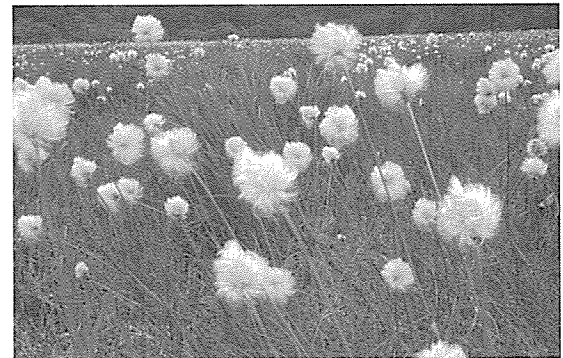


写真4 大谷地を埋め尽くすワタスゲの「花」、今年は花株が多い。花期はまだ続く。



写真5 大谷地の守り神ともいえる見事なレンゲツツジ。

深かった雪に負けぬよう植物は必死で季節を追いつこうとしているのだろう。

一方、玉川の大場谷地は、大谷地よりも標高では100mも下にあるのにレンゲツツジはまだつぼみ、コバイケイソウは咲き始めたところ。ここの雪は深いからだ。それなのに夏に咲くニッコウキスゲが3輪すでに開き始めていた。つぼみも多数あったので今年はニッコウキスゲも「当り」年となり、群落が出現しそう。

玉川大場谷地は駐車場も整備されて車も止めやすい。

H17/6/27記

### 〈報告3〉：2005/07/25

今年は、やはり高山植物の当り年か…

今年は雪が多く雪融けも遅かった。

植物はこのような気象にどう対処しているのだろうか。愛しい花のいる高山が気になっていた。

遅くなって雨の予報。大館の鳳凰山が霞み始めたのが気になる。しかし、今年の高山植物はひょっとして「当り年」かな、との思いで7月18日八幡平へ行ってみた。

ここ何日かの暑さのためか、大沼、後生掛付近の花はすでに終了。八幡平頂上に向けて車を走らせていると、ふけの湯の少し上部でライトを点けた対向車が下ってきた。やはり頂上地域はガスか……。少しでも晴れ間がのぞけばいいのだが、との思いで頂上へ。

標高1400m付近で、視界50mの濃いガスの世界に入ってしまった。花など見えるはずもない、と諦めながらも頂上へ。まあ車から降りてみよう。

霧雨だったが、頂上から草の湯方面に下り田代平（兄畑分岐）だけでも覗いて来ることにした。猫の縄張りには自宅から半径100m位で毎日縄張りチェックのマーキングを言う。筆者も猫になった気持ちで、八幡平の「縄張り」をマーキングすることにした。歩き始めてみると、ますますガスが濃くなり視界は30mほどになってしまった。そのうちシャーシャーと雨も降り出し、風までついてきた。草の湯への道に人影はまったく無い。

周囲の竹の子藪の中にはまだ残雪がちらほら見える。この地域には部分的に低温地帯がある…とすると花はまだあるはず。

雪が消えて間もないくぼ地に花

残雪が消えたばかりのくぼ地には、めったにお目にかかれぬヒナザクラが満開。これはやった…。藪のなかの雪の上を歩いていると、足元の雪がバサーンと割れてしまった。あわてて飛び跳ねたら、その横にキヌガサソウが咲いていた。この低温地域のイワカガミ、イワイチョウ、みな元気だ。ショウジョウバカマは種ができかけ。

今年はコバイケイソウの当り年か……（写真6、7、8、9）



写真6 今年のコバイケイソウは群落をなすほど花株が多い。



写真7 8合目田代沼付近、視界50mのガスの中低速走行。ハクサンチドリが道路脇溢れている。



写真8 草の湯への分岐（田代沼）のコバイケイソウと石楠花



写真9 足元の雪がバサーンと割れてしまった。その横にキヌガサソウが……

最近あまり見ることのなかったコバイケイソウがいつもの年にないほどの群落を復活させているのではないかと、大沼のコバイケイソウの花期はとくに終了していたが、ここではこれからだ。ワタスゲは少し花期が過ぎたのか雨に濡れてしぼんだようになっていた。

ガスを伴った風が吹き荒れており藪はザワーンと鳴りっぱなし。植物は絶えず首を振り風に耐えている。写真などとても撮れる状態では無い。カメラのレンズに水滴は付くし光学ファインダーは曇るやら液晶モニターにはすぐもやがつく。植物とガスに視線を奪われながら、立ったまま昼食。

この時期にまだチングルマ

筆者にとっておきの場所に行ってみると、雪渓が消えたあとに、予想通りチングルマが季節に遅れまいと「懸命」に花を満開にし、小群落を作っていた。久し振りにこの花株に会えた。15年ぐらい前にこの近くで盗掘されたチングルマの花株はいまだに再生していない(写真10)。

ガス、雨、風の中の散策はあまり楽しくないが、花をみるのには結構良い条件だ。花々はしっかり水分をとり花本来の姿に輝いている。高山の気象にじっと自分の生



写真10 八幡平で最も遅咲きのチングルマ。雪渓の横に小群落、盗掘されねばよいが・・・



写真11 毎年「馴染み」の石楠花の花株、今年は久々に会えた。

命を守っているようにみえる。間もなく、ニッコウキスゲ、トウゲブキ、タチギボウシが咲く。リンドウの花株も多いので8月が楽しみだ(写真11)。

頂上から草の湯分岐(田代平)への登山道には「木道」がないため登山者の歩行跡が何通りもつき、拡大してきていたのは気がかりだ。

H17/7/20記

#### 〈報告4〉: 2005/08/15

いま、八幡平の花は真っ盛り・・・

八幡平は冬も夏も魅力一杯

7月に引き続き、8月初旬にも八幡平の「花」に会いに行ってみた。

残雪時期の八幡平も捨てがたい魅力一杯でいつまでも味わっていたかったが、しかし雪への捨てがたい愛着とは反対にこの雪はいつになったら融けるのかななどの思いもついていた。

里にカッコウが鳴き、水田の稲穂がサワサワと音を立て始めると、高山にはどんな夏が来ているのかと心がときめいてくる。

大沼の、エゾノリュウキンカ、コバイケイソウが終わり、標高1600m地帯にしか咲かないチングルマが終わると、夏になる(写真12)。

八幡沼周囲はニッコウキスゲの黄色の海

やはりそれぞれの花期に「マーキング」だ。今年は右膝の調子が思わしくなかったのも、リハビリを兼ねて八幡沼周囲の遊歩道を何度も歩くことにした。

ワタスゲ、コバイケイソウ、ニッコウキスゲは群生する花だが、毎年群生が出現するとは限らない。

八幡沼の周囲の「木道」に足を踏み入れてみると気のせいか、ガスが黄色く照りかえっているように見えた。近づいてみるとニッコウキスゲが力強く大群落に成長し、「黄色の海」になっているのではないかと。こんな年は滅多に無い。八幡沼の源太森寄り付近が見ごたえのある



写真12 筆者の「島」では、チングルマの大きな花が・・・



写真13 ニッコウキスゲの黄色の海・・・



写真15 八幡平スキー場は久々にヤナギランの花で一杯



写真14 若い夫婦がガスの中のトウゲブキの写真に夢中



写真16 八幡平沼岸辺のニッコウキスゲも水に映え鮮やか

「海」だ。八幡沼岸辺のニッコウキスゲも水に映え鮮やか (写真13)。

若い親子を夢の中に誘う八幡平のガス

若い夫婦が、ガスの中のトウゲブキの写真に夢中。避難小屋の凌雲荘がガスに霞んでいる。母さんは買ったのでデジカメで夢の中。父さんはガスの中で夢の中。赤ん坊は父さんの背中で夢の中。みんな揃って夢の中・・・

筆者が40年前、まだ道路も無いとき、長男をリュックに入れて登ってきたのと重なる。八幡平はいつのときも、やさしく親子を包み込んでくれる (写真14)。

7月15日に来た時は、筆者の「島」のチングルマは満開だったが、すでに大きなヒゲ状の実をつけ、フヤフヤと風になびいていた。

スキー場も花で一杯

八幡平スキー場では久々にヤナギランの花に会うことができた。また、夏わらびも少々採れた。この時期のわらびはアク抜きしなくてもまことに美味 (写真15, 16)。

この分だと、タチギボウシ、エゾオヤマリンドウ、サワギキョウも間もなくにぎやかに咲いてくれそうだ。

H17/8/10記

## 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

ジオフィジクス分野は物理探査工学を中心とした地球物理学関係の研究を行っている。特に弾性波や電磁波を用いて、地下構造調査・地球計測や波動伝播メカニズムの解析を行っており、探査対象域は海洋下の深部構造から陸上の極表層の領域まで多岐に及んでいる。

#### 新たな波動解析手法の開発に関する研究

地震発現象の解明や大陸棚調査のために、人工震源を用いた屈折法地震探査による大規模・大深度な地下構造推定がなされているが、通常は地震波の鉛直成分のみを用いた P 波速度構造解析が行われており、水平成分は用いられないことが多い。一方で、自然発生の遠地地震を受振してその水平・垂直成分から受振点直下の地下速度不連続面の深度を推定する、レーザ関数解析が近年は注目されている。そこで屈折法地震探査の 3 成分のデータに対してレーザ関数解析の適用を試み、地下構造のイメージ化に成功した。数値計算による解析例を図 1 に示す。本研究の手法により、屈折法地震探査でも P-S 変換波を用いた地下の不連続面の解析が可能となった。また従来の自然地震によるレーザ関数解析では地震波記録が多数必要であったが、この欠点も人工震源からの地震波データ地震波データによって捕えることが示された。

このような地震波 3 成分記録を用いた解析に際しては、多成分受振機により取得された波動場から P、S 波各々による信号を分離・抽出することが必要である。そこで F-K 領域における平面波分解などを用いて、3 成分 3 次元反射法地震探査データから P、SV、SH 波各々による信号を分離・抽出する手法を開発した。本手法は地表面付近の P、S 波速度のみが必要なため、高い汎用性が期待できる。

#### 波動伝播現象の解明に関する研究

巨大地震発生時の津波伝搬予測などを高精度でリアルタイムに行うためには、地震時に発生する地震波や地殻変動・水中音響波・津波を総合的にモデル化し理解する必要がある。そこで海底下と海水の間の固液境界カップリングと、流体の圧縮性を考慮した津波発生過程における音響波伝播のシミュレーションコードを開発した。

地震波や津波のみならず、太陽光が引き起こす波動現象の解析も行っている。例えば、微小セラミック球を含む塗料には太陽光による温度上昇を抑制する効果があることが知られている。そこで波動伝播現象—ここではセラミック球への電磁波入射・散乱現象など—に基づいて、温度上昇抑制メカニズムの説明を試みている。

#### 海域や陸域における探査データ解析および調査手法の開発

石油・天然ガス資源やメタンハイドレートの開発、あるいは地震防災の側面で、沿岸域での海底下の地下構造調査は重要な要素の一つである。特に近年は海底電磁探査による地下資源や活断層のイメージングが行われつつあるが、急峻な海底地形の影響は海底電磁場データを大きく歪めることが知られている。そこで東海沖海底電磁探査のデータを実際に解析し、海底地形が与える影響を評価しつつ地下構造の可視化を行った(図 2)。これに

よって、沈み込む海洋プレートと思われる高比抵抗層や、海底付近の変形構造に伴うと思われる高比抵抗層の盛り上がりなどが明らかとなった。

一方、陸域においては空洞・配管調査や活断層調査などにおいて、地下 20 m 程度までを効率よく面的に探査する手法が求められている。そこで電波時計の時刻校正用に非常に安定した電波送信がなされている JJY 標準電波に着目し、これを用いた浅層電磁探査法を新たに開発した。3 次元数値シミュレーションの結果、既存の VLF-EM 探査に比べて浅部への感度が高いことが示されており、試作機を用いた実データ取得も開始している。

教授 三ヶ田 均  
准教授 後藤 忠徳  
助教 武川 順一

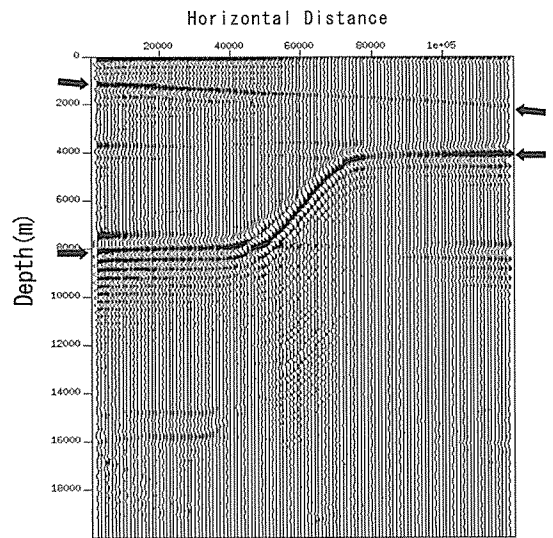


図 1 屈折法地震探査データ(数値計算による合成データ)に対してレーザ関数解析を適用した例。予め与えた不連続面の位置と、推定された P-S 変換波の面が一致している。

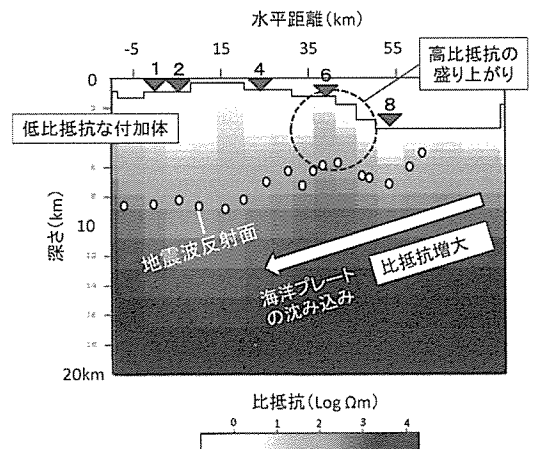


図 2 海底電磁気探査による東海沖沈み込み帯の地下比抵抗構造

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

### CO<sub>2</sub> 地中貯留における貯留量評価手法と 地化学的評価に関する研究

CO<sub>2</sub> 地中貯留は、地球温暖化をもたらす温室効果ガス削減の有効な手段として注目されており、Sleipner や In Salah のような商業規模の実施例がよく知られている。地中貯留において、帯水層に圧入された CO<sub>2</sub> 挙動のモニタリングは、基本的かつ重要な課題である。本研究室では、比抵抗や弾性波を用いた CO<sub>2</sub> モニタリング手法の開発や、CO<sub>2</sub> 貯留量評価に関する基礎研究を行っている。現在は新潟県南長岡ガス田で実施された CO<sub>2</sub> 圧入実証試験の結果と、室内で行われている比抵抗と弾性波の同時測定の実験結果の比較検討による CO<sub>2</sub> 貯留量評価手法の確立を試みている。一方で、安定的な貯留メカニズムである溶解トラッピングの促進手法として、CO<sub>2</sub> を微細気泡化し圧入する手法についても研究を行っている。また貯留層の岩石鉱物と地化学反応実験による、鉱物固定メカニズムの解明や地中貯留の長期安全性に関する基礎研究も行っている。

### 地震波探査手法の開発に関する研究

地震波干渉法及び表面波探査に対し、手法の開発及び適用範囲の拡大を試みている。

- ・地震波干渉法を用いることで、坑井内に物理的な震源を設置せずに坑井間反射法と同様な波形記録の抽出を試みた。具体的には、人工震源を地表に設置し、坑井内は受振器のみを設置することで、坑井内に仮想震源を合成した。その結果、通常の坑井間反射法とほぼ同じ高解像度な地下構造のイメージが得られ、干渉法が坑井間反射法にも有効であることが分かった。

- ・地下を走行する電車振動を中心とした交通ノイズに対して地震波干渉法を適用し、防災の点で重要とされる浅部地下構造のイメージングを行った。この電車振動は P 波に加えて S 波にも卓越していたため、人工震源で発生させるのが困難な S 波を用いた解析を容易に行うことができた。

- ・表面波探査の研究では、SPAC 法を用い、微動から S 波速度構造を高次モードを考慮して推定することを試みている。シミュレーションにより作成した微動データに SPAC 法を適用し、インバージョンを行うことでモデルに整合的な S 波速度構造を推定することができた。

### 干渉 SAR による地表変動解析

干渉 SAR は、合成開口レーダによって取得された 2 回の観測記録の位相差から、観測間に生じた広域の地表変動を検出する手法である。当研究室では干渉 SAR 解析によって、防災やモニタリングを行う研究を行っている。以下に、干渉 SAR 解析結果の具体例を示す。

- ・2007年新潟県中越沖地震では、震央に近いトンネルの被害が少なかったにも関わらず、震央から約 30 km 離れた柿崎地域においてトンネルの被害が集中した。干

渉 SAR 解析の結果から、トンネル被害の集中した桁窪背斜において隆起運動が卓越していることが明らかとなった。桁窪背斜が破壊の伝播方向に位置していたことが、局所的に震動が増幅しトンネルに被害を及ぼした原因と解釈することができた。

- ・2006年ジョグジャカルタ地震に対して干渉 SAR 解析を行った結果、これまで震源断層と考えられていた断層よりも 10 km ほど東側に震源断層が存在していることが分かった。

### アナログモデル実験を用いた地質モデル 構築に関する研究

日本はプレート衝突帯に位置し、プレートテクトニクスに伴う地殻変形は、歪エネルギーを蓄積し巨大地震などの大規模な自然災害を引き起こすと考えられている。当研究室では、新潟中越地域の堆積層に対してアナログモデル実験を行い、層内に存在する物性異常層によって複雑化した断層形態や地表変動をモデル化した。また実験データを画像解析することにより、物性異常層による歪集中帯の分布や地表付近の褶曲構造に特徴的な形態を抽出した。これにより、地表変動から中越地域深部の断層形態をより詳細に決定することができる。今後はアナログモデル実験とバランスドクロスセクション法を組み合わせ、当該地域の深部地質構造を明らかにすべく、研究を進める予定である。

### 格子ボルツマン法を用いた多相流シミュレーションの資源開発分野への適用

岩石孔隙内の流体挙動特性の把握および岩盤の変形・崩壊などをテーマに、格子ボルツマン法 (LBM) や個別要素法 (DEM) を用いた多相流シミュレーション解析を行なっている。以下に解析事例を示す。

1. 自由エネルギーモデルの LBM によって、濡れ性や表面張力を考慮した気-液-固相及び、液-液-固相のシミュレーションを行ない、様々な条件下における岩石孔隙内の H<sub>2</sub>O と CO<sub>2</sub> の置換メカニズムの解明を目指す。
2. LBM と DEM の連成解析により、断続的な出砂の発生メカニズムやオイルサンドからのピチューメンと微粒子の分離促進を検討した。これにより、ドローダウンが出砂に与える影響および傾斜分離装置内での沈降分離速度の向上 (ボイコット効果) を示すことができた。

### 分子動力学を用いた研究

分子動力学 (MD) は、原子間ポテンシャルの下で、ニュートンの運方程式を解き、個々の原子の挙動を追跡し、その軌跡から系の性質を把握するシミュレーション手法である。当研究室では、MD を用いて、鉱物-水-油界面の挙動や炭化水素の物性の解析、SiO<sub>2</sub> ナノ粒子・ナノチューブ等の酸化物の計算を行っている。

教授 松岡 俊文  
准教授 山田 泰広  
講師 薛 自求  
助教 辻 健

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

### AE と X 線 CT を用いた貯留層微小 地震観測に関する研究

石油の採掘では、自噴により回収される油の量は埋蔵量の 20% 程度であり、残りは水や天然ガス、二酸化炭素ガスなどの流体を地下に圧入する増進回収法により回収される。これらの流体の圧入過程において、間隙流体圧力の上昇に伴って引張またはせん断の岩石破壊が生じることが想定される。したがって、それらの破壊の発生位置や発生メカニズムを分析できれば、圧入した流体の動きを把握することが可能であると考えられる。そこで本研究では、まず初めに均質な岩石（ベレア砂岩）を用いて間隙水圧を上昇させる三軸破壊実験を実施し、その際に発生する AE の測定を行った。その結果、間隙水圧の上昇による岩石の破壊と AE の発生は、Mohr-Coulomb の破壊基準と Terzaghi の有効応力理論で説明できることが分かった。次に、不均質性の強い岩石（多胡砂岩）を用いて、同様に三軸圧縮応力下で間隙水圧上昇により岩石を破壊させ、その際に発生する AE の測定を行った。また、破壊試験前に同一の供試体に対して X 線 CT スキャナによる流体流動モニタリングを行い、透水性と破壊との関連性についても検討を行った。その結果、X 線 CT スキャナによる観察から、多胡砂岩内部に水の流れを妨げる難透水領域が存在することが分かり、AE の測定による震源決定からは、破壊の発生がその難透水領域に沿って発生していることが分かった。本研究により、岩石の水理-力学的相互作用に関する分析に AE 法と X 線 CT 法のカップリングが有効であることが分かった。

### 貯留層内ブロッキングによる掃攻率改善 効果に関する研究

プロセスがほぼ確立している EOR においてその効率を高め回収率を向上させるには、掃攻効率改善技術の開発が不可欠である。貯留層内の既掃攻域は選択的な圧入流体の流路となっているので、その領域をゲル化剤により強制的に閉塞して浸透率を低下させることが可能であり、それによってその後の圧入流体は未掃攻域に浸入して掃攻効率が改善されるものと考えられる。従来、このような強制閉塞手法は圧入プロファイルの改善を目的に圧入井近傍に対して実施されてきたが、貯留層内での強制閉塞は貯留層ダメージが懸念されることから積極的に実施されることがほとんどなかった。しかしながら、

MEOR に用いられるバクテリアや水素生成菌あるいはメタン生成菌によって分解されるゲル化剤が開発されれば、それを用いることで貯留層ダメージをあまり懸念することなく、さらにバクテリアの副産物による増油効果を期待して掃攻効率を改善することが期待できる。しかし、既掃攻域全体をゲル化剤で閉塞することは経済的にも非現実的であるため、最も効率的なゲル化剤による閉塞方法について調査研究を行う必要がある。そこで本研究では上記のような生分解性のゲル化剤の開発は別途実施することとして、最も効率的なゲル化剤による閉塞方法についての調査の手始めとして、シミュレーションと掃攻可視化実験により強制閉塞による掃攻効率の改善効果を確認した。その結果、シミュレーションにおいて、5点法による水攻法の 1/4 領域に浸透率が 100 倍の高浸透率領域が存在するモデルでは、掃攻効率の顕著な改善が見られ、それにより回収率が改善することが分かった。また、ガラスビーズをパッキングした貯留層モデルに対する可視化実験においても同様に掃攻効率の改善を確認することができた。

### 個別要素法による未固結堆積層の水圧破 砕の破壊過程に関する研究

メタンハイドレートは、石油や天然ガスに代わる非在来型炭化水素資源として注目を集めている。日本近海にも、我が国の年間天然ガス消費量の約 100 年分に相当する資源量が存在すると試算されており、将来の純国産エネルギーとしての開発が期待されている。現在メタンハイドレートを効率よく回収するために、貯留層に対して水圧破碎法を適用することが考案されているが、対象となる貯留層が従来の固結した岩盤とは異なり構成する粒子間の結合力が極めて小さく、浸透性の大きな未固結堆積層であることから、固結した岩盤に対する従来の理論モデルとは異なる新たなモデルの構築が課題となっている。この課題に対して、室内実験やシミュレーションによる検討が進められているが未解明な点が多い。そこで本研究では、岩石の亀裂の発生過程を忠実にモデル化でき、破壊に伴う大変形を容易に取り扱うことのできる粒状体個別要素法を用いて、未固結堆積層内での水圧破碎挙動のメカニズムについて検討を行った。その結果、実験で観察された多様な水圧破碎挙動を再現することができ、実験結果に対して合理的な説明ができることが分かった。

教授 石田 毅  
准教授 村田 澄彦  
助教 深堀 大介



工学研究科 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****山岳トンネルの地震被害メカニズムに関する研究**

山岳トンネルは一般に地表構造物と比較して耐震性に優れているが、近年の大規模地震では、山岳トンネルといえども大きな被害を受けることがある。しかし、山岳トンネルの耐震性については十分な検討がされておらず、地震時の影響を考慮した覆工設計法や既設トンネルに対する効果的な耐震補強の方法はいまだに確立されていない。当研究室では、このような山岳トンネル工法の耐震性向上に関して検討を行っている。本年度は、兵庫県南部地震、新潟県中越地震、新潟県中越沖地震による被害事例を整理・分析することで、地震被害発生メカニズムを明らかにし、地震断層面からの距離や地震規模と被害の大きさの相関関係などを確認した。また、新設トンネルにおける繊維補強コンクリートおよび緩衝材の効果について FEM による数値解析を行い、その効果を定性的に確認した。解析の結果、繊維補強コンクリートでは破壊の拡大や崩落の防止という点で一定の効果があることが分かった。一方で、緩衝材は地震時の覆工に生じるひずみを低減し、変形や破壊の抑制に効果的であることが分かった。

**長尺鏡ボルトによる地山補強効果の検討**

近年、脆弱地山でのトンネルや土被りの浅い都市型トンネルの施工が増加しており、切羽（鏡面）の崩壊対策が重要化している。そのため、切羽をボルトで補強することにより安定化を図る鏡止めボルト工法が多くの現場で採用されている。中でも、長尺鏡ボルトの施工事例は増加傾向にある。しかし、長尺鏡ボルトによる地山補強効果については不明瞭な点も多く、その設計も既往の事例にならった経験的手法にとどまっているのが現状である。そこで、その補強効果について定量的な検討を行い、合理的な設計手法を確立するため、3次元有限差分法を用いて評価を行った。その結果、土砂地山の場合では、1本あたりの付着強度が十分に発揮されないため、ボルト長を長くすることよりも本数を増やすことで大きな補強効果が得られることが分かった。一方、泥岩地山の場合では、塑性領域を超える長さのボルト長が効果的な補強に不可欠であることが明らかになった。

**レーザー超音波法による面状領域検査の高速化**

構造物壁面の剥離や亀裂の検出など、面状領域の一括検査への展開を目的として、レーザー超音波法について種々の検討を行っている。この方法は、パルスレーザーによる対象材へのスポット的な超音波の励起と、レーザ

ードプラー振動計（LDV）による対象表面の波動観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・観測点のスキャンが容易であることを特長とするものである。これまでに模擬欠陥試料などを用いた剥離部分の可視化方法の検討など、主に実験的な研究を行ってきた。実用へのさらなる展開のためには、レーザーによる超音波励起・伝播という現象自体の基本的理解が重要との認識に立って、本年度は、そのシミュレーション技術の構築を行った。まず、パルスレーザーによる超音波の励起を、局所的な温度上昇による内部熱応力の発生を源とした熱応力を介した温度拡散場と弾性波動場の連成問題であるとして、純理論的に定式化して解析する方法を確立した。これによって得られたレーザー超音波の指向性などの伝播特性は、実験と良い一致をみた。また、剥離などの可視化においては、欠陥を含んだ波動場の解析手段が必要であるため、純理論解析と同様の温度・波動連成場に適用できるスタッガード差分を用いる数値シミュレーション法を構築した。実際の問題を解くには大規模計算専用のマシンが必要であるが、軸対称とした簡単な剥離欠陥モデルについては、現実の波動場の特徴を再現できることを確認した。

**応力磁気効果を利用するケーブル及び  
PC ストランド用の張力測定器の開発**

吊構造物のケーブルや、プレストレスコンクリート橋の PC ストランドなどにおいては、安全性の観点から、その緊張力が規定どおり保持されているかどうかを定期的あるいは常時的に監視することが重要であって、そのために利用する張力計として、環境変動に対する十分な安定性と、長期使用に耐える優れた堅牢性を備えた装置の開発が望まれている。本研究室では、この目的に適合するものとして、長尺鋼線材やケーブルなどにかかっている張力を非接触的に測定できる、応力磁気効果を利用した新しい荷重計の開発を進めている。ケーブルの一部を永久磁石によって長手方向に近飽和状態に磁化し、応力によるケーブルの磁化状態の変化を、空間磁界強度の変化として捉える方式のものであって、既設のケーブルにそのまま適用できるという特長を有している。昨年度は、試作器によって、この方式の荷重計が十分な感度を持つものであることを確認した。本年度は、実用化試験の第一歩として吊橋ハンガーロープ用の張力測定装置を開発した。幸いにも、ある吊橋においてハンガーロープの張力を一旦解放し、再緊張する作業が行われ、開発した装置を実使用する機会に恵まれ、本装置の有用性を実際に確認することができた。

教授 朝倉 俊弘  
准教授 塚田 和彦  
助教 西藤 潤

工学研究科 都市環境工学専攻

## 地殻環境工学講座

## 岩盤空洞の気密性能評価法に関する研究

近年、新しい岩盤内エネルギー貯蔵施設として注目されている LPG 貯蔵岩盤タンクは、従来の石油貯蔵岩盤タンクで用いられてきた水封式貯蔵により建設可能と考えられている。これらの施設では周辺岩盤に高い空洞内圧が作用するため、岩盤内に亀裂が発生・進展し、貯蔵ガスが漏洩する可能性がある。また一度漏気してしまうと、その岩盤での気密性の確保は実際上ほぼ不可能となる。そのため、岩盤内エネルギー貯蔵施設の設計にあたっては、このような漏気現象が全く生じないように設計する必要があり、周辺岩盤の性能低下の程度の適正な予測・評価が不可欠な課題である。

本研究では、これまでに構築した岩盤-地下水-貯蔵ガスの相互影響を考慮した力学的・水理学的連成解析手法を開発し、高圧ガス貯蔵岩盤タンクにおける水封メカニズムの解明を行ってきたが、本年度は、岩盤空洞気密試験において得られた計測結果を検討すると同時に、構築した応力-浸透流連成解析手法による数値シミュレーションを行った。なお、解析に用いた水理地質モデルについては、空洞周辺の原位置透水試験を基に地球統計学手法を用いて作成した。検討の結果、漏気発生時における周辺岩盤と空洞との動水勾配を用いた気密性能判定基準を構築した。

## 3次元水理地質モデルの構築法に関する研究

地下構造物の建設にあたっては、建設プロジェクトの進行に伴って追加・統合される地質データを適時解析処理することで得られる地質モデルを基に、合理的な設計・施工を行っていくことが重要である。著者はこれまでに、現在建設中である水封式の LPG 地下備蓄基地を検討サイトとして

■MDS イメージングによる初期岩盤水理モデルの構築

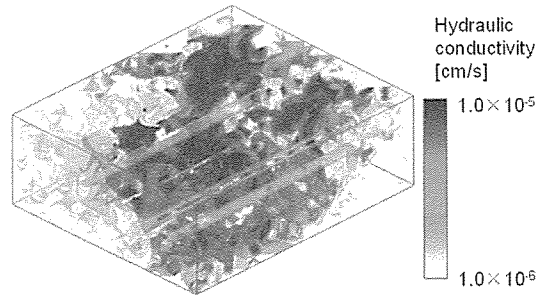
■多変量統計解析による岩盤水理モデルの構築

■地球統計手法による岩盤水理モデルの構築

を行ってきた。

本年度は、岩盤内地下水の挙動を高精度に予測できる3次元水理地質モデルの構築を目的とし、地球統計学シミュレーションを用いたモデル化手法の提案を行った。まず対象とする領域で得られた透水特性のデータを基に定常/非定常の Sequential Indicator Simulation を用いて複数の水理地質モデルを作成した。次にそれぞれの水理地質モデルに対して3次元非定常浸透流解析を行い、一定の検証規準を満足するモデルのうち、地下水の

実挙動を最も精度良く再現できるモデルを対象領域の水理地質モデルとした。この手法を水封式燃料地下備蓄タンク建設中の原位置岩盤に適用し、従来から用いられている均質モデルや Ordinary Kriging によるモデルと比較した結果、実測の間隙水圧の経時変化を高精度に評価できることを確認した。



Sequential Indicator Simulation により構築された水理地質モデル

## 岩盤の水理地質構造評価に基づくフラクチャシーリングシステムの合理化に関する研究

現在建設中の LPG 地下備蓄基地や、将来建設が予定されている高レベル放射性廃棄物地層処分施設などの、地下岩盤構造物の建設においては、構造物に要求される機能を満たすために、厳密な地下水制御を行うことが重要である。この地下水制御のためには、フラクチャシーリングを行い、対象岩盤を所要の透水性まで改良することが必要である。フラクチャシーリング技術としては一般にグラウチングが用いられているが、その施工においては、所要の透水性に改良できるまでチェック孔を削孔することで追加孔の要否判定が行われているのが現状である。合理的に確実かつ効率的なフラクチャシーリングを行うためには、対象岩盤の水理地質構造に応じたグラウトの充填状況について検討を行うことで、合理的なグラウト注入方法を確立することが必要である。

本年度では、グラウトの流動特性と充填過程を考慮した数値解析モデルを構築し、岩盤の亀裂性状および注入パラメータからグラウト充填状況を定量的に評価し、2孔間の孔間隔を合理的に算出する手法を構築した。さらに、本手法を原位置岩盤に適用し、予測したグラウト充填範囲とグラウト注入実績との関係を検討することでグラウチングシステムの合理化を検討した。

教授 青木 謙治

准教授 水戸 義志

エネルギー科学研究科 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****ナノラメラ Co-Cu 合金の力学・磁気特性**

ナノ結晶金属は力学・磁気特性ともに通常の金属材料に比べ、優れた特性を示すことが知られている。本研究室では磁性材料として知られている Co-Cu 合金を電析法により作製することで、結晶粒内に 3nm 間隔のナノラメラ構造を導入することに成功し、その力学特性が向上することを示した。そこで、本研究はナノラメラ Co-Cu 合金に対し、熱処理を行い、ナノラメラ構造を変化させ、様々なナノラメラ構造を有する Co-Cu 合金の力学・磁気特性を調査した。

熱処理の結果、熱処理温度が上昇するにつれてナノラメラ構造の間隔は増加することがわかった。硬さ試験により硬さと速度依存性を調べた結果、熱処理温度が高い材料ほど硬さが減少、速度依存性が低下するという結果が得られた。これらの速度依存性からナノラメラ Co-Cu 合金はナノラメラ界面からの転位放出により変形していることが示唆された。また、硬さとナノラメラ間隔の関係から、この Co-Cu 合金はナノラメラ間隔が 3nm という非常に小さな値でも、硬さの減少が見られないことがわかった。この性質は、従来のナノ結晶金属における結晶粒径が 10nm 以下となると強度が減少するという性質と異なり、ナノラメラ構造特有の性質であると考えられる。さらに、磁気特性を測定した結果、熱処理温度が高い、すなわちナノラメラ間隔が大きい材料ほど保磁力が低下していることがわかった。ナノ結晶金属では 20nm 以下になると結晶粒径が小さくなるにつれて保磁力が大きく減少することが知られている。今回のナノラメラ Co-Cu 合金はこれとは逆の結果となっている。

以上より、ナノラメラ Co-Cu 合金は従来のナノ結晶金属とは異なる力学特性、磁気特性を有することがわかった。

**脱合金化法により作製されたナノポーラス Ni の磁気特性**

強磁性体のナノ粒子やナノ結晶材料はバルク材料とは異なり、超常磁性や軟磁性などの磁気特性を示すことが知られている。しかしナノポーラス構造を有する強磁性体の磁気特性について詳しくは知られていない。そこで本研究では脱合金化法によりナノポーラス Ni を作製し、その磁気特性を測定した。実験方法としては、Ni<sub>0.25</sub>Mn<sub>0.75</sub>合金の脱合金化により Mn を除去し、ナノポーラス Ni を作製した。この試料に対し Ar 雰囲気中各温度（～873 K）で15分の熱処理を行い、リガメント径の異なる試料とした。走査型および透過型電子顕微鏡により各試料のナノポーラス構造を観察するとともに、試料振動型磁気測定装置によりそれらの磁気特性を測定した。その結果リガメント径が臨界値（55 nm）以下の試料においては、ナノポーラス Ni の保磁力は

リガメント径の 1.2 乗に比例することがわかった。これはすでに報告されているナノ結晶 Ni における 6 乗則とは異なる。また、臨界リガメント径の 55 nm という値も、ナノ結晶 Ni の臨界結晶粒径（約 13 nm）より大きい。また飽和磁化に対しても、比表面積と飽和磁化の値を比較すると比表面積が大きくなるにつれて飽和磁化の値は小さくなることがわかった。そして、ほぼ同様のリガメント径の値を持つ未処理材とアニーリング処理材との値とを比較すると、比表面積の値はほとんど変わらないが、未処理材のものの方が小さい飽和磁化を有していた。このことからナノポーラス構造の表面原子構造は乱れており、アニーリング処理によってその乱れが補正されたことが予想できる。このように、脱合金化で作製したナノポーラス Ni は他の Ni 材料と異なる磁気特性を有することがわかった。

**花崗岩の温度履歴によるクラック進展の解析**

近年、放射性廃棄物の処分が大きな問題となっているが、その対策として地層処分が注目されている。しかし、地層処分には残存放射性物質の核反応による温度上昇の影響や、地下水による放射性核種の溶出など解決されていない問題も多い。花崗岩はこのような地下空間利用の対象となる岩石の中で有力な候補となっているが、温度条件下における岩石内に存在するさまざまな間隙構造の変化についてはまだ詳細は明らかになっていない。そこで本研究では、粒径の異なる花崗岩を昇温履歴試験に供し、試験前後の物性値の変化を測定し、間隙構造の変化について観察と画像解析を行った。

粒径の異なる花崗岩を昇温履歴試験に供し、試験前後の物性値を測定した結果、いずれの試料でも最高到達温度が高くなるほど寸法、有効間隙率は大きくなり、P 波伝播速度は低下した。これは、花崗岩を構成している鉱物間の熱膨張率の違いによる熱応力等が発生し、既存のクラックが拡大あるいは新たなクラックが発生・進展したことによるものと推察された。また、粒径の違いにより、物性値の変化の割合などに違いが認められた。そこで、間隙構造の変化を詳細に分析した結果、最高到達温度の上昇により、クラックの密度及び開口幅が大きくなる傾向は同じであるが、クラック発達の様子に違いが認められた。すなわち、発達したクラックは粒径の小さな花崗岩ではほとんどが粒界クラックであったが、粒径の大きな花崗岩では粒内クラックも多数発達することが明らかとなった。また、主要構成鉱物である石英、長石、雲母にそれぞれ異なったクラックの発展パターンが認められた。粒径の大きい石英粒子内ではクラックが網目状に発達し、長石や雲母粒子内では、へき開面や双晶面といった弱面に沿ったマイクロクラックが進展することがわかった。

教授 馬淵 守  
助教 陳 友晴

資源エネルギー学講座  
資源エネルギープロセス学分野

加熱固体平板に衝突するカーテン状水膜  
噴流の熱伝達特性

カーテン状水膜噴流は衝突点近傍において高い熱伝達率を有することから、鉄鋼製造プロセスの圧延工程における制御冷却に用いられている。これまでにカーテン状水膜噴流と加熱固体面との熱伝達特性を実験的に研究した例は多く存在するが、水を冷却媒体とした低レイノルズ数 ( $Re < 10^4$ ) 条件下での知見が現状では不足している。そこで、加熱固体平板に衝突する水膜噴流の熱伝達特性を解明することを目的とし、実験によって研究を行い、熱伝達特性を予測する整理式を提案した。実験では、厚さに対して幅が十分大きい断面形状のノズルから鉛直下方に噴出するカーテン状水膜噴流を、通電加熱したインコネル板に衝突させ、衝突点近傍におけるインコネル板の温度分布を熱電対で計測した。実験はインコネル板と噴流の衝突角、流量、ノズル出口-加熱固体平板間距離を変化させることで行った。垂直衝突では、衝突点においてヌッセルト数はピークをとり、そこから離れるに従い減少する。一方斜め衝突では、ヌッセルト数の分布は左右非対称になる。垂直衝突、斜め衝突両方において、今回提案した整理式は実験におけるヌッセルト数のピーク値と良好に一致した。

(梅田 太一, 現: パナソニック株)

高温固体面に衝突する微小水液滴内の沸騰現象

鉄鋼業では連続 casting プロセスにおける二次冷却帯にスプレー冷却が用いられている。スプレーの冷却特性を高精度に予測するためには、個々の液滴と高温固体面の衝突現象を詳細に解明する必要がある。液滴衝突に関する実験はそれなりに存在するが、微小液滴の衝突現象は時間的・空間的スケールが小さく、知見が不足している。本研究は写真観察実験による液滴衝突時の沸騰現象の解明を目的とした。まず、衝突液滴を二方向から同期撮影する観察手法を確立した。次に、供試液体として室温の精製水を、供試固体にインコネル 625 を使用し液滴衝突実験を実施した。衝突条件は液滴直径を約 0.6 mm、衝突速度 1.7~4.1 m/s、固体表面温度 170~500℃ と変化させた。一次元非定常熱伝導問題から推算される接触面温度が液体の加熱限界温度 (本条件では約 300℃) よりも低い場合は、固液界面で蒸気気泡が発生し、高い場合には液体と固体の間に蒸気膜が形成されることが明らかになった。

(奥 洋介, 現: 住友金属工業株)

高張力鋼管の用途拡大から、電縫鋼管のロール成形工程の見直しが必要となっている。これまで鋼管のロール成形に関しては、プレス成形などの分野に比べて、その計算領域の大きさもあって、有限要素シミュレーションが必ずしも積極的に行われてこなかった。著者らは、高張力電縫鋼管のロール成形の有限要素シミュレーション法を確立するため、まず、種々のシミュレーションソフトの比較を行った。その結果、静的陰解法ソフト Marc が適していることがわかった。本研究では、Marc を用いて最初の 3 段のロールスタンドでの板の 3 次元変形をシミュレーションし、板幅端部の応力・ひずみに焦点を当てて、計算板長さ、摩擦条件およびロール径が計算結果に与える影響を調べた。得られた結果は以下のである。(1) 計算板長さは、板が 3 段に噛まれている長さであれば十分である。(2) 摩擦条件の影響は無視できるほど小さい。(3) 板幅端部の長手方向ひずみはロール径の増加とともに減少する。この影響は初段において顕著である。

(辻川 敬祐, 現: 関西電力株)

角筒絞り対向液圧成形における圧力媒体  
流出挙動

対向液圧成形は深絞り加工法の一つであり、従来のプレス成形における下型を液圧で代替した成形法である。従来のプレス成形に比べて製品の寸法精度や深絞り性の向上が実現できることから、さまざまな産業分野での適用が期待されている。対向液圧成形では成形中に圧力媒体が上型と下型の間隙から流出する場合があります。材料の成形性に大きな影響を及ぼす。圧力媒体の流出は材料の変形に伴って成形中に大きく変化するが、その特性は十分明らかにされていない。本研究では、対向液圧角筒絞り成形中の圧力媒体流出特性と材料の変形との関連性を明らかにすることを目的に実験研究を行った。実験では金型の各部位で成形中に生じる液圧を測定し、その推移を調査した。その結果、ダイ肩部近傍における逆張り出し変形の発生および消滅、また材料のダイ肩部へのなじみが流出特性に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。その一方で、流出中にダイ面上で生じる液圧は、流出量に依らずほぼブランクホルダ力で決定され、液圧室内の液圧とは大きく異なることが明らかとなった。

(松嶋 啓太, 現: 新日本製鐵株)

教授 宅田 裕彦  
准教授 藤本 仁  
助教 浜 孝之

エネルギー科学研究科 エネルギー応用科学専攻

**資源エネルギー学講座  
ミネラルプロセス分野****メタン発酵における NaCl の影響**

近年、石油資源の枯渇や地球温暖化が問題となり、バイオマスエネルギーへの期待が高まっている。その中でもメタン発酵は、様々な有機廃棄物を有効に利用できる手段として注目されている。メタン発酵とは、食品廃棄物、家畜排泄物、下水汚泥などの有機物を嫌気状態で発酵させることにより処理し、エネルギー源として有用なバイオガスを発生する生物学的プロセスである。この発酵過程には種々の菌が関わっており、様々な基質からバイオガスが生成する。食品廃棄物へのメタン発酵の適用を考える際には、食品に含まれる NaCl の影響を考える必要がある。そこで、本研究では、メタン発酵における NaCl の影響について考察した。その結果、NaCl 投入量と発生したガスの組成を比較したところ、NaCl 投入量が増すほどメタン生成が進んだことがわかった。また、pH との比較より NaCl 投入とともに酸生成も進んでいるという結果が得られた。メタン生成による自由エネルギー変化は非常に小さく、メタン菌は基質反応およびエネルギー獲得形態に  $\text{Na}^+$  の濃度勾配を利用していると言われている。実験で用いた発酵液については、NaCl への適応がなされておらず、NaCl 投入前は  $\text{Na}^+$  濃度が非常に低い状態にあったため、基質反応が弱かったと考えられた。このことから、NaCl 投入によって生じる浸透圧変化のダメージ以上に、 $\text{Na}^+$  によるメタン発酵促進の効果が強く出たのではないかと推測された。

**CO<sub>2</sub> ハイドレート生成頻度に及ぼす過冷却度ならびに NaCl 濃度の影響**

大気中の CO<sub>2</sub> 濃度増加による地球温暖化が騒がれる昨今、大量に排出される CO<sub>2</sub> を地中や海底へ処分することが想定されている。海洋処分の場合、海水と CO<sub>2</sub> の界面にはハイドレートが生成し CO<sub>2</sub> の海水への溶出挙動に大きな影響を及ぼすことが考えられ、海水中のハイドレート生成挙動を知ることは極めて重要である。そこで本研究では、生成における重要な指標である過冷却度と NaCl 濃度を変化させた場合のハイドレート生成頻度について考察した。その結果、まず NaCl 濃度を揃えての比較を行った場合どの濃度においても過冷却度が大きくなるほど生成頻度が高くなる傾向が見られた。これは過冷却度の上昇に伴い、核生成に必要な結晶の大きさである臨界半径が小さくなったためだと考えら

れる。次に過冷却度を揃えて比較を行ったところ NaCl 濃度の違いによる生成頻度の変化はほとんど見られなかった。NaCl をはじめとする電解質はインヒビターとしての効果がありハイドレートの成長速度や平衡条件を変化させる。平衡条件の変化はガス分子の溶解度変化が原因だと考えられている。また、成長速度の変化については電解質イオンに生じるクーロン力や無極性分子の溶質分子に生じる分子間力によってハイドレートに組み込まれようとする水分子の動きを阻害するためなどが考えられている。結晶生成においてもこの機構と同様のものが働くことで生成頻度に変化が生じるのではないかと推測した。しかしながら、先にも述べたように、生成頻度の NaCl の濃度による影響は見られず、本実験での NaCl 濃度範囲では結晶生成に対して与えるインヒビターとしての効果が小さいことが明らかになった。この理由として、臨界核の生成に際しての水分子の移動範囲程度ではイオンによる阻害が生じず、そのため今回の実験においてはインヒビターの効果が得られなかったと考えられる。

**浮遊選別法による食品系排水の固液分離に関する基礎的研究**

近年、各種排水による河川の富栄養化の防止のため食品等を扱う工場排水に対する規制が年々強化されている。一方、エネルギー資源枯渇の懸念から食品廃棄物あるいは食品排水の固体成分を固形燃料としてサーマルリサイクルする試みも行われている。それらに対処するための高度な固液分離技術が求められている。そこで本研究では、食品廃棄物を含む排水の固液分離に浮選法を適用し、その浮遊挙動について検討を行った。その結果、ドデシルアミン酢酸塩 (DAA) を一定にした場合の固体の浮上率に及ぼす pH の影響を検討したところ、DAA 濃度を増加すると固体浮上率は逆に低下することが分かった。DAA 無添加の場合粒子は浮上しないこととあわせて考えると、DAA の最適濃度領域の存在が示唆された。また、酸性側に比べてアルカリ性側で高い浮上率が得られることが分かった。アルカリ性では粒子の負の電位が増大し、DAA の吸着性が良くなっていると考えられ、これについてはゼータ電位測定によりその傾向があることを確かめた。さらに、少量の DAA で処理前の固液比を3倍に高めている点から、食品系排水の固液分離において浮選は有効な手段であることを指摘した。

准教授 楠田 啓  
助教 日下 英史

工学研究科 材料工学専攻

### 材料設計工学講座

#### 液相還元法による金属ナノ粒子の製造とその応用

液相還元法を用いた、金属銅・銀・錫・鉄・コバルト・ニッケルおよびそれらの合金ナノ粒子製造の研究を行っている。特にナノ粒子形成過程での酸化還元反応を電気化学的な立場で解析し、ナノ粒子形成機構を明らかにする研究に取り組んでいる。これらの研究成果に基づき、企業および京都市産業技術研究所と共同で、金属ナノ粒子を高密度に分散させた微細配線用インクの開発や、金属ナノ粒子を有機系材料中に高分散させたハイブリッド材料の開発およびその物性についての研究も行っている。

#### 金属ガラスの構造安定性

酸化物ガラスやポリマーなどの一般的なガラス物質と同様に、明瞭なガラス転移を示す金属物質が存在する。このような金属物質を金属ガラスと呼び、その構造安定性の起源は、材料科学的な観点から興味深い研究対象である。また、金属ガラスは等方的な結合状態を示す金属結合を主体としながら、安定なガラス構造を発現するため、ガラスを研究する化学分野の研究者からも注目されている。我々は、東北大学の金属材料研究所や学際融合センター、本学の原子炉実験所のグループなどと共同して、金属ガラスの構造安定性の起源を、X線回折による構造解析、SPring-8でのX線非弾性散乱、熱分析、超音波スペクトロスコーピーを用いて詳細に研究している。

#### プラズマ陽極酸化による軽量高強度マグネシウム合金の表面改質

マグネシウム合金材料は、軽量高強度の自動車用部材としての応用が期待されているが、腐食しやすいといった問題点を持つため実用例は極めて少ない。我々は、マグネシウム合金の耐食性改善を目的として、プラズマ陽極酸化による表面改質技術の研究開発を行っている。

#### ナノスケール微細組織を持つ鉄基磁性薄膜の組織制御

ナノスケールの微細組織を持つ鉄基磁性薄膜を製造し、その磁気特性と組織との関わりについて研究してい

る。現在、基板上に均一に分散させた金属微粒子を種結晶として、ナノスケールの柱状晶を有する鉄基合金磁性薄膜を製造する研究に重点的に取り組んでいる。また、この鉄基合金磁性薄膜を磁場中で焼鈍したときの効果について研究し、形状磁気異方性を持つ垂直磁化膜を簡便に製造する技術の開発を行っている。

#### コヒーレントX線回折による物質内部構造の可視化

コヒーレントX線回折を用いて測定した回折強度から、物質内部の構造を再構築する手法について、測定や解析の方法や、この方法を実際の材料に応用する場合の具体的問題点などについて研究を行っている。この研究は、X線自由電子レーザーを用いた技術の将来展開に向けた予備的研究であり、時分割で材料内部組織の変化を可視化するための基礎技術の開発を目的としている。

#### 二次電池用電極材料における応力ひずみの影響と新電極材の開発

リチウムイオン電池の充放電過程における、負極材料の膨張・収縮に伴うひずみにより、負極材料の組織が破壊され電池のサイクル特性を劣化させることが知られている。我々は、このひずみの効果を低減しサイクル特性を改善するために、リチウムイオン電池用負極材料として、金属ナノ粒子や金属ナノ多層膜などを用いて、サイクル特性と材料組織の関係についての研究を行っている。特に、現在、ポーラス銅の空隙中に錫を埋め込んだ複合材料を用いて、歪エネルギーが電極電位に与える影響について詳細に研究している。また、新規マグネシウムイオン電池の正極材料の開発も行っている。

教授 松原英一郎  
准教授 市坪 哲  
助教 八木 俊介

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****プロトン伝導性固体電解質を用いた燃料電池**

燃料電池は、化学エネルギーを効率よく、電気エネルギーに変換でき、特に、固体電解質を用いたタイプの燃料電池は、小型化、高集積化が容易であり、その将来性が有望視されている。なかでも、固体酸化物燃料電池は、高温動作型でありコジェネレーションに適しているが、多大な努力にも関わらず、その動作温度は、今でも800℃程度なのが現状である。本研究では、この温度を250-500℃に下げることが目的とし、アクセプタードープにより加湿雰囲気中でプロトン伝導性を有するバリウムジルコネートについて研究を行っている。これまでの研究により、600℃で30 mS/cmの大きな伝導度を実現した。また、酸化物中のH<sub>2</sub>Oの熱力学的性質やリン酸塩などの新規固体電解質についても研究を行っている。

**燃料電池用電極材料の開発**

燃料電池は、電解質と電極からなる電気化学システムであるため、燃料電池の性能向上のためには、電解質だけではなく、電極に関する研究も重要である。当研究室では、バリウムジルコネートを燃料電池として使用する際の電極について研究を行っている。アノード用として、NiもしくはPdを無電解めっきし、その性能を調べている。無電解めっきは、溶液への浸漬により比較的簡単に電極を作製することができ、複雑な形状にもめっき可能であることから有望なプロセスと考えられる。これまでに、めっきしたPdの電極反応抵抗は実用レベルに十分な値が得られており、現在、ポーラス化したバリウムジルコネート表面にめっきすることで、電極性能のさらなる向上に取り組んでいる。カソードとしては、電子伝導性とプロトン伝導性の両方を有する材料の探索を行っている。

**チタンの溶融塩電解**

チタンは資源量が豊富で軽くて強く、さらに、海水中などで半永久的な抜群の耐食性を示すが、高純度のチタンを得るための製錬に手間とコストがかかり、その用途は限られている。そのため、少ない使用量で高い耐食性が得られる「チタンめっき」技術の開発が望まれている。しかし、チタンは卑な金属であるため、水溶液ではめっきすることができない。そこで、当研究室ではチタンの溶融塩電解をベースにチタンの製錬法の要素技術を研究

している。これまでの研究では、チタンが珊瑚状に析出してしまうことが問題であり、実用化のためには、電析形態の制御がキーテクノロジーである。そこで、どのような電析の条件がチタンの電析形態に影響を及ぼすかを系統的に調べている。また、溶融塩中のチタンイオンはフッ化物イオン濃度により、その価数が増えることが知られており、このチタンイオンの挙動について、分光法により解明することを試みている。

**熱力学に基づく新規太陽電池用材料の探索**

集積回路や太陽電池などに用いられる半導体においても、金属や合金と同じように熱力学の立場から現象を理解できる。カルコバイライト構造を持つ化合物半導体ZnSnP<sub>2</sub>は、規則不規則変態により、そのバンドギャップが1.66 eVから1.25 eVまで変化することが報告されている。これは、ZnSnP<sub>2</sub>のバンドギャップを太陽電池の理想的な値である1.4 eV程度に制御できる可能性を示唆している。バンドギャップを制御したZnSnP<sub>2</sub>を作製するためには、Zn-Sn-P三元系状態図が有用であるが、これまでに報告はなく、当研究室では三元系状態図の作成を行っている。この状態図を基にZnSnP<sub>2</sub>を作製し、その組成と原子配列の乱れを表す指標である規則度、および半導体特性との相関を明らかにしていく予定である。

**太陽電池用薄膜材料の作製プロセスの開発**

現在、太陽電池材料としてはシリコンが主流であるが、太陽電池の更なる普及のためには、材料の多様化が求められている。化合物半導体はシリコンに比べて大きな光吸収係数を持つため薄膜化が可能であり、省資源の面からも期待されている。現在、実用化されている化合物半導体太陽電池には、インジウムなどの希少元素やカドミウムなどの毒性のある元素が用いられている。そこで当研究室では、亜鉛のリン化合物半導体であるZn<sub>3</sub>P<sub>2</sub>に着目し、研究を行っている。Zn<sub>3</sub>P<sub>2</sub>太陽電池を世の中に登場させるためには、まず、高品質の薄膜が得られる薄膜作製プロセスの確立が必要不可欠である。現在、湿式法、乾式法、問わず、様々なプロセスを検討し、高品質な半導体薄膜が得られる作製プロセスの確立を目指している。

教授 栗倉 泰弘 (2009年3月定年退職)

准教授 宇田 哲也

助教 野瀬嘉太郎

材料プロセス工学講座  
プロセス設計学分野

ハンディー全反射蛍光 X 線分析装置の開発

金属材料, 半導体, 有機材料など各種材料の性能の向上や低下, 環境汚染, 疾病等に極微量元素が深く関わっている場合は多く, これら極微量元素を分析し, その役割を明らかにすることは新材料創生, 環境保護, 疾病の原因解明などのために必要不可欠である. 全反射蛍光 X 線分析法は複数元素を同時に検出し定量できるという利点をもっており, 半導体の表面汚染物質の分析, 環境汚染の評価等その応用例は多岐にわたっている. 全反射蛍光 X 線分析では, シンクロトロン放射光のような強力 X 線源から発生する X 線を単色化して用いることが極微量元素を分析するために必要不可欠と考えられてきたが, われわれは数ワットの X 線管から発生する微弱 X 線を単色化せずに用いることで, シンクロトロン放射光にあと 3 桁にまで迫る  $10 \text{ pg}$  ( $10^{-11} \text{ g}$ ) の検出下限が得られることを明らかにした. この微弱な非単色 X 線を使用するという方法を用いることにより, 高感度ハンディー全反射蛍光 X 線分析装置 (図 1) の開発に成功した.

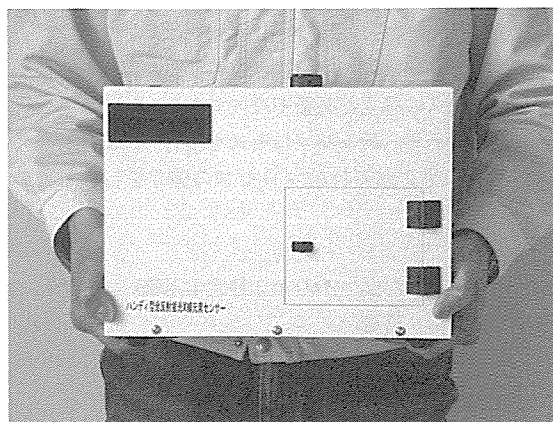


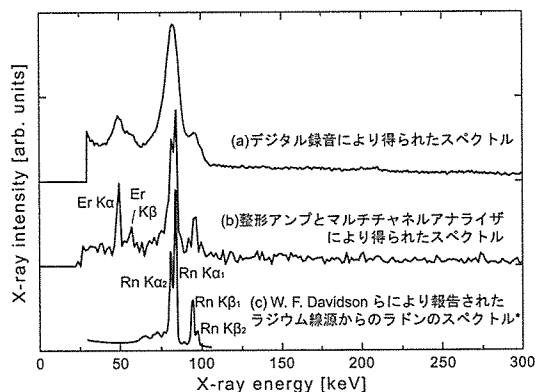
図 1

デジタル録音による X 線計測

これまでの検出器では, 検出器のアナログ信号を波形整形アンプとマルチチャンネルアナライザ, 或いは A/D コンバータとデジタルシグナルプロセッサを用いて X 線のスペクトルを得た上でコンピュータに取り込んでいた. しかしながら, デジタル録音端子は高分解能 A/D コンバータを内蔵しており検出器のアナログ信号を直接デジタルデータとして取り込む事ができると考えた. そこで, 取り込んだデータの処理ソフトウェアを作成し X 線検出器の出力を録音する事で X 線の測定を行った.

検出器はカドミウムテルライドの半導体検出器とチャージアンプを用いた. サーベイメータ校正用のラジウム線源からの X 線を測定したところラドンの  $K\alpha$ ,  $K\beta$  線が観測された. 分析用の回路を一般的なコンピュータのマイク入力端子とソフトウェアで置き換えることで非常に簡単に X 線の検出が行えることが示された. (図 2)

教 授 河 合 潤  
助 教 弓 削 是 貴  
技術専門職員 林 豊 秀



\*W. F. Davidson and R. D. Conner, Nucl. Phys. pp. 363-384 (1970).

図 2



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

### 陽電子線高温クリープ損傷その場評価装置の開発

従来のクリープ損傷評価手法は、すべて冷却後の試験材の破壊検査によるものであり、これまで高温クリープ変形中の耐熱材料の内部変化を高温その場で捉えることは不可能であった。そこで、本研究室では、金属材料中の格子欠陥やナノ組織の変化を高感度で検出可能な陽電子消滅法を高温クリープ試験に適用し、高温その場で耐熱材料中の組織劣化を測定する世界初の装置を開発し、新しい耐熱鋼の設計開発やクリープ寿命予測に活用する。さらに、陽電子寿命測定法により、高分解能電子顕微鏡でも見えない原子スケールの格子欠陥の種類と量を非破壊で検出することによって、クリープ損傷機構の解明と新しいクリープ強度予測パラメータを提示することを目的とする。

従来の陽電子寿命測定法 ( $\gamma$ - $\gamma$ 同時計測法) では、陽電子線源 (放射性物質) と試験材を密着させる必要があり、クリープ試験その場測定は不可能である。しかし、本研究室で独自開発した新方式の陽電子自身の通過信号で陽電子の入射時刻を測定する ( $\beta^+$ - $\gamma$ 法) を採用することで線源と試験材を密着させる必要がなくなるため、この陽電子入射システムとクリープ変形評価機構と一体化することで、陽電子線高温クリープ損傷その場評価が可能になる。

線源から発生した陽電子は、陽電子検出器 (アバランシェ・フォトダイオード: APD) を通過し電気信号 (スタート信号) を出す。この信号は陽電子がクリープ試験材に入射する時刻を与えてくれる。その後、陽電子は磁気レンズによってフォーカスされ、効率よくクリープ試験材に照射される。試験材に打ち込まれた陽電子は、耐熱材料中の格子欠陥に捕獲され、各種の欠陥に固有の時間後に電子と対消滅して、ガンマ線となって試験材の外に放出される。この対消滅した  $\gamma$  線 (ストップ信号) をシンチレーション検出器で検出して、クリープ試験材中の陽電子寿命を調べることで、高分解能電子顕微鏡でも見えない原子スケールの格子欠陥が検出可能である。作製した陽電子線クリープ損傷高温その場評価装置 (図1) は、陽電子ビーム導入部、陽電子消滅  $\gamma$  線検出器、電子衝撃加熱装置、光学式クリープ変位測定器等を備えている。今後、クリープ変形に伴う材料中の組織劣化を原子レベルで解明する。

### ラザフォード後方散乱法による Cu(Ti) 合金膜を用いた拡散バリア層形成機構の理解

近年の Si-ULSI では配線遅延低減のため、配線に Cu が用いられている。しかし、Cu の誘電体層への拡散を防ぐ拡散バリア層が必要であり、それが Cu 配線の有効断面積を減少させるため抵抗が増加する要因とな

っている。そこで、Cu(Ti) 合金膜を熱処理することにより Ti を表・界面に析出させ極薄バリア層を自己形成させる方法を提唱してきた。これまで様々な誘電体層上でバリア層自己形成法を試み、誘電体層の種類によりバリア層中の化合物が変化 (TiC か TiSi) すること、TiC を含むバリア層の形成速度が TiSi を含むものより速いことを明らかにした。このバリア層形成速度の違いを理解するために、本研究では、バリア層形成の活性化エネルギーの算出をラザフォード後方散乱 (RBS) 法を用いて行った。

RBS プロファイル中の界面 Ti ピーク面積  $S$  は界面に析出した Ti 原子の個数  $N$  に比例し、理論式より界面に析出した Ti 原子のモル数  $n$  を算出できる。いずれの誘電体層との反応でも、 $\log n$  は  $\log t$  に比例しその傾きは約 0.2 で、反応が粒界拡散に支配されていることが考えられる。また、 $\log n$  は  $\log(1/T)$  に比例し、反応が熱活性化に支配されていることが明らかとなった。傾きより得られた活性化エネルギー  $E$  は誘電体層の種類に依存し、C を含まない  $\text{SiO}_2$  で最も大きく、C を含む誘電体層では C 濃度の減少に伴い減少し、誘電率の低い Low-k 膜で最小となった。また、上記 2 つの関係より、Ti 原子と誘電体層中の元素とが会う頻度  $Z$  をあらわす頻度因子も活性化エネルギーと同様の傾向を示した。以上より、合金元素である Ti と誘電体層との反応は、拡散による機構も影響しているであろうが、 $E$  と  $Z$  に支配された化学反応により支配されていると結論づけた。得られた各パラメータより、合金膜中の Ti 濃度を低減し、C 濃度の少ない低誘電率膜を用いることで、反応速度を落とさずに低温プロセスが可能となることを示唆した。

教授 白井 泰治

准教授 伊藤 和博

講師 井上 耕治 (2009年3月着任)

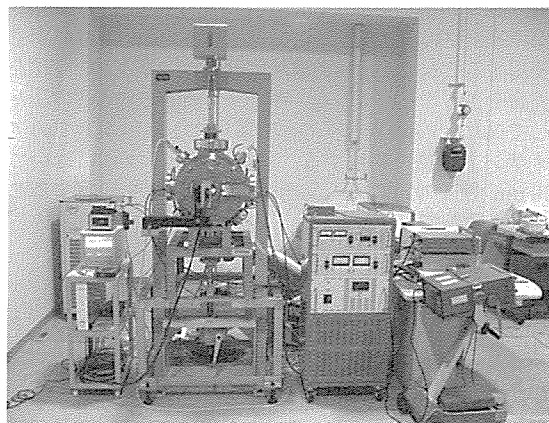


図 1

先端材料物性学講座  
先端材料物性学分野

## STM による材料表面の原子レベル評価

## (1) Au(111) 炭素吸着表面の STM 観察

金属表面上での炭素原子の挙動はグラフェン(単層グラファイト)やカーボンナノチューブ(CNT)の生成過程に密接に関連していることから近年多くの研究が進められている。従来, グラフェンや CNT の生成には Ni や Co といった金属が使用されてきた。これらは比較的炭素と強い結合を作る金属である。ところが, 最近 Au, Ag, Cu といった炭素と強い結合を作らない金属においても CNT が生成することが見出された。このようなことから, さまざまな金属上に炭素吸着をした表面の構造を調べる研究に着手した。手始めとして本年は Au(111) 表面へ炭素吸着を行い, STM(走査トンネル顕微鏡)観察を行った。STM 観察の結果, いくつかの異なるサイトが観察されることが明らかになった。このうち最も特徴的なサイトは直径約 0.5 nm の“俵型”をしたサイトである。STS(走査トンネル分光)の結果, このサイトはこれまでに報告されている C36 フラーレン/Au(111)の電子状態と類似した電子状態を持つことが明らかになった。現在このサイトの生成過程・条件に関して慎重に研究を進めている。

## (2) SOI 基板を用いたナノギャップ作成の試み

ナノメートル以下の間隙を持った接合は, 単分子デバイスの研究の舞台であり, このことから将来的には実用的にも重要性が増す構造であると考えられる。本研究では SPM(走査プローブ顕微鏡)で観察可能なナノギャップの作成を試みている。SPM が使用できれば, 接合の局所的な電子状態さらには電流を流した状態での局所的な電圧降下(電子散乱)など, 有用な情報が得られると考えられる。しかしながら SPM 観察のためには基本的に原子レベルに近い平坦な表面が必要である。このようなことから本研究では SOI(silicon on Insulator)基板を用いて, ナノギャップを作成することを試みている。我々の構造では SOI 基板の BOX 層(酸化膜層)がギャップの右と左を分ける絶縁層となる。シリコンを使用することで, 比較的簡単に原子レベルの近い平坦な表面を得ることができ, ギャップ間隔を狭める方法としては比較的低温での Ge 蒸着による酸化膜上でのアイランド成長を利用する。現在, ギャップ部において 10 nm 程度の距離での局所的な電圧降下を観察することに成功しており, より良く定義された構造の作成の方法を模索している。

## 原子・分子サイズ接点の研究

## (1) 単原子コンダクタンスに対する水素の影響

2つの電極が1個の原子あるいは1本の原子列で連結された単原子接点は化学的に活性であり, 気体分子を吸着しやすいとされている。従来の実験ではガス雰囲気中で単原子接点を形成する手法が用いられており, 接点形

成の際にガス原子(分子)が接点に取り込まれて純金属の単原子接点よりも低いコンダクタンスの接点が形成されることが明らかにされている。今回我々はガス雰囲気中で接点を形成するのではなく, 予め単原子接点を作成してからガスを導入して, 接点とガス原子との相互作用によりコンダクタンスがどのように変化するかを調べる実験を行った。接点金属は Au, 導入ガスは水素であり, 液体ヘリウム温度で Au 単原子接点(コンダクタンスは  $1G_0$ ,  $G_0$  はコンダクタンスの量子単位)を作成・保持しておいてから水素を導入し, コンダクタンスの時間変化を観測した。従来のように水素雰囲気中で Au 単原子接点を作成すると, 水素が接点に取り込まれてコンダクタンスは  $1G_0$  から  $0.5G_0$  以下に低下する。ところが Au 単原子接点を作成してから水素を導入するとコンダクタンスは数倍に上昇し, その後低下して最終的に接点は破断した。コンダクタンスの上昇幅にはばらつきがあるが, コンダクタンスの上昇とその後の接点破断は再現して数多く観測された。コンダクタンスの上昇は全く予想外の現象であり, 興味深い機構が寄与している可能性もある。このため現在も原因究明のための研究を継続して行っている。

## (2) Au 合金単原子接点の破断電圧

平成19年度に Au および Cu 単原子接点の破断電圧測定を行ったのに引き続き, 20年度に AuAg 合金の単原子接点の破断電圧測定を行った。実験方法等は Au の場合と同様であり, 実験環境は室温・超高真空中である。17at%Ag, 31at%Ag, 55at%Ag, 73at%Ag の4種類の AuAg 合金試料について測定を行い, 31at%Ag, 55at%Ag の試料では破断電圧分布が2つのピークを示すことが見出された。1V 付近のピークは Au 単原子接点の平均破断電圧に, 0.5~0.6V 付近のピークは Ag 単原子接点のそれにほぼ一致していることから, 2つのピークはそれぞれ接点原子が Au または Ag であるときの破断電圧に対応していると考えられる。この実験結果は合金単原子接点の破断電圧が接点原子の種類に依存して局所的に決定されることを示唆している。

## (3) ジチオアミド分子架橋のコンダクタンス

首都大学東京の杉浦健一先生との共同実験として, 同先生から試料を提供いただいたテレフタルジチオアミド分子を Au 電極間に架橋してコンダクタンス測定を行った。この分子は Au 電極に対してアミノ基とチオール基の2つの結合部位を有するため, 高コンダクタンスが期待される分子である。測定では  $0.003 - 0.005G_0$  程度のコンダクタンスが観測されている。この値は結合部位だけが異なるベンゼンジメタンチオール分子のコンダクタンスより約1桁高く, ジチオアミド基が Au 電極に対して有効な結合部位であることを示している。

教授 酒井 明  
准教授 黒川 修

工学研究科 材料工学専攻

材料物性学講座  
量子材料学分野

### 逆スピネル型複合酸化物における陽イオンの規則 - 不規則相転移

スピネル型の酸化物は、電気及び磁気デバイスとして広く応用されている。これらの応用において、2種類の陽イオンの配置の詳細な理解と制御が重要となるが、逆スピネルにおける陽イオンの配置や規則 - 不規則相転移については十分に理解されていない。本研究では、代表的な逆スピネルである  $Mg_2TiO_4$  を取り上げ、熱処理による陽イオン配列や構造の変化を粉末 X 線回折測定及びリートベルト解析により調べた。また、Mg を Zn で置換あるいは Ti を Sn で置換したスピネル型固溶体についても同様な解析を行い、6 配位サイト間の規則 - 不規則相転移について系統的な考察を行った。

固相反応法により上記スピネル型酸化物を様々な条件下で合成及び熱処理した結果、 $Mg_2TiO_4$  については 773 K ~ 943 K、 $Zn_2TiO_4$  については 823 K ~ 773 K に保持することによって陽イオン配列が規則化した正方晶相が得られた。一方、 $Mg_2SnO_4$  については、陽イオン配列の変化は観測されなかった。規則 - 不規則相転移を生じる  $Mg_2TiO_4$  と  $Zn_2TiO_4$  を組成の両端に持つ  $Mg_{(2-x)}Zn_{(x)}TiO_4$  では、773 K に保持することで全組成範囲において正方晶相が現れた。 $Mg_{(2-x)}Zn_{(x)}TiO_4$  において Zn は 4 配位サイトを優先的に占有し、6 配位サイト上の相転移温度は Zn 濃度の増加と共に低下することがわかった。一方、 $Mg_2Ti_{(1-x)}Sn_{(x)}O_4$  においては、Sn 濃度が高くなるにつれて相転移温度が低下するものの、6 配位サイト上で陽イオンが規則配列した正方晶相が逆スピネル相よりも安定に存在することが示唆された。

### Pt-Ru 固溶体における溶質原子配列の理論的検討

Pt 合金は様々な触媒として利用されており、中でも Ru をおよそ 50at% 添加した Pt-Ru 合金は固体高分子型電極触媒への応用が期待されている。その触媒機能の的確な設計を行うためには、溶質原子の配列についての詳細な情報が必要である。本研究では、Pt-Ru 合金における溶質原子の原子配列とその温度依存性について、第一原理計算とそれに基づく統計力学シミュレーションを行った。具体的には、様々な組成を持つ Pt-Ru 合金規則構造のエネルギーを第一原理計算により評価した。そして、クラスター展開法とモンテカルロ法を用いた統計力学シミュレーションを  $Pt_{50}Ru_{50}$  合金に対して実施し、合金構造や内部エネルギーの温度依存性を調べた。

fcc および hcp を母格子とする Pt-Ru 合金規則構造に対する系統的な第一原理計算の結果より、Ru 組成が

50 at% 以下で fcc を母格子とする多数の規則構造が負の生成エネルギーを持つことがわかった。また、 $Pt_{50}Ru_{50}$  合金の絶対零度における安定な原子配列は、Pt もしくは Ru のみからなる (001) 面が交互に二層づつ積層する Z2 型構造であり、Ru 組成が 25 at% から 50 at% の範囲における最もエネルギーが低い構造はこの Z2 型構造を基本とするものであることがわかった。一方で、50 at% を超える Ru 組成を持つ fcc を母格子とする規則構造や hcp を母格子とする規則構造は絶対零度において安定でないことがわかった。これらの結果より Ru 組成が 50 at% 以下の範囲では固溶体の形成が示唆された。

### 生体活性カルシウムリン酸塩における陽イオン固溶の第一原理計算

リン酸オクタカルシウム ( $Ca_8H_2(PO_4)_6 \cdot 5H_2O$ , OCP) は、アパタイト層及び水和層が交互に積層した結晶構造を持つ。そのため、骨や歯の生体アパタイトが生成される過程での前駆体の一つと考えられており、生体活性なカルシウムリン酸塩として骨再生材料への応用が期待されている。また、OCP やハイドロキシアパタイト (HAp) をはじめとするリン酸カルシウム塩は種々の陽イオンや陰イオンを結晶内や表面に取り込むことで、生体内での結晶構造安定性やタンパク質の選択的吸着等に重要な役割を果たすことが知られている。そのため、OCP のイオン交換能について知見を得ることが重要である。本研究では、第一原理計算を用いて OCP 中の  $Ca^{2+}$  イオンと二価陽イオンとのイオン交換エネルギーを系統的に解析し、各種イオン交換能について検討することを目的とした。具体的には、110 原子から構成される OCP のユニットセル中の  $Ca^{2+}$  を様々な二価陽イオンで置換した構造について、構造最適化及び全エネルギー計算を行った。異種陽イオンを含む OCP の飽和水溶液と OCP 結晶との固液平衡状態を考慮することにより、イオン交換エネルギーを算出した。

飽和水溶液中の陽イオン濃度を  $1.0 \times 10^{-3}$  mol/L としたときの、 $Ca^{2+}$  イオンと異種陽イオンにおけるイオン交換エネルギーを求めたところ、 $Pb^{2+}$  が顕著に低いイオン交換エネルギーを示した。置換イオンの電子状態を解析したところ、 $Pb^{2+}$  では他のイオン種と比較して隣接する  $O^{2-}$  と強固な共有結合を形成することが判明した。また、イオン交換エネルギーを HAp と比較した結果、多くのイオン種について OCP の方がイオン交換が容易であることが示唆された。

教授 田中 功  
准教授 松永 克志  
助教 大場 史康

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

### L1<sub>2</sub> 型 Co<sub>3</sub>(Al,W) の力学特性

近年 Co-Al-W 系において、Ni 基超合金と同様の微細組織形態を有する fcc-Co/L1<sub>2</sub>-Co<sub>3</sub>(Al,W) 二相合金が見出され新規耐熱構造材料として注目されている。しかし析出強化相である L1<sub>2</sub>-Co<sub>3</sub>(Al,W) 相の力学特性はほとんど明らかになっていない。本研究では L1<sub>2</sub>-Co<sub>3</sub>(Al,W) 単結晶の弾性定数などを調べると共に、多結晶材の引張・圧縮変形における塑性変形挙動を調べることが目的とした。まず、得られた単結晶弾性定数から求めた Cauchy 圧の値から Co<sub>3</sub>(Al,W) が延性的な変形挙動を示すと予測され、弾性異方性が大きいことから cuboidal 組織の形成に有利であることがわかった。また圧縮変形における降伏応力は、室温以下では温度の上昇とともに急激に減少した後、室温から 973 K まで単調に減少し、973~1073 K の狭い温度範囲で逆温度依存性が見られた。TEM による転位組織観察の結果、すべての温度範囲において APB を挟んだ 1/2[110] タイプの部分転位に分解していることを明らかにした。

### Ni<sub>3</sub>Sn<sub>2</sub> の空孔規則構造とリチウム拡散挙動の相関

リチウム二次電池高容量化のための新規負極材料として、Sn や Si を含む金属間化合物が注目されている。電極材料の特性は一般に電極内における Li の拡散挙動に支配されるため、電極材料中の空孔の濃度や規則配列などに依存すると予想される。本研究では空孔配列の規則-不規則変態ならびに空孔配列の組成依存性を有する Ni<sub>3</sub>Sn<sub>2</sub> 単結晶を用いて、空孔規則配列とリチウム二次電池負極特性との相関に関する基礎研究を行った。

Ni<sub>3</sub>Sn<sub>2</sub> の高温相は組成によらず六方晶系 B8<sub>2</sub> 構造をとるのに対し、低温相は B8<sub>2</sub> 構造を基礎とする変調構造を有し、その変調周期は組成に依存して変化する。Ni<sub>3</sub>Sn<sub>2</sub> 相の定電流充放電試験における充放電容量は、主として試料内の Li の拡散速度を反映しており、結晶方位および組成に強く依存する。得られた結果から、高い充放電容量を得るには、Li 拡散パスのボトルネックのサイズを大きくし、同時に空孔規則配列による空孔列の連続性を高くすることが有効であることを見出した。

### Mn 添加 Ru<sub>2</sub>Si<sub>3</sub> チムニーラダー化合物の結晶構造と熱電特性

Ru<sub>2</sub>Si<sub>3</sub> の高温相は、チムニーラダー構造と呼ばれる、遷移金属原子からなる副格子 (チムニー) と Si 原子からなる副格子 (ラダー) が重ね合わさったような特異な結晶構造を有する。これまでの研究の結果、Ru<sub>2</sub>Si<sub>3</sub> に Re を添加すると幅広い組成領域において Si 副格子の周期の異なるチムニーラダー相が数多く形成され、Re 置換量の増加によって熱電特性の向上が認められた。しかし、固溶限に達し Re 置換による更なる向上が見込めないため、より幅広い組成領域を有すると考えられる

Ru-Mn-Si 系に着目し、形成されるチムニーラダー化合物の結晶構造と熱電特性の相関を得ることを本研究の目的とした。実験の結果、Ru<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Si<sub>3</sub> チムニーラダー相が Re 添加の場合より広い組成範囲 (0.12<x<1) にわたって存在することを確認し、無次元性能指数 ZT は x=0.90, 874 K において最大値 0.76 を示し、Ru-Re-Si 系の場合 (最大値 0.60) よりも向上することが確認された。

### La-Ni 系合金の水素吸蔵特性に及ぼすブロック層構成比の影響

La-Ni 二元系に存在する金属間化合物のうち LaNi<sub>3</sub>, La<sub>2</sub>Ni<sub>7</sub>, La<sub>5</sub>Ni<sub>19</sub> の結晶構造は LaNi<sub>5</sub> 層と La<sub>2</sub>Ni<sub>4</sub> 層が c 軸方向に特定の周期で積層した構造として記述できる。本研究では、これら一連の La-Ni 系金属間化合物の水素吸蔵特性と水素吸蔵放出前後の結晶構造を明らかにし、水素吸蔵特性に及ぼすブロック層構成比の影響を明らかにすることを目的とした。LaNi<sub>3</sub>, La<sub>2</sub>Ni<sub>7</sub> および La<sub>5</sub>Ni<sub>19</sub> の PCT 曲線は低圧で La<sub>2</sub>Ni<sub>4</sub> 層が水素化し、高圧で LaNi<sub>5</sub> 層が水素化する 2 段階プラトーを示した。この時、La<sub>2</sub>Ni<sub>4</sub> 層の非常に低い平衡水素圧のため、この層に吸蔵された水素は放出されず、可逆的な水素の吸脱は LaNi<sub>5</sub> 層のみで起こる。また、LaNi<sub>3</sub> と La<sub>5</sub>Ni<sub>19</sub> は吸脱サイクルによるアモルファス化が進行するが、La<sub>2</sub>Ni<sub>7</sub> は良好なサイクル特性を示すことが明らかになった。この原因として、La<sub>2</sub>Ni<sub>7</sub> では 1 段階で吸蔵する水素量が少なく、水素化に伴う格子の歪が小さいことが考えられる。

### L1<sub>0</sub> 構造を有する FePd 単結晶の塑性変形

L1<sub>0</sub> 構造を有する金属間化合物の塑性変形挙動を理解するためには、多くの研究がなされている TiAl 以外の変形挙動を知ることが重要である。本研究では FePd 単結晶の塑性変形挙動を調べ、塑性変形挙動における共通点と相違点を明らかにすることを目的とした。[671] と [253] 方位の単結晶の圧縮試験結果から、液体窒素温度から規則不規則変態点近くの 600 °C までの全ての温度域において、普通転位は容易に活動するのに対して超格子転位の活動は非常に困難であることが明らかとなった。TiAl では超格子転位も容易に活動することから変形挙動が異なることが明らかとなった。どちらの転位の CRSS も液体窒素温度から室温までは負の温度依存性を示し、室温以上の範囲では温度に対してほぼ一定の値を示した。電子顕微鏡による転位組織の観察では、超格子転位が TiAl 同様超格子部分転位に分解しているがその分解様式は異なることが明らかとなった。この分解様式の違いが超格子転位の活動の容易さの違いの原因と考えられる。

教授 乾 晴行  
准教授 田中 克志  
准教授 岸田 恭輔  
助教 岡本 範彦

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

前任教授である田村剛三郎先生が2008年3月末に定年退職され、平成20(2008)年度の大半は、松田のみが職員として在籍して研究・教育活動を行なった。その研究成果は下記の通りである。

### 放射光コンプトン散乱測定による低密度 多体電子系の相挙動解明

融点付近の金属液体は、典型的な金属的性質を示し、自由電子ガス近似がよく成り立つ。一方、気体は絶縁性である。このように金属における液体から気体への一次相転移では、金属から絶縁体への電子的性質の転移も同時に起こる。よく知られているように液体と気体の共存線は臨界点で消失する。そこで臨界点を迂回するように温度圧力を変化させると、融点近くの液体から希薄な気体へと、一次相転移を起こすことなく連続的に移り変わることが可能となる。当研究室では、金属の連続転移を実現し、履歴から局在に至る電子状態の変化に着目して研究を進めている。特に、金属元素の中で最も自由電子近似が成り立つアルカリ金属を対象とし、SPring-8における放射光コンプトン散乱測定を実施している。コンプトン散乱測定は電子の運動量分布を与える強力な手段であり、近年、大型放射光施設の登場により高輝度X線を用いることが可能となったことから、極端条件下におけるコンプトン散乱測定の精度も格段に向上してきている。

一般に、伝導電子密度の低下に伴い、電子間の相互作用(交換相関)の影響が強く現れる。このような相互作用の効果は、伝導電子の運動量分布にも反映する。コンプトンプロファイルのフェルミ運動量付近には、電子間相互作用を反映して特異なプロファイルが現れる。このプロファイルを解析することにより、低密度の多体電子系の挙動について知見を得ることが可能となる。昨年度は、流体ルビジウムを対象として1100℃までの散乱実験を実施することに成功し、伝導電子の運動量密度分布を導出することができた。プロファイルの解析により求まるフェルミ運動量は、電子数密度の1/3に比例して低下する傾向を示しており、定性的には基底状態の電子ガス相挙動を示している。今後さらに低密度領域で測定を行う予定であるが、そのためには必然的に高温高压条件下の実現が必須となるため、現在、その技術開発を遂行中である。

2009年3月に、辻が教授として着任した。松田は2009年4月より、京都大学理学研究科物理学・宇宙物理学専攻の准教授に転出し、従来の研究をさらに発展させて行く予定である。2009年4月に、寺田が助教として着任した。構造物性学分野では、新たに「構造用金属材料の組織制御と力学特性の解明」を主テーマとして研究活動を推進して行く。鉄鋼材料、アルミニウム合金、チタン合金、銅合金等、我々の社会ではその基盤を支えるために、様々な金属材料が多量に用いられている。この多くは、モノの形を保ったり、重量を支えたりという、力学的な機能を果たしている。我々は、構造用金属材料のナノ/マイクロ組織・構造とその形成機構、そして力学特性を発現する基本原理と組織との相関に関する基礎研究を行なう。当面の個別テーマは以下の通りである。

### ナノ組織を有するバルク金属材料の創製

我々が用いているバルク金属材料のほとんどは、数多

くの結晶から構成された多結晶体である。従来の組織制御法では、その平均結晶粒径をせいぜい10 $\mu\text{m}$ 程度までしか微細化することができなかった。これに対し、対数相当ひずみ4~5以上の極めて大きな塑性変形を施す巨大ひずみ加工プロセスを利用すると、結晶粒径を数十~数百nmまで超微細化できることが見出され大変注目されている。我々は、ARB(accumulative roll-bonding)というバルク材に適用可能な巨大ひずみプロセスを独自に開発し、超微細粒・ナノ組織を創製する手法を確立して、鉄、銅、アルミニウム、チタンなどの純金属材料や鋼、アルミ合金、銅合金等の種々の合金材料の組織の超微細化に成功している。また、鋼のマルテンサイト加工熱処理の出発組織として用いることなどにより、大ひずみを必要とせずに超微細組織を得ることができるとも見出している。さらに、異種金属の組み合わせに巨大ひずみ加工を施せば、固相状態で合金化が進むバルクメカニカルアロイング(MA)が生じ、金属ガラスなどの非平衡相が形成されることも明らかになっている。

### ナノ組織金属の特異な力学物性

結晶粒径1 $\mu\text{m}$ 以下の超微細粒金属やナノ結晶金属は、粒径数十 $\mu\text{m}$ 以上の従来金属とは大きく異なる力学特性を示す。例えば、超微細粒金属は、従来粒径材の4倍にも達する高強度を有する。こうした高強度化には合金元素の添加を必要としないことから、環境負荷軽減の観点からもナノ組織金属は次世代の高強度材料として大いに期待されている。そのほかにも、ナノ組織金属は、純アルミニウムでも降伏点降下現象が現れたりExtra Hardeningや焼鈍硬化・加工軟化現象を繰り返すなど、特異な力学物性を発現することが明らかとなっている。我々の研究室では、こうしたナノ組織金属材料の興味深い力学物性の発現原理を明らかにするための基礎研究に取り組んでいる。なお、これらの「超微細粒金属材料に関する研究」に対して、辻は2009年3月に第5回日本学術振興会賞を受賞した。

### 相変態・析出・再結晶現象の基礎学理の追及

金属材料の力学特性は、そのマイクロ組織に強く支配される。金属のマイクロ組織は、多くの場合、相変態・析出・再結晶といった固相反応により形成される。しかし、種々の相変態・析出・再結晶現象には、数多くの未解明な問題が残されている。我々は、これらの解明を目指し、組織学的・結晶学的アプローチから組織形成原理を明らかにし、力学物性へのつながりを見出すための基礎研究を行なっている。

### 材料のマイクロ/マクロ局所変形挙動の定量解析

金属結晶の塑性変形は、本質的に不均一である。しかし、そうした不均一な変形が積み重なって、材料の平均的な強度や延性を決定している。また、変形の不均一性は、結晶の構造やマイクロ組織と強く相関していると考えられる。しかしながら、一般的な力学試験では、平均的な強度や延性しか評価することができない。我々は、引張試験時の二方向その場外形変化測定システムや、光学的全視野ひずみ解析システムなどの局所変形を定量評価可能なシステムを構築した上で、変形の不均一性とマクロな力学物性との関わりを基礎的に明らかにすることを目的とした実験研究を行なっている。

教授 辻 伸泰(2009年3月着任)

助教 松田 和博

(2009年4月より京都大学理学研究科准教授)

助教 寺田 大将(2009年4月着任)

工学研究科 材料工学専攻

**先端材料機能学講座  
先端材料機能学分野**

複数の相が内在する「複合系材料」について、微視構造形成過程、構造と材料全体としての力学および機能特性との相関の実験的評価およびモデリングによる普遍的な体系化、およびこれら成果に基づく材料設計、性能予測などへの応用を目指している。本年度の主な成果は以下のように要約される。

(1) 高温酸化物超伝導テープの負荷ひずみ下での変形破壊とその臨界電流に及ぼす影響

超伝導テープは作製・使用中に機械的・電磁気学的応力を受け、その結果超伝導特性も変化する。本研究では多芯型の BSCCO 複合テープ、および被覆型の DyBCO 複合テープの変形破壊と、V-I カーブ、臨界電流、 $n$  値の相関を調べた。前者では BSCCO フィラメントは負荷ひずみの増加に伴って集積型破壊から連鎖型破壊に移移すること、後者では DyBCO 層の独立して生じる微視破壊からその後の基盤合金の不連続降伏による多重破壊へと移移すること、両者とも損傷部での安定化金属への電流迂回で発生する電圧が臨界電流および  $n$  値を低下させることなどを明らかにした。

(2) 高温酸化物超伝導テープおよび融液成長アルミナ/YAG 共晶複合材料の熱残留ひずみ評価および解析

超伝導電流輸送を担う BSCCO や DyBCO などの超伝導物質の熱残留ひずみは臨界電流の耐ひずみ特性を決定する因子の一つであり、その集積過程の解明が待たれている。また、アルミナ/YAG 共晶複合材料は次代のタービン材料として期待がかかっているが、室温近傍の低温では破壊靱性に残留応力が影響を及ぼすため、その解明が待たれている。本研究では、SPring 8 および当研究室での X 線回折実験による残留ひずみ測定結果と弾塑性力学を組み合わせて、熱履歴に伴う残留ひずみ変化の解明とモデル化を試みた。超伝導物質の電流輸送方向での残留ひずみの温度依存性を明らかにし、その結果と応力ひずみ曲線の解析から、固有破壊ひずみ（残留ひずみの無い場合の破壊ひずみ）を求めること成功した。また、アルミナ/YAG 複合材での各構成材の室温での残留応力を明らかにし、実験で観察された破壊プロセスをこの結果から説明することができた。

(3) 金属へのコーティング層の破壊・剥落

硬質層を金属にコーティングした被覆複合型金属は、自動車、建築、工具など多彩な分野で使用されている。また DyBCO などの超伝導物質を合金にコーティングした被覆型超伝導は高磁界発生、電力貯蔵などさまざまな分野での応用が期待されている。これらの材料では、コーティング層の破壊・剥落は機能の消失につながるため、メカニズムの解明とその抑制方法の開発が要請されている。本研究では自動車鋼板として用いられている溶融亜鉛めっき鋼板および被覆型 DyBCO 複合テープについて、コーティング層の多重破壊・剥落現象を調査し

た。前者では、クラック間隔は負荷ひずみの増加に伴って平均値は小さくなるが、その分布は相似形を保っていること、後者では基盤材の不連続降伏時で多重破壊が引き起こされること、両者ともに、帯状に寸断されたコーティング層にかかる引張軸に垂直方向の圧縮応力により、破壊が生じ、界面剥離が誘発されることを明らかにした。また有限要素解析により、前者の剥離プロセスを明確に示した。

(4) FIB 法による細径繊維の破壊靱性評価

直径が数ミクロンの炭素、炭化珪素などの繊維は構造用複合材料の強化材として広く用いられているが、繊維そのものの破壊靱性については、測定に必要な鋭い人工ノッチの導入が困難なため、非晶質繊維でのミラーゾーンサイズを用いた経験的な手法により得られた値しか報告されていない。本研究室では、繊維に FIB（集積イオンビーム）を用いて、繊維に人工ノッチを導入し、有限要素法解析と組み合わせて、繊維の破壊靱性を評価する方法を提案し、結晶性および非晶質炭化珪素繊維の破壊靱性を明らかにしてきた。本年度は、この手法を適用して、アルミナ繊維、および、高強度型および高弾性型炭素繊維の破壊靱性値を明らかにするとともに、微視構造と破壊靱性の相関について考察を行った。

(5) Zr 基金属ガラスのなかの構造と組成揺らぎの検討

Zr 基金属ガラス中のクラスター的な不均一構造と準結晶晶出の関係性を調べるため、全真空条件での異常小角散乱実験をすすめた。

ナノスケールの準結晶を初期に晶出する Zr 基合金に注目した。今年度は特にナノスケールで準結晶を過冷却融体状態から生成する Zr-貴金属系の合金に着目し、その構造変化の詳細解析を進めるとともに、構造の時間的发展過程を調べるための時分割その場測定法の検討をおこなった。Isochronal な熱処理による ZrCuPt, ZrPd の解析結果より、ナノ準結晶生成系では早い時期に明確な長距離秩序が形成されることが明らかとなってきた。今後は定量的に低バックグラウンドで取得できるようになった小角散乱強度を種々の条件で調整された試料へと適用を進め、準結晶化初期の機構を検証してゆく。

(6) 化合物半導体系ナノドットの GI-SAXS による構造解析

斜入射 X 線小角散乱法 (GISAXS) の、III-V 族化合物半導体ナノドットの構造解析への適用と  $a$ -As 埋めこみ状態の InAs ナノドットのファセット構造の解析をおこなった。多重散乱効果の弱い領域を利用し、散乱強度の 3 次元分布を解析することによって埋め込まれたナノドットの 3 次元形状を再構成した。

教授 落合庄治郎

准教授 奥田 浩司

工学研究科 材料工学専攻

材料機能学講座  
材料物理学分野

BaV(S<sub>1-x</sub>Se<sub>x</sub>)<sub>3</sub> の反強磁性絶縁体-金属強磁性体転移

BaV(S<sub>1-x</sub>Se<sub>x</sub>)<sub>3</sub> には  $x = 0.03$  の置換量を境に、自発磁化を持たない Se 低濃度相と自発磁化を持つ Se 高濃度相が存在する事が明らかになった。強磁性にならない Se 低濃度相では BaVSe<sub>3</sub> の金属絶縁体転移が Se 置換によって低温へ抑えられる事が示唆された。Se 高濃度相では強磁性転移温度が Se 置換量が多くなるにつれ上昇し、Se 置換により強磁性相互作用が強まっている事を反映している。しかし、飽和磁化は Se 置換量に依存せず、V 原子当たり  $0.4 \sim 0.5 \mu_B$  程度で一定である。また Se 低濃度相、Se 高濃度相のそれぞれが  $3 \sim 50$  T の磁場によって別の相へ転移する事も明らかとなった。

GaNb<sub>4</sub>S<sub>8</sub> におけるクラスタダイマー状態

GaNb<sub>4</sub>S<sub>8</sub> は Nb<sub>4</sub>S<sub>4</sub> クラスタ一つあたり  $S = 1/2$  スピンを有するモット絶縁体である。帯磁率の温度依存性は高温でキュリーワイス則に従うが、ある温度で異常が見られ相転移の存在が示唆されていた。しかしながら基底状態については明らかではなく、我々は核磁気共鳴法により基底状態に関する知見を得た。転移温度以下でシフト及びスピン格子緩和率は熱活性的に減少し、基底状態はスピニングレットであると考えられ、およそ 200 K 程度のスピンギャップが存在する事が分かった。低温でクラスタが対を作り  $S = 0$  の非磁性状態になっていると考えられる。

## 長距離 RKKY 相互作用系における平均場のスピングラス転移

ランダム磁性体におけるスピングラス現象は、その発見以来、統計物理の魅力ある対象として盛んに研究されている。特に、平均場モデルの解析によって得られた「レプリカ対称性の破れ (RSB)」は、均一な系には無いランダム系特有の性質として注目されてきた。しかし、現実のスピングラス物質に対する平均場モデルの適用の妥当性には問題があり、RSB が現実起こっているか否かについては、多くの疑問が投げかけられていた。我々は、長距離相互作用である RKKY 相互作用の働く金属間化合物 Dy<sub>x</sub>Y<sub>1-x</sub>Ru<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> の臨界現象を詳細に調べ、この物質では平均場モデルが適用可能であり、RSB が

起こっている可能性が高いことを実験的に示した。

## 重い電子系における複数の反強磁性相間の競合と量子相転移

金属における非磁性フェルミ液体と磁気秩序の間の量子相転移は、不確定性原理に由来する量子ゆらぎが相転移の駆動力となる量子相転移の典型例の一つとして古くから研究されている。その中で、重い電子系は、この量子相転移が圧力などによって比較的簡単に引き起こすことの出来る物質群であり、量子相転移の臨界現象などの研究が近年盛んに行われている。我々は、典型的な重い電子系 CeRu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> に対して元素置換や圧力印加を行い、この系に存在する複数の反強磁性相間の競合により量子相転移がどのような影響を受けるかを中性子非弾性散乱実験によって調べた。その結果、相境界近傍では上記の複数の反強磁性相間がともに臨界的に増強され、相分離的な振舞が見られることが分かった。

X 線小角散乱による Al 基合金における Al<sub>3</sub>(Sc, Zr) 粒子の析出過程の観察

アルミニウム合金に Sc, Zr を添加することによって析出する Al<sub>3</sub>(Sc, Zr) 粒子は静的再結晶を抑制する能力に優れていることで知られている。この Al<sub>3</sub>(Sc, Zr) 粒子は粒子径が数十 nm 以上となる時効後期においては中心が Sc リッチで外殻が Zr リッチの Core & Shell 構造をとることが分かっているが、時効初期の内部構造については未だ良く分っていない。今回の研究では時効条件を変える事により Al<sub>3</sub>(Sc, Zr) 粒子の粒子径サイズを変えた試料を作製し、X 線小角散乱測定を行った。得られた小角散乱プロファイルと理論計算により求めたプロファイルをフィッティングすることにより粒子の内部構造を決定した。その結果、粒子径が数 nm 程度の時効初期においても Al<sub>3</sub>(Sc, Zr) 粒子は Core & Shell 構造をとっており、Core 部分はほとんど Al<sub>3</sub>Sc に近い組成であることが明らかとなった。また、時効に伴う外径の変化や分散の変化についても調べることが出来たが、Shell 部分の含有 Sc/Zr 比の解明にはさらに高角側の散乱プロファイルの測定が必要であることが分かった。

教授 中村 裕之  
准教授 田畑 吉計  
助教 足立 大樹  
助教 和氣 剛

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

### イオン液体を用いた還元拡散による Cu-Sn 合金形成

スズ含量が40~60 wt% の Cu-Sn 合金 (スペキュラム合金) は, アレルギー誘因性のあるニッケルめっきの代替皮膜として有望視されている. 本研究では樹脂基板上に無電解めっきにより作製した銅薄膜を, イオン液体浴 (合金化浴) 中で還元拡散法により Cu-Sn 合金化することで, 非導電性の基板上への Cu-Sn 合金皮膜の形成を試みた. イオン液体は熱的安定性が高く, これを浴に用いた中低温域でのプロセスにより, 水溶液より大きな速度での合金形成が可能である. 合金化は, 合金化浴中に浸漬した金属スズ棒を擬参照電極として用いた定電位法により行った.

異なる合金化時間で得られた合金相を評価し, 合金相の形成段階を調査するとともに, 熱力学計算と併せて合金形成のメカニズムを考察した. これにより, 電位および合金化時間の制御によって, 得られる金属間化合物相 ( $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  および  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  相) を制御できることが分かった. そこで各化合物相の色調を反射率測定により評価したところ, 各相の有する色調が異なり, ニッケルと類似したスペキュラム合金の色合いが  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  相固有の反射率を反映したものであることが分かった.

### 水素終端化シリコンと二官能性分子の反応および自己集積化分子膜形成

固体物性に新たな機能を付与する技術の一つとして, 自己集積化単分子膜 (SAM) がある. SAM とは, 適当な基板とその基板表面と親和性を持つ有機分子を, 特定条件下で共存させた場合に基板表面に形成される有機超薄膜のことである. これまで, 末端にビニル基を有するアルケンや, ヒドロキシル基を有するアルコールなどが Si (111) 上に SAM を形成することが知られている. 本研究では, 分子両端にビニル基とヒドロキシル基を有する 10-undecen-1-ol について, 可視光励起法による Si (111) 基板上への SAM 作製を行い, その構造・物性を調査した. その結果, 配向性の高い SAM が得られたが, 表面にナノスケールの粒状物が微量吸着することが確認された. この原因については完全には明らかではないが, 二官能性分子特有のものである可能性が高いことがわかった.

### 自己集積化単分子膜の真空紫外マイクロ加工

複雑な工程を経ず, 有機分子膜表面にマイクロパターンを刻む手法として, 真空紫外 (Vacuum Ultra-Violet, VUV) 光を用いた微細加工技術がある. フォトマスクを利用することで, 局所的な光分解によるパターン転写が可能となる. 解像度の劣化を小さくするため,

通常はフォトマスクを試料表面に密着させるが, この場合円滑な酸素供給がなされず, また, VUV 光により生成した分解有機物が残留し, 短い露光時間で効率的に分解されないという可能性が懸念されていた. そこで本研究では, フォトマスク-試料間に微小ギャップを設けたフォトマスクを用いて 1-ヘキサデセン SAM の VUV マイクロ加工を行い, 転写されるパターンにおよぼす影響を調べた. その結果, ギャップ型露光により, 密着型露光と同程度の解像度のパターンを短時間で形成できることを明らかにした.

### ケルビンプローブ原子間力顕微鏡による SAM-金属界面の電子物性分析

個々の有機分子を電子機能素子として用いる分子エレクトロニクスにおいて, その素子の性能は分子そのものの性質だけでなく, 分子-電極間結合の状態に大きく影響される. 特に, 界面分極はキャリア注入障壁に直接的に関与することから, その研究は極めて重要である. 本研究では, 微視的な表面電位計測法であるケルビンプローブ原子間力顕微鏡法 (KFM) を用いて, 金-硫黄および金-セレン結合を有する SAM の表面電位を分析することで, その結合様式と界面分極との関連性について検討した. Dibenzyl disulfide (BT) および Dibenzyl diselenide (BSe) を含む相分離 SAM を作製し, その表面電位を測定した結果, BSe SAM は BT SAM より表面電位が約 300 mV 高いことがわかった. それぞれの分子のもつ電気双極子の表面鉛直成分の差は極めて小さいことから, 分子-基板界面界面における界面分極の差がこの電位差の主たる要因であることが明らかとなった.

### フェロセン系自己集積化単分子膜のイオン液体中における電気化学

フェロセニル (Fc) 末端基をもつ SAM は, 電気化学的に活性であるため, センサーやメモリーデバイスへの応用が期待される. 本研究では, 電気化学測定法を用いて, 種々のイオン液体におけるフェロセンチオール混合 SAM の電気化学挙動を調べることで, SAM とイオン液体の界面を究明することを目的とした. サイクリックボルタンメトリーにより SAM の酸化還元挙動を評価した結果, 水溶液とイオン液体のいずれの場合も, Fc 基の酸化還元が確認された. しかし, イオン液体の種類によって, 酸化還元に必要な電流量が異なることがわかった. イオン液体に異なるアニオンを意図的に添加することで, 酸化還元ピークに新しいピークが観測されたことから, イオン液体におけるアニオンのサイズが酸化還元挙動の違いの原因であることを指摘した.

教授 杉村 博之  
准教授 邑瀬 邦明  
助教 一井 崇



エネルギー科学研究科 エネルギー社会・環境科学専攻

## 社会エネルギー科学講座 エネルギー社会工学分野

○昨年度修了した博士課程学生の研究からベトナムにおける家電リサイクルの現状と今後について紹介する。

### 1. 使用済み家電製品のフロー調査結果

アンケート調査より、最初の使用者から出た使用済み家電製品は、自宅保有、次の使用者への譲渡(売却)、回収業者への売却、サービスショップへ売却、埋め立て処分の5つのオプションがあることが分かった。自宅に保有する場合、その期間は数年程度が多いようである。

回収業者は使用済み家電製品(完全に動かなくなった場合が多い)を買い取り、有価パーツ(鉄、銅、アルミニウム、ソフトプラスチック、IC、ダイオード)とそれ以外のパーツに分ける。前者はリサイクル業者(クラフトビレッジ)に売却されマテリアルリサイクルされ、ICやダイオードはリユースされる。それ以外は埋め立て処分が中国に輸出される。

回収業者から出てきた価値のないパーツ(基板やCRTモニター)は違法に捨てられるか、細かく砕かれたあとで規制されていない土地に埋め立てられる(埋め立て処分)、もしくは中国に輸出される。

一方、サービスショップでは、使用済みとなった製品の不具合のあるパーツが交換され新しい製品に作り直される。交換部品はほとんどが中国から輸入されている。

Vinh Phuc 省におけるフィールド調査から、毎年約400-580トンの使用済み家電製品が、解体センターにある16の大型ショップに売られていることが見積もられた。さらに、年間2000~3000台のCRTが何の規制もなく廃棄、または埋め立てられていることも分かった。ハノイでは、一日10トン、すなわち年間2500~4000トンの使用済み家電製品が2つの主な解体センターに売られている。これらの数値は、小規模な店舗に売却されハノイ周辺の地域に散らばっている製品については考慮されていないことに注意しなければならない。

### 2. 家電製品の普及量と使用済み量の予測結果

ベトナムにおける今後の家電製品の普及についてロジスティック関数、保有期間がワイブル分布に従うという仮定に基づき、ポピュレーションバランスモデルを用いて2025年までの家電製品の普及台数と使用済み台数の予測を行った。その結果、2004年に128万台の4家電製品が使用済みとなり、2010年には370万台(11万トン)、2025年には総計1700万台(56.3万トン)となることが判明した。

### 3. 廃棄家電製品のリサイクル量及び埋め立て量の推定

上述のように使用済み製品は、回収業者、サービス業者などを経て、リサイクル、埋め立て、中国へ輸出などされることとなる。本研究では、各オプションへのフローを調査するため単純化した使用済み製品フローモデルを構築した。このモデルは L. P. Genandrialine と M. F. Psyche (3) がフィリピンにおけるテレビ、ラジオ、冷蔵庫、洗濯機、エアコンの5種類の使用済み家電製品のフローを分析するために用いたもので、A. Nagurney と F. Toyasaki (4) がさらに改良している。

本研究で、埋め立て量は Landfill のカテゴリに流れる量として定義し、リサイクル量は Recycler のカテゴリに流れる量から Landfill に出ていく量を差し引いた量として定義した。個々のオプションの遷移確率はアンケート調査と解体業者とリサイクル業者へのヒアリングで得られた値を用いた。回収された材料の85%はリサイクル業者がマテリアルリサイクルし、残りの15%は埋め立てに流れるとした。実際には埋め立てだけでなく中国へ輸出されるというオプションもあるが、本研究では全て埋め立て処分されるとして考えた。また、実際には4番目、5番目・・・の使用者も考えられるが無視した。

Fig. 1 は推算されたりサイクル量、埋め立て量である。図より、2010年には使用済み家電製品から11,200トンの材料がリサイクルされ、37,000トンが埋め立てられるか中国に輸出されること、2025年には120,000トンの材料がリサイクルされ、290,000トンが埋め立てられるか中国に輸出されることがわかった。すなわち、現在のリサイクルシステムでは全体の使用済み家電製品の半分以上が埋め立て場か中国に流れることが分かる。リサイクルされる量は、埋め立てられる量の半分以下である。ベトナムのリサイクルはクラフトビレッジで主に行われるが、その技術力および処理能力は小さいため、環境や公衆衛生に与える悪影響を抑えることは難しい。したがって、リサイクル率を向上させ、埋め立てられる量を極力減少させるための適切なりサイクルシステムの構築が今後重要になると考えられる。

### 参 考 文 献

Duc-Quang Nguyen, Eiji Yamasue, Hideyuki Okumura, Keiichi N. Ishihara, "Use and disposal of large home electronic appliances in Vietnam", *Journal of Material Cycles and Waste Management* (to be published).

教 授 石原 慶一  
助 教 奥村 英之  
助 教 山末 英嗣  
技術職員 藤本 正治

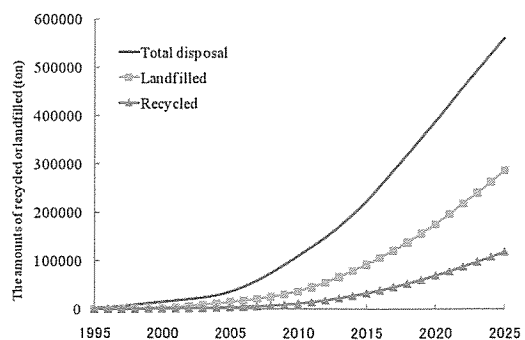


Fig. 1 The predicted amounts of recycled and landfilled e-waste.

## 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調べる —

当分野では、おもにレーザー等を用いた固体機能材料の解析を行っている。多種多様な機能を持ったエネルギー機能固体酸化物、光機能ガラス、電気化学的手法により作成された半導体薄膜を対象とした光学物性の探求を主目的としている。

これらの研究を本年度も継続して行うとともに、以下の研究を京都大学生存圏研究所、同エネルギー理工学研究所の研究グループとの共同研究として行っている。

### マイクロ波照射による金属酸化物表面でのプラズマ励起現象と表面変化

近年、気相原料由来のプラズマの反応活性を利用して金属や半導体表面の処理など材料プロセスへの応用が研究されている。これらの研究の多くは、気相原料へのマイクロ波エネルギー投与により生成したプラズマを反応に用いることを前提にしたものである。マイクロ波加熱は、対象物の迅速加熱、迅速応答、選択加熱を実現できることから、近年、金属のみならず、窯業・セラミックス産業、有機材料合成など様々な材料プロセッシング分野で新規の省エネルギー熱源として注目されている。

本研究では、減圧下で金属酸化物バルク試料に対してマイクロ波を照射することで、酸素原子プラズマが生成・放出し、相補的にバルク試料表面が還元される現象であり、二酸化チタンをはじめとして酸化鉄、酸化銅、酸化亜鉛などで同様の現象が見出されている。

金属酸化物試料として二酸化チタン焼結体を用い、2.45 GHz シングルモードマイクロ波照射装置を用いて、減圧下で試料にマイクロ波を照射した。プラズマ分光測定はファイバ CCD スペクトロメーターを使用し 350 nm-1050 nm の範囲をモニタした。照射後の試料は、粉末X線回折 (XRD)、ラマン分光、紫外・可視・近赤外分光反射率、および比抵抗測定により評価を行った。

プラズマ分光測定の結果、マイクロ波照射に伴い酸素原子 (777 nm, 845 nm) のピークが確認された (図1)。処理前後で試料表面は白色から濃青色に変化し (図2)、分光反射率から求められる吸収係数における照射前に見られた二酸化チタンのバンドギャップ (~3.0 eV) は照

射後に消失した。試料色の変化は破断面でも一様に観測されたため<sup>[1]</sup>、照射における表面変化は試料表面のみならず結晶粒の表面で起こることが示唆される。また、比抵抗値が大幅に低下し温度下降とともに減少していることから、二酸化チタンが低次酸化状態へ還元されていることが明らかとなった。

[1] T. Sonobe, T. Mitani, N. Shinohara, K. Hachiya, S. Yoshikawa, *Jpn. J. Appl. Phys.*, accepted (2009).

助 教 蜂 谷 寛

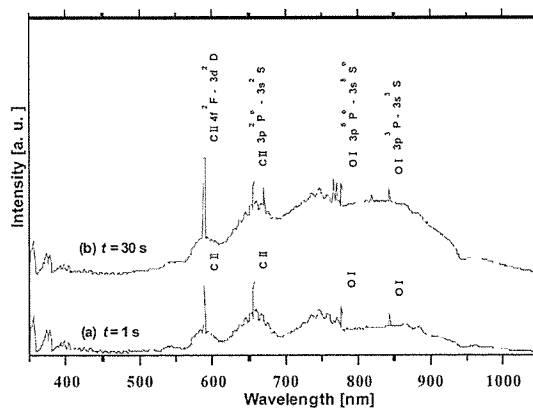


図1 マイクロ波照射時のプラズマ発光スペクトル：  
(a) 1秒後、(b) 30秒後<sup>[1]</sup>

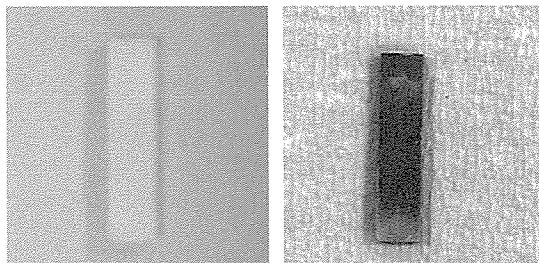


図2 マイクロ波照射前 (左) 照射後 (右) の二酸化チタン試料

エネルギー科学研究科 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  
材料プロセス科学分野**

平成21年度より分野名を高温プロセスから材料プロセス科学に変更しました。これまでの研究室の伝統を守りつつも、幅広く材料プロセッシングに関する研究を進めています。今後ともよろしくお願ひいたします。

**ダイレクトメタノール型燃料電池の触媒の開発**

ダイレクトメタノール型燃料電池はモバイル装置の電源として期待されているが、100℃以下の温度での作動性の向上、小型化には、電極材料の高機能化が不可欠である。炭素粉末表面に白金合金を担持した触媒の新しい製造プロセスの研究に取り組んでいる。

**電解を利用する新しい炭素担持白金触媒作製法に関する研究**

本研究では、電解を用いて従来とは異なる方法で炭素担持白金触媒を作製する方法を開発することを目的とする。もしこの方法が確立すれば、カーボンファイバー電極やグラッシーカーボン電極上に Pt を電析する際よりも担持量および表面積が大きくなり、また電極作製法としては担持量や担持状態、粒子径を電気化学的に調整することができる等の利点があり、魅力的な電極触媒作製法となる。電解装置の開発に当たっては、粉末をペースト状にし、それを Pt 板に接触させて濾紙で包むことによって作用極とし、対極および参照極に Pt 線を使い電解すれば粉末炭素上に Pt 微粒子が担持されることが確認できた。こうして得られた電解装置を用いて定電流電解を行い、得られた試料を担持量や電流効率、担持状態、結晶子径の測定および評価を行った。得られた実験結果から、電流値が小さい方がより多くの担持量が得られ、通電量が多くなるにつれ電流効率が下がることがわかった。また多少のばらつきはあるものの、結晶粒径に関しては電流値、通電量にかかわらず、ほぼ一定の値をとることがわかった。

**ポリオール法による燃料電池用 PtRu 触媒作製における前駆体溶液について**

ダイレクトメタノール型燃料電池に用いる白金・ルテニウム合金触媒の作製として、コロイド法を行う前駆体の保存状態を調べるために、NaOH 添加後の RuCl<sub>3</sub>・エチレングリコール (EG) 溶液について紫外・可視吸光度計を用いて経時変化を測定した本研究において以下の知見を得た。水溶液中において Ru<sup>3+</sup> は NaOH と反応して黒色沈殿を生成する。黒色沈殿は水酸化ルテニウムと考えられる。1-プロパノールまたは EG を溶媒とした場合、水酸化ナトリウムを添加すると初期のピークは徐々に高波長側にシフトし、さらに時間を経ると全域に渡る吸光度の減衰が生じる。水酸化ナトリウムの添加量が、物質質量にしてルテニウムの5倍未満であれば、RuCl<sub>3</sub>・EG 溶液は照射下においても長時間安定である。水酸化ナトリウムの添加量が、物質質量にしてルテニウムの5倍以上になると、RuCl<sub>3</sub>・EG 溶液は変化する。その変化速度は水酸化ナトリウムの添加量が多いほど早い。EG は水酸化物イオンによってその酸化力が増加し、常温下であってもルテニウムを還元したと推測される。

**新しい機能性表面処理法および機能性薄膜作製法の研究**

鉄鋼材料の表面処理には亜鉛めっきが広く用いられているが、亜鉛資源の枯渇の問題から“脱亜鉛めっき法”の開発が望まれている。この候補として、独自の非水溶媒を用いるあたらしい Al 合金電めっき法の開発を行っている。太陽電池用の化合物半導体薄膜の電析や金属とセラミック微粒子との共析を利用する複合電析による機能性複合材料薄膜の作製に関する研究も行っている。

**電析法による Al-Zn 合金薄膜の作製**

Al は非常に卑であるため、水溶液からの電析が困難であり、非水溶媒の電解質が必要となる。本研究では溶媒にジメチルスルホン (DMSO<sub>2</sub>) を使い、電析物の形態や組成を制御することを目指して、定電位電解による Al-Zn 合金電析を行った。組成 DMSO<sub>2</sub>:ZnCl<sub>2</sub> = 10:0.3 ~ 10:1 の電解浴に純 Zn 線を浸漬して作製した Zn/ZnCl<sub>2</sub>-DMSO<sub>2</sub> 電極が参照電極として使用できることを見いだした。

Zn/ZnCl<sub>2</sub>-DMSO<sub>2</sub> (DMSO<sub>2</sub>:ZnCl<sub>2</sub> = 10:1) 参照電極を用いて CV の測定を行った。その結果、-1.0V ~ -2.0V で電解を行えば Al の析出が期待できることがわかり、これに従って電解を行った結果、Al 含有量 1-90at% の幅広い組成の電析物が得られた。また、得られた試料は Al と Zn が分離することなく非常に均等に混ざっており、X 線回折の結果において Al を 10% 程度含む試料から Al の回折ピークが確認されなかったことから通常の溶融めっきで得られるものと異なる構造を持っていると考えられる。

**電析 Cd-Te の熱処理による結晶化**

電析による CdTe 薄膜製膜の高速化を目指して、Te-rich なアモルファス Cd-Te 電析と電析物の熱処理を組み合わせることによる電析物の再結晶化過程について調べた。ITO ガラス基板に CdS 薄膜を形成し、その上にアモルファス Cd-Te を析出し、温度 400℃ のもとで空气中で熱処理を行うことにより、粒径約 50 nm の結晶性 CdTe が得られた。過剰に存在する Te は、酸化され針状の酸化物となるが、アンモニア-硫酸アンモニウム溶液に浸漬することにより溶解除去できた。

**金属-シリコン系の熱力学関数の測定およびシリコン化合物の合成**

液体電解質を使用してシリコンの活量を測定して種々の熱力学関数を導出する。合成が困難な化合物の新しい合成方法を開発し、その機構を解明する。

教授 平藤 哲司

助教 植田 幸富

エネルギー応用プロセス学講座  
プロセス熱化学分野

劣質炭による酸化鉄還元の CO<sub>2</sub> メタラジー

1. 緒言

炭素が過剰に共存するように木材と Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を混合し急速加熱すると、金属鉄が生成し、生成ガス中の CO<sub>2</sub> 濃度は非常に低くなり、温度の上昇とともに平衡値 (P<sub>CO<sub>2</sub></sub>≈0) に近づく (Fig. 1)<sup>1)</sup>。以上の実験事実は、製鉄プロセスにおける CO<sub>2</sub> 発生量低減に向けての基本的な考え方を示すものである。

本研究では文献 (1) で用いた炭材を木材から Donaldson 炭に、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を鉄鉱石に変更した場合、生成ガス中の CO<sub>2</sub> 濃度がどのように変化するかを調査したので報告する。

2. 実験方法

粉末状の木材、Donaldson 炭、灰分を除去した Donaldson 炭、C の一部を木材チャーで置換した Donaldson 炭と鉄鉱石を混合し、ペレット状に成形したものを実験試料とした。混合比は、混合物中の C と O のモル比 (C/O) が 1.2 となるよう定めた。実験試料の組成を Table 1 に示す。

Ar 雰囲気の高周波炉内で所定の温度 (1673K ~ 2073K) に保持した MgO るつばに試料を投入して急速加熱した。一定温度で試料を 21 分間保持し、発生ガスをガスバッグに捕集し、ガス成分、濃度をガスクロマトグラフィにより分析した。

3. 実験結果・考察

Figure 2 に各混合物を 1673 K に加熱したときの発生ガス中の CO<sub>2</sub> 分圧を示す。(a) 木材により Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を還元すると、CO<sub>2</sub> 発生量は微量であり、熱力学平衡にほぼ到達する。(b) 鉄源を Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> から鉄鉱石に変更し木材で還元すると、P<sub>CO<sub>2</sub></sub> はわずかに増大した。(c) 炭素源を木材から Donaldson 炭に、鉄源を Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> から鉄鉱石に変更すると、P<sub>CO<sub>2</sub></sub> は大きく増大した。(d) 灰分を除去した Donaldson 炭で鉄鉱石を還元すると、(c) よりも P<sub>CO<sub>2</sub></sub> が減少した。(e) Donaldson 炭の C の一部を灰分の少ない木材チャーで代替することで、P<sub>CO<sub>2</sub></sub> がさらに減少した。

以上の結果より、炭材中灰分が平衡への到達を妨げていると考えられ、石炭の一部を灰分の少ない木材で置換することで酸化鉄の還元時に生成するガス中の CO<sub>2</sub> の濃度を低減させることができると考えられる。

参 考 文 献

- 1) T. Matsuda, M. Takekawa, M. Hasegawa, Y. Ikemura, K. Wakimoto, T. Ariyama and M. Iwase; *Steel Res. Int.*, 77 (2006), 774.

教授 岩瀬 正則  
准教授 柏谷 悦章  
准教授 藤原 弘康  
助教 長谷川将克

Table.1 実験試料組成

|     | (wt%) |           |                |                         |                                | C/O mole ratio |     |
|-----|-------|-----------|----------------|-------------------------|--------------------------------|----------------|-----|
|     | Wood  | Wood Char | Donaldson Coal | Ash-free Donaldson Coal | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |                | Ore |
| (a) | 70.9  | -         | -              | -                       | 29.1                           | -              | 1.1 |
| (b) | 79.9  | -         | -              | -                       | -                              | 20.1           | 1.2 |
| (c) | -     | -         | 29.2           | -                       | -                              | 70.8           | 1.2 |
| (d) | -     | -         | -              | 26.8                    | -                              | 73.2           | 1.2 |
| (e) | -     | 1.9       | 26.3           | -                       | -                              | 70.8           | 1.2 |

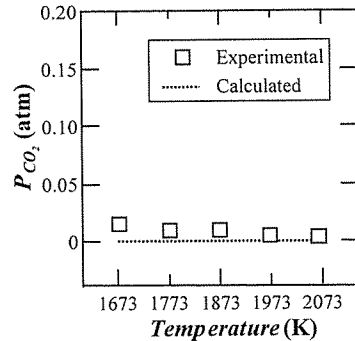


Fig.1 木材 + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 混合物から生成したガス中の CO<sub>2</sub> 分圧

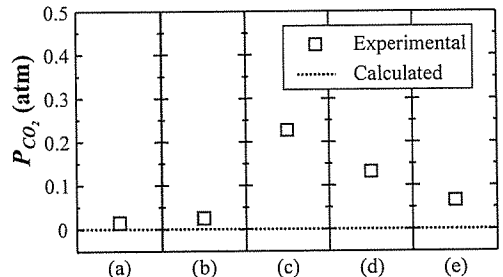


Fig.2 1673 K における生成ガス中の CO<sub>2</sub> 分圧  
(a) 木材 + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (b) 木材 + 鉄鉱石, (c) Donaldson 炭 + 鉄鉱石, (d) 灰分を除去した Donaldson 炭 + 鉄鉱石, (e) Donaldson 炭 + 木材チャー + 鉄鉱石

# 会 報

## 追 悼

森山 徐一郎 先生

京都大学名誉教授，森山徐一郎先生は平成20年11月10日，享年90歳にて逝去されました。ここに先生の生前のご功績を偲び，謹んで哀悼の意を表します。



### 森山徐一郎先生の御略歴

- |          |                                 |         |   |
|----------|---------------------------------|---------|---|
| 昭和16年12月 | 京都帝国大学工学部採鋇冶金学科卒業<br>同講師，海軍技術士官 | 昭和45年   | 日本金属学会谷川・ハリス賞受賞                             |
| 昭和22年2月  | 京都大学助教授                         | 昭和56年4月 | 停年により退職，京都大学名誉教授                            |
| 昭和37年4月  | 同教授冶金学教室非鉄冶金学講座担任               | 在任中，    | 日本鋇業会理事，日本金属学会評議員，日本学術振興会非鉄冶金第69委員会委員長等を歴任。 |
| 昭和44年    | 科学技術長官賞受賞                       |         |   |

## 振り返れば今蘇る遙か遠い昔の思い出

小野 勝 敏

森山徐一郎京都大学名誉教授は昨年暮れの平成20年11月10日に90歳の高齢でお亡くなりになった。私は永年に亘り森山先生の下で研究生生活を送った者として、先生の逝去を悼むとともに、その業績を紹介させていただくのであるが、先生が日本で初めて韌性金属チタンの製造に成功され、日本における現在のチタン産業隆盛の礎となったのは終戦から昭和26年頃までの遙か昔のことである。この私ですら先生のチタンに関する研究活動を直接見てきた訳ではなく、私が先生の研究室に入れて頂いた昭和35年には先生のクロール法によるスポンジチタンの製造実験および関連の基礎研究は終わってからすでに5年以上経過していた。先生との雑談を通して、昔の製造実験にまつわる苦労話に痛く感銘を受けたが、今では遙か遠い昔の伝説のように感じられる。

森山先生は昭和17年京都大学工学部採鉱冶金学科冶金科を卒業、海軍技術士官として旧海軍技術研究所材料研究部において現在の「レアメタル」、当時では「特殊金属」の製造研究をしておられたが、終戦を迎えて京都大学へ戻り、講師、助教授を経て、昭和37年教授に任ぜられ、非鉄冶金学講座を担任された。昭和56年に定年により退官された。海軍技術研究所での金属チタンとの出会いが、その数年後京都大学において日本で始めてチタンの抽出に成功した輝ける足跡の原点に当たる。先生の温厚、誠実な人柄と風貌は後進による敬愛的であったが、私はむしろ先生の若かりし頃の、病に倒れるまで過酷な実験に耐えた強靱な精神と進取の気概に強い感銘を受けてきたものである。

先生の研究所時代におけるレアメタルは、世界大戦当時の軍事技術と関連する電子回路デバイスとしての真空管に用いる貴重な金属であった。タングステンはフィラメントに、ジルコニウム及びチタンはその高温における抜群のガス吸収能力が見出されGetter剤に求められ、欧州ではPhilips、米国ではG.E.の研究所が競って応用技術进行研究していた。チタンはすでにルクセンブルグ出身のDr. William Justin Krollが1930年から約10年かけて、四塩化チタンのマグネシウム還元・アーク溶解に立脚し現在も踏襲されているクロール法を確立していた。金属チタンは一体いつ実用化され世に出てきたものなのか、私がしばしば受ける質問であり、よく知られていないようである。これに関しては以前、チタン国際会議でのパリ大学Lacomb教授による“The Kroll Memorial Lecture”の中に次のような紹介がある。Krollはルクセンブルグで彼が主宰する研究所においてチタンの製造研究を行っていたが、“Fall of 1938, visit to USA. Presentation of various samples of Ti

(wires, rod, sheet, are melted buttons) at six leading companies which showed no interest.” 森山先生は研究所では大型送信管の性能向上のために特にチタン(当時はチタニウム)が必要であると考え、入手できたクロール法の概要を参考に格闘の末、韌性はさて置き何とかガス吸収性のある粉末チタンを作るに至った。しかし、東京の研究所の空爆による炎上で装置はもとより研究資料一切は灰燼に帰し、終戦とともに呆然として故郷の京都へ帰還した。終戦後の京都の研究室は実験資材も無く、到底複雑で危険なチタンの製造実験を行える環境ではなく、単に研究室の復旧に数年を費やした後、昭和24年頃から、漸く欧米の文献を通してその後のチタン・ジルコニウム製錬の進展が覗えるようになった。すなわち、第二次世界大戦中に米国では例のマンハッタン計画の一端として、チタンは高温材料・航空機材料に位置づけられ、当時の内務省鉱山局(USA Bureau of Mines, Albany-Oregon)の研究所が中心となり、Krollを招聘して韌性構造材料チタンの大量生産の見通しが得られるようになっていた。これに大いに触発された森山先生は、猛然と実験準備に取り掛かったのである。高温で極めてリアクティブなチタンは、製造原料の四塩化チタンと熔融マグネシウム還元剤のみならず装置材料とシール用不活性ガス中の不純物を全て取り込み、析出と同時に際限なく汚染され脆性チタンに劣化してしまう。其の時の実験はまさに寝食を忘れてのものであり、論文にして一行にもならないことに研究時間の大半を費やしてきたことなどを述懐されたときは、返す言葉も無く頭が下がる思いであった。先生が日本で始めて韌性金属スポンジチタンの抽出に成功し、それを当時の新聞が大々的に報じたことを、今から60年以上前の私がまだ中学生のときのことであるが、微かな記憶として残っている。それに先立ち昭和24年には森山先生の京都大学冶金学教室と神戸製鋼所が新金属チタンについて懇談を行い、日本においても国家的見地からその生産方法の確立が必要であるとし、チタニウム生産委員会を結成、京都大学冶金学教室、大阪大学理学部浅田研究室、神戸製鋼所研究部、新日本金属化学研究部をメンバーとして活動した。昭和27年に当時の大阪チタニウム(株)が住友金属工業の関連会社として発足して目度く工業化されるに至った。このように日本におけるチタン産業の発祥の地は京阪神である。我々門下生一同は先生とのお別れの際、先生の胸元にスポンジチタンを捧げ深く感謝の意を表した次第である。

(京都大学名誉教授、昭和36年卒)

## 森山先生を偲んで

幸塚 善作

森山先生とは十数年位前から2~3ヶ月に一度、京都

のホテルで会食することをお互いに楽しみにしていました。昨年の京都の夏は、殊の外暑く先生の体調がよくないので、暫く先に延ばしてほしいとのことでしたので、また元気になられお誘いのかかるのを待っていました。ところが、その間に先生は体調を崩され暫く入院されていたようで、一週間前に漸く退院されたが直ぐにまた入院されることになったとのご家族から連絡を受けたのが10月1日でした。早速病院に見舞いに行きましたが、以前の入院の時と違って、ひどく憔悴されているのに驚きました。実は同じ病院に2年ほど前に入院されていた時、上田喜三郎、松村昭両氏と見舞いした時など、先生の方からもう一度元気になって、一緒にビールを飲みたいとおっしゃっていました。事実その通り元気になられ、酒量は減りましたが、何回も楽しく会食することが出来ました。それに比べ今回は、私の方から、もう一度元気になられ、また会食することを期待しますと申しましたが、もうそれは無理だろうとの返事しか、返ってきませんでした。卒業生に心配かけても悪いので、あまり連絡しないようにとのご意向でしたので、大石敏雄先生にだけ連絡し、西村山治先生とは10月30日に一緒に見舞いに行き、多くの思い出に浸りました。残念ながらそれが最後となりました。

森山先生の存在なくしては、私の人生は考えられませんが、27年に卒業して6年間企業にいましたが、33年に森山先生から大學に戻って、もう一度勉強し直す気持ちはないかと誘われました。大変迷いました。その理由は学生時代に見ていた森山先生は、まことに素晴らしい研究一筋のスーパーマンで、とても簡単について行けそうもない存在でした。何しろ当時は靱性Tiを日本で初めて製造したとの新聞報道もあり、研究室はものすごく活気に溢れ、その先頭に立って健闘しておられました森山先生のイメージが私の脳裏に強く焼き付いていました。28年に病气されてからは、ご自身の健康に多少留意されるようになられました。それまでの助教授時代の先生は、大學の研究者はかくあるべしと言うすさまじいものがありました。逡巡しながら、先生のお世話になることに決めました。それから数年間、6年間のブランクを回復すべく必死に勉強し、少しずつ研究者としての自信が持てるようになりました。それには森山先生の絶大な支援に負うところ大でありました。43年村上陽一郎先生のお世話で大阪大学に移ることになるまでの間、10年間森山先生の指導を受けました。助手、講師、助教授、一年間カナダでの留学と、全く充実した10年間、私の研究者としての基礎を確立させて頂きました。その間、西村山治先生、森山昭先生と切磋琢磨しながら研究できたこと、また当時在籍された優秀な学生諸君の協力を得て多くの研究成果を上げることができましたことは、ま

ことに幸運だったと思います。このようにして森山研究室の基礎造りができつつある時に、十分なお恩返しをしないまま京都大学を去ることになり大変迷惑をかけたことと思います。しかしながら新天地での私の活動に全面的に支援して頂きました。干渉がましいことは一切なく、ただただ激励してもらいました。25年間無事大阪大学で研究、教育に専念できたのも先生の先輩としてのアドバイスに負うところ大きいものでありました。数多く持ちました京都での2人だけの会食の席で、雑談の中に多くの有形無形の薫陶を受けました。

京大非鉄冶金研究室では20年位前から一年に一度、有志による同窓会を持つようになりました。吉田耕生氏(住友金属鉱山OB)、西村山治先生と私の3名が幹事役となり、森山先生を囲んで石井小太郎(26卒)、上田喜三郎、松村昭、奥村昇、阿部隆三(27卒)、松浦菊男(28卒)、榎本修造(29卒)、野村悦二(31卒)、田中克芳(32卒)、松本洋祐(33卒)氏らがよく出席して下さいました。数年前から、幹事役も高齢化したので大石敏雄先生らに幹事をお願いすることになり、出席者もかなり若返りして、数回森山先生も出席されて、益々盛会裡に実施されました。平成19年が最後になりましたが、この会は今後とも継続されていくかも知れませんが、残念ながら先生の姿が亡くなるのは寂しい限りです。

先生の業績については、水曜会誌に多数Ti, Si, Zr, Hfなど、今で言うレアメタルの製錬に関する記述が残されていますが、この分野のわが国の先駆者と言えるでしょう。これらの研究については小野勝敏名誉教授、鈴木亮輔北大教授、岡部徹東大教授らが継承して活躍中であり、数年前に岡部先生に森山先生を紹介した時、Tiに関する神様とお会いするような気持ちだと言ってくれたのは印象深いものがあります。

学協会活動では、資源・素材学会(旧、日本鉱業会)と学振69素材プロセッシング(旧、非鉄冶金)委員会が中心であります。とくに69委員会は、昭和50年に大きな改革が行われ、開かれた委員会として、現在も非鉄冶金、素材プロセッシング以外に新素材、リサイクル分野にも拡大して発展してきていますが、その改革後の初代委員長として活躍されました。私達には自分の活躍分野として他の異業種の専門家と一緒に勉強することが必要であるとのことから、電気化学会溶融塩委員会、固体イオニクス学会の設立に尽力され、これらは現在も後輩達が活躍中であり、このように「森山先生は亡くなりました」が、遺訓は多くの後輩達に引き継がれ、わが国の非鉄冶金、素材プロセッシング分野の発展に今後とも寄与していくことを信じて已みません。

今回の水曜会誌の追悼文をお願いしたい方は他にも沢山おられますが、紙面の都合で、年長者として私一人が

選ばれ、代表して書くことになりましたが、まことに拙文で申し訳ない次第であります。最も世話になったのは自分であるとの思いから書かして頂きました。

(大阪大学名誉教授、昭和27年卒)

### 森山先生を偲んで

大石 敏雄

私が森山先生の非鉄冶金学研究室にお世話になったのは、3回生のときの先生の熱力学の授業が全く理解できず、先生の研究室に入れば少なくとも活量の何たるかぐらいはわかるようになるだろうというあまり前向きでない理由からでしたが、それよりも先生の講義を通して、先生のお人柄に魅かれたというのが本当の理由だった気がしています。当時の研究室は幸塚助教授、山口助手、小野助手の陣容でした。私たち同期生は金属加工学科が設立された第1期の入学生であり、学生数も冶金、金属加工の両学科合わせて80名に増え、その影響で研究室配属も10名ずつだったと記憶しております。4回生のときは幸塚、小野両先生に卒業研究の指導を受け、森山先生に研究の詳細について直接ご指導をしていただくことはほとんどなかったと記憶しています。ところが私が修士1回生のときに幸塚先生がカナダに留学され、その後まもなく小野先生がフランスに留学されたこともあり、森山先生に直接ご指導を頂く機会が多くなりました。私の修士の研究テーマはカロリーメトリーによる合金の熱力学的研究というもので、カロリーメーターによる熱量測定の実験データのみから合金の活量を求めるという新しい熱力学的解析方法によるものでありました。原著論文がすべてドイツ語で、教養のドイツ語の成績が悪かった私にとって、論文を読むこと自体が大変な苦勞でした。先生はそんな事情を察しておられたのでしょうか、修士1回生の正月を挟んだ一時期でしたが、ほとんど連日一緒に文献を読み、熱力学的展開に関してご指導をいただきました。今考えて見ますと、私の熱力学の原点がこのときにあったと思っています。余談ですが、このときから10年後に私がこともあろうにドイツに留学することになるとは、当時全く考えもしませんでした。この時期を境に、先生のお部屋によく出入りさせていただきました。先生の昔話で、冬には朝大学に来てまずやることは油回転真空ポンプの油を温めること、石英管がきわめて高価であったこと、当時は軟質ガラスを使用して真空回路を組み立てていたので簡単に割れが発生しガラス細工に非常に苦勞したことなど、戦後まもなくの頃の思い出話をよく聞かせて頂いたことを思い出します。

先生はいつも大局から研究を見ておられ、細かな研究手法などは私たちに任せ、それぞれの自主性を重んじる

という教育方針だったと思います。実験データをご覧になり、次の展開を適切にアドバイスしてくださいました。先生からなかなかおもしろいですねと一言頂くと安心して次の実験に進めたものです。また、私たちの実験室に入って来られ、胃の辺りを擦りながら「ゆっくりやりましょう」というのが口癖でしたが、あまり気分が乗らずにだらだらしていたときなどは「そろそろ急いでくださいよ」と聞こえ緊張したものです。

ご退官後も水曜会誌にチタン、ジルコニウム・・・などいわゆるレアメタルの解説を長く続けられておられました。それらの内容は先生が昭和20年代になされていたチタンの研究および特殊金属製錬に基礎をおいたものであり、会員の皆様で参考にされた方も多くおられたものと思います。

私が関西大学に転任しました平成5年以降もお宅が近かったこともあり、先生には時々お会いしていました。そんな折にはいつも私のことを気遣って下さいました。昨年9月だったと思いますが、幸塚先生から先生が入院されていると聞き、病院にお見舞いに伺いました。先生がお亡くなりになる3週間前でした、このときも「ゆっくりして温泉にでも行って来なさい」と、むしろ見舞いに行ったこちらがびっくりするような先生の方からのお言葉を頂きました。帰り際に「また来ます」と申し上げたら、「また来てください」とのご返事がありましたが、これが最後となりました。

森山先生にこれまで直接・間接的に頂いた恩恵は計り知れず、先生との出会いなくして今の私を考えることはできません。森山先生との深いご縁に感謝し、ここにご冥福をお祈りする次第です。

(昭40年 冶金学科卒)

### 森山徐一郎先生を偲んで

速水 弘之

昨年11月11日、大石敏雄関西大学教授から、森山徐一郎先生が昨10日に満90歳の天寿を全うされたとの電話を頂きました。ご存命中は公私に亘り大変お世話になりましたこともあり、私も翌十二日の葬儀には馳せ参じさせていただきました。葬儀の行き帰りにご一緒しました同じ非鉄冶金研究室出身の方と森山先生の思い出を道中色々語り合いました。やさしく物静かなお人柄も無論ありますが、何と言いましても共通して特に強く印象に残っておりましたのは比類ない程の上品なお人柄でした。いや、上品さをはるかに超えた気高さという表現の方がびったりしているのかも知れません。森山先生のお姿を間近に見させて頂いておりましたので、学生時代は上品な大人が世の中にはそこかしこに大勢おられるもの



とばかり思っておりました。ところが、いざ民間企業人になってみますと、学生時代には決して求められることがなかった利益の追求という不可避の使命を背負った環境変化も手伝いまして、森山先生の様な真に上品さを身に付けておられる方は、私を筆頭にしまして非常に少ないことにも気付くことができました。社会人になりましたからの方が、先生からごく自然に醸し出されます比類のない上品さが、それだけ余計に強く印象として心に残っているのです。本当は他人様のことを言うよりも、森山先生のご薫陶を少しなりとも受けましたはずの私自身が、本来ならば先生のお人柄から善き感化を受けまして、もっと上品さを身に付けておかなければならなかったのではないかと、今さらながら森山先生に申し訳ない思いも致すのです。

さて、私は学生時代の四年間ずっとクラブ活動（応援団吹奏楽部）をしておりましたが、運動部の応援活動、演奏活動、また11月祭前夜祭の準備等々で極めて多忙だったこと、さらには吉田神社鳥居のすぐ隣に、即ち時計台とは至近距離の所に下宿しておりましたこともあり、応援団仲間や高校の同窓生、大学教養時代と専門時代の友人達、また同じ森山研究室所属の仲間と、昼夜を問わず来訪者が本当に多くありました。青春時代に築いたこうした交友関係は、その後の人生に於いて結果的に何物にも替え難い貴重な財産となりましたが、半面勉学に勤しむという学生として本来あるべく姿とは程遠い日々を送っており、決して褒められた状況ではありませんでした。従いまして、大変申し訳ないことに初めて森山先生の授業を受けました三回生の頃の記憶は定かではなく、森山先生がチタン精錬の開発に初めて成功という素晴らしい業績を挙げられたこともずいぶん後になって知った程でした。四回生になり非鉄冶金教室に配属され先生に直接お目にかかる機会も増え、バナジウム二元合金の状態図を作成する卒業論文の研究では、直接先生からご指導を頂くこともありました。先生は私の様な不勉強な学生に対しても、分け隔てなく穏やかでやさしく気品ある表現で「ここはもう少し深く掘り下げてみたらどうですか」とか、「この現象はこの様に受け止められるのではないのでしょうか」という様に決して上から押し付けられずに、あくまで学生の自主性を重んじられて、本人のやる気を引き出すという真にハイレベルの教育指導をなされたことが、今も強く印象に残っております。これまで、森山先生から直接ご薫陶を受けられて、そのお人柄を心から慕われる水曜会会員の方々は数多くおられることと思います。その中で、幸塚先生、大石先生等、いわば愛弟子の先生方がお世話役をされております関西在住有志によります森山先生を囲む会が、毎年一回京都で和やかな雰囲気のもとに開催されております。私もご

高配を頂き何年か前から最も若輩の身として末席を汚しておりますが、確か一昨年の会が森山先生のお出ましになられた最後の会であったと記憶しております。また、私事で誠に恐縮ではありますが、森山先生には私共の仲人をお願い致しました所「ああ、いいですよ」と二つ返事で快くお引き受け頂きましたことにも夫婦共々に心より感謝しております。妻が初めて森山先生にお目にかかりました際「今の時代にも、あんなに上品で気品あふれる先生がおられるのですね」と大変感銘を受けておりました。その結婚式当日があいにく途中から豪雨となり、何となく私共の将来を暗示している様な不吉な予感が一瞬よぎったのですが、その気持ちをすかさず察されたのでしょうか、奥様が私共に向かって「雨が降り込むが、幸せが振り込むに転じて、雨はとでも縁起がいいのですよ。雨の日に式を挙げられた御夫婦は、その後幸せな家庭を築かれると昔から言われているのですよ」と仰って下さいました。

そのお陰様で私共は不安になった気持ちを、一瞬にして払拭してしまうことができたのでした。

この様な温かい気配りを頂きましたことが、今も心に鮮明に残っております。思い出は走馬灯の如くいろいろと駆け巡りますが、本当に先生ご夫妻には公私に亘りまして大変お世話になりました。有難うございました。

私は先生ご専門の非鉄関係ではこれと言った業績を挙げることはできませんでしたが、後半に非鉄合金の挙動と類似性が多く見られる無機材料の石英ファイバーの研究開発に携わることができました。そこで偶然と幸運とが重なり、とりわけ原子力発電所の様な高エネルギー照射環境下での挙動に関する研究では、若き頃の私の姿からは本人ですら想像できなかった、正に出来過ぎとも言えますエンジニア人生をお陰様で送ることが出来ましたことを、先生への深い感謝を込めまして最後に御報告申し上げます。

森山先生の長年に亘りますチタン精錬の開発を始めとする非鉄冶金の御研究並びに私共への大きな視点からの教育、また関連学会や研究室の発展に尽くされました偉大な御功績を偲び、誠に惜越ながら非鉄冶金研究室配属の昭和42年卒業同期生を代表しまして心から感謝を込め謹んで御冥福をお祈り申し上げます。

(昭和42年卒)

#### 恩師 森山徐一郎先生を偲んで

榎 木 義 淳

森山先生とのお付き合いの始まりは3回生になった1968年に非鉄冶金研究室に配属になった時でした。当時の大学は学生運動の真っ只中で、我が京都大学も授業が

ほとんどなく、毎日のように大学近くの喫茶店やマージャン店でたむろする生活が続いていたことが思い出されます。また、翌年の大学院入試の時には、学生運動家が2度にわたり試験会場に乱入して妨害したため、3度目は、結局、バスを借り切って名神高速の養老サービスエリア（岐阜）に一日中駐車して、車中でガパンを抱えて受験したことも鮮明に記憶しております。後日、合格の知らせをもらった時、森山先生から「樫木君、バスの中での受験で良かったね！」との発言がありました。私は、一瞬なんのことか？と思いましたが、森山先生としては、「バスの中のような試験場では、樫木君とは違う真面目でデリケートな学生の中には、パニック状態になって実力が発揮できなかった者もいただろう....」とでも仰りたかったのではと思いました。いつも静かな語り口で冷静かつ温厚なお人柄の森山先生からこのような発言があるとは思っていませんでしたので、先生も仲々のユーモアをお持ちの方なのだと思認識致しました。

その後、大学院に入ってから、森山先生や大石先生から懇切丁寧な暖かいご指導を頂いたお陰で、極めて充実した修士課程生活を過ごすことができました。

1972年に大学院を卒業して住友金属に入社してからは、先生とお会いする機会は少なくなりましたが、1975年には結婚式の仲人もして頂きましたし、また、同期の植田君が、数年間企業で勤務した後森山研究室に戻ってきてからは、時々研究室に顔を出し、その際には必ず森

山教授室にもお伺いして、ご挨拶と仕事や家庭の近況報告をさせて頂きましたが、いつもにこやかなお顔で聞いて頂き、その都度勇気付けられた次第です。

先生のご退官後は、もっぱら年賀状だけのやりとりとなり、直接お目にかかる機会はほとんどなくなっておりましたが、ご逝去される1年ほど前の2007年の夏には、蹴上のウエスティン都ホテル京都（旧都ホテル）のレストランで、同期の植田君と先生を囲んで3人で食事をさせて頂きました。その時の先生は、勿論お元気で、奥様の体調を気遣ったお話をされていたのがとても印象に残っております。また、先生の大好物である「とらやの羊羹」を手土産に持参したところ、先生からも同じ「とらやの羊羹」を頂く事態となってしまいました。その場は大笑いとなりましたが、いつまでも変わらない先生の暖かい心配りには改めて感銘した次第です。

このようにお元気にされていた先生が、まさかその後わずか1年余りで他界されるとは全く予期しておりませんでしたので、訃報を耳にした時にはすぐには信じる事ができませんでした。

これまで、充実した、幸せな社会人生活を過ごすことができていたのは、偏に森山先生の愛情溢れるご指導のお陰と改めて感謝する次第であります。本当にありがとうございました。ここに謹んで哀悼の意を表し、先生のご冥福を心よりお祈り申し上げます。

（住友金属テクノロジー（株） 昭和45年卒）

## 追 悼

中村 陽二 先生

京都大学名誉教授、中村陽二先生は平成20年12月15日、享年84歳にて逝去されました。ここに先生の生前のご功績を偲び、謹んで哀悼の意を表します。



## 中村陽二先生の御略歴

|       |                                  |                             |
|-------|----------------------------------|-----------------------------|
| 昭和21年 | 東北帝国大学理学部物理学科を卒業<br>同大学金属材料研究所助手 | 日新製鋼株式会社顧問、龍谷大学工学部教授        |
| 昭和23年 | 京都大学理学部副手                        | 平成14年 勲三等旭日章受章              |
| 昭和38年 | 京都大学工学部教授                        |                             |
| 昭和63年 | 退官、京都大学名誉教授 金属物理学講座担任            | 在任中、日本金属学会、日本応用磁気学会等の役員を歴任。 |

## 追悼の辞

志賀正幸

京都大学名誉教授 中村陽二先生は平成20年12月15日享年84歳で逝去されました。謹んで哀悼の意を表します。

中村先生は大正13年(1924)8月10日愛知県でお生まれになり、昭和21年9月東北帝国大学理学部を卒業されました。卒業後東北帝国大学助手に就任されましたが、その時の上司であった高木秀夫先生が京都大学理学部化学教室に特殊金属学担当教授として赴任されたとき副手として京都に来られました。戦後まもなくの頃で、何もない中、椅子や机を作ることから始めたと言っておられました。その後、講師、助教授を歴任され、昭和38年4月創設されたばかりの京都大学工学部金属加工学科金属物理学講座の担当教授として若干39歳で赴任されました。それ以前に、先生は金属加工学科創設に尽力された故高村仁一先生と研究を通じて親交があり、新しい学科に量子力学や統計力学に基づく新しい視点での材料の教育・研究が必要だというお考えに沿った人選だったと聞いています。先生の専門は金属・合金の磁性物理学であり、その主要なテーマの一つ金属強磁性体の磁気歪みの研究は理学部での恩師高木秀夫先生から受け継いだもので、師弟関係をさらに遡ると、茅誠司、本多光太郎、長岡半太郎と、日本の物理学の源泉に至る伝統ある研究課題といえます。新しい研究室ではこの伝統を引き継ぐと共に、メスバウアー効果、核磁気共鳴、中性子回折といった、まだ開発途上の近代的な実験手段を積極的に取り入れ、我が国でのこの分野でのパイオニアの一人として活躍されました。昭和63年3月定年退官されるまで25年間、さらに京都大学退官後、日新製鋼(株)顧問を務められ、平成元年4月より龍谷大学理工学部教授に就任、平成7年3月同大学を退職されるまでこの分野の教育・研究に携わられ三百数十件の研究論文を発表され、また数多くの優秀な人材を育ててこられました。

その業績の主なものを紹介させていただきますと、

1. インバー合金および金属間化合物の磁気体積効果：インバー合金の低熱膨張率の物理的起因を明らかにするため、Fe-Ni, Fe-Ni-Mn, Fe-Pt等の鉄合金について、その磁氣的、熱的、電氣的性質、メスバウアー効果、中性子回折などの微視的性質を組織的に研究され電子論に基づくメカニズムを明らかにされました。この研究には初期の頃は私志賀が、その後、研究室出身の故村岡芳俊君(信州大学へ転出)、和田裕文君(現九州大学理学部教授)などがお手伝いしました。
2. 希土類化合物の磁性と電氣的性質：この研究は中村陽二先生の最初の助教授として、化学教室時代の弟

子で、アメリカでこの分野の研究をしておられた植田 劭さん(精華大学へ転出)を呼ばれ始められた分野で、大変先進的な研究でその当時はわからないことだらけだったようでそれほど注目されなかったのですが、その後物性物理学の大きなテーマに発展していった種をまかれた研究とっていいと思います。この他、教務技官だった井上和子さんと遷移金属合金の電氣的性質についての研究にも取り組んでおられました。

3. メスバウアー効果と核磁気共鳴法による金属合金の研究：金属・合金の微視的構造を明らかにするため、メスバウアー効果と核磁気共鳴法を初期の段階において金属学研究に適用し、多くの成果を上げられました。メスバウアー効果の実験は私が担当し、核磁気共鳴は理学部物理教室出身で後に東大物性研に転出され所長も務められた安岡弘志さんが担当されました。
4. 気相急冷非平衡合金の研究：これは研究室出身で学位取得後トロント大学で研鑽を積まれた隅山兼治さん(東北大学に転出後名工大教授)と共に始められた研究で、スパッター法による気相急冷非平衡合金の物性の研究を組織的に行い、通常の方法では得られない、例えばFe-Ag固溶体等多くの興味ある物質を創成し、その出現の条件を系統的に調べられました。

このように、先生は金属学と物理学の境界領域の研究に力を注がれ、研究手法としては、試料の作製から始まり、X線による同定、磁気測定、電氣的性質、磁歪など磁性を中心とする物性測定に加え、微視的測定手段を駆使しメカニズムの解明を進めるといった方法を確立され、その過程で、新しいインバー型物質などの新物質の発見にも貢献されました。これらの研究を遂行するにはもちろんスタッフや学生の協力が必要なわけですが、先生はまず何よりも人間関係を重視し、あまり細かい指示をせず、研究者の自主性を尊重し、各自が力を発揮できるような環境を作り出すことに気を配られていたとお見受けしました。今から振り返ると私などもずいぶんわがままな弟子だったかもしれません。

先生は、教授就任後程なくして、ニューヨークにあるIBM T.J.ワトソン研究所へ1年間研究留学され最先端の研究機器を使った研究に接され、帰国後その体験を大いに生かされたようです。その間、私が助手として、技官の家原力太郎君と共に研究室のお留守番をしていたのですが、当時学位論文のための研究をしていた私のため当時まだ京大には導入されていなかった液体ヘリウムを使った測定をして下さり大変助かったものです。帰国後はその経験を生かされ京大の低温センターの立ち上げに

尽力され、研究室だけでなく大学全体の物性研究の進展におおいに寄与されました。またその間築かれた外国の研究者との交流を大切にされ、帰国後数多くの外国人研究者を招かれ留学生を含めるとほとんど切れ目なく研究室に外国人が滞在し、スタッフだけでなく学生も英語をしゃべる機会を得て国際的な雰囲気や味合わせて頂きました。また、その広い人脈を生かし『金属間化合物の磁性国際シンポジウム』、『金属および合金の非平衡相に関する国際シンポジウム』、『メスバウアー効果の工業への応用国際シンポジウム』など研究室のテーマに直結する分野の国際会議を主催されました。その他、しばしば京都で開かれる磁性や物性関係の国際会議には組織委員として参画され、特に地元ということで、なくてはならない存在だったようです。我々スタッフもそのお手伝いを通じて多くの外国の研究者と知り合うことが出来、その後の研究の発展にいろんな刺激を受けさせて頂きました。

教育も大切にされ、研究室の学生のゼミを熱心に指導されるのはもちろん、個人的な相談にも応じられていたようで、その成果かどうかは知らないのですが、数え切れないほどの仲人を引き受けられ、かく申す私とその第一号で、このときはさすがに少し緊張しておられたようにお見受けしました。正月にはお世話になったカップルが山科の自宅を訪れ、座る場所がないほどの賑わいでした。もっとも、こちらの方は大変気さくで朗らかな松子夫人の功績の方が大きかったのかもしれませんが。また、新緑の頃の北山ハイキングや夏の海水浴などの研究室の行事にも積極的に参加され結構タフなのに驚かされたものです。

京大退官後は、すぐに日新製鋼の顧問として東奔西走されていましたが、1年後に瀬田に新設された龍谷大学の理工学部教授に招聘され、3度目の研究室の立ち上げに尽力され、こちらの方でも多くの学生を育てられました。また滋賀県の学術顧問のような仕事もされていたようで県の教育行政にも寄与されていました。

その後、70歳になられる前後だったと記憶していますが、最愛の松子夫人に先立たれ、かなり気落ちされたようで時々山科の自宅を訪れても少し元気がなかったのが心残りになりました。

幸いと言っていいかどうかはわからないのですが、中村先生が退官された後の研究室は不肖私が後を引き継がせて頂き、私が退職した後も、先生の最後の弟子である中村裕之君が磁性の研究室を引き継ぎ、さらに先生の古巣の理学部化学教室でも研究室出身の吉村一良君が金相学研究室の教授として活躍しており、又、阪大理学部教授を勤めた河原崎修三君、東京理科大学教授として活躍中の元屋清一郎君など各地の大学で多くの卒業生が長岡・本多に遡る磁性研究の伝統を守っているのは先生の

偉大な影響力によるもので、少しは慰めになっているのではないかと推察しながら、先生のご冥福を祈らせて頂きます。

(京都市大名誉教授 理学部化学教室 昭和36年卒)

## 中村陽二先生を偲んで

隅山兼治

朝は教授室、昼食後は研究室で、コーヒーを飲みながら、中村先生とよくお話しをしました。特に、外国出張や他の大学へ集中講義に行っておられた後、あるいは微妙な議論をした翌日などは、その機会が多かったと記憶しています。昨年暮れにご他界されましたが、今もあの人懐っこく語りかけられる理知的なお姿が鮮明に蘇ります。しかし、10年余りに奥様がお亡くなりになってから、急激に気力、体力を失われ、数年前からお話ができなくなっていたことも悲しく想い出されます。

振り返りますと、中村先生に最初にお目にかかったのは、40年以上も昔であり、教室主任の激務と体調不良の中で、簡潔な金属物理学1の講義をされたときでした。また、磁区観察の学生実験を通して磁性材料に興味をもちました。卒業研究に当たり、自主性が尊重される研究室であるとの噂を耳にし、中村研への配属を希望しました。研究室に入って直ぐに、中村先生はじめ理学部出身のスタッフの方々が、工学部学生の指導に苦慮されつつ、学生を信頼して着実に進めるしかないと悟られていることが判りました。徐々に参考書の輪読や実験装置の立ち上げに参加し、悪戦苦闘しながら、アカデミックな研究環境に浸っていきました。研究室のメインテーマは、理学部化学教室の高木研の時から行っておられた鉄系インバー合金の研究であり、大学紛争の嵐が吹き荒れたときも停滞することなく発展しました。大局的に、磁気体積効果を遷移金属・合金磁性の電子論の問題として理解しようとされるなど、磁性物理の本質を見据えた実験的研究が進展し、後継の研究者とともに世界をリードされました。薫陶を受けた学生の一人として、誇りに思います。その背景には、志賀先生と一緒にメスバウアー効果、安岡先生を通して核磁気共鳴法など今で言うナノテクノロジーの手法を他に先駆けて導入されたこと、榎田先生を通して希土類金属化合物の磁性の研究を開始されたこと、井上先生を通して近藤効果に目を向けられたことがありました。時が経つにつれそれらが相俟って、遷移金属合金や希土類・遷移金属合金化合物の真骨頂である強相関電子物性というフロンティアへ発展しました。小生が研究室に入った頃は、良質の合金、化合物ができずに悩む学生がいましたが、漸次経験が蓄積されて行きました。その圧巻は、的を得た指導者と若い力と意欲が共鳴

して、新しい化合物や物性が発見され、世界の一流研究者が集う京都の磁気国際会議で、直ちに発表されたことでした。

このような磁性物理研究が盛んな中村研にスタッフとして採用して戴きながら、小生は、不遜にも金属合金薄膜の研究を希望しました。当初は実験データも無く、中村先生を説得できませんでしたが、科研費が採択されたのを機に、「大げさだが、シーザーになったつもりでルビコン河を渡り、ひたすら前進しなさい」と納得、激励して戴きました。志賀先生や家原さんのご支援、一緒に研究した学生諸君の渾身の努力のお陰で、次々に新合金が見出され、中村先生のご定年の時には、「遷移金属や希土類金属の合金の磁性という研究室の幹に、気相急冷合金という望外の枝が生えた」と喜んで戴きました。その間、研究成果を国内外の会議や研究会で発表するために、中村先生と一緒に旅行をし、色々な会話、経験をしました。印象深い幾つかを披露しますと、先ず「芸者さんは、普段から長唄、三味線などの技芸を磨き、お座敷がかかったときに備えている。それと同じように、研究者も、常に研究に励み、明快な発表に努めない生き残れない」と諭されました。夕暮れの町中で、自分の山勘を頼りにホテルやレストランを探していると、「事情が分かっている地元の人に何故尋ねないのか」と、独断や偏見を捨て英知を集めることの重要性を指摘されました。更に、中村先生や小生の若いときの状態と比較して学生を評価しようとすると、「学生と対峙するときは、自分の若いときのことを棚にあげるべきだ」と、君子豹変の必要性を説かれました。とりわけ、高価な実験装置が欲しいと訴えたときには、「研究は、お金でするものではなく、頭で行うものだ」と注意されました。後日、大型プロジェクトを企画、実施する機会に恵まれたときになって、ようやくその意味が理解できました。この心構えは、昨今の大学を取り巻く風潮とかけ離れていますが、大学が(中村先生がよく仰っていた)中庸を取り戻すために、研究者も肝に銘じるべきであろうと思います。

私事になり恐縮ですが、大学院博士課程在学中に父を亡くした小生は、中村先生の中に父親を感じていました。折りに触れて相談したり、反抗して叱られたり、結婚の仲人をして戴いたり、公私にわたりお世話になり、深く感謝しています。その小生も、学生やスタッフと研究・教育する機会を持ち、3年前に還暦を迎え、本年3月に名古屋工業大学を定年退職しました。まさに、子を持って知る親心を噛み締めています。また、中村先生が名古屋で高校、仙台で大学時代を過ごされ、東北大学金属材料研究所にご勤務の後、京都で研究・教育生活をされたのに対して(その後の瀬田の龍谷大学ご勤務を別に

して)、小生は京都で高校、大学時代を過ごし(カナダのトロントに1年余り留学後)、京都、仙台、名古屋で勤務しました。同じ都市で学び働きましたので、自ずと共通の知人に巡り会い、中村先生の逸話や意外な側面を伺うなど、縁の深さを感じたものでした。

中村先生から戴いたご指導、ご厚誼についての取り留めない回想を終えるに際して、京都を離れてからは頻繁に伺いお話できなかつたことをお詫びするとともに、心よりご冥福をお祈り申し上げます。

(昭和43年卒)

### 中村陽二先生の思い出

高橋 明

昭和51年学部4回生の時に研究室配属となって、先生にお世話になることになりました。配属した直後に感想を聞かれて、大学の中に自分の机があることがとても嬉しい旨の返答をすると、先生は、根無し草の状態から変わったのだから、しっかりがんばるようにと言われました。本当にご期待に沿えられたのか、いまだに自信がありません。

修士2回生の時に就職のことで相談すると、即座にシャープを訪問するように言われ、そのまま就職することになってしまい、現在に至っております。在学中に、雑談の中で、研究室の中では目立たなかつた学生が、大学の外で活躍する例を幾人かお話されましたが、今になって思うと、大学を出て社会に出て行く者に対する最高の激励であつたと思っています。

在学中、先生の机の上には“THINK”と書かれたプレートが置いてあつたのですが、大学を出てだいぶたってからIBMの社であることを知りました。先生が米国にある研究所を訪問されていたときの名残なのかもしれませんが、今となっては確認のしようがありません。“THINK”に関しては直接のご指導は無かつたのですが、机の上に銀色に輝くプレートは印象深く残っており、今でも「常に考える」ということは意識しています。ですから、これもひとつの大きなご指導だつたのかなと思っています。

先生は、社会に出ると研究室での勉強は役に立たないことをいつも言われていましたが、今になって考えると、専門に閉じこもるなどの意味だつたように思います。常に新しいことにチャレンジするよとのメッセージは、今頃ようやく私の中に届いております。ただし、私の場合、会社に入ると、希土類遷移金属薄膜を扱う部門に配属となり、研究室での知識・経験はほとんどそのまま必要になってしまいました。こればかりは、先生のお言葉とは違う結果になつたと思っております。

卒業してから、たまたま、先生の娘さんとお話をする機会があったのですが、娘さんが大学生の時、先生は娘さんをご覧になると、若いときのご令室を思い出して、しばしタイムスリップ状態になることがあったとか。

奥様に先立たれた時、「きみ、これは寿命だよ」と先生は何度か言われましたが、ご自身に言い聞かせておられるようでした。先生はもう一度、若いときの奥様に会えたのでしょうか、ご冥福をお祈りいたします。

(シャープ基盤技術研究所 昭和52年卒)

### 中村陽二先生を偲んで

志賀 千 晃

先生は、若干39歳の若さで金属加工学科の教授に赴任され金属物理講座を開設された。私と高橋稔彦君は、栄えある第一期生である。時は1963年4月、場所は、京大の一等地である時計台の右側に位置する、赤レンガの冶金学棟に増設された新校舎である。当然ながら人も設備も全くない無からの出発である。希望しての配属であったが、事前に先生の講義を受けたことも拝顔したことも一切なく、ただ高橋君に進められての大胆な進路決定であった。新進気鋭の若き先生からは、立派な研究室を作ろうとする気迫がひしひしと感じ取れ、意気に燃えておられた。4年生の配属初期、先生は私の落伍しての不登校を恐れてか、やたらと親しく声をかけて下さり、音羽の自宅にもお招きいただいた。『優秀な学生は放って於いても、独りで研究し卒業していくが、君は……』と口を濁らせ、『兎に角、二日に一度は顔を見せなさい』と声を掛けられた。これを幾度か聞くと、鈍な私でも複雑な気持ちと、ささやかな向学心が交錯した。そして、3年間、最優等性であった高橋とサボリで落伍寸前の私が先生の下で学び研究に従事することになる。

研究内容は、アンバー合金を対象にメスバウア効果を用いて、内部磁場を測定し、アンバーメカニズムを解明することであった。正直に言って、『磁性学』は冶金学科で学んだ結晶学や熱力学の学問では、到底ついて行け

ない領域であった。量子力学、電子論、固体物理、等を理学部化学教室の大学院生と一緒に輪講や雑誌会を重ね学んだが、よく分からず、磁性の底知れぬまでの奥深さを味わった。先生は細かい説明や解説は好まれなかったが、大きな視点からの説明は『なるほどと思わせる何かの力』をお持ちであった。詳細な説明はいつも天才の誉れ高き志賀正幸助手からであり、両者のコンビ振りは絶妙で心地よかった。

人を見抜く慧眼の持ち主であられた先生は、若手の優秀な研究者を呼び込み、可愛がられた。従って、中村研では、志賀(正幸)、植田、新庄、遠藤、安岡、等々、蒼蒼たる研究者達が交流や在籍をされ、たちまち、ちょっとした先端の物性研究拠点となった。これらの方々の研究活動を見て、また、熱処理炉、磁気天秤、電気抵抗測定、メスバウア装置、等の手作り装置の手伝いを通して、いろいろな実験基礎知識を学んだ。下の写真は1965年嵐山の旅館での懇親会における中村研全員の記念写真で、撮影者は、技官の家原さんである。先生は家原さんを生涯、気かけられ二人の絆は強かった。

先生は、約1年間ニューヨークのIBM研究所へ留学された。帰国後は一段と風格を増され自信に漲っておられた。それは、1ドル360円の時代に高給でIBMへ迎えられた誇りとそこでの体験に裏打ちされた余裕からであろう。帰国直後に購入された自動車(そのころは大変めずらしかった)とアメリカ体験談は、田舎者の私を魅了し、よく便乗しアメリカでの運転マナーや四方や話を聞かしてもらい大いに喜んだ。

『今日、自分があるのは家内の御蔭である』と先生は、日頃、感謝され、奥さんのことをしばしば話題にされた。確かに、明るく社交的な奥さんの人柄は、寡黙で実直な先生の人間性と相俟って中村研ファミリーの繁栄に貢献された。私は失礼を省みず、幾度か麻雀の御相手をさせて頂いたが、奥様の勝負強さは抜群で、天性の才を感じた。また、京都駅でのお見送りの場面も私には忘れ難い。



昭和40年嵐山の旅館の昼

志賀 中村先生 植田助手 高橋 志賀正幸助手

先生のおられるアメリカへのお子様連れの旅立ちであった。多くの先生方に万歳で祝福され、一人一人にご挨拶される奥様の姿は燦然と輝いていた。これは新幹線が数ヶ月後開通し、続いて東京オリンピックが開幕しようとする年のことである。

定年後の、ある時、日新製鋼の顧問と龍谷大学の教授に就任されていた頃か、先生と奥さんにお会いした。羨むほど二人で喜々として『今が一番幸せ』と口にし、第二の人生を謳歌されていた光景が鮮明に甦る。その後、何年も経たないうち、奥さんの突然の訃報と先生の落胆ぶりを耳にした。あまりの無常さに、しばらく暗澹たる気分になった。……しかし今頃、天国で再会され、声一段と高らかに『今が一番幸せ!』と、喜んで、おられることであろう。

中村先生の功績は、冶金学科のメタラジー性からメタルサイエンス性への発展に貢献されたことにあると考える。言い換えれば理学部化学教室で発達したサイエンスと冶金工学科で育ったメタラジーとの融合の先駆者であり、京大の金属分野の研究先進性に、幅と深さを広められたと高く評価している。

先生のご薫陶を受けた私と高橋は、別々の鉄鋼会社で研究の道に励んだ。そして卒業して35年後、奇しくも、つくばの金属材料研究所（今の物質材料研究機構NIMS）へ同時期に転職し、一つの国家プロジェクトを共同で5年間推進することになった。昨今、私も年のせい、運命や縁を強く感じるようになり、この高橋との再会が先生の導かれた時空を超えた運命的な一筋の縁ではなからうかと思ったりしている。

今日、私が微力ながら、研究を続けていられるのも、先生のお陰と感謝している。先生のご冥福を心から祈る次第である。

(大阪大学接合科学研究所)

### 中村陽二先生の思い出

和田 裕 文

私が中村研で学んだのは、ちょうど中村先生が京大を退官される前の最後の10年間であった。私は4回生で研究室に配属されたあと、修士・博士と進み、その後助手としても在籍したので、中村先生から教える機会が多かった。先生には学問、研究に限らず社会人・研究者としてのあり方までいろいろとご指導を賜った。中村先生はたいへん威厳のある先生であったが、わたしたち最後の世代の弟子にはやさしかった。叱責されたことはあまりないが、行儀や社会常識についてよく注意をされた。とくに気が利かないときには人前でもすぐ注意が飛んできた。自慢にはならないが、先生から注意を受け

た回数では私が最も多いかもしれない。

私たちが学生のころ、先生は講義と会議のほかはだいたい教授室に“局在”しておられたが、夕方になるとそれぞれの学生の居室に“遍歴”されるようになり、学生といろいろな話をされた。先生はどんな話でも議論をするのが好きで、自分の意見をいう学生を好まれていたと思う。また、たいへんジョークの上手な先生で、いつも笑いを誘うような話をされていた。

博士課程のときは吉村一良君（現 理学研究科教授）や故 湯岡教行君（元 東北大学助教授）とともに、毎週土曜日に研究経過を報告することが義務づけられていた。まったく何の成果も得られない週もあったが、叱責されたことはなかった。しかし先生を目の前にすると、来週までには何とか新しい結果を出さねばという雰囲気があった。博士の研究指導とはこのように、学生が自らやる気を起こすように仕向けるのが本来のあり方ではないかと思う。

研究者の心構えについてはいろいろと教えていただいた。例えば「研究はそれを論文にまとめて学術雑誌に発表しなくては終わったといえないよ」とか「よい論文を書く人は論文数も多いものだ」などは今でも心に残っている。また、「学生の悪いところを見つけて注意するのは簡単だが、よいところを見つけて褒めるのは難しいね。しかしそうするほうが学生は伸びるのだよ」ということばも忘れられない。

中村先生は、若手が指導教官と同じスタイルで研究するのを好まず、新しいスタイルを開拓することを奨励された。「上の先生と同じような研究者になったってつまらないじゃないか」というのが口癖であった。私の場合は博士課程のとき、相転移の有無を調べるため比熱を測定したいので、その装置を作りたいと申し上げたところ、すぐに理学部物理学科の鈴木孝夫氏を呼ばれて、装置の作製についての可能性を検討し、鈴木氏に弟子入りして装置を作製することを認めていただいた。先生のおかげで私は実験装置の作製法について習熟し、それが今日の糧になっている。

先生は国際会議を数多く組織されており、また研究会も積極的に開催されていた。これは先生の得意なことの一つだと思うが、これについてお伺いしたところ「京大は学生のレベルも申し分ないし、その他の面でもよその大学に比べてたいへん恵まれている。このような大きな大学に勤める者は、当然相応の仕事をしなければならない。だからリーダーシップを取ることは務めだと思っているよ」とおっしゃっていた。これは今に至るまで、私の大学教員の一つの尺度になっている。

中村先生は京大を定年退官された後、1年を経て龍谷大学の理工学部の教授になられた。このころになると、



“material”よりも“human”のほうにより興味をもたれ、「humanのほうが複雑で面白いよ」とおっしゃっていた。ただし先生のいう“human”とはmaneuverやnegotiationというような意味であって、学問的なことではない。これらの英単語も先生から教えてもらったが、実際にこのような仕事も回ってきた。中にはここには書けないような内容の仕事もあった（もちろんあやしい仕事ではないが）。山科の家に報告に行くとか作戦会議になって、よく奥様と一緒に3人で食事をさせていただいた。ところがこの類の話になると奥様も大好きでよく意見を述べられるため、ときおり食事中に先生と奥様の言い争いに発展する。これを仲裁するのもこちらの役目であった。理性と感性のぶつかり合いなので、間に入った者は大変だったが、お二人は楽しんでおられたのだろう。今となっては懐かしい思い出である。11年前に奥様がお亡くなりになったあと、先生は足をけがされて、思うように外出することができなくなった。お一人では寂しいだろうと、年に何回か先生宅にお伺いし、食事にお誘いした。恩返しというには程遠いが、先生は大変喜んでくれた。最後にホテルと一緒に食事に行ったとき、「一人暮らしは大変なので、老人介護ホームに入ることにしたよ」といわれた。その後も2回ほど老人介護ホー

ムに先生を訪ねたが、先生はすでにかかなり健康を害されており、昔のような会話をすることはできなかった。

先生は趣味が多く、また学生と遊ぶことが得意であった。奥様といっしょに麻雀をされるし、コンパの二次会ではカラオケで歌われる。還暦を過ぎてもボーリングをされていたし、若いときは社交ダンスに熱中されていたそうである。おひとりになられてからはピアノを習われていた。絵は昔から得意だったそうである。よく「人間は遊ばないとだめだね」と言われていたが、私はこの教えだけは忠実に守っている。こういうこともあって、中村先生は大変学生から慕われた先生であった。

私は社会人・研究者としてのほとんどすべてを中村先生に教えていただいた。中村先生に会っていなければ今の自分はなかっただろうと思う。私以外にも中村先生にお世話になった卒業生は何人もいると思うので、代表して先生に感謝のことばを送らせていただき結びとしたい。

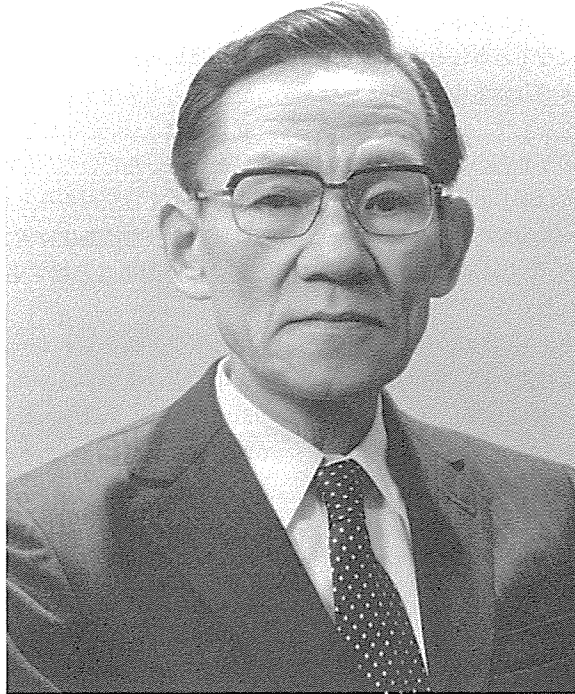
中村先生、私を弟子の一人に加えていただき、深く御礼を申し上げます。ここまで来ることができたのは先生のおかげです。私は中村研出身であることを誇りに思っています。本当にありがとうございました。

(九州大学教授 理学研究院)

## 追 悼

平松 良雄 先生

京都大学名誉教授，平松良雄先生は平成21年1月17日，享年93歳にて逝去されました。ここに先生の生前のご功績を偲び，謹んで哀悼の意を表します。



## 平松良雄先生の御略歴

|          |                   |         |            |
|----------|-------------------|---------|------------|
| 昭和13年3月  | 京都帝国大学工学部採鉱冶金学科卒業 | 昭和54年4月 | 停年により退官    |
| 昭和13年4月  | 同学科講師             |         | 京都大学名誉教授   |
| 昭和13年12月 | 同20年8月まで兵役        |         | 愛知工業大学客員教授 |
| 昭和21年9月  | 京都帝国大学工学部助教授      | 平成元年    | 勲二等瑞宝章受章   |
| 昭和24年12月 | 同教授鉱山学科鉱山学第2講座担任  |         |            |

在任中，日本学術会議第9期会員，日本鉱業会会長，岩の力学連合会理事，国際岩盤力学学会副総裁など歴任。

## 平松良雄先生を偲んで

齋藤 敏 明

平松先生にしばらくお目にかかっていなかったのですが、近いうちにお訪ねしようと思っていた矢先に先生の訃報を聞き、残念に思うとともに寂しさを一層感じました。先生には学生時代はもとより、卒業後、また先生がご退官になった後も公私共に大変お世話になり、多くの時間を一緒に過ごさせていただいた。

先生の学問的な業績はいまさら言うまでもないでしょうが、従来経験的な知識が多かった採鉱学に理論的な検討を加え、より合理的なものへと発展させられたと言えます。特に岩石力学や通気学の分野は、採鉱学の範囲を超えて展開されました。このとき、岡先生とのコンビも大きな力となったと思います。また、先生の理論的な検討は現場の観察や測定を重視するもので、現場感覚に裏打ちされた理論展開は産業界の方々にも大いに受け入れられました。さらに、先生は多くの優秀な卒業生を育てられました。大学や研究所の研究者も多く育ち、これらの人達で「平松・岡先生を囲む研究懇談会」を作り、長年にわたり先生のご指導を受けました。

◀IN TELEPHONE CARD 50



写真1 テレホンカード仕立てのスケッチ

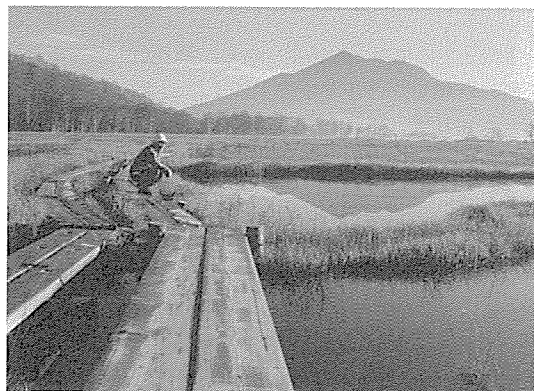


写真2 傑作写真の一枚（尾瀬にて）

先生はお酒が好きで、仕事に一区切りついた時などしばしば酒宴が始まりました。お酒が進むと、先生はお手製の分厚い歌詞手帖をおもむろに取り出し、歌い出されました。皆のリクエストに歌詞手帖のページを探し出し、大合唱になりました。楽しいお酒でした。なお、その後カラオケが登場しますが、先生はこれが苦手のように思いました。

ご趣味もいろいろとお持ちでした。その一つにスケッチがあります。もともと現場観察の必要性から始められたのですが、その腕は確かなものでありました。研究の合間や海外旅行の折などに、眼に映る風景をスケッチしておられた。写真1は、先生の何かの祝賀会で頂戴したテレホンカードに仕立てられた先生のスケッチの1枚です。ご停年の少し前あたりから写真もこれに加わりました。ドイツ製の小型ながらフルスペックのカメラがご自慢でした。これを駆使して旅行先の風景などを切り取って大きく引き伸ばして楽しんでおられました。確か古希のお祝いの会であったと思いますが、先生の写真展を開催し好評でありました。写真2は先生の傑作の一枚で先生自身が写っている尾瀬沼での写真です。

先生には学問ばかりでなく、多くのことを教えていただいた。また、いろいろと楽しませていただいた。誠にありがとうございました。安らかにお眠り下さい。

(京都大学名誉教授、昭和40年卒)

## 平松良雄先生の思いで

日 比 野 敏

平松先生の紹介で、鉱山学科修士を卒業して(財)電力中央研究所に勤務した。数年後学位取得のために論文を持参して見ていただいた。論文として文章がまずいところを最初に幾多指摘され、自分の文章が科学論文として体をなしていないことを知った。日本語は主語が無かったり述語が無くても意味が通じる。日常の日本語はそのような曖昧さを楽しんだり、場合によってはそれを奥ゆかしさと感じたりもする。しかし論文の文章ともなると、まず文意が明確・正確である必要があり、奥ゆかしさは敵なのである。目から鱗が取れる感じであった。それ以降論文の文章の書き方が変わった。学位授与式で総長から、皆さんは研究者として独り立ちできるスタートに立った、ということを言われたが、なるほど、文章も多少それらしく書けるようになりこれからだと思ったものだ。

大学院生のとき、平松先生のお供をして琵琶湖の北の方にある鉱山へ通気測定に行ったことがある。計器は大学の手製のもので切り替えコックが沢山ついていた。調査して旅館に帰り、夕食後部屋に戻って届けられた日本酒の徳利を片手にデータの整理である。その日僕は調査

の途中でコックの操作を1回間違えた。そのことを先生に話すと、その時の状況はどうだった？それならばこうなると、こまかい検討の結果一つの結論が出た。僕はてっきり明日再調査をしなければならぬと申し訳ない気持ちで一杯だったので、ホットしたと同時に、現場のデータはどんなデータでもそれなりの意味を持っており、つねに詳細な検討が重要であることを知り、それ以降データの読み方に細心の注意を払うようになった。

いろんな思い出があるが、最も古いのは学部二回生の時にコンパを皆で開き平松先生をお呼びした時のことである。我々学生が次々と先生のところへお酒をつぎに行ったが、先生は注がれるままに次々と受けて飲み干された。そんなにお酒の強い人をそれまで見たことがなくびっくりしたことを憶えている。日本人の肝臓はアルコールを消化する酵素が少ないので欧米人に比べると酒に酔いやすいと言われるが、先生の肝臓は酵素が多かったのだろうか。

日比野君、この靴一寸履いてみてと言われ、履いてみると丁度僕の足にピッタリ合った。丁度いいですねーと言うと、君にあげると言われ貰った覚えがある。貧乏学生の僕の靴がすり切れていたのを先生が見かねて、お古を頂いたのだと思うが、靴底が平らに減っているのには驚いた。自分の靴はいつも外側が極端に減ってしまう。先生は体が軟らかく、立った状態で前屈すると両手が地面に着けられるほどでびっくりしたが、この柔らかさと靴の減り方は関係があるのかもしれない。

学部では平松研究室配属を希望した。毎日の研究指導の合間に昼食時には囲碁の手ほどきも受けた。先生は愛妻弁当を食べながらの囲碁で、おかずの汁まで完全に飲み干される。ほくも副菜などの汁はよく飲み干すがこれは先生の直伝だと思っている。

先生の自宅へ研究室の学生が呼ばれて、奥様の手料理をご馳走になったのも忘れることができない。我ら学生にとっては減多に食べるのでできないおいしい家庭料理で、楽しい思い出の一つである。

つぎつぎと思えばきりがながい、これまで研究上でのご指導や個人的なことなど大変お世話様になり、本当に有り難うございました。

先生のご冥福を心からお祈り申し上げます。

(電力中央研究所名誉特別顧問、昭和37年卒)

### 平松先生の思い出

厨 川 道 雄

平松先生と申しますと、まず第1に、五線紙に音符を書くように、ノートに独特な方法で歌詞を書き、これを見ながら、歌を楽しそうに歌っている姿を思い出します。このことは、平松研出身者の多くの人が経験しています

が、この他私個人として忘れられない思い出があります。

私は、公務員になることを目指し、4回生の時国家公務員試験を受けました。その結果、資源技術試験所に採用されることになりました。資源技術試験所は、その後公害資源研究所、さらに資源環境技術総合研究所に改組され、2001年には他の研究所とともに、独立行政法人産業技術総合研究所となりました。当時の資源技術試験所には、北海道と九州に支所があり、主として鉱山保安の研究を行っていました。私は北海道出身ですので、できることなら北海道で就職したいと考えていました。

国家公務員試験を受けたとき平松先生は、特に行政官を目指せとか、研究職に就けとか、おっしゃいませんでした。資源技術試験所に決まったときに、私は「北海道支所に入りたいと思っています。」と先生に報告しました。その時初めて先生は、「君、研究所に入り、しっかりと研究をやりたければ、支所ではなく本所に入らなければだめだよ。」とおっしゃいました。私は支所と本所の違いなど分かりませんでした。とにかく先生のおっしゃることに従い、本所に入ることにしました。

ほぼ35年間にわたる研究生活を振り返り、先生のおっしゃる通りにしてよかったと思っています。サンシャイン計画に参画して、地熱のプロジェクトを推進する機会を得ました。おかげさまで、アメリカ・ロスアラモス国立研究所で実施された国際エネルギー機関のもとでの日本、アメリカ、ドイツ3カ国による国際共同プロジェクトにも参加するなど、多くの海外経験を積むことが出来ました。これが私にとって貴重な財産となっています。

研究生活を振り返るたびに先生の暖かいアドバイスを思い出します。ご冥福をお祈りいたします。

(産業総合技術研究所顧問、昭和41年卒)

### 平松良雄先生の思い出

棚 橋 由 彦

平松先生の生年(1916年)から、筆者が大学4年で平松研に所属したとき平松先生はまだ53歳の若さだったことを知り驚いています。現在の私の年齢63歳より10才も若かったとはにはわかには信じがたい気分です。それほど、学生時代の私にとって平松先生は雲上人に近い存在でした。多忙な平松先生が私の卒業論文を「てにをは」の訂正まで懇切丁寧に添削頂いて、大変恐縮したのを鮮明に覚えています。就職活動に失敗し、卒業研究以外の単位は取得済みでしたが、学生の身分でいた方がなにかと都合がいいので、卒業論文の提出を保留し留年を選択しました。平松先生と岡先生のおかげで長崎大学(工学

部土木工学科)に助手としての採用が面接なしで決まり、昭和45年11月30日付けで卒業させて頂き、12月1日に長崎大学に赴任し、以来、助手16年、助教授10年、教授13年目に入り今日に至っています。

平松先生と岡先生が学部卒で研究・教育職についた私をいたくご心配下さり、私が一日も早く職を全うできる力をつけられるよう、平松研出身で研究職に従事している諸先輩・後輩\*との年1~2回の研究懇談会を設けて下さるとのご配慮をいただきました。研究懇談会はもちろんのこと、その夜の懇親会の席で披露される両先生と錚々たる経歴の諸先輩の体験談が私には大きな財産となりました。平松先生行きつけの木屋町のカラオケスナックでカラオケを熱唱しあったり、お酒を注ぎあったり、親しくお話を頂いたのは卒業してからです。平松先生がいそいそとおなじみのカバンから先生お手製の歌詞のメモ帳を取りだされる様や、朗朗と「琵琶湖周航歌」を唱われる様や、美味しそうに煙草を吸われる様や、いとおしむ様に日本酒をたしなまれる様や穏やかな笑顔を想い出しています。先生のご配慮に深く感謝申し上げますとともに、心からご冥福をお祈り申し上げます。

(長崎大学教授、昭和45年卒)

\*日比野敏氏 (S37年卒)、木山英郎氏 (S38年卒)、斎藤敏明氏 (S40年卒)、水田義明氏 (S40年卒)、厨川道雄氏 (S41年卒)、菅原勝彦氏 (S43年卒)、亀岡美友氏 (S48年卒)、石田 毅氏 (S52年卒)

### 平松良雄先生を偲んで

亀 岡 美 友

私は、昭和44年入学、昭和48年学部卒業、昭和50年修士課程修了、昭和53年博士課程修了、昭和54年研究生という経緯で、昭和54年3月博士号を取得致しました。勿論、数多くの諸先輩方のご指導を頂き博士論文を完成させたわけですが、昭和54年3月に平松教授が退官なされ、同年9月に岡助教授が突然亡くなられました。

このことからもおわりの通り、平松教授の最後の博士論文審査を受けたものであり、また博士論文のご指導を岡助教授から直接受けた最後のものです。

岡先生から博士論文の指導を受けているときに、相当の手直しを受けていながら、さらに平松教授の査読はもっと厳しいとすることをさんざん教え込まれたことが思い出されます。当時の印象としましては、岡先生の手直しを受けて、平松教授の下へ恐る恐るの何うと、厳しいご指摘や書き直しというような事態には至らなかったという記憶しかありません。

また、私の前年には韓国からの留学生である李喜根元ソウル大学教授が博士号を取得されており、以前より私どもの博士論文については、平松教授、岡助教授が事前に相談をされて、大まかな仕分けを成されていたものと想像され、この方針の下での論文作成作業で有り、これらの基礎となる鉱山や土木工事現場での岩盤応力測定、室内試験、応力・変形解析であったものと考えております。

私が学位を取得して大学を後にしてから丁度30年を経過しようとした矢先に平松先生の訃報に接したわけであり、平松先生も京都大学退官後30年を迎えられる直前でありました。平松先生とは、退官後東京に住まいを移されてからも平松研懇談会を定期的に東京にて開催させて頂き、お酒を飲みながら昔話に参加をさせて頂きました。このときに、昔の年を取った教え子よりも酒は先生のほうがむしろ進んでいるという話題が出たこともありました。

平松先生のご恩に感謝しご冥福をお祈りして

合掌

(施工技術総合研究所技師長、昭和48年卒)

### 平松良雄先生を偲んで

石 田 毅

平松先生のご退職は、私が修士課程を卒業した昭和54年3月ですので、その意味では最後の教え子の世代になります。私は平松先生の研究室で昭和52年3月に学部を、昭和54年3月に修士課程を卒業し、その間3年間お世話になりました。研究室では「おじいさんと孫の関係だから・・・」とおっしゃって、厳しいお言葉をいただいた記憶がありません。しかし卒業後、国際雑誌への論文投稿の原稿を持参してご自宅に伺いご指導を賜ったことがありました。このときは、いつもの柔和な先生の表情からは予想しなかった非常に厳しいご意見をいただきました。先生の研究に対する厳しい姿勢をはじめて垣間見て、背筋が伸びる思いがしました。これから一層、真摯な態度で研究に取り組みなればと、心を新たにした鮮明な記憶があります。研究に自信を持ち驕りが生じはじめて周囲の方の意見を聞かなくなりかけていた時期に、恩師が厳しくいさめてくださったのだと、深く感謝しております。いまから思えば、これが1対1でご指導を受けた最初の機会、また残念ながら最後の機会になってしまいました。

また私の同期や年代の近い先輩や後輩と同様、私どもは結婚の際の媒酌人をご夫妻にお願いしました。その際は、こころよく引き受けてくださり、先生と奥様にごやっかいをおかけしました。子供が生まれて家内とご挨拶

に伺ったときも、お忙しい中ご夫妻に子供をあやしていただいたことを、ありがたくなつかしく思い出します。

その後は、山口大学の水田先生が平松先生を招かれたときに宇部でお目にかかり、また熊本大学の菅原先生が開催された国際会議に招待された際には阿蘇でご夫妻のお元気なお姿を拝見する機会を得、その際にも親しくお言葉をかけてくださったことを懐かしく思い出します。

現在担当させていただいている研究室は、その後の改組などを経っていますが、平松先生と伊藤先生のお2人の

大先生の流れを汲む研究室です。いまではわが国の大きな鉱山がほとんどすべて閉山し、土木業界も縮小しつつある時代の中で、研究室の学生の大半は石油採掘関連業界に就職しています。「日本の鉱山にはじめて科学を持ち込んだ」と諸先輩から聞く平松先生の大きなご業績を仰ぎ見ながら、職責を果たすべく努力していきたいと思っています。

平松先生のご冥福を心よりお祈り申し上げます。

(京都大学教授、昭和52年卒)

## 追 悼

朝木 善次郎 先生

京都大学名誉教授，朝木善次郎先生は平成21年4月25日，享年73歳にて逝去されました。ここに先生の生前のご功績を偲び，謹んで哀悼の意を表します。



## 朝木善次郎先生の御略歴

|         |                         |          |                         |
|---------|-------------------------|----------|-------------------------|
| 昭和35年3月 | 京都工芸繊維大学工学部窯業工芸学科卒業     | 昭和51年11月 | 京都大学工学部助教授              |
| 昭和35年4月 | 京都大学大学院工学研究科冶金学専攻修士課程入学 | 昭和63年1月  | 同教授冶金学科・冶金反応操作講座担任      |
| 昭和37年3月 | 同修士課程修了                 | 平成11年3月  | 京都大学を定年退職               |
| 昭和37年4月 | 京都大学工学部助手（冶金学科）         | 平成11年4月  | 京都大学名誉教授                |
| 昭和45年4月 | 京都大学工学部講師               |          | 三菱マテリアル（株）常勤顧問（平成15年まで） |
| 昭和47年9月 | カナダ・トロント大学留学（49年3月まで）   | 平成21年4月  | 従四位瑞宝小綬章受章              |

## 朝木善次郎先生追悼 「同じ研究室で34年間のおつきあい」

田 邊 晃 生

4月25日の夜、先生の訃報を知らされたとき私は仕事で僻地にいた。夜が明けてすぐに車でJRの駅まで送ってもらったが、当日は前夜からの風雨で列車のダイヤはずたずたになっており、列車も迂回路を通過して遅れに遅れ、やっと家に帰りついた時には夜も更けていた。なかなか来ない列車をプラットフォームで待っている間も、動かない列車の中でぼつねんと座っている間も、先生とお会いしてからの永いおつきあいの情景が、ひとコマひとコマ走馬燈のごとく蘇っては消えた。

水曜会誌での特集号の企画に当たって、先生のお仕事の内容に関わる点は他の方々が述べられると思う。それで私の方は、研究室内で先生のご様子などを、手元に残っていた写真を中心にご紹介することで、先生への感謝と残されたご家族の方々へのお悔やみの気持ちに代えさせていただきます。

<1960年代>

昭和37年、冶金学科に入学した時に決めていた下宿先で、先に入居していた法学部のN君（現在、弁護士）から「君の学科の先生になった人がここにいたんだ、女の人に来られていたが結婚されるらしい」と耳打ちされたが、それが朝木先生のことであって、後から考えると何か因縁めいたようなものを感じるのである。その後、私は大学に入った開放感からか、あまり勉強はせずに高校時代の仲間と遊んだり、あちこち旅行をして過ごしていたので先生のことは意識から遠のいた。3回生になり、先生とは学生実験で初めてお目にかかったのであるが、まだ多くのスタッフの一人という程度の意識であった。ところが4回生になり、当時の近藤研究室に第3期生として6名が配属された。そこで日常的に先生とお会いす

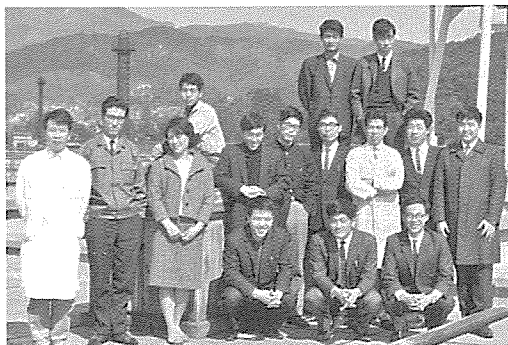


写真1 当時の近藤研メンバー：左から佐竹政蔵さん、朝木善次郎先生、渡辺昌子さん（現粟倉夫人）、1人おいて丸洋一先生、2列目左端、林豊秀さん、右から3人目（白衣）、西村山治先生

ることになり、改めてN君の言葉が蘇った次第である。写真1は、新築まもない旧6号館の屋上でのスナップである。近藤良夫先生以外の全スタッフ6名の方々（今から考えると随分ゆとりがあった）と1期生、2期生の院生にも入っていた。

私の卒業論文は西村山治先生のご指導だったので、朝木先生のご様子については、やや外から眺める感じになってしまうのはやむを得ないだろう。最初に一番驚いたのは、とにかくきれい好きで、毎日のように部屋の床をぞうきんで拭いておられたことである（ただし、技術指導をされていた同室の佐竹先生が主に拭いておられたようではあるが）。きれい好きはどうも近藤先生譲りで、近藤先生は「隗より始めよ」と、ご自分で箒をもって掃除をされていたくらいである。また朝木先生はお茶が好きで、コンロに小さなやかんを乗せてお湯を沸かしておられた。当時は、普及し始めたインスタントコーヒーにたっぷり砂糖を入れて飲みながら議論（雑談？）するのが、われわれ学生・院生のナウい風潮であったが、先生はそれには目もくれなかったようである。同級生の伊藤絃一氏が作詞した「近藤研の歌」には、次のような文句が残っている。

「朝木夢見氏飲みもせず

朝から晩まで湯を沸かす」

朝木先生は当時からスリムな体型で“白皙の美青年”といった雰囲気を持っておられたが、意外とスポーツも堪能で、われわれ研究室の学生とスケートやボーリングをしたり、卓球の試合を行ったりしておられた。しかし野球やバレーボールについては、どうも出番がなかったようである。写真2は、当時の近藤研究室でよく出かけていたハイキングでの情景である。やはり真ん中に陣取

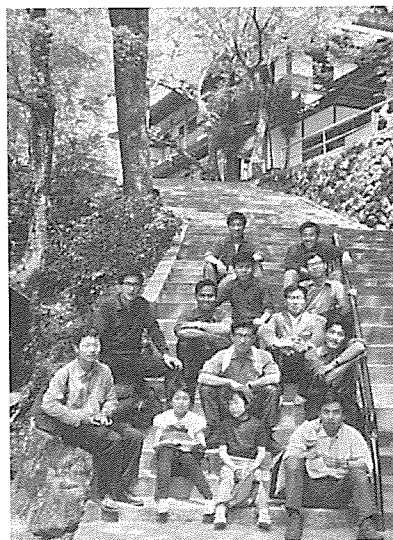


写真2 ハイキング途中で休憩



り、全体の要となっている。同じく写真3は、山形県名物の「芋煮会」を行った時のもので、新人類?の走りの学生が入ってきたためか、先生は端に寄っておられる。しかし先生も暑さ対策には手を焼いておられ、「水を入れたバケツに足をつっこんでおくと夏でも仕事ができるんだ」と言っておられた。しかし我々の中では、先生に習って仕事をした者はいなかったようである。

<1970年代>

大学紛争が一段落しても大学の中には後遺症が多く残り、その一つが「〇〇委員会」ばやりであった。カナダ留学の後、助教授に昇進されてからも、まじめな性格を反映して「助講会」の役員、教育関係、改革関係の委員会などいろいろ役を買って出られていた。写真4は、猛烈にお忙しく様々な内容のお仕事に精を出されていた頃



写真3 保津川で芋煮会

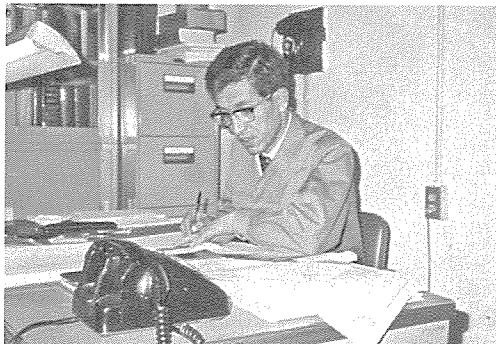


写真4 デスクワークに大忙しの朝木先生



写真5 近藤研の研究室会議

の先生のご様子である。先生は問題のポイントをつかむのに長けておられ、やるべき課題をまずリストアップし、早急に結論を出すべきものとゆっくり議論してもよいものを区分するなど、議論の進行にも参加者に安心感を与えるのである。データの統計的処理法や実験計画法などにも造詣の深いことが、その背景になっていると思われる。研究室でも「研究室会議」(写真5)なるものが毎週もたれ、近藤先生も、最後は朝木先生の断を尊重されておられた記憶がある。

そしていつ頃からか、それまではお茶しか飲めなかった先生が急にお酒に強くなられ、またカラオケにも積極的になられて、皆がびっくりするような上達ぶりであった(写真6)。当時から研究室には外国からの訪問者が多くあったが、その時の歓迎レセプションには四条大橋の袂にある東華菜館をよく利用したので、おいしい中華料理をいただくのが楽しみであった。朝木先生の英語は近藤先生の薫陶もあってか単純明快で、曖昧な表現のないのが特徴である。会話を盛り上げる面と経費の軽減を兼ねて(?)、「製錬系」の先生方にもご参加いただくことが多くあった。写真7はインドの先生夫妻を囲んだ会食の場面である。



写真6 研究室同窓会での朝木先生

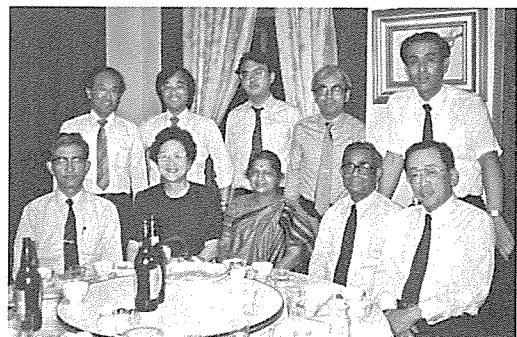


写真7 インド人研究者夫妻の歓迎会

### <1980年代>

その後、私も先生と一緒にいくつかのテーマで共同のお仕事をさせていただくことになったが、実験を進めていく上でのポイントのおさえ方、得られた結果を解析する上でのモデル化の仕方などの面で、はっと目を見張るような思いを何度か経験した。そのような先生の才能は学生とのディスカッションにも現れ、「そういうシチュエーションをのっけからこさえると、…インポッシブルであるから…」といった調子で、実験計画やモデル化の勘所を披露するのである(写真8)。ただし学生の理解が遅いと先生もやや短気になって、学生が自分で考える前に教え込んでしまうという場合もあったようである。

その間、中国からの研究者の長期滞在や韓国の留学生などが博士コースを進む例が増え、研究も大きく進展するようになった。ところで、先生の退官記念講演の表題は「迅速反応速度を追い求めて」となっており、その内容をなす研究の主要部分は、先生が1980年代に精力的になされた仕事である。私もその一部を分担してお手伝いしたが、講演題目の副題が「-研究の失敗談-」となっている。これは、硫化鉱物の酸化反応のメカニズム解明に関しては国際的な評価を受けたが、それを自溶炉の反応工学的解析にまでつなげるには不十分であった、と

いう先生の厳しい自己評価である。その点では、私もあまりお役に立てなかったと反省させられる思いが強く残っている。

### <1990年代>

研究室の運営に責任を持たれるようになると、研究室の研究進捗だけでなく、国際的な会議運営や研究生受け入れのための資金集めなどにもご苦労されるようになる。写真9はカナダからの研究生夫妻を囲んだ歓迎会での様子である。研究内容に対する先生の要求度が高いため、報告書作成でも当人や周りの者も苦労したようである。平成5年にハワイで行われた先端材料工学の国際シンポジウムでは、資源・素材学会の代表として国際会議の運営に貢献された。ある日の夕方「日本酒を飲もうや」と、当時アメリカで華々しく展開して話題になっていた「紅花」店に誘っていただいた。会議もスムーズに進行し、ほっとされていたのかもしれない。写真10は店のサービスで撮ってくれたスナップである。何か晴々とした雰囲気が顔ににじみ出ているご様子であった。また翌年のサンディエゴで行われた金属製錬プロセスの国際会議では、たぶん先生と気の合われたイギリス紳士風の先生ご夫妻と一緒に写真を撮ってくれと頼まれたが、それが写真11である。

その後、研究室に河合先生が来られてから初めて朝木



写真8 院生を直接指導する朝木先生



写真10 ハワイで日本酒を楽しまれる朝木先生

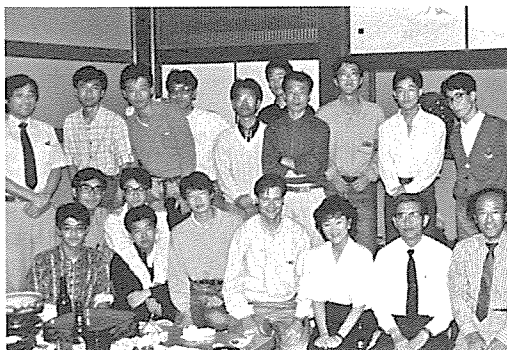


写真9 カナダからの研究生夫妻を歓迎する朝木研

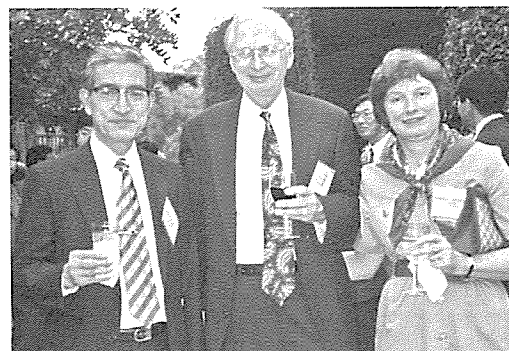


写真11 サンディエゴでの会議レセプションにて



写真 12 朝木先生ご自宅でのパーティ



写真 13 朝木先生宅ではしゃぐ学生・院生たち

先生のお家でパーティが開かれた(写真12)。朝木先生のご趣味を反映したお家の佇まいで、ご家族の思いが溢れた瀟洒な気品に満ちた雰囲気であった。しかし学生諸君には娘さんの存在が気になるようで、この後大いにはしゃいで盛り上がり、ご家族の方々にご迷惑をおかけすることになった(写真13)。

<2000年代>

先生は退職される少し前から足を悪くされておられたが、会社の常勤顧問として元気に大宮の方に行かれた。一度先生の研究室におじゃましたが、先生のご気性を表すように簡素で広々としたお部屋であった。お話を伺う中で、やはり銅熔錬の反応工学に関する先生の造詣の深さを知らされ、やはり私には荷の重い課題であることが改めて実感された。またその後、私の退職にあわせた研究室の同窓会には、足下がやや不自由であったにもかかわらず駆けつけてくださり、暖かい言葉をかけていただいた。

以上、私の大学入学からの縁で、朝木先生とは長い年月に渡っておつきあいさせていただいた内容を紹介した。しかし今となっては、もうお会いできない事実を受け入れざるを得ないと自分を納得させ、改めて先生のご冥福をお祈り申し上げる次第である。

(冶金学科, 昭和41年卒業)

## 朝木先生追悼文

### 「流動層装置との出会いと朝木先生」

福田 光 弘

昭和40年、大学の4年生になって近藤研究室に配属された。朝木先生に出会ったのは近藤研での研究テーマが流動層の不均一系に関する研究に決まった時である。当時の近藤研究室は、冶金学科「冶金反応及操作講座」として昭和36年に発足したばかりで、まだ日が浅く、実験装置や機器類を手作りで作製しているような状況だった。先生は6歳年上で兄貴分のような存在であり、流動層での実験につき手取り足取りご指導を頂いた。

研究室は不均一系反応とその反応操作の研究を目的としており、流動層関係以外では、卑金属の溶媒抽出や高炭素フェロクロムの真空脱炭などの研究が行われていたと記憶している。

流動層装置は粉粒体を充填した円筒容器であるが、下部からの少量の空気の吹き込みで粉全体が若干浮き上がり流動化を開始する。流動化状態になると、粉粒体は液体と同様な挙動を示し、プロセスの連続化も可能になる。この特長を生かして、石炭の燃焼やガス化装置、都市ゴミの廃棄物処理、酵素を用いるバイオリクター、食品乾燥など様々な分野で、現在、流動層は幅広く利用されている。

昭和40年頃は流動層の研究は揺籃期の状況だった。流動化を超えて流動層に吹き込まれた空気は流動層内を気泡として上昇し、層内の粒子を攪拌・混合させるが、気泡の上昇速度、大きさ、発生頻度などと操作条件、装置特性との関係、さらに気泡と粒子との相互の関連などにつき不明な点が多かった。流動化現象につき2相説モデルや Davidson モデルなどが文献で発表されていた時期である。

研究室で実験に使用した装置はアクリル樹脂製の円筒容器で、天井まで届くような高さだった。層内にガラス粒子を充填し、下部の整流板を通して空気が吹き込まれ、粒子濃度を真空管熱電対式のキャパシタンス・プローブで測定して実験を行った。プローブを層内に設定するため大型の脚立を何度も上り下りする必要がある、結構手間ひまのかかる実験だった。

プローブの信号電流はオシログラムに記録され写真撮影される。現在ならパソコンで信号電流を数値化し、粒子濃度の変化を定量的に整理することも可能だが、当時はそんな便利なものはない時代である。オシログラムの形状をメジャーで測定してデータ化した。一度の実験で百枚近いオシログラムの写真が得られ、メジャーで計測したオシログラムの枚数は数千枚を超えたと思う。

先生も20台後半と若く、白い実験着を真っ黒にして、実験やデータ整理に夜遅くまで対応して頂いた。測定デ

ータと流動化条件との関係付けがまた大変だったが、流動層内の局所的な粒子濃度を平均とそのバラツキとして統計的に整理し、先生のお陰で流動層の不均一性につきレポートにすることができた。

流動層につき朝木先生は、黄鉄鉱や石灰石などの熱分解につき実験研究も行われている。流動層での伝熱係数の測定や熱分解反応の反応速度式の解析などを行われ、これらの研究成果によって、昭和47年、米国 AIME の科学賞ゴールドメダルを受賞されている。

研究室を卒業し神戸製鋼所に入社して、神戸製鉄所の製鉄現場や(東京)技術企画部、中央研究所などの業務について、その間、朝木先生がカナダ・トロント大学に留学されたこと、亜鉛精鉱の酸化反応の研究など非鉄精錬分野で顕著な業績を上げられていること、などお聞きしていた。

先生に再会したのは、先生が教授に昇進され、神鋼中央研究所の製鉄・製鋼関係者に対し講演会を開催する機会がもてた時である。講演後、研究所長を交えた会食を行い、久しぶりに楽しい時間をもつことができ、先生の元気なお姿を拜見することができた。会食後、神戸・三宮のガード下の少し汚い中華料理店で一緒に食事をとったが、満面に笑みを浮かべ楽しく語る先生のお姿を今でも思い出すことができる。

流動層については、日本鉄鋼連盟がナショナルプロジェクトとして1988年から8年間、「石炭直接利用溶融還元製鉄技術(DIOS)」の開発を行ったが、その時に再び会うことができた。当プロジェクトでは粉鉱石の予備還元で流動層が採用されている。DIOS 検討の準備段階に参加したが、「流動層」の言葉を懐かしく思い、朝木先生との何かのご縁を感じたものである。

先生が定年された後も近藤研究室の同窓会などで何度か先生にお会いできた。体調を損なわれていたが、笑い顔を絶やさずお元気なご様子で、今回の急な訃報を本当に残念に思っている。

朝木先生のご冥福と家族の皆様方のご健勝を心からお祈り申し上げます。

(昭和41年卒)

### 冶金反応及び操作講座時代の朝木先生

福 中 康 博

昭和42年4月に我々、6名の学生が冶金反応及び操作講座に配属された。6号館337号室に召集され、卒論テーマが決定された。どのような経過でテーマが決定されたのかは記憶が定かではない。4回生で研究室配属になり、緊張していたせいか、体調が悪くその場に居合わせなかった気もする。おぼろげながら記憶をたどると以

下のような課題であった。

栗倉泰弘君：高温流動層の伝熱特性(朝木助手、長瀬 M 1)

大山 伸君：銅の陽極限界電流密度(丸助手)

辻 義行君：重回帰手法による液-液溶媒抽出平衡係数の決定(西村助教授、田辺 M 2)

藤岡順三君：充填層における石灰石の熱分解反応(朝木助手)

村上孝士君：流動層の粒子混合(朝木助手、福田 M 2)

福中 康博：連続流動層による石灰石の熱分解反応(朝木助手)

当時、西村助教授はピッツバーグのデュークン大学にご留学中であり、研究室には M 2 が 4 名(伊藤、田辺、中神、福田院生)、M 1 が 2 名(長瀬、吉田院生)、佐竹先生と秘書の渡辺さんが在籍しておられた。現在とは異なり、その時代の大学院生には迫力があり、知識も経験も 4 回生とは圧倒的にかけ離れていた。はたして我々、新入生として研究室生活を継続できるか否かが大きな不安材料であった。指導教官たる朝木、丸両先生には畏敬の念を抱かざるを得なかった。ましてや、その頃、3 回生では「統計的方法」の授業を受け、4 回生では「移動現象論」の授業を受けてはいたが、近藤教授はまさに雲の上の存在であり、緊張のあまり、会話を交わすことなど思いもよらなかった。

毎日、命ぜられるままにデイリーレポートを提出し、各先生方から赤ペン、青ペンで修正を受けることになった。ゼミでは全く理解できなかったが、諸先生や先輩の指導のもとに William H. McAdams の Heat Transmission を読まれた。コンピュータが発達し始める直前の時期にアメリカの大学院で使用されていたテキストであったのか、やたらと数値解法と作図法が記述されていたことが今でも頭の片隅に残っている。ちなみに原子核工学教室に隣接していた 1 号館北西角の京大計算センターで黒テープにパンチ開孔し、朝木先生のご指導のもとにフォートランプログラミングを行いだしたのは、この当時ではなかったかと記憶している。新しい仕事にチャレンジする遺伝子が冶金反応及び操作講座に植えつけられたのは昭和38年新設研究室発足以来の伝統で、近藤、西村、朝木、丸諸先生のご意思によるものであり、計算機に関する関心はきわめて高く、その取り組みは速かった筈である。

このような厳しい環境下でいかに生き延びるのが心配になった。我々、4 回生 6 名の取りまとめ役であった水泳部の藤岡君と相談して、京大東門前にあった彼の下宿に早速、全員が集まり、ビールを飲みながら全員が如何に生き延びるか、その対策を練った記憶がある。

朝木先生のもので 1 名が 332 号室で充填層研究に従事

し、3名が334号室に「鎮座ましましていた」大音響ブローワーのお世話になり、流動層研究に従事した。粟倉君はアトミック商会で購入したレンガを連日連夜、削り続け、高温流動層炉の温度分布の均一性改善に努力していた。村上君は流動層内の真鍮とアルミナ粒子の混合特性に及ぼす比重や粒子径の依存性を検討する一方、福田先輩、辻君、大山君や佐竹先生と1年間で1000番勝負といって連日連夜、囲碁将棋に明け暮れていた。小生は連続流動層操作に慣れるために最初はパイライトの熱分解反応実験の後始末のデータ取得に従事したと記憶している。実験装置の下部にあった排出管から落下する高温の硫化物粒子を床にはいつくばって試験管内にサンプリングされる朝木先生のお手伝いをしていたようにも記憶している。一歩間違えると $S_2$ が燃え、 $SO_2$ ガス雰囲気や晒された気もする。この研究はAIMEのEMD論文賞に輝いていたが、当時はその内容を理解できるはずもなく、ただ言われるままにサンプリングのお手伝いをしていた。夏休み中の企業実習や大学院入試の危ない体験を経て、研究室生活にも次第に慣れ始めてきた。

そのうちに宇部興産から麻袋につめられた石灰石が送付されてきたので、その粉碎分級作業に従事した。粉碎は6号館南側の資源工学木造2階建て建物の1Fに設置されていた向井教授研究室のジョークラッシャーを若松助教や中廣助手のご指導の下で使わせていただいた。ジョークラッシャーが室外に向けて設置されており、換気に大きな問題がなかったためか、粉碎作業には大きな騒音と粉塵以外に余り困った印象はなかった。それに対して分級操作には苦勞した。夏の厳しい条件の中で、防塵マスク、タオルと白衣の異様なスタイルで完全防衛し、6号館3F南東隅の数理工学、大矢教授室前の廊下で石灰石粒子を60-100メッシュに100kg分級する仕事に藤岡君とともに連日従事することを命じられた。体中、まっ白になり、息苦しく倒れそうになったかもしれないが、劣等生達がそんな弱音を吐ける雰囲気にはなかった。同級生でも材料科学分野の最新理論を得意気に振りかざしたり、研究室の大学院生は、全員、難しそうな理論を駆使しているように見えた。それに引き換え、自分達は「最高学府」(西村先生の慣用語)にきて、何故、このような肉体労働ばかりさせられるのかと情けなくなったことを今でも記憶している。おそらく劣等生用の研究だと思いこまれた。4回生の「移動現象論」の授業でようやくRosin-Rammler式やGaudin-Schuhmann式というものがあることは知ったが、何を意味しているのかはさっぱりわからなかった。どうも3回生の授業の「統計的品質管理」で習った母集団分布を代表する平均値

や分散と少し関係しているようであることはおぼろげながら理解した。

廊下を歩かれる大矢先生はもちろん、研究室の全員からは、今でいう粉塵汚染で環境を破壊し、胡散臭い目で見られている気がした。ようやく粉碎分級が終わり、連続流動層による石灰石の熱分解実験を始めることになった。もちろん朝木先生のご指導のもとに、整粒した石灰石粒子を334号室の中庭に面した窓際に設置されていた装置の天井に近い位置にあったホッパーに粒子を供給し、シンクロモーターで流動層反応装置に供給することになった。床から4m以上の高さにあるホッパーは900℃に加熱された電気炉の直上に位置しており、天井部分は粉塵と高温空気が淀んでいた。床ではブローワーが大音響を立てて駆動しているため、天井部分で粒子供給装置の粉体操作に従事していると、下にいる粟倉君や村上君と何かを連絡する際には大声で話さなければならなかった。

定常的に粒子が所定の速度で供給されているか否かを検討するため、適宜、サンプリングして、管理図を作成することになった。また、流動層の温度分布を確認するため、熱電対で温度分布の均一性を確認することになった。特に高温実験で炉体が熱により歪んでいたもので、内部の様子が外部から一部見えるような炉をニクロム線で900℃まで加熱していたので、しばしば断線した。そのたびに直径100mm程度の炉心管にニクロム線を巻きつける作業を繰り返した。3F廊下の西端の水野研実験室から東端の大矢教授室前へと引っ張ったニクロム線をアルミナ管の外側に巻きつけていった。おそらく半年間で5ないし6回、或いは更に多くの回数を巻き直さざるを得なかった記憶がある。あまりにおかしいと思い、いくらなんでも劣等生の炉設計が間違いばかりではなかろうと思い悩んでいた時に、佐竹先生にカンタル線やイットリウム線がもっと耐熱性を有することを教えていただき、ようやく炉が長持ちするようになった。

これらの場面でしばしば、統計的手法を用いてデータのバラツキや偏りを確認することになった。場合によっては、実験計画法まで利用しようとした。ようやく3回生で勉強したことが実際に使えることになった。もちろん検定、推定、帰無仮説などの意味を理解していたわけではないが、何とはなく門前の小僧よろしく、計算して御報告した。化学分析の精度を確保するために何回、実験をしておくべきか、検出力をどう確保すべきか、要因と水準をどのように決定すべきか、分散分析の適用方法など、理解できないままに、それなりに種々の解析を試みた。

朝木先生はその度に丁寧に統計的解析方法を指導し

ていただいた上で「福中君、君ね、総計的方法に使われたらいいけません。データをグラフ化しなさい。常識で考えれば一目了然ですから。」と言って笑っておられた。当時、高度経済成長期にあり、鉄鋼をはじめとする製錬プロセス革新の動向が世界的に流行し始めた時代であった。後に知ることになるが北米でのNORANDA連続製鋼炉開発を行うための方法論として反応工学の体系化がインペリアルカレッジのRichardson門下で開始され、わが国でも高速製鋼プロセス開発のための完全混合時間概念が提案されてきた時代であった。いわば反応工学の黄金期が始まろうとしていた時代であった。未反応殻モデルを組み込んだ伝熱律速モデルを提唱し、混合現象に粒子滞留時間の確率密度分布関数を導入して連続流動層内のFeS<sub>2</sub>熱分解反応速度を解析された手法は反応工学分野で現在でも斬新に見えるご業績であり、AIME論文賞に輝かれたのも当然であった。共立出版から「実験計画法」の出版を間近に控えておられ、統計解析と反応工学の両立を目指されていた時期、朝木先生の最も自信に溢れたご指導であった。

冬場になり、実験も佳境に入ってきた。ある晩、朝木先生が334号室実験室に入ってきて、332号室で高温加熱中の充填層の実験状況について尋ねられた。担当していた4回生がその場に居合わせなかったので心配して尋ねられたのであろう。流動層担当組は適当な言い訳をしたり、黙っていたりした。そのうちに先生はそれなりに我々の状況を把握されたのであろう。かなりの剣幕で我々、残留組に対し「人をかばうのは良くないことです。実験中は責任を持つべきです。これは友情ではありません。」と叱られた。我々はただただ黙っているより仕方がなかった。あれほどの剣幕の先生のお顔を拝見したことはそれ以降もなかった。実は担当者は高温加熱炉実験を中座してデート中であつた。今も昔も学生がすることには変わりはない。「朝木先生、嘘をついていて、申し訳ありません。しかしながら知っていてもそれを言いつけることはできませんでした。済みませんでした。」

このように、教育者として朝木先生は出来の悪い新入生に対しても基礎から極めて丁寧に、本質を見抜く力を付けることが重要だと誠心誠意、身を持って教えていただいた。同時に与えられた仕事に対する責任感が重要であることも教えていただいた。

40年前の大学紛争が勃発する1年前の平和な時代のお話であった。学生も教官も時間的に余裕があり、きめ細かい教育が行き届いていた。グローバル化が進行し、国立大学が法人化された現在において過去を振り返ることは出来ないけれども、大学教育は如何にある

べきかは永遠の議論として残されている。

教員と学生間の信頼関係に基づく教育研究指導が保障されるためには、適当な緊張関係と時間的余裕のバランスを常に見続ける必要がある。朝木先生はそれを常に意識しながら駆け抜けて行かれたように思われる。

(昭和43年卒業)

### 朝木善次郎先生を偲んで

#### —「熱及び物質移動」の講義について—

河 合 潤

朝木先生はあだ名を「文部省」と呼ばれたそうです。私が朝木研に着任後、「熱及び物質移動」の講義と一緒に担当したとき、試験の成績を素点でつけたあと、「事務所に報告する点数は $10\sqrt{x}$ にしてください」と言われたことがあります。素点で36点取れば、この式に入れると60点になって合格します。「文部省」というあだ名は、「厳しい」、「融通が利かない」と言うような意味だと思いますが、こっそり温情の採点をしていたことがわかってもらえると思います。

あるとき卒論の学生が、「朝木先生の講義を去年登録だけはしたけれど、試験を受けてもいないのに優をもらったのでどうしたらよいか」と真剣な顔で私に相談してきました。事務提出用の成績報告用紙は、コンピュータ入力するとき個人情報漏れないように氏名の部分と得点の部分の切り離せるように少し離れた位置に記入しなければならなくなってしまいました。相当注意していても1名分くらいずれてしまいます。私は紙を折りこんで氏名と得点記入部分を近づけて書き込むことにしていましたが、転記がすむと、事務提出用の用紙はよれよれになってしまいました。私が朝木先生と共同で講義を担当してからは、上のようなことがあったので、注意して成績報告用紙をチェックしていたところ、朝木先生の集計は1人ずれると後はずっと1人ずつ成績がずれていて、しばらくするとまた正しくもどっているというようなことがありました。ということは、優だった学生で不可をもらった人もいたはずで、特に苦情は無かったようです。今なら新聞に出そうなことですが、当時はのんびりしていました。

「熱及び物質移動」の講義資料として配布されていた朝木先生のノートのコピーのp.1とp.57を示します。1ページ目はこの講義の必要性を論じた部分です。57ページはおそらく朝木先生がもっとも得意とする球の伝熱の部分で、講義用の書き込みがあります。このコピーは朝木先生が講義に使用していたものからコピーしたものです。この講義資料は2Bくらいのやわらかい芯の

### 1. 序説

#### 1.1 はじめに

金属・合金などの製錬プロセスにおいては、酸化物の還元、硫化物の酸化、溶融媒体へのガスの吹込みなど、いわゆる不均一反応によって操作される場合が多い。不均一反応は気体/固体、気体/液体、固体/液体あるいは液体I/液体IIなどの異相間の界面で進行するので、反応は継続的に進行させるためには、反応物質と界面に連続的に供給する必要がある。従って、不均一反応の進行には反応物質の移動過程が重要な役割をもちこに与える。

また、反応装置全体について考えると、例えば半導体・反応炉などの反応容器内における流体の流動、粉体とともに吹込まれる高速ガスジェットの流動状態などはプロセスの初歩的な操作の重要な因子である。さらに、このようなプロセスは高温で操作されることが多く、適切な温度制御が要求される。このためには、熱の移動速度に関する知識が不可欠である。

以上に述べたことは、鉄・銅・鉛のような common metal の製造ばかりでなく、rare metal や高純度金属の製造、さらに酸化物・硫化物系などの化合物の製造プロセスにおいても事情は同じで、従来よりも一層精密なプロセス制御が要求される。このように考えると、流体の流動や熱・物質の移動現象は、化学反応に関する知識とともに、プロセス全体の諸現象を理解する上で基本的な事項である。本稿では、流体の流動と熱および物質移動の基礎的な事項について述べる。

#### 1.2 流体の特性

本稿では流体における流動や熱および物質移動について述べることが多いので、ここでは流体の特性についてまず考えておくこととする。

図 1

シャープペンで丁寧に書き込んだ自筆のもので、それを林豊秀技官がコピーを取ってリソグラフで大量印刷して配布していました。「移動現象論」というタイトル、目次、演習問題がついて140ページのものでした。私が講義を担当したころには、総ページ数で70ページくらいのやさしい講義資料になっていましたが、私に「コピーして勉強するように」と言われて取った講義ノートのコピーが手元に残っていてスキャンしたものがこれらの図です。図3も同じ講義ノートの余白のメモですが、朝木先生の研究と教育がよく一致していたことを示すものです。

朝木先生は講義でよくカンドコ（勘所）をつかむのが大切だと言われていました。学生は与えられた微分方程式を解くのは得意ですが、自分で微分方程式を導くのは苦手なものです。しかし一旦カンドコをつかんでしまえば、新しい現象の微分方程式も導けるとい意味です。多くの学生がカンドコをつかんで卒業したことと思います。

もし朝木先生の講義で試験は良く出来たはずなのに悪い成績だった人は、上のような転記ミスがあったのだから

$$(3.15) \quad Q = 2\pi r L k \frac{T_1 - T_2}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = S_{lm} k \frac{T_1 - T_2}{r_2 - r_1} \quad (3.17)$$

$$S_{lm} = \frac{S_2 - S_1}{\ln\left(\frac{S_2}{S_1}\right)} = \frac{2\pi r L (r_2 - r_1)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (3.16)$$

で表わされるので、これを引用して式(3.15)はマゼンタのように書きかえられる。

$$Q = (S_{lm}) k \frac{T_1 - T_2}{r_2 - r_1} \quad (3.17)$$

この式は、見かけ上平媒における一方向定常伝熱を表わす式(3.8)と同じ形をしており、異なるのは面積に対数平均を用いている点である。

#### (c) 球での伝熱

2章では球座標を扱ったラプラス方程式は省略したが、ここでは、(径) (外径  $r_2$ ) の固体中空球に於いて伝熱方程式を求めよう。この問題は固体粒子の反応における伝熱を扱うときによく用いられる。

図3.3に半径  $r$  の位置の厚さ  $\Delta r$  の球殻について熱収支を考えると以下のようになる。

$$4\pi r^2 \Delta r \rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} = -4\pi r^2 k \frac{\partial T}{\partial r} + 4\pi (r + \Delta r)^2 k \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial T}{\partial t} \Delta r \quad (3.18)$$

ここで、温度差による体積変化は無視しているため、 $c_v$ を用いたが

$$\left[ \frac{m^3}{m^3} \frac{J}{K} \frac{K}{m} \right] = \left[ \frac{J}{s} \right]$$

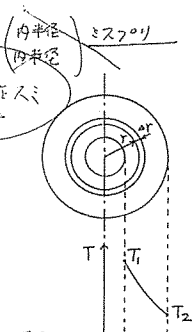


図3.3 球座標における定常伝熱

図 2

- ① 製錬プロセス — 不均一反応
- ② 不均一反応
  - 界面で反応進行
  - 界面での物質移動 (伝熱) ← 流体の影響
- 流動 — 反応器内の混合特性 (温度分布、流動、上向き移動)
- CVD

図 3

うと納得していただければと思います。これは今だから明かせることです。朝木先生の講義ではカンドコを習得できたのですから、成績などはどうでもよいことではないかと思ひます。

なお朝木先生の訃報は、2009年4月27日の朝日、毎日、読売、京都新聞などに掲載されましたが、京都大学とし

て正式のものは「京大広報」2009年7月（No.647）をご覧ください。（<http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/issne/kouhou/documents/647.pdf>）ここに謹んで哀悼の意を表します。

（工学研究科教授）

### 朝木先生を偲ぶ

小 山 和 也

私は博士課程で朝木先生にご指導を賜りました。早いもので20年余りの年月が経ってしまいました。博士課程で研究室を移った私にとって、当初は期待と不安が入り混じる状態でしたが、先生からは常に温かい励ましの言葉をかけていただき、そのおかげで早く研究室になじむことができたように思います。それまでの湿式製錬に関する課題から乾式の、しかも移動現象という分野での課題に取り組むことになったため、お忙しいなか時間をおとりいただき、基礎的なことからご指導を賜りました。

先生は実験を本当に愛されておられたとの印象が強く残っております。例えば、先生への進捗状況の報告において、データの解析、考察についての議論はもとより装置の組み方や試料採取の方法、手順など実験方法に関することまで非常に熱く語られておりました。また、私が

研究室にいた頃には実験室で拝見する機会は少なかったのですが、実験をされるときには楽しそうな表情で作業をしておられ、実験をしている時が好きだとおっしゃっていたように記憶しております。退官の際の最終講義は「迅速酸化反応速度を追い求めて－研究の失敗談－」という演題でした。流動層の実験装置を横に置いて、実験の際の経験談を交えて講義をされました。私は最近は自分で実験の作業をする時間が少しずつ少なくなってきており、やや寂しい思いを抱いております。先生の胸のうちは計り知れませんが、そのような思いがあったのかもしれない。

先生の学生への指導は教授室での進捗状況の報告が主なものでした。時間は一応決められてはいるのですが、しばしば超えることがありました。先生は学生の意見には寛容で、よく耳をかたむけてくださり、良い鍛錬の場であったと思います。

ご逝去の報は大きな悲しみでした。先生のご冥福をお祈り申し上げますとともに、先生からご指導を賜ったことに対し感謝の気持ちを持って過ごしていきたいと思えます。

合掌

（独立行政法人 産業技術総合研究所，昭和63年卒）



京都大学大学院工学研究科教授 粟倉泰弘先生は定年退職されました。



粟倉泰弘先生ご略歴

粟倉泰弘先生は、昭和43年3月京都大学工学部冶金学科をご卒業後、昭和45年3月同大学大学院工学研究科修士課程冶金学専攻を修了、同年4月新日本製鐵株式会社に入社、昭和46年4月同社を退社され、昭和47年4月に京都大学大学院工学研究科博士後期課程冶金学専攻に入学、昭和50年3月同課程を単位取得退学されました。その後、昭和51年8月から京都大学工学部助手として勤務され、昭和60年11月京都大学工学部講師に、平成元年2月京都大学工学部助教授に、さらに平成5年8月京都大学工学部教授にご昇任、冶金学科電気冶金学講座を担任されました。また、昭和53年5月には京都大学工学博士の学位を授与されています。平成8年4月には京都大学大学院工学研究科教授に配置替え、材料工学専攻材料プロセス工学講座表面処理工学分野を担当されました。平成21年3月をもって京都大学をご定年退職、同年4月より京都大学名誉教授になられています。

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り多くの人材を養成し、京都大学工学部学生部員ならびに大学院教育制度委員などを務められました。学外においては資源・素材学会会長、さらには同学会副会長、理事、編集委員長、関西支部長、また表面技術協会理事、編集委員長、関西支部長を、さらには平成13年4月より平成16年3月まで日本学術振興会産学協力第

69委員会委員長を務められ、学術行政に尽力されました。海外においても、わが国の代表として多くの国際会議の組織委員を務められ、特に平成17年10月の第7回鉛-亜鉛国際シンポジウムにおいては実行委員長をお務めになりました。

先生はこれまで40年間にわたり金属材料の湿式製錬、材料プロセス、表面処理の分野に関して多くの業績を挙げておられ、その主なものは次のようです。

#### (1) 工業電解に関する研究

金属電解における自然対流を伴う垂直平板陰極近傍の濃度分布および陰極電流分布の理論解析を行なうとともに、自然対流の速度分布および陰極拡散相の濃度分布を精密に測定し理論解析の結果を実験的に検証されました。この研究の中でホログラフィック光干渉法による拡散層内の濃度分布の測定法を確立したことは、先駆的な研究として高い評価を受けています。さらに復極式電解槽を用いたウランの電解還元に関する研究では電解液中陰極表面で発生する水素ガスが還元速度を加速することを明らかにされ、この工程の連続化のために必要な液中のウラニルイオン濃度を検出する微小電極系からなるモニターシステムを考案されました。これらの研究は我が国のウランの湿式一環製錬技術の確立に大きな寄与をなすものとして大変重要なものです。一方、金属の電

解プロセスの解析・設計に必要な基礎データである酸性金属塩水溶液の電気伝導度および金属塩の拡散係数なども測定され、貴重な基礎データの蓄積も行われています。

(2) 金属酸化物および硫化物の浸出反応に関する研究  
統一した説明が与えられていなかった金属酸化物および硫化物の酸浸出反応速度が水素イオン活量に比例することを見だし、これらの浸出速度がアルカリあるいはアルカリ土類塩化物の添加により大きく影響される塩類効果と呼ばれる現象は水素イオン活量の増減に基づくものであることを実験的に示されました。一方、黄銅鉱の酸化浸出反応の速度論的研究においては、鉱物表面の元素状硫黄の析出形態および鉱物表面における酸化剤の反応性の検討から、この浸出反応は黄銅鉱の酸化溶解電流と黄銅鉱表面での酸化剤の還元電流がバランスしながら進行する電気化学反応機構に基づくことを提唱されています。

(3) 混合電解質水溶液の活量に関する研究  
従来測定が不足していた濃度の高い塩酸-塩化物系、硫酸-硫酸塩系混合電解質水溶液の水の活量を測定し、得られたデータから溶質の平均活量を決定されました。これらのデータは、種々の湿式製錬反応の解析に役立つデータとして国内外において広く活用されています。

(4) 溶液中のイオンの酸化および溶媒抽出反応に関する研究

湿式製錬の浄液工程に関連し、酸性水溶液中のFe(II)イオンおよびアルカリ水溶液中のAs(III)イオンの溶存酸素による酸化反応速度が酸素分圧に一次依存性を示すほか、それぞれの酸およびアルカリの活量に一次依存性を示すこと、また、微量の銅イオンの添加がこれらの酸化反応を加速させる触媒効果を持つことを見だされました。さらにエマルジョン型液膜法および静電型擬液膜法によるウラン等各種金属イオンの濃縮・回収に関する研究を通じて、エマルジョンの安定性、解乳化および液滴の静電分散等に関する基礎的知見を得られ、エマルジョン擬液膜法を応用した金属微粒子の製造研究も行なわれています。

(5) 材料の湿式表面処理に関する研究

太陽電池材料として期待されるCdTe化合物半導体薄膜をアンモニア性塩基性水溶液から、Cd-Te-NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O系の電位-pH図に基づき、電析することに成功されました。また、Ni-Mo合金電析浴の光学スペクトル解析によるめっき浴の設計、非対称パルス電解による低炭素鋼の表面改質、イオン液体を用いた新しい金属電析、中でも接触めっきによるスペキュラム合金の電析に関する基礎研究なども精力的に行われました。

これらの成果は学術論文として和文論文70篇、欧文論文162篇に発表され、日本鉱業会奨励賞、村上記念奨励賞、表面技術協会賞、表面技術協会論文賞3回、日本金属学会功績賞を受賞されています。このように、先

生は、40年にわたる湿式製錬、表面処理などの専門分野において、これらの学問の進歩に大きく貢献されました。また材料工学の材料プロセス領域の展開において、特に湿式製錬と湿式表面処理の物理化学と技術に指導的役割を果たし、多くの優秀な人材を育成されました。先生のご指導、ご貢献に感謝致しますと共に、今後の先生の益々のご健勝、ご活躍をお祈り申し上げます。

(宇田哲也)

## 粟倉先生のご退職に寄せて

稲嶺 正一

<粟倉先生との出会い・当時の研究室について>

私が粟倉研究室に入ったのは、平成4年(1992年)であり、ちょうどバルセロナオリンピックが開催された年であった。粟倉先生は、当時から既に髪はロマングレーで、学部での講義から、声の質も、話をされる内容も非常にクリアという印象を受けており、理解の悪い私でも何とかついていけそう、ということで、粟倉研究室を志望し、無事入室となった。とはいえ、実際の所は、当時サークル活動や学費稼ぎのアルバイトをしていた私には、上回生による事前紹介での触れこみである、(失礼ながら)楽な研究室、というフレーズが魅力的に映ったことも事実である。(補足：当時の金属系学科では唯一湿式の部門で、炉の調整などの実験予備時間が少なく、実験スパンも、比較的短い。そのため、“楽”というのは自らの裁量範囲が大きいためであり、最終成果に落とし込んでいくプレッシャーは当研究室でも実は同じだった。)

この時期は真嶋先生が退職された後ということで、当時の金属系学科の中でも最も小さい研究室であり、先生方を合わせても合計10名という、単独では研究室対抗の学生ソフトボール大会にも出られない陣容であった。

当時の研究室は本部構内の工学6号館(時計台に向かって右の建物)北西角にあり、一番中心となる角部屋には学生の机と、大机とホワイトボードが1組あった。その大机は昼食時には先生方が愛妻弁当を食べられるテーブル、休憩時はコーヒーを飲みながらホワイトボードを使って技術論議に花を咲かせるサロンの場となっていた。

本稿では3年間、研究室で一緒に過ごして頂いた際の印象を2点にまとめてみたい。

<粟倉先生の印象①：俯瞰 Bird's-eye view>

粟倉先生は電気化学の知識を、それ単独でなく、熱力学や物理化学などと強固に結合した構造としてお持ちであった。その構造を例えると、私の知識がグラファイトのように各分野の知識が層状で、各層の繋がりが弱いものに対して、粟倉先生の知識構造はダイヤモンドのような完全結晶として存在しているイメージである。加えて、その知識をベースに、一段高いレベルで俯瞰して物事を

考えておられ、まるで学問の高層ビルの間を悠々と飛び移っておられるように感じられたものである。

また、研究室内で洋書を訳す輪読勉強会が実施されていたが、その内容についても、電気化学の本でありながら、一般的な研究書のように専門分野だけに特化したものではなかった。一例として、生物の体内での電気化学挙動、例えば、電気ウナギが発生させる高電圧のメカニズムなどが含まれた本など、非常に興味深い選定であった。

栗倉先生の最終講義が、ホログラム等、光学に関しての講義であったことに驚いたが、知識・仮説を総動員して、実験装置を自作・改良し、結果を出されたという内容に、強固な知識構造に基づいた俯瞰に改めて触れることができ、懐かしさと感嘆を覚えた。

#### <栗倉先生の印象②：深堀 Drill Down>

栗倉先生には電気化学では電位-pH 図の概念から書き方、果ては電極の研磨に到るまで、数多くのご教授を頂いたが、事象の本質を捉えるために深堀をしていく姿勢は国士無双であった。

例えば、私どもが大机で先生に教授を仰ぐ事も多くあったが、当初議論の結論が出た後も、議論が膨らんでいき、私どもも、理解できたのも束の間、更に加速する議論に付いていくのが精一杯ということもよくある光景であった。

実験に関係する面白いエピソードとして、ひところ、息子さんの夏休みの理科の自由研究に深く参画しておられた。その実験テーマは今では覚えていないものの、子供ではまず思いつかないものであり、結果、何かの賞を受賞してしまった、という話を伺ったことがある。この点も、物事に対する深堀の姿勢の産物と勝手ながら解釈している。

#### <最後に>

栗倉先生はこの度、ご退職ということで一つの節目を迎えられましたが、過日お会いした際にもバイタリティは衰えるどころか更に磨きがかかっている印象を受けました。世界はまだまだ栗倉先生を必要としています。今後とも益々のご活躍を祈念致します。

(三洋電機(株))

#### 栗倉先生の電気化学講義—ご退職によせて

邑 瀬 邦 明

私の栗倉先生とおつきあいは、平成8年の春以来、今年で13年目になります。その年の7月、それまで栗倉先生のご専門すら全く存じ上げなかった私は、栗倉研究室に助手として採用して頂きました。採用に先立つ4月、大阪大学で学位をとって間もない私は、当時6号館にあった栗倉研究室を初めて見学させて頂きました。その折、「邑瀬君は電位-pH 図って知ってるの」とお訊

ねになった先生に「さあ？よく知りません」と素直にお答えしたのを今でもはっきり覚えております。赴任してすぐ「邑瀬君は助手として来てくれたんだから、何の研究をしてもいいし、研究室に朝何時にきて夜何時に帰ってもいいんだよ」と声をかけ、私と一緒に当時の教授の先生方の部屋をまわって「これが今度うちに来たパリパリの若手の邑瀬君です」とご紹介になり(当時は教室会議で新任教員を紹介するという習慣はなかった)、駆け出しの私を後押しして下さいましたこと、今でも大変感謝しております。以来、平成16年の秋まで栗倉先生のもとで金属、合金、化合物の電析に関する研究をさせて頂き、いまなおその流れのテーマを続けています。「リベラル」以外の形容詞が見当たらない栗倉先生から私が教わった最も重要なことは、電気化学という学問に対する考え方です。私は化学系の出身ですから、電気化学はもちろんその履修カリキュラムに含まれていました。しかし、私が学生のとき受けた電気化学の講義は、まさに「教科書通り」の眠くインパクトに欠くもので、「電気化学とはなんとまあ面白い学問だな」と感じた記憶があります。その電気化学を、栗倉先生は私にとって「魅力的な学問」に変えて下さいました。もちろん、仕事(研究)の道具として電気化学を使うようになり、イチから勉強しなおしたので身に付いた、という面もありましょう。しかし、研究の相談から何気ない雑談に至る日々の生活の様々な局面で、ときには研究室内で、ときには出張先や旅行先で、ときには学生を交え、ときには一対一で電気化学のエッセンスを説いて下さったことが、私にとっていちばんの糧となりました。栗倉先生は、私がする研究の内容や方向に関しては、ご自分から先にあしろうしろととやかにおっしゃることはほとんどありませんでした。そのかわり、研究の結果を解釈するうえでの学問においては、貴重なアドバイスを数えきれないくらい頂きました。

栗倉先生の電気化学の講義の分かりやすさは、学生の間でも定評があります。実際、「栗倉先生の講義がいちばん理解できたので、4回生で栗倉研を選んだ」という学生に何人も出会いました。先生の講義は他学科にも知れわたっていたようで、電気化学分野において現在ご活躍の他学科の先生からも、学生のときに栗倉先生の講義を履修してよかったとの声を頻々と耳にします。工学研究科化学系の某先生は、「(他にも電気化学の講義を受けたが)栗倉先生の講義で初めて電気化学を理解した」と述べておられます。また、定年ご退職になった今年度、栗倉先生のもとには学外の企業や団体から電気化学の講義に来てほしいとの依頼が多数舞い込んでいます。その一方で、他大学出身の私は、栗倉先生の実際の講義を拝聴したことは当然ありませんでした。これほどまでに評価の高い講義とはどんなものなのか？長い間気になっていた私は本年度、栗倉先生が引き続き非常勤講師として「材料電気化学」をご担当になったの

を機に、評判の授業を学部3年生と一緒に毎週「受講」してみました。水曜会誌のご退職祝賀記事ですので、具体的な講義内容について滔々と書くことはいたしません。端的に言えばそれは、工学教育に即して目的をしばった「使える電気化学」の講義でした。電気化学の講義はともすれば数式の羅列に走り、学生は出口を見失いがちです。その電気化学を、ある場面ではムダ除き噛み砕いて半定性的に、ある場面では身近な例に立ち戻り、また別の場面では常套の順序にとらわれずに講釈され、それでいて電気化学的なものの考え方を習得する上でポイントとなる箇所は決して逃しておられない教え方には敬服いたしました。初学者には少し難解でイメージしにくいかなと思われる部分も、言葉を慎重に選んでそれを感じさせない語り口にも感銘を受けました。「僕は老人ですから、どんな教え方をしてもだれにも文句を言われなからね」と先生はおっしゃいますが、これがご謙遜であることは明白で、「大学の先生には、簡単な内容をわざと難しげに喋る人がいるんや。そんな人になったらあかんよ」との、先生のお言葉が頭によぎりました。

栗倉先生の本年度の講義は既に終わりました。ご本人曰く、「来年度はもう（非常勤講師は）せんでもいいやろ・・・」とのことですが、栗倉先生の講義がなくなることは材料工学専攻にとって損失以外なものでもありません。どうか周りの空気をお察し(?)頂き、来年度以降も後進のために講義を頂戴できれば幸いです。奥様とご旅行の際やお孫さんに会いに行かれる際は、私が講義を代行いたしますので・・・（平成21年7月記）

（京都大学大学院工学研究科材料工学専攻 准教授）

### 栗倉泰弘先生のご退職によせて

三宅正男

私は、学部4回から博士課程を修了するまでの6年間、栗倉研究室に在籍しました。研究室に配属されるまでは、サークル活動やアルバイトなどの学外活動に明け暮れており、大学の講義には、卒業に必要な単位を揃えるだけのために、かろうじて出席する程度でした。そのため、ほとんどの講義についていくことができず、落ちこぼれを自認していました。しかし、そんな私でも、栗倉先生の講義だけは、ただ座って聞いているだけで、何の苦労もなく理解することができました。いつも分かりやすく話を下さる先生のもとでなら、劣等生の私でも何かを学ぶことができるかもしれないと思ったのが、栗倉研究室を志望した理由でした。

実際に研究室に入ると、期待以上に丁寧な教育を施して下さいました。栗倉先生ほど学生の勉強のために時間を割いて下さった大学教授はいないと思います。毎年、研究室に配属された四回生は、配属直後から数か月の間、毎日一時間ずつ、先生の直接指導のもとで、英語で書かれた電気化学の教科書を読み解くのが恒例でした。

修士課程に入った後にも、別の教科書を題材にゼミを開いて頂いたこともありましたが、先生は忙しいにも関わらず、一冊の教科書を読み終えるまで、毎日一時間ずつゼミを行って下さるのです。時には、先生と一対一で論文を読んだこともありましたが、四回生の秋、初めての研究テーマを与えられた際も、「三宅君、一緒にこの論文を読もう」と声をかけて頂き、一文ずつ、先生に解説して頂きながら読み下したことを印象深く覚えています。

また、先生は日頃から気さくに話し掛けて下さり、日常会話を通しても、電気化学を中心とした学問だけでなく、人生の楽しみ方など、あらゆることを教えて下さいました。先生との何気ない雑談が、いつのまにか白熱した研究討議へと発展し、気がつくと何時間も議論し続けていたというのは研究室ではよくある話でした。日々の議論やゼミを通して学問の基礎をしっかりと教えて下さった一方で、先生は、研究の進め方や時間の使い方などについては事細かに指示されることはありませんでした。先生が寛大なお人柄を持ち、「研究だけやってちゃあかん。遊びもしっかりやりなさい。」と、おっしゃっていたこともあり、研究室では、（研究以外の活動も含めて、）好きなことを自由にさせて頂くことができ、毎日が充実していました。十分な教育とサポートを受けた上で、思う存分、好きな研究をさせて頂けたことは、最高の幸せでした。

先生に優しく熱心にご指導して頂いたおかげで、修士課程の一年目が終わる頃には、私の学業に対する劣等感などはほとんどなくなっていました。実験や研究の楽しさをすっかり覚え、私は研究者の道を進みたいと思うまでになっていたのです。そして、先生には博士課程進学を受け入れて頂きました。博士課程では、それまで以上に自由に研究をさせて頂きました。しかし、当初は研究がなかなか思うように進展せず、自分に学位が取得できるのかどうか不安な日々が続きました。周囲からは「3年で卒業できないと、その後の就職が難しくなる」と聞かされていたので、焦りは募るばかりでした。そんな中、先生だけは、「まあええやん、4年、5年かかったって、無理に3年で卒業して中途半端に終わるより、納得できるまでじっくりやったほうが得るものが大きい」と励まして下さいました。私の焦りを抑える意図も込めてそうおっしゃって下さったと思いますが、「3年で修了するのは無理だ」と言われているようにも思え、動揺もしました。しかし、結局はこの言葉のお陰で、腰を据えて研究する覚悟を決めることができ、結果を恐れず、何度でも課題に挑戦することができました。そして結果的に、運良く3年で博士号を取得することができたのです。この時、簡単に結果の出る安易な道を選ばず、苦しみながらも困難を乗り越えられたことは、先生の言われた通り、『私の人生を支える大きな糧』となっております。

学位取得後、私は、東大、イリノイ大と移りながら、専門分野を少しずつ広げています。新しい研究分野に抵

抗なく挑戦できるのも、環境が変わっても研究を楽しむことができるのも、研究の基礎を徹底的に教えて下さり、自立した研究者になれるようにご指導して下さいました。栗倉先生のおかげです。心から感謝しています。

東大で助手をしていた頃、「栗倉先生は紳士だ。」「栗倉先生ほど人格者で真摯な学者はいない。」といった評判を耳にし、先生が他大学の先生方や企業の方々からも尊敬を集めていることを改めて認識することがよくありました。そのような偉大な先生にご指導頂いたことは、私の誇りです。私は引き続き、研究・教育者として、先生に少しでも近づけるよう、日々努力していきたいと思っております。先生には、今後とものご指導をお願いいたしますとともに、益々のご健勝をお祈り申し上げます。

(イリノイ大学アーバナ・シャンペーン校)

### 栗倉泰弘先生のご退職に寄せて

八 木 俊 介

「八木君、これで9勝目や。」栗倉先生のご退職なさる年、国際電気化学会に出席するために、栗倉先生と同専攻の邑瀬准教授とともにスペインのアンダルシア地方を訪れました。広大なオリーブ畑の中を走り抜ける特急列車。その車内で栗倉先生に将棋の勝負を挑みましたが、返り討ちに遭いあえなく惨敗。10連敗はなんとか免れましたが、悲惨な勝負でした。「なんや、八木君はまだ20代なんか。」私の大敗を慰めるかのように、先生がそうおっしゃったことを思い出します。確かに、先生とお会いしてから（10年近く）お世話になり続けており、その間は非常に密度の濃い時間でしたので、私が未だ20代でいたことに驚かれたのも無理はありません。振り返れば、私の20代は栗倉先生のお近くで多くのことを学ばせていただいた貴重な時期でした。

私が学部3年生のとき、『材料電気化学』の講義にて栗倉先生と初めてお会いしました。当時、私は授業には一応出ておりましたが、予習などはあまりしてこない不真面目な学生でした。しかし、先生の講義はどのようなレベルの学生でも理解の階段を一段ずつ着実に上がっていけるように考えられており、私のような怠け者の学生にも学問の面白さが鮮烈に伝わってくる内容であったことを覚えています。このような先生の素晴らしい講義は、非常に緻密で体系的な知識と豊富な経験、そして先生特有の丁寧で明瞭な語りが合わさることで為せる技であったのでしょうか。

学部4年生の研究室配属のとき、私は研究室を選ぶことに苦労はしませんでした。何故なら、京都大学材料工学専攻のどの研究室に入っても、自身に一生懸命やる意

気込みがあれば有意義な研究ができる、という確信があったからです。そこで、研究内容もさることながら、栗倉先生のお人柄を決め手に栗倉研究室への配属を志望しました。今でこそ、研究に対する姿勢としては不純な動機であったと思いますが、結果論で言うところの選択は正解であったと強く感じております。

栗倉先生は常に学生の自主性を重んじられておりました。研究室に配属され研究を開始した当初でさえ、「これをやりなさい。」などとはおっしゃらず、まずは学生のやりたいようにさせて貰いました。もちろん研究について右も左も分からない学生が最初から自分で研究を進めても、闇雲な実験とそこから導かれたその場限りの推察にしか至らず、路頭に迷うことがほとんどでしょう。しかしながら、先生としては最初から「これをやりなさい。」と言うよりも、学生が自ら考え、手を動かした後で「これをやればどうか？」と指導する方が後々学生の力と自信になる、とのお考えだったのだと思います。実際、私にとって栗倉研究室は、工夫する努力の楽しさ、そして発見の喜びを噛み締めながら伸び伸びと成長していける場所でした。

先生に質問に伺うと、先生はいつでも私の視点に合わせて、「一緒に考えてみよう。」とおっしゃってくださいました。頭ごなしに結論のみを上から教えるのではなく、思考の道筋を辿れるようにゆっくりと、丁寧に私を結論へと導いてくださいました。また、先生は「優秀な君達が理解できない教科書は、書き方が悪いと思え。決して君達がバカだから分からないなどと思うな。」と常に学生を励ましておられました。その言葉に励まされ（勘違いして?）、これまでにどれほど多くの学生が自信を持って羽ばたいて行ったのかは計り知れません。かく言う私もその一人です。

現在私は、栗倉先生の講義のタイトル『材料電気化学～Materials Electrochemistry』を、自らの専門分野として恥ずかしげもなく掲げております。これは、自分の専門分野を端的に表しているのみならず、栗倉先生の弟子であることを誇りに思い、胸を張って世界を舞台に活躍したいと真に切望するからです。先生には、研究や思考の進め方はもちろん、絵の描き方や写真の撮り方、歌や草花の名前、ひいては子育てや人生についてまでご指導いただきました。研究者としての人格が形成される最も大切な時期に、栗倉先生にご指導いただけたことはこの上なく幸いですと感じます。栗倉先生、本当にありがとうございます。先生の益々のご健康と、ご活躍をお祈り申し上げます。そして今後も引き続きご指導、ご鞭撻をいただきたいと願っております。

(京都大学大学院工学研究科材料工学専攻 助教)

## 平成21年度水曜会大会

- 日 時 平成21年6月6日（土曜）11：00～16：30
- 会 場 工学部6号館および京大会館

平成21年度水曜会大会は6月6日（土）に開催され、午前は工学部6号館内の「水曜会教育資料展示室（166号室）」の公開、および6号館167号室にて各研究室紹介のポスター展示が行なわれました。午後からは京大会館にて懇親会、総会、特別講演会が開催されました。当日は晴天に恵まれ、教育資料展示室およびポスター展示室にはおよそ30名以上の方が見学されました。懇親会には75名程が参加され、総会・特別講演会には例年を上回る約81名の参加者がありました。

まず、水曜会教育資料展示室の公開および各研究室紹介のポスター展示が約1時間開催されました。その後、場所を京大会館へ移し、101号室において懇親会が開催されました。懇親会は三ヶ田均教授の司会のもと、青木謙治会長の開会の挨拶の後、村上陽太郎名誉教授の音頭で乾杯が行われ、若松貴英名誉教授、足立裕彦名誉教授から挨拶がありました。新任の教員紹介があり、辻伸泰教授（材料工学専攻）、辻健助教（社会基盤工学専攻）、後藤忠徳准教授（社会基盤工学専攻）が挨拶されました。落合庄治郎教授の開会の挨拶をもって、会は和やかな雰囲気うちに終了しました。

場所を210号室に移し、総会は辻伸泰教授の司会で進められ、まず青木謙治会長から平成20年度の事業報告ならびに人事異動などの近況報告がなされました。次いで乾晴行会計幹事から会計報告および石田毅会計監事から監査報告がなされ、いずれも承認されました。続いて、次期役員推挙により、新会長に落合庄治郎教授が選出されました。

その後引き続き、特別講演が開催され、本年度は以下の2件の講演が行なわれました。

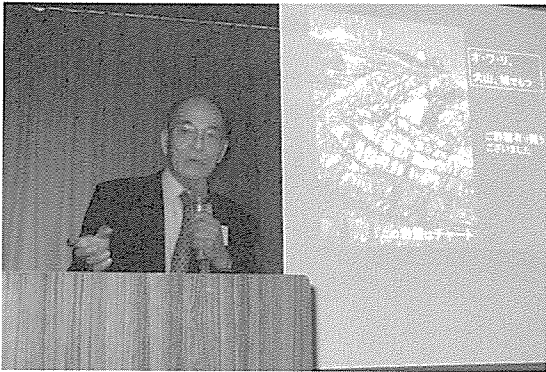
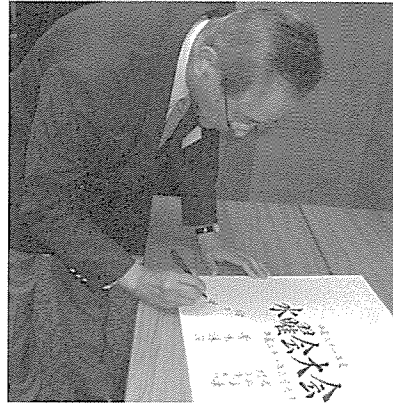
### 「鉄鋼業における地球環境への取り組み –住友金属の事例–」

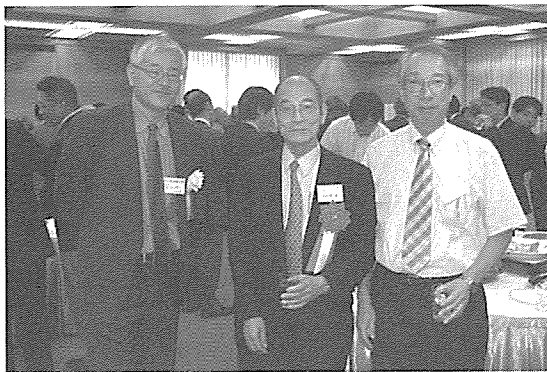
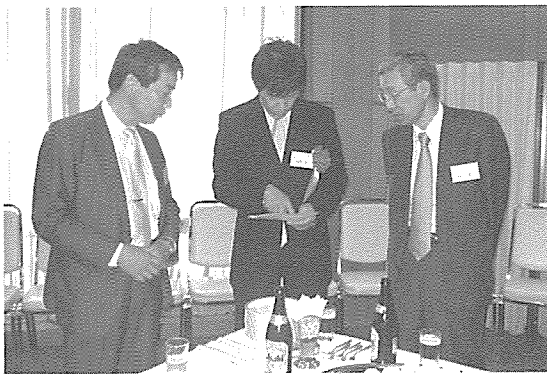
住友金属工業株式会社 社長 友野 宏 氏

### 「分からないことが分からない –不思議な岩盤の世界–」

（財）電力中央研究所 名誉特別顧問 日比野 敏 氏

特別講演会の内容は大会記念講演として本誌にご寄稿いただいているので、詳細はそちらにゆずりますが、友野氏の講演では、環境問題のうち特にCO<sub>2</sub>排出量抑制に焦点をしぼり、製造プロセスにおける技術革新や高い性能を持った製品の開発を通して鉄鋼業においていかにCO<sub>2</sub>排出量抑制が行なわれてきたかを社会情勢との関連を交えて解説いただきました。日比野氏の講演では、“構造材料”としての岩盤の特徴を実測データを交えて解説いただき、さらに不確定性を伴った対象を相手に安全を確保しつつ建設・施工を行なうための手法に関してお話をいただきました。いずれの講演も非常に興味深く、参加者は皆、熱心に傾聴していました。平成21年度水曜会はこれら2件の講演が終了した後、午後4時半に散会しました。なお、来年度の水曜会大会は平成22年6月12日（土）に京大会館で開催の予定です。







## 平成20年度水曜会会計報告

平成21年3月31日現在

| 収 入              |             | 支 出               |             |
|------------------|-------------|-------------------|-------------|
| 前年度繰越金           | 6,586,090円  | 会誌印刷代（製版・封筒・郵送料込） |             |
| 会 費              | 3,492,000   | 24巻1号             | 1,716,562円  |
| 会誌広告掲載料（製版代込）    |             | 水曜会大会経費（20年6月7日）  | 1,257,630   |
| 24巻1号            | 495,985     | 名簿発行費             | 2,766,752   |
| 名簿広告掲載料（製版代込）    |             | 名簿二重払返金           | 10,500      |
| 平成20年11月発行       | 361,250     | 編集委員会経費           | 52,815      |
| 名簿売上             | 1,883,000   | 会誌原稿料             | 140,000     |
| 会誌売上             | 3,340       | 新入生歓迎行事援助         | 18,700      |
| 水曜会大会懇親会費        | 312,000     | 通 信 費             |             |
| 預金利息             | 14,729      | （切手・後納郵便料・振込手数料）  | 170,000     |
| 寄付金（盛先生をしのぶ会他）   | 76,500      | 事務人件費             | 651,000     |
|                  |             | 封筒・文具・コピー代等       | 87,923      |
|                  |             | その他の経費（弔慰経費）      | 22,260      |
|                  |             | 引越し経費             | 22,800      |
| 収 入 合 計          | 13,224,894円 | 小 計               | 6,916,942円  |
| 上記の通り会計中間報告致します。 |             | 次年度への繰越金          | 6,307,952円  |
| 平成21年6月6日        |             | 内訳 銀行普通預金         | 1,801,700   |
| 会計幹事 乾 晴 行       |             | 銀行定期預金            | 4,500,000   |
| 以上の通り相違ございません。   |             | 郵便振替預金            | 3,380       |
| 会計監事（監査） 石 田 毅   |             | 手持現金              | 2,872       |
|                  |             | 支 出 合 計           | 13,224,894円 |

## 会員消息

### 冶金昭和31年組同窓会

2009年4月9日14時、大阪吹田市「ホテル阪急エキスポパーク」へ集まったのは「冶金昭和31年組」生存者20名中の13名であった。1年半ぶりの再会を喜び合い、万博公園にて、丁度桜・チューリップが満開の花を愛でながら逍遥、その後「日本庭園」の「心字池」・茶室・滝・竹林・迎賓館等と周り、再び「心字池」中央休憩所にて、兼六公園・後楽園・偕楽園・水前寺公園等と当日本庭園の比較感想談義、当庭園は数ある日本の名庭に匹敵する名園ではあるまいか?で意見一致。

17時頃ホテルに帰り入浴後、18時30分からお待ちかねの宴会開始。この1年半の間に亡くなられた溝渕君への黙祷、土川君のヴァイオリン演奏・参加者全員による近況報告・欠席者の欠席理由返信・前回同窓会写真の回覧・今後の同日宇会運営方法協議・次期幹事(村上)の選出等でアツと言う間に2時間が過ぎ宴会は終了し、夜

桜見物等へ.. この日の大阪市の最高気温=25.5℃、雲一つ無い快晴・満月に恵まれ、幹事の日頃の精進のお陰か?。

翌10日9時神戸・明石市見物へマイクロバスにて出発。「玉藻刈る 敏馬(みぬめ)を過ぎて 夏草の 野島の埼に 舟近付きぬ」(柿本人麻呂)で有名な敏馬神社(阪神岩屋駅南)・「嗚呼忠臣楠子之墓」の湊川神社・殉節物・宝物殿を見物、この日は天王陛下のご結婚50周年記念日、それにあやかった(?)アラフォー結婚式を見物、シーパル須磨にて昼食後、源平ゆかりの名刹須磨寺にて「源平の庭」「青葉の笛」等見物後、東経135度子午線標識でもある明石市天文科学館で日本最古・世界でも番目に古い、ドイツ・カールツァイス社製プラネタリウムで満点の星を楽しみ、JR新幹線西明石駅にて1年半後の京都での再会を祈念して散会・終了した。10日の神戸の最高気温=22.1℃快晴であった。

(文責:江藤隆義 冶金 昭和31年卒業)



万博公園にて 平成21年4月10日  
後列左から 海田, 荒木, 土川, 藤田, 武智, 石井, 野村, 長澤  
前列左から 江藤, 木村, 村上, 竹内, 田畑

37水曜会 古希お祝い会  
(昭和37年冶金学科卒)

「1」プロローグ

37水曜会の歴史はかなり古い。第1回が1983年(昭和58年)9月なので今年で26年目、既に四半世紀を過ぎている。こんなに長くやっているのに水曜會誌の会員消息が今回初めてと云うことは、全く不徳のいたすところである。

会の中味は主に伊豆スカイラインCC(静岡県)でゴルフをして、その夜に例会と称して夕食会を開き一杯飲みながら夜が更けるまで懇談するスタイルである。<但し、最近ではゴルフ組とハイキング組に分かれて昼間を過ごしている。ハイキング組の世話役は、山口絃君である。>

年1回秋に開催していたが2001年(平13年)より参加者が60歳を過ぎて時間に余裕が出来、更に行く先が長く無くなるので年2回春秋に開こうと云うことになった。

2007年(平19年)10月の第32回の例会の席上、大半の参加者が古希を迎える来年の秋は古希祝の会を盛大にやろうと云うことになり、2008年(平20年)10月に有馬温泉をベースキャンプ(柳島章也君担当)にして古希お祝い会を開催した。

「2」10月28日：前夜祭

新幹線の事故があり集合時間が心配されたが、前夜祭

参加予定の15名は無事有馬温泉のJFE(旧川鉄)有和荘に到着。早速、有馬温泉名物の「金泉」「銀泉」を楽しんだ。

また、サンフランシスコ郊外に在住する加納勝雄君が「モナヴィー」という健康増進ジュース<このジュースは、アマゾンで採れる野生のアサイベリーを主体として他に18種の果実ジュースをミックスしたもの>を米国より1ダース持参して呉れて2泊した有馬温泉での朝食、夕食時に参加者全員が試飲した。しかし、加納君ご推薦の効果は直ぐには現れなかったようである。

「3」10月29日：保津川下りと京都嵯峨野の散策並びに古希祝会

朝風呂と朝食を済ませると直ぐに貸切マイクロバスで明智光秀の居城のある亀岡市を目指して有和荘を出発した。10時過ぎに、これまた貸切船を使って保津川下り乗船場を出て16Km、2時間の秋の保津川を下り、船頭の竿さばきの技に見とれ、移り行く景色を楽しんだ。嵐山の着船場に着き昼食を「湯豆腐 嵯峨野」で取った。

お店の入口で久しぶりに集合写真を撮った(写真1)

昼食後、散策は天竜寺、大河内山荘、落柿社、二尊院、祇王寺等を巡り清涼寺に集合して朝のマイクロバスに乗り込み、名神高速で一路有馬温泉を目指した。

有和荘での古希祝会には、つくば市より尾上俊雄君も駆けつけ(写真2)総員16名で夜の更けるまで飲食、カラオケと懇談に時の経つのを忘れた。



写真1 京都「湯豆腐 嵯峨野」の入口にて

前段(左より)：酒井、佐藤、松原、前田、杉本、吉田

後段(左より)：柳島、山口、秦、田端、阿部、名和田、畑中、加納、福田

「4」10月30日：ゴルフ組とハイキング組

3日目はゴルフ組とハイキング組に分かれた。ゴルフ組は『宝塚ゴルフ倶楽部』へ向かい、ハイキング組は有馬温泉よりロープウエーで六甲山に上がり六甲山、麻耶山をまわって神戸に下って異人館巡りをした。

尚、この日は更に有志により

- ① 京都／祇園にある『萬養軒』でのフランス料理の夕食会<これより椿原治君が参加(写真3)> と
- ② 高野山の宿坊での一泊と翌日の山内観光が行われた。(写真4)

「5」エピローグ

昭和37年の冶金学科の卒業者は26名、うち鬼籍に入った者が4名である。

37水曜会への参加者は時期に差が有るが19名であったのが、清水英男君が平成11年2月、松尾國彦君が平

成20年4月に逝去され現在17名である。この内2名が米国に在住している。<加納君(前述のようにカリフォルニア州)と酒井武雄君(ノースカロライナ州)>

尚、加納君が本年4月『37水曜会10年の歩み(1999年～2008年)』と云うCD-ROM写真集(301MBの豪華版)を完成させメンバー全員に配布して戴いた。

次回からの「37水曜会の消息報告」には、その年の写真と共にこのCD-ROMからの懐かしい写真も紹介したいと思っている。

今回の古希お祝い会の全体を取り仕切って呉れたのは、佐藤健吉君(37水曜会世話人)並びに福田健君(関西代表)である。ここに、参加者一同深謝の念を表明したい。

(秦 瑛記)



写真2 尾上：有馬温泉の古希祝会にて



写真3 椿原：京都／祇園の萬養軒にて



写真4 高野山の宿坊にて  
左より：吉田、佐藤、松原、柳島、畑中

## 会 員 通 信 欄

平成21年度水曜会大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。

高嶋 宏（採治，昭15）冶金学科昭和15年卒僅か2名（中尾善信，高嶋宏）のみとなり、水曜会の存在には貴重なる、且つ誇りを持つものと思ひ盛会を祈ります。諸先生、諸先輩によろしく。

村上陽太郎（冶金，昭17）毎朝、40分弱のウォーキングを続けています。原稿の執筆、顧問の調査、会議や講演会への出席など、毎日をお陰で元気で楽しく過ごしています。

佐伯 博蔵（鉱山，昭21）昭和21年鉱山学科卒は「21鉱水曜会」と称し、30年程前から毎年東京でクラス会をしております。近年も毎回7～9人が出席し、旧交をあたためています。

山崎 豊彦（鉱山，昭22）現在は石油技術協会、石油学会及び関連の石油開発会社と協力しています。また、将来はこの方面の新しい資源開発関係の技術開発が望まれています。どの大学もこれらの方面の技術部門がなくなっています。京大でも是非研究開発部門を育てて下さい。

三谷 文夫（鉱山，昭23）あちらこちらの病院のお世話になりながら、まあまあ元気に過しております。今年は石見銀山を訪ねてみようかと思っております。

谷口 利廣（冶金，昭23）元気です。お年寄りを相手にパソコン指導を続けています。4年前に片手間で始めた月刊情報誌「パソコンの集い（A4版8頁）」はNo.48となり、100名を越える方にメール配信をしています。

鷹取 正六（冶金，昭24）1949年冶金学科卒、沢村教授の鉄鋼研究室の出身です。我々の時代の冶金の卒業生は、皆んな敗戦で破壊された日本の基礎産業の復興と、更に世界をリードする程までの発展に貢献し得たとの誇りを持っています。年月は流れ、小生は、今や高齢で実社会から退き、気楽に暮らしています。

松岡 秀夫（鉱山，昭27）リタイヤして満16年、八十路を越えましたが、何とか元気に過しています。書道、俳句やパソコンで暇つぶしするほか、ふるさと会、同窓会への出席が楽しみです。

田中 晃三（冶金，昭27）公職のお手伝をしながら物づくりに精を出しております。

三浦 精（冶金，昭29）10年間の熊本崇城大学の勤め

から京都へ帰って2年たち落着いた暮らしになりました。アイスホッケー部関係の会合に出ることが多くなりました。学生時代コーラスとアイスホッケーばかりの生活でしたので後輩の為に少しでも役に立ちたいと思っています。

田中 功（冶金，昭29）北九州市の要請で産業技術史をまとめる観点から「八幡製鉄所製鋼技術史（1901～1945年）」を監修いたしました。いい勉強をさせていただきました。暖かい時には早朝、寒い時には夕刻のwalkingを40分ばかりやって健康維持につとめています。

清滝昌三郎（鉱山，昭30）ゴルフ、詩吟、オペレッタ、等々健康的な生活をエンジョイしています。

若松 貴英（鉱山，昭30）南御蔵山自治会長の任期は終わりましたが、「地域まちづくり」協議会の代表をさせられております。元気しております。

佐藤 史郎（冶金，昭30）悠々自適の毎日ですが、わが国のアルミ産業のこと、銅産業のことがやはり気懸かりです。

江藤 隆義（冶金，昭31）冶金・昭31年の同窓会をエキスポパークで開催し、幹事役を無事終了させることが出来ホッとしています。

田村 敬二（冶金，昭32）世田谷区卓球連盟で卓球に専念しています。

谷口 章八（鉱山，昭33）東京近郊に住む同窓同期6人で年に数回食事をしております。

松本 善文（冶金，昭33）年令なりに元気です。時に、在京の同期の友達と美術館巡り、散策等を楽しんでいます。

伊藤 二郎（鉱山，昭34）仕事では地図情報システムの普及に、ボランティアでは地域のコミュニティー作りに従事しています。

江見 敏夫（冶金，昭34）毎年5月、34年冶金卒の宿泊ゴルフ会をやっています。今年は9人集まります。学生時代のままの雰囲気です。飲んで、しゃべって楽しいですよ。

久賀 俊正（鉱山，昭35）珍しいスポーツ、シャッフルボードを習っています。

赤井 慎一(冶金, 昭36) 一昨年の11月に座骨神経痛を発症し(加齢に伴う腰椎変形に起因), 以降一年半真向法を続けて, ほぼ克服しました. たまのゴルフや日々の家庭菜園で元気に過しています.

小松 伸也(冶金, 昭36) '09年3月末で定年退職し, 名誉教授になりました. 4月以降は釣と温泉(殺生と養生)の日々です.

山本 隆造(冶金, 昭36) 地域福祉活動, ボランティア協会活動, 自治会活動, 障害者施設後援などで及ばずながら頑張っております. 週に2~3回歩行(6km/回)も行って, 少々ボケて参りました.

片岡 隆昭(鉱山, 昭37) 昨年末より左肺の腫瘍に対する抗がん剤治療を行っており, 体調と体力維持が毎日の課題. 体調のいい時には短期の旅行に出たり, 水彩画スケッチを楽しんでいます.

日比野 敏(鉱山, 昭37) 日日は好日. ソバ打ち, 陶芸, 庭の手入れ, 家庭菜園の手伝い等々, 時に読書という感じです.

西村 孝(冶金, 昭38) チタン材料の普及に迅力しています.

小松 啓七(冶金, 昭39) S39年卒の卒業45周年記念同窓会を当日開催する予定です.

横山 莞泰(資源, 昭41) 4月末にJICAのシニア海外ボランティアとしての3度目のマラウイ(南部アフリカ)から帰って来たばかりです.

森 邦彦(冶金, 昭41) いろいろ思いつくまま, 好きなことをやって過しています.

白井 秀明(金属, 昭41) 37年入学・41年卒業の我々は「みなよい(皆酔)会」と称して, 東・西での呑み会, 合同の旅行会を行って, 昔の親交をさらに深めております.

加藤 雅典(冶金, 昭42) 昭和42年冶金学科卒業関東在住者の会を昨年4月5日に続き, 本年は4月11日に新丸ビルで執り行いました. 本年は10月頃にも行う予定です.(長瀬さんと共に幹事を勤めさせて頂いております)

速水 弘之(冶金, 昭42) 長年勤務しました企業で原子力関連コンサルタントと致しまして再び非常勤の勤務をさせてもらっています.

水野 昭宏(冶金, 昭42) 時々, 会社からの要望で海外へ出張し, 若手のお手伝いをしています.

吉川 正昭(資源, 昭43) 念願のボカラ(アンナプルナ)にも出かけました. あとは足腰が弱れば, 新神戸駅前の超高層マンションに住む段取りをしていますが, 当分は高知と暑い夏は新神戸の超高層マンション(29階)を行き来する生活が続くと思います.

木村 隆義(冶金, 昭43) 昨年6月に退任し, サンデー毎日を楽しんでいます. 山, スキー, 旅行など混雑を避

け, 好きな時に出来る有難味を感じています.

黒木 正純(冶金, 昭43) 造船関連業界も受注残はあるも世の中の後を追ひ, 厳しさが増しつつあります. 元気で長生きが一番の心境の年令となり, 日々心身を鍛えています.

近崎 充夫(金属, 昭43) 2005年に㈱日立製作所を定年退職しました. 親の介護で愛知と茨城を行ったり来たりしています. 年に数回, 社内研修の講師で, 入社しています.

浅井 達雄(資源, 昭44) 副学長のままテクノミュージアム館長を拝命, 以前からの教授職はeラーニング化し何とか多忙な毎日を過しています. 定年まで3年足らずとなりました.

山田 範保(資源, 昭46) 北海道に来て満4年となり, 春夏秋冬の素晴らしい自然を楽しんでいます. 京都市と旭川市は観光姉妹都市ですし, 文化と自然が相補える地域です.

内貴 治三(冶金, 昭47) 全くフリーとなり, 各種のカルチャースクール等に参加しています. その内, 油絵や彫金にも挑戦してみようと思っています.

福井 康司(金属, 昭48) 最近のスケジュールは, 1/3が大阪, 1/3が東京, 残りの1/3は各地の生産工場という状況で毎日忙しく全国を飛び回っています.

朝倉 俊弘(資源, 昭49) 休日は3才になる孫と遊ぶ時間が増え, その分ゴルフの回数が減りました.

山本 隆三(資源, 昭49) 住友商事からプール学院大学に職を変えました.

小西 和幸(金属, 昭49) 3回目の米国(NY)駐在生活です.

井口 義朗(資源, 昭50) 国が保有する三次元物理探査船「資源」の運行管理業務に携わっています.

則竹 和光(資源, 昭50) JAEA 本部安全統括部で環境報告書のとりまとめや省エネ法, 温対法対応の業務とりにとめに従事しています.

楠井 潤(金属, 昭53) 現在, フランスにある東洋アルミニウム(株)の関連会社トーヤル・ヨーロッパ社に勤務しております.

宮脇 新也(金属, 昭53) 東京への単身赴任が3年目になります. 背広とネクタイ姿も何とか板についてきました.

小野 直樹(資源, 昭54) 平成21年6月末から, 再び北九州市小倉南区の三菱マテリアル(株)東谷鉱山勤務となります.

竹士伊知郎(冶金, 昭54) 大変な時代になりましたが, 知恵と技術が全ての突破口になると信じて日々努力の毎日です.

北村 公亮(資源, 昭55) WBCのイチロー, 見ていた

だけましたか？皆様もスポーツ用品を選ばれるときは是非、ミズノとご指名下さい。08年11月卒業以来、初めての同期会で京都に1泊しました、楽しい一夜でした。

道本 龍彦（冶金，昭55）最近の仕事の上で1930年代という大変古い時代の合金に関する海外の論文を購読しています。和訳するのに非常に時間がかかります。

及川 初彦（冶金，昭56）不況の中、着実に技術開発を進めています。

札軒富美夫（金属，昭56）昨年秋の米国発の金融不況により名古屋の景気が急転下に落ち込み、最近になって回復の兆しが見えはじめた感じです。地道にステンレス材の用途拡大に精一杯頑張っています。

安部 研吾（冶金，昭57）激動の世の中、厚鋼板に関わってはや25年、四半世紀になります。

竹内 正（冶金，昭58）まともに使える石油はあと半分だそうです。中国・印度など人口増加で使用量がどんどん増え、ガソリン価格も上昇気味。今こそ、日本の「もったいない」の具現化をあらゆる所で実施しないと、日本に未来はないかもしれません。

湊 万寿男（金属，昭58）生産量激減の中で苦戦していますが、元気にしています。

土井 健司（金属，昭60）アルジェリアの東西高速道路工事関係での通訳生活も1年半になりました。

山本 保（金属，昭60）今年3月にHDDヘッド事業が終息となり、（株）富士通研究所の厚木研究所に戻りました。

木村 得敏（金属，昭61）長い帰休で体調がおかしくなりそうでしたが、ようやく少し受注が戻ってきた様です。

古澤 光一（金属，昭62）カリフォルニアでの生活も4年目になりました。光ファイバによる高速伝送素子の開発をしています。

西村 英孝（冶金，平2）4月より株式会社半導体先端テクノロジーズへ出向いたしております。

寺元 宏一（冶金，平3）今年5月より香港に赴任することになりました。

佐藤 彰洋（冶金，平6）㈱IHIにてジェットエンジン用材料の開発に従事しております。

西 孝文（資源，平7）福岡で新しいイメージセンサーの設計を頑張っています。

川上 俊之（金属，平7）広島県三原市の工場が開発の仕事をしています。元気にやっております。

堺 健次（金属，平8）6月からブラジルに転勤することになりました。

高瀬 嗣郎（資源，平10）津波の防災関係の仕事が続いております。学生時代に学んだことが具体的にどのような生かされるかが分るにつけて、もっとしっかり研究、勉強に励んでおけばよかった、と思う今日この頃です。

高木由起子（物理工，平10）昨年長女が生まれました。元気に育っています。

安井 雅人（物理工，平10）今年のゴールデンウィークにドイツに旅行しました。ユネスコ世界遺産であるフェルクリンゲン製鉄所を見学し、20年前迄このような設備で稼動していたことに製鉄技術者として感心して帰ってきました。

竹長 勝行（地球工，平14）10月に結婚します。

井上 祐輔（地球工，平16）広告業界に身を投じ、はや3年必死に走り続けています。

山本 健太（地球工，平16）山口県上関町で原子力発電所建設の仕事に励んでいます。

山岡 幸男（元教官）参加したいのですが、ここ2年間程、全て渡韓日程と重なり残念です。韓国で技・コンサル13年間、まだ全開の現役です。クレームの修羅場も潜っています。お陰で健康です。

森 英嗣（元教官）最近の研究と学内の仕事の両立が難しくなってきましたが頑張っております。水曜会の益々の発展をお祈り申し上げます。

## 平成 21 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>   |  |                          |
| 川 林 徹 也            | 反射法地震探査におけるフレネルボリュームマイグレーション適用性の研究                                     | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学) |
| 坂 野 貴 仁            | 地層流体中のガスによる音波速度上昇メカニズムの研究  | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学) |
| 藤 谷 淳 司            | 人工電流を用いた海底下浅部比抵抗の連続モニタリング  | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学) |
| 安 井 佑 介            | 地中レーダアンテナの周波数特性と放射パターンに関する研究   | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学) |
| <b>地質工学分野</b>      |  |                          |
| 池 田 達 紀            | 高次モードを含む微動データに対する解析手法の検討   | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学) |
| 牧 村 大              | Computational Design of Silica Nanoparticles for Enhanced Oil Recovery | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学) |
| 宮 本 広 樹            | 新潟中越地域の地質構造における物性異常層の影響  | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学) |
| 山 田 達 也            | 地中貯留におけるCO <sub>2</sub> 溶解促進技術の開発                                      | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学) |
| <b>地殻開発工学分野</b>    |  |                          |
| 牛 口 健 人            | 貯留層内卓越流路の強制閉塞による掃攻効率改善について   | 新日本石油開発(株)               |
| 丹 羽 智 哉            | 多胡砂岩三軸試験における間隙水圧上昇時のAEモニタリング   | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学) |
| 山 口 裕 弘            | 炭酸ガスのブレイクスルー圧力と空隙形状の関係について   | (株)オーアイシー                |
| <b>ジオメカトロニクス分野</b> |  |                          |
| 駒 嶺 聡 史            | 応力磁気効果を利用したワイヤロープ <sup>®</sup> の非接触張力測定法の開発                            | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学) |
| 前 田 龍 一            | 長尺鏡ボルトによる地山補強効果の検討   | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学) |
| 野 口 貴 史            | 円筒領域内の物質流動可視化のためのキャパシタンスCTに関する基礎的検討                                    | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学) |
| 保 田 尚 俊            | 山岳トンネルの地震被害メカニズムに関する基礎的研究  | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学) |
| <b>地殻環境工学講座</b>    |  |                          |
| 吉 川 輝              | 亀裂性岩盤内における原位置空洞気密試験時のAE挙動の検討   | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学) |
| 後 藤 陽 一            | 粒状体個別要素法による岩盤のグラウト充填機構に関する評価法  | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学) |
| 中 村 哲 也            | 亀裂性岩盤の透気特性評価に対する粒状体個別要素法の適用  | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学) |
| 前 田 哲 平            | 岩盤タンク周辺における地下水水質の長期変動の予測について   | 中京テレビ放送(株)               |



| 氏 名                   | 研究論文題目  | 就職先                       |
|-----------------------|---|---------------------------|
| <b>資源エネルギーシステム学分野</b> |   |                           |
| 上 田 貴 康               | マグネシウム合金の固溶強化機構   | 京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学) |
| 北 川 彰 紀               | バイオガスを想定したCH <sub>4</sub> /CO <sub>2</sub> 混合ガスハイドレート膜の生成・分解挙動-混合比率の変化に関する考察- | 京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学) |
| 高 橋 真 生               | 脱合金化法によるナノポーラスNiの作製とその磁気特性  | 京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学) |
| 中 澤 拓 己               | Cu/Cu粒界およびCu/Co粒界すべりの分子動力学シミュレーション  | 京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学) |
| 前 西 遼                 | 粒径の異なる花崗岩の温度履歴によるクラックの進展  | 京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学) |
| <b>資源エネルギープロセス学分野</b> |   |                           |
| 荻 原 知 洋               | 固液界面温度が衝突液滴内の沸騰現象に及ぼす影響   | 京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学) |
| 仮屋崎 祐 太               | マグネシウム合金板の引張曲げ成形におけるマルチスケール変形特性   | 京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学) |
| 北 島 達                 | 対向液圧深絞り法における圧力媒体流出挙動の実験研究   | 京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学) |
| 鈴 木 悠 平               | デュアルカーテン衝突噴流の熱伝達特性  | 京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学) |
| <b>ミネラルプロセッシング分野</b>  |   |                           |
| 栗 山 歩                 | メタン発酵におけるNaClの影響  | 京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学) |
| 渋谷 誠 幸                | CO <sub>2</sub> ハイドレート生成頻度に及ぼす過冷却度ならびにNaCl濃度の影響                               | 京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学) |
| 田 村 聡 士               | 浮遊選別法による食品系排水の固液分離に関する基礎的研究   | (株)大和総研ビジネスイノベーション        |

**修士課程修了者**

| 氏 名              | 研究論文題目   | 就職先                    |
|------------------|--|------------------------|
| <b>ジオフィジクス分野</b> |  |                        |
| 岡 野 豊            | ベクトル弾性波動場におけるP波とS波の平面波分解   | 国際石油開発帝石               |
| 越 智 公 昭          | 海底面での固液境界カップリングと流体の圧縮性を考慮した津波発生過程における音響波伝播のシミュレーション  | 石油資源開発                 |
| 坂 田 玄 輝          | 海洋MT法による地殻比抵抗構造探査と地形の3次元的影響の検討   | 国際石油開発帝石               |
| 辻 本 す ば る        | レシーバー関数解析によるP-S 変換波を用いた地下構造イメージング  | JR東海                   |
| <b>地質工学分野</b>    |  |                        |
| 大 島 佑 介          | モデル実験から推定されるせん断帯の内部構造と発達過程   | (株)豊田自動織機              |
| 國 枝 真            | CO <sub>2</sub> -EORプロセスにおける界面化学現象の不均一反応速度論的解析   | 京都大学大学院工学研究科(博士後期課程進学) |
| 湊 翔 平            | Application of Seismic Interferometry to Crosswell geometry using Crosscorrelation after Wavefield Separation and Multidimensional Deconvolution | 京都大学大学院工学研究科(博士後期課程進学) |
| 山 本 勝 也          | 干渉SAR解析による平成19年新潟県中越沖地震に伴う地殻変動解析   | 三菱商事石油開発(株)            |
| ガルシア・ヘンリー        | Reservoir Simulation for CO <sub>2</sub> Injection into an Onshore Aquifer, Nagaoka, Japan   | British Petroleum(BP)  |

| 氏 名                       | 研究論文題目  | 就職先                         |
|---------------------------|---|-----------------------------|
| 地殻開発工学分野<br>石 田 基         | AE観測による水攻法注水フロントモニタリングに関する実験的研究   | NECエレクトロニクス(株)              |
| ジオメカトロニクス分野<br>中 上 晋 志    | レーザー超音波法によるはく離状欠陥検出に関する研究   | 住友電気工業(株)                   |
| 地殻環境工学講座<br>磯 井 健太郎       | 粒状体個別要素法を用いた岩盤空洞の気密性能評価に関する研究   | 関西電力(株)                     |
| 笠 川 謙 人                   | グラウト充填機構を考慮した岩盤注入システムの合理化に関する研究   | 双日(株)                       |
| 西 垣 広 大                   | 鉛汚染土壌の浄化に対するキレート剤の効果に関する研究  | DOWAホールディングス(株)             |
| 林 達 也                     | 岩盤の水理地質モデル構築に対する地球統計学手法の適用に関する研究  | IBM ビジネスコンサルティングサービス(株)     |
| 資源エネルギーシステム学分野<br>加 渡 幹 尚 | Effects of Solute Atoms on Mechanical Properties of Magnesium (マグネシウムの機械的特性におよぼす固溶元素の影響)  | トヨタ自動車(株)                   |
| 木 村 洋 芳                   | The effect of NaCl on CO <sub>2</sub> hydrate film formation and growth (CO <sub>2</sub> ハイドレート膜の生成および成長に及ぼすNaClの影響)            | 三菱重工業(株)                    |
| 長 谷 俊 輔                   | Co/Cu粒界構造の分子動力学シミュレーション   | 本田技研工業                      |
| 湯 浅 元 仁                   | Effects of nanoscale lamellar structure on mechanical and magnetic properties in Co-Cu alloy (Co-Cu合金におけるナノラメラ構造の力学・磁気特性に及ぼす影響) | 京都大学大学院エネルギー科学研究科(博士後期課程進学) |
| 資源エネルギープロセス学分野<br>梅 田 太 一 | Convective Heat Transfer from a Heated Surface to Impinging Plane Jets of Water   | パナソニック(株)                   |
| 奥 洋 介                     | Boiling Phenomena in Collisions of Small Water Droplets with a Hot Solid  | 住友金属工業(株)                   |
| 辻 川 敬 祐                   | Finite Element Simulation of Roll Forming of Seam-Welded Pipes  | 関西電力(株)                     |
| 松 嶋 啓 太                   | Outflow Behavior of a Pressure Medium in Square-Cup Sheet-Hydroforming  | 新日本製鐵(株)                    |
| ミネラルプロセッシング分野<br>大 野 恵    | Effects of Strong Magnetic and Gravitational Field on Water Electrolysis  | 本田技研工業(株)                   |
| 小 澤 敬 祐                   | Fundamental Study on Electrochemical Processing under Magnetic Field  | (株)神戸製鋼所                    |
| 苗 村 善 人                   | Electrochemical Processing of TiO <sub>2</sub> Dye-sensitized Solar Cell  | 京セラ(株)                      |
| 森 健 史                     | Local Current Distribution Characteristics in Energy Conversion and Storage Devices   | シャープ(株)                     |

## 博士後期課程修了者

| 氏 名                 | 研究論文題目                                       | 就職先                   |
|---------------------|--|-----------------------|
| 地質工学分野<br>中塚善博      | 地中貯留におけるCO <sub>2</sub> 挙動モニタリングと貯留量評価に関する研究 | 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 |
| ジオメカトロニクス分野<br>依田淳一 | 第四紀未固結粘性土地山における都市NATMの挙動分析と合理的な設計・施工管理手法     | (独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構    |
| 地殻環境工学講座<br>張傳聖     | 亀裂性岩盤の水理地質モデルの構築及び水理挙動の評価法に関する研究             | 東電設計株                 |

## 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 |
|---------------------|--|------|------------|-----|
| 地質工学分野<br>中塚善博      | 地中貯留におけるCO <sub>2</sub> 挙動モニタリングと貯留量評価に関する研究 | 松岡俊文 | 平成21年3月23日 |     |
| 三善孝之                | 格子ボルツマン法と個別要素法を用いた固液混相流解析システムの地球工学分野への応用     | 松岡俊文 | 平成21年3月23日 |     |
| ジオメカトロニクス分野<br>依田淳一 | 第四紀未固結粘性土地山における都市NATMの挙動分析と合理的な設計・施工管理手法     | 朝倉俊弘 | 平成21年9月24日 |     |
| 地殻環境工学講座<br>張傳聖     | 亀裂性岩盤の水理地質モデルの構築及び水理挙動の評価法に関する研究             | 青木謙治 | 平成21年3月23日 |     |

## 旧 金 属 系

## 学部卒業生

| 氏 名              | 研究論文題目                  | 就職先                      |
|------------------|-------------------------|--------------------------|
| 材料設計工学分野<br>足立毅郎 | チタン酸ストロンチウム誘電体薄膜の誘電特性制御 | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学) |
| 岡谷基弘             | 無電解コバルトめっき膜の強磁場中形態制御    | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学) |
| 塩見昌平             | 銅ナノ粒子を用いた鉛フリー釉薬の研究      | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学) |
| 仙石晃大             | マグネシウムの陽極酸化膜の構造とその耐食性   | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学) |
| 正木幹人             | 航空機材用アルミニウム2013合金の析出挙動  | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学) |

| 氏 名              | 研究論文題目   | 就 職 先                     |
|------------------|--|---------------------------|
| <b>表面処理工学分野</b>  |  |                           |
| 今 林 宏 樹          | 蒸着法による Zn <sub>3</sub> P <sub>2</sub> 化合物半導体薄膜の作製        | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学)  |
| 佐々木 出            | 3 価の元素をドーブした BaZrO <sub>3</sub> への水の溶解反応とその熱力学的考察        | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学)  |
| 田 中 孝 明          | Y 及び Sc をドーブした BaZrO <sub>3</sub> における粒界抵抗の制御因子の特定       | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学)  |
| 林 彰 平            | 水溶液からの銅および銀の電析形態   | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学)  |
| 宮 崎 達 也          | CsHSO <sub>4</sub> を固体電解質に用いた窒素酸化物 NO <sub>2</sub> の電気分解 | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学)  |
| <b>プロセス設計学分野</b> |  |                           |
| 市 川 貴 之          | Pt, Rhナノクラスターの構造と相安定性の第一原理計算                             | 京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学) |
| 井 上 雄 貴          | 配位数分析法の開発  | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学)  |
| 李 征 宇            | ポータブル質量分析装置の開発   | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学)  |
| 森 川 悠 佑          | スペクトル分析ソフトの開発とその応用                                       | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学)  |
| <b>マイクロ材料学分野</b> |  |                           |
| 上 原 脩 司          | LCD配線としてのCu(Ti)合金薄膜の低抵抗化                                 | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学)  |
| 金 谷 徹            | 陽電子消滅によるオーステナイト系耐熱合金のクリープ損傷過程の研究                         | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学)  |
| 田 中 智 久          | Cu(Ti)合金膜を用いたバリア層自己形成技術のポラス低誘電率膜への応用                     | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学)  |
| 吉 住 翔            | A-USC発電用Ni基耐熱合金の陽電子消滅による研究                               | 航空大学校                     |
| <b>先端材料物性学分野</b> |  |                           |
| 垣 内 孝 則          | 水素終端Si表面下ドーパントのLBHのバイアス依存性                               | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学)  |
| 匂 坂 多佳実          | 新規リンカーを介した分子架橋の電子伝導特性                                    | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学)  |
| 田 中 宏 樹          | Al単原子接点の破断電圧   | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学)  |
| 山 本 樹            | Si酸化膜中のトラップ電荷のSTM-LBH計測                                  | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学)  |
| <b>量子材料学分野</b>   |  |                           |
| 大 阪 友 也          | 層状チタン酸化物のTi-K吸収端X線吸収スペクトルの理論計算                           | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学)  |
| 田 力 誠 也          | アルカリ土類金属酸化物擬二元系の平衡状態図計算                                  | 京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学) |
| 西 尾 尚 己          | ペロブスカイト型リチウムイオン伝導酸化物の作製と評価                               | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学)  |
| 喜 多 祥 章          | PLD法によるGa <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :Mn薄膜の作製と評価        | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学)  |
| 山 崎 亘            | PLD法によるZnO:Al過飽和固溶体薄膜の作製                                 | パナソニック株式会社                |
| 竹 内 秀 騎          | リン酸三カルシウム中の固溶元素の理論計算                                     | 愛知県産業技術研究所                |

| 氏 名              | 研究論文題目  | 就職先                       |
|------------------|---|---------------------------|
| <b>結晶物性工学分野</b>  |   |                           |
| 大橋 裕介            | FePd単結晶の変形における引張/圧縮非対称性   | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学)  |
| 落合 祐司            | TiAl PST結晶の外形拘束引張変形   | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学)  |
| 北村 友賢            | Mg添加RE <sub>2</sub> Ni <sub>7</sub> 基合金(RE=La,Ce,Pr,Nd,Sm,Gd)の相平衡と水素吸蔵特性                  | (株)日本航空                   |
| 北本 雄祐            | 二相組織を有するクラスレート化合物の熱伝導特性   | 京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学) |
| 田中 慎哉            | FePd単結晶の常磁性状態における磁気異方性  | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学)  |
| 永池 諒彦            | Ni基超合金の熱疲労特性と変形双晶   | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学)  |
| <b>先端材料機能学分野</b> |   |                           |
| 荒尾 亮             | 異常小角散乱法によるZr-Pd合金における晶出過程の解析  | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学)  |
| 土田 佳孝            | 被覆InAsナノドット構造における表面モホロジーと散漫散乱の関係の検討   | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学)  |
| 戸田 徳大            | 高温酸化物超伝導テープの臨界電流およびn値の引張負荷ひずみ依存性  | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学)  |
| 藤岡 和宏            | GA鋼板コーティング層の多重破断挙動に及ぼす調質圧延の影響   | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学)  |
| 高原 晋             |   |                           |
| <b>材料物理分野</b>    |   |                           |
| 高井 隼人            | 六方晶フェライトの構造と磁性  | (株)神戸教育研究所<br>久保田学園       |
| 金田 理史            | Dy <sub>x</sub> Y <sub>1-x</sub> Ru <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> における横磁場誘起スピングラス量子相転移の可能性 | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学)  |
| 高橋 顕             | 螺旋磁性体CuB <sub>2</sub> O <sub>4</sub> の単結晶育成と磁化測定  | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学)  |
| 寺澤 慎祐            | 三、四元素遷移金属窒化物の合成と、遍歴電子フラストレーションに由来する新規物性の探索  | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学)  |
| 山本 順輝            | 擬一次元磁性体Sb <sub>2</sub> VO <sub>5</sub> の基底状態と単結晶作成  | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学)  |
| 富岡 佑岐            | 液体アルカリ金属のX線小角散乱   | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学)  |
| 高木 健             | X線小角散乱による、Al-Zn-Mg-Cu基合金におけるAl <sub>3</sub> (Sc,Zr)粒子の析出課程の観察                             | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学)  |
| <b>機能構築学分野</b>   |   |                           |
| 江上 真人            | 化学吸着法によるジメチルシロキサン高分子ナノ薄膜形成  | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学)  |
| 藤川 皓太            | ソフトモールドを用いたSAMのパターン化成長  | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学)  |
| 藤村 元彦            | 固体基板表面へのイオン液体膜の形成   | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学)  |
| 山城 宏介            | VUVリソグラフィによる金ナノ粒子アレイの作製   | 京都大学大学院工学研究科<br>(修士課程進学)  |
| 張 唯一             | 中低温イオン液体浴からのFe-W合金電析  | 未定                        |

| 氏 名                                | 研究論文題目  | 就職先                       |
|------------------------------------|---|---------------------------|
| <b>エネルギー社会工学分野</b>                 |   |                           |
| 上原 昂                               | 水中超音波処理および熱処理を施したグラファイト微粉末のNO <sub>x</sub> 吸着分解能  | 京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学) |
| 岡本 基良                              | 反応性スパッタリングを用いたTiNベースpH電極の研究   | 日本放送協会                    |
| 坂口 和也                              | 表面改質を施したWO <sub>3</sub> 粉末の光触媒能および磁場の影響   | 京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学) |
| 芝 大輔                               | Ti/Wメカノケミストリーを用いた担持型ナノ光触媒の研究開発  | 京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学) |
| <b>高温プロセス分野<br/>(現 材料プロセス科学分野)</b> |   |                           |
| 植田 毅                               | 電解を利用する新しい炭素担持白金触媒作製法に関する研究   | 京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学) |
| 塩見 卓                               | Al-Fe合金電析に関する基礎研究   | 京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学) |
| 杉浦 崇                               | 電析と熱処理を組み合わせたCdTe薄膜作製に関する研究   | 京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学) |
| 藤田 尚芳                              | Al電析を利用するTiの表面処理  | 日本電気(株)                   |
| 水田 恒                               | RuCl <sub>2</sub> エチレングリコール溶液の紫外可視吸収スペクトルの測定  | 京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学) |
| <b>プロセス熱化学分野</b>                   |   |                           |
| 今西 正起                              | 劣質炭および廃木材由来炭素の圧壊強度  | 京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学) |
| 上田 智史                              | La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -MoO <sub>3</sub> 系複合酸化物の水への溶解度  | 京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学) |
| 林 広明                               | 劣質炭および廃木材由来炭素の燃焼速度  | 京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学) |
| 三宅 裕之                              | CaO-SiO <sub>2</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 系スラグへのPbの物理吸収  | 京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学) |
| 宮田 翔                               | Na <sub>2</sub> O-MoO <sub>3</sub> -La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 系およびNa <sub>2</sub> O-MoO <sub>3</sub> -CeO <sub>x</sub> 系の状態図 | 京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学) |

## 修士課程修了者

| 氏 名             | 研究論文題目   | 就職先        |
|-----------------|--|------------|
| <b>材料設計工学分野</b> |  |            |
| 位高 渉            | X線非弾性散乱と超音波スペクトロスコーピーによる金属ガラスの不均一構造の解析             | 三菱重工業(株)   |
| 神岡 なつみ          | スピネル型MgCo <sub>2</sub> O <sub>4</sub> の合成および電気伝導特性 | パナソニック(株)  |
| 田中 康弘           | 透明導電性TiO <sub>2</sub> 薄膜材における微細構造と電気的特性            | 新日本製鐵(株)   |
| 張 碩             | Zr基金属ガラスの結晶化挙動と構造安定性                               | ATカーニー(株)  |
| 中西 英貴           | Cuナノ粒子形成過程の熱力学的考察                                  | 住友軽金属工業(株) |
| 平井 浩介           | リチウムイオン電池負極の電極電位に及ぼす歪の影響                           | 住友金属工業(株)  |
| 広畑 隆太           | コヒーレントX線を用いた微細構造の可視化                               | 古河スカイ(株)   |

| 氏 名              | 研究論文題目   | 就 職 先                      |
|------------------|--|----------------------------|
| <b>表面処理工学分野</b>  |  |                            |
| 谷 口 元 一          | 水溶液からのプロトン伝導性チタンりん酸塩薄膜の作製  | (株)神戸製鋼所                   |
| 土 本 和 明          | イオン液体を用いた常温チタンめっき法の探索  | JFE スチール(株)                |
| 畑 田 直 行          | ポリリン酸ランタンの合成法とプロトン伝導性  | 京都大学大学院工学研究科<br>(博士後期課程進学) |
| 細 川 晃 平          | 水溶液からの Zn <sub>3</sub> P <sub>2</sub> 化合物半導体薄膜の電析                              | ホソカワミクロン(株)                |
| <b>プロセス設計学分野</b> |  |                            |
| 畠 山 想            | 低輝度X線を用いたポータブル蛍光X線装置による微小領域の元素分析   | トヨタ自動車(株)                  |
| 中 江 保 一          | Observation of Pulsed Electron Field Emission driven by a Pyroelectric Crystal | 京都大学大学院工学研究科<br>(博士後期課程進学) |
| Abbas Alshehabi  | Multilayer nano-characterization by a portable X-ray reflectometer             | 京都大学大学院工学研究科<br>(博士後期課程進学) |
| 原 田 博 規          | 小型液体電極プラズマ発光分光器を用いた有害元素の定性定量分析法の開発   | 独立行政法人 造幣局                 |
| 上 田 佳 典          | 蛍光X線スペクトル強度比に与える角度異方性に関する研究  | 日本電気(株)                    |
| <b>マイクロ材料学分野</b> |  |                            |
| 小 濱 和 之          | Cu(Ti)合金膜を用いたLSI配線用バリア層形成プロセスに及ぼす誘電体膜組成の影響                                     | 京都大学大学院工学研究科<br>(博士後期課程進学) |
| 佐 藤 大 樹          | Cu(Ti)合金薄膜の抵抗率と微細構造に及ぼす熱処理条件の影響  | パナソニック(株)                  |
| 武 田 英 久          | p, n-SiC両伝導型に同時にオーミック性を示すNi/Al電極の機構解明  | 三菱重工業(株)                   |
| <b>先端材料物性学分野</b> |  |                            |
| 磯 宏 弥            | Au単原子コンダクタンスに対する水素吸着の影響  | 住友商事(株)                    |
| 岩 田 圭 市          | Au合金単原子接点の破断電圧   | (株)リクルート                   |
| 吉 野 雄 介          | 炭素吸着Au(111)面のSTM観察   | 日産自動車(株)                   |
| <b>量子材料学分野</b>   |  |                            |
| 後 藤 和 宏          | 逆スピネル型複合酸化物における陽イオンの規則-不規則相転移  | 住友電気工業(株)                  |
| 中 島 信 也          | Pt-Ru固溶体における溶質原子配列の理論的検討   | 東洋エンジニアリング(株)              |
| 西 尾 哲            | 生体活性カルシウムリン酸塩における陽イオン固溶の第一原理計算   | シャープ(株)                    |

| 氏 名                      | 研究論文題目  | 就職先   |
|--------------------------|---|---|
| <b>結晶物性工学分野</b>          |   |   |
| 大橋 貴志                    | L12型Co <sub>3</sub> (Al,W)の力学特性   | マイクロンジャパン(株)  |
| 小庄 孝志                    | Ni <sub>3</sub> Sn <sub>2</sub> の空孔規則構造とリチウム拡散挙動の相関   | 日鉱金属(株)   |
| 小山 達也                    | Mn添加Ru <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> チムニーラダー化合物の結晶構造と熱電特性  | 新日本製鐵(株)  |
| 松本 竜司                    | La-Ni系合金の水素吸蔵特性に及ぼすブロック層構成比の影響  | JFEスチール(株)  |
| 王 晨                      | L10構造を有するFePd単結晶の塑性変形   | 日産自動車(株)  |
| <b>先端材料機能学分野</b>         |   |   |
| 窪島 成隆                    | 集束イオンビームを用いた人工き裂導入による細径繊維の破壊じん性値評価  | 三菱重工業(株)  |
| 中野 聡                     | 引張負荷ひずみ下におけるオープンセル型発泡金属のヤング率変化および破壊プロセス   | (株)神戸製鋼所  |
| 松林 央                     | BSCCO超伝導複合テープ材の曲げひずみ負荷時の臨界電流分布評価  | 日本ガイシ(株)  |
| <b>材料物理学分野</b>           |   |   |
| 梶並 佳朋                    | GaMo <sub>4</sub> S <sub>8</sub> 型磁性金属クラスタ化合物の磁性  | 大同特殊鋼(株)  |
| 田口 裕健                    | Ce系重い電子化合物の量子相転移  | 特許庁   |
| 直江 和明                    | BaV(Si <sub>1-x</sub> Sex) <sub>3</sub> の反強磁性絶縁体-強磁性金属転移  | (株)日立製作所  |
| 松田 紘典                    | 希釈イジング反強磁性体R <sub>x</sub> Y <sub>1-x</sub> Ru <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> (R=Ho,Dy)の低温磁性~横磁場誘起スピングラス量子相転移の可能性~ | 東京電力(株)   |
| <b>機能構築学分野</b>           |   |   |
| 伊藤 輝                     | イオン液体を用いた還元拡散によるCu-Sn合金形成   | (株)キーエンス  |
| 南條 信一郎                   | ケルビンプローブ原子間力顕微鏡による有機分子膜の表面/界面電子物性分析   | 関西電力(株)   |
| 畑中 剛司                    | 自己集積化単分子膜の真空紫外マイクロ加工  | ソニー(株)  |
| 夜久 智広                    | 水素終端化シリコンと二官能性分子の反応および自己集積化分子膜形成  | 東レ(株)   |
| 孫 慶蔚                     | フェロセン系自己集積化単分子膜のイオン液体中における電気化学  | Department of Environmental Health, School of Public Health, Harvard University |
| <b>エネルギー社会工学分野</b>       |   |   |
| 荒井 佳代                    | 炭化物のNO <sub>2</sub> 吸着・分解機構   | (株)日本航空インターナショナル  |
| 上田 純子                    | 特許情報を用いた研究発展分析手法の検討   | 三井住友銀行  |
| 北野 亮平                    | メカニカルミリングを施したMn及びMn酸化物の二酸化炭素との反応性   | 住友化学(株)   |
| 下谷 翔                     | 金属資源循環型社会システムの研究  | (株)NTT データ  |
| Jordi Cravioto Caballero | Evaluation of Road Transport Externalities  |   |



| 氏 名                                   | 研究論文題目                           | 就職先                             |
|---------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| 高温プロセス分野<br>(現 材料プロセス科学分野)<br>水 田 雄 二 | 定電位電解法によるAl-Zn合金電析               | 三菱マテリアル(株)                      |
| プロセス熱化学分野<br>桶 田 昌 嗣                  | スラグ中への塩素溶解度                      | 京都大学大学院エネルギー科学<br>研究科(博士後期課程進学) |
| 片 平 圭 貴                               | 溶銑脱硫の効率化                         | 新日本製鐵(株)                        |
| 衣 笠 貴 博                               | 劣質炭による酸化鉄還元のコ <sub>2</sub> メタラジー | (株)神戸製鋼所                        |
| 佐々木 太 郎                               | 石炭系炭材用バインダーの開発                   | 住友金属工業(株)                       |
| 西 野 修 司                               | CaO-Nepheline系スラグのサルファイドキャパシティ   | 新日本製鐵(株)                        |

## 博士後期課程修了者

| 氏 名                        | 研究論文題目   | 就職先   |
|----------------------------|--|---|
| 表面処理工学分野<br>今 宿 晋          | アクセプターをドーブしたジルコン酸バリウムの結晶<br>粒界の電気伝導度   | マサチューセッツ工科大学<br>(日本学術振興会特別研究員)  |
| プロセス設計学分野<br>Eko Hidayanto | Portable Elemental Analysis for Environmental<br>Samples (ポータブル装置を用いた環境試料の元素分<br>析)                                      | Department of Physics,<br>Faculty of Mathematics<br>and Natural Science,<br>Diponegoro University,<br>Indonesia |
| 佐々木 宣 治                    |  | 京都大学工学研究科技術職<br>員(平成20年度中退)   |
| 先端材料機能学分野<br>申 載 京         | Mechanical Behavior and Its relation to Superconducting<br>Property of High Temperature Composite Superconductors        | Samsung Electro-Mechanics<br>Co.  |
| 岩 本 壮 平                    | Analysis of Multiple Cracking and Interfacial<br>Debonding of Galvannealed Coating Layer under<br>Applied Tensile Strain | (株)小松製作所  |
| 機能構築学分野<br>金 永 鍾           | Vacuum ultraviolet surface modification of organic<br>materials  | 博士研究員(京都大学大学院<br>工学研究科材料工学専攻)   |
| 佐 野 光                      | シリコンに直接結合した自己集積化単分子膜の形成と<br>その応用   | 博士研究員(独立行政法人<br>産業技術総合研究所)  |
| 韓 智 元                      | Local anodic modification of Si substrates covered with<br>self-assembled monolayer by scanning probe<br>microscopy      | 博士研究員(京都大学大学院<br>工学研究科電子工学専攻)   |

## 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 |
|----------------------------|--|---------|--------------|-----|
| 表面処理工学分野<br>今 宿 晋          | アクセプターをドーピングしたジルコン酸バリウムの結晶粒界の電気伝導度   | 粟 倉 泰 弘 | 平成21年 3 月23日 |     |
| プロセス設計学分野<br>Eko Hidayanto | Portable Elemental Analysis for Environmental Samples (ポータブル装置を用いた環境試料の元素分析)                                       | 河 合 潤   | 平成20年 9 月24日 |     |
| 先端材料機能学分野<br>申 載 京         | Mechanical Behavior and Its relation to Superconducting Property of High Temperature Composite Superconductors     | 落 合 庄治郎 | 平成20年 9 月24日 |     |
| 岩 本 壮 平                    | Analysis of Multiple Cracking and Interfacial Debonding of Galvannealed Coating Layer under Applied Tensile Strain | 落 合 庄治郎 | 平成20年 9 月24日 |     |
| 機能構築学分野<br>金 永 鍾           | Vacuum ultraviolet surface modification of organic materials   | 杉 村 博 之 | 平成20年 9 月24日 |     |
| 佐 野 光                      | シリコンに直接結合した自己集積化単分子膜の形成とその応用   | 杉 村 博 之 | 平成21年 3 月23日 |     |
| 韓 智 元                      | Local anodic modification of Si substrates covered with self-assembled monolayer by scanning probe microscopy      | 杉 村 博 之 | 平成21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 |
|---------------------|----------------------|---------|--------------|-----|
| 表面処理工学分野<br>黒 崎 将 夫 | 電気亜鉛めっき鋼板の電析機構に関する研究 | 粟 倉 泰 弘 | 平成21年 3 月23日 |     |

水曜会誌卒業年次幹事制について

水曜会では、下記のような付則にもとづき卒業年次幹事を委嘱しております。年次幹事に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ご協力をお願いすることになります。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、水曜会会長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4年9月5日    | 中村 捨男 | 昭16           |
| 平成14年1月     | 大西 秀和 | 平4・金          |
| 数年前         | 猪村 稔  | 昭10・採         |
| 平成19年10月13日 | 伊藤 嘉紀 | 昭42・治         |
| 平成20年5月19日  | 藤谷 義  | 昭34・鉱         |
| 平成20年6月1日   | 鮫島 正五 | 昭16・採         |
| 平成20年6月     | 中川 一郎 | 昭23・鉱         |
| 平成20年10月2日  | 西 成基  | 昭15           |
| 平成20年11月3日  | 塩川 鏢一 | 昭25・治         |
| 平成20年11月8日  | 中川 弘昭 | 昭20・治         |
| 平成20年11月8日  | 大寺 康雄 | 昭49・金         |
| 平成20年11月10日 | 森山徐一郎 | 昭16・採<br>名誉教授 |
| 平成20年11月12日 | 齋藤 康  | 昭18・治         |
| 平成20年11月25日 | 岩佐 治夫 | 昭16           |
| 平成20年11月    | 足立 隆彦 | 昭35・治         |
| 平成20年12月10日 | 中島 朗  | 昭23・鉱         |
| 平成20年12月15日 | 中村 陽二 | 名誉教授          |
| 平成20年12月21日 | 杉本 和夫 | 昭27・鉱         |
| 平成20年12月    | 古賀 秀人 | 昭30・治         |
| 平成21年1月16日  | 山本日出雄 | 昭26・鉱         |
| 平成21年1月17日  | 平松 良雄 | 昭13・採<br>名誉教授 |
| 平成21年1月30日  | 八木 友蔵 | 昭23・治         |
| 平成21年1月     | 松田 佑  | 昭27・治         |
| 平成21年2月9日   | 塩田 啓典 | 昭30・治         |
| 平成21年2月20日  | 竹村 友之 | 昭43・資源        |
| 平成21年2月     | 高橋 克侑 | 昭34・鉱         |
| 平成21年3月15日  | 尾崎 忠彦 | 昭32・治         |
| 平成21年3月31日  | 岡田 時一 | 昭33・鉱         |
| 平成21年4月9日   | 神谷 隆三 | 昭30・鉱         |

|            |       |               |
|------------|-------|---------------|
| 平成21年4月25日 | 朝木善次郎 | 昭35・治<br>名誉教授 |
| 平成21年5月1日  | 田辺 定男 | 昭26・治         |

教室報告

<旧資源系>  
宇宙資源エネルギー学分野はミネラルプロセッシングに変更

教員人事

|            |                           |                 |  |
|------------|---------------------------|-----------------|--|
| <旧資源系>     |                           |                 |  |
| 平成21年3月1日  | 水戸 義忠                     | 准教授に昇任          |  |
| 平成21年4月30日 | Miranda Caetano Rodrigues | 辞職（任期満了）        |  |
| 平成21年5月31日 | 尾西 恭亮                     | 辞職（転任）          |  |
| 平成21年7月1日  | 武川 順一                     | 助教に採用           |  |
| 平成21年7月16日 | Liang Yunfeng             | 特定助教に採用         |  |
| 平成21年10月1日 | 薛 自求                      | 准教授に昇任          |  |
| <旧金属系>     |                           |                 |  |
| 平成21年3月1日  | 辻 伸泰                      | 教授に採用           |  |
| 平成21年3月1日  | 井上 耕治                     | 助教に採用           |  |
| 平成21年3月31日 | 粟倉 泰弘                     | 定年退職            |  |
| 平成21年3月31日 | 山本 孝                      | 助教辞職（転任）        |  |
| 平成21年3月31日 | 松田 和博                     | 助教（理学研究科）に異動    |  |
| 平成21年4月1日  | 寺田 大将                     | 助教に採用           |  |
| 平成20年4月1日  | 小山 幸典                     | 助教（産学連携センター）に異動 |  |
| 平成21年8月1日  | 井上 耕治                     | 講師に昇任           |  |
| 平成21年8月1日  | 大場 史康                     | 准教授に昇任          |  |

## 水曜会誌投稿規定

(昭和62年4月23日改訂)  
(平成21年10月20日一部改訂)

### 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（25×48行×2列）であり、表題および英文概要は刷上り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  
京都大学工学部8号館内  
水曜会宛

- (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に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にする。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。

## 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 21 年 度 水 曜 会 誌 編 集 委 員

|     |              |              |         |         |  |  |  |
|-----|--------------|--------------|---------|---------|--|--|--|
| 委員長 | 酒 井 明        |              |         |         |  |  |  |
| 幹 事 | 村 田 澄 彦 (会誌) | 宇 田 哲 也 (広告) |         |         |  |  |  |
| 委 員 | 中 村 裕 之      | 長谷川 将 克      | 馬 溯 守   | 小 野 玲 児 |  |  |  |
|     | 水 野 正 隆      | 佐 藤 彰 洋      | 川 分 康 博 | 安 田 秀 幸 |  |  |  |
|     | 中 根 徹 裕      | 葛 谷 俊 博      | 山 本 真 哉 | 山 下 善 弘 |  |  |  |
|     | 宇津木 慎 司      | 雨 宮 清        | 木 戸 俊 郎 |         |  |  |  |

平成21年10月25日 印刷 平成21年10月30日 発行

編 集 兼  
発 行 者  
印 刷 者

落 合 庄 治 郎

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

606-8501

水 曜 会

京都市左京区吉田本町  
京都大学工学部8号館内

電話 (075) 753-5930 (月・木曜日)

振替口座 京都 01090-8-26568 水曜会

銀行口座 みずほ銀行出町支店 普通 1242526 水曜会

# クリスマスツリーからの プレゼント

”クリスマスツリー“を通して地球から贈られてくる  
石油や天然ガスなど、未来への希望をつなぐ  
貴重なプレゼントを皆さまのもとへ安定供給。



石油、天然ガスの採掘井に取り付けた地上の設備で、バルブを組み合わせた形から“クリスマスツリー”と呼ばれている



**JAPEX**  
石油資源開発株式会社  
<http://www.japex.co.jp/>

**コベルコ**【KOBELCO】（株）神戸製鋼グループの事。  
神戸製鋼グループ百数十社の統一ブランドとして、日本のみならず、世界でも広く使用されている。●「」のものづくりは、とても信頼できる。「」のオンリーワン製品は、世界中で活躍している。

**KOBELCO**  
神戸製鋼グループ

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



**日本軽金属株式会社**

〒140-8628 東京都品川区東品川2-2-20 天王洲船ビル  
TEL.03-5461-9333 URL <http://www.nikkeikin.co.jp>

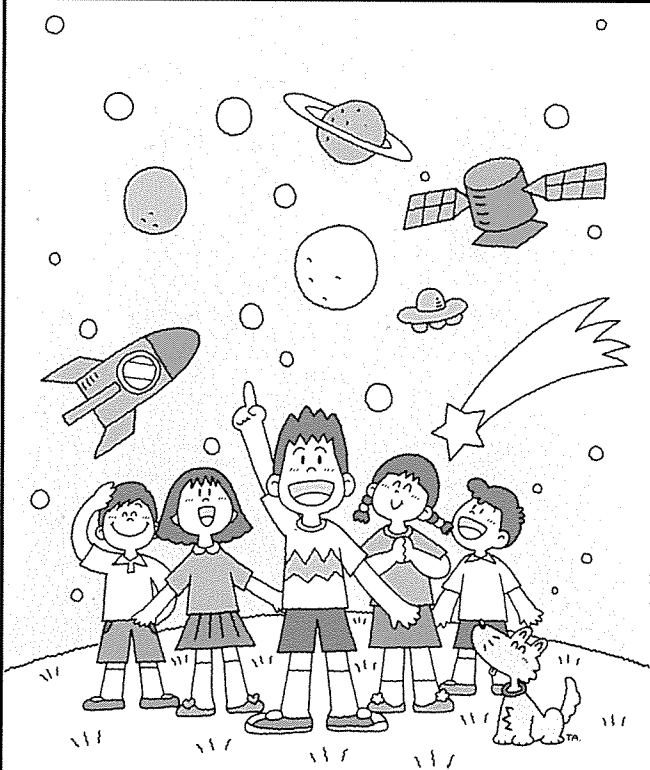
ほら、  
未来が見えてきた。



地球をとりまく環境に黄色信号が  
点滅するいま、より軽く、より強  
く、よりリサイクルしやすい素材  
が求められています。  
子供たちのために、そして、こ  
れからの社会のために。  
アルミニウムの進化とともに、  
あたらしい未来がはじまります。

## 未来、承ります。

あなたが描いている未来は、どんな姿ですか。  
人や地球への思いやりが欠かせない21世紀。  
新しい時代にふさわしい金属として、  
注目を集めているのがアルミニウムです。  
街、ビル、車、そしてリサイクル…。  
アルミニウムを通した豊かな未来づくり、  
住友軽金属にお任せください。



 **住友軽金属**

〒105-8601 東京都港区新橋5丁目11番地3号  
TEL.03(3436)9700 FAX.03(3434)6464  
<http://www.sumitomo-LM.co.jp>

# Suiyōkwai-Shi

TRANSACTIONS OF THE MINING AND METALLURGICAL  
ASSOCIATION  
KYOTO

## CONTENTS

|   |                           |
|---|---------------------------|
| <b>Retirement Memorial Lectures</b>                                   |                           |
| Materials Processing and Experiments .....                            | Yasuhiro AWAKURA..... 159 |
| <b>Memorial Lecture in the Annual Meeting of Suiyokwai</b>            |                           |
| The measures for conservation of global environment in steel industry |                           |
| – In the case of Sumitomo Metals – .....                              | Hiroshi TOMONO..... 176   |
| One can not reveal what one does not see                              |                           |
| – the mysterious world of rock mass – .....                           | Satoshi HIBINO..... 193   |
| <b>Forum</b>  |                           |
| Ultrafine Grained Metallic Materials .....                            | Nobuhiro TSUJI..... 206   |
| For explorations of the underground world .....                       | Tadanori GOTO..... 213    |
| Dynamics of positronium in ionic crystals .....                       | Koji INOUE..... 218       |
| First-Principles Study on Positive Electrode Materials                |                           |
| of Lithium-Ion Batteries .....  | Yukinori KOYAMA..... 221  |
| Quantitative image analysis of inhomogeneous deformation              |                           |
| in polycrystalline metals .....                                       | Daisuke TERADA..... 226   |
| A revisit to songs of “Lake Biwa Rowing Song (Biwako Shuko no Uta)”   |                           |
| and of Mt.Fuji Entirely Covered with Snow .....                       | Masahiro KOIWA..... 232   |
| The Money Philosophies of Mr.Kounosuke Matsusita .....                | Yoshio ATSUTA..... 240    |
| Natural Environment of Northeastern Tohoku, a Symbol that Fosters     |                           |
| a Well-rounded Being with a Heart that Relishes the Mother Nature     |                           |
| .....   | Kentaro SUGIMURA..... 245 |
| <b>Current Studies in Laboratories</b> .....                          | 250                       |
| <b>Suiyokwai Information</b> .....                                    | 273                       |
| <b>Letter to Editor</b> .....   | 316                       |