

水曜会誌

第23卷 第8号

目 次

退職記念講演

- 超音速自由噴流 石井 隆次 865

大会記念講演

- 自動車のグローバル化とともに 林 稔 868
地震・津波・火山噴火現象と物理探査 三ヶ田 均 874

講 座

- 金属学とその研究手法の進歩 - 研究生活を顧みて [IV] 村上陽太郎 883

談 話 室

- 11月祭の歴史について 松田 陽一 899
有限要素法による対向液圧成形解析プログラムの開発 浜 孝之 905
電磁波の目で不飽和帯を見る 尾西 恭亮 908
金属の歴史 松原英一郎 913
結晶の対掌性決定のための新しい電子回折法 乾 晴行 916
松下幸之助論／「鳴かぬならそれもまたよしホトトギス」 熱田 善男 921

- 研究速報 928

- 会 報 951

- 会員消息 958

- 卒業者名簿 968

平成17年10月30日発行

京 都 大 学

水 曜 会

創業以来60余年

私たちは合金生産技術の可能性を

追求しています。

非鉄 中間合金

りん銅、マンガン銅、けい素銅、
ボロン銅、鉄銅等

銅合金 鋳造加工

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



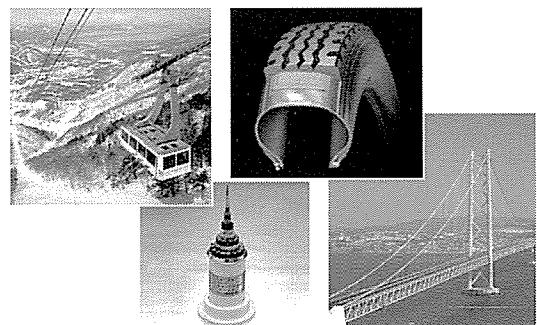
株式会社 大阪合金工業所

本社 〒910-3131 福井市白方町第45号5番地9
大阪 〒567-0005 茨木市五日市1丁目2番1号
東京 〒104-0031 東京都中央区京橋3丁目9番4号

TEL (0776)85-1811(代) FAX (0776)85-1313
TEL (0726)26-1313(代) FAX (0726)26-1353
TEL (03)3563-0301(代) FAX (03)3563-0302

東京製綱株式會社

地球をデザインする



本 社 東京都中央区日本橋室町二丁目3番14号(古河ビル) TEL.(03)3211-2851

銅索鋼線事業部
大 阪 支 店 〒103-8306 TEL.(03)3211-2851
堺 市 築 港 新 町 二 丁 6 - 1
〒592-8331 TEL.(072)245-3418

エンジニアリング事業部
大 阪 支 店 〒541-0054 TEL.(06)6252-1821
名 古 屋 支 店 〒460-0008 TEL.(052)218-5577

九 州 支 店 北 九 州 市 小 倉 北 区 高 浜 一 丁 目 3 番 1 号 TEL.(093)513-6111
〒802-0021 TEL.(093)513-6111
札 幌 支 店 札幌市中央区北二条西三丁目1番地(越山ビル) TEL.(011)241-8256
〒060-0002 TEL.(011)241-8256

仙 台 支 店 仙台市青葉区一番町二丁目1番2号(仙台長和ビル) TEL.(022)263-3811
〒980-0811 TEL.(022)263-3811

研 究 所 茨城県かすみがうら市穴倉5707 TEL.(029)831-2222
〒300-0195 TEL.(029)831-2222

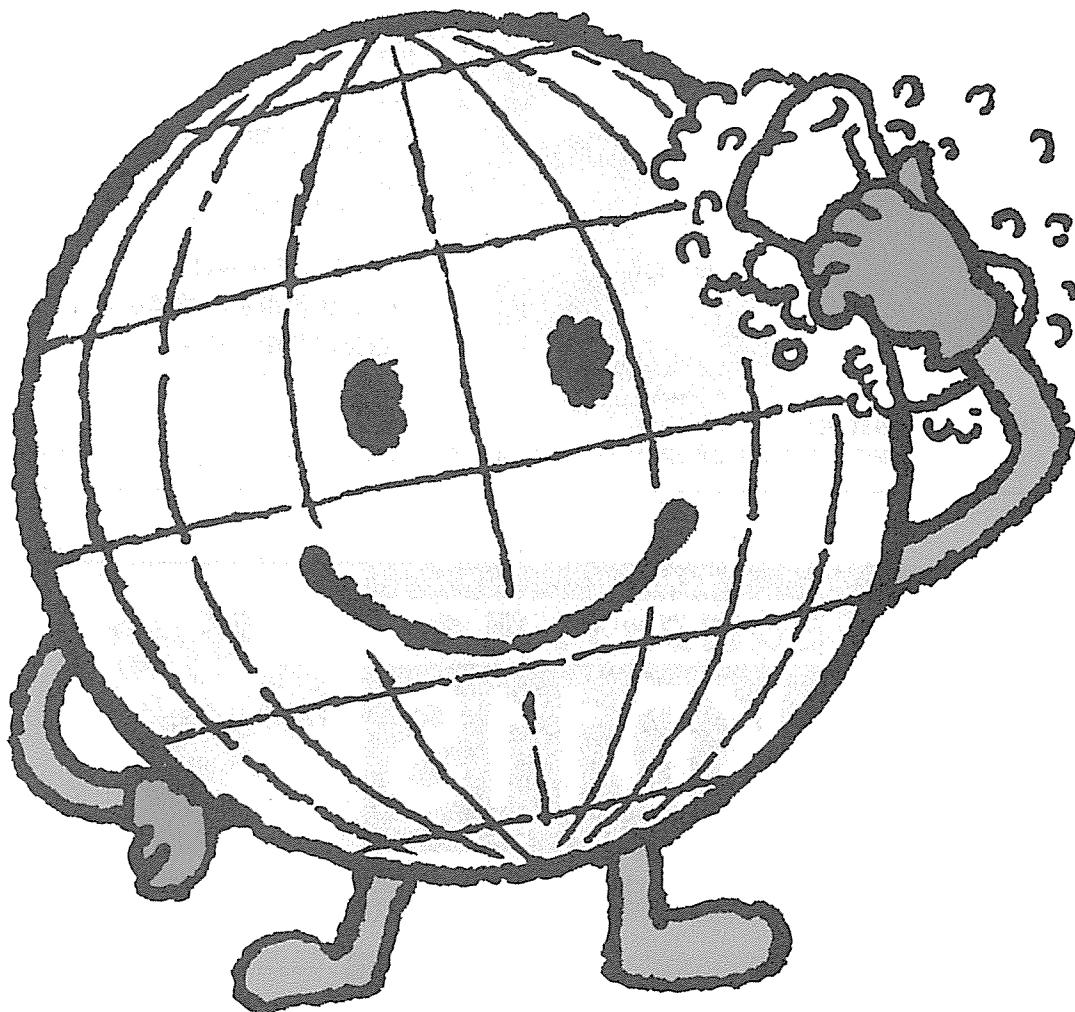
上 海 事 務 所 上海市夢山閣路83號新虹橋中心大廈2011室 TEL.+86-(0)21-6236-8788

土 浦 工 場 茨城県かすみがうら市穴倉5707 TEL.(029)831-2222
〒300-0195 TEL.(029)831-2222

堺 工 場 堀 市 築 港 新 町 二 丁 6 - 1 TEL.(072)245-3493
〒592-8331 TEL.(072)245-3493

DOWA

地球をリサイクリン。



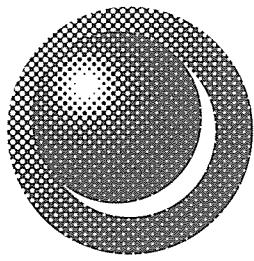
地球環境を守り、快適な暮らしを実現するために、
同和鉱業は非鉄製錬技術を活かして、
情報通信、自動車関連、環境などの分野に貢献しています。

——技術で資源と仲良く——

同和鉱業

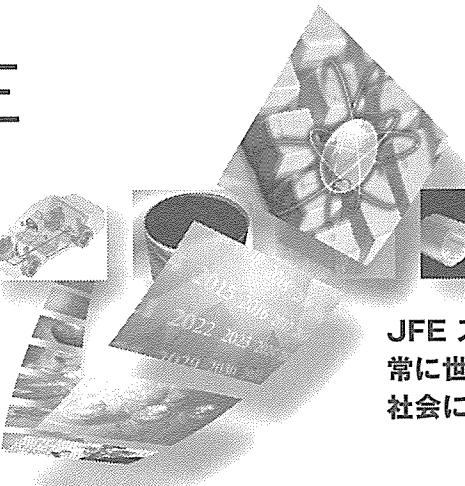
〒100-8282 東京都千代田区丸の内 1-8-2
TEL. 03-3201-1062 (大代表)

ホームページアドレス <http://www.dowa.co.jp/>



JFE

挑戦・柔軟・誠実 JFE スチール



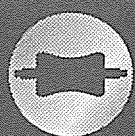
JFE スチールは、
常に世界最高の技術をもって
社会に貢献します。

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>

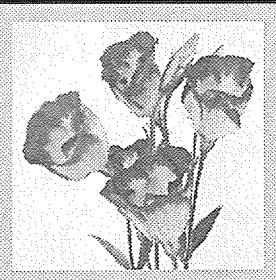
MICRO FINE

● ミクロファイン鋼 ●

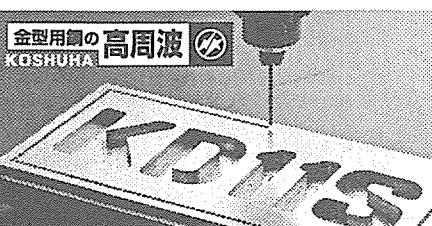


KD11S

NIPPON KOSHUHA STEEL CO., LTD.



抜群の加工性を誇る汎用冷間ダイス鋼。



金型用鋼の高周波
KOSHUHA

第39回
日本塑性加工学会賞
技術開発賞 受賞!

KD11Sの特長

KD11Sは、被削性を驚異的に向上させた
新しいタイプの汎用冷間ダイス鋼です。

1 抜群の加工性。

- 工具寿命の延長と、加工能率改善が可能です。
- 仕上切削加工面がとても綺麗です。
- 熱処理後の切削加工が可能です。

2 優れた金型寿命。

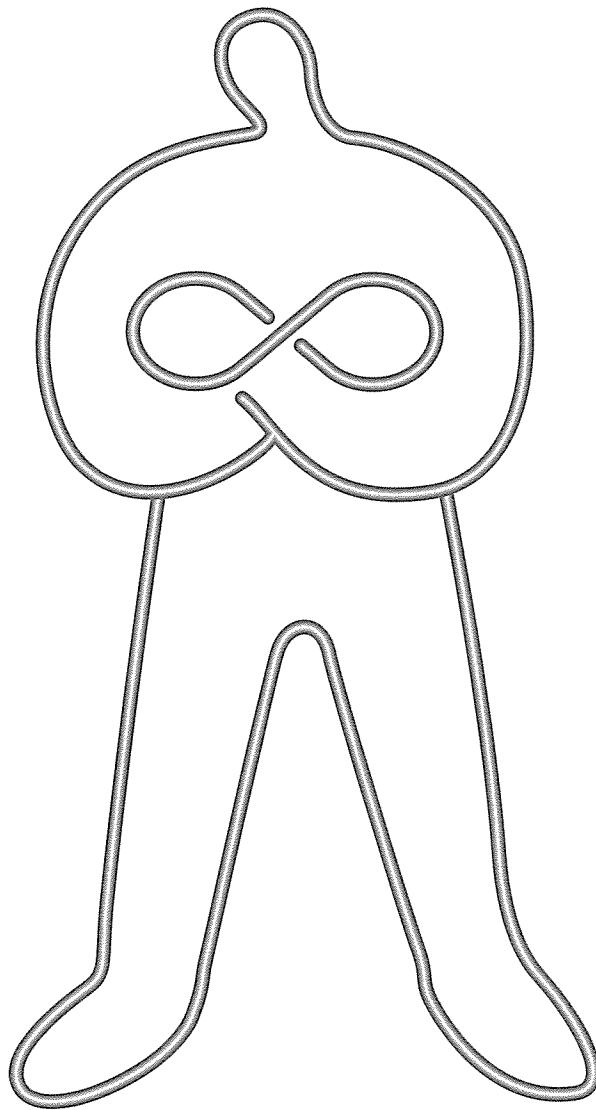
- 満足のいく金型寿命、品質向上が得られます。
- 冷間ダイス鋼としてハイテン材の曲げ、
絞りにも対応します。



日本高周波鋼業株式会社

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

メタルスタイルリスト



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

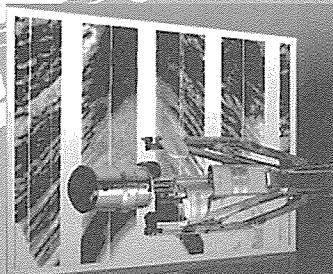
TEL(075) 581-2161 FAX(075) 581-7271

東京支店／名古屋支店／関西支店／滋賀工場

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

Schlumberger

We provide the world-wide technology



Logging services

FMI /FMS

(フォーメーションマイクロイメージヤー)

フランチャイズ解析、坑壁画像解析、

コアイメージ分析に有効

使用範囲: 100mm~600mm径

詳細は下記までお問い合わせください。

長岡事業所

Tel 0258-24-9600 Fax 0258-24-9620

新潟県長岡市北陽2-14-30

ofs-japan@slb.com

東京事業所

Tel 03-3431-0997 Fax 03-3431-1779

東京都港区浜松町2-7-1ハウス浜松町ビル7F

gq-tko-support@slb.com

シュルンベルジェグループ

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 京 都 市 左 京 区 川 端 丸 太 町 東 入 ル (075) 751-7755 代
F A X (075) 751-0294

滋賀営業所 〒523 滋 賀 県 近 江 八 幡 市 古 川 町 1173-68 (0748) 36-6682
F A X (0748) 36-6683

もっとグローバルに。鉄ビジネスは、生まれ変わる。

日本の鉄鋼業はいま、新しい時代の扉を開いています。技術力で競い合い、総合力を高め、次のグローバルスタンダードを創造する時代です。世の中は、ますます鉄の進化を求めていきます。新日鉄は、ヨーロッパの鉄鋼メーカー「アルセロール」、韓国の「POSCO」、そして国内の鉄鋼メーカーと提携するなど、より付加価値の高い鉄を提供できるよう、新たなビジネスモデルの構築を進めてきました。これからは、さらに進化した鉄を、世界中にお届けしていきたいと考えています。お客様それぞれに、魅力ある素材とソリューションを提供しつづける、最強のパートナーをめざして。新日鉄を超えていく新日鉄を見てください。

お問い合わせは広報センター Tel.03-3275-5021

あなたのために
新日鉄。
あ
最強に
なりたい。

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

たまいまホームページにて、新日鉄の動く絵本「新・モノ語り」が好評連載中! ぜひお見逃しなく。

SET

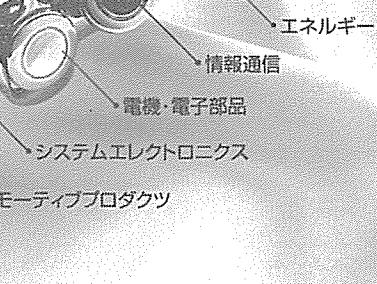
素敵な未来を奏でたい。

パッドの上で指が踊り、美しい音色が心に響く。

それは全てのパッドが役割を果たしてこそ心に届くもの。

このフルートのように、一世紀の間に蓄積した技術で心に響く未来を創る、

それが住友電工なのです。

- 
- エネルギー
 - 情報通信
 - 電機・電子部品
 - システムエレクトロニクス
 - オートモーティブプロダクツ
 - ニューマテリアル
 - エンジニアリング

明日を素敵に創りたい

住友電工

大阪本社 〒541-0041 大阪市中央区北浜4-5-33 ☎06-6220-4119 東京本社 〒107-8468 東京都港区元赤坂1-3-12 ☎03-3423-5111 URL <http://www.sei.co.jp/>

楽々e俱楽部®

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。



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

安心
・日本ベリサイン加盟
(お客様の情報を守ります)

詳しくはホームページをご覧下さい

<http://www.ippp.co.jp>
<https://ippp.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俱楽部 FAX 06(6443)5815

鉄づくりをコアに、時代環境の変化に柔軟に対応

ONWARD UPWARD

◆住友金属

〒104-6111 東京都中央区晴海1丁目8番11号

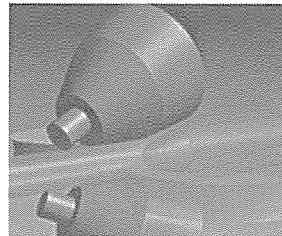
(トリトンスクエアオフィスタワーY)

連絡先：人事労政部人事室 宮川／阿部

TEL：03-4416-6160

HP：<http://www.sumitomometals.co.jp/>

Eメール：recruit@sumitomometals.co.jp



美術印刷、出版印刷、
商業印刷をはじめ、
SPツールやアート関
連などにわたる幅広
い事業領域。

情報事業

Webコンテンツの企画
制作からデジタルアーカ
イブやデータベースシス
テムの構築まで情報処理・
加工の最前線に展開。

印刷事業

産業資材事業

携帯電話や家電・OA機器か
ら自動車に至るまで、製品表
面に意匠性や機能性を付加
する独自技術で世界をリード。

電子事業

液晶ディスプレイ関連製品や精密
電子部品の製造など、情報化社会
の進展を精密技術でサポート。

Impression Technology

インプレッション・テクノロジーは、伝統の印刷技術を応用発展させた高品位で精緻な表現技術。形あるもの全てに高度な意匠性や機能性を付加するニッシャ独自のブランド技術として、皆さまに確かな価値と心からの感動をお届けしています。

NIESCHA
日本写真印刷株式会社

本 社：京都市中京区壬生花井町3 〒604-8551 TEL(075)811-8111(大代表)
東京支社：東京都千代田区一ツ橋1-1-1パレスサイドビル 〒100-0003 TEL(03)5252-7200(代表)
事 業 所：京都 東京 大阪 名古屋 神戸 高松 長野 千葉 加賀 亀岡 久美浜 シカゴ サンディエゴ ダラス
ブランチ：デトロイト デュッセルドルフ ヘルシンキ コペンハーゲン ロンドン ソウル クミ
グンポ 北京 上海 香港 台北 クアラルンプール 広州 昆山



総合建設コンサルタント



自然と人を技術で結ぶ。

大阪本社／大阪市北区本庄東2-3-20
東京本社／東京都江東区新大橋1-12-13
<http://www.newjec.co.jp>

TEL. 06-6374-4901
TEL. 03-5625-1801

ZAM

日新製鋼は、ZAMを通じて
お客様の無限の可能性を拡げていきます。

詳しくはホームページをご覧ください。
www.zam.biz

ZAMとは、亜鉛-アルミニウム6%、マグネシウム3%のめっき層を持つ新しい溶融めっき鋼板です。

さまざまな形状が
ご提供可能です。

ZAMは、「性能」「コスト」「環境」の“トリプルメリット”。

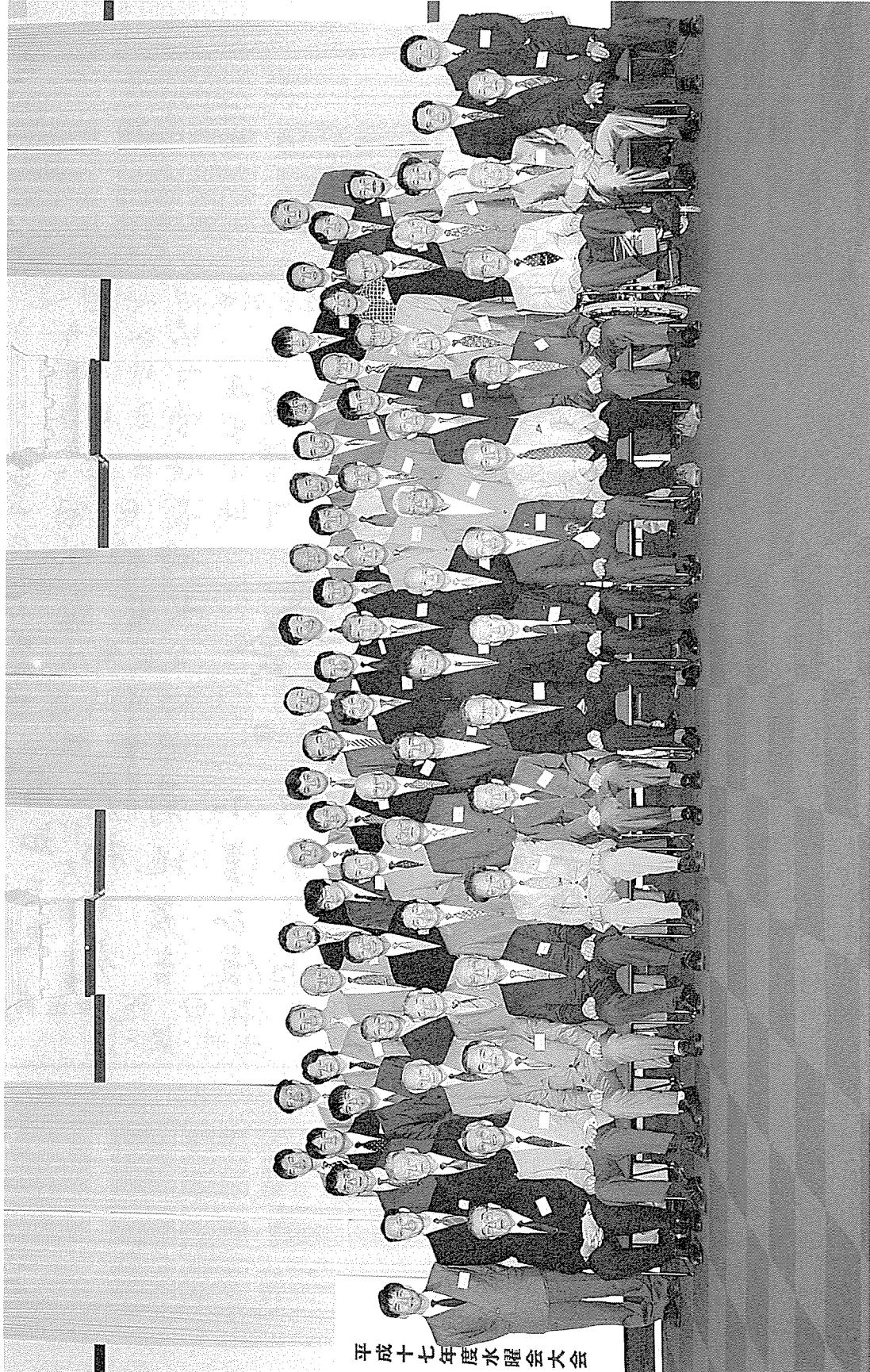
性 能 亜鉛めっき製品（当社製品名ヘンタイトB）に比べて10~20倍の耐食性。
亜鉛-5%アルミめっき製品（当社製品名ガルタイト）と比べても5~8倍の耐食性を誇ります。

コ 料 廉食環境の厳しい用途に耐え得ることから、熱浸漬溶融亜鉛めっき（兼めつき）やユニクロめつきの代替としてご使用いただけ事ができ、お客様の工程省略が図れます。

環 境 「少ないめっき付着量で高耐食性が得られる」、「長寿命化が図れる」という観点から、省資源対応の製品としての展開が期待されています。

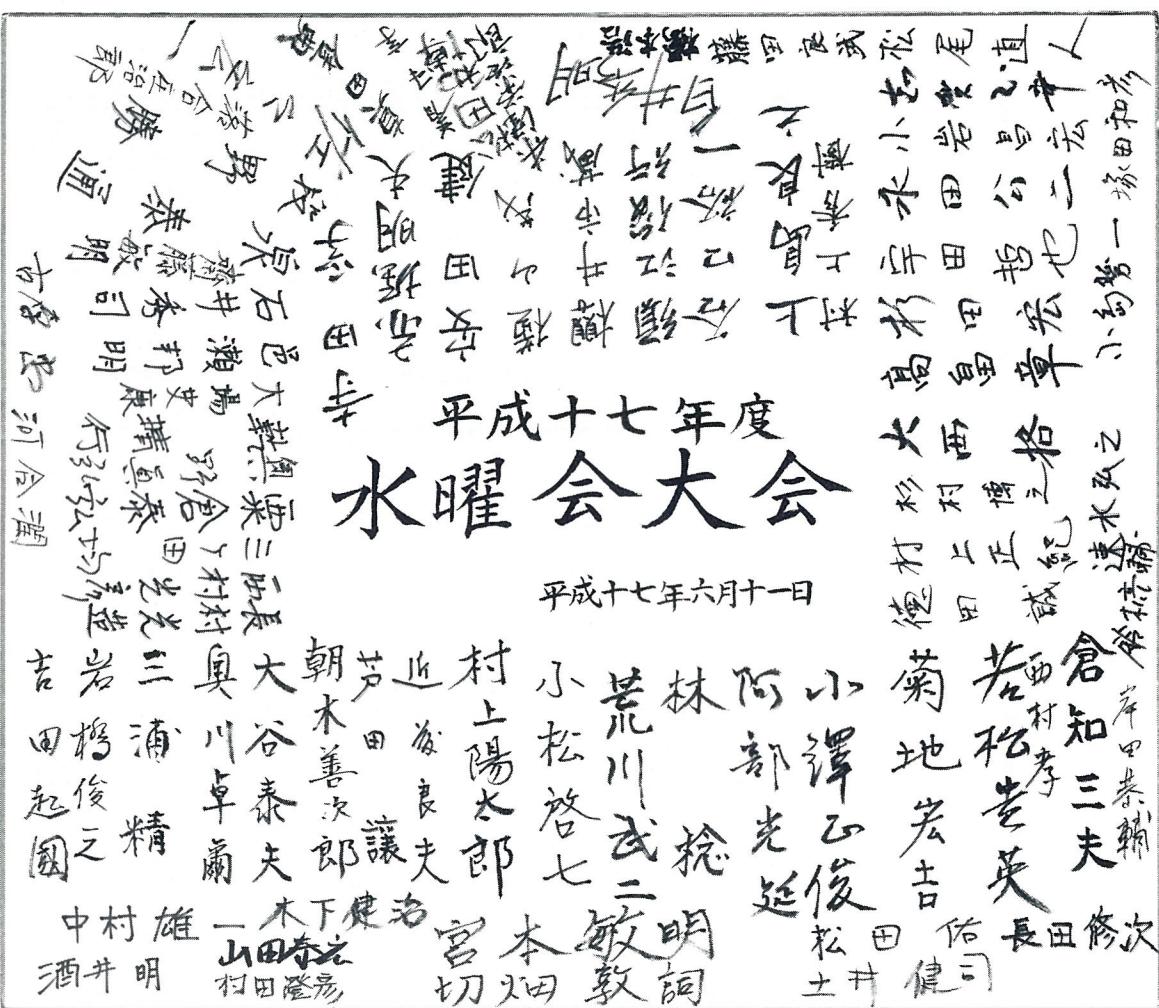
日新製鋼株式会社 〒100-8366 東京都千代田区丸の内3-4-1 新国際ビル
TEL.03-3216-5166

●建築基準法第37条第2号認定取得 ●日本住宅性能表示基準に従って表示すべき劣化対策等級（構造躯体等）の特別評価方法認定取得 ●建築施工技術・技術審査証明書取得 ●建設技術審査証明書取得（土木系材料）



平成十七年度水曜会大会

平成17年度 水曜会大会 記念写真（平成17年6月11日 京都大学百周年時計台記念館にて）



平成17年度 水曜会大会 懇親会寄せ書

退職記念講演

超音速自由噴流

石井 隆次*

Supersonic Free Jet

by Ryuji ISHII

1. はじめに

高圧気体をラバル（狭まり広がり）ノズルより外気中に噴射するときの噴流は超音速になり、超音速自由噴流が実現される。ロケットノズルやジェットノズルからの排気噴流などがその典型的な例である。その他ロケットの点火直後や圧力容器の破損時にもパルス状の非定常超音速自由噴流が発生する。また宇宙にはきわめて大規模な非定常超音速自由噴流、すなわち「宇宙ジェット」が多数観測されている。これらの超音速自由噴流中では気体力学的に非常に複雑な複数の現象が絡み合っており、その結果としてジェット全体として特異な構造と流動特性を示す。これら超音速自由噴流の構造と流動特性の解明はその工学的利用にとって不可欠である。

2. 超音速自由噴流の工学的利用

非定常超音速ジェットの研究はロケット発射台の設計や圧力容器の破損事故の被害予測などに重要であるが、最近はエアバッグや高速内燃機関の燃焼制御等にも非定常パルスジェットが利用されるようになった。しかし工学的利用としては定常超音速ジェットのほうが多く用いられている。

冶金工学では ALFR (Aerodynamic Levitation Flow Reactor) として試験物質を安定的に空中浮揚するために使用されている。この場合には静かな層流ジェットを実現するため（即ちレイノルズ数が 10^4 以下）、細いノズルと希薄な気体のジェットが採用されている。

一般には、レイノルズ数が 10^4 よりもはるかに大きな乱流ジェットが多く利用されている。ボイラーの伝熱管表面に付着したすすを除去するための Sootblower、岩

石の作孔、化学プラントの熱発生装置、廃棄物処理や高硬度材料の溶射のためのフレームジェット、熱強化ガラス表面の急冷のための超音速ジェットなどがある。

その他、液体あるいは固体微粒子を含んだ混相ジェットの利用としてガスアトマイゼーション(Gas Atomization)がある。これは金属粉末の精製法の一つで、溶融金属を超音速気流により飛散・凝固させ、粉化させる技術である。Sn, Zn, Pb, Sn-Pb, Cu, Cu 合金, Ni 合金, Co 合金、ステンレス鋼などほとんど全ての金属の粉末化が可能である。粉末の形状は金属の表面張力とアトマイズ条件に依存し、球状・粒状・涙滴状・不規則状の微粒子の形成が可能で、しかも量産に適している。これらの粉末は焼結機械部品、軸受、金属フィルター、溶射、電池、触媒などに利用される。

固体微粒子を含む超音速ジェットの利用技術としては、噴射加工技術としてのマイクロプラスト工法がある。これは粒子径 $1 \sim \text{数 } 10 \mu\text{m}$ の研磨材用固体微粒子を混入した高圧（約10気圧程度）気体を出口内径が $100 \sim 200 \mu\text{m}$ 程度のノズルから噴射するもので、シリコン、ガラス、セラミックス面の微細溝・穴加工に利用される。

3. 超音速自由噴流の構造

以下では超音速ジェットの基本的構造について述べる。そのため純粹に気体のみの噴流を扱う。

3.1 パルスジェット

実験的に再現性の保証された非定常ジェットとしては、衝撃波管を用いたパルスジェットがある。これは図 1 に示すように、ステンレス製の内管内の高圧室 A と低圧室 B を隔てる隔膜を破ることにより、高圧側の気体を低圧室側に押し出し、その全面に衝撃波を形成させる。衝撃波は右側に伝播し、低圧室の気体を圧縮、同時に右側に加速する。そのため衝撃波が低圧室の右端から

*京都大学名誉教授

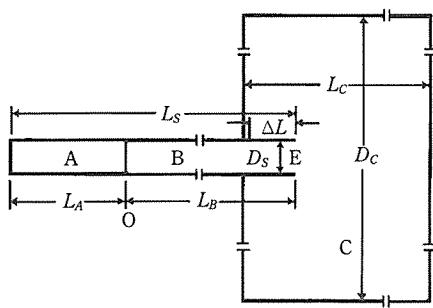


図1 衝撃波管実験装置

$L_A=40\text{ cm}$, $L_B=70\text{ cm}$, $L_C=36\text{ cm}$, $D_S=2\text{ cm}$,
 $D_C=32\text{ cm}$

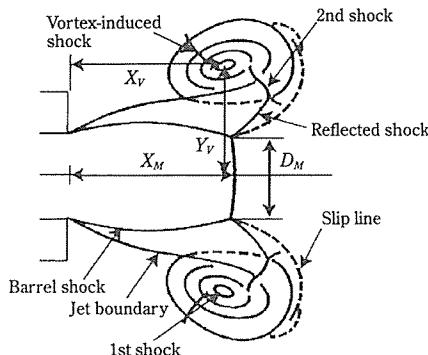


図2 パルスジェットの構造

観測室Cに入る瞬間に、低圧室内の気体はパルス状に観測室に押し出され、非定常ジェットを形成する。この時のジェットの強さは初期の高圧室の圧力 p_4 と低圧室の圧力 p_1 の比 p_4/p_1 で一意的に決定され、 $p_4/p_1 \geq 5$ では超音速ジェットになる。図2には圧力比が10以上の強いパルスジェットのある瞬間の構造が説明されている。

圧力比25の場合のシュリーレン可視化実験結果は図3に示されている。写真的露光時間は約 $2\mu\text{sec}$ であり、各図の下に記された時間は衝撃波が管端から観測室に入射（低圧室の気体が観測室に噴出開始）後の経過時間である。衝撃波、渦、密度および速度不連続面等が複雑に絡み合った構造になっていることが分かる。特に管の出口に形成される大きな1次渦は、マッハディスク外側から生ずるスペリ面に発生する多数の2次渦群と共にジェット気体と外気体との急激な混合を引き起こす。この性質が高速燃焼器に利用されている。

図4には圧力比50のパルスジェットの実験結果に対する数値解析結果（等密度線図）が示されている。数値解析ではオイラー方程式についてTVDスキームが用いられた。数値解析は実験結果を非常に良く説明していることがわかる。

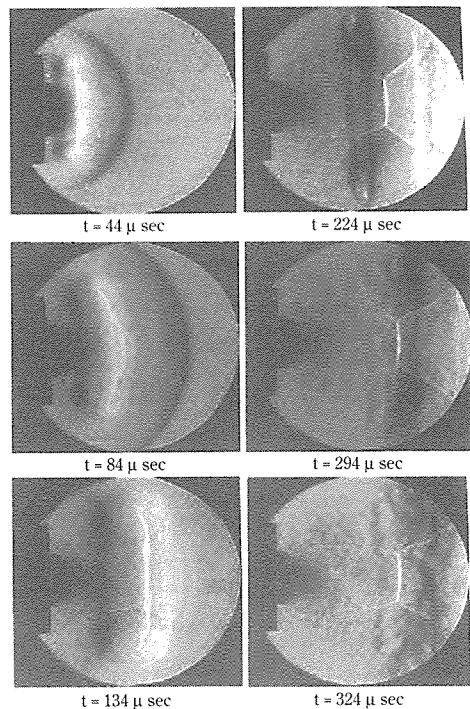


図3 圧力比25のパルスジェットの時間発展

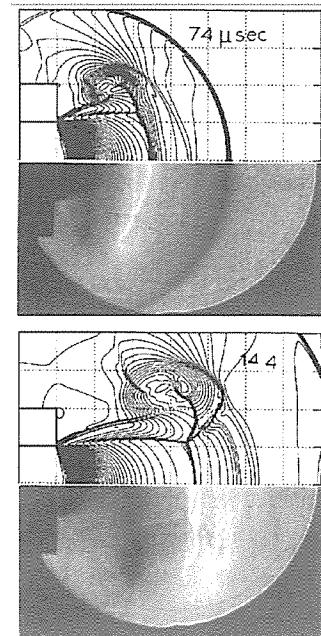


図4 圧力比50のパルスジェットの実験と数値解析結果

3.2 準定常ジェット

定常な超音速ジェットは通常の超音速風洞で簡単に実現できる。貯蔵槽の圧力 p_0 と大気（外気）の圧力 p_∞ の

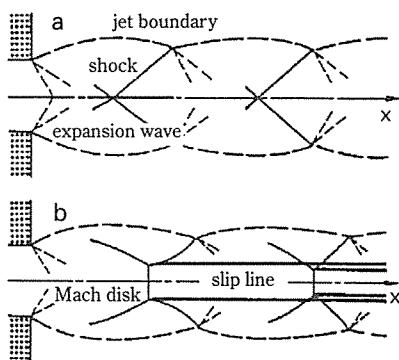


図5 準定常ジェットの構造

比、 $R = p_0/p_\infty$ 、が1.9以上で超音速ジェットになる。この超音速自由噴流は（通常はレノルズ数が大きく）本質的に不安定であり、自励振動を起こし、いわゆるスクリーチという強い音波を発生し、航空機のジェット騒音の大きな原因となっている。結果的に完全な定常超音速ジェットは存在せず、準定常ジェットと呼ぶのが適切である。

典型的なジェットの構造は図5に示されている。これらは並行円形ノズルから噴出されたソニックジェットで、ノズル出口で気体のマッハ数は1であり、ジェット内気体の圧力は外気圧より高くなっている（不足膨張ジェット）。圧力比Rが4以下では、図5aのように衝撃波セル構造はすべて斜め衝撃波からなっているが、圧力比が4以上では、図5bのように衝撃波セル構造の下流側に垂直衝撃波（マッハディスク）が形成される。いずれにしてもこれらの衝撃波セル構造は比較的の安定であり、ジェット全体は半径方向に大きく広がることはなく、かなり遠方まで直進する。この性質がSootblowerや噴射加工技術に利用されている。

図6は圧力比Rが3.5のジェットの可視化写真である。（露光時間は1/30 sec）。いくつかの衝撃波セル構造がはっきりと確認でき、ジェットの直進性がよく現れている。ところで、実際のジェットは超音速で流れしており、その瞬間的な姿は1/30秒の写真では見ることができない。図7は露光時間が2μsecの可視化写真である。この写真ではジェット内の流れはほぼ静止して見える。この写真の上のジェットは図6と同じジェットであり、両者には際立った相違があるのが理解できる。図6のジェットは真のジェットの時間平均的姿を表していると考えることができる。図7のジェットでは第一セル構造は全体的に安定で、時間的変動は大きくない。しかし第二以後のセル構造は軸対称から大きく変形し、その時間変動が著しい。これは主にジェット境界の不安定性により引き起こされる現象である。ノズル出口近傍のジェット境界は特に不安定で、下流からの圧力波により刺激され、

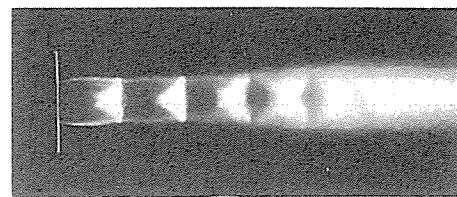
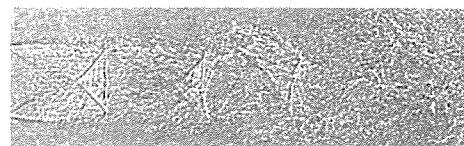
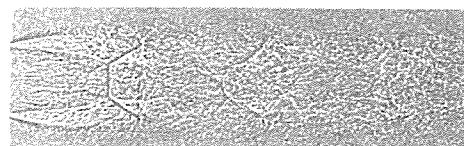


図6 準定常ジェットの長時間露光写真



R=3.51



R=6.03

図7 準定常ジェットの瞬間写真

リング渦を形成する。このリング渦は流れにより下流に流され、衝撃波セル構造下流部の斜め衝撃波と干渉し、強いパルス状の圧力波を発生する。この圧力波がジェットの外側の外気中を上流側に伝播し、再度ノズル出口近傍のジェット境界を刺激し、リング渦を形成させる。このようなフィードバック機構によりジェット全体がある特定の周波数で自励振動する。このときに発生する強い音波はスクリーチトーンと呼ばれジェット騒音の原因となっている。しかし工学的にこの不安定性を利用したのがガス・アトマイザーである。

4. まとめ

超音速自由噴流の構造とその流動特性について概略した。第2章で述べた工学的利用技術はこれらの構造と特性を利用したものである。超音速自由噴流のさらなる利用には基本的特性の理解が不可欠であろう。

参考文献

- 1) R. Ishii, H. Fujimoto, N. Hatta and Y. Umeda: Experimental and numerical analysis of circular pulse jets. J. Fluid Mech. Vol. 392, pp. 129-153, 1999.
- 2) Y. Umeda and R. Ishii: Oscillation modes of supersonic multijets. J. Acoust. Soc. Am. Vol. 101, pp. 3353-3360, 1997.
- 3) A. Powell, Y. Umeda and R. Ishii: Observation of the oscillation modes of choked circular jets. J. Acoust. Soc. Am. Vol. 92, pp. 2823-2836, 1992.

大会記念講演

自動車のグローバル化とものづくり

林 稔*

Grovalization in Automotive Industry and Manufacturing Technology

by Minoru HAYASHI

1. はじめに

昨今、自動車業界において、環境、安全、利便をめざしたグローバルな開発競争が進むとともに、海外生産も急激に伸びてきた。この中で、競争に勝ち抜くため、世界的な自動車メーカーのグループ化、また、部品メーカーの再編が行われてきた。

本稿では、このような自動車業界のグローバル化の現状とそれに対してどのようにものづくりが進められているかを事例も交えて報告する。

2. 自動車業界の進展

国内のカーメーカの自動車生産台数は、図1に示すように、1990年の1350万台をピークとして減少しており、頭打ちと見られた時期があったが、世界の総生産台数は年々増加しており、2003年には6000万台を超え、さらなる伸びが予想されている。これに伴い、国内カーメーカも海外生産を増加させてきた。

世界の地域別生産台数の動向を見てみると、図2のように、日本が1000万台、北米が1700万台で頭打ちになっているが、中国、東南アジア、オセアニアを含むアジア・大洋州は急激な伸びが予想されている。

また、EUの拡大、ロシアを含む東欧の市場の伸びにより、欧州全体としては数量が増加すると考えられ、全世界でみれば、自動車産業は成長産業と言える。

一方、自動車の技術は、環境、安全、利便といったニーズに向けて急速に進歩してきた。環境についてみてみると、70年代に公害が問題となった時期があるが、図3にあるように、排出ガス量では、1965年を100とした場合、最近では、HCは100分の1以下、COも約40分の

1、NOxは50分の1以下になりつつある。

これらの成果は、エンジン制御、触媒、センサの進歩によるところが大きい。今後も地球温暖化への対応として、製品の製造～廃棄、再利用までの環境影響を評価するライフサイクルアセスメントの考え方も含め、CO₂削減がさらに厳しく求められ、それに伴う技術開発の難しさも加速すると予測される。

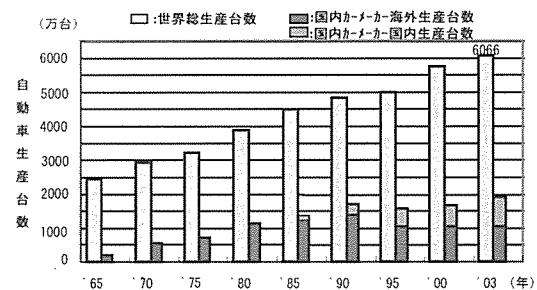


図1 自動車生産台数の推移¹⁾

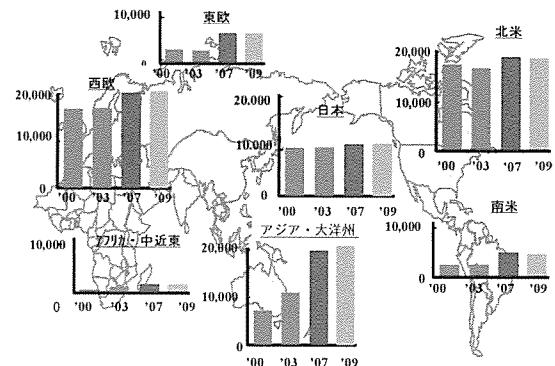


図2 世界の地域別生産数の推移¹⁾

*アイシン精機株

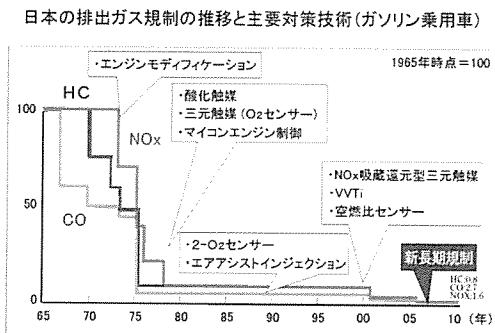


図3 排ガス技術の動向

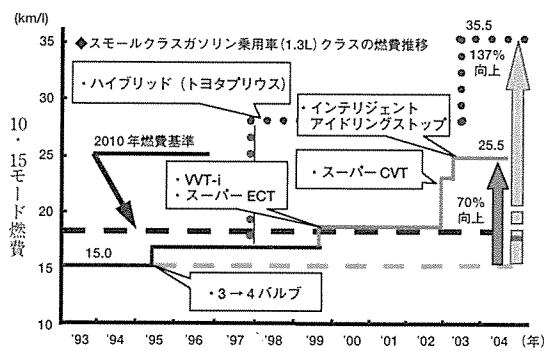


図4 燃費向上技術の動向

また、省エネの観点から燃費を見てみると、図4の通り、1.3Lクラスの乗用車では、10年前に比べ、エンジンの多バルブ化、VVT (Variable Valve Timing), CVT (Continuously Variable Transmission) 及びアイドルストップ等のシステム制御の開発により、70%もの向上が実現した。さらに、モータとガソリンエンジンを併用したハイブリッド車においては、137%アップ、つまり約2.5倍も向上していることになる。このタイプの車は、燃料電池車の普及時期がまだ見えない中で、各社とも展開に力を入れており、2015年頃には市場の15%を占めるとも言われている。

さらに、以前は『走る凶器』とも言われた自動車であるが、図5に示すように、1965年まではモータリゼーションの隆盛とともに事故発生件数、交通事故の死者数は増加していた。そこで、1965年以降、行政によるガードレールや信号等のインフラの整備が進み、減少傾向となった。しかし、バブル景気とともに車の所有台数がさらに増え、事故発生件数が増加傾向を示してきたが、1990年頃を境に死者数は減少している。これはABS (Antilock Brake System), エアバッグ, 衝突安全ボディ等の技術開発とその標準装備化によるものである。今後はさらに、国土交通省のASV (Advanced Safety

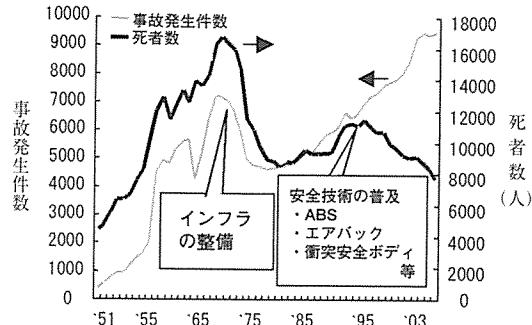


図5 安全技術の進歩

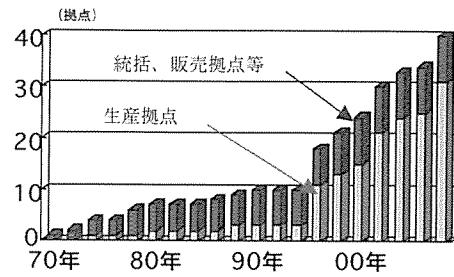


図6 当社の海外拠点数の増加

Vehicle) プロジェクトでも推進されている先進的な安全技術、たとえば、車線維持支援装置、居眠り警報装置等の技術進歩と普及が図られ、理想である交通事故死ゼロへの取組みが進むと予想される。

ところで、車社会においても、他の業界と同じく、情報化が進展し、ITS (Intelligent Transport Systems) と呼ばれる分野が急速に拡大している。具体的には公共交通機関の利用情報の提供や支援、高速道路で普及しつつあるETC (Electric Toll Collection System), プリウスへの装着で話題となった当社のIPA (Intelligent Parking Assist System), 愛知万博でお目見えた自動運転のIMTS等が実用化されはじめ、今後もさらに車と情報の関係が大きく変化していくと考えられる。

3. グローバル競争の激化

前段で述べた自動車そのものの開発競争とともにグローバル展開における各社の競争も進んでいる。当社においても、図6に示すとおり、海外拠点がここ数年で急増し、13ヶ国、31社の生産拠点があり、また、グループでは52社に達している。このような急速な展開に対し、生産関係のリソースが増大しており、これも重要な課題として取組んでいる。

自動車における海外進出の基本的な考え方とは、消費者のいる地域で生産するというものである。図7にあらわ

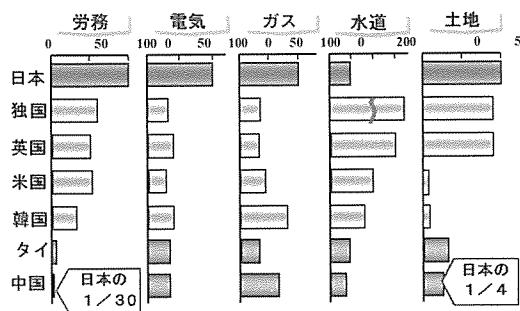


図7 労務費、エネルギー費の比較

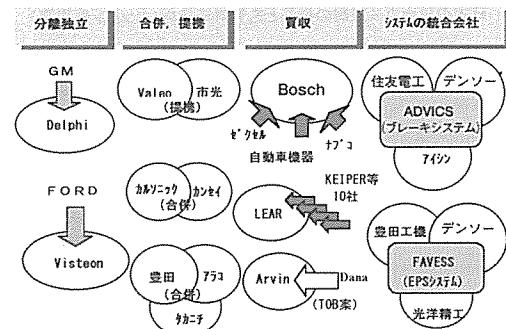
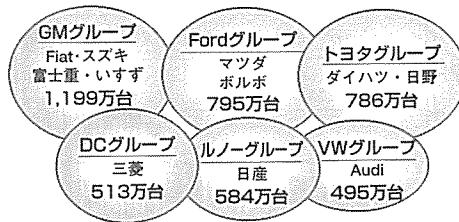


図9 自動車部品業界の再編

図8 カーメーカの国際的なグループ化¹⁾

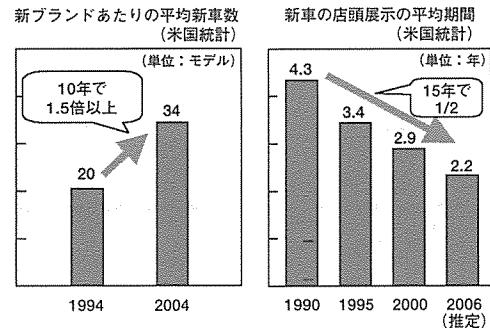
されているように、労務費では、日本を100として、中国、タイが30分の1から20分の1、欧米でも約2分の1であり、エネルギーにおいても、他の地域が安価となっている。したがって、ものづくりの観点から言えば、日本は大変厳しい場所といえるが、家電とは異なり、各社とも日本にこだわって、現場力と技術革新で新しい車づくりを行っている。

また、グローバルな競争の激化とともに、カーメーカ各社は、下記の理由で、図8のような国際的なグループ化を図ってきた。

- ① リソースが莫大となる燃料電池車のような環境技術や安全対応の技術開発の効率化
- ② 低コスト化のための規模拡大に向けたプラットフォームの共通化の推進

この動きとともに、カーメーカと部品メーカーの役割に変化が起き、部品メーカーへのシステム、モジュール形態の発注と、これに対応できるTier 1（1次サプライヤ）と、その部品メーカーに個別部品を納めるTier 2（2次サプライヤ）の層別ができてきた。この中で、部品業界においても、図9のような合併、提携、買収、統合等の再編が進んだ。当社においても、制御ブレーキの分野で、ボッシュ、テーベスといった世界の競合メーカーに対抗していくため、国内の競合であったブレーキ3社によるADVICSという会社を発足させた。

また、この国際競争の中で、2000年以降、カーメー

図10 新車の市場投入の現状²⁾

カーメーカに対して、トヨタのCCC21活動、日産のリバイバルプラン、マツダのABC活動と名づけられた15~30%の大幅なコスト削減要求がなされてきた。これに対して、各部品メーカーにおいても、同様のコスト削減活動を進めている。

さらに、図10にあるように、カーメーカは、勝ち残りに向けて、10年前の1.5倍という多くのモデルを市場に投入しており、新車の市場投入サイクルも短縮されてきた。

これらの新車の市場投入サイクルが短縮化するのに伴い、カーメーカから部品メーカーに対して、開発期間の大規模な短縮が求められてきた。従来、デザインの決定から量産開始までの開発期間が、18ヶ月であったものが、6~8ヶ月に短縮される車種も出てきた。これを実現するためには、設計、生産準備の同期化、標準部品の共有化、ノウハウを活用したやり直しロスの低減、さらに最新のIT技術の活用した3次元（3D）モデルを用いた設計から生産までの業務効率化が必須となってくる。

激しい国際競争のなかで、大幅な小型、低コスト化が実現された商品としてABS（Antilock Brake System）がある。図11のように、1987年当時の初期のモデルに対して、設計、材料、工法の革新により、現在では、体

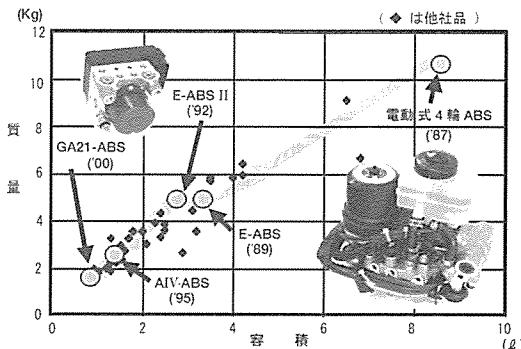


図11 小型、低コスト化の事例 (ABS)

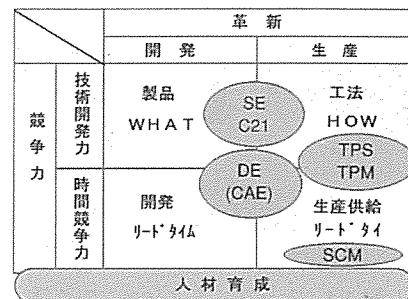


図12 当社の取組みのコンセプト

格、質量、コストとも約5分の1が実現されている。

4. ものづくりの取組み

今まで述べてきた厳しい国際競争の中で、日本は、従来のような、材料を輸入して、加工し、輸出するという“MADE IN JAPAN”という考え方から、技術革新に裏付けられた新しいビジネスモデル“MADE BY JAPAN”を構築していく必要がある。これからは、生産は必要なところで行うが、その技術は日本で開発するということが重要なコンセプトになってくる。つまり、『ものづくり』は日本にとって、永遠のビジネスモデルであるといえる。

当社においても、図12のようなマトリクスに表される考え方で取組んでいる。これからのものづくりは、競争力として、技術開発力と時間競争力が必要であり、また、これを支える製品開発と生産の両方の革新が重要になる。これらを推進するため、製品設計と工法を同時に検討して競争力の高い製品を生み出すSE (Simultaneous Engineering) 活動、これを効率良く、短期間で行うためのDE (Digital Engineering)、さらに、生産の場での革新として、TPM (Total Productive Maintenance)、TPS (Toyota Production System) に取組んでいる。また、仕入先から自社までの部品の流れのリードタイム短縮をはかるため、仕入先も含めたSCM (Supply Chain Management) にも取組んでいる。さらに、これらを実現していく上での原動力となる人材育成も重要課題となっている。

当社における競争力向上のための活動のひとつとして、1999年より『C21全社プロジェクト』(図13参照)に取組んできた。この活動は、トップマネジメントが推進し、営業、設計、生産、調達等の各部門が商品毎にプロジェクトを組み、共通の目標に向かって各関係部署がそれぞれタスクを明確にし、同時並行で推進するものである。さらに、必要に応じて、設計と生産技術の大部屋

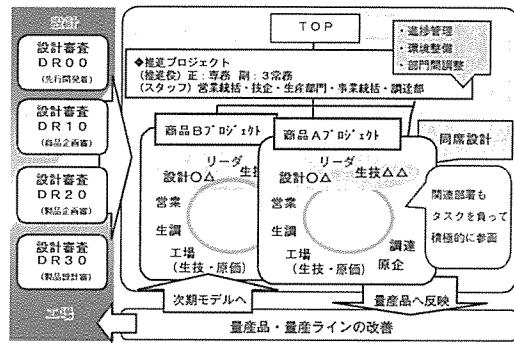


図13 C21全社プロジェクト

化をはかり、同席設計を行う。その結果を量産工場とも連携して検討し、ある期間で、トップ報告を行い、PDCAを回して製品開発、生産を進めてきた。

2004年からは、新たに『ものづくり改革』として、二種類の活動を立ち上げた。

まず、ひとつ目の活動は、コスト低減だけでなく、商品としての価値拡大を掲げたバリューアップ活動である。価値は、次式であらわされるが、

$$V(\text{価値}) = F(\text{機能}) / C(\text{コスト})$$

分母のコスト(C)を下げるだけでなく、分子の機能(F)を上げて、価値(V)を上げることを目指している。

もう1種類の活動は、ものづくり改革ラインの構築である。これはつくりを変えて、商品を変えるという意識改革にもつながるもので、シンプル、スリムラインのモデルラインを具現化する活動である。

これらの活動の取組み事例を下記に示す。

1) トランスマッisionの取組み

図14のような新たなトランスマッisionを開発するにあたり、主なねらいは次の3項目であったが、

- ① 燃費、動力性能の向上

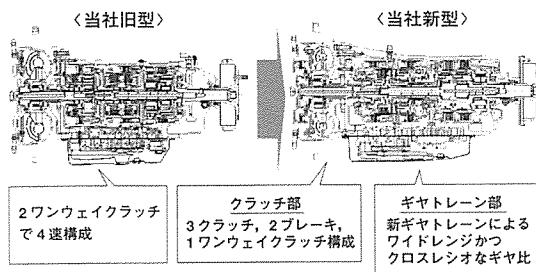


図14 トランスミッションの革新

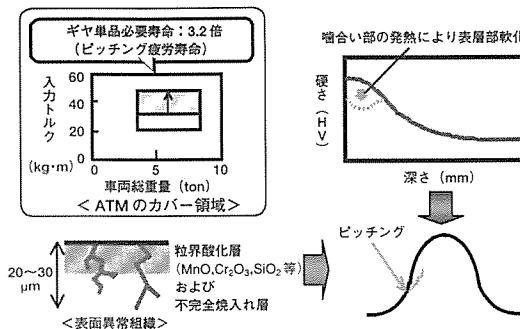


図15 必要寿命と疲労破壊メカニズム

② 運転快適性の向上

③ 小型、軽量化

ここでは、小型、軽量化を実現する上で重要なトランスミッションギヤの高強度化に向けた工法の新たな取組みについて述べる。

まず、図15のように、ギヤに求められるピッキング必要寿命と疲労破壊メカニズムの探求からスタートし、取組むべき工法の目標を明確にした。

新しいミッションのギヤ単品寿命としては、従来に比べて3.2倍が必要となり、このため、かみ合い部の発熱による表層部の軟化に対応できる工法の開発が課題となつた。

開発の着眼点としては、下記の3項目がある。

- ① 相組織の微細化による強化
- ② 固溶強化
- ③ 析出粒子分散強化

今回、新たに高精度雰囲気制御技術、組織微細化技術、さらに、ピッキング寿命に影響する特性評価技術の要素技術を開発し、高強度浸炭浸窒法（図16参照）による組織微細化技術を確立した。組織写真を図17に示す。

この結果、寿命について、従来の浸炭品を1とした場合に、通常の浸炭浸窒法が1.3倍であるのに対し、今回の開発工法では9倍となり、目標の3.2倍をクリアすることができた。

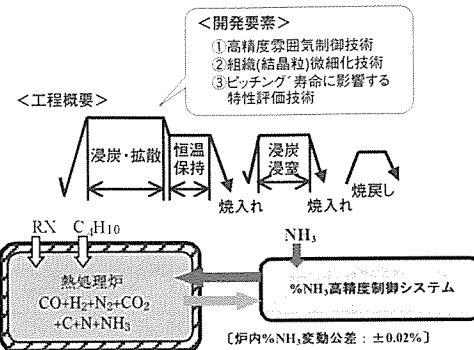


図16 高強度浸炭浸窒法工程概要

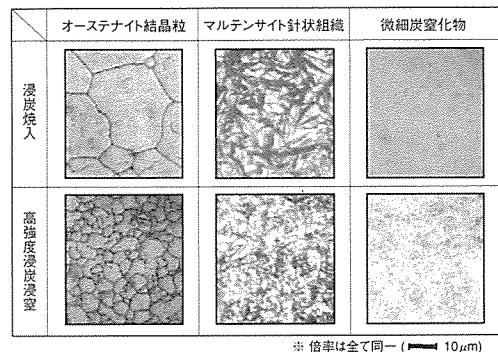


図17 微細化組織写真

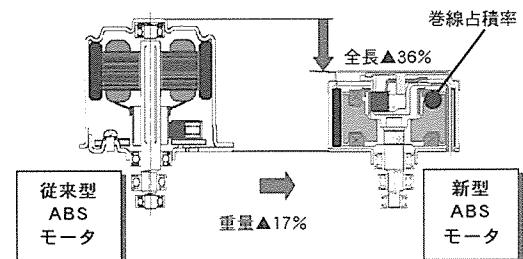


図18 革新モータの成果

2) モータの革新

この開発においては、各分野のプロを交えて検討し、競合各社、さらには異業種まで商品を集め、出力密度、ワイヤ占積率などの製品構造のベンチマークだけでなく、加工方向、加工孔数、あるいは組付け方向性（反転回数）などのつくりのベンチマークも行った。この中から、将来のトレンドを見た上で目標値の設定と他社のベストプラクティスの抽出を行うとともに、社内外の知恵を入れて、図18に示す、全長▲36%，重量▲17%の革新モータを開発することができた。これを実現するた

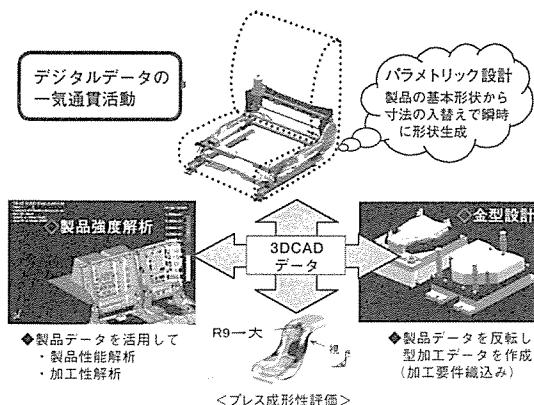


図19 IT技術のシート開発での活用

め、軟磁性材料の3次元コア成形技術、内接コンミ構造、高占積率巻線技術等の新たな技術を数多く盛込んだ。

3) IT技術の活用

開発から生産のリードタイム短縮に向けて、従来の個別業務でのIT活用とは異なり、製品の3次元(3D)データを一気通貫で活用する取り組みが進められている。

図19のシート開発の事例にあるように、設計側では、パラメトリック設計や衝撃試験のシミュレーションまで含めた性能、強度の解析が行われ、生産側では、その3Dデータをもとに、塑性加工時の材料の延び、割れの加工性等の検討、さらに製品データを反転後、加工要件も盛込んだ型設計等が進められている。

4) ものづくり改革ライン

当社のセンサラインをモデルにシンプル・スリム化に取組んだ事例を図20に示す。開発目標として設備サイズ1/3、リードタイム1/3を掲げて進めた。実現に当たって、社内外の知恵者を集め、小型、高速成形機、からくりによる複合組付け、ターミナル成形組付機等の開発に取組んだ。

このターミナル成形組付機では、従来、仕入先で、フープ材のプレス、端子のメッキ、ケースへの組付けの3工程で行われていたものを、図21にあるように、メッキ済みの角ワイヤの採用及び加工、組付けを複合して行える小型専用設備の開発により、内製の1工程に集約した。

これにより、材料歩留りを2倍に上げるとともに、工程のスペースの1/3化、生産のリードタイム短縮も実現することができた。

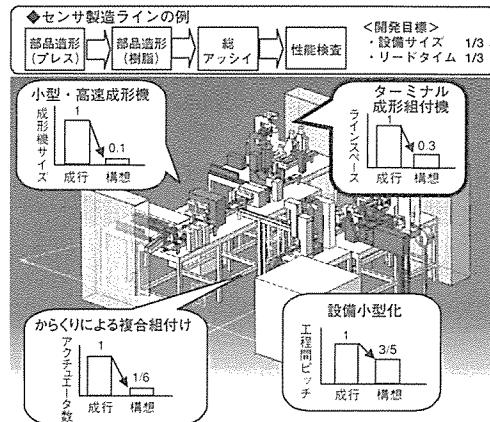


図20 ものづくり改革ライン事例（センサ）

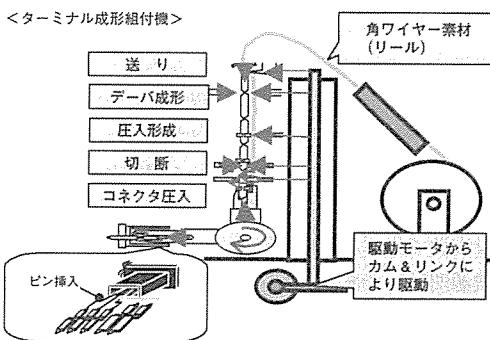


図21 ターミナル成形組付機の事例

5. おわりに

自動車業界は、今後ますます、環境、安全、利便への取組みが進み、燃料電池や自動車の統合制御等の、より難易度の高い開発をめざして、グローバル競争が激化していくと予想される。当社としては、お客様の視点にたった製品開発と、生産ラインのシンプル・スリム化、さらに開発から生産までのリードタイム短縮をものづくりの課題として取組んで行く。また、日本で技術を高めて、グローバルに展開していくためにも、今まで培ってきた技術、ノウハウを伝承し、『ものづくりはひとつづくり』の観点で人材を育成していく。

参考文献

- FOURIN 海外自動車調査情報 (2004)
- オートモーティブニュース (2004)

大会記念講演

地震・津波・火山噴火現象と物理探査

三ヶ田 均*

**Geophysical Explorations for Studying Earthquake,
Tsunami, and Volcanic Eruptions**

by Hitoshi MIKADA

1. はじめに

工学で一般的に用いられるたたみ込みモデルを用いることで、災害を引き起こす自然現象を記述することができる。たたみ込みモデルでは、出力信号は入力信号とその信号の伝播する場を示すシステム関数とのたたみ込みで求められる(図1)。例えば、自然地震であれば、入力は震源で生ずる破壊の伝播という物理現象(時空間での震源関数)であり、システム関数となる伝播の場は地下構造、そして人類の生息する場で観測される振動が出力ということになる。津波であれば、入力は海底変動、海洋がシステム関数、人々を次々に飲み込む出力部分となる。こうした推測は、対象が例え自然現象であっても、物理的な入出力の関係を記述することで、現象を解明することが可能であることを物語っている。日本周辺の津波は、主として地震により発生する。この日本列島は、太平洋プレート、フィリピン海プレート、北米プレート(あるいはオホーツクプレート)、ユーラシアプレートとよばれる地球表面の4つのプレートの境界に生成された弧状列島である。この4つのプレートはお互いに年間数~10cm程度の速度で動いている。日本列島の場合、太平洋プレートおよびフィリピン海プレートという海洋プレートがユーラシアプレートおよび北米プレートといった大陸プレートの下部に沈み込んでいる(図2)。この沈み込みの起きている海底は千島海溝、日本海溝、駿河トラフ、南海トラフ、南西諸島海溝といった海底の谷あるいは平坦に窪んだ地形を形成している。小笠原海溝では太平洋プレートがフィリピン海プレートの下部に沈み込み、東北地方西側では、日本海の海底下に、ユーラシアプレートと北米プレートの衝突帯と考えられている日

本海東縁プレート境界がある。そのため、隣り合う2つのプレートを考えると、その境界では、お互いの相対的な運動によりいわゆるプレート間地震とよばれる地震が繰り返し発生することとなる。マグニチュード8程度以上の大きさの地震を一般的に巨大地震とよび、大きなプレート間地震は巨大地震であることが多い。ひとたび発生すると大きな災害を引き起こすプレート間地震は海溝型地震とよぶこともあります、特に太平洋側に多く発生する。日本列島では、他にも海溝のようなプレート境界で発生する地震と異なり、一つのプレートの内部で起きる地震もあり、こうした地震をプレート内地震とよぶ。地震はプレートとプレートの間の相互運動によって引き起こされるので、地震を起こす力の起源はプレートを動かす力に他ならない。

自然現象のスケールは机上で観察できる大きさを超え、地震は一般に地下数~数10kmからより深い部分で発生する。津波も日本周辺では、海岸から距離のある水深数1,000mという人類の持つ技術を総動員してもアクセスの非常に困難な場所で生じる。そのため、その発生の場を記述することが困難であったことは否めない。その詳細な断層運動を目にするには困難である。例えば1923年関東地震、1946年南海地震等の巨大地震の際には、海岸の隆起などの現象が陸上で確認されたが、地震発生場所である震央に近い海底での運動は津波の解析

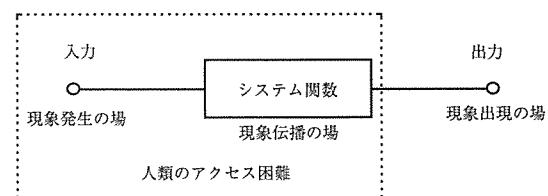


図1 自然現象を記述するシステム関数

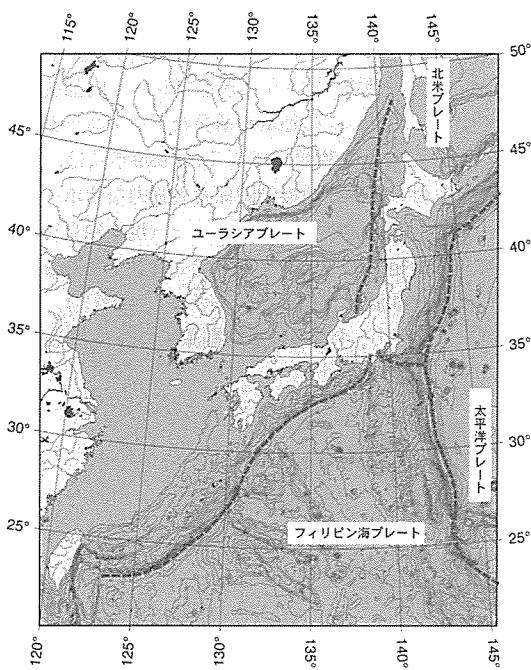


図2 日本列島を取り巻くプレートとそのプレート境界(破線)。白い実線は、ARENAで考えられている将来のケーブル式観測システムのケーブルルート図である。縦軸および横軸は、それぞれ北緯、東経。プレート境界から沈み込む太平洋プレートとフィリピン海プレートが、日本列島の太平洋側に地震を発生させる。

から予想されるモデル計算の結果を除き、確認することは困難であった。海底という人間のアクセスの困難な場所にあるからである。こうした困難を乗り越え、近年では、地震や津波等の発生する地中の場を推定し、物理的に記述するアプローチが成功しつつある。構造探査の技術も大きな進化を遂げ、海底下に発生するマグニチュードの大きなプレート間地震のシミュレーションや地震により引き起こされる急激な海底面の上昇・沈下に伴う津波を理論的に推定することができるようになって来た。

2. 平成15年十勝沖地震の観測成功

平成15年十勝沖地震は日本時間平成15年9月26日4時50分に発生したプレート境界型の巨大地震であった(図3)^{1,2)}。気象庁の求めたマグニチュードは8.0、震源域は、千島海溝の南端付近の北米プレート(千島前弧スライバと呼ばれる部分)³⁾の下部で太平洋プレートと接している地震発生帯にあった。太平洋プレートの沈み込み速度は、年間約8.5 cmと推定されており⁴⁾、前回の地震から約50年の間の歪の蓄積は滑り量にして約4 m分ということになる。実際に遠地地震波解析の結果、平成15年十勝沖地震のプレート境界における滑り量は約3~5 mに達すると推定されている²⁾。不幸中の幸にして、気象庁発表の震央直近に設置してあった海底ケーブル観測システム「釧路・十勝沖海底地震総合観測システム」により、地震の全波形、地震前後の海底面下降および上昇運動、地震発生直後に発生したと思われる海底乱泥流

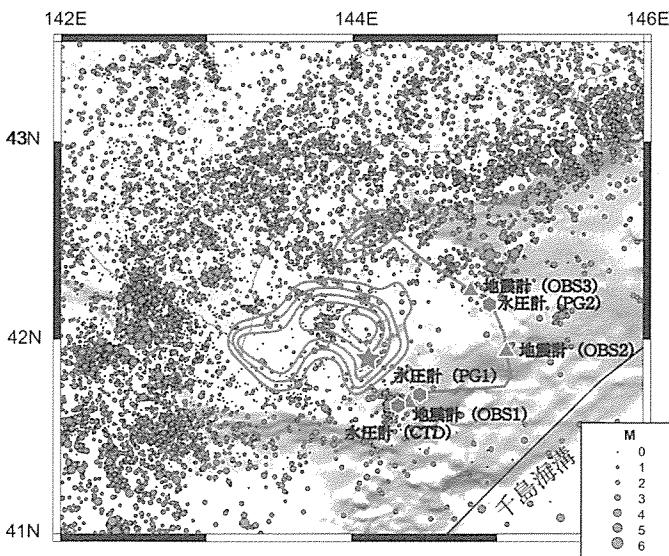


図3 十勝沖地震の発生した海域と2000年3月から2003年8月までの微小地震震央図。星印は平成15年十勝沖地震の震央、センター²⁾は遠地記録から推定された断層滑り量を1 m毎にしたもの、海底ケーブル式観測システムは3つの地震計、2つの水圧計、そしてCTDと呼ばれる圧力計を含む装置の取り付けられた先端海底環境観測装置で構成される。平成15年十勝沖地震の地震発生領域を取り囲むように整備されていた。

等が観測された。水圧計は地震震央（気象庁発表）から 25.5 km, 31.4 km, 81.8 km の距離にある 3 点（それぞれ CTD, PG1, PG2 とよばれる観測点）に設置され、地震時の海床上昇量および地震発生直後に発生した津波波形（外洋津波波形）を捕らえることに成功した¹⁰（図 4）。

既に Takahashi et al. (1999)⁵により報告されているように、北海道周辺では、北米プレート、太平洋プレート、そしてユーラシアプレートの間の相互作用により、継続した地殻変動が進行している。その中で、1990 年頃より、今回の十勝沖地震震源域における地震の空白域

（微小地震の発生が周囲に比較し極端に少ない地域）が形成されていた⁶。また、1993 年の釧路沖地震⁷や 1994 年北海道東方沖地震⁸という大きなプレート内部被害地震も発生しており、この地域が活発なテクトニックな環境下にあったことを物語っている。1999 年には、空白域形成に気付いていた地震学関係者の強力なサポートのもと、十勝沖に海洋科学技術センター（現：独立行政法人海洋研究開発機構）により日本で 7 番目となる海底ケーブル式地震観測システムが設置された⁹（図 3）。図 3 に明らかなとおり、十勝沖地震の震源域の周辺に比較し、

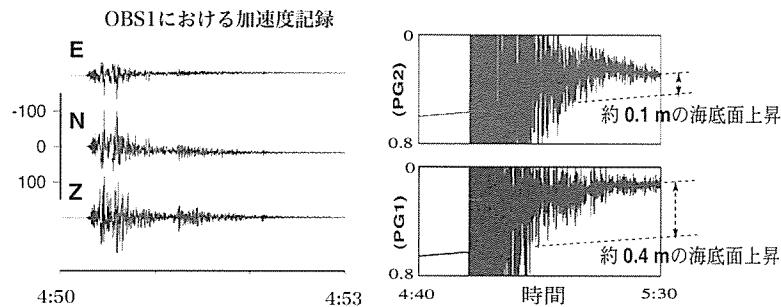


図 4 OBS1 観測点における地震加速度記録と PG1, PG2 観測点における水圧計記録。完全な地震波形を記録することに成功した。横軸は日本時間、地震記録（左側）の縦軸は加速度の大きさであるガル (gal, cm/sec² を示す)、水圧計記録の縦軸（右側）は水深換算された水圧値で、単位は m である。水圧記録は図の外側に出た部分を見せていないが、振幅は地殻変動値の約 100 倍である。

表 1 18世紀以降 1,000 名以上の犠牲者を伴った津波災害。犠牲者数は概数であり、地震による直接の犠牲者が含まれる可能性も多い。著者により加筆・訂正済。

年	津波(原因)	発生国	犠牲者数
1703	元禄(プレート境界地震)	日本	6,500
1707	宝永(プレート境界地震)	日本	5,000~20,000(?)
1741	渡島大島(火山体崩壊)	日本	>2,000
1755	リスボン(プレート境界地震?)	ポルトガル	62,000
1771	八重山(プレート内津波地震?)	日本	9,209
1783	バルミ(プレート境界地震)	イタリア	1,504
1792	島原・肥後(山体崩壊)	日本	15,200
1815	バリ島(プレート境界地震)	インドネシア	10,253
1854	安政東海(プレート境界地震)	日本	2,000~3,000
1854	安政南海(プレート境界地震)	日本	>1,000
1856	サンジル島(火山体崩壊)	インドネシア	>2,000
1868	チリ(プレート境界地震)	チリ	25,000
1883	クラカトア(火山体カルデラ形成)	インドネシア	36,000
1896	明治三陸(プレート内津波地震)	日本	22,000
1906	チリ(プレート境界地震)	チリ	3,760
1922	チリ(プレート境界地震)	チリ	1,000
1933	昭和三陸(プレート内地震)	日本	3,064
1944	東南海(プレート境界地震)	日本	1,223
1946	南海(プレート境界地震)	日本	1,330
1960	チリ(プレート境界地震)	チリ	5,700(日本:139)
1976	ミンダナオ海(プレート境界地震)	フィリピン	8,000
1992	フローレス島(プレート内地震?)	インドネシア	1,713
1998	シッサノ潟(プレート境界地震と地滑り?)	パプアニューギニア	>2,300
2004	スマトラ島沖(プレート境界地震)	インドネシア	>300,000(?)

震源域の微小地震は少ない。地震の発生に至る過程で、巨大地震発生の兆候を捕らえることはできなかつたが、空白域形成およびその間の地震活動をつぶさに捕らえ、今回のプレート間巨大地震を迎えたこととなつた。図5に示した如く、地震波の解析から震源での断層変位を求め、海底の地殻変動量を求めることが可能である。物理探査による地下構造の推定が行われているが、こうした断層変位の地下分布と地下の地震波反射面周辺の物性とを結びつけることが今後の課題である。

3. 津波と物理探査

表1は、18世紀以降2004年末までに発生し、1,000名以上の犠牲者を出した津波をまとめたものである¹⁰⁾。南海トラフに発生するプレート境界地震が3回含まれている。相次いで1896年、1933年、そして1960年の津波で大きな災害を被った三陸地方の格言に、「津波でんでんこ」というものがある¹¹⁾。これは、古の世より何度も津波による被害を受けた地域で、津波による人的災害を最小化するために自然発的に得られた知見で、津波の発生が疑われた場合には、例え家族・親戚が心配でも、一人一人が自分の身だけを考え、離散して避難しなさいという意味だそうである。三陸海岸はアリス式の津波常習海岸であるが故に、繰り返し発生する津波災害から自然発的に災害を軽減するための悲しい格言が生まれたと推察できる。しかしながら、例え2004年12月26日のスマトラ島沖地震津波のように数世代（～150年）を隔てて発生した津波災害に関して過去の記憶の風化は

著しく、経験科学的な進歩は期待できなかつた。表1にある世界で24回の約半数に当たる11回が日本近海で発生する地震・火山等の海底変動現象に起因している。極東の小国である我が国で半数弱という数字には驚かされる。我が国の位置が、いかに海底変動を生じ易い場所にあるかを物語つてゐる。1741年の渡島大島を波源とする津波は約2,000名の犠牲者を記録したが、津波の大きさに比較し小さい約0.4立方kmの山体崩壊の後が地上に残るだけで、津波源については、そのメカニズムが解明されていなかつた。しかしながら、津波発生約260年後の海底地形探査により、水面下に約2立方kmを超える体積の崩壊痕を見いだすに至り、津波を再現できるようになった¹²⁾。これは、例え数百年前の現象であつても、探査がいかに大きな役割を果たすかを物語つてゐる。また、1771年の明和津波は、高さ約80m超の津波を発生させた。この成因は予てより海底地滑り或は地震による海底変動現象であると推定されたが、海底及び海底下地下構造についての知見が十分得られる迄、議論に決着がつかなかつた。これも、津波研究に海底調査や海底の断層調査が重要であることを物語る。1755年のマグニチュード8.5と考えられているリスボン地震は、5～10mの高さの津波を発生させ、ポルトガルの首都であったリスボンを襲い、62,000名の犠牲者を数え、欧洲列強による海洋の覇権争いからポルトガルを脱落させた大地震である。これだけの地震にも拘らず、その成因は長い間謎であった。しかしながら近年の地殻変動や地震観測ネットワークの充実、物理探査による地下構造解析

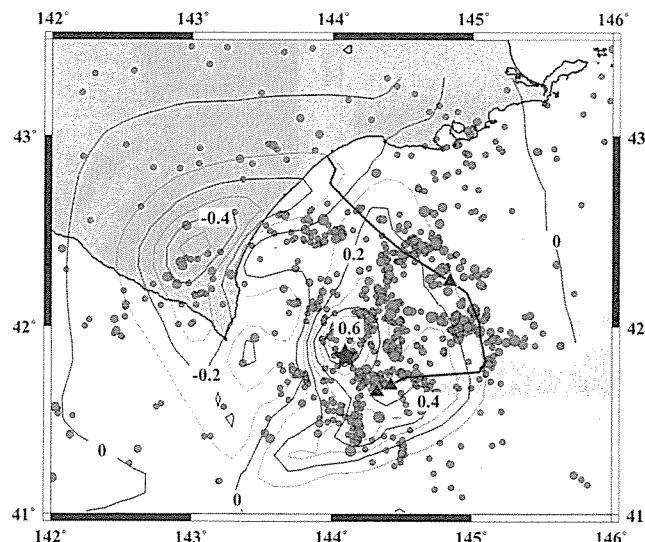


図5 平成15年十勝沖地震で推定された海底上下地殻変動。単位はmで、上昇が正数、沈下が負数である。主要な地殻変動が沖合の海底で生じていることがわかる。海岸線は、地殻上下変動のないセンター線に近く、港湾の潮位計では検知できない可能性も示唆している。

の結果、この地震が大西洋～アフリカ大陸を構成するプレートが、欧洲大陸～地中海の陸塊の下部に年4mmの割合で沈み込むプレート境界に非常に近い場所に位置すること、海底地滑りの年代から、再来周期が1000～2000年である可能性等に言及されている¹³⁾。これにより、プレート内に生じたとするにはあまりにも大きな地震のマグニチュードも理解することができるようになった。やはり長期の観測と物理探査が融合し、謎を解明する一歩を踏み出した例と考えることができる。

4. 2004年スマトラ沖地震津波と津波研究

津波の研究には、発生の仕組み、津波の伝わる仕組み、そして津波が沿岸域を襲う仕組みという3種類の分野がある。科学的にこのそれぞれの分野における現象を解明することが必要なのは勿論のこと、防災という観点からも3分野について何らかの手段を講じる必要があることは言を待たない。2004年12月26日に発生したインドネシア・スマトラ沖地震はマグニチュード9.3と2003年十勝沖地震の約100倍、1995年兵庫県南部地震の約1,600倍のエネルギーを持つ巨大地震の一つであり、そのエネルギーは1976年から1990年までの世界の地震15年分に匹敵した。地震と同時に発生した津波はインド洋沿岸諸国を襲い、少なくとも30万人という犠牲者を数えるに

至った（図6）。地震の規模も巨大であったが、インド洋沿岸諸国に国際的な津波などの防災を目的としたシステムが整備されておらず、被害を拡大したことが新聞紙上を賑わしている。巨大地震とその地震により生じた海底の変動は津波を発生させた源になり、その津波が海洋を伝わって行く様相、そして沿岸域の海底から陸域の地形により遡上する様相などを考慮した防災体制が必要となる。海洋には津波が伝わることを妨げる国境はないので、当然、防災には国を超えた体制が必要となる。

スマトラ島はユーラシア・プレート（あるいはビルマ・プレート）の上に位置し、南側のスンダ海溝からスマトラ海溝でインド・オーストラリア・プレートが年約6cmの速度で沈み込んでいる。過去にも大きな地震があったことが、サンゴ礁を用いた研究等を駆使して解明されていた（図7）¹⁴⁾。今回の津波地震では、このプレート沈み込み域でマグニチュード9.3という巨大地震が発生し、1960年のチリ地震で発生した太平洋スケールの津波と同様な、インド洋スケールの津波が引き起こされたと考えられている¹⁵⁻¹⁷⁾。津波の発生につながった地震について即座に研究が開始され、世界中の地震波記録からある程度の規模や場所についての知見は得られたが、未だにその津波を引き起こした海底の上昇や沈降といった変動現象と結びついていない。海底よりも下の地

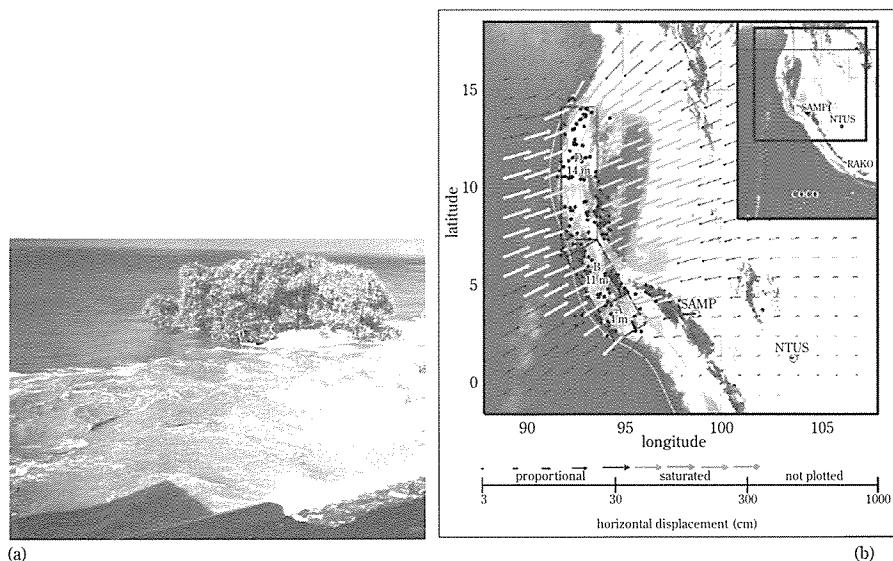


図6 平成16年12月26日のスマトラ沖地震で発生した津波と地殻変動。(a) スリランカ西側のトライトンホテル3階で撮影された津波。ホテル1階が水没している。(b) スマトラ沖地震発生域を取り囲む4つのGPS観測点のデータから推定されたプレート境界断層面の滑り量分布。矢印の長さが地殻変動における水平移動距離を示しているが、30cm以上移動した場所については、全て同じ長さとなっている。平成15年十勝沖地震は約80km×80kmの断層面が5m程度滑ったと考えられているのに対し、2004年スマトラ沖地震の場合1,000km以上×200km以上の断層部分約26万平方km（日本の国土面積の約7割程度）が平均12m滑ったと考えられている²²⁾。

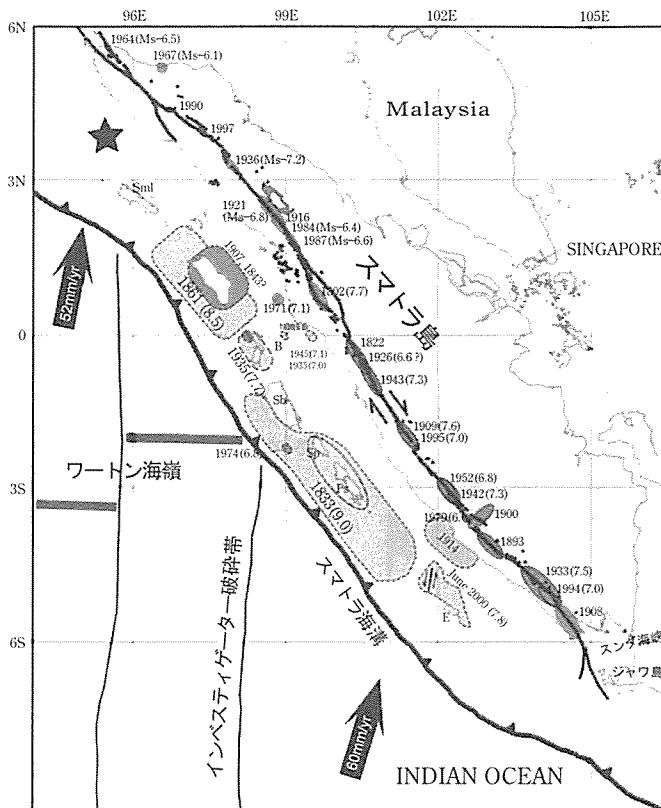


図7 スマトラ島沖のインド・オーストラリア・プレート沈み込みと過去の地震活動¹⁴⁾。2004年のスマトラ沖地震が19世紀の2つの地震発生域の北部に発生している。2004年12月26日のスマトラ沖地震は図中の星印から始まり、北側1,000 km以上に渡る断層を破壊したと考えられている（図6-(b) 参照）。

中にある地震断層あるいはプレート境界の位置も十分に把握されていない。津波の発生現象に対し、十分な検討は今後の課題と考えられている。津波の伝わった海域についても水深のデータが十分ではなく、津波研究には今後の詳細な海底地形調査の結果を待つ必要もある。巨大な津波の押し寄せた地域では、海底地形や海岸の形状も変わってしまい、津波の到着時の振る舞いについての研究も、やはり今後の調査結果を含めた検討がなされこととなろう。

地震発生から一ヶ月、スリランカ沖で行方不明者捜索の任についていた英國の海軍調査船 HMS Scott は平成17年1月26日より20日間にわたり、スマトラ沖地震発生場所近傍の海底地形調査を実施した。この調査では、海底のプレート境界の位置、海底地滑り、インド・オーストラリア・プレートの沈み込みによるビルマ・プレート側の海底形状（図8）など、これまで不足していた多くのデータを取得した。日本の独立行政法人海洋研究開発機構の調査船「なつしま」も平成17年2月末より調査を行った。こうした新たに取得されたデータが、津波

や地震の研究に役立てられることは、言うまでもない。今回の巨大地震では、地震および津波の研究に地震発生前に取得されたデータや太平洋津波警報センターで行われているような継続した国際協力がいかに重要であるかも明らかにしただけでなく、自然の驚異が目前に曝される前に、その自然現象が生ずる場を知るための試み、即ち物理探査、が重要であったことを物語る。

海底ケーブルのような防災情報の高精度化や地震現象解明に向けた地震・津波観測システムの整備を見込む活動が続けられていると同時に、地球上には観測システムすら整備されていない状況に置かれた地域も数多く存在する。スマトラ沖地震は、太平洋沿岸諸国に整備されているような津波警戒システムが整備されていない国々に、不幸にして甚大な災害を引き起こした。40年前に太平洋沿岸諸国を動かしたように、同時にこの地震津波は、津波の脅威を世界中に知らしめ、インド洋への観測システムや津波警戒システムの導入を促進しようとしている。平成17年1月からは、東南アジア諸国連合の閣僚級会議やNHKを始めとするアジア報道機関のワークショ

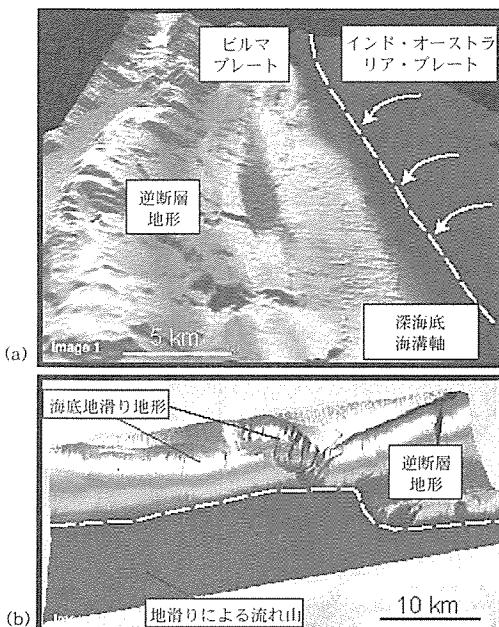


図8 英国海軍による平成17年1月からの調査で明らかとなったスマトラ沖プレート境界部分の海底地形。こうした地道な調査結果が、津波やその原因となった地震現象の解明に役立てられる。(a) 北側から眺めたインド・オーストラリア・プレートが沈み込むスマトラ島西方のプレート境界。海溝軸の位置および逆断層系の発達した海底地形が明らかとなった。(b) 海底調査により明らかとなった逆断層地形と海底地滑りの痕跡(a)とは別な海域を西方から眺めている)。見えにくいが、地滑りができる流れ山地形も捕らえられている。

ップ、そして3月以降は津波被災国および救援国による政府間海洋学委員会調整委員会の開催など、インド洋津波防災体制の大枠について、平成17年6月末の政府間海洋学委員会総会での採択を目指した活動も本格化した。太平洋津波警報センターと日本の気象庁は共同で、これまで太平洋域に限っていた津波警報の対象国を、暫定的にインド洋沿岸諸国にまで広げることを確約した。本格的なインド洋津波警報システムが整備されるまで時間が必要であるが、津波よりはるかに高速で伝わる地震波を用い、津波の発生の可能性を判断し、万一発生する際に、その脅威を事前に伝えることは可能となろう。今回のスマトラ沖地震では、海岸での潮位観測では津波の到達時にしか津波の発生を知ることができないこと、地震発生後どのように津波が発生するかを知る手段がないことなどが指摘された²²⁾。前者は地震発生場所に近い場所や人口の多い場所に津波が到達するまで十分時間を稼

げる場所での津波監視、後者からは地震が起きた後の津波発生の仕組みを研究することの重要性を物語っている。数値シミュレーション等の手法を用い、地震や津波の大きさを把握し、防災に活かす試みが必要である。また、このために、海底地形や地下の断層やアスペリティ位置を知ることが重要であり、物理探査手法が適用されねばならないと考えられる。

5. 地震と物理探査

殆どの地震の震源運動は断層運動と一致することは、既に40年前に解明されている¹⁸⁾。この断層を、ある面で接した二つの媒質の表面と考える場合に、近年使われるモデルは、アスペリティ・モデルと呼ばれる。アスペリティ(asperity)というのは、元来物体表面の凹凸や出っ張りを意味することばであるが、この概念を導入することで、断層面の凹凸を考慮し、面上の位置により異なる摩擦係数を考慮することができる。地震学では、断層面上とろどころに、すべりに対する摩擦抵抗の大きな部分が存在し、その摩擦抵抗の大きな部分はすべり量も大きくなり、結果として強い地震波が射出されると考える。地震観測が開始され100年になろうとしている日本では、いくつかの断層で、このアスペリティ位置が、(100年スケールで)変わらない可能性があることが指摘された²³⁾。1952年十勝沖地震と2003年十勝沖地震という殆ど同じ場所で生じた1サイクルの海溝型巨大地震のアスペリティを調べた結果、殆ど同じ分布が得られたことで、このアスペリティの不動性が確認されることとなつた²⁴⁾。この不動性は、過去の地震のアスペリティを調査することにより、将来発生する巨大地震の断層運動をある程度精度良く震源関数として与えることが妥当であることを裏付けたこととなる。近年では、このアスペリティを時空間の関数として求められる場合、そのまま入力できるため、地下構造が解明されれば、ある程度地表での地震動をシミュレーションすることができるようになつた^{19, 20)}と言っても過言ではない。この地震学の進歩は、地震予知計画～地震調査研究計画の賜物であると断言できる。たたみ込みモデルが自然災害にも応用可能であることは、物理探査と地球科学が互いに近接した応用分野であることを示しているとも考えられる。

6. 火山噴火における物理探査

火山学分野においては、これまでの火山噴火予知計画により、地震・地殻変動等の常時観測ネットワークの整備や地震探査により、表面現象や地下へのマグマの供給量、そして噴火の可能性について議論が可能となってきた。現在では、観測が十分であれば、噴火直前予知は現実のものとなりつつある。しかしながら、中長期的な噴

火のメカニズムやマグマの供給経路、その広域応力場との関係、マグマの成因といった観点で眺めた場合、今後への課題が山積している。例えば、火山体が未固結の火山碎屑物と固結した溶岩のような高密度岩体の組み合わせて構成され、地震波を用いた構造探査に適した環境を有していないこと、上部地殻～モホロビッチ不連続面(地殻とマントルの境界)～上部マントルを含む地下数km～数10kmの構造が殆ど解明されていない。地震探査が困難な地域として知られる地熱地帯同様の問題が生じている。これまでに明らかにできるようになつた地下地下数～10kmのマグマの量的収支や噴火直前予知に係る表面現象を境界条件として、中長期的に進行する火山深部における噴火準備過程やマグマの地下マイグレーション(移動)、そして種々のマグマの差異を引き起こすマグマ混合過程の解明が現段階での目標となる。当然のことながら、マグマの供給量という入力の一部、噴火(噴出)という出力の一部が解明されたに過ぎず、火山学においても構造探査や地下物質の物性リモートセンシング技術を革新する重要性は言を待たない。

7. 今後の地震学研究に向けて

現在、大規模地震災害特別措置法などによりマグニチュード8以上の巨大地震によって引き起こされる地震による災害を軽減したり防止したりするため、地上の一点が数mmでも動けば検知可能な地殻変動観測や微小地震を捕らえる地震観測の実施体制強化が図られている。一瞬にして多くの生命、甚大な資産の逸失を伴う地震という現象に立ち向かうためには、地震発生の予知による災害防止と、地震発生時の災害軽減という2つの側面を考慮する必要がある。地震発生および地震現象の解明には、どちらの場合でも実際の地震の際に生じた現象を捕らえることが重要である。近年の地震学的研究からは、地震の前兆的現象として、空白域形成や前震の発生等の地震学的現象、ダイラタンシーとよばれる岩石破壊に関連する現象による前兆的地殻変動、地下水分布変化や流動やピエゾ磁気効果等による電磁気学的現象および地球化学的現象等が考えられている。三要素とよばれる場所・規模・時期を事前に予測できるようになって、はじめて予知ということになる。この予知や災害軽減という目的のためにも、マグニチュード8クラスの地震が発生する海底という場所で、できるだけ多くの地点で、できるだけ多くの事例が集められる必要がある。また、甚大な災害を引き起こす巨大地震は、太平洋側では數十～百年、日本海側では数百年という時間間隔で発生すると考えられる。生命のサイクルに比較し、非常に長い時間間隔となるこの巨大地震発生現象を理解するには、やはり長期間の観測が必要不可欠となる。それに加え、物理探

査手法を用い、地下や海底を可視化して現象の生ずる場を記述することは、観測されたデータを有効に利用するためだけでなく、現象そのものを理解する上で、やはり必要不可欠となる。

平成15年十勝沖地震では、残念ながら明確な地震の前兆が見出せなかつた。これは巨大地震発生の前兆が、十勝沖の場合、これまで考えられてきた以上に小さい信号であること、或は地殻変動や地震活動だけでなく、地下水理学的な観測や地球化学的な観測を導入する必要性を示しているかもしれない。また前兆を示す信号が、これまで想定されていた以上に小さいことを裏付けるかもしれない。現段階では震源過程の詳細は解明されておらず、物性論的なアプローチが今後も必要であることを示唆する。2004年スマトラ沖地震では、地震発生場所の観測が十分ではなかつたこともあり、その現象が十分に解明されていない。地震発生に至る前のデータの収集は重要である。物理探査は、自然現象を記述するために必要不可欠な情報を提供する。自然災害を減ずるため実施される数値シミュレーションの精度は、一意にこの探査データに依存すると考えて良い。

今後の地震研究には、いくつかの方向性が示される。

- (1) 震源過程の研究
- (2) 地下構造研究
- (3) 震動予測研究
- (4) 長期モニタリング

などである。震源過程の把握に必要なアスペリティの推定では、最近物理探査を用いる方法²¹⁾も提案されているなど、この全ての分野に関し、材料系・資源系からの貢献が可能であると考えられる。物理探査であれば、構造の直接推定や不可視の領域の物性把握の手段として大きな役割を果たすことが推察可能である。物性論的研究では、震源に生ずるアスペリティの正体、破壊直前の媒質の挙動把握等にその知見を活かすことができる。一度発生すれば、あまたの犠牲者を生む可能性のあるこの地震・津波・火山噴火といった現象は、人類の抱えるリスクの一つであり、このリスクを抑えることは大事な物理探査の役割であると認識できる。一人でも多くの研究者が興味を持って、この分野に踏み出して行かれることを期待してやまない。

謝辞

図8はHMS Scottに乗船した研究者チームのL.C. McNeill博士にご提供戴いた。厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) Watanabe, T., H. Matsumoto, H. Sugioka, H. Mikada, K. Suyehiro, and R. Otsuka, *EOS Trans.*,

- 85 [2], 14, (2004).
- 2) Yamanaka, Y., and M. Kikuchi, *Earth Planes Spa.*, 55, e21– e24, (2003); *J. Geophys. Res.*, **109**, B07307, doi:10.1029/2003JB002683, (2004).
 - 3) Kusunoki, K., and G. Kimura, *Tectonics*, **17** [6], 843-858, (1998).
 - 4) DeMets, C., R. Godon, F. Argus and S. Stein, *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 2191-2194, (1994).
 - 5) Takahashi, H., V. Bahtiarov, V. Levin, E. Gordeev, F. Korchagin, M. Gerasimenko, M. Kasahara, F. Kimata, S. Miura, K. Heki, T. Seno, T. Kato, N. Vasilenko and A. Ivashchenko, *Geophys. Res. Lett.*, **26** [16], 2533-2536, (1999).
 - 6) 高橋浩晃・笠原稔, 地震第2輯, **56** [4], 393-403, (2004).
 - 7) Takeo, M., S. Ide and Y. Yoshida, Y., *Geophys. Res. Lett.*, **20** [23], 2607-2610, (1993).
 - 8) Morikawa, N., and T. Sasatani, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **94** [3], 33-54, (2004).
 - 9) Hirata, K., M. Aoyagi, H. Mikada, K. Kawaguchi, Y. Kaiho, R. Iwase, S. Morita, I. Fujisawa, H. Sugioka, K. Mitsuzawa, K. Suyehiro, H. Kinoshita, N. Fujiwara, *IEEE J. Ocean. Eng.*, **27**, 170-181, (2002).
 - 10) 京都大学防災研究所, http://inpaku.dpri.kyoto-u.ac.jp/jp/think/sea/tsunami_jpn/contents/right.html, (2005)
 - 11) 山下文男, あゆみ出版, 222pp, (1997).
 - 12) Satake, K., and Y. Kato (2001), *Geophys. Res. Lett.*, **28** [3], 427-430, (2001).
 - 13) Gutscher, M. A., *Science*, **305**, 1247-1248, (2004).
 - 14) Natawidjaja, D. H., K. Sieh, S. N. Ward, H. Cheng, R. L. Edwards, J. Galetzka, and B. W. Suwargadi, *J. Geophys. Res.*, **109**, B04306, doi:10.1029/2003JB002398, (2004).
 - 15) Khan, S.A., and O. Gudmundsson, GPS Analyses of the Sumatra-Andaman earthquake, *EOS Trans.*, **86** [9], 89, 94, (2005).
 - 16) Chapman, C., The Asian tsunami in Sri Lanka: a personal experience, *EOS Trans.*, **86** [2], 13-14, (2005).
 - 17) Park, J., K. Anderson, R. Aster, R. Butler, T. Lay and D. Simpson, *EOS Trans.*, **86** [6], 57-64, (2005).
 - 18) Maruyama, T., *Bull.Earthq. Res. Inst.*, **41**, 467-486, (1963).
 - 19) Furumura, T., and K. Koketsu, *PAGEOPH*, **157** [11-12], 2047-2062, (2000).
 - 20) Koketsu, K., and M. Kikuchi, *Science*, **288**, 1237-1239, (2000).
 - 21) Sato, H., N. Hirata, K. Koketsu, D. Okaya, S. Abe, R. Kobayashi, M. Matsubara, T. Iwasaki, T. Ito, T. Ikawa, T. Kawanaka, K. Kasahara, and S. Harder, *Science*, **309**, 462-464, (2005).
 - 22) Chapman, C., The Asian tsunami in Sri Lanka: a personal experience, *EOS Trans.*, **86** (2), 13-14, 2005.

講座

金属学とその研究手法の進歩 －研究生活を顧みて[IV]

村上陽太郎*

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

by Yotaro MURAKAMI

1. はじめに

本誌23巻5号¹⁾（平成14年12月発行）から、6号²⁾及び7号³⁾に、表記題目の3報文を連載していただいた。本年の4月中頃、編集委員長の落合庄治郎教授から、統いての寄稿の依頼があった。筆者は本年4月7日に満88才（米寿）になったが、まだまだ元気で、書きたい事があるので喜んでお引受けした。1981年（昭和56年）4月1日付で京都大学は定年になり、すぐに関西大学工学部金属工学科に移ったが、国立大学の様な制約がなくなったので、頼まれる儘に、いくつかの企業の技術相談を引受けることになり、企業における種々の問題に対応することが求められてきたので、新しい学問の進歩にも遅れないように、従来にも増して広く、毎月来る内外の学術誌に目を通すようになった。関西大学は1988年（昭和63年）3月末で退職し、金属学の研究に直接携わることは少なくなったが、1986年（昭和61年）から、（財）大阪科学技術センター付属ニューマテリアルセンター（NMC）所長に就任し、業界や国との接触も密になり、産業界の各種の情報も得られ易くなった。その頃には、金属学を始めとし材料の基礎学問が進展し、国の指導で、新材料、新素材の研究が活況になってきた。これは我国は、資源もエネルギーもないで、これらを海外から調達し、付加価値を高めた製品を製造できる、所謂、科学立国の考え方が浸透してきたことによるものであった。NMCの設立より丁度1年前の1985年（昭和60年）10月には金属材料の研究開発を目的とする（財）金属系材料研究開発センター（JRCM）が発足している。NMCは、JRCMの新材料の研究開発の推進を補完するため、材料の試験・評価法等の確立を主目的とする姉妹団体の関係

にある。JRCMは会員の殆んどが鉄鋼関連の諸企業であったが、アルミニウム業界からは、当時の庄延7社が参加した。私はアルミニウム業界の学会側の代表のような形で評議員を委嘱され、発足したいくつかの調査部会の中の「アルミニウム材料の高機能化調査部会」の委員長の役割を果たすことになった。NMCでは1997年（平成9年）3月末、JRCMでは1998年（平成10年）10月に、それぞれ辞任するまで活動を続けた。以上のような経緯から、前3報の続きとして、第4報では、(1) JRCMと関連のある超微細結晶粒アルミニウム材料と、企業と関係して勉強した(2)アルミニウム缶胴体用材料及び電解コンデンサー用高純度アルミニウム箔について、その基礎を含めて書くことにした。

2. JRCMで実施されたスーパーメタルの研究開発⁴⁻⁶⁾

2.1 はじめに

JRCMでは、（財）次世代金属・複合材料研究開発協会と共に、当時の工業技術院の「新規産業創出型産業科学技術研究開発制度」に基づき、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）から、委託された「スーパーメタルの技術開発プロジェクト」を、1997年（平成9年）度から5ヶ年に渡って実施した。このプロジェクトでは、金属材料の従来の設計概念を革新し、合金元素の添加、熱処理等によって、その特性向上をはかる方法に代って、省資源とリサイクル性を考慮して、合金元素の種類と添加量をできるだけ少くし、所謂 Hall Petch式で示されるように、結晶粒径を微細化することによって、強度、靭性及び耐食性等を大幅に向上させる技術を目的としている。このプロジェクトの研究開発テーマとサブテーマは表1⁴⁾のようである。

「アルミニウム系メゾスコピック組織制御材料創製技術」は、JRCMと住軽、神鋼、スカイアルミニウム、日

*京都大学名誉教授（昭和17年、冶金卒）

表1 研究開発テーマとサブテーマ⁴⁾

1. 鉄系メゾスコピック組織制御材料創製技術
2. アルミニウム系メゾスコピック組織制御材
3. ナノ結晶組織制御材料創製技術 料創製技術
■ 微粒子微細分散技術
■ 高速粒子堆積・超塑性成形技術
■ 超構造材料
4. アモルファス構造制御材料創製技術
■ 高密度エネルギー相利用制御技術
■ 制御冷却技術
■ 環境融合材料

軽、古河電工及び三菱アルミニウムの6社とが共同体を組織し、「3μm程度以下の極微細結晶粒径を有する組織制御材料で、工業的特性（強度、耐食性）が現在使用されている同種材料の1.5倍以上、かつ板幅が約200mm以上のアルミニウム系大型素材の創製技術を確立する」ことを開発目標とした。当初は、主に現行の工業用純Al及び加工硬化性Al合金について、既設の試験圧延機を用いた低温圧延・高圧下圧延・異周速圧延・繰返し重ね接合圧延・異方向圧延等における歪みの蓄積を検討すると共に、ECAPによる高剪断歪みと微細結晶粒の関係の検討が行われた。さらに、この様な方法によって加工した材料について、極微細結晶粒を創製する為の熱処理条件を検討し、合金系・分散粒子のサイズとその分布と結晶粒組織との関係が調査された。又微細結晶粒の評価方法を検討し、同評価装置として、当時はまだ新しかったOIM (Orientation Imaging Microscope)⁷⁾が設置され、低温圧延加工設備が設計・製作され、研究成果の向上に寄与した。これらの詳細は、第1回スーパーメタルシンポジウム講演集（平成9年度）⁴⁾、第2回講演集（平成10年度）⁵⁾及び第3回講演集（平成11年度）⁶⁾に記載されている。

2.2 結晶粒微細化強化と Hall-Petch の式⁸⁾

結晶粒微細化強化では、Hall-Petchの関係によって示されるように、降伏強度は結晶粒径の平方根に逆比例して増大する。図1のように、有効外力 τ_o （外力 τ_a -摩擦力 τ_f ）のもとで、n個の転位が長さ L（粒径 d の 1/2）に沿って堆積すると、粒界に $n\tau_o$ の応力集中が起る。粒界から Γ （転位網の間隔 δ_c に等しい）離れた距離にあるピン止めされた転位が離脱するに要する応力 τ_c を求めると $\tau_c - \tau_f = \tau_o (L/\delta_c)^{1/2}$ のようになる。ここで、 $\tau_o = \tau_a - \tau_f$ 、 $L = d/2$ を考えると、 $\tau_a = \tau_f + \sqrt{2}\sqrt{\delta_c}(\tau_c - \tau_f)d^{-1/2}$ となる。 $\delta_y = 2\tau_a$ 、 $2\tau_f = \delta_o$ 、とし、 $k_y = 2\sqrt{2}\sqrt{\delta_c}(\tau_c - \tau_f)$ と置くと、 $\delta_y = \delta_o + k_y d^{-1/2}$ 、Hall-Petch 式が得られる。図2⁷⁾に Al とその合金及び低炭素鋼の耐力と結晶粒の平方根の逆数 ($d^{-1/2}$) の関係を示す。何れも実験値は直線上に乗り、Hall-Petch の関係が成り立っている。これらの直線の勾配は k_y の値を示し縦軸との交点の値は δ_o に相当する。

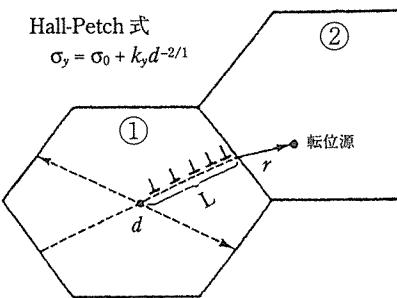
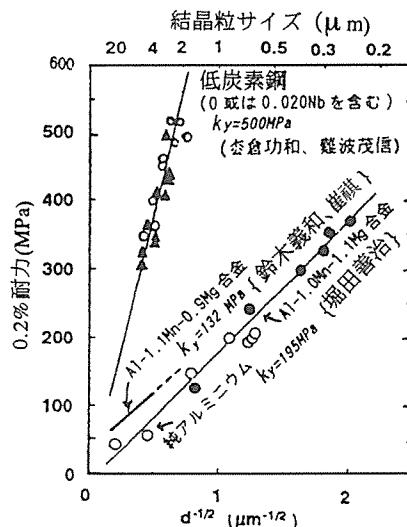


図1 結晶粒界に於ける転位の堆積と辺り面先端の応力集中

図2 アルミニウム合金と炭素鋼の耐力の結晶粒径依存性、特に Hall-Petch 式の k_y の比較⁸⁾

ここで重要な事は、炭素鋼と Al では k_y の値に大きい差があることで、炭素鋼で、500 MPa であるのに対して、Al では、132, 195 とかなり小さく、Al の結晶粒微細化の効果が炭素鋼よりも小さいことである。 k_y の寄与を考えてみると、 k_y は上式から明らかなように、 τ_c に依存するので、溶質原子と母相原子とのミスマッチ歪みが大きい程有利であると思われる。表2⁹⁾は、江藤武比古博士の計算結果で、Al 中の固溶元素によるその値は、Fe 中の C 原子によるそれよりもかなり小さい事が示されている。又結晶粒界の移動阻止能や Zener Drag も重要である。Al 合金中の分散粒子に就いて、江藤博士の計算によると、Mn : Cr : Zr : Sc で、1 : 6 : 10 : 30 の比の順に効果が増大する。Mn のミスマッチ歪みは最も大きいが、分散粒子の能力は大きくない。しかし、Mn は結晶粒微細化には有効な元素であることが鈴木ら⁹⁾によって実証されている。

2.3 超微細結晶粒組織製造のための高歪塑性加工法の現状

ナノ或はサブミクロン・サイズの超微細結晶粒(Ultrafine-grained, UFG)組織の製造は、我が国において、2.1で述べたように、「スーパーメタル・プロジェクト」として、世界に先がけて開始されたが、UFG組織は合金開発上、極めて魅力的であるため、それを製造するための過酷な歪を与える塑性変形(Severe plastic deformation, SPD)技術⁹⁾が各国でも急速に研究開発が進められ、研究段階から工業生産へ発展しつつある。我が国のプロジェクトの成果と共に現状について述べる。

バルク試片やビレットを用いて、希望するUFG組織

を製造するための高歪塑性加工法には、先ず結晶粒組織は高傾角粒界で構成されている事、第2はナノ組織は均一であること、第3は過酷な塑性変形を受ける間、大きな機械的損傷即ちクラックを生じてはならない事。これらの要求に確実に答えるために、最適なプロセシング・パラメータの確立が必要である。現在までに開発されている技術の種類と特徴を表3⁹⁾に示す。高圧力振り法(図3(a))では、均一なナノ・スケールの高傾角粒界を含む組織が容易に得られることが、初期の研究段階で示されたが、製品サイズの小さいことが最大の欠点で実験的スケールに限られる。ECAP(図3(b))と回転ECAP(図4)は次節で詳細に述べる。図5に示すような不同

表2 アルミニウム及び鉄中の溶質原子のミスフィット歪(江藤武比古)⁷⁾

元素	原子半径 (Å)	原子半径より求めた ミスフィット歪み、 ϵ'	弾性係数を考慮した ミスフィット歪み、 ϵ
Al	1.43	0	0
Si	1.32	-0.077	-0.083
Fe	1.26	-0.119	-0.145
Cu	1.28	-0.105	-0.123
Mn	1.26	-0.119	-0.150
Mg	1.60	0.119	0.088
Zn	1.38	0.035	0.035
Li	1.55	0.084	0.032
Fe中のC原子		-0.278	-0.381

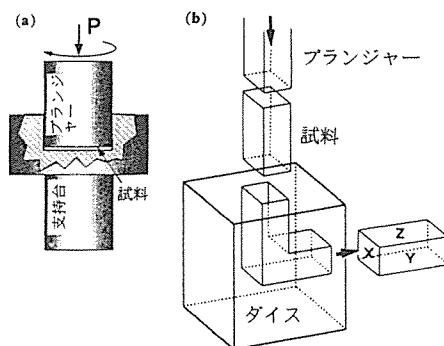


図3 高歪塑性変形技術の原理
(a)高圧力振り (b)ECAP

表3 高歪塑性変形法の種類と特徴⁹⁾

変形法	特 徵
高圧力振り(High pressure torsion, HPT)	図3(a)のように、数GPaの圧力下で、振り回転を加える。試料寸法は、10~20mm ϕ 、厚さ0.2~0.5mmで小さい。実験的手法、高傾角粒界と100nm以下の超微細結晶粒(UFG)を得る。
ECAP(Equal-channel angular pressing)	図3(b)のように、90°又は其れより大きい角度で交差する等断面の2つのチャンネルのダイスを通して、4~6バスの繰り返し圧縮を加える。高傾角粒界の均一なUFGを得る。最も実用化し易い。
回転ダイスを持つECAP	図4のような回転ダイスセットを持つ事で、バス間のビレットの取出し・再挿入の必要がなくなる。
板の不同CAP(Dissimilar channel angular pressing of sheets)	図5のような不同断面のチャンネルを通して圧延を繰り返す。広幅・長尺のUFGの板が得られる。
繰返し波形-整直圧延(Repetitive corrugation and straightening)	図6に示すように、ロール系を通して、繰り返し、曲げと整直を多数回加える。高い実用生産性の可能性がある。
多重鍛造(Multiple forging)	繰返しの自由鍛造操作と鍛造方向の系統的変化で、高い歪みの均一性を計る。高効率と安価なプロセスを得る。
振り押出し(Twist extrusion)	図7のような矩形断面のビレットを、振れたチャンネルのダイスを通して押出し、強い剪断変形を与える。
蓄積ロール・ボンディング(Accumulative roll bonding)	図9のようなプロセスで、等厚の2枚の板を、最初の厚さまでの、同時圧延を、数回繰り返す。結合圧延で板は相互に圧着される。ミクロ組織は厚さを通じて不均一である。

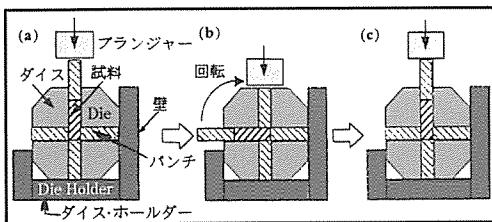


図4 回転ダイス・セットを持つECAP法の原理図
(a) 第1回パス, (b) ダイス・セットの90°回転,
(c) 第2回パス

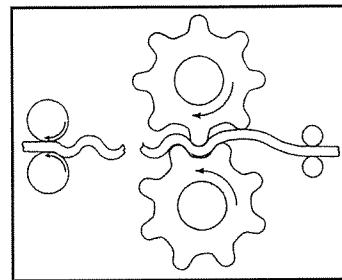


図6 連続RCSのプロセスのサイクル

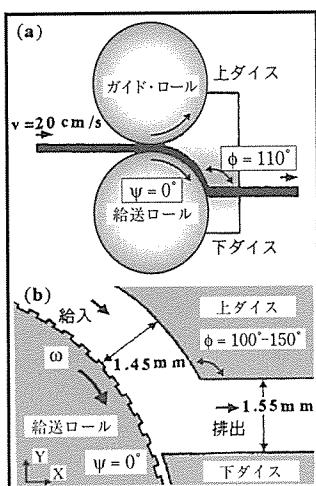


図5 板の不同チャンネル・アンギュラー・プレッシングの原理図

チャンネル・アンギュラー圧延法による連続板への剪断歪みの導入法が開発されている。又連続的な方法として、図6に示すように、ギヤ様式のロール系を用いて、曲げと整直を繰返し行う方法がある。多重鍛造法は繰返しの自由鍛造操作と鍛造方向の系統的変化で歪みの均一性を計るが、均一性は低い。しかし、このプロセスは高温から出発するので比較的脆い材料でもUFG組織の製造が可能になるし、安価なプロセスである。捩り押出し法は、図7(a)のように、矩形断面のビレットを捩れたチャンネル・ダイスを通して押出し、強い剪断変形を与える方法で、その装置の一例を、同図(b)に示す。

2.4 ECAP法と回転ダイス・セットを持つECAP法

ECAP¹⁰の起源はSegalらの研究で1980年代に遡る。しかしUFGへ応用されたのはValievが彼の同僚と共にSPD法として適用した1990年代初期である。我国では、九州大学の堀田善治教授ら¹¹⁻¹⁴が、筆者の旧知の南カリフォルニア大学のT.G.Langdon教授と広汎な共同研究を行なっている。図3(b)はこの加工法を模式的に示したものである。図のように屈曲したチャンネル中に

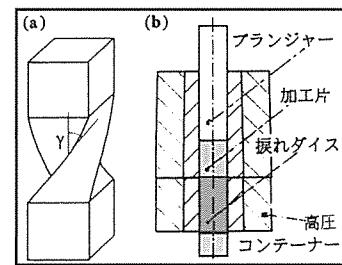
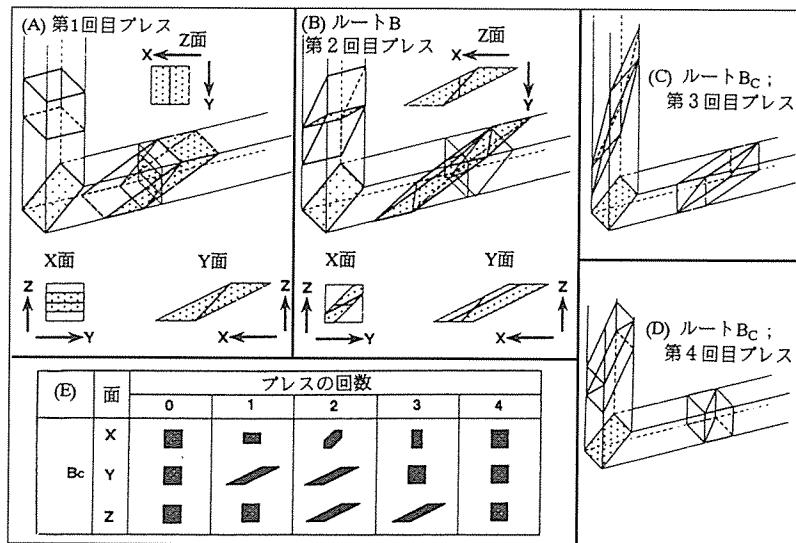


図7 捣りチャンネル押出しの原理図
(a) 捣じりチャンネルの幾何学的図形
(b) 捣り押出しの装置構成図

試料を通すことで、剪断歪みが導入される。チャンネルの断面形状が入り口と出口が同じであることから、同一試料を繰返し通す事ができ、結晶粒微細化がバルク状態で達成できることが利点で、工業的に実用化できる可能性が高い。ダイスを通過する各パスは、最も一般的に用いられる90°の交叉角の場合約1の付加的有効歪を与える。変形の難しい材料の場合には、変形は高温か、交叉角の大きいダイスを用いる。均一なナノ組織を製造するには、多くのプロセス・パラメータ即ち、付与歪み量、歪みの導入方向、加工温度、チャンネル角度、固溶元素添加等の制御が必要である。図3(b)で、試料取出し後に、試料長軸回りに90°宛同一方向に回転する場合(これを“ルートB_c”と名付ける)最小の回数で結晶粒微細化ができるので、そのプロセスを少し詳しく述べる。図中のX, Y, Zは試料面を示し、各面の垂直方向を、夫々X, Y, Z方向とする。図8¹¹は加工による剪断と立方体素片の形状変化を模式的に示す。(A)は第1回パスの状態で、入口側の立方体素片は初期結晶粒と見なす事もできる。立方体素片は出口側では、X方向に伸びた平行六面体になる。この平行六面体のX, Y, Z面に平行な断面形状も示してある。Z面上では正方形が保存され粒形状は変化しないが、X面ではZ方向につぶれ、Y面ではX方向(試料長軸方向)と27°傾いた方向に伸びる。剪断トレースでは、X, Z面ではY方向を平行に、

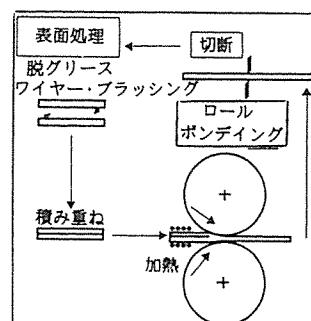
図8 ECAP加工による剪断とこれに伴う立方体素片の形状変化を示す模式図¹¹⁾

Y面ではX方向と45°傾く。このトレースは平行六面体のX, Y, Z断面中に夫々実線で示す。(B)は90°回転し第2回目の状態を示す。出口側の素片は、どの断面も伸びた形状になり、X断面ではY, Z両方向と45°で交わる対角線方向に、Z断面もX方向と27°傾いた方向に伸びる。また、各X, Y, Z断面中に第1回目と第2回目の両剪断トレースを実線で示す。(C)は3回、(D)は4回目のECAPを重ねて行った時の素片の変化を示す。試料は毎回長軸回りに90°宛同方向に回転を行った“ルートB_c”である。第4回目後には元の立方体素片に戻り、形状は完全に保存される。(E)は素片のX, Y, Z断面形状を初期状態をも含めて第1回～第4回をまとめたものである。変形するビレットとダイス壁間の摩擦は剪断塑性歪みの均一性に強く影響するので、実験と有限要素モデリングを通して研究され、プロセシングの最適化がはかられている。ECAP中に逆圧の負荷が有効である。プロセシングのコストを最小にする一つの方法として、図4の回転ダイスを持ったECAPは極めて有望と考えられている。取出しも再挿入の必要もなくなる。しかし、これはルートAにのみ可能で、交叉角は90°に限定される。ECAPによる微細化に関する堀田らの研究¹¹⁾で、初期結晶粒径1mmの高純度AlはECAPによって、ルートB_cの操作で約1.3μmまで微細化できることが示された。試料無回転の場合(ルートA)、180°回転の場合(ルートC)などの操作ではルートB_cほど効率よく微細結晶粒は得られていない。ルートB_cでは毎回異なる方向に剪断が入るのに対して、ルートAやCでは剪断が殆んど同じ方向に入る。この為、ルートB_c

では種々の方向のサブグレン組織が形成され易く、このようなサブグレンでは加工によって生成した転位がサブグレン粒界で効果的に吸収・消滅されて粒界角度が大きくなり易くなるためと説明されている。

2.5 繰返し重ね接合圧延(Accumulative Roll-Bonding, ARB)

この方法は、我が国では、大阪大学の斎藤好弘教授の研究グループが多く研究成果を挙げている。図9はこの方法の原理図¹⁵⁾である。この方法では、例えば50%圧延によって厚さが半分になった板を長手方向に二等分し、元のサイズに戻した上で再度圧延することを繰返す。一体化した材料を得るために接合プロセスをも兼ねたroll bondingであり、良好な接合を達成するために、試料の表面には積層前に脱脂・ワイヤブラッシング等表面処理が施される。良好な接合と圧延荷重を減らす目的で、通常再結晶温度以下の温間域で行われる。このプロセス

図9 ARBの原理図¹⁵⁾

によるミクロ組織の微細化は、例えば、Al (1100) で、5分間、473Kで7サイクルを行った場合、初期粒サイズ $37\text{ }\mu\text{m}$ が、 670 nm に減少した。ARBによって達成できる強度の増大は、Hall-Petchの関係がほぼ成立するが、破断伸びは、Al及び侵入型原子を含まない鋼において、平均粒サイズが $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下になると急激に減少した。これを解明するために、大きな歪み領域における力学挙動を調べる事のできる圧縮試験が行われた。結晶粒微細化に伴って変形初期の変形応力（降伏応力）が大きく増加するが一方で加工硬化が起り難くなる。その結果、塑性不安定性条件、 $\sigma > d\tau/d\varepsilon$ が、変形初期に達成し易くなり、引張試験で早期くびれが発生して破断に至ることが判った。これを改善するためには、例えば微細第2相粒子の均一分散により、マトリックスの加工硬化率を大きくすることなどが考えられている。

2.6 GDRの利用による通常の圧延法

Al合金のUFG組織は、上記のようにECAP法やARB法のような特別な高歪みを与える方法で達成できるが、生産のスケールアップは難しい。Humphreys教授ら¹⁶⁾は、幾何学的動的再結晶（Geometric Dynamic Recrystallization, GDR）を利用する通常の圧延法で、粒子を分散させた2種類のAl-3%Mg合金において微細化に成功している。図10¹⁸⁾に示すように、板に圧延（面歪圧縮変形）を加えると、その結晶粒は圧延方向に伸ばされ

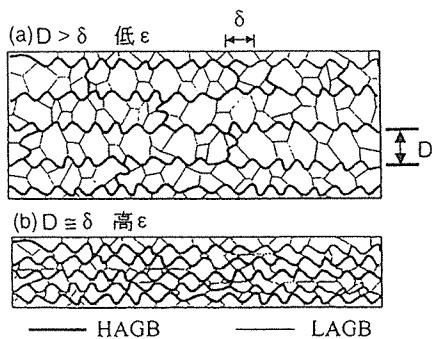


図10 結晶粒厚さ D とサブグレンサイズ δ に及ぼす歪の影響の図式表示¹⁶⁾

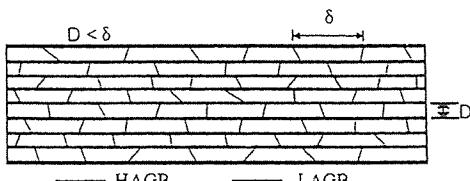


図11 HAGBの移動が起こらず纖維状組織が生じた高度に変形したミクロ組織の図式表示¹⁶⁾

されて相互に、図の(a)のように押し合うが、粒界移動が起り易い高温で十分に大きい歪が与えられると、最終的には隣接する粒界が pinch off されて、ほぼ等軸な動的再結晶粒組織(b)が生じる。これがGDRである。図において、結晶粒径 D の減少は歪 ε と最初の粒径 D_0 の間に、 $\varepsilon = \ln(D_0/D)$ の関係がある。GDRが起るためには、 D がサブグレンサイズ δ と同程度の臨界値まで減少しなければならない。高傾角粒界（HAGB）の間隔 D が δ に等しくなる臨界歪 ε_c が必要条件で、 $\varepsilon_c = \ln(D_0/\delta)$ である。若し条件が満足されない場合には、図11¹⁶⁾に示すような纖維状組織が生じる。次にGDRを達成するための条件を示す。

(イ) 2種類の合金と分散粒子

GDRを達成するには、分散粒子の導入が必要と考えられるので、Al-3%Mg-0.2%Cr-0.2%Fe合金とAl-3%Mg-0.2%Sc-0.1%Zr合金（以下、前者を、Al-Fe合金、後者をAl-Sc合金と略称）を用いた。Al-Fe合金では、 $0.5\sim 1\text{ }\mu\text{m}$ 径 ($V_f=0.02$) の粗大粒子が不均一分散し、これらの粒子は予備的な加工熱処理中に粒子刺激核生成場所を提供し、 $12\text{ }\mu\text{m}$ 径の再結晶粒組織が得られた。一方、Al-Sc合金では、 $\sim 8\text{ nm}$ 径 ($V_f=0.002$) の整合な $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 微細粒子が密に均一分散し、強力な Zener pinning によって、最初の熱間変形プロセス中には再結晶は起らなかった。図12¹⁶⁾（上）にAl-Fe合金を 350°C で $0.1/\text{s}$ の速度で変形した場合の歪みの影響を示す。変形初期には結晶粒は圧延方向に伸長するが、 ~ 2 の歪みで、 D と δ はほぼ同等となり、ミクロ組織は微細等軸粒にな

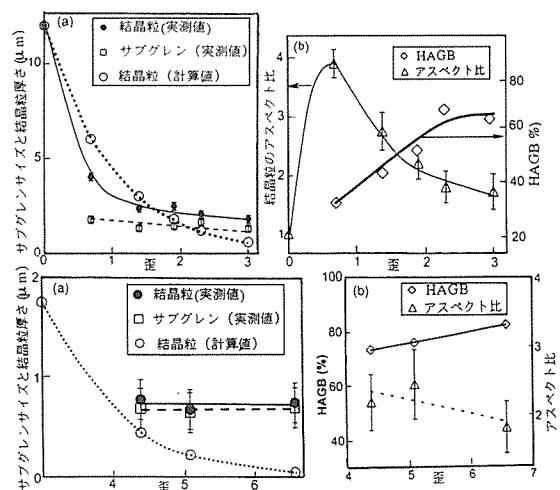


図12 350°C で変形したAl-Mg-Cr-Fe（上）及びAl-Mg-Sc-Zr合金（下）に及ぼす歪の影響、(a) サブグレンサイズと結晶粒厚さの実測値と計算値、(b) HAGBの分率と結晶粒のアスペクト比¹⁶⁾

る。結晶粒の実測値は上記の式で計算した値とほぼ一致している。 $\sim 350^{\circ}\text{C}$ 以上の変形では、Dは δ よりも急速に増大した。Al-Sc合金に関しては、図12¹⁶⁾(下)に同様なデータを示す。Al-Fe合金よりもずっと大きな歪まで微細結晶粒が得られ、4.4以上の歪で、Dと δ は $\sim 0.7\mu\text{m}$ と同等になった。変形温度が高くなるとD、 δ は共に増大するが、Al-Fe合金よりも傾向は顕著に小さい。これらは微細な $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 粒子の寄与によるものである。

(口) 超微細粒組織形成の条件

高温変形中に、温度と歪速度 (Zener-Hollomon パラメータ) の特定の条件下で微細等軸粒が発達し、“連続的再結晶”の特徴を示した。図13¹⁶⁾(a) に Al-Fe 合金の形成条件を示す。微細粒は●印で、粗大粒は○印で示す。×印は図12(上)(a) の用いて計算した 350°C で $\delta = D$ の歪 ε_c を示す。変形温度に対する ε_c の予測される変化は実線で示されている。微細粒形成条件は、 $\varepsilon = \varepsilon_c$ よりも僅かに高い温度か、より大きい歪が要求され、図中の斜線部に限定される。一方 Al-Sc 合金では同じ変形条件で、結晶粒サイズは2~3倍も小さい。 350°C で、歪3で、前者では、 δ は $1.3\mu\text{m}$ であるのに対して、後者では $0.7\mu\text{m}$ である。Al-Sc 合金の微細結晶粒は、図13¹⁶⁾(b)の斜線部のように、 350°C では ~ 6 、 400°C では ~ 5 の歪で初めて形成される。又、 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 微細粒子は微細結晶粒組織形成後もその安定化に寄与する。

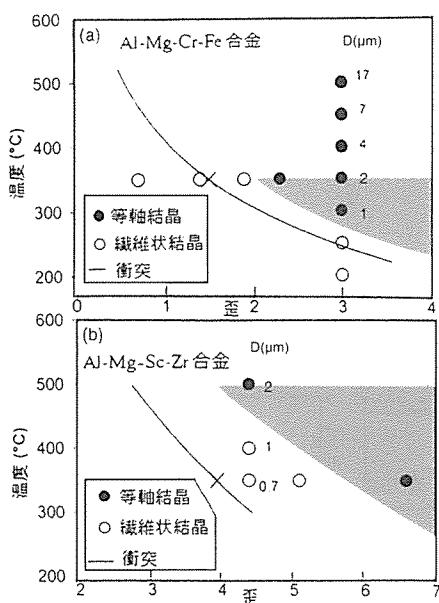


図13 ミクロ組織に及ぼすプロセス条件の影響、
実線：衝突条件、斜線部： $2\mu\text{m}$ 以下の結晶
粒を生じるプロセスウインドー¹⁶⁾

3. アルミニウム板の集合組織

3.1 集合組織¹⁷⁾とは

筆者が業界の技術指導で経験した飲料用 Al 缶胴体と電解コンデンサー用高純度 Al 箔の集合組織の制御に就いて書くが、その前に集合組織に就いて章を設けて解説をしておく。筆者が教授に昇進してしばらく経った頃、旧制大学院の修了者が理化学研究所の就職試験の口頭試問で、集合組織 (texture) とは何かとの質問があったことを聞いたことが想い出された。古い時代には集合組織という語は金属学の専攻者にも一般的な常識になっていたなかった。新しい言葉であった。これは X 線による集合組織の測定技術が一般に利用され始めた頃の話である。工業用金属材料は多数の結晶粒の集合体である。各結晶粒中の原子は概して規則的に配向しているが、その配向の方向は結晶粒毎に異なっている。多結晶材料は、凝固、塑性加工、熱処理等において、結晶の成長や移動の異方性から、製造工程でそれらの配向が統計的に偏ったものとなり、優先方位が発生する。これが集合組織である。例えば、板の圧延においては、金属結晶の辺り変形（一部は双晶変形）によって塑性変形が起こる。結晶体は周囲の粒界等から一定の拘束を受け、変形の進行によって結晶の回転が起こる。結晶回転は1つの辺り面上の剪断変形による試料座標系に対する結晶座標系の相対回転として規定できる。例えば、図14に示すように、(100)[001] 方位の単結晶板を圧延して、単純な辺り変形が進んで、約 60% に板厚が薄くなると結晶方位は、(111)[112] になる。その際に、図15に示すように結

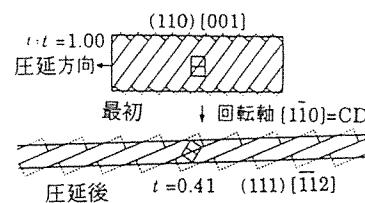


図14 圧延に伴う結晶方位の変化
(001)[001] 初期方位の例

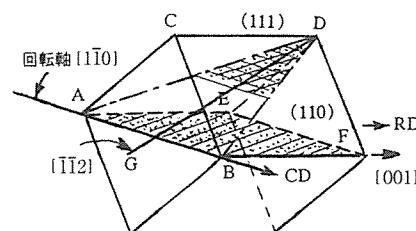


図15 (001)[001] 方位が [110] 軸の回りに回転して
(111)[112] 方位に変化する事の説明図

晶は板幅方向に平行な $[1\bar{1}0]$ 方向を軸に回転したように見える。このような巨視的変形による方位回転は、多結晶体でも粒界での連続性等を満足する可能な辯り系と変形モデルを選べば可能であって、圧延等の塑性加工で形成される加工集合組織は可なり正確に予測できる。加工材を焼純して再結晶を起すと集合組織は変化する。すなわち再結晶集合組織が形成される。これらの集合組織は工業製品の性質に大きく影響するので、集合組織の制御が行われる。

3.2 圧延試料の結晶粒方位の表示法

3.2.1 ミラー指標による表示法

古くからよく用いられている方法で、ミラー指標を用いる。試料座標系として、圧延面法線方向に ND、圧延方向に RD、板幅方向に TD をとる。板の中の一つの結晶粒において、圧延面に平行に (hkl) 面、圧延方向に平行に $[uvw]$ 方向を向いているとき、この結晶粒の方位を $(hkl)[uvw]$ と記述する。 $h \cdot u + k \cdot v + l \cdot w = 0$ の条件を満たすように、 h, k, l 及び u, v, w の順番を入れ替えて得られる24通りの等価の方位群を $\{hkl\}<uvw>$ と表示し、理想方位と呼ぶ。図16¹⁹⁾に理想方位を持つ3個の結晶粒を示す。

3.2.2 オイラー (Euler) 角表示法

試料座標系と結晶座標系との間の角度関係を表すため

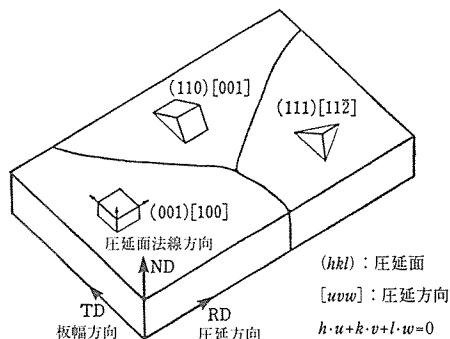


図16 ミラー指標による集合組織の表現¹⁹⁾

に、図17²⁰⁾に示すように、オイラー角 (ϕ_1, Φ, ϕ_2) が用いられる。試料座標系として、X 軸に RD, Y 軸に TD, Z 軸に ND をとる。結晶座標系として、立方晶系の場合は、X=[100], Y=[010], Z=[001] からなる直角座標をとる。先ず、図17の上部右図に示すように、試料と結晶の両座標が一致した状態を考える。次に結晶座標系の 2 軸について、反時計回りに ϕ_1 回転を行い、更に移動した結晶座標系の X 軸 (X' 軸) について、 Φ 回転を行い、最後に、結晶座標系の Z 軸 (Z' 軸) について、 ϕ_2 回転を行う。これによって、結晶座標系は、X', Y', Z' へと移動する。この時 3 つの回転角 (ϕ_1, Φ, ϕ_2) によって結晶方位が定義できる。すなわち、図17²⁰⁾の下部右に示すように、 $\phi_1 - \Phi - \phi_2$ 3 次元空間内の 1 点 P によって、その方位が表現できる。この 3 次元空間を 2 次元の紙面に示すため、通常この空間を角度 ϕ_2 方向に 5° おきに水平にスライスして得られた各 ϕ_2 一定断面を並べて示すのが、一般的である。図18¹⁹⁾に立方晶における $\phi_2=0^\circ, 45^\circ, 65^\circ$ 断面を示し、低指数の理想方位を示す。

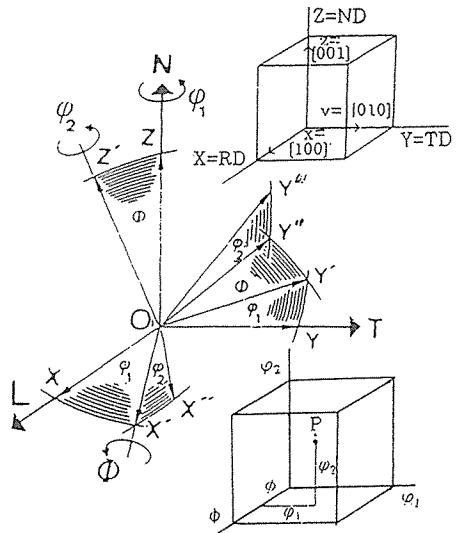


図17 オイラー回転 (ϕ_1, Φ, ϕ_2)²⁰⁾

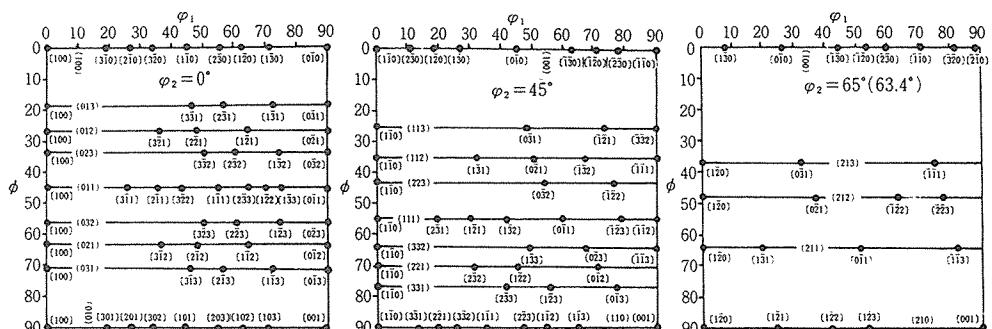


図18 オイラー空間の $\phi_2=0^\circ, 45^\circ, 65^\circ$ 断面における代表的な理想方位の位置¹⁹⁾

3.3 ステレオ投影法による正、逆極点図の表示法

3.3.1 正極点図による表示法

無限小の結晶を中心とし、この球を参考球と呼ぶ。この結晶の(hkl)面の法線が参考球の球面に交わる点を(hkl)面の極と呼ぶ。(図19²⁰⁾の上部右)その例として、同図下部右に{100}面の極を示す。同図左のように、参考球に接して投影面を垂直に置き、試料座標系をその原点を参考球の中心として、ND軸が投影面に垂直に、RD軸を上下に、TD軸を横方向にとる。次に、ND軸の投影面の交点の正反対の位置にあたる参考球面との交点に光源をおいて、参考球上の極Pを投影面に投影すると、P'点がえられる。すなわち、図20²⁰⁾に示すような極点の二次元投影図がえられる。このような投影法をステレオ投影と呼び、えられた投影図を正極点図といふ。図20²⁰⁾は、(001)[100]方位の{111}極をステレオ投影したもので、これを(001)[100]方位の{111}極点図といふ。AIの場合{111}極点図と共に{100}極点図も多く用いられる。

3.3.2 逆極点図による表示法

正極点図では、基準座標系として試料座標系を用いたが、逆極点法では結晶座標系を採用し、図19において、

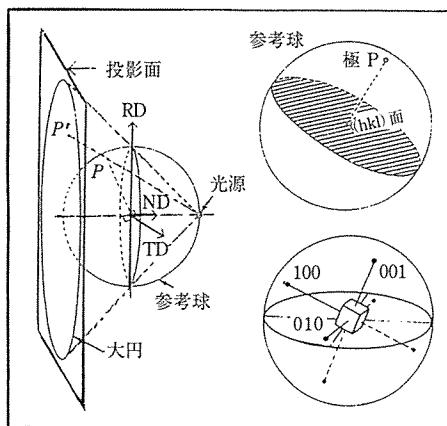


図19 試料座標系を基準としたステレオ投影²⁰⁾

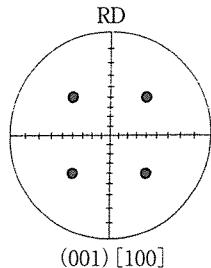


図20 {001}[100]方位の(111)正極点図²⁰⁾

RDの代りに[100], TDの代りに[010], NDの代りに[001]軸をとる。この状態で参考球面上の主要結晶面の極をステレオ投影すると、中心に(001)極がある001標準投影図と呼ばれるものがえられる。これは、001, 011, 111を3頂点とする三角形を24個含んだ構造になっているので、その中の一つ図21²⁰⁾の三角形を代表させて、これを単位ステレオ三角形と呼ぶ。この三角形の中に試料軸の位置をプロットしたものが逆極点図である。例えば、圧延面法線ND軸の位置をプロットしたものはND逆極点図と呼ぶ。

3.4 集合組織の表示法

塑性加工や再結晶を行った試料において、試料のある体積にわたって含まれる結晶粒の方位を測定し、上記の正、逆極点図、オイラー空間にプロットすると、それらは或る特定方位の回りに分布、集積する。これらを優先配向或は集合組織ということは既に述べた。例として、図22¹⁹⁾に(001)[100]立方体集合組織をもつ試料の{111}及び{100}極点図を示す。最近は測定技術が進歩したので、三次元結晶方位分布関数(orientation distribution function, ODF)を用いる方法が多く用いられるようになってきた。既に述べたように、測定した結晶方位を $\phi_1-\Phi-\phi_2$ 3次元空間(オイラー空間)にプロットすると三次元分布となり、分布関数 $f(\phi_1, \Phi, \phi_2)$ で表

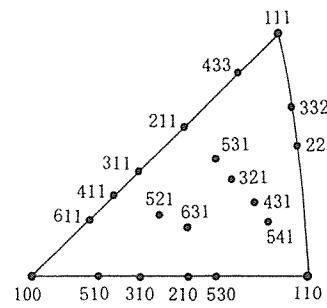


図21 単位ステレオ三角形²⁰⁾

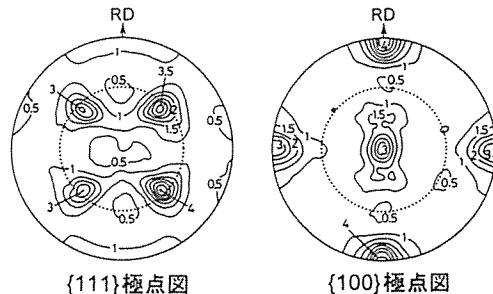
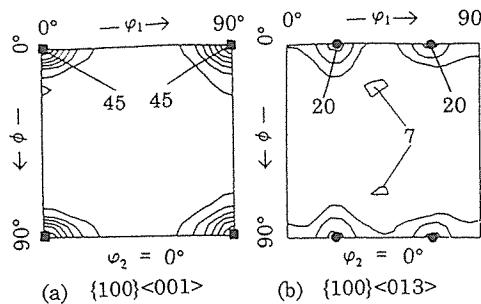


図22 5052アルミニウム合金焼純板の正極点図
点線は反射法領域と透過法領域の接続位置を示す¹⁹⁾

図23 ODF の実測例²⁰⁾

すことができる。この分布関数を ODF という。ODF は計算によって得られる。この ODF は図18と同様、 5° きざみの $\phi_2 = \text{一定断面}$ をならべて示す。或は注目する ϕ_2 の一定断面のみを表示する。図23²⁰⁾はその例で、理想方位の位置を示すマップと対比すれば、その主方位は容易に同定できる。主方位は図23²⁰⁾(a)では $\{100\}<001>$ 、(b)では $\{100\}<013>$ である。

3.5 集合組織の測定法

3.5.1 X線による測定法

反射法の原理を述べる。X線は上下方向の幅を制限したビームを当て、入射X線と回折X線を検出するシンチレーション・カウンターを常に Bragg 反射条件を満足するように固定して置く。試料の α 回転及び β 回転に伴う回折X線強度を測定する。これによって、参考球の球面上の強度分布、すなわち $\{kk\}$ 面法線の集積の粗密分布が得られる。これを二次元投影して、図22のような正極点図を得る。反射法ではポーラーネットの内部のみが得られるので、外側は透過法で求める。数枚の極点図を元にして、市販のソフトを使って ODF を計算することができる。

3.5.2 EBSP による測定法 (OIM の利用)

SEMにおいて通常のスキャンを行なながら、各測定点で、反射電子線回折パターン (Electron Back Scatter Pattern, EBSP) を採集、自動的に処理、解析して、精度 1° 以内の高精度で、結晶方位のマッピング像を得ることができる OIM (Orientation Imaging Microscope)⁷⁾ が市販され、広く一般に使用されるようになり、種々便利に応用されている。

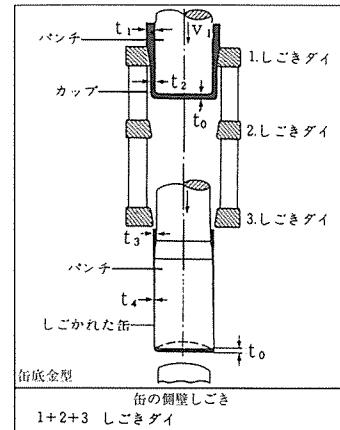
4. 飲料缶胴体用アルミニウム合金と集合組織制御

4.1 はじめに

現在日常に目にする飲料用オールアルミ缶（蓋も缶胴部もアルミ合金で造る）の生産は米国で始まったが、我が国で生産が開始されたのは1971年である。現在、アルミ飲料缶用板材の年間生産額は約32万トン程度で、板材総出荷量の約4分の1に達し、アルミ圧延産業の主要

表4 アルミニウム缶胴体用合金の化学組成²¹⁾

合金	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
3004	0.30	0.7	0.25	1.0-1.5	0.8-1.3	-	0.25	-	Bal.
3004A	0.40	0.7	0.25	0.8-1.5	0.8-1.5	0.10	0.25	0.05	Bal.
3104	0.6	0.8	0.05-0.25	0.8-1.4	0.8-1.3	-	0.25	0.10	Bal.
5017	0.40	0.7	0.18-0.28	0.6-0.8	1.9-2.2	-	-	0.09	Bal.

図24 DI 加工工程²²⁾

な柱になっている。製造コストの大きな部分を占める缶材の節減が主な課題となり、著しい薄肉化がはかられている。合金としては、缶胴体に表4²¹⁾に示すような3004合金 (Al-1.0% Mn-0.5% Mg)、蓋には5182合金 (Al-4.5% Mg-0.3% Mn) が用いられる。特に缶胴体合金には、適度の強度、良好なしごき性とフランジ成型性と低耳率が要求され、特に耳率は素材の集合組織に起因するもので、その制御技術が、金属組織学的な集合組織の解明と共に大きく進歩している。

4.2 缶胴体用合金に要求される材料特性

製缶工程の主要部分は、カッピングと DI (Draw and Ironing, 深絞りとしごき) で、特に DI 工程は、図24²²⁾に示すように厳しい加工を受けるため、材料への要求は、(1) 鋳造時に発生する $\text{Al}_6(\text{Mn}, \text{Fe})$ 等の数 $10 \mu\text{m}$ 以上の巨大晶は、フランジ割れ、ピンホール、缶壁破断の原因になるため、微細化が必要なこと、(2) DI 加工性の向上には、潤滑や金型等の加工条件が重要であるが、金属組織的には、1から $10 \mu\text{m}$ 程度の硬質の $\alpha\text{-Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2$, $\text{Al}_6(\text{Mn}, \text{Fe})$ が加工性を向上するので、第2相粒子組織の制御が重要なこと、(3) 表面欠陥として圧延板の僅かなスクラッチは、しごき加工時の缶壁破断につながるので、完全な除去が必要である、(4) 特に重要な耳率の減少については次節で述べる。

4.3 耳率制御

カッピングプレス加工において、カップの縁に深絞り

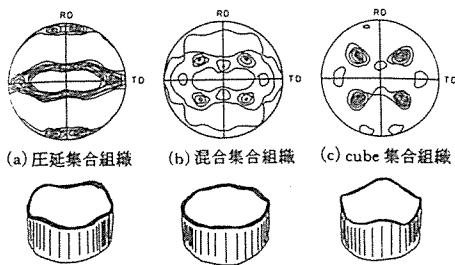
図25 集合組織と耳²³⁾

表5 理想方位に対応する耳の名称と角度

方位	名称	耳の種類
(100) <001>	Cube	0-90°
(110) <001>	Goss	0-180°
(110) <112>	Brass	45°
(112) <111>	Copper	45°
(123) <6.34>	S	45°

耳が形され、これがしごき工程を経ても残留する。図25²³⁾に実際の形状を示す。圧延方向に対して45°方向に出る耳を45°耳、0°と90°方向に出る耳を0°-90°耳という。これらの耳は、表5に示すように板の集合組織と明瞭な対応を示す。耳が高いと、しごき加工時に耳の先端がちぎれ、これが金型に残ると破壊やビンホールの原因となる。その他材料の節減や種々の理由で、耳率を低くすることが、最も重要なとなる。Cube成分は0°-90°耳を、Goss成分は0°-180°耳を、Brass, Copper, 成分は、45°耳を発生する。したがって、両者が適度に混合していると、耳率が低くなるか、消失する。集合組織の制御によって耳の発生を抑えることができる。

4.4 3004合金の圧延集合組織と再結晶集合組織

強圧延されたfcc金属・合金では、アルミニウムやその合金のように、高い積層欠陥エネルギーを持つ場合には、図26に示すように、 β -fiberと α -fiberの2方位群系列がある。図の下部に示すように、 β -fiberは、C→S→Bに到る。 α -fiberは、B→Gに到る。缶胴体用3004板は、H19状態で使用するため、耳は45°に生じるので、再結晶集合組織中のCube及びGoss方位を可能な限り高めてバランスさせて耳をなくする努力がなされている。図27(a)は、3004合金熱間圧延板を、 $\varepsilon=3.5$ まで冷間圧延したODFで、 β -fiberが発達し、その強度は、C, S及びB位置でそれぞれ、randomの17, 14, 及び8倍である。これを300°Cでフラッシュ焼鈍したODFを同図(b)に示す。大部分はND回りの回転Cube(100)<310>で、少量がP(110)<111>とCube(001)<100>からなっている。この研究では耳率の測定をしていない。

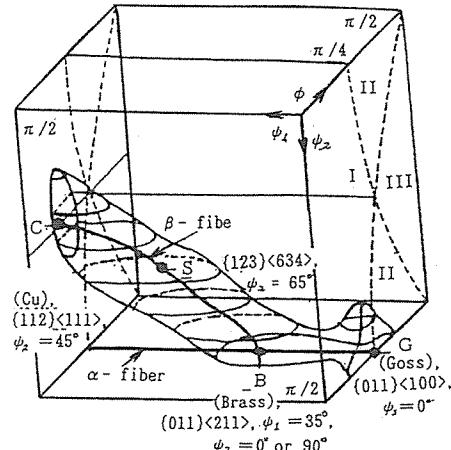


図26 アルミニウムの冷間圧延集合組織

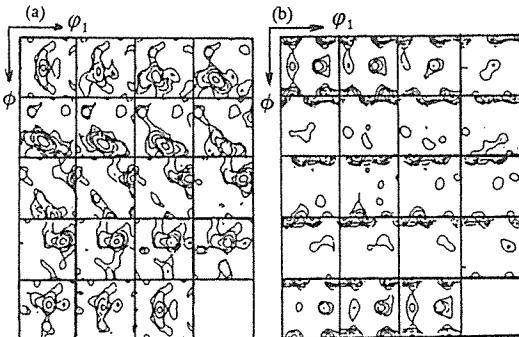


図27 3004合金のODF
 (a) 冷間圧延, $\varepsilon=3.5$
 (b) 冷間圧延後300°Cでフラッシュ焼鈍

4.5 缶胴体用圧延板の立方体方位(Cube方位)成分の形成

DI缶胴体用板は、DC鋳塊の均質化処理、熱間圧延、再結晶焼鈍及び冷間圧延工程の順に製造され、強度を増大させるため、H19硬質材或はH39調質材が使われる。上述のように最終製品の耳率を低減させるため、熱間圧延工程後、再結晶させるので、熱間圧延時の集合組織の制御が極めて重要である。最近、EBSPを用いたODFのデーターが蓄積され、Cube方位成分を高めるための必要な事項が多く解明され、実際の製造工程で採用され、技術が著しく向上している。その主な現象について説明する。

先ず、第1に熱間圧延板中に圧延方向に沿うて、図28²³⁾に示すような、細長く伸長したCube方位を持った“Cubeバンド”が存在することが見出されている。

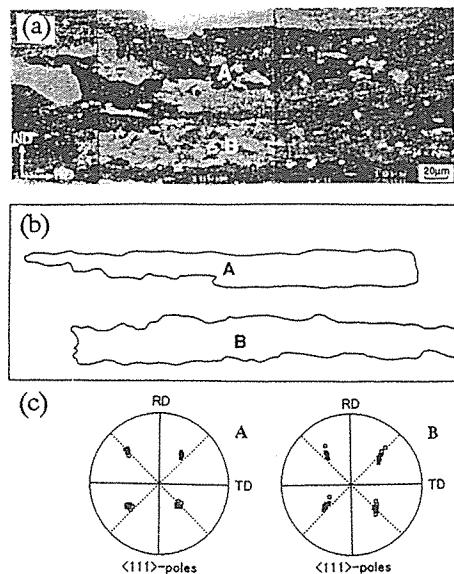


図28 热間粗圧延上上がり板に観察された立方体バンド
(a) 板厚中心層のミクロ組織
(b) (a) にある立方体方位バンドの模式図(AとB)
(c) 立方体方位バンドの(111)極点図²¹⁾

Cube バンドの特徴として、バンド内のサブグレンは他の未再結晶領域中のそれよりも粗大なこと、バンド内のサブグレンの転位密度はマトリックスと較べて少ないこと、これらのサブグレンは理想立方体方位を中心に TD 軸回りに分散していること。Cube バンドはマトリックスと特定な方位関係は持たず、隣接領域と大傾角粒界で接していること、焼純によってマトリックスと較べて回復速度が速く、熱間圧延段階で既に臨界核サイズを越え、そのまま Cube 粒に成長できることなどが明らかになっている。

次に、熱間圧延板に数多くの Cube バンドの存在が観察されるが、その理由として、従来圧延によって Cube 成分は破壊されるとしてきたが、それは、 $\{111\}\langle1\bar{1}0\rangle$ 汗り系が活動する 300°C 以下で起ることであって、熱間圧延はそれ以上の温度で行われ、 $\{110\}\langle1\bar{1}0\rangle$ 汗り系が活動する場合には、Cube 粒は安定で、残留することが証明されている。更に、3004 合金は粗大分散粒子が多く含まれるので、粗大分散粒子のまわりの Deformation Zone から核生成する粒子刺激核生成 (Particle Stimulated Nucleation, PSN) の役割りも明らかになっている。一般に PSN はランダム方位と一部 R 方位に寄与することが知られているが、熱間圧延の段階での回復で、PSN 効果が抑制されるため、ランダム成分が少くなり、Cube 成分が発達し易くなる。

従来、純アルミニウムと 3004 合金で、部分焼純後の

10~20% 程度の軽い冷間圧延を加えることで、その後の再結晶で、Cube 方位が著しく発達することが知られているが、これらについても、各方位粒の面積率が EBSP で求められるようになり、軽圧延後も Cube 方位粒は残存し、与えられた歪エネルギーを駆動力として、周辺の他方位粒を侵食して成長することによる事が解説されている。

5. 高圧電解コンデンサ陽極用アルミニウム箔と立方体集合組織の形成

5.1 はじめに

コンデンサは電子回路に不可欠な部品で、電気製品、電子機器の小型・薄肉化、高密度・高集積化、高性能・高信頼性に対応するため、種々のコンデンサが開発されている。この中で Al 電解コンデンサは、同一の耐圧、同一の静電容量で見た場合、他のコンデンサに比較して、極めて小型で大容量が実現でき、しかも安価に製造できる利点を有している。アルミニウム電解コンデンサの基本構造を図29²⁴⁾に示す。左は外観図で、陽極箔と陰極箔の間に電解液を含浸させた電解紙をはさんで巻いた形をしている。右は構造の模式図である。箔の面を Al₂O₃にして誘電体としている。又箔の表面の拡大により静電容量を著しく大きくることが可能で、箔をエッチングすることで表面積の拡大がはかられる。高圧用箔は高純度 Al を用い、立方体集合組織を発達させる。この場合、直流エッチングを施し、箔の表面から板厚内部に向って、図30²⁵⁾に示すようなトンネルピットを発達させる。これらのピットは <001> 方向、即ち {100} 面に垂直に優先成長するために最終焼純の段階で、{100}<001> 立方体方位を強く発達させることが必要であって、{100}<001> 方位占有率を高めることが技術課題である。この現象は学問的にも興味があるため、従来から多く研究が行なわれてきたが、上述のように集合組織の研究は、最近、EBSP 及び菊池線の解析により微細領域の方位の自動測定が可能になったため、基礎的に多くの新しい事実が明

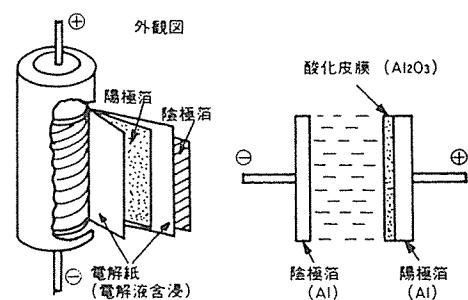
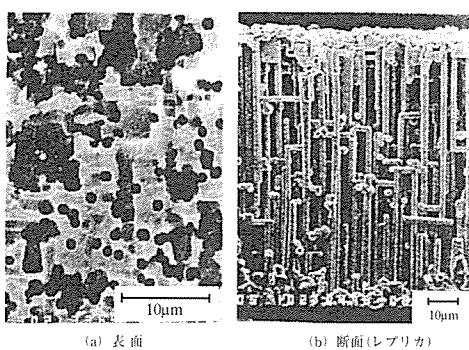


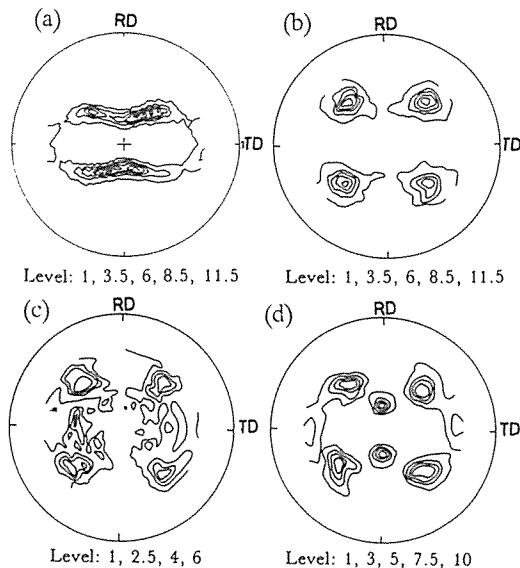
図29 アルミニウム電解コンデンサの基本構造²⁴⁾

図30 高圧化成エッチド箔（直流エッティング）³⁵⁾

らかになり、集合組織の技術的な制御も大きく進歩している。

5.2 高純度 Al 箔の立方体集合組織向上の指導原理

従来の多数の研究によって、高純度 Al 箔の立方体集合組織向上のための指導原理として次の事が一般に認められている。即ち、高純度 Al（例えば、Fe: 7 ppm, Si: 7 ppm, Cu: 50 ppm, 4Mと略称）のように Fe 量が少ないと箔厚が 110 μm 程度より薄くない場合、“(イ) 熱間圧延板の強冷間圧延、(ロ) 再結晶温度（約 200°C）での中間焼鈍、(ハ) 20% 程度の軽圧延、(ニ) 最終の高温焼鈍”のプロセスを行うことによって、{100}<001> 方位の占有率を 98% 程度に向上できる。これらの一般的説明として、熱間圧延で形成された Cube バンドは、次の冷間圧延でも残留し、中間焼鈍によって、少数の理想方位 (100)[001] をもったサブグレンが発生する。次の軽圧延によって歪が与えられたサブグレンは高温の最終焼鈍によって、速やかに回復し、歪誘起粒界移動によって、R 方位を有するマトリックス内で、これらを食つて優先的に成長する。この説明は前章の缶胴体板における Cube 方位発生の機構と同様である。上記の説明では、4N Al の場合、立方体方位の占有率を 98% 程度に向上することは比較的容易であるが、Fe 量が 35 ppm 程度の純度（例えば、Fe: 35 ppm, Si: 40 ppm, Cu: 25 ppm, 3M と略称）では、固溶 Fe の影響が現われることを示した研究の概要を述べる。4N と 3N の 2 種類の 8mm 厚の熱延板を φ320 mm の大径ロールによって 1.4 mm 厚まで 80% 冷延。次に 360°C × 1 h の前焼鈍（これは固溶 Fe の析出処理）後、110 μm と 90 μm の 2 種類の箔厚に冷延した。図31²⁹⁾(a) は、4N 材を 98.9% まで冷間圧延した試料の {111} 極点図で、3N 材も同様の極点図を示し、通常の集合組織で相異はなかった。図31(b) は、4N 材を 93.6% 強冷延後、400°C × 200 s の最終焼鈍を行った試料の {111} 極点図で、立方体方位がよく発達して

図31 3N 及び 4N 箔の {111} 極点図、(a) 4N 箔の圧延集合組織、(b) 4N 箔の 400°C/200s 焼鈍後の再結晶集合組織、(c) 3N 箔の同様処理後の再結晶集合組織、(d) 3N 箔の中間焼鈍 + 20% 軽圧延後最終焼鈍後の再結晶集合組織²⁹⁾

いる。図31(c) は、3N 試料の同様に焼鈍した再結晶 {111} 極点図であるが、立方体方位の分散は大きく、不規則方位成分が多く共存している。しかし、3N 材を最終焼鈍前に、260°C × 200 s (260°C は再結晶温度) の中間焼鈍、20% の弱圧延を行った試料は、図31(d) に示すように、立方体方位が高い極密度で現われている。同程度の密度の R 方位が見られるが、中間焼鈍と軽圧延が立方体集合組織向上のために極めて有効であることを実証している。

5.3 热間圧延板の結晶組織と集合組織の不均一性と Cube 方位の起源

4N Al 板の最終焼鈍で {100}<001> Cube 方位の顕著に発達する機構は上記のように理解されているが、Cube 方位の起源について、最近研究が行なわれている。Cube 方位の発達に対して、強圧延の儘の冷間圧延板の板厚方向の集合組織の不均一性が重要な役割を果していく可能性や冷間圧延の儘で、既に Cube 方位の領域が存在し、これらが以後の焼鈍過程で、Cube 再結晶粒となる可能性が指摘されている。特に冷間圧延板の {100}<001> 方位領域、所謂 Cube band に由来する可能性を考慮すると、最終焼鈍で発達する {100}<001> 方位は、本質的には熱間圧延板中の {100}<001> 不均一組織に由来することが考えられる。これらを明らかにするため熱間圧延板中の板厚方向の組織の不均一性を調べ、

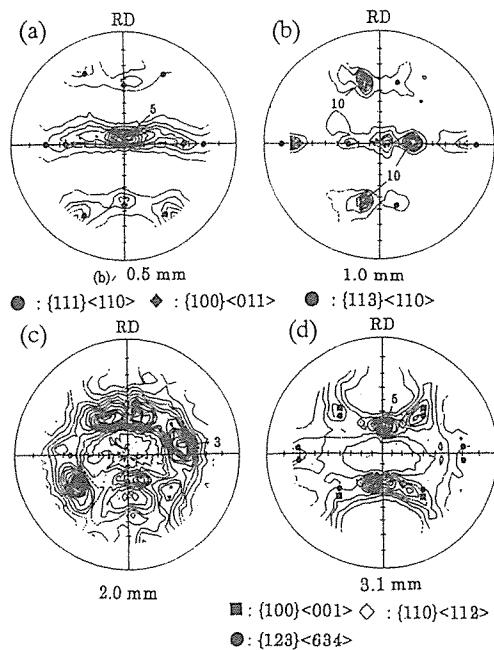


図32 热間圧延板の表層より、(a) 0.5, (b) 1.0, (c) 2.0, 及び (d) 3.1 mm (板厚中央) の深さで測定した {111} 極点図²⁷⁾

Cube 方位の起源を考察した研究²⁷⁾がある。その概要を説明する。この研究に用いられた热間圧延板は、上記の 4N 材の 6.2 mm の板厚材で、最終焼鈍後に、高い立方体方位占有率が得られる試料である。板厚方向に表面から、0, 0.5, 1.5, 2.0, 及び 31 mm (板厚中央) の深さを化学研磨で薄くした試料について、光学顕微鏡組織、マイクロ・ビッカース硬さ (荷重 98.07×10^{-3} N) 及び {111} 不完全極点図を測定し、特に板厚中央部に就いては、{111}, {100}, {110} の 3 面の不完全極点図を測定し、Roe の方法で、OOF 解析を行ない、主方位の結晶方位分布を求めた。マイクロ組織の観察で、板厚方向の不均一性が認められた。表層直下から深さ方向の 0.5 mm までの範囲は細粒の等軸再結晶粒からなる完全再結晶組織である。この部分の集合組織は、図32²⁷⁾(a) に示すように、主方位は {111}<110> である。約 1 mm の部分は大部分が再結晶しており、主方位は、(b) に示すように、{113}<110> 方位で、これは剪断変形集合組織成分 {100}<110> 方位とこれが再結晶して生成した {111}<110> 方位成分が重畳して形成したピークに対応する。約 1.5 mm より内部の領域は部分再結晶の状態で、深さが増すにつれて展伸加工組織の占める体積率が増加する。この部分は剪断変形から等 2 軸平面歪み変形へ遷移してゆく領域であることが原因で、図 (c) に示す 2.0 mm の深さの極点図に示すように、集合組織は複雑

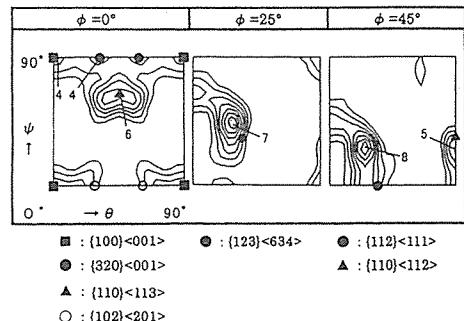


図33 热間圧延板の板厚中央で測定した ODF の $\phi=0^\circ$, 25° , 及び 45° 断面²⁷⁾

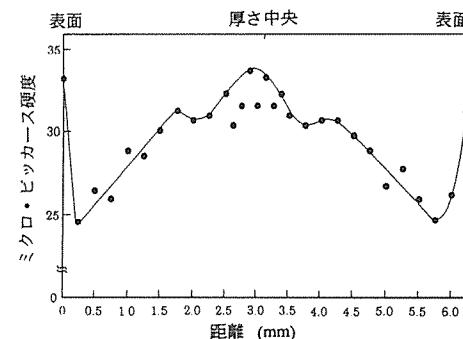


図34 热間圧延板の厚さの深さ方向に測定したミクロ・ビッカース硬度、荷重 98.07×10^{-3} N²⁷⁾

で、対称性は低く、主方位の同定は不可能であった。板厚中央は、結晶粒が圧延方向に著しく展伸した加工組織で成り立っていたが、再結晶した部分も可成り認められ、集合組織は、図32(d) と図33²⁷⁾の ODF に示すように、 β 織維集合組織とは異なっており、{110}<113> 方位と near {123}<634> は比較的強いが、{112}<111> 方位は弱く、その代りに {100}<001> 方位が比較的強い集合組織になっている。

熱延板の板厚方向の硬さの分布の測定結果を図34²⁷⁾に示す。表層ではロールとの摩擦による剪断変形のため硬化している。表層直下の完全再結晶領域では著しい軟化が生じている。0.25~1.75 mm の範囲では硬さは直線的に増大する。しかし、深さ 2.25~2.5 mm の範囲では軟化が認められ、極小を生じるが、さらに深部では硬さは再び増大し、板厚中央が最も硬化する。このような硬さが不均一な熱延板を冷間圧延すると、変形も不均一に起こり、硬さが低く、変形抵抗の小さい表層直下が集中的に変形し、従って再結晶もこの部分から起こる可能性を考えられる。このような知見から、{100}<001> 方位の起源を熱間圧延板中に求めるべるとすると、表層直下の等軸

微細再結晶粒からなる完全再結晶域か、或は {100}<001> 方位を比較的多量に含む板厚中央の何れかになる。量的な面から考えて熱間圧延板中の {100}<001> 方位が冷間圧延後も残存し、最終焼鈍時に Cube 方位の再結晶核になるという説を考慮すれば、板厚中央の可能性が高い。又最近、EBSP を用いて、{100}<001> 再結晶粒の核になる部分が、冷間圧延板の表面と板厚の中間部、若しくは板表層部に存在することを示す研究もある。上記の硬度変化の結果から、冷間圧延した場合、この部分に変形が起こり、再結晶過程では、この部分が最初に再結晶することが予測され、この部分に形成する再結晶核の方位が再結晶集合組織の主方位になることは十分に考えられる。

6. おわりに

前3報は、筆者自身が研究実験を行ない、又共同研究者と共に直接研究に接觸した分野に關係した題目について書いたが、本報は、實際の研究と離れて以後、研究委員会での仕事や、技術指導を行った会社で重要な研究事項の中から集合組織の制御に關係した2題目を選んで、それから得られた知見に關係する文献を中心に書いた。最近も NMC ニュースの“新技術・新素材”の欄に毎月執筆するための題目の探索や二三の会社の技術相談に必要な事項の調査などで、毎月到着する内外の関係の学術誌に目を通すことを日課にしているが、筆者が研究生活を始めた1940年代初期と較べて、金属学の學問の發展と研究手法と機器の進歩は極めて顯著であることを常々実感している。しかし、この近年、或る財團の「新素材」に対する奨学金の審査を行っているが、筆者が担当している「金属材料分野」は「高分子材料分野」と比較して、新規の題目が極端に少ない。金属材料では、工業材料として、その研究開発が十分に成熟しているためでないかと思っている。本報で書いた最初の項目、極微細結晶粒材料の研究開発は、新規の研究題目として時宜を得たものと思われる。實用金属材料の研究開発は、従来合金元素の添加によって支えられてきたが、これらに制限を加え、省資源と高いリサイクル性を目指した研究で多くの優れた成果が挙げられているが、プロセシングが高価にならざるを得ない側面がある。汎用の工業用金属材料としては価格が何よりも重要である。更なるプレース・スルーが求められる。後者の集合組織制御による飲料缶胴体用 Al 合金板と、コンデンサ用高純度 Al 陽極箔の研究は高い段階まで進んでいる。これは、ひとえに結晶粒の方位分布を精密に計算できる ODF の利用とそれらを、容易に測定する OIM のような研究機器の發達のお蔭である。昔は “Texture, Textur” の測定は、時間がかかり、面倒な実験を必要とした筆者の経験から全く考えられないことである。終りに基礎學問の進歩と

測定機器の發展によって、更なる研究開発が進むことを祈念して擱筆する。

謝辞：末尾に挙げた文献から、図、表、写真及び内容等多くを引用させて戴いた。それぞれ、番号を附記してある。著者の方々に深謝する。

参考文献

- 1) 村上陽太郎：金属学とその研究手法の進歩－研究生活を顧みて [I], 水曜会誌, 23, [5], 451-460, (2002), 12月.
- 2) 村上陽太郎：同上 [II], 同上, 23, [6], 600-615, (2004), 1月
- 3) 村上陽太郎：同上 [III], 同上, 23, [7], 755-770, (2004), 12月
- 4) 第1回スーパーメタルシンポジウム講演集, JRCM 他団体, 平成10年11月12日(木)～13日(金), 於東京国際フォーラム。
- 5) 第2回同上, 同上, 平成11年11月1日(月)～2日(火), 於国立オリンピック記念青少年総合センター。
- 6) 第3回同上, 同上, 平成13年1月29日(月)～30日(火), 同上。
- 7) A. J. Schwartz and W. E. King: JOM, 50, 2, 53 (1998) 及び OIM Academy 資料, テクセム・ラボラトリーズ社日本事務所, 鈴木清一氏提供資料, 平成10年7月10日。
- 8) 江藤武比古：アルミニウム合金の結晶粒微細化技術とその応用, 日本鉄鋼協会・日本金属学会関西支部. 平成10年度第2回材料研究会. 1998-10-16. 及び文献4)の55～63頁, 鈴木義和, 崔祺, 微細分散した金属間化合物粒子による3000系Al合金の再結晶粒微細化。
- 9) T. C. Lowe and R. Z. Valiev: The Use of Severe Plastic Deformation Techniques in Grain Refinement, JOM, 56 (2004), Oct. pp 64-68.
- 10) V. S. Segel et al.: Russian Metallurgy-Metally, 1 (1981), 99.
- 11) 堀田, 古川, Langdon, 根木：新しい組織制御法としての ECAP, まてりあ, 第37巻, 第9号, 767, (1998).
- 12) Y. Iwahashi et al.: Scripta Mat., 35, 2, 143, (1996).
- 13) Z. Horita et al.: J. Mater. Res., 13, 2, 446, (1998).
- 14) M. Furukawa et al.: Acta. Mater., 45, 11, 4751, (1997).
- 15) Y. Saito et al.: Acta Mater., 47, 579-583, (1999).
- 16) A. Ghosh, F. J. Humphreys, P. B. Prangnell: Production of ultra-fine grain microstructures in Al-Mg alloys by conventional rolling, Acta Mater 50, 4461-4476, (2002).
- 17) 集合組織の書籍として、世界的に著名な “Texturen metallischer Werkstoffe”, Springer-Verlag 1962年発行第2版が筆者の手許にある。著者は、当時ドイツの Clausthal-Zellerfeld の Institut für Metallkunde der Bergakademie Clausthal の教

- 授で集合組織の研究で有名であった G. Wassermann で、弟子の J. Grewen との共著で、808 頁の大冊であるが、内容は極めて豊富で、その時代までの状況を知るのには恰好の書物である。同教授は、Al-Cu 合金の θ' -CuAl₂ の発見でも著名で、筆者も親しくしていただいた。1986年9月19日に第84回の誕生日を迎えて間もない9月30日に逝去された。
- 18) 長嶋晋一編著, 集合組織, 昭和59年1月20日, 丸善(株)発行.
 - 19) 井上博史, 稲数直次: 集合組織の測定と解析, 軽金属, 47, 4, 246-257, (1997).
 - 20) 稲垣裕輔, 鈴木清一: 集合組織の起訴, 軽金属, 52, 11, 494-499, (2002).
 - 21) 日比野 旭: アルミニウム缶胴材の耳率と集合組織, 軽金属52, 11, 530-535, (2002).
 - 22) 川島敏彦: 飲料用オールアルミ缶の発展とその技術的背景, 軽金属, 40, 11, 860頁, (1990).
 - 23) 胡 建国, 石川孝司: アルミニウム合金板の集合組織と塑性異方性, 軽金属, 48, 11, 543頁, (1988).
 - 24) アルミニウムの製品と製造技術, 7 アルミニウム電解コンデンサ用箔, 108頁, 軽金属学会, 2001年10月31日発行.
 - 25) 福井康司, 清水 道, 牧本昭一: アルミニウム箔, 軽金属, 40, 9, 716頁, (1990).
 - 26) 関 史江, 上成太一: 高純度アルミニウム箔における立方体集合組織形成, 軽金属, 48, 10, 507-510, (1998).
 - 27) 遠藤誠一, 稲垣裕輔: 電解コンデンサ用高純度アルミニウム熱間圧延板の再結晶組織・集合組織, 軽金属, 52, 4, 167-173, (2002).

談話室

11月祭の歴史について

松田 陽一*

Essay on the History of November Festival

by Yoichi MATSUDA

1. はじめに

京都大学（以下、「本学」と略称する。）の学園祭（今日では文化祭、大学祭などの名称が使用されているが、以下、本稿では「学園祭」を使用する。）の名称は？と尋ねられれば、水曜会員の大半の皆様からは「11月祭」という名称を指摘いただけれどと思われます。その11月祭の第47回目（2005年）も本稿が会員の皆様に届くころには、無事、盛大に終わっていることでしょう（？）。しかし、本学が、1869（明治2）年に設置された「舎密（セイミ）局」に前身をもち、1897（明治30）年に帝国大学としてスタートしたという史実から考えれば、なぜ第47回なのでしょうか。歴史を遡ると第1回の11月祭は、1959（昭和34）年の開催になっています。では、それまで、本学には今日でいう学園祭、あるいは学生の「祭」や「騒ぎ」と称される、日常の授業や勉学を中心とした学生生活とは異なる、いわゆる「非日常の場」とでも呼べるものはなかったのでしょうか。

また、私は1977年～1980年まで「11月祭事務局（文化系サークル）」員でした。当時、先輩からは「11月祭は、原爆展（おそらく、1951（昭和26）年の「春季文化祭」および同年に丸物百貨店（現、JR京都駅前の近鉄百貨店）で夏季に開催された展示会を指していると思われる。）を契機に始まった」と聞いていましたが、これは本当なのでしょうか。調べてみると、関連する証拠は乏しく、その後原爆に関する企画はそれほど多くありません。疑問はまだまだ続き、これ以外にも11月祭という名称への疑問（なぜ、例えば「京大祭」、あるいは「吉田祭」などと呼ばないのであるのか。）、私が所属していた事務局の存在（他の大学では一般的に学生の自治会が○○祭実

行委員会等を構成し、行なっているが、通年活動しているのはめずらしい。）などに関する疑問があります。

以上のように元事務局員の私でも、案外、知っているようでも知らなかつた「11月祭」に関する歴史やいろいろな疑問点について明らかになったことを記述してみようというのが本稿の目的です。本稿執筆に際しては、主に「京都大学新聞（前身の「京都帝国大學新聞」・「大學新聞」・「學園新聞」を含む。）」「京都新聞（前身の「京都日出新聞」・「京都日日新聞」を含む。）」、および「朝日新聞」記載の記事に基づいています。これ以外に、本学の大学史記・学部史記、本学関連文献、11月祭のパンフレット等の資料に記載されている記述、および関係者へのインタビューに基づいています。なお、紙面の都合上、かなり簡略的な記述になってしまっていますこと、カナ使い等につきまして適宜、修正しましたことをご容赦ください。また、本稿で掲載しました写真はすべて『京都大学百年史写真集』（1997年）に掲載のあったものです。これ以外にも多くの写真があるのですが、本稿においては鮮明度等の観点からこれらを採用しました。

2. 11月祭の歴史

(1) 創立時の陸上運動大会

今日の学園祭のような形ではありませんが、学生の「祭」や「騒ぎ」などの場としては、陸上運動大会や園遊会があります。当時の京都日出新聞をみると、とくに陸上運動大会については相当な紙面の扱いを受けており、第1面に各競技の優勝者のフルネームとタイム等が掲載されています（例えば、京都日出新聞 1899. 4. 3, 4290号）。

具体的には、1897（明治30）年の本学創立直後から陸上運動大会がありました。これは、本学の前身である大学分校（現在の大阪市中央区に所在し、1885年7月に

*岡山大学経済学部

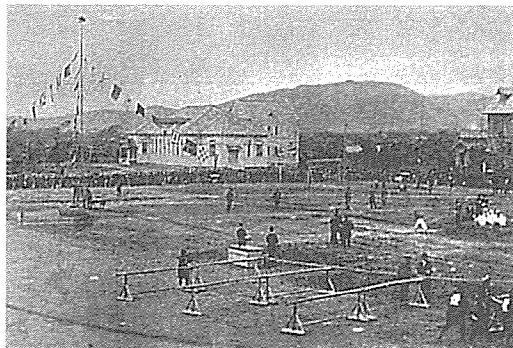


写真1 第1回陸上運動大会の様子



写真2 上・下とも園遊会の様子

前身の「大阪中学校」から改称した。) 時代から行われています。京都の地に移転(1889年8月)後は、本学の前身である第三高等中学校、および第三高等学校(以下、「三高」と略称する。)でも行われており、一説には「祇園祭」や「葵祭」と併せて「京都の三大祭」と呼ばれていたようです(『京都大学百年史総説編』、86頁)。

「第1回運動大会は1899(明治32)4月3日の神武天皇祭に挙行され、午前は庭球試合、午後寄宿舎の南に一周二百メートルの競技場がつくられ各種競技が行われた。翌1900(明治33)年に新運動場ができ、第2回運動大会で木下広次会長(※本学の初代総長)より訓示があり、午前庭球試合、午後各種競技が行われた。(中略)、百米突競争、長飛、二百米突競争、棒飛…第三高等学校競争、…綱引、…障害物競争、…慰め競争等が行われた(『京都大学工学部八十年史』、73-74頁)。」(写真1を参照)

(2) 大正から昭和初期の園遊会

上記の陸上運動大会とは別に、1922(大正11)年の本学の創立記念日にともなって学友会主催による第1回の園遊会が開催されています。それ以前より、創立記念日に講演会や市民への学内公開は行われていましたが、学生の希望により新たに園遊会として芸能の余興や各種の模擬店も組み込まれることになりました。この園遊会は、かなり盛大なものだったようです(写真2を参照)。

「京大記念式順序 久邇中将宮台臨 学内開放と大園遊会。十八日京大が行ふ創立二十五周年記念式の順序は左の如くである。午前八時に東門及北門を閉鎖するから其れ以後は正門へ廻る必要がある。久邇宮邦彦王殿下の台臨遊ばされるのが九時四十分…殿下御臨場が十時の予定で式場は図書館東の広場が用いられる、奏楽裡に式は総長の式辞演説に初められ…來賓、教授連は工学部大教場に設らへた茶菓室に入る茶菓室周囲は大園遊会会場で

ここに卒業生、職員、学生茶菓を終った来賓迄加はって大陽気に一日を終らうというプログラムである、尚同学講演部で之を機会に同日午後二時から学生集会所に先輩現部員の連合懇親会を行ふ筈で会費は五十銭…(京都日出新聞 1922. 6. 17, 12658号夕刊)。」

1926(大正15・昭和元)年から本学の創立記念の行事については、創立記念祝日(5月の第三日曜日)には祝賀式や園遊会が、創立記念日(6月18日)には学内の市民開放や講演会等が分けて行われるようになりました。同時期に、寄宿舎祭や三高の寮祭も行われています。その後、園遊会は大正天皇崩御や飲酒問題で、また陸上運動大会は明治後期に一時中止になっています。

1932(昭和7)年まで園遊会は続いています。1933(昭和8)年から1945(昭和20)年までは戦時色が強くなりますが、創立記念祝日にともなう祝賀式や行事、新入生歓迎・学内懇親の陸上運動大会、および三高紀念祭が行われています。このころまで、陸上運動大会や園遊会の開催期間は1日です。なお、1934(昭和9)年には、創立記念日に「大學六月祭」と呼称した催物が行われています(京都帝国大學新聞 1934. 6. 21, 204号)。

(3) 戦後の学園祭

戦後まもなくは、本学独自というよりも近隣の大学と合同で行う「学生文化祭」が行われています。しかし、1947(昭和22)年の本学創立50周年記念祭を契機に、同学会を中心に本学独自の学園祭を行おうとする機運が盛

り上がります。1948（昭和23）年には「10月祭」という名称で学園祭が行われています。

「12月1日午前9時より大阪朝日会館において第1回全関西学生文化祭盛大に催さる（學園新聞 1946. 12. 11, 23号）。」

「再びひらく大学の門、10月祭スケジュール決まる。京大同学会中央委員会で準備されていた「10月祭」は、10月30日より11月3日まで行われるが、盛りだくさんため29日から繰上げて挙行される（學園新聞 1948. 10. 11, 96号）。」

1951（昭和26）年の「春季文化祭」に「原爆展」が開催されていますが、その後の11月祭とともに強い関連は見出せません。また、同年の「京天皇事件」によって、同学会は大学の当局より解散の命を受けましたが、学園祭は、準備委員会によって継続されています。また、吉田分校では、新たに前夜祭が行われるようになり、1950（昭和25）年に開校した宇治分校でも、1952（昭和27）年より独自に学園祭が行われています。このころは春の5月あるいは6月、および秋の10月あるいは11月の年2回、学園祭が今日の11月祭に近い形で行われています。

「繰りひろぐ京都青年学生祭。国際学生連盟が8月5日から19日までベルリンで第三回世界青年学生平和祭をひらくが、これに呼応して6月下旬から7月8日にかけて原爆展を中心に計画がすすめられている。京大同学会、各学部自治会、看護学校、学内諸団体、西京大、同志社大、立命館大などの代表があつまって計画をすすめている。第1部原爆展、第2部総合科学展、第3部文化・スポーツ競技会、第4部たなばた祭（円山公園）。京大春季文化祭の原爆展には四千人の参観があった（學園新聞 1951. 6. 4, 604号）。」

「京大創立54周年記念式、6月18日。京大吉田分校は、分校祭を吉田文化祭に改めることで正式に決定し、現在行われている各種のクラスマッチに加え、30日午後新徳館における演芸会、7月1日分校挙げての運動会、仮装行列、大ファイバー・ストームを予定し、カンバを行っており…。京大補導部は原爆展に関与しない、したがって学校の物品、資料の持ち出しあはいけないとの方針…（學園新聞 1951. 7. 1, 607・608号）。」

「注目の中に総合原爆展は同学会主催で7月14日より10日間京都丸物百貨店で開かれ、2万7千人が来場、卒倒する人も出る騒ぎ…（學園新聞 1951. 8. 27, 613号）。」

1953（昭和28）年に同学会は再建されます。このころより、同じ年に春と秋の2回の学園祭は負担が大きいため、年に1回、「11月祭」と命名し、その主要な開催期間を3~4日間程度にした学園祭を秋に行おうとする動きがでできます。この11月祭という名称は1953（昭和28）年ごろから新聞にも登場します。その由来については11月に行うことと東大の5月祭を意識してつけられたものである、という記述（例えば、京都大学新聞 1987. 11. 1, 1985号）もありますが正確なことは不明です。

「問題化する名称、11月祭は認められず、今までの文化団体偏重の一部学生のみの文化祭を反省し、全ての学生・教授・職員さらに一般市民の祭典として、東大の5月祭にならって企てられた11月祭は、文化、運動、各自治会を統合して進められているが、最近、柴田学生課長を通じて準備会事務局に「11月祭という名称は認め難いから秋季文化祭の名称に変更するように」との申し入れがなされた。…運動祭準備進む、11月祭中的一大行事として12日午後3時より吉田分校グランドで開催される体育会主催の運動会…。職組も文化祭、創立5周年を記念して、10月24日から…（學園新聞 1953. 10. 26, 718・9号）。」

（4）第1回11月祭以降

1955（昭和30）年に前年の前夜祭のフォークダンスを不法集会とする本学の当局と同学会とが対立します。同年5月に同学会は3回目の解散をすることになりましたが、準備委員会によって学園祭はその後も継続して行われています。その後、1958（昭和33）年に「11月祭」の名称は正式に大学の当局から許可されることになります。

「文化祭準備委員会は、京都駅付近の繁華街、本学周辺などに重点をおいてポスターをはったり、19日からは市電の車内に広告することを決めていたが、グライダー部を通じて19日には飛行機からビラをまくことになった。ビラは、赤・青・黄・白の4色で宇治に2万枚、京都に5万枚まかれる。京大本部を訪れるのは正午ごろで、メッセージを入れた通信筒と花束を投下する（學園新聞 1955. 11. 14, 822号）。」

「11月祭に決まる。文化祭準備委員会は、京大文化祭を11月祭と変えることを希望していたが、14日の補導会議でこれが条件付きで承認された。条件は、11月祭という名称が一般に理解されるまで京大文化祭と付記すること、である。また昨年、一部を除いて禁止されていた校外講師の招聘も許可された。宇治も同様に11月祭とし、22・23日に行われる（學園新聞 1958. 10. 20, 949号）。」

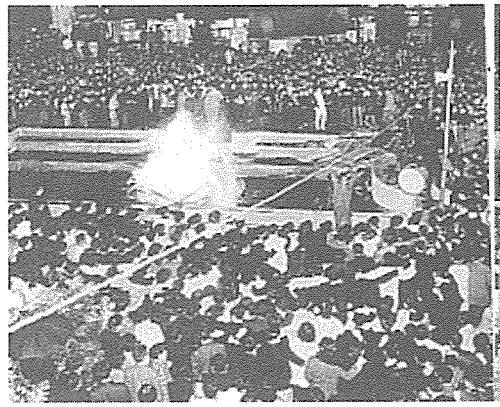


写真3 上・下とも 1960年代の仮装行列の様子

1959（昭和34）年に同学会が再建され、この年が現在の11月祭の第1回になっています。また、1960（昭和35）年より、応援団の主催による前夜祭と仮装行列が行われはじめ、現在まで続いている。ただし、前夜祭は1951（昭和26）年に吉田分校の文化祭でも行われています。また、仮装行列も三高では戦前より行われています（『紅萌ゆる丘の花』講談社、1973年を参照）。

「京大の“11月祭”は4年ぶりに再建された同学会がはじめて主催、午前9時半から法経第一教室で開いた開会式には約八百人の学生が集まり…（京都新聞 1959. 11. 19, 28034号夕刊）。」

「今年の11月祭は、4年間のブランクを経て再建された同学会が主催するものであり、前夜祭の参加者数も西部講堂構内を埋めつくしてざっと千人余りであった。（學園新聞 1959. 11. 23, 999号）。」

「11月祭への窓、企画紹介。宇治分校最後の11月祭は12、13日開かれた。応援団が力を入れて進めてきた前夜祭はかってない大規模なものになろう。まず、2時から

各志団体の仮装行列が自動車パレードを先頭に四条河原町まで繰り出す（京都大学新聞 1960. 11. 14, 1041号）。」

1960年前後より学生運動が盛んになりますが、11月祭は継続されます。1965（昭和40）年の新聞には、実行委員長および事務局長という名称が登場します。また、1968（昭和43）年前後には、2つの主催団体（日共系と反日共系）によって11月祭が行われています（写真3・4を参照）。

「11月祭全貌が浮彫りに、サークル企画も出揃う。ジャズフェスティバル弘田三枝子ショウとして北野忠男とアロージャズ、京大軽音楽部を迎えて24日午後5時より京都新聞ホールにて行うことを決定（入場料400円）。京大11月祭とタイアップして21日午前11時から第1回京大体育祭が行われる（京都大学新聞 1964. 11. 2, 1216号）。」

「京大には日共系の11月祭実行委員会にたいし、昭和39年から反日共系の11月祭準備委員会が主催する別の“11月祭”があるから話はややこしい。反日共系は公認の11月祭のテーマを言葉のおあそびとからかえれば日共系が反日共系の非合法を厳しく批判し、そのテーマをふざけすぎると攻撃する始末、派閥争いで学園祭も二つに分かれる（公式には一つ）とは連帶もいいところ…（京都新聞 1968. 11. 7, 31282号）。」

「異例の“11月祭”きょう幕あける。紛争から授業再開へと学園正常化に大きく踏み出した京大で23日から30日まで、恒例の「11月祭」がにぎやかに開催される。しかし、紛争の影響で広く市民に親しまれていた解剖祭などの医学展は中止のウキ目となった。ことしの11月祭は

紛争の影響で授業時間に余裕がなく、開催をめぐって11月祭実行委と大学とすつもんだしたあげくの開催。医学部は不参加のうえ、行事日程もとびとびという異例の学園祭になりそう。22日に予定されていた前夜祭は雨のため23日午前（注：午後の間違いと思われる）4時から百万遍新グランドで開かれる（京都新聞 1969. 11. 23, 31659号）。」

その後、タレント招致やテレビ番組を模した企画が登場する時代を経て、原理研問題、テーマ公選問題、恋人リサーチ企画問題、および環境問題等を開拓しながら現在の11月祭に至っています。

「大学祭ことしもタレントブーム、楽しめたらそれでいい、ねらいは立派だが創造性どこへ。京大は、かまやつひろし、エルザ、ヤマガタスミコなどを予定…（京都新聞 1975. 11. 2, 33799号）。」

「原理研、11月祭介入はかる…。（中略）11月祭事務局は本年度が初めてのテーマ公選に対する反省として、テーマを公選にかける前に、テーマの内容を審議する期間をおくべきであったとしている（京都大学新聞 1982.

10. 16, 1873号）。」

「生体解剖生々しく告白、京大11月祭で元軍医が講演。小泉今日子ショー中止にファン大暴れ、投石、舞台を壊す（京都新聞 1982. 11. 22, 36319号）写真あり。」

「恋人リサーチ禁止決議。9月12日、NF第3回教養部実行委員会が行われ、懸案となっていた恋人リサーチ問題について決議がなされた。この決議によって、今年度11月祭における恋人リサーチとそれに類する企画は禁止された（「恋人リサーチなんか千年炎で燃やしたれ！の会」によって提起された）。（中略）例年通り、企業スポンサーをつけての企画は原則として認めないことも承認された（京都大学新聞 1989. 9. 16, 2026号）。」

「11月祭中の使い捨て皿使用禁止宣言（京都大学新聞 1992. 11. 1, 2095号）。」（写真5を参照）

3. いろいろな疑問点からみた11月祭

（1）第1回の「11月祭」

なぜ、11月祭の第1回が1959（昭和34）年なのか、という点については、いまだ明確ではありません。11月祭という名称自体はそれ以前から存在しますし、1959年の新聞記事においても第1回の記述がないことを考えると明確なことはわかりません。また、同学会の再建後初めての第1回というのであれば、それ以前にも同学会は何回か解散をして再建しており、ややおかしくなります。この年の11月祭に関わった先輩にもその点について尋ねると「とくに第1回だった、という記憶はないが…」ということです。また、別の先輩から送っていただきました1954（昭和29）年のプログラムのコピーには「京大学園祭11月祭」という表記があります。回数は明記していません。その先輩によると、11月祭という名称を使用したのは「自分達が初めてではないか」ということでした。

（2）主要な開催期間

11月祭の主要な開催期間については、戦前までの陸上運動大会や園遊会については1日です。戦後はそれが3～5日間になり、1948年に10月末から11月初旬にかけて初めて5日間になっています。今日では、4日間+1日間（後片付け）の5日間です。また、主要な開催期間の前後にも学部や文化系サークル等の諸団体、および体育会などが独自に企画を行うことも戦前より現在まで続いている。

（3）催事

催事については、園遊会を行うようになった大正時代より、講演、映画、音楽関係のイベント、演劇、学内公開、体育祭、シンポジウム、展示、模擬店などが形を変えて行われています。ただし、いつの時代でもどちらか



写真5 上・下とも1987年の11月祭の様子

といえば学内よりも学外の人の方が、関心が高く、今日でも11月祭事務局員が本学の在学生の誘致に苦慮しているようです。

(4) 開催場所

開催場所については、創立時当初の陸上運動大会や園遊会はその大半が現在の本部構内および農学部グランドで行われています。その後、祭の規模が大きくなるにしたがって、西部構内、吉田グランドや各学部の教室等が使用されるようになります。

(5) 主催団体

主催団体については、現在は11月祭全学実行委員会や文化サークル連合会、および各学部の実行委員会等が主催し、その事務的な統括や実際の運営を11月祭事務局が行う、という運営形態のようです。ちなみに、本学の学生自治会の名称は、三高時代は壬辰会、獄水会、創立後は以文会、学友会、同学会というように変遷しています。これに運動会（現在の体育会）が加わって、上記の陸上運動大会や園遊会を大学と協調して行っているようです。とくに本学の創立時より戦前までは、大学の当局とかなりうまく協調して行われていたようです。戦後、同学会と大学との間にこれらの開催内容や運営について齟齬を生じるようになり、1956（昭和31）年に、春季の園遊会や創立記念式の催事は大学が主催し、秋季の学園祭は学生の諸団体が主催して行うように大学によって縦引きされています。

(6) 仮装行列

仮装行列自体は、大正時代より三高の紀念祭において吉田グランド内で行われています。1960年に初めて大学構内より市街地へ出ているようです。当時のコースは、百万遍→祇園→四条河原町→河原町今出川→百万遍でした。その後、コースの向きやスタート・ゴール地点は何回か変更されますが、行列が練り歩く範囲はこの外には出ていません。

(7) 11月祭事務局

現在の11月祭事務局がいつごろ、どのようにして成立したのかは不明です。1965年の新聞には、11月祭準備委員会から現在の運営体制に変わり、また、準備委員長から実行委員長と事務局長に変わったとする記述もありますが、正確なことやその理由は不明です。

(8) 原爆展と（1951年）の関連

11月祭のはじまりが「原爆展」にあるという私の先輩の言については、さほど関連があるとは思えません。判

明したところでは、原爆展あるいはこれを発展させた水爆展が11月祭の企画として行われているのは、1951（昭和26）年以降、1954年、1956年、1978年、1995年しかありません。これ以外にも、放射能との関係（1957年）、被爆者の問題（1977・1982年）、朝鮮人被爆者の問題（1979・1980・1981年）、平和展（1984・1985年）、および原発の問題（1955・1988年）等あるようですが、いまひとつ明確ではありません。1957（昭和32）年の文化団体連合会の11月祭指針（學園新聞1957. 11. 11, 908号）がそのまま、11月祭の契機として継続されているかのような記述（京都大学新聞1962. 10. 8, 1125号）もありますが、明確に原爆展と11月祭の関連を指摘できるものではありません。

4. むすび

本稿の目的について、どれほど解明できたものか不明ではありますが、少しほは参考にしていただけたでしょうか。現在も11月祭事務局はありますが、基本的にはその年に携わった者だけが中心になって11月祭を行っていくことに変化はありません。そのためか、11月祭に関わる資料の継続等はほほありません。その昔より本学学生の自治会が中心になって行なわれ続けていますから、体育会系のクラブのように先輩から後輩へ受け継ぐ、というようなことはないようです。「その時、楽しめれば」ということなのかもしれません。

実は後輩の11月祭事務局員に「資料を全部あげるから卒業論文にでもしたらどうか」という提案も何回かしてみましたが、何の反応もありません。つまり、「11月祭のルーツは？とか、その歴史は？」などということよりも「今年の11月祭をどうするか、どう楽しもうか」ということの方が、差し迫った、非常にウエイトを占める重要な事なのだと思います。

なお、本稿の記述は、2000年11月の11月祭事務局OB会の席上で関係者に配布した、私製『11月祭の記録的資料集』未完、に基づいています。会員の皆様から本稿中の誤った記述や不正確な記述をご指摘等いただきましたらと思っております。また、11月祭に関するビジュアル（第1回の1959年には、「記録映像を撮った」という記述がある。）や資料等をお持ちの会員の方がいらっしゃいましたら、差し支えのない範囲でお見せいただきませんか、というお願いをさせていただきまして本稿を終わらせていただきます。

談話室

有限要素法による対向液圧成形解析プログラムの開発

浜 孝之*

**Development of Sheet Hydroforming Simulation Program by
Finite Element Method**

by Takayuki HAMA

はじめに

筆者は、平成16年3月に早稲田大学にて博士課程を修了し、平成16年10月1日より大学院エネルギー科学研究所科エネルギー応用科学専攻 資源エネルギー学講座の助手としてお世話になっております。筆者はこれまで、高張力鋼板を用いたプレス成形や管材のハイドロフォーミング成形、板材のハイドロフォーミング成形（対向液圧成形）などをはじめとする塑性加工に関する研究に従事してまいりました。これらの材料や加工法は、環境問題の観点から自動車車体の軽量化が求められている自動車業界において大変注目されている技術であり、急速にその適用が進められています。筆者らは最近では対向液圧成形に関する有限要素法解析プログラムの開発に取り組んでおり、本稿ではその最近の成果を紹介させていただきます。

対向液圧成形法とは

対向液圧成形法とは、パンチ（上型）に対向する液圧を利用することにより成形を行うプレス加工法の一種である。対向液圧成形法の成形原理を模式的に図1に示す。圧力媒体を液圧室に供給した後（図1(a)）、プランク（板材）を下型の上へ設置してしづ押さえをする（図1(b)）。その後パンチを押し込むことにより、成形を開始する。このときパンチの押し込みとともに圧力媒体は加圧され、それによってプランクはパンチへと押しつけられる（図1(c)）。パンチに対向する液圧によりパンチとプランクの間に大きな摩擦力が発生し、この摩擦力で成形力の一部あるいは全部を負担しながら成形が進む。

同時にフランジ部では、液圧による押し上げ力がしづ押さえ力を上回ると圧力媒体がフランジ部から型外へ流出し、下型とプランクの間に流体潤滑状態が生じる。その結果フランジ抵抗が減少し、プランクが型内へ流入しやすくなる。このように液圧による様々な効果から割れの発生が抑制され、複雑形状部品や難加工材の成形が可能となる（図1(d)）。

このように対向液圧成形法は、通常のプレス加工に比べて成形限界の向上や寸法精度の向上など多くの利点を有している。さらに工程ごとの下型が不要なため、金型コストの削減や金型製作時間の大幅な短縮が可能となり、多くの分野での活用が期待されている。

一方で、対向液圧成形法では成形中に負荷する液圧を高精度に制御する必要があり、液圧としづ押さえ力、パンチの押し込み量などが互いに調和したとき初めてその特長が十分に生かされる。しかし制御因子が多いため加工条件の最適化が困難であり、本加工法の幅広い普及への大きな障害となっている。

このような問題を解決する上で、数値解析によるプロセス設計支援は必須のツールである。しかし現場での実用に耐えうるほどの解析精度を有する対向液圧成形解析ソフトウェアは存在せず、加工条件の最適化には未だ現場の勘に頼っているのが現状である。そのため高精度対向液圧成形解析ソフトウェアの開発は急務となっている。

弾塑性有限要素法による対向液圧成形解析 ソフトウェアの開発

本研究では、著者らによってこれまでに開発された静的陽解法弾塑性有限要素法に基づく管材のハイドロフォーミング解析プログラムに新たな機能を組み込むことにより、対向液圧成形解析プログラムの開発を推進してい

*京都大学大学院エネルギー科学研究所科 エネルギー応用科学専攻 資源エネルギープロセス学分野

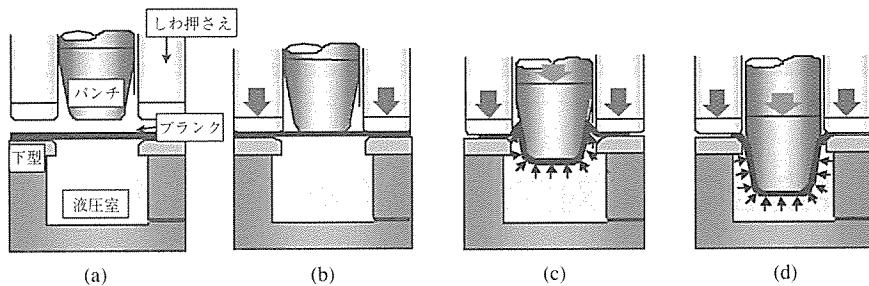


図1 対向対向液圧成形の成形原理

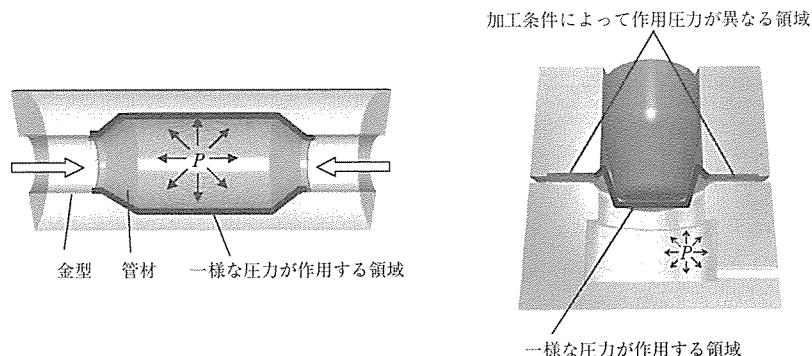


図2 管材のハイドロフォーミングと液圧成形の違い

る。管材のハイドロフォーミング成形と対向液圧成形の大きな違いは、図2に示すように材料に対する液圧の作用の仕方にある。管材のハイドロフォーミングでは管内部から液圧を作用させるため、圧力は管内部全体に一様に作用する。一方で対向液圧成形では、液圧室内に位置する材料部位には一様な圧力が作用するが、フランジ部に作用する液圧は加工条件によって大きく異なる。さらに成形の進行に伴って板材はフランジ部から液圧室内へと流入するので、材料各部に作用する圧力の大きさは時々刻々変化する。従って解析において板材に適切な液圧を作用させるためには、材料各部で作用させるべき圧力を判定し、かつ適切な圧力を精度良く作用させるアルゴリズムを構築する必要がある。筆者らは接触探索アルゴリズムと静的陽解法における不釣り合い力補正手法の一つである一ステップ遅れ補正法を応用することにより、静的陽解法弾塑性有限要素法の枠内で精度良くこれらの現象を取り扱うアルゴリズムを提案した。本手法によれば、繰り返し計算を行うことなく適切な圧力分布を与えることができるため、高精度かつ実用的な対向液圧成形シミュレーションを行うことができる。

実験結果との比較による妥当性の検証

開発した対向液圧成形解析プログラムの妥当性を検討

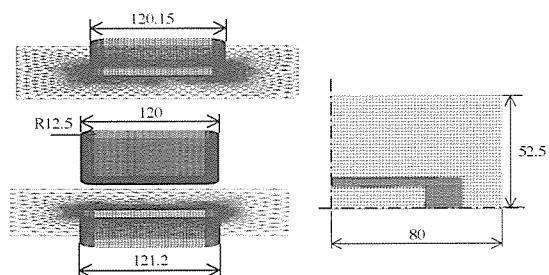


図3 工具および材料形状の概略図

表1 実験で用いた材料の機械的性質

E Gpa	v ratio	σ_y MPa	F value MPa	n value	ε_0	r value
210	0.3	107.1	515.4	0.246	0.00171	2.24

The true stress-logarithmic plastic strain curve of the specimen is approximated by $\sigma = F (\varepsilon_0 + \varepsilon)^n$

E: Young's modulus, v: Poisson's ratio, σ_y : Yield stress

するために、長円筒容器の絞り成形実験、および解析を行った。図3に実験および解析で用いた工具形状を示す。材料には軟鋼板を用い、その材料特性値を表1に示す。材料の寸法は160×105 mm、板厚0.4 mmであり、解析では図3に示すように変形の対称性を考慮して1/4部分

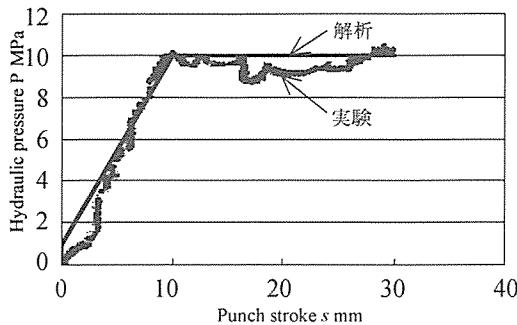


図4 パンチ押し込み量と液圧の関係

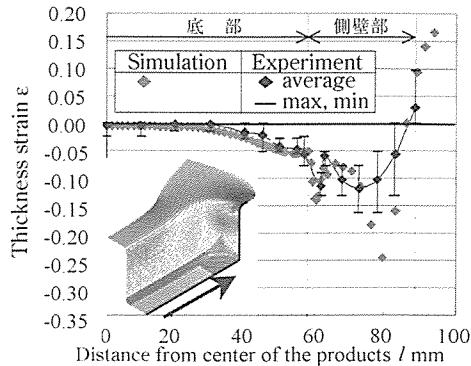


図5 長軸の沿った板厚ひずみ分布の比較

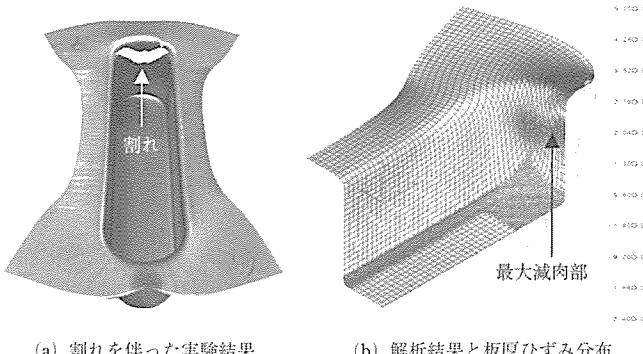


図6 実験における割れ発生部位と解析における最大減肉部位の比較

のみをモデル化している。有限要素には4節点縮退シェル要素を使用し、総節点数は3717、総要素数は3613である。

材料と工具の摩擦にはCoulomb摩擦則を採用し、パンチと材料の摩擦係数 μ は0.15、下型およびしづ押さえと材料の摩擦係数 μ は0とした。パンチストロークに対する液圧の負荷経路を図4に示す。

実験および解析で得られた材料の中央から長手方向にかけての板厚ひずみ分布を図5に示す。材料中央部からパンチ肩部近傍では、実験、解析で定量的によい一致が見られている。一方側壁部上部では実験結果、解析結果ともに大きな板厚の減少が見られるが、定量的な一致は得られていない。これは材料にシェル要素を用いたために、フランジ部での板厚増加が拘束できずにフランジ部での流入抵抗が増加したこと、また実験ではしづ押さえ力を定圧としたが解析では定クリアランスとしたことが影響したと考えられる。

しかし図6に示すように、実験および解析における最大減肉部と実験における割れ発生部位は定性的にはほぼ一致している。本成形品の場合、液圧を作用させない通常のプレス加工で成形を行うとパンチ肩部近傍での局所的

な減肉が進行する結果、パンチ肩で割れが発生する。つまり、対向液圧成形による結果と大きく成形性が異なることが明らかとなっている。以上の結果を踏まえると、図5、6に示す解析結果は対向液圧成形の特徴的な成形性を非常に良くとらえており、本解析プログラムの有効性を示していると考える。

現段階までで開発した定式では、フランジ部からの圧力媒体の流出に伴う摩擦力低下や圧力分布の変化については解決すべき問題点が多く残っている。従って今後はこれら問題点の解決を図りつつ、現場での使用にも耐えうるような高精度かつ汎用的解析プログラムの開発を目指していく。

さ い ご に

ものづくりは日本が世界に誇るべき基盤技術であります。またその発展には、大学でしか遂行できないような基礎的な研究が欠かせないと考えます。筆者は今後も実験的、理論的アプローチより塑性加工に関する基礎研究を進めていくことで、その発展に少しでも寄与すべく、努力していく所存です。水曜会の皆様におかれましては、厳しいご指導ご鞭撻を宜しくお願い申し上げます。

談話室

電磁波の目で不飽和帯を見る

尾 西 恭 亮*

Looking at the unsaturated zone with an electromagnetic eye

by Kyosuke ONISHI

はじめに

平成17年4月に社会基盤工学専攻地盤工学講座地質工学分野の助手として赴任致しました尾西恭亮と申します。この度は伝統ある水曜会誌に寄稿の依頼を頂きました。専門としております電磁波による地下探査を扱う中で、近年魅力に感じている地下水という対象に関して、やや雑感となりますが考え方をまとめてみたいと思います。

水分率遷移領域

地面の下部、土質や岩盤の間隙に存在する水を地下水と称します。私たち人間にとり大変身近な存在です。地下深くでは土粒子の間隙は水で飽和されており、これに対し、たいていの地表表層部の間隙は不飽和状態となっています。どこかで水分率は変化しているはずです。

本稿はこの不飽和帯を中心とした話題となっております。不飽和帯の分野は本来の水理学よりも、より実学性の強い農業や土木の分野で議論が重ねられており、水曜会員の方々には基本的な内容も含まれることをご容赦ください。

さて、地中に縦坑を掘ると、ある深度で突然縦坑が完全水飽和される現象が認められます。地下水水面です。地下水水面のある基準面からの深度が地下水位です。地下水位以深は100%水で占められ、地下水位以浅は0%であり、境界が明瞭です。地下水位は簡単に計測できるだけでなく、間隙水が感じる圧力の高低を示す指標となるため、地下水流动を考える上で大変重要な役割を果たしています(Freeze and Cherry, 1979)。

地盤や土壤内では、自由状態から土粒子が水を引きつける吸引力の積算であるマトリックポテンシャルが働きます。マトリックポテンシャルが地下水位より上部領域で重力ポテンシャルの不足分を補完し得なくなる深度で、不飽和領域の形成が開始されます。理論的には粒径分布や間隙率により不飽和含水領域の厚みは規定されます。実際の土壤では飽和帶上端面より上部に移動するに従い、水分率は急激な低下を示すが、次第に低下率は小さくなり、完全に0%になることはなく定常状態に落ち着くことが、各種観測結果で示されております。自然界では適度に地表面より水分の供給があるためです。Fig. 1に間隙水状態により区別された各領域の呼称を示します。

水分率が変化している領域の呼称は「Moisture Transition Zone」や「Capillary Tranzition Zone」等多様にあります(Nguyen et al., 1998)。ここでは仮に水分率遷移領域と称すことに致します。水分率の遷移領域は定まった呼称がないことから、地下水の把握に対し重

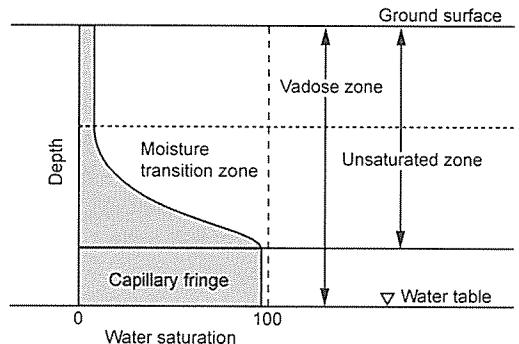


Fig. 1 地水面以上部領域の整理

*京都大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻

要度が低い現象部であると考えることもできます。しかし、実際には水分率遷移領域を考慮すべき状況は少なくありません。

水より軽い油 LNAPL (Light Non-Aqueous Phase Liquid) の流出を考えてみたいと思います。Fig. 2 のように難溶性である LNAPL が第一に沈積する深度は水分率遷移領域であることが指摘されています (Fetter, 1999)。LNAPL の拡散は供給過多により沈積油塊領域が拡大し地下水と接触した後に本格的に進行すると考えられています。従って、流出量と毛管帶厚（厳密には水分率遷移領域の地下水位からの高さ）がわかっているれば、周到な対策準備を行う猶予期間が存在するか否かの判断が可能となります。

また、堤防管理や地すべり対策を講じる際に湿潤線の位置が重要となります。湿潤線の定義は不明確ですが、飽和帶上面すなわち毛管帶上面または水分率遷移領域を指すものと考えられます。これは、降雨により間隙水圧が上昇した場合に水の流動を待たずして地下水位が上昇する範囲です。水分率遷移領域の場合は毛管帶に準じて地下水位が上昇し易い領域と捉えることができます。地すべりは地下水位以深の地下水が流動する領域でなければ生じにくく、地下水位の上昇しやすい領域を知らないければ、地下水位だけ把握していても地すべりの危険性は正確に評価できないことを意味します。

不飽和帯は厳密には不飽和な領域を指します。つまり、間隙が 100% 水で飽和している毛管帶の上部を意味する呼称です。しかし、専門家や実務者の中にはあえて不飽和帯と毛管帶の境界を 100% 飽和部の少し上部の水分率が急激に減少する突端としたり、水分率が急激に減少している箇所として使用している方が多いと思

います。これは、計測機器の精度不足と計測対象の不明瞭さが原因であると思います。現実的に飽和領域の上部境界位を現場で計測することは大変な困難を伴います。

電磁波による計測

不飽和帯の水ポテンシャルはテンシオメータを埋設して計測できます。しかし、間隙圧力と水分率は異なる物理量です。比較的高い関係があることが期待されますが、互いに線形変換できるものではなく、土質によっても換算式は多様に変化することが予想されます。しかし、全く独立な変化を示す関係ではなく、利用分野の求める精度によってはどちらか一方の値が判明すれば事足ります。

地下水位以下の間隙水圧分布は地下水の流動に直結するため非常に重要であるのに対し、間隙率に等しい水分率は土質の種類や浸透率の情報を与えるものの、重要度は数段落ちます。これに対し、地下水面上部領域では土粒子による拘束力の方が強く、動水勾配による一般的な流体流動が生じないため、圧力分布の値は地下水位以深の領域よりも重要性が低くなります。ただし、農学では植物の給水能力に大きく影響するため大変重要視されます。

毛管帶厚や水分率遷移領域を計測するには水分率という物理量を計測する手法が求められます。井戸を用いた計測では地下水位は計測できても水分率変化を計測することは困難です。TDR 等を用いた孔壁の水分率を計測することも可能ですが、縦坑周辺の水分率は周囲の領域に対し特異な分布を示すため、正確な同深度水分率値と隔たりがある可能性が残ります。また、中性子検層等は表

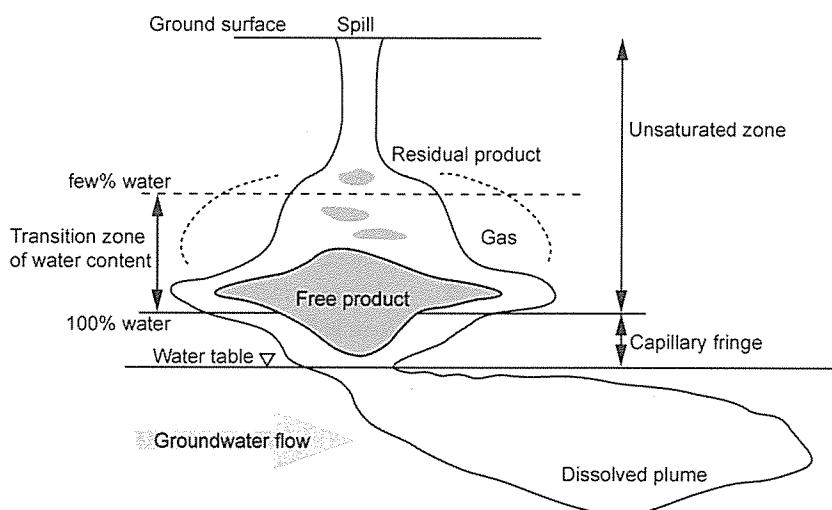


Fig. 2 LNAPL 拡散模式図

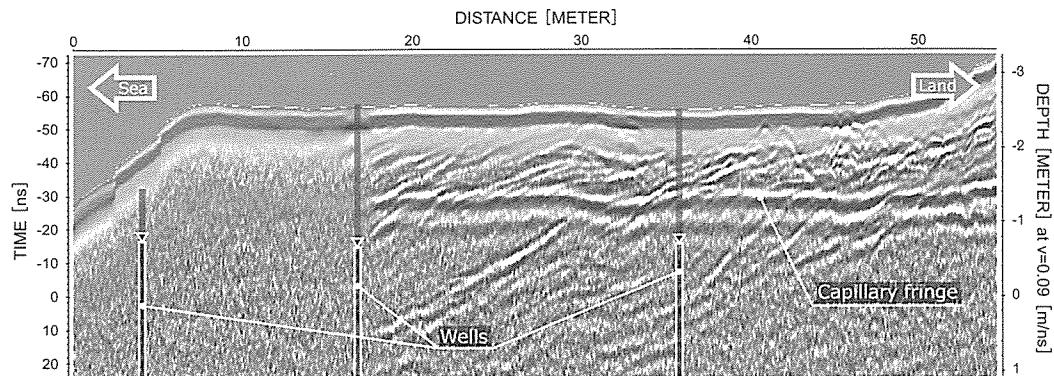


Fig. 3 地中レーダ記録例 (200 MHz)

層部では現実的ではありません。

従って、水分率の計測は地上からの非開削計測に頼らざるを得ません。これには、比抵抗探査とレーダ探査が有効であると考えられます。結論としては、要求分解能から地中レーダ探査がより有効であると私は考えています。ただし、計測可能な領域は電磁波が到達する浅層部に限られます。

地中レーダ法は直進電磁波の反射走時列を利用した地下可視化手法であり、一般土壤の浅層部探査では最も高い分解能を有します。探査や解析手法は反射法地震探査に準じます。最大の欠点は可探深度が浅いことです。地中レーダをご存じの方は対象まで電磁波が届けばそれなりの描画結果をもたらすが、地質調査用では探査可能な用途が少なく使い勝手はあまり良くないという印象を持たれていると思います。利用可能範囲に対する探査断面解像度を他の探査法と比べると見劣りがすると考えていらっしゃる方は少なくないと思います。

Fig. 3 は地中レーダで観測した記録断面例です。場所は富山県の黒部川河口左岸沿岸で、測線は海岸線に対し直行方向に配置されました。図の左側が海側となります。標高 1.5 m 付近に認められる水平な反射面が水分率遷移領域の位置に当たります。水分率の変化により誘電率が大きく変化するため、電磁波は反射や回折を起こします。図中には参考井と観測された水位が併記されております。地下水位では水分率変化は生じず、誘電率が変化しないため地中レーダや電気探査等の物理探査手法で観測することは不可能です。しかし、水分率遷移領域の計測が行えます。

毛管帶厚は粒径が小さくなると高くなり、粗砂で 2~5 cm、細砂で 35~75 cm、粘土で 150~300 cm といわれています(水収支研究グループ、1992)。Fig. 4 に参考調査地の粒径分布を示します。中砂で占められていることがわかります。Fig. 3 では地下水位より水分率遷移領域までの高さは約 40 cm と示されており、妥当な数

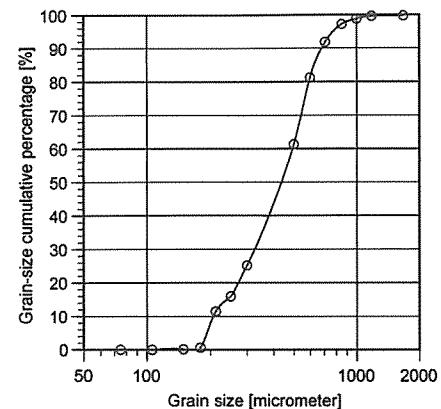


Fig. 4 調査地域の粒径加積曲線

値であることがわかります。汚染土壤の入れ替えが厚み分 50 cm 異なると、工事費用にかなりの差異が生じるのではないかでしょうか。

上記の観測試験では時系列観測をしております。海岸より 20 m 付近の地中レーダ断面による水分率遷移領域の推定値と参考井を用いた手計測と圧力センサによる自動計測の地下水位を併記して Fig. 5 に示します。海水準変動に伴い地下水位が変化するという興味ある観測記録が取得されております。なお、この地下水は海岸線より 15 m 付近まで 0.1 mS/cm 以下の淡水で、導水勾配からも地下水流动は陸から海へ向かっていることが判明しています。

Fig. 5 では比較のために地中レーダによる推定値は 50 cm 減算しています。自動計測値が正解とするならば、通常の手計測による水位観測と地中レーダ観測の誤差は同等であることがわかります。地中レーダ記録は空間連続しているため、むしろ信頼性が高く、物理探査記録が直接観測記録に劣るという構図は成立しない場合もあると考えています。高い探査精度を活かし、反射波形の長波長化から遷移領域幅の評価を行ったり、遷移領域幅か

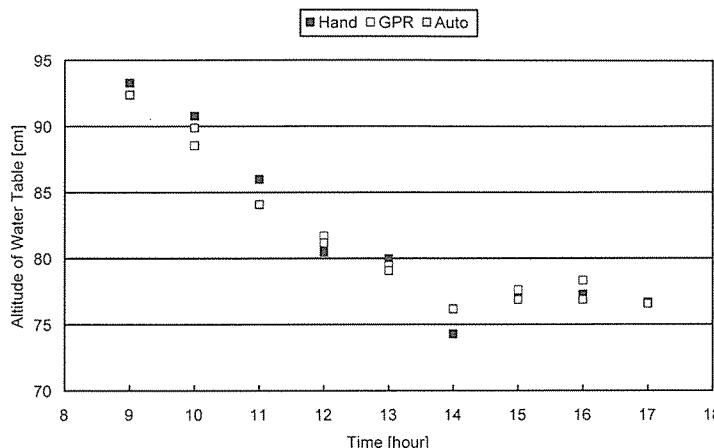


Fig. 5 井戸観測値と地中レーダ観測値の比較

ら地下水位の推定を行う等の発展が考えられ興味が尽きません。

地中レーダ発展史

反射法地震探査の開発は意外にも地中レーダ同様1920年代とされます。その後地中レーダ技術の発展が細々としたものだったのに対し、反射法地震探査は1930年代には早くも石油探鉱の主要探査法としての地位を確立し、莫大な資金を背景に急激に発展することになります。観測機器も地中レーダより簡易な機構であるため、デジタル化も早く、1970年代には多チャンネル化が進められました。多チャンネル観測が標準となる中、それまでに考案されていた CMP 法やマイグレーション処理が開発され、さらに、Time-lapse 観測や 3 次元観測など次々と深部構造観測や急傾斜構造の検出力を向上させていきます。そして、人類の文明発展に安価なエネルギー供給という側面で貢献してきました。

地中レーダは反射法地震探査と利用する波動の性質やデータ取得法などが類似しています。そのため、地中レーダ記録は反射法地震探査の記録と、扱う時間や空間のスケールは大きく異なるものの、処理の観点からは非常に似た性格をもちます (Sharma, 1997)。従って、長年にわたり巨費を投じられ開発および洗練されてきた反射法地震探査のデータ処理技術を地中レーダのデータ処理に多くの場合そのまま利用できます (Nakashima et al., 2001)。そのため、地中レーダは長らく、反射法地震探査の開発技術をそのまま利用する形で発展してきました。

しかし、地中レーダ観測は高速性が重要視され、調査時の品質管理は地震探査より数段落ちます。そのため、反射法と同等な処理体系の適用ができず、実際より探査能力は低く見積もられてきました。しかし、近年の地雷

探査技術としての精査利用は地中レーダの解像度能力の認識の改善をもたらしています。さらに、GPS 技術の高精度化は作業量を抑えたまま品質管理の改善を可能とし、S/N の向上をもたらしました。2000 年代は地中レーダ史にとり、反射法からの追随の終了と記憶されることになるかも知れません。分解能と精度の向上により、水分率遷移領域の描写ができるところに近づいています。

おわりに

科学発展史を眺めると偉人の鋭い発想が新しい殻を破る場面に多々出くわします。しかし、時代相応の実験装置や計測機器がなければ発想が開花する素地が得られず、新法則の発見や新しい概念の誕生は生まれてこなかったことを見落としてはならないと思っています。万有引力の法則の発見には天文観測技術が不可欠であり、電磁気学の発展には電池が必要でした。X 線解析技術がなければ遺伝子工学は誕生しなかったのではないかでしょうか。また、特に工学の分野では、生活に寄与しない技術は議論が進展しない傾向にあります。

自然界の情報抽出は科学の発展の基礎です。計測工学が担う科学的工学的潜在知識体系は少なくないと思います。物理探査技術はいわゆる一般的な計測技術の範疇外にある印象が持たれます。多分に不確定な要素が含まれ、経験と技術による解釈の判断が常に求められることが多いのは事実です。一般的な計測技術との違いを異なった言い方で表すと、他の情報から計測結果が別解釈される余地があるかないかと考えることができます。

近年、浅層調査においては、物理探査の一般計測技術化が認められます。地中レーダによる埋設人工物位置計測や被覆施工検証作業は常用されており、表面波探査法等が地盤調査評価に多用されています。

水分率の遷移状況の定式化が Leverett 等により試み

られているものの (Bear, 1972), 実用上及び物理挙動の理解双方の側面から不完全と言わざるを得ません。水分率遷移領域の上端境界の定義化も困難です。しかし、これを電磁波反射領域と捉えるならば評価の方向性が見いだせます。地中レーダの反射係数分布による地下水の理解ということを、週末研究で行つていただきたいと考えています (いわば "Rader Groundwater Hydrology")。身近であるはずの地下水の水分率の遷移状態がどのようになっているのか未解明のまま、来る水の時代に突入することに危惧を覚えます。

地中レーダの高解像度化は必要とされないという意見も寄せられます。現状の解決方式では必要とされないと理解し、社会に役立つ物探とは何か意識し、時にはデータの活用方法も提示しつつ、研究を進めて行きたいと考えます。道具であることを忘れずに、道具を提示していきたいと考えております。ご指導、ご鞭撻の程よろしくお願い申し上げます。

参考文献

- 1) Freeze, R. A. and J. A. Cherry: *Groundwater*, Prentice Hall, (1979).
- 2) Nguyen B.L., J. Bruining, E.C. Slob, V. Hopman: Delineation of air/water capillary transition zone from GPR data, *Reservoir Evaluation & Engineering*, 1, 319-327, (1998)
- 3) Fetter, C.W.: *Contaminant Hydrology*, Second Edition, Prentice Hall, (1999).
- 4) 水収支研究グループ：地下水資源・環境論、その理論と実践、共立出版, (1992).
- 5) Sharma, P.V.: *Environmental and engineering geophysics*, Cambridge University Press, (1997).
- 6) Nakashima, Y., H. Zhou, and M. Sato: Estimation of groundwater level by GPR in an area with multiple ambiguous, *J. of Applied Geophysics*, 47, 241-249, (2001).
- 7) Bear, J.: *Dynamics of fluids in porous media*, Dover Publications, Inc., (1972).

談話室

金属の歴史

松原英一郎*

HISTORY of Metals

by Eiichiro MATSUBARA

1. はじめに

必死で向き合う人々の姿が見えてくる。

4月に東北大金研から赴任し、現在研究室を立ち上げ中でばたばたしており、原稿の締切だけが過ぎていくこともあり、東北大金研にいた時に、東北大学総合博物館、東北電力グリーンプラザ、21世紀COEプログラム「物質創製・材料化国際研究教育拠点」の主催で開いた一般向けの公開展示のパンフレット用に私が書いた金属の歴史という解説に基づいて、金属の歴史というタイトルで述べたい。この展示で金属の歴史を取り上げた理由は、金属が我々に最も身近な物質の1つでありながら、あまり意識されていないからである。人々が金属をどのようにして発見し、利用してきたかを振り返ることによって、金属を当たり前のように日常利用している一般の人たちに、もう一度金属に目を向けてもらうことが本展示の1つの大きな目的であった。私自身永年金属に携わってきたが、正直あまり深くこのことについて考えたことはなかった。例えば、人々が最初に鉱石から得た金属銅の起源についても、食事をするキャンプファイヤーのかまどを作るのに偶然利用した銅鉱石が燃料の木炭で還元されて灰の中に金属光沢を持つ金属銅を見つけたという程度の何の根拠もない話であった。この解説を書いてみて感じたことは、現在我々がややもすると忘れがちな物事の真実を理解したり、様々な問題を克服したりするために、必死に取り組む姿勢を再認識させてもらったことである。紀元前8000年から7000年の新石器時代の「天然金属」の利用に始まり、銅、青銅の利用を経てローマ時代初期の鉄の利用に到る人々の金属の歴史を振返る時、武器や食べ物を得るために、より強く、より使い勝手のよい道具作りのために身の周りの様々な現象や物に真剣に

2. 天然金属の利用

人類がいつ頃、どのような場所で意図的に金属を利用するようになったかは分かっていない。ただ新石器時代に、ある種の石が、他のものより重くて、敲いて割れたり欠けたりしないで、ある場合には敲いて好きな形にすることができるということに気付いて使い始めたと考えられる。その最もよい例は「天然金属」(鉱石中で他の元素と化合物を形成せず、ほぼ純粋な状態で産出する金属)である。人類が最初に利用した天然金属は金、銅、鉄であったと考えられる。天然白金や銀もあるが、そもそもごくまれにしか存在しない天然金属の中でも、さらに稀少な金属であり、一般的ではなかったと考えられる。

天然金は通常高純度の状態で存在し、人の目に留まり易く最初に利用された金属と考えられる。天然鉄は他の天然金属とは違い、宇宙から地球上に落ちてきた隕石である。隕鉄と呼ばれるこの隕石には、高濃度のニッケルが含まれているため地球上の鉄と違いさび難く、紀元前4000年前に作られたものが現存している。そのため、人々が太古に隕鉄を利用したことを知ることができる。天然銅及び銅化合物は鉱床が地表近くで多量に存在し、天然金や鉄に比べ手に入り易かったため、新石器時代の人々が金属銅を最もよく利用した。

3. 銅精錬の始まり

人類にとってただ加熱するだけで柔らかくなり、金属によっては溶かして鋳物を造れる天然金属に比べ、金属元素を含む鉱石から不純物を取り除いて金属を取り出す精錬技術を見いだすのは決して簡単なことではなかった。第一、普通に加熱しても金属にはならない鉱石の場

合、天然金属と違い外見から金属元素を含む鉱石であることを見分けることはできなかった。ただ、新石器時代の人々は、銅鉱床から天然銅と銅鉱石のくじやく石（マラカイト、malachite）と一緒に産出することから、両者に何か関係があると知識として知っていたと考えられる。酸素が欠乏した炭素に富んだ雰囲気中で銅鉱石を1083℃近くの高温に熱すると、鉱石中の銅元素から酸素元素がとれて（還元反応）、重い溶けた金属銅と軽いスラグと呼ばれる不純物を含む鉱石の残りの部分に分かれる。そこで先にも述べたように、銅精錬の発生起源として、たまたま銅鉱床の上で調理を行ったり、知らずに銅鉱石で炉を造り使用したりした偶然がきっかけではないかとよく言われる。ただ、このような調理用の炉で得られる温度はせいぜい600～700℃程度である。このような条件で、融点327℃の金属鉛を鉛鉱石である方鉛鉱（galena）から精錬できても銅の精錬はできなかった。すなわち、銅精錬には決定的な技術革新が必要であった。

現在考えられているのは、紀元前6000年頃にはすでに、保温に優れた厚い壁で作られ、煙突を持つ自然吸気を備えた炉を利用して焼かれていた製陶技術の転用である。このような炉では、鉱石の還元に必要な1000℃以上の温度を還元雰囲気で長時間保持することができる。次に鉱石であるが、これは当時陶器の顔料に用いられていた金属鉱石からヒントを得たのではないかと考えられている。すなわち顔料の一部が陶器の表面で還元されて金属になっているような焼き物が発掘されている。そして発掘された遺跡から、紀元前4000年頃シナイ半島の紅海付近では、くじやく石を原料、木炭を還元剤、鉄鉱石をフラックスとして、ポール形状の炉を用いて銅精錬がかなり大規模に行われていたことが知られている。当時、この地はアフリカ、アジアを結ぶ交通の要衝であったことから、銅精錬の技術はエジプト、メソポタミア、シリア、アナトリアへ、さらに紀元前3000年から2500年の間にはヨーロッパへと伝わったと考えられる。

銅鉱床が世界中に広く分布しており、しかも地表近くに多量に存在していること、そして、銅精錬は一度習得すると、再現性よく良質の銅を作ることができることから、広い地域で多くの人々が大規模に利用した最初の金属が銅であったことは、決して偶然ではなかった。そしてさらに大事なことは、それまで利用されていた石器に比べれば、銅は見た目もよく、加工も容易であるため、調理道具、装飾品、小型の道具などは金属銅に急速に置き換えていくことになる。しかし、大型の道具や武器などには、銅は柔らかすぎて不向きであった。槌で敲いて加工硬化により少し硬くすることはできたが、やりすぎると脆くなり割れてしまった。人々は新しい金属を発見し、新たな技術革新が必要であった。このような背

景の中、紀元前4000年頃に銅に錫を添加した銅合金、青銅が登場することになる。

4. 青銅の時代

紀元前4000年後半には、人々は金属銅にヒ素などの混ぜものをすること（合金）で硬さが増すことを見出していた。また、銅合金をつくることによって純銅の融点（1084℃）より低い温度で銅は溶け、広い温度領域で溶けた状態を保てることから、型に流し込んで様々な形状の道具を作製する鋳造技術が銅合金に利用されるようになった。銅に添加する元素として最も適していたのは錫であった。銅と錫の合金、青銅の本格的な利用が考古学的に確認されるのは、紀元前3000年頃のメソポタミアである。その後数百年の間に青銅は中近東全域、エジプト、イラン、シリア、アナトリア、キプロスに広がっていく。銅を飛躍的に硬くし、様々な複雑な形状の道具を精度よく大量に作ることができる鋳造という技術の出現は、人々の青銅の使用を急速に広げていくことになった。中国でも紀元前1400年から1100年頃に存在した殷王朝では青銅が使われ、極めて精密な文様の青銅器が作られていた。この殷での青銅技術の発生については、中国を起源にするものか、中東付近から伝來したものはよく分かっていない。ただ、中近東のように青銅時代以前の金属利用が明らかではないため、伝來した技術であるというのが現状では有力である。しかしながら、ヨーロッパから中国に至るまで幅広く広がった青銅の利用に関する最大の謎は、銅に混ぜた錫の入手先がよく分かっていないことである。この青銅時代も、次に出現するより優れた道具を製造できる鉄器によって終わりを告げることになる。

5. 青銅から鉄へ

鉄器の出現によって、多くの農地の開拓がされ、より多くの人々の生活を支えることができるようになり、武器の性能は向上し、戦いも優勢に進めることができるようにになった。このように鉄は人々の生活様式に大きな変化をもたらしたことは言うまでもない。しかしながら、青銅から鉄への移行には2000年近くの長い年月を必要とした。銅に比べ鉄資源は豊富で安価なことを当時の人々は知っていたにもかかわらず、紀元前1000年の初めになってようやく一般に使われるようになった。鉄の精錬の習得にこのように長い年月を要したのは、鉄が溶ける温度（融点1537℃）が、紀元前2000年当時に利用されていた青銅、銅、金、銀、鉛、錫などの他の金属に比べ500℃以上高い温度であったことが考えられる。

鉄鉱石自体は、実は銅精錬のフラックスとして利用されていたことが分かっている。マラカイト中のシリカと

鉄酸化物が複合酸化物（スラグ）を形成し、金属銅が作られる。この過程で、炉の高温部分で鉄鉱石の一部が還元されて銅と一緒に金属鉄が得られた。このような鉄は銅を敲いて板に加工する場合や溶かして鋳込んだ際に介在物として傷の原因となった。そのため、介在物である鉄は注意深く削りとられた。既に知られていた隕鉄とどのように削り取られた鉄との類似性当然、知っていたと考えられる。ただし鉄の融点が1537°Cであるため加熱して削り取った鉄の破片をつなぎ合わせるというようなことは難しく、大きな物を作ることはできなかった。

青銅時代の技術で、鉄鉱石を金属鉄に還元することはできた。しかし1500°C以上の高温を得ることができなかつたために、鉄鉱石から溶融鉄とスラグを分離回収することはできず、スラグを介在物として含んだポンジ状の塊鉄を得ることができたと考えられる。この塊鉄を加熱しては槌で敲くことによって中のスラグを除去する方法で鉄（還元鉄）が作られた。ただ、このようにして得られた鉄は青銅より柔らかく、すぐ錆びるため青銅に取って代わるはなかった。

青銅に代わる金属鉄の製造技術がどのようにして生まれたかは定かではない。しかしひとづ確かなのは、紀元前2000年以降にアナトリア（現在のトルコ北西部）で起こったヒッタイト人が、優れた鉄器文化を持っていたことが知られている。これは、この地に産する鉄鉱石に原因があると考えられる。すなわち、黒海の南岸に産出するマグネタイトや橄欖石（オリビン）を多く含んだ鉄鉱石は自溶作用を持っており、約900°Cで金属鉄に還元することができた。ヒッタイトが征服した黒海沿岸のカリュベス族は、この鉄を使って、敲いて硬くする技術など優れた鍛冶の技術を持っていた。紀元前1200年のヨーロッパ族のアナトリアへの侵攻によるヒッタイトの衰退に伴い、鉄の文化もヨーロッパなど広い地域へ広がつ

ていくことになる。

6. 鉄から鋼へ

紀元前1500年から1000年の間に、アナトリアからメソポタミア地域において、日常の鉄の製造過程での偶然も手伝って鉄を鋼（はがね）に変える技術革新が確立したと考えられる。ポンジ状の還元鉄から槌で敲いてスラグを除去するために、鉄を柔らかくする必要があった。鉄を800°C以上に一酸化炭素が発生している木炭炉の中で加熱すると、炭素が少量鉄中に拡散して入り込む。すなわち鉄を鋼にする技術である。炭素が0.3%程入れば、鋼は青銅より硬くなり、1.2%でさらに硬くなり、加工硬化させた青銅より強くなった。紀元前1200年頃には、このような鋼を室温で、槌で敲いて加工硬化させ、青銅の倍の強さにすることも行われていた。

炭素の添加による鋼（はがね）化に続く重要な技術革新は、加熱した鋼を水に焼き入れること（焼入れ）で、さらに硬くする技術であった。ただ、焼入れによって硬くされた鋼は脆く割れやすいという欠点があった。ローマ時代初期のおおよそ紀元前400年頃には、この焼入れた鋼を約700°Cに短時間加熱しゆっくり冷やすこと（焼入れ焼鈍）で、硬さは若干失われるものの粘くなることが確立された。鉄に関する（1）炭素添加による鋼化、（2）焼入れ、（3）焼入れ焼鈍という3つの技術革新により、鉄器は青銅器に完全に取って代わることになる。その優れた性質ゆえに紀元前1000年から数百年の間でヨーロッパ、アフリカ、アジアへと急速に広がっていくことになる。しかし、鉄を溶かすことができなかつたために、鉄器を大量生産することはできなかつた。鉄器の大量生産までの技術革新は、送風技術の発展などにより、人々が1600°C～1800°C付近の高温を利用できるようになるまで、さらに1000年以上が必要であった。

談話室

結晶の対掌性決定のための新しい電子回折法

乾 晴 行*

New Electron Diffraction Method to Identify Crystal Chirality

by Haruyuki INUI

1. はじめに

材料工学専攻材料物性学講座担任教授に平成16年11月1日付けで昇任いたしました。これまで一貫して金属間化合物の力学特性、転位など結晶格子欠陥のキャラクタリゼーションに関する研究・教育に従事してきました。このような研究も更なる展開を目指して続けておりますが、新しい材料、特に当専攻でこれまで扱わなかった有機系材料への展開も視野に入れて研究を続けております。本稿では、最近研究に着手したばかりですが、医薬品関連の有機短分子結晶で特に重要となる「結晶の対掌性」決定のために新たに開発した電子回折法についてご紹介させていただきます。

2. 結晶の対掌性

右手と左手のように互いに鏡面対称の関係にあり重ね合わすことのできないペアを鏡像体（対掌体）と呼び、そのような鏡像体をもつことを対掌性、特に、結晶学ではエナンショモルフィズム(enantiomorphism)、化学ではキラリティー(chirality)と呼ぶことが多い。対掌性は、分子のみでなく結晶においても回転軸がなければ、すなわち対称中心 $\bar{1}$ 、鏡面 $\bar{2}$ 、 $\bar{4}$ 軸の対称要素がなければ存在し、表1に示す11の結晶点群に属する空間群すべてが対掌性をもつ¹⁾。一般に、鏡像体の右手系結晶の原子座標を (x_i, y_i, z_i) と表すと左手系結晶の原子座標は $(-x_i, -y_i, -z_i)$ と表わされ、同一空間群に属する鏡像体が存在する一方、らせん軸の違いにより異なる空間群に属する鏡像体も存在する。後者の鏡像体は表1で括弧で示した空間群のペアに相当し、右手系から左手系の結晶への変換には上記の原子座標の変換に加えてらせん軸の

巻き、すなわち、空間群も変換する必要がある。当然のことながら、表1に示した点群あるいは空間群に属する結晶の構造（絶対配置）を決定する場合、その対掌性の識別が必要となる。鏡像体は、互いに通常の物理的、化学的性質は等しいものの、光学活性や生理活性が異なる²⁾。従って、対掌性の識別は、無機結晶、有機結晶いずれでも学問上非常に興味深いが、医薬品に関連する有機結晶などで特に実用上の重要性が生じる²⁾。

3. 対掌性識別のための新しい収束電子回折法の原理

3.1 バイフィット（フリーデル）対の結晶構造因子

回折現象を利用した対掌性の識別の方針として異常分散効果を用いたX線回折法が一般的である³⁾。ここでは、このX線回折異常分散法と比較しつつ、本方法の原理を説明する。

原子座標 $\{x_j, y_j, z_j\}$ を持つ結晶の hkl 反射に対する結晶構造因子は、以下のように表される。

$$F(hkl) = \sum_j f_j(\theta) \cdot \exp [-2\pi i (hx_j + ky_j + lz_j)] \\ = |F| \cdot \exp (i\phi) \quad (1)$$

$f_j(\theta)$ はj番目の原子の原子散乱因子、 θ は散乱角である。(1)式において $|F|$ は結晶構造因子の振幅、 ϕ はその位相を表す。中心対称を持たない結晶に対しては、2つの反射指数 hkl と $\bar{h}\bar{k}\bar{l}$ は等価ではなく、これらはフリーデル(Friedel)対と呼ばれる。フリーデル対の反射では、(2)式に示すように結晶構造因子の振幅は等しく位相 ϕ の正負が互いに逆転している。通常のX線回折では、回折強度は構造因子の振幅の自乗に比例するため、フリーデル対反射の強度はまったく等しく、フリーデルの法則が成り立つ³⁾。

*京都大学大学院工学研究科 材料工学専攻

表1 対掌性を持ち得る点群およびその点群に属する空間群。

Crystal Systems	Enantiomorphic Point Groups	Space Groups Belonging to the Point Group
Triclinic	1	P1
Monoclinic	2	P2, P2 ₁ , C ₂
Orthorhombic	222	P222, P222 ₁ , P ₂ 1212 ₁ , P ₂ 1212, C222 ₁ , C222, F222, I222, I ₂ 1212 ₁
Tetragonal	4	P4, (P4 ₁ , P4 ₃), P4 ₂ , I ₄ , I ₄ ₁
Tetragonal	422	P4212, (P4122, P4322), (P41212, P43212), P4222, P42212, I422, I ₄ 122
Trigonal	3	P3, (P3 ₁ , P3 ₂), R ₃
Trigonal	32	P321, (P3 ₁ 21, P3 ₁ 21), P312 (P3112, P3 ₂ 12), R32
Hexagonal	6	P6, (P6 ₁ , P6 ₅), (P6 ₂ , P6 ₄), P ₆ ₃
Hexagonal	622	P622, (P6 ₁ 22, P6 ₅ 22), (P6422, P6222), P6 ₃ 22
Cubic	23	P23, F23, I23, P213, I213
Cubic	432	P432, P4232, F432, F4132, I432, (P4132, P4322), I4132

$$|F(hkl)| = |F(\bar{h}\bar{k}\bar{l})|, \phi(hkl) = -\phi(\bar{h}\bar{k}\bar{l}) \quad (2)$$

実際のX線回折の実験では、点群の対称操作から生じるフリーデル対の等価反射を含めたバイフット(Bijvoet)対の強度差を観察することになるが、鏡像体の右手系結晶の原子座標を (x_i, y_i, z_i) と表すと左手系結晶の原子座標は $(-x_i, -y_i, -z_i)$ と表わされるため、右結晶と左結晶の hkl 反射の結晶構造因子を比較すると、振幅は互いに等しいものの、位相の正負が逆転することになる。このようなことから(3)式に示すような関係が成り立つ。

$$\begin{aligned} F_{\text{右}}(hkl) &= |F| \cdot \exp(i\phi), \quad F_{\text{右}}(\bar{h}\bar{k}\bar{l}) = |F| \cdot \exp(-i\phi) \\ F_{\text{左}}(hkl) &= |F| \cdot \exp(-i\phi), \quad F_{\text{左}}(\bar{h}\bar{k}\bar{l}) = |F| \cdot \exp(i\phi) \end{aligned} \quad (3)$$

すなわち、鏡像体の一方の結晶に関して結晶構造因子をバイフット対で比較すると、振幅は等しいものの位相が正負逆転しており、右結晶と左結晶で hkl 反射の結晶構造因子を比較すると、同様に振幅は等しいものの位相が正負逆転している。右結晶の hkl 反射と左結晶の $\bar{h}\bar{k}\bar{l}$ 反射は振幅、位相とも全く等しい。即ち、以下のようなバイフットの関係が成り立つ³⁾。

$$F_{\text{右}}(hkl) = F_{\text{左}}(\bar{h}\bar{k}\bar{l}), \quad F_{\text{右}}(\bar{h}\bar{k}\bar{l}) = F_{\text{左}}(hkl) \quad (4)$$

(2), (4)式に示すようにフリーデルの法則が成り立つ限り、通常のX線回折では、右結晶と左結晶の hkl および $\bar{h}\bar{k}\bar{l}$ 反射の結晶構造因子の振幅は互いに等しく、対掌性の区別はできない。しかし、異常分散を考慮すると、結晶が複数種の原子で構成されているときには原子散乱因子の虚数項が構成原子により異なるためにフリーデルの法則が破綻し、バイフット対に強度差が生じる³⁾。この時バイフットの関係は依然成り立つことから、対掌性の識別が可能となる。

3.2 電子回折におけるフリーデルの法則の破綻

電子回折では物理的にX線回折で見られる異常分散効果が起らぬいため、対掌性識別には、何らかの方法でフリーデルの法則を破綻させる必要がある。以下に示すように、電子回折では、電子線の入射方位をバイフッ

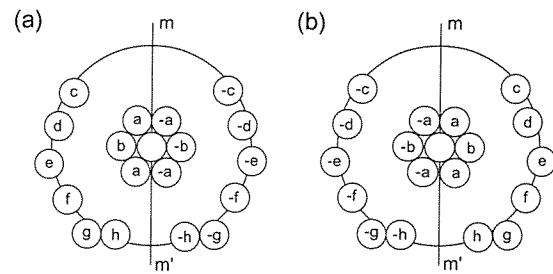


図1 バイフット対が対称に配列するCBED图形での位相分布；(a) 右結晶, (b) 左結晶。

ト対反射が対称に配列するよう選定し、その晶帶軸入射の収束電子回折图形に現れる反射ディスク間の多重回折によりフリーデルの法則が破綻する。

図1(a), (b)はバイフット対反射がm-m'ラインに関して対称に配列している収束電子回折(CBED)图形の模式図である。各反射のディスク内には結晶構造因子の位相を模式的に示している。m-m'ラインに関して対称にバイフット対反射が観察できる適切な入射方位を選ぶことができれば、CBED图形においてはバイフット対反射の位置および構造因子の運動学的振幅はm-m'ラインに関して対称に分布するものの、バイフット対反射の位相のみが互いに正負逆転するように非対称に分布する。このとき(3)式に示すように、右結晶と左結晶の hkl 反射では、結晶構造因子の位相が正負逆転しているためCBED图形における回折波の位相分布は右結晶と左結晶ではm-m'ラインに関して反転した形(反対称)となる⁹⁾。

このようなCBED图形の回折強度を運動学的に考えれば回折強度も当然m-m'ラインに関して対称となるが、動力学的効果を考慮したとき、ある回折波の強度は当該回折波と遠まわり反射(Umweganregung)の足し合わせとして考えることができ、回折強度はこれら回折波の位相に依存する。バイフット対反射が対称に配列する電子回折图形では回折波の位相がm-m'ラインに関して非対称に配列しており、回折強度もm-m'ラインに関

して非対称となる。すなわち、電子回折では動力学的な効果によりバイフィット対反射の回折強度に非対称が現れ、フリーデルの法則が破綻する^{4), 5)}。また右結晶と左結晶では回折波の位相分布が m-m' ラインに関して反転した形であるため、回折強度の非対称も反転した形となり対掌性の識別が可能となる。m-m' ラインはこのような操作により数学的な鏡面として作用している⁴⁾。

3.3 バイフィット対が対称に観察可能な入射方位

どのような反射指数がバイフィット対になるかは結晶点群に依存し、表 2 に示すように結晶点群の対称性が上がるにつれてバイフィット対反射の等価反射指数が増加する³⁾。例えば、点群 622 の場合、ある任意の指数 hkl を I_A , $\bar{h}\bar{k}\bar{l}$ を I_B としたとき、 I_A と I_B はバイフィット対であり、バイフィット対がどのように分布するかステレオ投影図上に書き込んだものが図 2(a) である。○印で囲んだ

指標および無印の指標は紙面の向こう側あるいはこちら側に面法線を持つ反射面である。このステレオ投影図から、入射結晶方位が {1120}, {1100} あるいは (0001) 晶帶上にあれば、すなわち、 $\langle h\bar{h}0l \rangle$, $\langle h\bar{h}2\bar{h}l \rangle$ あるいは $\langle hki0 \rangle$ 方向であれば、バイフィット対反射が対称に観察できることが分かる⁴⁾。同様に、点群 321, 点群 222 についてバイフィット対の分布をステレオ投影図に書き込んだものが図 2(b), (c) で、バイフィット対反射が対称に観察できる入射方位はそれぞれ、点群 321 の場合、 $\langle h\bar{h}0l \rangle$ 方向、点群 222 の場合、 $\langle 0kl \rangle$, $\langle h0l \rangle$ あるいは $\langle hkh0 \rangle$ 方向であることが分かる。このようにして対掌性を持ち得る全ての点群について、バイフィット対反射が対称に観察可能な入射方位を表 2 に示すように決定した⁴⁾。

4. 実在結晶への応用

Te は対掌性を持つ代表的な無機結晶の 1 つで、点群 321 に属する $P_{3_1}21$ および $P_{3_2}21$ のキラルな空間群ペアのいずれかに結晶する⁶⁾。表 2 よりバイフィット対反射が対称に観察可能な入射方位は $\langle h\bar{h}0l \rangle$ で、ここでは [2203] を選定した。図 3(a), (b) はそれぞれ空間群 $P_{3_1}21$ および $P_{3_2}21$ の [2203] 入射の CBED 図形の模式図で、ZOLZ, FOLZ いずれでも多数のバイフィット対反射が m-m' ラインに関して対称に配列している。各反射の指標と結晶構造因子の位相が書き込まれている。個々の CBED 図形では位相分布は m-m' ラインに関して非対称となっており、空間群が変わると位相分布が m-m' ラインに関して反転している。動力学的な多重回折による強度分布の非対称は、振幅 - 位相図^{5), 7)}をもとに容易に予想できる(図 3(c), (d))。その結果は、図 3(a), (b) に記されており、濃いマークを入れた反射の方が強度が強いと予測できる。図 4 に Te の [2203] 入射の実験 CBED 図形およびシミュレーション¹⁰⁾ 図形を示す。図 4(b), (c) は空間群 $P_{3_1}21$ および $P_{3_2}21$ を仮定したシミュレーション図形(加速電圧 100 kV, 試料厚さ 14.1 nm)で、ZOLZ, FOLZ いずれでも反射強度は

表 2 対掌性を持ち得る点群のバイフィット対およびバイフィット対反射が対称に観察可能な入射方位。点群 1 および 3 では ZOLZ と記しているが、これはバイフィット対反射の対称観察が可能な入射方位が存在せず、ZOLZ (Zeroth order Laue zone) のフリーデル対反射を利用して識別を行うことを意味する⁴⁾。

Crystal System	Point Group	Bijvoet Pairs Equivalent indices	Appropriate Zone-Axis Equivalent indices
Tric.	1	hkl	$\bar{h}\bar{k}\bar{l}$ ZOLZ
Monc.	2	$hkl=h\bar{k}\bar{l}$	$\bar{h}\bar{k}\bar{l}=h\bar{k}\bar{l}$ $\langle h0l \rangle$
Orth.	222	$hkl=\bar{h}\bar{k}\bar{l}=\bar{h}\bar{k}\bar{l}=h\bar{k}\bar{l}$	$\bar{h}\bar{k}\bar{l}=\bar{h}\bar{k}\bar{l}=h\bar{k}\bar{l}=h\bar{k}\bar{l}$ $\langle h00 \rangle, \langle 0kl \rangle, \langle h0l \rangle$
Tet.	4	$hkl=h\bar{k}\bar{l}=h\bar{k}\bar{l}=h\bar{k}\bar{l}$	$\bar{h}\bar{k}\bar{l}=\bar{h}\bar{k}\bar{l}=h\bar{k}\bar{l}=h\bar{k}\bar{l}$ $\langle h00 \rangle$
	422	$hkl=h\bar{k}\bar{l}=h\bar{k}\bar{l}=h\bar{k}\bar{l}$ $=\bar{h}\bar{k}\bar{l}=\bar{h}\bar{k}\bar{l}=h\bar{k}\bar{l}=h\bar{k}\bar{l}$	$\bar{h}\bar{k}\bar{l}=\bar{h}\bar{k}\bar{l}=h\bar{k}\bar{l}=h\bar{k}\bar{l}$ $=h\bar{k}\bar{l}=h\bar{k}\bar{l}=h\bar{k}\bar{l}=h\bar{k}\bar{l}$ $\langle h00 \rangle, \langle 0kl \rangle, \langle h0l \rangle$
Trig.	3	hkl	$\bar{h}\bar{k}\bar{l}$ ZOLZ
	321	$hkl=h\bar{k}\bar{l}$	$\bar{h}\bar{k}\bar{l}=h\bar{k}\bar{l}$ $\langle hh0l \rangle$
	312	$hkl=h\bar{k}\bar{l}$	$\bar{h}\bar{k}\bar{l}=h\bar{k}\bar{l}$ $\langle hh2\bar{h}l \rangle$
hex.	6	$hkl=\bar{h}\bar{k}\bar{l}$	$\bar{h}\bar{k}\bar{l}=\bar{h}\bar{k}\bar{l}$ $\langle hki0 \rangle$
	622	$hkl=\bar{h}\bar{k}\bar{l}$ $=h\bar{k}\bar{l}=h\bar{k}\bar{l}$	$\bar{h}\bar{k}\bar{l}=\bar{h}\bar{k}\bar{l}$ $=h\bar{k}\bar{l}=h\bar{k}\bar{l}$ $\langle h\bar{h}0l \rangle, \langle hh2\bar{h}l \rangle, \langle hki0 \rangle$
Cub.	23	$hkl=\bar{h}\bar{k}\bar{l}=\bar{h}\bar{k}\bar{l}$	$\bar{h}\bar{k}\bar{l}=\bar{h}\bar{k}\bar{l}=h\bar{k}\bar{l}=h\bar{k}\bar{l}$ $\langle h00 \rangle$
	432	$hkl=\bar{h}\bar{k}\bar{l}=\bar{h}\bar{k}\bar{l}$ $=h\bar{k}\bar{l}=h\bar{k}\bar{l}=h\bar{k}\bar{l}$	$\bar{h}\bar{k}\bar{l}=\bar{h}\bar{k}\bar{l}=h\bar{k}\bar{l}=h\bar{k}\bar{l}$ $=h\bar{k}\bar{l}=h\bar{k}\bar{l}=h\bar{k}\bar{l}=h\bar{k}\bar{l}$ $\langle h00 \rangle, \langle hh0l \rangle$

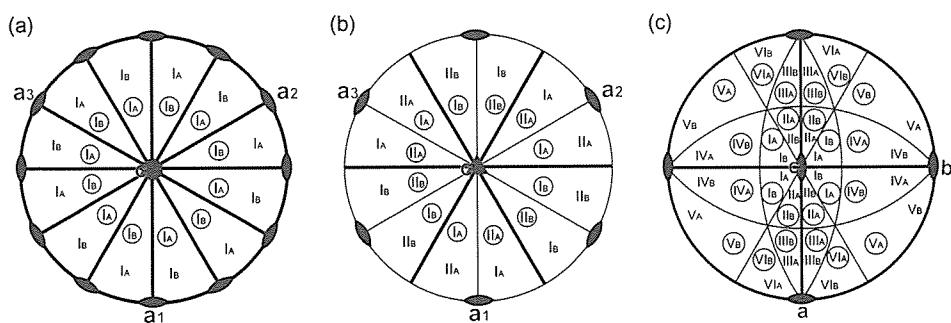


図 2 バイフィット対の空間分布；(a) 点群 622, (b) 321, (c) 222.

$m-m'$ に対して非対称であり、空間群が変わると強度の非対称が $m-m'$ に関して反転している。実験图形(図3(a))での強度の非対称は空間群 $P_{3_1}21$ を仮定したシミュレーション图形(図3(b))とよく一致しており、この結晶は空間群 $P_{3_1}21$ に属すると対掌性の識別が容易に行える。

6つの等価な $\langle 2\bar{2}0\bar{3} \rangle$ 方向を入射方向とすれば、いずれ

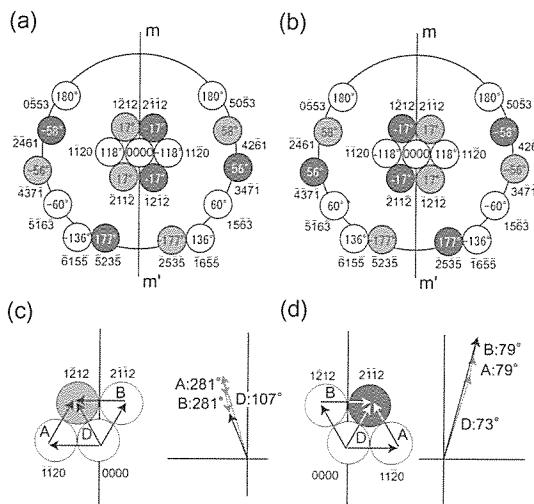


図3 Teの $[2\bar{2}0\bar{3}]$ CBED图形における位相分布
(a) $P_{3_1}21$, (b) $P_{3_2}21$ と空間群 $P_{3_1}21$ でのバイフィット反射の振幅-位相図 ((c) $1\bar{2}12$, (d) $2\bar{1}\bar{1}2$ 反射)。

もまったく同じ CBED 図形が得られ、対掌性の識別はたった1枚の CBED 図形を撮影することにより行える。X線回折異常分散法では少なくとも2種以上の構成元素が必要であるが、電子回折を用いる本方法では構成元素が1種類でもその数にかかわりなく対掌性の識別が行える特徴を有する。試料の厚さ、電子線の加速電圧、収束角、励起誤差の影響については、文献⁹を参照されたい。

最後に、本方法の応用で実用上の重要性が最も高いと考えられる有機結晶への応用例を示す。有機結晶は一般に融点が低く、電気伝導にも熱伝導にも乏しいため、容易に電子照射損傷が起こり実験は難しい。これを避けるため液体ヘリウム温度での観察がしばしば行われるが、電子顕微鏡そのものが大変高価となる。しかし、結晶を液体窒素中での様な低温で粉碎するとかなり薄い試料が作製でき、回折图形をビデオでリアルタイム録画することにより、通常の電子顕微鏡でも室温で十分に実験ができるようになる。アミノ酸の一種、グルタミン酸($C_6H_{13}O_2N$)を検鏡材として選んだ。空間群は $P2_12_12_1$ で原子座標の正負の変換で、同一空間群で右、左結晶となる。それぞれ L-体、D-体と呼ばれ、いずれも人体に取り込まれたとき副作用は無いものの、片方は旨みを持つものの、もう片方は無味であることが知られている。点群 222 のためバイフィット対反射が対称に観察可能な入射方位は $\langle h\bar{k}0\rangle$, $\langle 0kl\rangle$, $\langle h0l\rangle$ で、ここでは $[101]$ を選定した。図5に $[101]$ 入射の実験 CBED 図形およびシミュレーション图形を示す。図5(b), (c) はそれぞれ L-

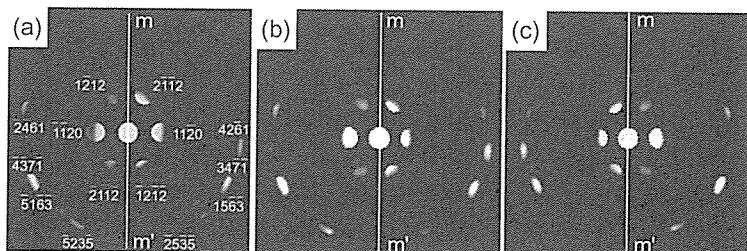


図4 Teの $[2\bar{2}0\bar{3}]$ CBED图形；(a) 実験图形, (b) $P_{3_1}21$, (c) $P_{3_2}21$ を仮定したシミュレーション图形。

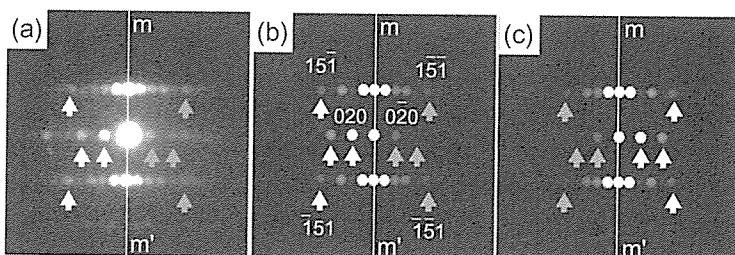


図5 グルタミン酸の $[101]$ CBED图形；(a) 実験图形, (b) L-体, (c) D-体を仮定したシミュレーション图形。

体と D-体を仮定したシミュレーション图形（加速電圧 100 kV, 試料厚さ 30.5 nm）で、いずれでも反射強度は m-m' に対して非対称であり、L-体、D-体が変わると強度の非対称が m-m' に関して反転する。実験图形（図 5 (a)）での強度の非対称は L-体を仮定したシミュレーション图形（図 5 (b)）とよく一致しており、有機結晶でも対掌性の識別が行えた。

本方法は、電子回折法であるためナノ領域で解析を行うことができ、X 線回折で要求されるような格子欠陥などを含まない高品質の単結晶なども必要なく、高密度の格子欠陥を含む多結晶でも実験が行える。また、X 線回折で要求されるような異常分散効果を顕著にさせる重元素を結晶が含む必要もない。また、原理的には結晶学的に許されるすべての鏡像体の対掌性の識別がたった 1 枚の CBED 図形の撮影で可能である。医薬品の生産量でキラル物質が占める割合は近年飛躍的に増大しているが、本方法のこのような特徴は、医薬品の開発過程で大いに利用されるものと期待している。

5. おわりに

「結晶物性工学」という分野名を前任の山口正治先生から引き継いだ形で研究室を運営しています。この分野名は、何年も前の改組の際に山口先生と相談して「結晶塑性学」に代わる名前として考え出したもので、私自身大変愛着もあり、今も研究室の実態を顕著に表していると思います。しかし、時代は新しい材料、方法、発想を

ますます要求しており、基礎研究を大切にしながら、このような要求に果敢に挑戦して行きたいと思います。そして、何年か先には「結晶物性工学」に代わる、その時の研究室の実態を表わす研究分野、分野名を打ち立てられるように奮闘したと思います。

参考文献

- 1) Hahn, T. (ed): in International Tables for Crystallography, Volume A: Space-Group Symmetry 4th revised edition, Kluwer Academic Press, Dordrecht, 1996.
- 2) 長瀬 博, 山本 尚: 創薬 - 薬物分子設計のコツ, エルセビア・サイエンス・ミクス東京, 2001.
- 3) 桜井敏雄: X 線結晶解析の手引き, 裳華房, 東京, 1983.
- 4) Inui, H., Fujii, A., Tanaka, K., Sakamoto, H. and Ishizuka, K.: Acta Cryst., B59, 802-810 (2003).
- 5) Cowley, J.M.: in Diffraction Physics, North-Holland, Amsterdam, 1986.
- 6) Villars, P. and Calvert, L.D.: in Pearson's Handbook of Crystallographic Data for Intermetallic Phases, American Society for Metals, Metals park, OH, 1985.
- 7) Hirsch, P.B., Howie, A., Nicholson, R.B., Pashley, D.W. and Whelan, M.J.: Electron Microscopy of Thin Crystals, Butterworths, London, 1965.
- 8) Sakamoto, H., Fujii, A., Tanaka, K. and Inui, H.: Acta Mater., 53, 41-52 (2005).

談話室

松下幸之助論／「鳴かぬならそれもまたよしホトトギス」

熱田 善男*

The Soul of Kounosuke Matsusita

by Yoshio ATSUTA



銀座駅前大学で「松下幸之助論」を講義する私（熱田／筆者）

日本人は、リーダーの性格を、信長型、秀吉型、家康型に分けて話題にするのが好きだが、松下幸之助は、つぎのように言っている。

3人とも、その行動については、ホトトギスは鳴くという前提に立って言われている。しかし私は、真実を見抜くためには、何事にも前提を置かずに臨んでいる。だから「鳴かぬならそれもまたよしホトトギス」といったところだ、と。

素直な心

何事にも前提を置かずに臨むには、いちばん大切なのは、「素直な心」だと、幸之助は言います。

「素直」という言葉には、「親に素直に従う」「素直に先生の言いつけを守る」といった受け身のイメージが強いのだが、幸之助の言う「素直な心」はそうではない。

習った事を捨てて、経験を捨てて、成功体験も捨てて、すべてから脱却した、「なにものにもとらわれない強い心」なのです。

幸之助はこう言います。

素直な心の初段。聞くところによると、碁を習っている人は、大体1万回くらい碁を打てば初段になれると言うことです。素直な心の場合もそれと同じようなことが言えるのではないかと思います。

まず素直な心になりたいと朝夕心に思い浮かべ、そして絶えず日常の行いにとらわれた態度がなかったか反省する。そういう姿を1年、2年と続けて、1万回、約30年も経つならば、やがては素直の初段の段階に到

*村上研 OB (S34年卒)、新日鉄OB
元・文京学院大学講師

達できるのではないかと思うのです。

素直な心も初段にもなったなら、まず一人前の素直な心と言えるでしょう。だから大体において、過ちなき判断や行動ができるようになってくると思います。

「全く新しいものを生み出すためには〈常識から自分を開放する〉ことが必要で、そのために熱意がいる。多くの知識を身につけた人ほどそれを越える熱意が必要ですな」とも、言います。

学校で習ったことから脱却せよと、呼びかけているのです。高学歴の人には耳の痛い話ですね。でも、幸之助だから説得力がありますね。

脱・金太郎あめ

つぎは、私（熱田）の現役時代の私事です。恐縮ですが、しばらくご笑読ください。

いつの頃か、私の中に、「会社の中の仕事だけやっていてはいけない」という考えが出てきました。新日鉄に在職していた、そうですね、45歳ぐらいの頃のことです。

職場の同僚や、先輩、後輩を見ていても、何かが感じられませんでした。会社の中ではそこそこのポジションをもらって、偉そうにしているが、その人と突っ込んで議論してみると、人を感銘させるような特別な材料がないのです。

「金太郎あめ」と言われるように、どこを切っても誰を切っても同じ、という状態でした。

それは自分自身にも当てはまることになっていたのです。45歳ぐらいになって、専門外のことになると、とたんに理解力が極端に落ちる自分に気がつきました。「これではいけない」と思いました。この頃から「脱・金太郎あめ」という言葉が、私の頭から離れなくなったのです。

50歳を過ぎて、イムカという人材コンサルタント会社に出向しました。仕事は転職のお世話です。転職のお世話というより、企業の求人に合った経験や技術力を持つ人材をスカウトする仕事が主でした。

初めての外の世界、こともあろうにスカウト業界、人間力が試されます。イムカには、学歴に関係なく優秀な人がたくさんおられました。それにひきかえ、新日鉄の人間は、学歴が優秀でも、どんどん頭が固くなっているような気がしました。

そこで「脱・金太郎あめ」を目指して、仲間に呼びかけ、新日鉄の元・副社長の戸田健三さんを中心に始めたのが、「21世紀を考える会」です。平成元年に始めました。私はちょうど56歳でした。

月に1回集まって、人の話を聞いてみようということです、最初、20数人で始めましたが、走り出してみると、

クチコミで来る人も増え、やがて毎月60～70人が集まるようになりました。それだけ日常生活にはあきたらない「脱・金太郎あめ」を望む人が多いということです。

「脱・金太郎あめ」といっても簡単なことではありませんでした。習った知識と身に付いた経験に縛られた物差しでしか物事を見ることができない人間になっていたのです。「これではいけない」と、いったん全部捨てようとした試みたのです。捨てるのに半年～1年ぐらいかかったと記憶しています。しかし、頭の中のプログラムやメモリーが書き込んであるチップを捨てても、チップの跡形がいつまでも残っているような感じで、跡形が消えてしまうのには、さらに1年以上かかり、やっと白紙に戻ったような感じでした。

いったん、「頭のなかを白紙にする」と、それぞれの講師の話のポイントが、どんどん頭の中に入ってきて、分野の違うそれぞれの話の、その底に流れる世の中の共通項が本当に見え始めるのです。

「頭のなかを白紙にする」ことが、幸之助のいう前提を置かないことで、「素直な心」に通じることだと思いました。

注記ですが、私（熱田）はイムカの後、特許庁の外郭団体に移り、これが最後の職場になりました。平成11年、そこを65歳で定年退職、40年間のサラリーマン生活を卒業しました。それを機に、10年間やってきた「21世紀を考える会」は、川鉄出身の後進に譲って、活動から離れました。しかし、その川鉄出身の人が中心になり、平成17年の今でも、活動を続けています。

・ · · · ·

今、世相をみると、混迷の極みと見えますが、政党も、政治家も、官僚も、企業も、経済人も、労働組合も、マスコミも、一般市民も、熟年も、壮年も、青年も、男性も、女性も、過去に身につけた物差しで、物事を測っているのが、原因にあるのではないかと思うのです。

小泉改革も、おおきく見れば、ほんの僅かな進みに過ぎませんでした。

行政改革、政治改革、教育改革、年金改革、医療／介護保険改革、等々、目先の課題は山積ですね。それに中期的な大きいテーマ、例えば、少子社会、高齢社会、環境問題、エネルギー問題。さらには、このままでは21世紀半ばには日本の人口が激減すると言われている超大型テーマも。

近時は、安全保障問題に関して、憲法改正も俎上に上ろうとしてきました。

このように、たくさんの大切なテーマが解決を待っているのですが、「頭のなかを白紙にして」、幸之助流の「素直な心」になって、よりよい解決を模索してほしい

とねがっています。

松下幸之助の話に戻ります

こんなエピソードが残っている。

故・高田好胤師（奈良・薬師寺管長）は、説法にはいるとき、朗々と、

「とらわれない心」

「こだわらない心」

「かたよらない心」

と唱えられたそうである。

松下幸之助は、好胤師と交遊があり、この言葉は知っていました。

あるときに、ある幹部の方が、幸之助に、好胤師のこの言葉と、「素直な心」と、同じかどうか質問しました。

「うん、だいたいええのと違うんか」と返事をもらったそうです。

幸之助は、「素直な心」で、何事にもこだわらずに真実を見ることが出来れば、「融通無碍」境地に立つことが出来て、どんな難問でも解決できるはずだと、それをめざして実践に努めてきました。

融通無碍＝自在

「融通無碍」ユウズウムゲ。今ではほとんど使われない言葉ですね。辞書には、「考えや行動が何事にもとらわれず、自由でのびのびしているさま」とあります。

幸之助は、「障害物があって動かせなくとも、上を乗り越えていくなり、脇へ避けていくなり、方法はいくらでもあるはずだ」という考え方なのです。

私（熱田）には、「邪魔があつてそんなもの眼中にならぬようにスッパリ通り抜ける」魔術のような感じがします。現在語に翻訳すると、「自在」ではないかと、おもいますね。

自在のついた言葉の代表に「自在かぎ」がある。いろいろなどの上につるし、鉄びん・釜などを掛けて好きな位置に上下させるもの。

「自在画」「自在継手」「自在スパン」などが、他に散見される。

あんころ餅の大きいものを「自在餅」と呼ぶ地方もあるそうだ。

ヒンズー教のシヴァ神、三目八臂の万物創造の最高神、この神の日本での異名は「大自在天」だ。

有名なロボット工学の森政弘先生（東工大・名誉教授）は、「自在研究所」をつくり活動をしておられる。千代田区のホテルにある事務所を訪問したことがあるが、18畳ぐらいの洋室に厚手の敷物をしき、中央に大きい円形の座卓を置いて、日本間式に座るように使っておられる。

これには驚いたが、先生は平気な顔で、「椅子とテーブルだと、椅子の数しか座れないが、これだと20人ぐらいい、いや、もっと集まつても平気で座れる」とおっしゃっていた。「自由と自在は違う、自在は、相互に矛盾して儘ならなくなつた要素でも、それを融合して、高次元の解決をはかることだ」と説明をされた。

私（熱田）は、「自由に英語を話す」が、「自在に英語を操る」となると、超凄い語学力だと感じる。

「自由に暮らす」と聞くと、束縛を嫌い、わがままに暮らすという感じだが、「自在に生活する」は、本職をちゃんとこなした上、他に、ボランティア活動をしたり、絵や文筆で活躍したり、専門家が驚くような研究成果をあげたりする「変幻自在」のスーパーマンの印象になる。

たしかに、「自在」は、神通力、万能、超能力、ウルトラパワー。矛盾を解決する超発想。三次元の世界に現れた四次元人間。こんなイメージになる。

幸之助が目指した融通無碍はこれではないでしょうか。

松下幸之助のほんとうの姿

それでは幸之助ご自身は、「鳴かぬなら…ホトトギス」の型では、どんな人だったのだろうか。

第1話

昭和57年、87歳、相談役。奈良の飛鳥保存財団理事長として奈良へ、その帰路奈良に工場のある松下住設株式会社を訪問。現地の幹部が総出で、工場見学と製品説明をする。とても喜んで見学され説明を聞いておられた。そして経理状況の説明に入る。1100億円の売上、赤字90億円、本社からの借入残が500億円。

赤字と聞いて、とたんに「なに！」と顔つきが変わった。「売上が1000億円以上あるのに、90億円の赤字とは何事か。こんな経営が松下の中にあるとは知らなかつた」

その場で本社の幹部に電話をかけ「本社は知っておったのか、500億円は、即刻引き上げよ」

電話をそばで聞いていた松下住設のトップは、幸之助の子飼いの一人、怒ったときの怖さを肌で知っており、本当にその場で、崩れるように倒れてしまった。「こんな大事なときに倒れるとは何事だ」と、ただちに解任、学卒中途入社の常務を責任者に命じる。

本当に本社の貸付は引き上げて幸之助が銀行の支店長に紹介状を書き、銀行に資金を借りる。これが契機で全社一丸となって経営再建に取り組み、結局成功する。

「鳴かぬなら殺してしまえホトトギス」である。

第2話

昭和30年、60歳、社長。幸之助はむめの夫人と2人

で、久留米にある美術館の落成式に出席され、帰路福岡へ。福岡で、ある会社に向して再建を担当していた松下の青年社員に声を掛けて、昼食をとりながら懇談をする。その社員は、33歳、社長夫妻との初めて食事で、緊張のあまり汗が体中から吹き出してきたそうです。

「福岡市内に遊休の工場があるんや。その会社も銀行もみな困っていて、何とか再利用してもらえんかという要望が、松下電器にきているんや。誰に聞いても〈やめた方がいい〉というし、何度も断っているんやが、君どう思うかね」

「私も不賛成です」、材料調達や外注先が不便で、九州で会社をやるのは無理だから、と理由をのべたそうだ。

「そうやろな、その通りや。でもわしはやるで、やることに決めたんや」

そして、地元の期待、過疎化の九州、それに対して松下の考えは、等々、九州進出の意義をコンコンと語り、結局、その社員をその気にさせてしまった。

この青年社員は、九州松下電器株式会社発足時に、幹部要員に抜擢される。

「鳴かぬなら鳴かせてみようホトトギス」である。

第3話

国民を幸福にするには、良い政治が必要だという思いを強く持って、昭和27年、57歳、財界、学会、言論界、の有力者たちに呼びかけて「新政治経済研究会」を発足。57歳～71歳、14年間頑張るが、政治家は派閥抗争に明け暮れて汚職や疑惑があとをたたず、国民の主権者意識もなかなか高まらない状態であった。いうなら挫折して活動を終えた。

そして「政経塾」の構想を発表するが、周りから反対され、一旦断念。しかし胸中で発酵しつづけて、さらに13年間、昭和54年、84歳で、私財70億円を投じて、「松下政経塾」設立。

「鳴かぬなら鳴くまでまとうホトトギス」である。

幸之助の「鳴かぬならそれもまたよしホトトギス」とは、このように、ある時は信長になり人を殺し、ある時は秀吉になり調略に腕をふるい、また、ある時は家康になり潮時まで待ちに待つて兵を上げるのである。

5つの顔

本田宗一郎といえば、なんとなく、タイプがわかる。井深大も、盛田昭夫もしかり。それに対して、松下幸之助は、1つの型で捉えられない、無数の側面をもっているのです。いわば掴みがないのである。

東京オリンピックの年（S39年）米国のライフ誌は日本特集を組んで、その中で、「Meet Mr. Matsusita」と題する記事を掲載。幸之助、69歳のときでした。

幸之助は、①最高の産業人、②日本一大金持ち（所得長者番付第1位）、③思想家、④雑誌発行人、⑤ベストセラー作家と、5つのタイトルを冠せられて、8頁にもわたり紹介されたが、5つも顔をもつなんて人物は、昔から今まで、世界中探しても例がなく、ライフの記者でも、肝心の人物像は、掴め切れないので記事が終わってしまいました。ただ「スゴイ」人物という印象だけでした。

幸之助は、「自在」のスーパーマン、「素直な心」の名人なのでした。

このライフ誌は、何と800万部発行された。

これにより松下の知名度は国際的に一層高まったのでした。

PHP

PHPはPeace and Happiness through Prosperityの略称です。

繁栄によって平和と幸福を実現しようという意味です。

第2次世界大戦に破れた直後の日本は、道義道徳の乱れ、人心の荒廃、平和にはほど遠い状態でした。はじめに働く人ほど損をするといった姿が少なからず見られた。

松下幸之助は、これが人間の姿なのかとう強い疑問を抱き、人間そのものに、また人間社会のあるべき姿に、さまざまに思いめぐらせた。そして「この世に物心一如の繁栄をもたらすことによって、眞の平和と幸福を実現する道を探究しよう」と決心しました。

そこで、このPHPを研究し実践運動を展開する機関として昭和21年11月 PHP研究所を創設し、翌22年4月には、その機関誌として月刊「PHP」を創刊、同誌に研究成果の発表を開始します。翌昭和23年から、中之島図書館（大阪市）で月例の研究講座を開催して発言を始めます。このように、いろいろ、積極的な活動を展開します。

公職追放解除

大戦後、公職追放処分を受けていた幸之助ですが、昭和25年にそれも解けて松下電器の経営に携わることが出来るようになったので、経営再建に専念するため、月刊「PHP」の発行だけにして、PHPの他の諸活動は中止しました。

松下の経営再建にはげみ、経営の基礎をつくりました。そして昭和36年66歳で会長に就任、経営の現場から離れる。そして、活動の軸足を社会活動に移します。

PHPの研究は、社会活動の重点課題の一つでした。

昭和25年から昭和36年まで中断していたのですから、11年間のブランクでしたが、さっそく再開します。

根源思想

今は、PHP研究所の本部は、東京は皇居のお濠ばたに近い三番町に、京都はJR京都駅八条口（新幹線口）の通りを隔てた直ぐ向かいにある。いつだったか、京都のPHPを訪問しました。きれいな7階建てのビルです。ビルの中の1隅に「根源の社」というのがありました。伊勢神宮に模した白木づくりの小社です。ご神体がわりに「根源」の字が、白木の板に幸之助の筆で書かれて、収められているということでした。

幸之助の考えの大本に「根源」という思想があるのです。

……………

PHP研究の再開は、「真々庵」を拠点にしました。「真々庵」は入手したばかりの別邸。京都、東山山麓南禅寺そば、敷地面積5000m²、数寄屋造りの建物と日本庭園、明治時代の名庭師・小川治兵衛の作。ある住友財閥の方から譲られたといわれています。

真々庵の名称は、「真実真理」を探究する道場の意ですが、環境がシンシンと静かであることにもかけている。勿論命名は幸之助です。

再開の次の年には庭園の一隅に「根源の社」を設けました。

宇宙根源の力は、万物を存在せしめ、それらが生成発展する源泉となるものであります。

その後、昭和42年に、PHP研究所が、真々庵から京都駅前に移転したときも、ビル内に根源の社が置かれました。

この京都のPHP研究所は、その後建て替えられたので、私が訪問したのは、新装なって程ない頃、平成14年でした。

……………

幸之助は、つぎのように言います。

宇宙根源の力は、自然の理法として、私どもお互いの体内に脈々として働き、一木一草のなかにまで、生き生きとみちあふれています。私どもは、この偉大な根源の力が宇宙に存在し、それが自然の理法を通じて、万物に生成発展の働きをしていることを会得し、これに深い感謝と祈念のまことをささげなければなりません。

その会得と感謝のために、ここに根源の社を設立し、素直な祈念のなかから、人間としての正しい自覚を持ち、それぞれのなすべき道を、力強く歩むことを誓いたいと思います。

幸之助は真々庵に来たときは、必ずこの根源の社の前に座って手を合わせ、祈りを捧げてからその日の日課に

かかっていました。

PHP研究にあたっては、素直な心になって宇宙根源の力を発見することを基本にしていました。

これを、新日鉄のOBとして、鉄にちなんで解釈すると、「同じ鉄鉱石からつくっても、自動車ボディにプレスで加工できるやわらかい鉄から、鉄道のレールのように固くて磨耗しにくいものまで、多種類の鉄をつくりわけることができますが、それは鉄が持つ宇宙根源の力で、人間はそれを引き出しているだけ」ということです。

幸之助にとっての真々庵

幸之助は、若い所員とともに、真々庵で、PHPの研究を重ねたのである。テーマは、宇宙、自然、人間から、政治、経済、文化と、さまざまな分野に及んでいました。

真々庵の庭園の木々の配植や剪定にも、幸之助は情熱を傾けました。個を生かしながら全体も繁榮させる幸之助の経営観が投影されています。

草も木も、土も岩も、大自然の万物は日に新たに変化し、一瞬たりとも止まってはいない。生成発展が自然の理法であり、人間もまた日々新たでなければならない。幸之助にとって、宇宙根源の理法を実感できるのが、真々庵の庭ではなかったのでしょうか。

付記ですが、「根源の社」は、昭和56年門真の本社につくられた創業の森の一隅にも設けられました。

あとがき

私（熱田）が、新日鉄で現役をしているときに、仕事の悩みや人間関係の悩みなどで行き詰ったときに、松下幸之助の著作を、思考と行動の鑑として読み始めました。それがきっかけになって、クセになってしまったのですね。私の松下幸之助研究は、もう30年は経っています。

最初に、講演で松下幸之助を語ったのは、サラリーマン卒業のころでした。あるご縁があつたのですが、たいへん好評をいただきました。それ以来、あちらこちらから、声をかけていただくようになりました。

65歳から72歳の今までの実績としては、足利市商工会議所、日本橋俱楽部、化粧品原料協会、東京管理職ユニオン、文京学院大学、京都工芸繊維大学、千葉市成人大学、八千代市ふれあい大学、銀座駅前大学、八千代台駅前大学、八千代わいわいテレビ（地域のCATV）、八千代市ロータリークラブ、日産火災、龍士クラブ（東京）、横浜栄樂クラブ、FP有志の会（東京）、レストラン貝殻亭（八千代市）、などでの講演や講義です。延べでは100回ちかく、多いときは年間20回ぐらいしました。

テーマとしては、「松下幸之助に学ぶ／その金錢哲学」、

「松下幸之助に学ぶ／不況対策」、「松下幸之助の宗教観」、「松下幸之助／生涯5度生きた人」、「永遠の青年／松下幸之助」、「強運の人／松下幸之助」、「松下政経塾設立のはなし」、「松下幸之助の女性観」、「松下幸之助の虚像と実像」、「著述家／松下幸之助の秘密」、など20ぐらい用意して、幸之助の思考と行動を、いろいろの側面から語ってきました。

本報告は、あらためて、幸之助がもつ無数の側面から、その内側を透視して、核心(soul)というか、掴み所をはっきりさせたものです。

「今まで一生懸命やったつもりやが、もういちど勉強しなおして、世の中の役に立ちたいんや、そのために後40年、130歳まで生きたいんや」と。

これは、幸之助が90歳になっときに言った言葉です。このようなことが言えたのは、素直な心の名人としか言いようがないですね。

これで、この報文は終わりです。

追記

終ったのですが、それでは、松下幸之助の核心は、少しのクモリもない、微細なキズ一つない、まったく最高品位のダイアモンドということになりまが、なんとなく違和感が残りますね。

本当に、少しのクモリもないダイアだったんだろうか。微細なキズ一つないものだったんだろうか。そんなダイアモンドが本当に自然界に存在するのだろうか。

私の知人、裕宗夫氏は、元毎日新聞の記者で、いまは評論家。松下幸之助には何度も会っており、幸之助の関する著書もあるが、次のように書いています。「幸之助直営の出版社・PHP研究所によるおびただしい〈幸之助ブック〉に彼の考え方や教えが満載されていて、幸之助とは何か——について既に随分と広く世間に知られているはずである。しかし、それでもなお透明度100%には程遠い。〈幸之助が歴史的大人物なら、それにふさわしく、率直な、巾広い情報を世の中に届けないといけないかな〉と私はかねがね思っていた」「生前の幸之助情報は、ある種のコントロールと算盤の上で踊らされていた後遺症が尾を引いているからなのか、幸之助は誰か、どんな人なのか——と突き詰めて研究していくと、光の当たった箇所だけが常に世間に向き合う仕掛けになっていて、光が当たっていないところは余計見えにくくなっていた」

作家・藤本義一さんが、PHP研究所発行の季刊誌「松下幸之助の研究」平成13年1月号に、次のようなことを書いておられます。

昭和40年頃に、読売テレビで「バイオニア対談」という番組があり、私が聞き手になって関西財界の人たち

と1対1で30分間にわたって好きな質問をし、それに対えていただくという内容だった。この中の1人が松下幸之助氏だったのだ。生番組だった記憶がある。

この番組で、私は松下氏を激怒させてしまった。他意はない。次の2項目に触れたのだ。

1項目は、冷蔵庫やテレビの内蔵されたメカの部分はなにも変わらないのに、何故デザインだけ変えるのかということを口にした。途端に、表情が変わり、私の頭(角刈り)を指して、「君の頭はなんだ。そんな髪かたちの社員はわが社では絶対に採用せんぞ」と語気を荒らげられた。わが家の冷蔵庫もテレビもナショナル製品であり、その冷蔵庫の横のテレビが新製品のデザインだけ変わった冷蔵庫のCMを流すのが腑に落ちなかつたからといったわけで、この凄まじい怒りがわからなかつた。

「私はナショナル社員になるつもりはないですよ。大体、日本の雇用制度はマヤカシです」といったことを返し、松下氏の怒りはますます激しくなった。

第2項目は、さらに松下氏を激怒させた。「戦前、戦中は軍需のための製品を生産なさったのではないですか」

戦後20年は経っている。「ま、時代の流れだから、どの会社も…」、という答えが返ってくるものだと思っていたが、この質問が怒りをさらに増した。

「き、君！、そんな質問は無礼きわまるぞ」、あのヒステリックな声と表情は忘れない。

そして、私は仕事を失った。なんらかの圧力が局側にかかるとしか思えない。この時、松下幸之助氏は非情な人だと思った。冷酷無情な一面をもった戦後経営者だと思った。

といって別に恨みを抱いたわけではない。私は私の思っていることをいっただけである。

ただ、戦前、戦中の部分をなにか隠そうという人が「経営の神様」という称号で存在するのが奇妙な気がした。

藤本義一は、上の事件から30年後、僅か4百字詰原稿用紙5枚のこの依頼のために、大量の松下幸之助語録を読んだそうである。そして、それらは「経営の神様」という表層的な記録であり、事実は記述してあっても、眞実からは遠ざかっている偉人伝であること気づくのである。

そして「経営という生々しい現実を描くなら、主人公をもっと裸にして、その人間臭の苦悩とか、内に秘められた人間関係を描かなくてはならないのである」そして「このいくつかの空白を埋める作業をしなければ、眞の松下幸之助の研究にはならないような気がする…」と言うのである。

清水一行著「松下イズム／ナショナル商法の秘密」のあとがきに、つぎの記述がみられる。「企業物語りが、まだまだ多く読まれている。そういう中で、本來、その種のもののトップに取り上げて然るべき松下が、いぜんとして商法もの出版の圈外に置かれているというのは、これは一体どういうわけだろうか。このことに、私は極めて不自然で、淫靡な力のニオイを、工作を感じるのである」「或いは松下商法の仕組んだ、狡知で迂遠な、絶対的な権威を犯させまいとする、松下の防壁であったとしたならば……」「松下イズムを理解するには、松下の数多い製品を買わされる1消費者の立場で、実はこのくらいの被害者意識をもってからなければならないこと……なのかも知れないのである」

しかし、身内からは幸之助批判はほとんど聞けません。

次は素直な心の初段についてのエピソードです。人から、「30年たって、もう素直な心の初段になられましたか」と尋ねられ、「いや、なりかけると、癖に障ることが出てきて、後ろへ引き戻される」と笑って答えています。

これは、松下電器産業に入社した年に、PHPに配転になり、幸之助が70歳から亡くなるまで25年間、身近で仕事をした、谷口全平氏が書いた「松下幸之助の遺した言葉」にあるのですが、暴露記事とは程違い、かえって、ほほえましく、幸之助の気さくな人柄を示すお話ですね。

身内から出るのはせいぜいこのようなものなのです。虚像と実像は、誰にでもある。幸之助も例外ではないはずです。幸之助の隠された実像に迫ることを、これからの、私(熱田)の松下幸之助研究の課題にするつもりです。

平成17年7月末日、原稿完成。

ご意見やご感想をいただければうれしいです。よろしくおねがいします。

連絡先：熱田善男／メール：BQZ12305@nifty.com
〒276-0032 八千代市八千代台東6-18-4
電話（携帯）090-8744-0890
FAX（専用）047-482-9222

参考文献

- PHPのことば・松下幸之助著 (PHP)
- 私の行き方／考え方・松下幸之助著 (PHP)
- 私の履歴書・松下幸之助著 (PHP)
- 決断の経営・松下幸之助著 (PHP)
- 指導者の条件・松下幸之助著 (PHP)
- 人生談義・松下幸之助著 (PHP)
- 人間を考える・松下幸之助著 (PHP)
- 君に志はあるか（松下政経塾塾長問答集）… (PHP)
- 松翁論語・松下幸之助述・江口克彦記 (PHP)
- 難儀もまた楽し・松下むめの（幸之助夫人）著 (PHP)
- 人生問答（上中下）・松下幸之助／池田大作 (聖教新聞社)
- こけたら立ちなはれ・後藤清一著 (PHP)
- 二人の師匠・平田雅彦著 (東洋経済)
- 上司の哲学・江口克彦著 (PHP)
- 【松下幸之助】運をひらく言葉・谷口全平著 (PHP)
- 松下イズム／ナショナル商法の秘密・清水一行著 (徳間書店)
- 小説・松下王国（上下）・邦光史郎著 (集英社)
- 小説・不況もまた良し・津本陽著 (幻冬社)
- 「経営の神様」松下幸之助伝・秋元秀雄著 (二見書房)
- 悲しい目をした男「松下幸之助」・稻宗夫著 (講談社)
- キーワードで読む／松下幸之助ハンドブック (PHP)
- 松下幸之助「一日一話」 (PHP)
- 松下幸之助発言集（ベストセレクション）第1～10巻 (PHP)
- 本田宗一郎語録 (小学館)
- 井深大語録 (小学館)
- 盛田昭夫語録 (小学館)

以上、参考文献の主なものを挙げました。

研究速報

工学研究科 社会基盤工学専攻

地殻工学講座 ジオフィジクス分野

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

以下に平成16年度の主な研究タイトルと内容を示す。

個別要素法による真三軸圧縮試験

従来、地殻を構成する物質の性質を知るために様々な種類の岩石試験が行われてきた。本研究は岩石供試体に異なる三種類の応力を与えて破壊する真三軸圧縮試験に注目したものである。本研究では従来行われている室内試験を数値シミュレーション手法の一種である個別要素法を用いて再現することを試みた。その際、入力とするパラメーターを周圧一定の三軸圧縮試験から求め、そのパラメーターを用いて真三軸圧縮試験を行った結果が岩石の物性値として適切な範囲にあることを確かめた。また、実際に砂岩を用いて行われた室内試験結果と比較することで、シミュレーション結果は定性的に室内試験結果と一致することが確認できた。

列車走行による地盤振動解析に関する研究

列車が走行するときに発生する地盤振動を抑制する対策工事のための解析を行った。並列コンピュータを用いて3次元振動シミュレーションを行った。このシミュレーションを用いて振動の発生源についての解析を行った。現場での計測を行い、振動にドップラー効果などの特有の振動がみられ、数値シミュレーションとの整合性が確認された。

表面波探査に関する研究

表面波探査において、高次モード解析を行った。インバージョン手法には、フォーキング遺伝子的アルゴリズムを用い、最小二乗法との比較検討を行った。いくつかの数値シミュレーションと現場データへの適用を行い、本手法を用いることによつて、複雑な地下の構造を推定することが可能であることがわかった。

海洋 MT 法データの 2 次元インバージョン解析

南海トラフ熊野灘地域および三陸沖地震発生帯において短周期型 OBEM を 9 台用いた海洋 MT 法調査を実施した。得られた海洋 MT 法データには、電場成分、磁場成分共に広範囲にわたりノイズの混入がみられた、そこで、ノイズの除去、リサンプリング処理の後、解析をおこなった。解析の結果、各測点ごとにコヒーレンシー、見掛比抵抗、位相などの MT パラメータが算出された。MT パラメータを入力データとして ABIC 最小化法を用いた最適平滑化法の 2 次元インバージョンをおこなった結果、2 次元の比抵抗構造断面を得た。これらの結果よりプレート沈み込み帶で頻繁に発生する地震の要因の一つと考えられる水の挙動について考察した。

P, S 分離波を用いた Kirchhoff 型重合前深度マイグレーション

反射法地震探査の鉛直方向と水平方向の受振記録から

P 波成分と S 波成分を分離する分離フィルタの作成を行った。また、走時計算に Fast Marching Method という手法を導入することで、PS 波や SP 波にも対応した Kirchhoff 型重合前深度マイグレーションの作成を行った。

浅層反射法地震探査を用いた 3 次元モデリングとイメージングに関する研究

コンクリート構造物を含む浅層領域内における 3 次元での弾性波シミュレーション、また得られたモデリング記録に対して行ったイメージング手法の適応性を確認した。数値シミュレーションには有限差分法を用い、合成地震探査記録を得、キルヒホフ型重合前マイグレーション処理を施して 3 次元イメージングを行った。この結果より、適切な計測配置や分解の検討を行った。

変位不連続理論による不連続面の定量解析

岩盤中の不連続面は力学的には構造的弱面として効果を示し、岩盤自体の強度を決定している為、その性質を知ることは非常に重要である。本研究では変位不連続理論を用い不連続面をモデル化し、媒質は粒状体で近似し個別要素法を用いる方法で、簡単に亀裂を含む波動シミュレーションを実現した。その結果、変位不連続理論を用いて粒状体モデルで不連続面を定量的に表現することができた。また、不連続面に弾性波による応力が伝わる際、圧縮・引張力をそれぞれ簡単に扱えるシミュレーション結果も理論値とよく一致した。

海底変動による津波発生時に生ずる疎密波内部伝播の二次元シミュレーション

本研究では震源に注目し、海底の大規模な隆起に伴って生ずる津波および海中内部を伝播する疎密波を 2 次元での数値シミュレーションを行うことにより確認し、水面の上昇時間と海底の変動量の関係を調べて将来 GPS 津波計を使った予報等への基礎的な研究を行った。

波線理論と有限差分法を用いた弹性波動のハイブリッドシミュレーション

シミュレーションの効率化のため、不要な海水部分の差分計算を省いた、波線理論と有限差分法によるハイブリッドシミュレーションを開発した。通常の有限差分法による結果との比較により、海底面下でほぼ同じ波形を取得できていることがわかり、ハイブリッドシミュレーションによる計算効率についても検討した。

音響領域周波数を用いた坑井内弹性波探査によるフラクチャ解析

坑井内弹性波探査とは単坑井内に音響領域周波数の弹性波を発生する震源と受振器を装着した検層機を挿入し坑井周辺の弹性波探査を行うことをいう。この探査法は地上からの弹性波探査や通常の検層だけでは把握できなかったフラクチャの位置や形状の把握を可能にすると考えられる。本研究では坑井内弹性波探査においてフラクチャのイメージングをどのように行うのか、またイメージング結果からフラクチャについてどれほどの情報が得られるのかについて検討した。

教 授 芦田 謙
助 教 授 菅野 強
講 師 三ヶ田 均
助 手 真田 佳典

工学研究科 社会基盤工学専攻

地殻工学講座
地質工学分野

超臨界 CO₂ にさらされた貯留層周辺物質の変化に関する実験

CO₂ を地中貯留する際には、長期間地表面へ漏洩しないことが保証されなければならない。そこで、貯留層周辺の物質が超臨界状態である CO₂ と接触することにより、どのような変化を起こすのか実験を行った。セメントおよび泥岩試料を CO₂ を圧入下、60°C, 10 MPa の状態で圧力容器内に保存し、1ヶ月おきに観察した。観察は表面観察と薄片観察を行った。泥岩試料には顕著な変化は認められなかったが、セメント試料は孔隙内に結晶の析出が確認された。特に G セメントではマトリクス部の溶解が確認され、超臨界 CO₂ に対して脆弱であり、ケーシングセメントとして不適であると考えられる。

地中雜音を利用した地下構造のイメージング

地中雜音（車両通行、微小地震、AE など）を震源として利用する手法が注目されており、研究を進めている。地中震源による地表観測透過波記録から、地表震源により通常取得される反射波記録を合成可能か、二次元数値シミュレーションにより検討した。その結果、震源を地中広範囲に多数配置した場合には同等な反射波記録を合成できた。これに対し、震源を地中にひとつ配置し作成した合成記録は、反射波記録とは様相が異なった。しかし、マイグレーション処理により、通常の反射波記録と同等の地下構造がイメージングされた。以上より、地中雜音の震源位置が広域に存在しない場合でも、透過波記録から地下構造をイメージング可能であることが示された。

格子ボルツマン法による二相流シミュレーションの研究

地下における非混和性多相流体の流れを解析する手法として、格子ボルツマン法を用いた2相流解析シミュレーションを構築している。本年度は格子ボルツマン法を2相流に拡張し、3次元非混和性2相流の流体挙動解析を行った。この時、流体の非混和性を特徴付けるパラメータとして、新たに液液相互作用係数 g を決定する必要がある。バブル形成シミュレーションを行い、バブル境界の安定条件を満たす適当な g の値として 0.05 を導出し、格子ボルツマン法による2相流解析シミュレーションの構築に向けて前進した。

付加体形成過程のモデル実験

主要な貯留構造であるスラスト帶の地質構造は、これまで構造の横断方向に作成した二次元断面形態で解析されてきたが、一般に複雑な三次元形態を有することが認

識されつつある。三次元形態の形成原因として、圧縮方向がスラスト構造の方向と直交しておらず、小規模な横ずれ変形が短縮変形に重畠している可能性がある。そこで、斜め圧縮を念頭においた三次元スラスト構造を再現し、その断層活動メカニズムを解明するアナログモデル実験を行った。構造表面の速度分布解析から横ずれ成分を検出し、斜め圧縮によるスラストの三次元構造化モデルの妥当性を評価した。

個別要素法を用いた付加体形成のシミュレーション解析

メタンハイドレートの生成領域および生成量を推定には、炭化水素の移動経路とハイドレート領域の発達過程の解析が求められる。アナログモデルによる付加体発達の再現実験の結果を踏まえ、本研究では個別要素法を用いて南海トラフ付加体を再現し、断層の発達過程と付加体内部運動の関係を解析した。要素の速度ベクトルから断層の停止および再活動を確認し、様々な形態の断層活動を視覚化するに至った。また、接觸力の解析から、一部の断層間領域ではユニットを形成し圧縮作用が生じない現象が認められた。この結果は、ユニット内部流体は定常流であり、付加体における流体移動は断層沿いの間欠的な流動と、粒子間孔隙による定常流の組み合わせであるモデルを支持している。付加体内メタンハイドレート分布は、断層沿いおよびその周辺粒子間孔隙が有望であると考えられる。

不均質媒質を用いたメタンハイドレート層のモデル化に関する研究

ハイドレートは大きな弾性波速度を有し、音波検層データに表れる速度変化はランダム分布している。地震探査データにおいては、震源の周波数帯域の相違による BSR 出現様相の変化や、ハイドレートの濃集との関連性が予測されているプランギング現象、さらに坑井間地震探査における著しい減衰などが知られている。本研究では検層データを元に、ランダムな不均質媒質によるハイドレート層のモデル化を試みた。ハイドレート層の自己相關関数は von Karman 型とし、確率密度分布として 2 箇所に極大点を持つ bimodal 分布を適用した。この bimodal 分布は 2 つの正規分布の重ね合わせとして表現され、極大点はそれぞれ、ハイドレートが高濃集している高速度部と、ハイドレートがほとんどない低速度部に対応している。作成したモデルに対し弾性波シミュレーションを行い、合成検層記録と実記録の比較により、不均質モデル作成法を提案し妥当性を評価した。弾性波シミュレーションによる合成地震記録は、反射法地震探査における BSR の震源周波数依存性および坑井間地震探査における地震波減衰が、散乱を原因とする可能性を示唆した。

教授 松岡 俊文

助教授 山田 泰広

助手 尾西 恭亮

工学研究科 社会基盤工学専攻

地殻工学講座
地殻開発工学分野

システムロックboltの支保効果に関する研究

ロックboltの支保効果は隣接するロックbolt間の相互作用を考慮に入れたシステムロックboltとして評価されるべきものである。これまでの解析から、全面接着型のロックboltの場合、複数本のロックboltの相互作用により空洞周辺に圧縮応力帯が形成され、それが支保効果として現れることがわかった。そこで、空洞周辺の応力状態からロックbolt間の中央線に沿って破壊接近度を算出し、塑性領域内におけるロックbolt打設前の破壊接近度の積分値 S_0 とロックbolt打設後の破壊接近度の積分値 S_1 との比、 S_1/S_0 によってシステムロックboltの支保効果を定量的に評価することを試みた。この結果、ロックboltの打設間隔が狭くなれば支保効果が増すこと、ロックbolt長が長くなれば支保効果が増すこと、地山強度が小さくなれば支保効果が増すことなど、システムロックboltの支保効果を定量的に評価することができた。また、鉄道トンネル、道路トンネルで一般に用いられている標準支保パターンに対してここで提案した指標 S_1/S_0 の値を求めた。その結果、 $S_1/S_0 = 0.94 \sim 0.99$ となり、一般的にはこの範囲の値で支保設計がなされていることがわかった。

数値多孔質モデルの構築とその評価・応用に関する研究

原油・天然ガスの効率的な開発とその地中貯蔵、ならびに温室効果ガスの地中隔離は、エネルギー資源の確保と環境保全という点で重要な技術課題となっている。これらの課題においては、岩盤内における間隙流体の流動挙動を精度よく評価する必要がある。このためには、岩盤の間隙内での流体の流動挙動を正しく理解し、浸透率および相対浸透率を正しく評価することが重要である。近年、計算機の計算能力が飛躍的に進歩し、格子ボルツマン法 (Lattice Boltzmann Method, 以下 LBM) など流体流動問題に対する新たな数値シミュレーション手法が開発されていることから、対象とする岩盤の間隙構造に基づく適切な数値多孔質モデルを用いて間隙流体の流動挙動をシミュレートすることでそれらを評価することが可能となってきている。そこで、砂岩のような比較的均質な多孔質岩石の数値多孔質モデルの構築法として妥当性が確認されている二点相関法を用いて構築したペレア砂岩の数値多孔質モデルおよび同じペレア砂岩のマイクロ CT 画像を 2 値化した画像を重ね合わせて構

築した数値多孔質モデルに対して LBM を用いた流体流動シミュレーションを行いその浸透率を評価した。また、これらの浸透率の評価結果を同じペレア砂岩に対する浸透率の実測値と比較し、その妥当性を検討した。その結果、数値多孔質モデルと LBM を用いて評価した浸透率は、ばらつきが見られるものの、間隙率を考慮すると実測値を通過する Kozeny-Carman の式を表す曲線に近い値を示しており、この方法による浸透率評価が有効であることが確認された。

炭酸ガスの地層貯蔵に関する研究

炭酸ガスを帯水層に圧入して固定する方法は、現在最も有望な固定法と考えられている。この方法では帯水層の帽岩は、長年超臨界炭酸ガス及び飽和炭酸水にさらされることになるため、これらの流体に対して力学的にも水理学的にも安定していることが必要である。また、炭酸ガス圧入井のケーシングパイプの固定に用いられるケーシングセメントについても、炭酸水と反応して劣化し漏洩の原因となることが予想される。このため、帯水層固定を安全かつ確実に行うためには、このような地層バリアの安全性を正しく評価することが重要である。そこで、帽岩試料として野外露頭において採取した泥岩を、ケーシングセメント試料として一般の石油坑井で用いられているクラス G セメントと EOR の炭酸ガス圧入井用に開発された炭酸ガス対策セメントを供試体として超臨界炭酸ガスに一定期間曝すバッチ試験を行い、それぞれの供試体に対して表面観察、薄片観察、浸透率測定、強度測定、化学分析を行うことにより超臨界炭酸ガスがこれらの供試体に与える物理的・化学的影響について検討を行った。その結果、試験 1 ヶ月後のセメント供試体では、両供試体ともに表面と内部の空隙にカルサイトの析出がみられ、特にクラス G セメントでは表面が赤茶色に変色し強度も低下した。これに対して炭酸ガス対策セメントでは表面の色に変化はほとんど見られず、浸透率がわずかに低下し強度が増加した。一方、泥岩供試体には炭酸ガスの影響がほとんど見られなかった。これらの結果から、ケーシングセメントには炭酸ガス対策用のセメントが望ましいこと、泥岩は超臨界炭酸ガスに曝されても帽岩としての機能を維持することがわかった。次に、ケーシングセメントの劣化が炭酸ガスの漏洩量に及ぼす影響をシミュレーションにより検討した。その結果、帽岩部分を覆うセメントの 60% が劣化する場合、劣化が全く無い場合に比べて、炭酸ガスが地表に到達する時間が約 35% 短くなること、地表からの漏洩量が 150 年間で 7.5 倍になることが分かった。

教授 斎藤 敏明

助教授 村田 澄彦

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

トンネルの覆工設計および変状対策工設計に関する研究

トンネル覆工変状に対して適切な対策工を設計しその評価を行うためには、地山の経時的な変形挙動を評価してトンネル覆工に作用する荷重の変動を考慮する必要がある。そこで、地山の塑性化により覆工に変状を生じている7つのトンネルに対し、地山の強度劣化モデルを適用して覆工変状の時間依存性を考慮した解析を行った。解析では、トンネル内空変位のヒストリーマッチングにより強度劣化モデルに与えるパラメータの値を決定し、それによりロックボルト工、裏込注入工、ストラット工といった変状対策工の評価を行った。その結果、それぞれのトンネルに対して、内空変位を指標とした実務にも適用できる対策工の評価を行い、適切な対策工を示すことができた。

レーザー超音波法による面状領域の非破壊検査

構造物壁面の剥離や亀裂などの劣化を検査するにおいては、大きな面状領域を短時間に一括して検査できるような手法の開発が望まれている。このような広域一括検査への展開を視座に、当研究室では、レーザー超音波法を用いる手法について基礎的な検討を行っている。提案している検査手法は、強力パルスレーザー光による対象物へのスポット的な超音波の励起と、レーザードップラー振動計による対象表面の波動変位の直接計測を組み合わせたものであって、完全な非接触性と波動励起・検出点のスキヤニングが容易であることを特徴とするものである。本年度は、層状構造を持つ平面材に対して、スポットレーザー光によって励起した波動伝播の様相を精密に計測し、その表面波の速度分散特性から、各層の材料物性を同定する手法の適用性について検討を行った。

ゴンドラリフトの停車区間での搬器の動揺と最適減速計画

単線自動循環式普通索道（ゴンドラリフト）では、その降車区間において、ローラーを連続的に配置した多段減速機構が採用されている。各ローラーは順に遅くなる速度で駆動されており、それを搬器吊下げ機構の上部に押付けることで、支曳索から離れて惰性的に走行する搬器を、強制的に減速させるようになっている。減速区間全体として30~40個のローラーがあり、全体として運行速度5m/sからほぼゼロの速度まで減速するようになっている。各ローラーの回転速度は前段との整数ギア比（減速比）によって設定されるが、そこで問題となる

のは、定められた個数でのゼロまでの減速を制約条件としながら、各段の減速ギア比をどのように選択するのがよいかということである。それらは、安全性の観点から搬器の揺れ幅が小さく、さらに乗り心地の観点から搬器内の水平加速度の変動が小さくように選択されねばならない。本研究では、この制約条件付き最適化問題に対して遺伝アルゴリズムの適用を提案し、減速機構の設計に一定の指針を与えた。

吊橋ハンガーロープ端末部への全磁束型劣化検査法の適用

当研究室では、本四架橋などの大型吊橋のハンガーロープに対して、その腐食劣化を非破壊的に評価できる検査法の開発に取り組んでいる。これまでにハンガーロープの通常部分については、全磁束法と名付けている検査手法の開発が完了し、実用的かつ定量的な計測技術との認知をうけて、すでに実検査に利用されている。本年度は、全磁束法での検査が難しいと考えられていた端末固定部近傍まで、その適用範囲を広げることに関して基本的な検討を行った。端末部近傍では周囲の鋼材の存在によってロープに十分な磁化を与えられないことが定量的評価における最大の難点となっていたが、固定部裏側の端末ソケット部に補助コイルを配置することで磁化不足を補うことが可能であり、それによって端末固定部の直近まで、全磁束法による腐食断面減少の評価が可能であることが、磁場解析と縮小モデルに対する実験的な検討によって明らかにされた。

構造・設備劣化の非破壊評価のための知的データ融合技術に関する研究

当研究室では、複数種の非破壊計測・評価技術の利用を前提とした、検査データの融合アルゴリズムおよび解釈技術の開発について研究している。データを融合する段階としては、情報表現の異なる三つのレベル（信号レベル、特徴レベルおよび判断レベル）を考えられるが、従来の研究は、ほとんど信号レベルにおける融合に留まっていた。本研究では、これを特徴レベルや判断レベルにまで広げた新しい融合法を開発することを目的としており、その鍵となる技術として、多重解像度解析（MRA）理論と人工ニューラル・ネット（ANN）技術の組み合わせを提案している。MRAが異なる解像度レベルから顕著な特徴を分離抽出できるという信号・特徴レベルの処理手段となる一方で、ANNが知的な結果解釈を引き出すための特徴・判断レベルの処理を提供すると考えられ、これら2つの基本技術の有機的な結合によって、より効率的で正確な融合結果の導出が期待される。

教授 朝倉俊弘
助教授 塚田和彦
助手 李令琦

工学研究科 都市環境工学専攻

地殻環境工学講座

堆積軟岩における掘削影響領域の評価と AE挙動に関する研究

将来建設が予定されている高レベル放射性廃棄物(HLW)地層処分施設の設計・施工にあたっては、空洞の力学的安定性に加え、厳格な遮蔽性の確保が求められており、そのためには空洞周辺に形成される掘削影響領域(EDZ)を高精度に評価する必要がある。そこでこれまでに、高地圧下において岩盤の応力変化や亀裂の発生・進展を鋭敏に検知できるAE計測と個別剛体要素法(DEM)による予測解析を併用した、応力評価に基づくEDZの予測・評価システムを提案し、結晶質岩においてその有効性を確認した。本研究においては、一般にAE計測が困難とされている堆積軟岩への本システムの適用性を検証することを目的として、岩石レベルでの基礎的検討を行った。堆積軟岩の供試体に対して高剛性三軸圧縮試験を実施し、その際に発生したAEのパラメータを分析するとともに、DEMによるシミュレーションを行うことでAEと応力変化および破壊現象の関連性を検討した。

高圧ガス貯蔵岩盤タンクの水封メカニズムの 解明に関する研究

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实际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。

そこで、タンクの水封機能を評価するための解析手法・設計フローの提案を行なうために、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用い、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た。

多次元尺度構成法を用いた岩盤の水理特性 評価法に関する研究

高レベル放射性廃棄物地層処分施設においては空洞の貯蔵施設としての機能を確保・維持するために、坑道周辺岩盤の掘削影響領域の水理特性をグラウチングなどによる止水処理によって向上させることが必要であり、確実かつ効果的なフラクチャーシーリング技術が求められている。

確実かつ効果的に止水処理を行うためには、坑道周辺岩盤の水理特性に大きく影響する水みちの検知が必要不

可欠となる。特に坑道周辺岩盤の水理学的な評価には、岩盤の巨視的な3次元透水異方性を評価することができるクロスホール透水試験が有効とされている。

現在までにクロスホール透水試験結果から孔間の水理特性の空間分布を推定するいくつかの逆解析手法が提案されているが、一般に初期モデルに対する依存性が大きくなり現実の流れと類似した初期モデルを用いない場合には、妥当な再構成結果を得ることが保証されないという問題点をもっている。また、格子ベースの方法では、水みちの形状に関わりなく格子が設定されるため、格子パターンに適合しないような水みちを経由する地下水の解析には不向きである。

これらの問題点を踏まえ、本研究においては、クロスホール透水試験結果から、多次元尺度構成法と空間補間法を利用して、不均質な岩盤の2次元および3次元水理地質モデルを合理的に構築する方法を提案した。また、その妥当性を数値実験によって検証するとともに実用性を現場実験によって検証した。

動的注入工法によるフラクチャーシーリングに 関する理論的研究

これまでに本研究では、低透水性岩盤に対するシーリング技術として、定常圧に振動圧を付加し、セメントに水を混入したグラウトと呼ばれる注入材を岩盤亀裂に注入・シーリングする動的注入工法を提案してきた。この工法においては、振動圧を与えることにより、グラウトの流动性の向上、及び目詰まりの抑制が期待され、現在までに原位置試験や室内実験より、その有効性が確認されている。

しかしながら、グラウトの注入メカニズムについては十分には解明されていない部分が多く、実際の設計、施工に際しては多くの実績に基づき経験的に注入仕様が決定されているのが現状である。そのため、グラウト注入をより効率的かつ確実に行うための理論の体系化が強く望まれている。

そこで本研究では、動的注入工法によるグラウト注入のメカニズムを解明し、それに基づく対象岩盤に応じた最適注入仕様の決定規範を確立することを目的に検討を行い、動的注入工法によるグラウト注入のメカニズムを解明した。

重金属汚染土壌への動電学的土壌浄化手法の 適用性に関する研究

本研究では電流(電位)によって発生する移流を流量(水頭)と置き換えて考える、簡便な数値解析手法を提案し、この手法を用いて汚染物質として陰イオンとして存在する六価クロムと陽イオンとして存在するカドミウムの2種類の重金属に対してそれぞれ浄化予測解析を行うことにより、実汚染サイトに対し本手法を適用する場合の操作因子についての検討、また不飽和土壌に対して適用する場合の対策について検討を行った。

教 授 青木 謙治
助教授 新苗 正和
助 手 水戸 義忠

エネルギー科学研究所 エネルギー応用科学専攻

資源エネルギー学講座
資源エネルギーシステム学分野

超軽量ポーラス金属材料の開発

ポーラス金属材料は、構造材、衝撃吸収材、防音材、フィルタ、熱交換器等への応用が可能な新しい軽量素材として注目を集めている。既存のポーラス金属はミリメートルオーダーの不均一な孔径を有するが、孔径の微細化・均一分布を実現すれば、強度や衝撃吸収特性の信頼性が向上し、ポーラス金属の用途拡大につながる。本研究室では、マイクロメートルオーダーの微小な孔径を持ち、かつ80%以上の高気孔率を有する超軽量ポーラス金属の創製および特性評価を行っている。

さらに、発泡铸造法で作製された市販のポーラスAlおよび本研究で作製されたポーラスAlについて、高温圧縮特性を調査した。その結果、ポーラスAlの流動応力-ひずみ速度の関係は、母材のそれと本質的に同一であることが確認された。

純Al粉末と整粒したNaClの混合粉を放電プラズマ焼結装置にて焼結した後、水洗によりNaClを除去し、均一な孔径分布を持つマイクロポーラスAl(孔径212-300μmや850-1000μmなど、気孔率75-95%)を得た。焼結の最適条件は、焼結温度843K、焼結圧力20MPa、焼結時間10分であり、ブレード応力(大変形の際の流動応力)は、気孔率78%の試料で5.0MPa、気孔率90%の試料で1.2MPaであった。また、異なる焼結条件でNaClを用いて作製した緻密母材Alを圧縮および引張試験に供した。その結果、ポーラス金属の圧縮特性には、母材の圧縮特性よりも、引張特性が大きく影響することがわかった。ポーラス金属は圧縮変形中にセル壁の曲げや引張りといった特有の変形様式を呈するためであると推察される。

固体リサイクル法により再生されたマグネシウム合金の疲労特性

マグネシウム合金は低密度、高比強度、高比弾性率等の優れた材料特性を有しており、次世代軽量材料として家電製品筐体や自動車部材などに用いられている。今後、マグネシウム合金のさらなる用途の拡大のために、機械的性質の向上とともにリサイクルの促進が求められている。そこで、マグネシウム合金の新しいリサイクル技術として、“固体リサイクル法”が注目を集めている。これは再溶解を経ずに、熱間押出し等によりスクラップから直接素形材を再生する方法である。固体リサイクル法により再生されたマグネシウム合金は、動的再結晶による結晶粒の微細化、及びスクラップ表面酸化被膜の微細分散化により、優れた機械的特性を示すことが報告されている。しかし、構造部材として利用する場合に必要な疲労特性に関する報告はまだない。そこで本研究室では、マグネシウム合金の切削屑を、固体リサイクル法で再生した際の、再生材の疲労特性を調査した。その結果、再生材は優れた引張強度を示すにも関わらず、疲労特性は

悪化した。また、その原因が再生材中に混入した酸化被膜によって、亀裂生成や進展が助長されたためであることが判明した。今後は再生材の疲労破壊のメカニズムについて、さらに詳細に検討する予定である。

圧力変化に伴うメタンハイドレートの生成・分解挙動の観察

これまで本研究室では、温度変化によるメタンハイドレートの生成・分解プロセスを観察してきたが、圧力変化に伴う挙動を観察することは出来なかった。そこで本研究では、高圧ハンドポンプの導入により、様々な圧力で高圧セル内にメタンハイドレートを生成・分解させ、偏光顕微鏡でその動的挙動を観察した。

生成過程では、まず気液界面にメタンハイドレート薄膜が生成し、そこから気相および液相にメタンハイドレートが成長していく様子が観察された。気相内では、メタンハイドレートは樹枝状に成長し、その成長速度は平衡圧力からの圧力差に比例して上昇する傾向が得られた。また、液相内でのメタンハイドレートの成長は気相内での成長とは異なり、立方体状や針状を呈していた。このような違いが見られたのは、メタン分子の拡散挙動が液相内と気相内で大きく異なるからではないかと推測される。

次に、様々な温度条件下でメタンハイドレートを減圧により分解させたが、0℃以上の温度条件下ではメタンハイドレートの分解挙動に大きな違いは観察されなかつた。

一軸圧縮試験によって形成されたWesterly花崗岩中のマイクロクラック分布

本研究では地下空間利用の対象として重要な花崗岩中に発達するマイクロクラックの状況を調べるために、Westerly花崗岩を一軸圧縮試験に供し、試料中に存在するマイクロクラックの分布を蛍光観察法を用いて観察し、画像処理手法を適用して解析した。一軸圧縮試験に供した未載荷、破断直前、破断後の試料を観察した結果、未載荷の試料中にも多くのマイクロクラックが観察され、破断直前の試料でも未載荷の試料と比べてマイクロクラックの分布に顕著な違いは認められなかった。破断面の形成された試料中ではじめてマイクロクラックの顕著な増加が観察された。マイクロクラックの進展状況をより詳細に検討するため、構成鉱物ごとに画像処理を用いてクラックの分布を解析した。その結果、破断前後で起きたクラックの急激な増加は、長石、石英粒子内両方でおこり、長石内ではマイクロクラックが新たに発達し、石英内ではクラックが伸展する傾向が大きいことが明らかとなった。また、破断面を含む領域では、それらのクラックの伸展は載荷軸方向に顕著であることが明らかとなった。

教授 馬渕 守

助教授 楠田 啓

助手 陳 友晴

エネルギー科学研究科 エネルギー応用科学専攻

**資源エネルギー学講座
資源エネルギープロセス学分野**

有限要素法によるチューブハイドロフォーミングの成形性に関する数値的検討

チューブハイドロフォーミングは、管を素材として管内部からの液圧と管端部からの軸押しを同時に作用させることで所定の形状を得る加工法である。本加工法では従来の加工法では為し得なかった複雑形状部品を一体成形できるため、自動車部品の軽量化と高強度化を同時に図ることのできる技術として近年大きな注目を集めており、様々な自動車部品への適用が進められている。しかし液圧と軸押しの負荷スケジュールの決定は非常に困難であり、幅広い適用への大きな障害となっている。そこで本研究では負荷スケジュールの設定に関する有効な指針を得ることを目的として、独自に開発した有限要素法解析プログラムを用いて様々な負荷スケジュールによる変形プロセスの違いを検討した。その結果、ある程度初期液圧を与えてから軸押しを行うことにより、大きなしわの発生が防がれその結果成形初期段階から部材全体にわたって塑性変形させることが可能なことが明らかとなった。(大久保 武史、現：住友金属工業)

高張力鋼板の成形限界に関する 3 次元有限要素解析

自動車軽量化の一つの方法として、高張力鋼板の使用拡大が期待されている。板材の成形限界予測は従来局所くびれ発生を予測する塑性不安定理論あるいは分岐理論によって行われてきたが、高張力鋼板などの延性の低い材料に対してはこのような手法が必ずしも適切ではない。そこで、延性破壊条件式の適用を試みた。延性破壊条件式はこれまで幾つか提案されているが、高張力鋼板の 2 軸張出し試験結果との比較から、Cockcroft らによる提案式が正確に限界ひずみを与えることが分かった。つぎに、Cockcroft らの延性破壊条件式を有限要素シミュレーションコードに組み込み、高張力鋼板の角筒深絞りおよび T 字成形の 3 次元変形解析を行い、成形限界予測が充分可能であることを明らかにした。(蟹江 智文、現：新日本製鐵)

固体面に衝突する液滴の変形挙動の 3 次元解析

微小液滴と固体面の衝突は、スプレー冷却やインクジェット印刷、スプレーコーティング等様々な工業アプリケーションで見られる基本的な物理現象である。本研究では、3 次元直交座標系の非圧縮性粘性流体の連続の式、

Navier-Stokes 運動量方程式を有限差分法に基づいて離散化し、固体面に入射する液滴の変形挙動を数値解析した。流体の粘性、重力、水と空気界面に作用する表面張力および水と固体面の濡れ性の効果を考慮し、自由表面(水と空気の界面)は VOF (Volume Of Fluid) 法によって追跡した。また、計算結果を検証するための実験を行い、得られた実験結果と数値解析結果を比較したところ、両者に良好な対応関係が見出せた。液滴が固体面に対し斜めに衝突する際の非対称な液滴形状と内部流れの構造を数値解析で明らかにした。(塩谷 優、現：松下電器産業)

マグネシウム合金 AZ 31 板の温間深絞り加工の有限要素シミュレーション

近年、リサイクル可能な軽量材料としてマグネシウムが注目を集めるようになってきた。マグネシウムは室温で塑性加工性に劣るが、150~300°C の温間で成形性が向上することが古くから知られている。温間での成形性向上には材料特性や加工中における材料内温度不均一等の種々の因子が影響していると考えられるが、未だに充分な知見が得られていない。本研究ではマグネシウム合金 AZ 31 板の温間での変形挙動を数値解析するため、まず、温間での変形抵抗を測定し、それを簡易式で近似した。つぎにその変形抵抗式を用いて、AZ 31 板の温間深絞り加工を、伝熱現象も考慮した有限要素シミュレーションによって数値解析し、成形限界予測を試みた。計算結果を他の研究者によって行われた実験と比較したところ良好な一致が見られた。また、深絞りの成形性向上には材料内温度不均一が必要であることが明らかになった。(森下 貴申、現：ホンダ)

教 授 宅田 裕彦

助教授 藤本 仁

助 手 浜 孝之

エネルギー科学研究所 エネルギー応用科学専攻

**資源エネルギー学講座
宇宙資源エネルギー学分野**

「“地球にやさしい”資源エネルギープロセシングとリサイクリング」等をテーマとして、分離精製技術を基盤とするリサイクル設計技術や環境資源工学の健全な発展を目指します。さらにまた、電気化学工学、界面物理化学、プラズマ化学、ナノ構造結晶成長論、微小重力・強磁場科学等を基礎とする非平衡電子化学プロセシングの地上研究を通じて、かけがいのない地球環境を守るために太陽・水素エネルギー・システムを確立するとともに、将来の宇宙資源エネルギー学分野の構築を目指します。

気泡と微粒子の衝突に関する数値的研究

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

微粒子のエマルション浮選機構の研究

アルミナ微粒子（平均粒径 $0.8\text{ }\mu\text{m}$ ）-イソオクタン系での粒子-油滴界面動電現象とエマルション浮選との相関性についてドデシル硫酸ナトリウム (SDS) 界面活性剤の効果を含めて検討を行っている。アルミナの等電点は pH 7.8 付近にあり、pH が低下するにつれてドデシル硫酸イオンの吸着による負へのシフトが認められた。またイソオクタンの等電点は pH 3.3 付近であり、SDS が $1.4\text{ }\mu\text{M}$ の微量添加でも大きく負へシフトする。エマルション浮選結果によれば、pH 7.8 と pH 4 付近で回収率が高くなった。前者ではアルミナのゼロ荷電によりホモ凝集が顕著になり、後者では SDS 吸着層により粒子表面が疎水性化され、回収率が増大する。

光触媒反応を利用した環境浄化技術に関する基礎研究

近年、 TiO_2 の光触媒反応は、廃水中の微量有機物の除去、特に人体や生態系に直接的に有害な有機物を除去する方法として注目されており、様々な研究がされている。一方、それ以外の有機物は、それ自体は無害であるものの高濃度で排出すると、水溶液中の化学的酸素要求量の増加、ひいては河川・湖沼の富栄養化を招くため、閉鎖性水域における排出規制が年々厳しくなっている。したがって、希薄、濃厚に関わらず排水中に含まれる有機物の迅速で経済的な除去・分解技術の開発が望まれている。当研究室では、主として産業排水中の有機物低減

化を目標とし、比較的弱い紫外線を用いた場合の TiO_2 光触媒作用による有機物分解の可能性について界面化学的な見地から基礎的な検討を行っている。

リサイクル設計要素技術

浮選法によるサブミクロン・ダイヤモンドの濃縮、研磨屑からの研磨剤微粒子の分離回収などの研究・プロセス開発が進行中であり、多くの成果が得られている。また、電気自動車普及のための社会的条件を整備する要求の一環として、希土類-遷移金属間化合物のリサイクル設計システムの基礎である晶析逆抽出法とそれに続く Ca 還元法を利用する金属間化合物再生プロセスに関する研究を実施中である。さらに連続製錬プロセス開発を目指して、その基礎としてインジェクション操作に伴う固-気-液 3 相流と融体間の熱および物質移動速度に及ぼす粒子濡れ性の影響も研究中である。

非平衡エネルギー変換貯蔵プロセシング（地上実験）

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

宇宙空間での非平衡電気化学プロセシング

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

助教授 福中 康博

助手 日下 英史

工学研究科 材料工学専攻

材料プロセス工学講座
表面処理工学分野

電析法を用いる CdTe 化合物半導体薄膜作製とその評価

次世代半導体材料として、直接遷移型のバンド構造をもつ化合物半導体が有望視されている。CdTe 化合物半導体の禁制帯幅は、太陽光から電気エネルギーへの変換に適しており、n-CdS/p-CdTe のヘテロ接合太陽電池が実用化されている。電析法による CdTe 層の成膜には、歴史的に硫酸酸性の水溶液が用いられるが、Te (IV) イオンの溶解度が小さい欠点があり、本研究室では、これに代わるプロセスとして Te (IV) イオン濃度を高くできる塩基性の電解浴を開発した。さらに、電析中に基板表面に可視光を照射すると電析速度が増加する光アシスト効果を見いだした。本年度は、(1) 電析浴中の塩化物イオンが電析挙動および電析物におよぼす影響、(2) オートクレーブを用いた高温での接触めっきによる CdTe 製膜に関して研究を行った。その結果、(1) 電析浴中の塩化物イオンにより、光アシスト効果が抑制されること、高濃度の塩化物イオンを含む電析浴から得られた CdTe は n 型の電気伝導を示すこと、(2) 温度 70°C ~ 150°C の範囲では浴温度が高いほど、得られる CdTe の結晶粒径は増大すること等が明らかとなった。

中温域における燃料電池の開発のための基礎研究

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。具体的には、高分子膜を電解質に用いた PEMFC 型と固体酸化物電解質を用いた SOFC 型が有力であるが、PEMFC 型では、動作温度が 80°C 程度以下に制限され、コジェネレーションに不利であり、一方、SOFC は、高温動作型でありコジェネレーションに適するが、その動作温度は、700~800°C 程度であり、安価な燃料電池システムの構築の観点からは、いっそうの動作温度の低下が望まれる。本研究では、固体酸化物電解質ならびに固体酸の一一種であるリン酸塩電解質を用いることによりこの動作温度を、200~500°C に下げる目的とし、伝導度の最適化、電極触媒反応について研究を開始した。

新しいイミド系室温溶融塩からの金属電析に関する研究

不揮発性かつ不燃性といった特徴をもつイオン液体はグリーンケミストリーを指向する新しい溶媒として種々の応用が検討されている。溶媒自身がイオンであるため、いくつかのイオン液体は、誘電率の低い有機溶媒と比べて金属塩の溶解性が高く、耐還元性や耐酸化性に優れ、広い電位窓をもつ。なかでも当研究室では、脂肪族 4 級アンモニウム陽イオンと含フッ素イミド型陰イオンからなる、電位窓 5 ボルト以上の疎水性のイオン液体に着目し、金属の電析溶媒としての可能性を探っている。本年度は、接触めっき法を用いて Cu-Sn 合金が析出可能であることを明らかにした。一方、疎水性のイオン液体で

あっても若干の水分を含有し、それが電析物に影響をおよぼすことが明らかとなり、本年度はイオン液体の種々の温度での平衡水分含量と、粘度や伝導度等の諸物性の相関を調べた。その結果、純粋なイオン液体および種々の金属イオンを含むイオン液体溶液について、Walden 則が適用できることが明らかとなった。また、イオン液体中での金属イオンの酸化還元および輸送挙動について検討した。

ジメチルスルホン浴を用いるアルミニウム複合電析

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

双方向パルス電解法を用いた鋼表面の鉄クロム合金化処理

世界的な 6 倍クロム使用規制の動きから、3 倍クロムめっき浴を用いた硬質クロムめっきについて関心が寄せられている。本研究室では、双方向パルス電解法を用いた鉄クロム合金化プロセスについて研究を行っており、3 倍クロムめっき浴から鉄クロム合金被膜を得ることに成功した。この方法は、金属イオンとして 3 倍のクロムイオンのみを含む電解浴に、母材基板である鉄そのものを溶解させ、溶出した鉄イオンと浴中のクロムイオンを共析させるため、浴中に鉄イオンをあらかじめ溶解させておく必要がない。それゆえ、廃液処理の際に金属イオンの分離をせずに済み、リサイクル等の処理も容易である。

塩化銅 (I) を含む電解浴からの銅の電解採取

黄銅鉱を Cu^{2+} イオンで浸出し、イオウを元素状で固定する湿式法が研究開発されている。なかでも Intec 社による手法は、濃厚ハロゲン化ナトリウム水溶液を用い、 Cu^{2+} イオンによる酸化浸出と、生じた 1 倍の銅イオンを含む浴からのカソード電解採取、アノードでの酸化剤 Cu^{2+} の再生を組み合わせた優れたプロセスである。本年度の研究では、塩化銅 (I) 水溶液中への塩化ナトリウムの溶解度を系統的に調べた。

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

教 授 粟倉 泰弘

助教授 平藤 哲司

助 手 宇田 哲也

工学研究科 材料工学専攻

材料プロセス工学講座
プロセス設計学分野

X線発生デバイスの開発

本研究では、帯電式の小型でポータブルなX線発生装置を作製した。その装置より発生したX線のスペクトルを測定し、X線発生時における現象を観察した。作製したX線発生装置は半径20mm、高さ50mmの円筒形であり、上部に150μm厚のBe窓をもつ。装置内の真空度を6Pa程度に保ち、電圧(-1500~-3000V)を印加した。絶縁物はテフロンで、外部電極にCu、ガラス貫通部分にW、針状電極にNiの3種の線材をより合わせて用いた。発生装置から検出器までの距離を3.0cm、測定は大気圧下で100秒間行った。印加電圧の増加に伴って発生X線の強度が増加するとともに、X線スペクトルが高エネルギー側へシフトした。またX線発生時、装置内で発光現象が観察された(Fig. 1)。



Fig. 1 X線発生時の発光現象

ポータブル蛍光X線分析装置の試作と応用

焦電式X線発生器を用いてプリンター用紙、名刺、朱肉、アルミホイル、プラスチックなどの日用品、ガラスとセラミック、鉄鋼標準試料等の分析を行ない、これらの試料の異同識別が可能であること、ガラスについては%レベルの含有元素の定性分析が、また鉄鋼試料中のクロムとニッケルは定量分析が可能であることを示した。さらに水溶液中の微量元素は、濃縮後のろ紙やイオン交換樹脂を直接分析してppmレベルの定量分析が可能であることを示した。

また、この焦電式X線発生器と小型の検出器を用いてポータブル蛍光X線分析装置を試作し、まずX線源と検出器の最適配置を実験的に求めた。この試作装置を

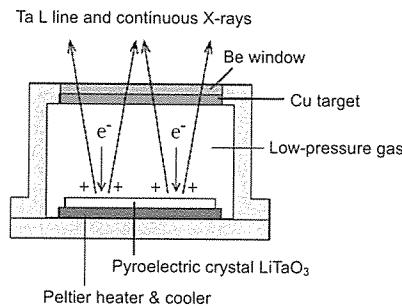


Fig. 2 焦電式X線発生原理 (加熱時)

用いて塗料・プラスチックの異同識別、アルミホイル中の鉄の定量分析が可能であることを示した。X線源と検出器の間に試料ホルダーと円盤状の2次ターゲットを置くことにより、SB比が10倍向上するなど信号強度が著しく増大し、2次ターゲット法の低出力X線源への適用が可能になった。このポータブル蛍光X線分析装置を用いて包装した物品の分析を検討した結果、金属や毒物の検出は可能で、郵便物や手荷物の検査にも使用可能であること、また被覆した鉄鋼試料の分析は推定誤差が30%以下に収まることから、現場での非破壊スクリーニング検査に使用可能であることを示した。

黄砂エアロゾルに含有される硫黄の化学状態分析

黄砂エアロゾル(大気中浮遊微粒子)は毎年中国内陸部で大量に発生し広い範囲に飛来するため、地球環境や人間活動に深刻な悪影響を及ぼしている。そこで各地の黄砂エアロゾル中に硫黄がどのような化学状態で存在するか、高エネルギー加速器研究機構のビームライン11Bにて測定を行った。試料として、京都大学周辺および中国の瀋陽で採取した黄砂エアロゾルの計5種類を用意した。硫黄のK吸収端付近である2440eV~2520eVの範囲でエネルギーを変化させながらX線を入射し、蛍光X線収量と全電子収量を同時に測定した。この手法により黄砂粒子バルクおよび表面付近の硫黄の化学状態を同時に測定できる。各試料の吸収スペクトルを比較してFig. 3に示す。全ての試料についてバルク、表面とともに硫黄は主にSO₄²⁻の形態で存在している。蛍光収量スペクトルでは、大学周辺で採取した4種類の試料の中で特にKyoto-Mar.14に高いSO₄²⁻ピークが検出され、その強度はShenyang-Mar.20と同程度であった。全電子収量スペクトルでは、同じくKyoto-Mar.14が他の大学周辺の3試料と比べ高いSO₄²⁻ピークを示していたが、その差は蛍光収量スペクトルほど顕著ではない。この測定結果は、硫黄を含んだ黄砂エアロゾルが日本に飛来し大学周辺のエアロゾルの硫黄濃度が上昇した事を示している。

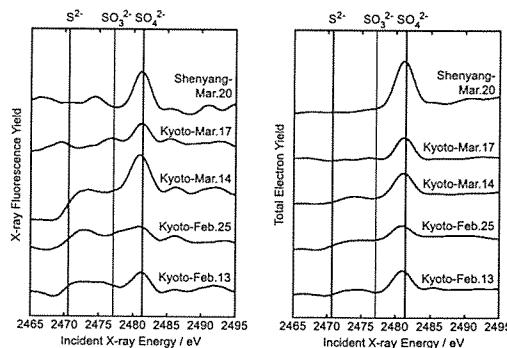


Fig. 3 黄砂試料のXAFSスペクトル

教 助 手 技術専門職員	授 田 石 木	河 合 晃 司
教 助 手 技術専門職員	授 田 石 木	潤 春 司
		豊 豊

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

窒化ガリウム用導電性窒化物バッファ層の開発

直接遷移型ワイドバンドギャップ半導体である窒化ガリウム (GaN) は、青色発光素子 (LED) などに広く応用されている。GaN 成長において、GaN と基板との間にバッファ (緩衝) 層を挿入することが不可欠である。バッファ層は GaN の微細構造やデバイス特性に大きな影響を及ぼすことが知られている。現在、バッファ層として、絶縁体である窒化アルミニウム (AlN) を用いるのが一般的である。しかし、バッファ層が絶縁体であるため、デバイスは複雑な横型構造を取らざるを得ない。絶縁体バッファ層に代わり、導電性バッファ層を開発すれば、デバイスはより単純な縦型構造となり、デバイス工程や構造の大幅な簡略化が可能となる。我々は導電性バッファ層の候補として窒化チタン (TiN) 薄膜に着目した。本研究では TiN バッファ層の成膜プロセス最適化により、実デバイスに適用可能な GaN 薄膜の作製を目的とした。

反応性スパッタリング法によりサファイア基板上に TiN バッファ層を成膜した。混合ガスの Ar/N₂ 流量比を変化させることにより、バッファ層の組成 (Ti/N 比) の制御を行った。その後、MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) 法により TiN バッファ層上に GaN を成膜し、Ti/N 比が GaN 成長形態へ及ぼす影響について調べた。化学量論組成からみて Ti 過剰の組成を有する TiN バッファ層上では、GaN は島状に成長した。一方、N 過剰の組成の場合には基板全面に平坦で連続な GaN が成長した。本研究において Ti/N 比が GaN 成長形態 (モデル) に大きく影響を及ぼすことが明らかとなり、導電性バッファ層開発に向けた重要な材料設計指針が得られた。

p/n 型炭化シリコン用同一オーミック・コンタクト材の同時形成とその機構解明

炭化シリコン (SiC) 半導体はシリコンに替わる次世代パワーデバイスへの応用が期待されており、オーミック・コンタクト材の開発は実用化に向けての主要技術である。現在、SiC に対する低抵抗コンタクト材として p 型には Ti/Al コンタクト材、n 型には Ni コンタクト材が主として用いられている。一般にデバイスにおける p 型、n 型に対するコンタクト材はそれぞれ異なるプロセスで作製されるため、デバイスの集積度が上がらず、工

程数も増加することとなり、プロセス・コスト面から不利である。そこで、同一プロセスにより、p/n 型に対して有効なコンタクト材を形成する技術開発は極めて重要である。本研究では、p/n 型 4H-SiC に対するオーミック・コンタクト材の同時形成を目的にコンタクト材の探索および形成機構解明を目指した。本研究では両伝導型に対してオーミック性を示す Ni/Ti/Al コンタクト材に着目し、その電気特性とコンタクト材/SiC 界面の微細構造の相関性について調べた。その結果、p/n 両伝導型に対してオーミック特性を示すコンタクト材の Ni/Ti/Al の各膜厚および熱処理条件を見出した。更に透過電子顕微鏡 (TEM) 解析によりオーミック特性のメカニズムに寄与する化合物相も同定した。

銅配線合金化による極薄拡散バリア材の自己組織形成

Si-ULSI デバイスの高性能・高集積化に伴い、Cu 配線材の極微細化が進められている。配線幅 100 nm 世代以降の超微細配線では、配線抵抗を低減するためにバリア層の層厚を極薄にする必要がある。本研究では、過飽和 Cu 合金薄膜を用いた極薄拡散バリア層の自己析出・相分離 (自己形成) プロセスの技術確立を目指した。Cu に固溶させる元素は、低固溶・相分離型・低融点化元素であり、かつ従来のバリア材の研究から耐熱性に優れた元素が望まれる。我々は、一候補元素として Ti を選択した。実験では SiO₂ 基板上に Cu (2.9 at% Ti) を 300 nm 成膜し、実プロセスと同程度の熱処理 (400~500°C, 2 時間) 後、電気特性の測定、TEM 等を用いて微細組織観察、バリア性の評価を行った。その結果、合金膜の表面及び合金膜/基板界面に極薄 (≤ 10 nm) の Ti-rich な析出層を確認し、高いバリア性も有することがわかった。極薄 Ti-rich バリア層は Ti と基板表面層との反応により形成していると考えられる。また、熱処理温度および雰囲気がバリア形成や微細構造に影響を及ぼすことも明らかとなった。この自己組織バリア形成プロセスは高压リフロー (HIP) との組み合わせにより配線プロセスへの応用が期待される。

教授 村上 正紀

助教授 伊藤 和博

助手 着本 享

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

XANES 法による AlN 薄膜の構造評価

X線吸収端近傍構造(XANES)は物質中の特定の元素の化学結合状態や局所原子配列を敏感に反映する。これを電子状態計算から得られる理論スペクトルに基づいて解釈することで、注目元素の局所構造を議論することができる。また、X線回折法では評価が困難であるナノ結晶やアモルファスについての解析も原理的に可能である。しかし、このような組織へのXANES法の応用例はほとんどなく、具体的な解析法は確立されていない。本研究では、XANES法の構造解析への応用および解析方法の確立を目的とし、(1) パルスレーザー堆積法により作製したAlN薄膜の構造評価、(2) Si添加AlN薄膜の構造評価およびSi不純物の局所構造評価という2つの実験を行った。

実験(1)では、c軸配向が既知であるAlN薄膜のAl K-edge XANESをX線の入射角度を変化させて測定した。この結果を第一原理計算により解析することで、c軸配向を示すXANESの構成要素を導き出した。また、これを基に各試料のXANESを解析することにより、X線回折法からの情報が乏しかったAlN薄膜のナノ組織を解析することに成功した。

実験(2)においてSi K-edge XANESによるSi原子の局所構造解析を行った結果、添加したSiの大部分はAlサイトに置換固溶していることがわかった。また、一部の試料についてはX線回折法では検出されなかったAlおよびSiの析出が示唆された。この結果は、TEM-EDSおよびELNESにより確認された。

本研究により、XANESと理論計算の連携は、薄膜組織および不純物局所環境の強力な評価手法となることが示された。

**ZnO中に固溶したAl, GaおよびIn
ドーパントの局所環境**

酸化物のようなイオン性結晶に異価数ドーパントを導入する場合、付随するキャリアや点欠陥の濃度は温度や雰囲気などの条件に大きく依存し、それに従って巨視的な特性も変化する。したがって、ドーパントの局所環境の変化を的確に評価することはきわめて重要である。本研究では、透明導電膜をはじめとした様々な用途をもつZnOを取り上げ、その代表的な3価ドーパントであるAl, GaおよびInの局所環境について、第一原理計算と陽電子寿命実験により詳細に検討した。

ドーパントの局所環境と電荷補償機構の理論予測のため、第一原理平面波基底擬ポテンシャル法によるバンド

計算を行った。一つあるいは複数の点欠陥を含む様々な点欠陥モデルと完全結晶モデルとの全エネルギー差から欠陥形成エネルギーを求め、熱力学の表式に基づいて各欠陥種の熱平衡濃度を求めた。また、理論予測の妥当性を評価するためにドーパントを20から100 ppm 添加した焼結体試料を系統的に作製し、特に酸化還元処理前後の空孔量の変化に注目して陽電子寿命測定を行った。

計算結果から、酸化雰囲気でのAl添加ZnO中の主要な欠陥種は、孤立した置換AlおよびZn空孔とこれら二種の欠陥が最近接陽イオンサイトに配置する複合体であることが予測された。また、還元雰囲気になるに従って、電子のキャリア濃度が増加するとともにZn空孔を伴う欠陥が減少することがわかった。この傾向はGaやInにおいても見られたが、最安定となる欠陥種の割合やドーパント近傍の局所構造については異なる結果を得た。一方、実験結果としては、大気中で焼成した試料中のZn空孔量がドーパントの添加量に伴い増加した。さらに、これらの試料を還元および酸化処理した結果、理論予測に対応するようなZn空孔量の減少と回復が確認された。

Vibrational contribution to nucleation free energy in binary alloy systems

The effects of lattice vibration on nucleation free energy change in binary alloy systems have been studied theoretically. (i) A cancellation condition of 'configurational-dependent' vibrational free energy change due to the formation of solute cluster was derived within the nearest neighbor pairwise interaction. Vibrational contribution to the free energy was calculated for specific examples of cluster formation from isolated atoms, and it proved to almost perfectly vanish when the interatomic force constant of unlike-atom pairs was assumed to be the arithmetic mean of the force constants of like-pairs. (ii) Lattice vibrational effects on Cu nucleation in Fe-Cu binary system have been examined through a first-principles technique. We found that vibrational effect is comparable (~36%) to configurational entropy, which significantly contributes to the nucleation free energy change of Cu precipitates. Lattice vibration encourages the free energy change due to the associated decrease of driving force, and the resulting activation barrier is estimated to be 0.62 eV at critical number $n^* = 12$ atoms. This encouragement can also be predicted by the 'configurational-dependent' vibrational effects, which proves our derivation of cancellation condition to be applicable to real alloy systems.

教授 田中 功

助教授 和田 裕文

助手 大場 史康

助手 桑原 彰秀

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

Ba-Ge 系クラスレート化合物の熱電特性に及ぼす第三元素添加効果

クラスレート化合物は、内包金属原子のラトリングに起因する低熱伝導性と、Cage 構造による良好な電気伝導性を兼ね備えるため、熱電材料として有望視されている。Ba-Ge 系のクラスレート化合物には Cage 構造の違いにより Type I と Type III の 2 種類の構造が存在する。Type I 化合物 $\text{Ba}_8\text{Ge}_{43}$ に 3B 族元素 Ga を添加すると、キャリア濃度の低下により熱電特性が向上することが我々の研究室の研究結果から明らかになっている。本研究では Type III 化合物 $\text{Ba}_{24}\text{Ge}_{100}$ に Ga あるいは同族元素の Al, In を添加した試料、および Ga を添加した Type III 化合物と Type I 化合物の 2 相混合試料の結晶構造や微細組織、熱電特性について調べた。得られた結果は以下のように要約される。(1) Ga, Al, In 添加 Type III 化合物では、Ga 添加量の増加に伴い、電気抵抗率とゼーベック係数の絶対値が増加し、熱伝導率が減少した。この材料の性能指数 (ZT) は後者 2 つの効果が大きいため向上した。性能指数は、特に高温になるにつれて優れた値を示し、 $\text{Ba}_{24}\text{In}_{16}\text{Ge}_{84}$ は 700°C で最大 ZT=0.8 の値を得た。(2) Ga 添加 2 相混合試料のうち、Type I 化合物より電気抵抗率の低い Type III 化合物の体積分率の大きい試料では、電気抵抗率は Type III 単相試料のものとほぼ同程度であるのに対し、熱伝導率は約半分に低減される。このため 2 相混合試料は単相試料よりも大きな ZT を示す。特に Type III 相の体積率が 80% の試料では、実用化の目安とされる ZT=1 を大幅に上回る ZT=1.65 (最大値) が得られた。

整列ラメラ組織を有する TiAl 一方向凝固材の力学特性に及ぼす表面加工層の影響

TiAl 合金は比強度や耐酸化性に優れていることから次世代の軽量耐熱構造材料として有望視されている。なかでも、TiAl (γ) 相と Ti_3Al (α_2) 相からなる二相ラメラ組織は高温強度と破壊靭性に優れている。我々の研究室では一方向凝固によるラメラ方位制御が力学特性の改善に対して最も有効であることを示してきた。このようにして作製した一方向凝固材の実用構造材料としての応用を考えた際、複雑な形状への機械加工がしばしば必要となるが、試料の加工方法によっては試料表面に何らかの損傷が導入されることが予想される。本研究では、一方

向凝固材に対し旋盤加工、機械的研磨により試験片を作製し、加工により導入される損傷が引張特性やクリープ特性に及ぼす影響について調べることを目的とした。得られた結果を以下に要約する。(1) Ti-46.5Al-0.5Si 合金の旋盤加工材では、試料表面から深さ 100 μm にも達する加工傷がラメラ境界面に沿って形成されるため、引張伸びが大幅に低下する。高温では表面酸化により加工傷はさらに内部に侵食することに伴い、クリープ特性が低下する。クリープ試験後の試料の引張試験では、引張伸びの低下が認められ、クリープ損傷を示すことが確認された。(2) Nb 添加材では、Nb の添加量の増加にともない耐酸化性が向上する。Nb 添加材についても旋盤加工時に加工傷が形成されるが、緻密な酸化膜の形成により高温保持時の加工傷の侵食は抑制されるため、クリープ特性の低下が抑制される。

Mo-Si-B 合金への耐酸化コーティング

MoSi_2 は高融点でかつ耐酸化性に優れるため、1500°C 付近の高温で使用をされる材料への耐酸化コーティング材料として有望である。しかし Mo-Si 合金基材に MoSi_2 コーティングを施した場合、 MoSi_2 が Mo_5Si_3 に変態し、耐酸化性が低下するという問題がある。これまで基材に B 添加することで Mo_5Si_3 反応相の耐酸化性向上させ、コーティング材の長寿命化を図ってきた。本研究では Mo-Si-B 合金基材と MoSi_2 コーティング間における反応拡散機構に関する研究を行い、コーティング材の長寿命化のための組織制御法の確立を目的とした。得られた結果は以下のように要約できる。マトリクス中の Mo_5SiB_2 相に加え、反応拡散により MoB 相が中間層に生成する。これら B 含有層により、Si の拡散が抑制されることとなり、 Mo_5Si_3 相の成長速度が低下する。結果として、コーティング層の MoSi_2 の消費が抑えられ、コーティング材が長寿命化する。基材を Mo_5SiB_2 相とした場合、反応拡散層は、 Mo_5Si_3 単層ではなく、 Mo_5Si_3 層と {MoB+Mo₅Si₃} 層との 2 層構造となる。この組織変化により、 MoSi_2 コーティング層のさらなる長寿命化が図れることが明らかとなった。

教 授 乾 晴行

助教授 田中 克志

助 手 岸田 恭輔

工学研究科 材料工学専攻

材料物性学講座
構造物性学分野

平成11年度から5年間にわたり実施した特別推進研究「放射光を用いた超臨界金属流体の静的・動的構造の解明」が一昨年度で終了したが、特別推進研究後半から着手したアルカリ金属の研究が新たな展開を見せており、SPRING-8におけるアルカリ金属流体を対象とする放射光実験は、その後も引き続き実施している。今回は、アルカリ金属流体に関する最近の話題を紹介する。

アルカリ金属は典型的な自由電子ガス模型に従う元素として認知されている。価電子の密度は $\sim 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ と非常に高密度であるにもかかわらず、イオンを有効に遮蔽し、かつお互いをも遮蔽することにより、自由に振舞う。この密度領域で、電子の運動エネルギーは電子間のクーロン相互作用を完全に凌駕しているが、低密度化に伴い系は相互作用の強い状態へと移行し、その局在化傾向が増大する。電子の遮蔽効果は、この過程で大きく変化し、その結果、イオン間相互作用も大きく変化する。すなわち、低密度化に伴う電子系の性質の変化は、まさに遮蔽効果を通じてイオンの動きに影響を及ぼすことから、イオン系は電子系の性質変化を捉えるプローブといえる。低密度の多体電子系の物性は、強磁性や超伝導の出現予測など、理論的にも非常に高い関心が注がれている。固体の密度を大幅に低下させることは困難であるが、流体では可能である。我々の取り組む、超臨界金属流体の研究は、物質の密度を融点近くの液相から、希薄な気相領域まで連続的にかつ大幅に変化させることができ、このような低密度多体電子系の物理を現実のものとして取り扱うことを可能にする。

これまでの我々の構造実験(X線回折実験、X線小角散乱実験)によれば、この低密度化の過程において、電子間相互作用の増大とともに、極めて特異なミクロ構造の変化を示すことが明らかになってきた。構造実験は、第三世代大型放射光施設SPRING-8のビームラインにおいて実施している。アルカリ金属であるルビジウムを対象として、融点近傍から臨界点(1744°C, 124.5 bar)を超えて気体に至る幅広い温度・圧力範囲でX線回折実験、およびX線小角散乱実験を行った。ルビジウムの密度は融点直上で 1.46 gcm^{-3} であるが、体積膨張による密度の低下により、 1.1 gcm^{-3} から最近接原子間距離が低下し始め、かつ配位数の低下が停滞するという興味深い挙動が観測されている。このようなミクロ構造の変化は、希ガスなどのvan der Waals相互作用を有する流体の膨張様式(最近接原子間距離が一定で、配位数が単調に減少)とは全く異なるものである。膨張しているのにも関わらず、このような局所的な縮小傾向が現れるることは、流体中に、例えばクラスター形成といった、系を不均質にするミクロ構造が出現していることを強く示唆する。実際に、X線小角散乱の結果によれば、同様の密度領域から小角散乱強度の増大が見られている。

Ornstein-Zernikeの式を用いた解析により、平均密度からのずれの大きさを表すS(0)が1程度、ゆらぎの相関長が $6\sim 7 \text{ \AA}$ という値をもつことが明らかになった。

電子密度をあらわす指標の一つとして、電子半径パラメータ r_s がある。 $(r_s = ((4\pi n/3)^{1/3} a_B)^{-1})$ n: 電子密度, a_B : ポア半径) 通常の金属元素では r_s の値は2~6の値をとるが、我々が対象としているアルカリ金属流体は $r_s > 6$ のいわゆる strong coupling region における金属であり、電子間の相互作用は強い。量子モンテカルロ計算を含む種々の電子系の多体理論は、およそ $r_s = 5.3$ で電子系の圧縮率が負に転ずるという多体電子系の熱力学的不安定性を予測している。これらの理論は一様な正電荷を背景としてクーロン相互作用する電子集団、いわゆる電子ガス模型に基づいてなされており、現実の物質の全圧縮率へのイオンの寄与を無視している。しかしながら、この電子系に固有の圧縮率が負であるという状況、すなわち電子系の熱力学的不安定性は、イオンの空間的配置にどのような影響を与えるのだろうか。ルビジウムで特異なミクロ構造の変化が始まる密度 1.1 gcm^{-3} は、イオンコアによる分極率補正を行うと、 r_s の値で5.3に対応し、電子ガス模型で負の圧縮率への転移点として予測されている値と極めてよく一致する。イオン間相互作用が電子の遮蔽効果に関わることを述べた。負の圧縮率は、遮蔽効果を記述する電子の誘電関数 $\epsilon(q, \omega)$ が $q \rightarrow 0$ で負になることを意味し、仮に一様な正電荷に密度のゆらぎの生成を許容すれば、正電荷に自発的に密度ゆらぎが生じることを示す[1]。一方で、 q の大きな領域における $\epsilon(q, \omega)$ の正確な記述は、現在でも多体電子論における困難な課題の一つとされている。最近の電子ガスの多体理論計算によれば、プラズモンとは異なる、電子-正孔対の集団運動の新たなモードの存在が見出されており[2]、このモードのソフト化と自発的励起が負の圧縮率と密接に関連することが指摘されている。実際にはイオンは、コア程度の空間的広がりをもった離散的な電荷として存在しており、そのことを考慮して、電子系とイオン系の相互作用を self consistent に取り扱う必要があるが、我々が観測している密度ゆらぎと平均イオン間距離の縮小は、このようなモードに対するイオン系の応答を捉えている可能性が高い。膨張するアルカリ金属流体の研究は、低密度電子ガスにおける未知の素励起についての重要な洞察を与えるものである。

- [1] Pines, D & Nozieres, P., *The theory of quantum liquids Vol. I* 206-210 (W. A. Benjamin, inc., New York, 1966).
- [2] Takada, Y. Exitonic Collective Mode and Negative Compressibility in Electron Gas. *J. Superconductivity*, to be published.

教 授 田村剛三郎

助教授 沼倉 宏

助 手 松田 和博

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

**Ni 合金基板上への酸化物バッファー層及び
 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ -超伝導薄膜の作製と評価**

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) 高温超電導体は結晶粒界により臨界電流密度 J_c が大きく低下するため、2軸配向化技術の開発が大変重要である。本研究では線材化の手法の一つである RABiTS 法により試料を作製し、その YBCO/YSZ/CeO₂/Ni-Cr 界面における配向挙動を EBSP で調べた。その結果、個々の結晶粒は、その下地となる結晶粒と特定の方位関係を有することが分かった。特に、CeO₂/Ni-Cr 界面において、(100) 配向していない Ni-Cr 粒上の CeO₂ 粒に関して、特徴的な方位関係を有することが分かった。一方、YSZ/CeO₂ 界面では、下地の結晶粒と Cube on Cube の方位関係をもつことが分かった。

**ナノリソグラフィーによる高温超伝導薄膜への
ピンニングセンターの導入**

液体窒素温度で超伝導を利用できる酸化物高温超伝導体には大きな期待が寄せられ、さまざまな研究が行われている。その中で高磁場中の臨界電流密度 (J_c) を高くすることは、線材として実用化するための第一といつてもよい課題である。磁場中特性を向上させるためにはピンニングセンターとなり得る欠陥の導入が必要となる。本研究では高温超伝導薄膜に欠陥を導入する方法として AFM (原子間力顕微鏡) によるナノリソグラフィーに注目した。用いたのは、AFM の探針を基板や超伝導薄膜に直接押し付けて微細なキズをつける方法である。本研究の結果、基板上のキズの上に成長した欠陥が磁場中 J_c に影響を与えることがわかり、この方法でピンニングセンターを導入できる可能性があることが証明できた。

YBCO 薄膜のピンニングメカニズムと微細組織

Pulsed Laser Deposition 法で YBCO 薄膜を作製し、臨界電流密度の磁場依存性、磁場方向依存性を評価した。配向性を最適化した YBCO/STO と YBCO/MgO のピンニングメカニズムを比較すると、YBCO/STO においては高温高磁場において YBCO/MgO よりも J_c の減少が緩やかになる領域が見られた。角度依存性の解析から YBCO/STO において高温高磁場で J_c を支配する欠陥は YBCO/MgO において支配的な c 軸に平行な欠陥とは異なることがわかった。 J_c の角度依存性は常に磁場が電流と垂直になる条件、つまりローレンツ力が一定となる条件で測定されるが、この測定に加え、磁場が電流に垂直にならないつまりローレンツ力が磁場の回転角に依存する条件で測定し、それらの比較を行った。YBCO/STO では $B//c$ の近傍ではローレンツ力が変化するにもかか

わらず上記の二つの条件で測定した J_c が一致した。二つの条件での共通の方向は $B//c$ である。 $B//c$ 近傍の数十°の範囲において量子化磁束の運動は c 軸に平行な成分の運動に支配されていることを示している。

**走査ホール顕微鏡による YBCO 被覆導体上の
ポルテックスの観察**

高分解能走査型ホールプローブ顕微鏡を用いて YBCO 膜表面の磁束量子を観察し、その形状や構造を調べた。単一の磁束量子を観察し、YBCO 膜とホールセンサ間の距離による磁束の発散を G-L 方程式を用いて補正することにより、YBCO 膜上で磁束量子の形状を評価することが出来た。その際に磁束侵入長 λ_0 を導出することが出来、その温度依存性から地場侵入長 λ_0 と臨界温度 T_c を決定した。また、印可磁場の増加に伴い磁束量子の数が増加するが、磁束量子が正方格子を組むと仮定した際にその挙動が上手く説明出来た。さらに、ピンニング力が強い場所では磁束量子は移動しないが、ピンニング力が弱い場所では移動することも視覚的に確認された。

**Al-Zn-Mg 合金の熱間押出し中の組織形成に
与える Mn 添加の影響**

Mn を過飽和に固溶させた急速凝固 Al-Zn-Mg 系合金粉末の熱間押出し中における組織形成過程を高分解能 EBSP を用いて調べた。その結果、熱間押出し前の昇温時に粒内に高密度に Mn 金属間化合物が分散し、その存在により熱間押出し中に動的再結晶が生じ、結晶粒が微細化されることが分かった。即ち、高密度に分散した Mn 金属間化合物の同士を連結する様に網目状の転位セル組織が形成され、そのセル壁が熱間押出しが進むに伴って亜粒界となり、さらに亜粒界の傾角が大角化していくことにより転位セル組織と同等のサイズの微細な大角粒が形成された。その結果、約 1 μm の結晶粒径を有する引張り強度が 950 MPa を超える超高強度アルミニウム合金を開発することが出来た。

**Cu/MgB₂ テープ材の機械的性質及び超伝導
特性に及ぼす熱処理の影響**

超伝導材のシース材として高い電気伝導性と熱伝導率をもつ Cu をシース材として採用した Cu/MgB₂ 超伝導線材の熱処理による機械的性質と超伝導特性の変化を調べた。熱処理の結果、Cu と MgB₂ の熱膨張係数の差により発生した残留応力により Cu が既に降伏していることが判明した。そのため、熱処理を施した Cu/MgB₂ 線材では Cu の加工硬化能が低く、負荷応力を負担しきれないため、MgB₂ 超伝導体に破断が生じやすいことが明らかとなった。また、Cu と MgB₂ の界面に反応層が形成されたため、超伝導特性が劣化したことが示唆された。

教授 長村 光造

助教授 松本 要

助手 足立 大樹

工学研究科 材料工学専攻

材料機能学講座
材質制御学分野

本研究室では、鉄鋼・チタン合金等の構造材料の組織制御に関する基礎研究として相変態・析出・再結晶の組織学的研究を行うとともに、これらと密接に関係する形状記憶や超弾性効果、超塑性などの機構解明や機械的性質の向上についても研究している。2004年度は以下のテーマについて研究した。

1. 鉄合金のマルテンサイト・ベイナイトの下部組織に関する研究

Fe-9Ni-C合金の上部ベイナイトおよびラスマルテンサイトのブロック組織の炭素量による変化を調べ、炭素量の増加に伴い、ラスマルテンサイト組織はパケット・ブロックとも微細になるが、上部ベイナイトではブロックは逆に粗大化することを見出した。また、オーステナイト粒界性格によってベニティックフェライトのバリエントが強く規制されるために、特に変態駆動力の低い高温・高炭素の場合にブロックの粗大化が起こることが明らかとなった。

Fe-(31, 33)mass%Ni合金のレンスマルテンサイト組織をTEM観察により詳細に調べた結果、その内部組織はミドリップ付近の完全双晶領域、その外側の双晶が一部成長した領域、双晶の存在しない非双晶領域からなること、非双晶領域内の組織も、成長界面に近づくに従って転位のほとんど存在しない領域から複数のらせん転位からなる領域、さらに湾曲した転位が絡み合った領域へと変化することがわかった。

鉄合金マルテンサイトの形態変化の支配因子として変態時体積膨張に注目し、Fe-Ni-Co合金でNi添加によるMs点の調整、Co添加によるキュリー点の調整を行い、またインバー効果を用いて、変態時体積膨張を低下させた時のマルテンサイトの形態、内部組織を調べた。その結果、体積膨張を小さくすると、従来ラスマルテンサイトが生成する室温以上でもレンスマルテンサイトが生成することがわかった。

2. ラスマルテンサイトの変形と強度に関する研究

Fe-0.2C-2Mn(mass%)低炭素鋼のラスマルテンサイトの冷間圧延組織を極低炭素鋼と比較して調べた結果、冷間加工によるラス境界の消滅やラスの分断が起こりにくく、極低炭素鋼と比べて元のラス組織がより強固に残ることがわかった。また、同じ鋼を用いて6~349μmの粒径を持つオーステナイトから生成したラスマルテンサイト組織と機械的性質との関係を調べた結果、パケット径、ブロック幅はオーステナイト粒径が細くなるほど微細になること、引張強さおよび0.2%耐力の旧オーステナイト粒径、パケットサイズおよびブロック幅依存性を比較すると、3種類いずれについてもHall-Petch則を満たすことが明らかとなった。さらに、過去に報告さ

れたフェライト鋼のHall-Petch則と比較して、詳細に検討した結果、ブロックがラスマルテンサイト組織の強度を支配する有効結晶粒であると結論づけた。

3. 鉄鋼中の炭窒化物の生成挙動に関する研究

1~30 mass%までの種々のCr組成を持つFe-Crフェライト系二元合金をプラズマ窒化し、Cr組成および窒化条件による組織変化を詳細に観察した。その結果、板状もしくは棒状のCrNが元のフェライト母相中に分散して析出する場合と、窒化層内に新たなフェライト粒が生成し、CrNがフェライト母相とラメラ状の組織を呈して未窒化領域とΣ9の対応格子関係を持って柱状に成長する場合の2通りの組織が形成されることを見出した。柱状晶組織は高Crほどまた窒化温度が低いほど形成されやすいうことから、窒化初期にCrNの析出により導入されたひずみによりフェライト粒の再結晶によって新粒が生成し、その粒界でCrNが不連続析出により成長して柱状晶組織が形成されると結論づけた。

SiおよびAlが鉄炭化物の熱力学的な安定性に与える影響を明らかにするため、種々の炭素濃度を持つFe-(1,2,3)mass%Si-CおよびFe-(1,2)mass%Al-Cフェライト合金を作製し、電気抵抗変化およびTEM観察により炭化物の析出挙動を調べた。その結果、Si添加により、ε炭化物からセメンタイトへの遷移が抑制され、ε炭化物と平衡するフェライトの炭素固溶限も増加することなどがわかった。これより、Siが固溶すると、ε炭化物およびセメンタイトとともに不安定化することが示唆された。

4. チタン合金のマルテンサイト変態および超弾性に関する研究

応力誘起α"マルテンサイト変態による形状記憶効果を示すnear-β型合金Ti-10V-2Fe-3Al(mass%)に、固溶強化能が大きい侵入型元素である窒素(N)を0.2 mass%までの微量添加した場合の、応力誘起変態および変形特性への影響を調べた。その結果、(1) N添加によりMs点、As点は低下するとともに、β相の引張強度が大きく上昇して延性は低下する。(2) 各合金とも応力誘起α"マルテンサイト変態により変形するが、N-free材では形状記憶効果のみ示すのに対して、0.1 mass%以上のN添加では超弾性が発現し、高強度化による純粋な弾性変形分の増加と合わせて約2%の高い回復ひずみが得られることなどがわかった。

また、Ti-(8,10)Mo2元合金(mass%)にNを0.2 mass%まで添加した場合に同様の研究を行い、(1) Ti-8Mo-(N)合金はほぼ全面α"マルテンサイト組織を呈し、応力負荷・除荷時に超弾性による表面起伏の成長・収縮が見られる。また、形状回復量はN添加により若干増加する。(2) Ti-10Mo-(N)合金では、変形時に応力誘起マルテンサイトおよび{332}<113>変形双晶の両方が不均一に生成し、超弾性は発現しないことなどを見出した。

教授 牧 正志

助教授 古原 忠

材料機能学講座
機能構築学分野

有機酸分子自己集積化単分子膜形成

これまで有機ホスホン酸分子の自己集積化と金属防食への応用について研究を進めてきたが、燐を含有するホスホン酸の使用は環境への排出が懸念材料である。これに替わる、有機カルボン酸による単層膜形成および積層膜形成に関する研究を行った。カルボン酸は、塩基性酸化物表面に静電的に吸着し单層膜を形成するが、密着性に問題がある。そこで 1) カルボン酸との反応サイトとなるアミノ基を基体表面に導入する表面処理工程、2) 反応促進剤を用いてアミノ基とカルボン酸との間でアミド結合を形成する工程からなる、有機酸自己集積化単分子膜 (Self-Assembled Monolayer, SAM) を強固に無機物および金属表面に固定化するプロセスを開発した。

単結晶シリコン表面への有機分子接合

半導体表面に有機分子を接合することで、有機分子と半導体の機能が複合化した新しい電子機能を生み出すための足がかりを得ることができる。特に、IV 族半導体であるシリコンへの有機分子接合は、半導体エレクトロニクスと分子エレクトロニクスとの融合化を目指す上のキーテクノロジーになると期待されている。

水素終端化シリコン表面の Si-H サイトを反応起点に、シリコンへ有機分子を接合する。熱励起あるいは光励起によって、Si-H から H 原子を引き抜くことで生成する Si ラジカル、 Si^{\cdot} 、と有機分子が反応し、シリコンと有機分子が共有結合によって接合される。例えば、図 1A に示すように、不飽和炭化水素が反応する場合は Si-C

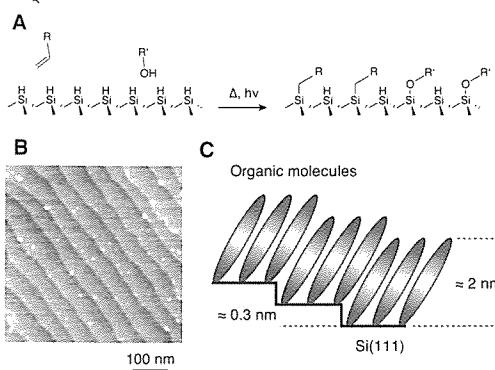


図 1 A) Si(111)-H 表面とアルケン分子およびアルコール分子の反応。B) ヘキサデシル単分子膜被覆表面の AFM 像。C) 試料模式図。

結合によって、アルコール分子が反応する場合には、Si-O-C 結合によってシリコンと連結され、シリコン表面にが形成される。

図 1B は、熱励起プロセス（反応温度 150°C）によって、Si(111) 面上に 1-ヘキサデセン ($\text{C}_{14}\text{H}_{29}\text{CH}=\text{CH}_2$) を化学接合した試料表面の、AFM 像を示す。Si(111) 面は、原子レベルでフラットなテラスと段差約 0.3 nm のステップから構成されるが、膜厚約 2 nm の SAM で被覆した後でも、このステップ & テラス構造が維持されていることがわかる。SAM の膜厚が、すくなくともこの AFM 像全面にわたって原子レベルで均一であること、すなわち接合されている分子の配列状態および配向が揃っていることを示している。

電気化学活性単分子膜

分子の酸化-還元は、それぞれ分子からの電子の放出および分子への電子注入にほかならない。電気化学活性を有する有機分子をシリコン基板上へ固定化することで、一分子あたり一つの電子を可逆的に貯蔵-放出することのできる、電子メモリー機能を付加することができる。

図 2A は、フェロセンカルボキシアルデヒド (FCA) 分子をシリコン表面へ固定化する反応を示している。実際に、熱励起反応によって Si(111) 面に FCA 単分子膜を形成した。図 2B は、FCA/Si 試料電極のサイクリックボルタモグラム（電位スイープ速度 10 mV/s、支持電解質 0.1 M HClO_4 ）を示す。電位 510 mV に酸化ピークが、電位 -130 mV に還元ピークが確認できる。

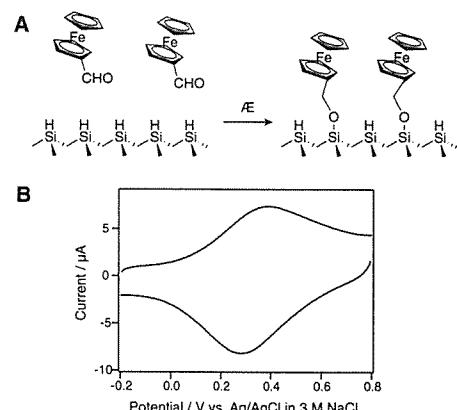


図 2 A) FCA 分子の Si(111) 表面への固定化
B) FCA 被覆試料の電気化学応答。

教 授 杉村 博之
助教授 邑瀬 邦明
助 手 李 康晃

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

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

材料科学からのアプローチ

「機能性材料・新素材（エコマテリアル）の開発」と「新しいプロセス（エコプロセス）の開発」の二つを軸とし、材料という観点から地球環境に優しい資源の有効利用を研究しています。

主な研究テーマ

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

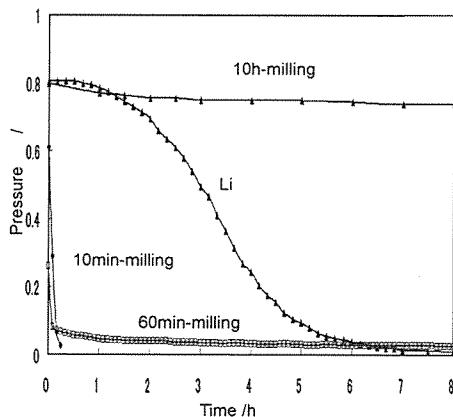


図1 ボールミル処理を施したFe-Li合金の窒素吸収曲線。短時間のミリングで純リチウムに比べて10倍以上早い窒素吸収能を示した。

社会分析・評価からのアプローチ

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

地球環境との調和について研究しています。

主な研究テーマ

- ・リサイクルを含めた環境影響評価指標の開発
- ・産業連関分析法によるエネルギー生産性評価
- ・燃料電池自動車の将来価格と普及に関する研究
- ・自動車広告が消費者に与える影響に関する研究

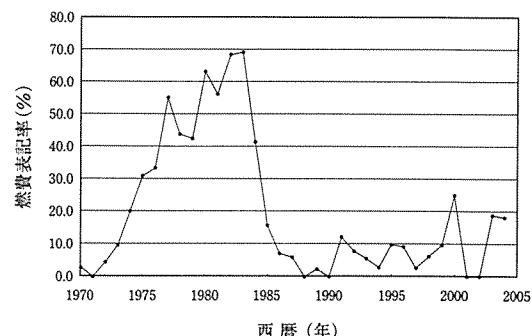


図2 新聞に掲載された自動車広告の分析結果。オイルショック後に比べて近年は燃費を記載した広告が減っていることがわかる。

教育からのアプローチ

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

主な研究テーマ

- ・アンケートと教育の実践に基づいた、環境保護行動に結びつくエネルギー環境教育のあり方に関する研究

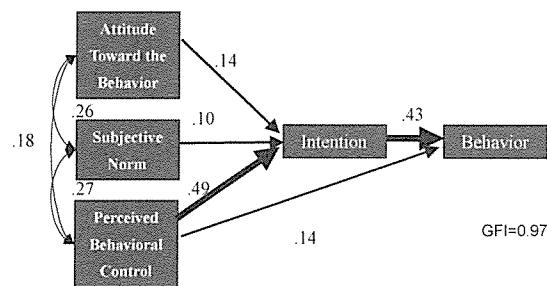


図3 買い物袋持参運動に関するアンケートを、Ajzenモデルに基づきパス解析した結果。実行可能性、行動意図、行動に強い相関が見られた。しかし、実行頻度は低く、環境教育や社会システムによる改善の可能性が示された。

教 授 石原 慶一

助教授 奥村 英之

助 手 山末 英嗣

技 官 藤本 正治

エネルギー科学研究所 エネルギー応用科学専攻

材料プロセシング分野講座

 $\text{CeCl}_3\text{-KCl}$ 系溶融塩からの Ce の除去

1. 緒言 使用済軽水炉燃料の分別処理方法として、溶融塩中での電解が検討されている。核分裂生成物の Ce を含む $\text{CeCl}_3\text{-KCl}$ 二元系を用いて、ガス分圧を変化させて Ce の安定相を調査し、溶融塩からの除去方法を検討した。また、均一液相領域での Ce の酸化還元平衡を測定した。

2. 実験方法 試料 ($\text{KCl-3 mol\% CeCl}_3$) をアルミナポートに入れ、 $\text{H}_2 + \text{HCl} + \text{H}_2\text{O} + \text{Ar}$ 雰囲気 1073 K の炉内で 6 時間保持した後、急冷した。沈殿を生じた試料は濾過して沈殿を分別し、XRD で相を同定した。沈殿を生じなかった試料は Ce^{4+} と Ce^{3+} の濃度を分析によって求めた。

3. 実験結果・考察 $\text{CeCl}_3\text{-KCl}$ 二元系溶体に準正則溶体モデルを適用して、計算状態図を作成した。Fig. 1 に示すように計算値 (○) と実測値 (○) はよく一致し、1073 K における $\text{KCl-3 mol\% CeCl}_3$ 中の CeCl_3 活量を 9.69×10^{-5} と算出した。Ce-O-Cl 系の Potential Diagram を Fig. 2(a) に示す。図中の相境界は CeCl_3 以外の活量

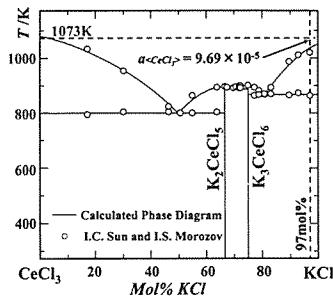
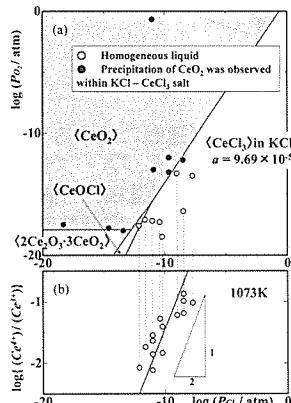
Fig. 1 Calculated phase diagram of the $\text{CeCl}_3\text{-KCl}$ binary system.

Fig. 2 Potential diagram of the Ce-O-Cl system at 1073 K.

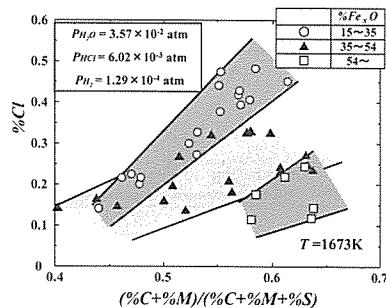
を 1 とした場合のものである。網掛けは CeO_2 安定領域である。図中 ● と ○ は、実験において CeO_2 で飽和していた場合としていなかった場合を示す。● は計算で求めた CeO_2 安定領域内に位置することがわかる。 CeO_2 の溶融塩への溶解度は充分に小さく、 CeO_2 安定領域に分圧を制御すれば溶融塩から Ce が除去できる。また、均一液相溶融塩中 $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ 比を Fig. 2(b) に併記した。結果から、 $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ の酸化還元反応を $\text{Ce}^{3+} + 1/2\text{Cl}_2 = \text{Ce}^{4+} + \text{Cl}^-$ で表しても矛盾がないと言える。

溶融スラグの塩素溶解度

1. 緒言 高炉に吹き込む廃プラスチック中の塩素は約 350°C 以上の温度で HCl ガスを生成する。腐食性のある HCl ガスを溶融スラグへ溶解させることを想定した。CaO-SiO₂-FeO-MgO (以下 C, S, W, M と略記) 系スラグへの塩素溶解度の組成依存性及び温度依存性を調査した。

2. 実験方法 CSWM 四元系スラグを MgO るっぽに収めて 1473 K~1673 K に昇温し、 $\text{Ar-H}_2\text{O-HCl}$ 4 種混合ガスと平衡させた。約 6 時間保持した後急冷し、スラグ中の Ca, Mg は ICP 発光分光分析法、 Fe^{2+} , Fe^{total} , Cl は湿式法により分析した。

3. 実験結果と考察 ガス分圧及び温度 1673 K 一定の条件で $(\%C+\%M)/(\%C+\%M+\%S)$ と $(\%Cl)$ の関係を Fig. 3 に示す。同程度の Fe_{x}O 濃度であれば $(\%C+\%M)/(\%C+\%M+\%S)$ が増大すれば $(\%Cl)$ も増加した。塩素は主に塩基性酸化物と反応してスラグ中に溶解し、その反応は $\text{HCl} + (1/2)\text{O}^{2-} = \text{Cl}^- + (1/2)\text{H}_2\text{O}$ で表されると考えられる。また塩素溶解度の温度依存性より、この反応の見かけのエンタルピー変化は -48 kJ/mol と算出された。CaO, MgO, SiO₂ と HCl との反応のエンタルピー変化は、それぞれ -80 kJ/mol, -20 kJ/mol, 30 kJ/mol である。見かけのエンタルピー変化は塩基性酸化物と HCl との反応のエンタルピー変化に近いことが確認された。

Fig. 3 Relationship between $(\%Cl)$ and $(\%C + \%M)/(\%C + \%M + \%S)$ at 1673 K.

教 授 岩瀬 正則

助教授 藤原 弘康

助 手 長谷川将克

エネルギー科学研究所 エネルギー応用科学専攻

エネルギー応用プロセス学講座 高温プロセス分野

溶融塩化カルシウム電解によるチタン製錬プロセスに関する研究

本研究室では、クロール法に代わる次世代型チタン製造プロセス（OS法）を提案し、その実現化に向けた研究を行っている。OS法では CaCl_2 溶融塩電解法とCa熱還元法を組み合わせることで、連続的な製造プロセスの実現を可能としている。しかし、電解時に発生した陽極ガスが生成Caと逆反応を起こし、電流効率の悪化を招くという問題があった。また、陽極から炭酸ガスが発生した場合、Tiが炭素汚染されるという課題も残されていた。

上記の問題点を解決するため、イットリア安定化ジルコニアYSZ隔壁の使用を提案した。固体電解質であるYSZの利用により、陽極発生ガスをTiやCaと接触させることなくTiの製造を試みた。

定電圧や定電流、スイープといった電解条件で実験を行った結果、YSZ隔壁を使用した条件の下で、酸素濃度1400 mass ppm、炭素濃度300 mass ppmのTiを得た。これはOS法では従来得ることの出来なかった炭素濃度であり、また隔壁を使用することで、OS法における電流効率は著しく向上させることに成功した。また、スイープ法による電解や数種類の電解装置を用いた実験結果の比較、さらに反応浴各部での電解中の電圧測定を行うことで、YSZ隔壁を使用した際の電解メカニズムについて、詳細な解析を行っている。

Ca共還元法によるTi-V-Cr系水素吸蔵合金の製造

本プロジェクトでは溶融 CaCl_2 を使用したCa共還元法により水素吸蔵合金を製造することを提案する。これは TiO_2 と V_2O_3 、 Cr_2O_3 の混合粉末を溶融した CaCl_2 中でCaにより還元し、水素吸蔵が可能なTi-V-Cr合金をつくるというものである。先行研究として行われたTi-V、Ti-Cr各二元系の水素吸蔵合金の作製では溶融 CaCl_2 を用いたCa還元が、用いない場合に比べて合金化に対して効果をあげ、その有用性が示されている。同様の手法を用いて本研究では三元系合金の作製を行ったところ、還元の時間としておよそ14.4 ksで酸素濃度は最大1300 ppm程度まで除去でき、これにより経験的脱酸限界まで除去できた。なおこのプロセスで使用したCaの混入は、濃度にして二千ppmに満たない程度であったので、生成された合金の特性を左右するほどではないと考えられる。また本研究で用いた実験装置において取り出した合金は、状態図に従い相分離する試料もあったが、組成によっては単相とすることができた。Ca還元にて

合成できた試料は粒子の大きさで数十 μm と細かくでき、本法によればインゴットの粉碎の過程を省くことが可能となった。水素吸蔵量は最大で約H/M=1.25の水素吸蔵量を確認した。

溶融塩・カルシウム還元によるニオブおよびタンタル粉末の製造プロセス

金属ニオブ粉末、タンタル粉末および一酸化ニオブ粉末はコンデンサ材料として優れた性能を持つ。本研究室ではこれらを効率的に製造するため、溶融塩化カルシウム中のカルシウム還元を利用した二つのプロセスを提案している。

ニオブ・タンタルの酸化物または水酸化物を原料とし、溶融塩化カルシウム中で、金属カルシウムを還元剤として用いて還元することで、還元副生成物の酸化カルシウムをその場で溶解除去し、高純度のニオブ・タンタル粉末を製造することができる。1223 Kでの還元反応で酸素濃度5200 ppmのニオブ粉末、3200 ppmのタンタル粉末を得ることができた。

また、酸化カルシウムおよび塩化カルシウムを電気分解し、陰極に生成したカルシウムで試料を還元するOS法を適用し、酸素濃度1.5-1.7 mass%の金属ニオブ・タンタル粉末を製造した。

さらに、OS法の電圧または電気量を制御することで、ニオブの低級酸化物である一酸化ニオブ粉末を製造することに成功した。これは新しいコンデンサ材料として有望である。

マンガン系複合酸化物の熱電特性

多量に存在するため資源の問題がなく経済的なMn酸化物をベースとしたMn系複合酸化物の熱電性能を調査した。Mg-Mn-O系化合物は半導体的性質を示し、温度の上昇とともにゼーベック係数の増加と電気抵抗率の低下が確認できた。約873 Kでパワーファクターは最大 $5.1 \times 10^{-8} \text{ W/mK}^2$ の値を示した。作製した試料の中では出発原料である Mn_3O_4 が最も高いパワーファクターを示し、 $9.05 \times 10^{-8} \text{ W/mK}^2$ の値を得た。生成プロセスによる試料の微細化、層状構造の構築により熱電性能のさらなる向上を期待している。

本研究室では他にも、溶融塩化カルシウム電解による四塩化チタンの還元や螺旋型熱電発電モジュールの最適設計、Nb-Li-Si-O系の相平衡関係の研究などを精力的に行っている。

詳細は当研究室のホームページ (<http://ogre.mtl.kyoto-u.ac.jp>) をご参照ください。

エネルギー科学研究所 エネルギー基礎科学専攻

エネルギー反応学講座
量子エネルギープロセス分野

固体物性が関わるエネルギー機能についての原理の探求と応用を目指している。超伝導体や半導体などの機能材料に関与する物性現象、たとえば(1)銅酸化物の超伝導、アモルファス半導体の電子挙動、電流磁気効果、結晶成長や原子の拡散過程などを対象に物理的計測(X線構造解析、低温下での電気抵抗、光吸収と光放出等)による知見を深めている。一方、応用的分野では(2)燃料電池の基礎的物性値の測定(熱起電力、エントロピー)等を踏まえて、燃料電池極面化学反応の素過程を支配する因子の把握に努め、具体的なものとして貴金属タイプの触媒の注目し、最終的には低温型高効率燃料電池の実用化を目指している。(3)また、従来の材料物理学の分野では、金属の微小弾性変形と加工を組み合わせたときの解析手法に有限要素法を導入し有力な研究手段としている。

他方、従来の研究成果の評価によって文科省特定領域研究(122)「江戸のモノづくり」の京都大学計画班として、放射光を含む大型機器分析を科学技術史上の器物に応用する研究を進めている。この研究はエネルギー機能等の現実問題に直接寄与する訳ではないが、我が国の科学・技術の根幹に流れる独自のアイデンティティの確立を計るものである。さらに、産業界との連携では「経産省地域コンソーシアム」に参画、「マイクロ切断刃物」、「超微小ノズルの製法」を主催している。

助教授 富井 洋一

助手 蜂谷 寛

国際融合創造センター

エレクトロニクス分野

STMによる材料表面の原子レベル評価

(1) トンネル障壁測定による GaAs (110) 表面下のドーパント観察

我々はこれまでに水素終端 Si (111) 表面を用いて表面下に存在するドナー、アクセプターの STM 観察およびトンネル障壁高さ測定 (Barrier Height (BH) imaging) を行ってきた。測定の結果 n-type 半導体のドナーではトンネル障壁の局所的な減少が、p-type 半導体中のアクセプターではトンネル障壁の局所的な増加が観測され、これらの結果はそれぞれの不純物の電荷が作る静電ポテンシャルの影響であると考えると理解することが可能であり、BH imaging 法を用いることで不純物原子等電荷を持ったサイトの区別が可能であることが示唆された。

本年度は BH imaging 法を GaAs (110) 表面下のドーパントに対して応用し研究を行った。GaAs に Si をドープした試料では Si は Ga サイトを置換しドナーとなるため試料は n-type の半導体となるが、高濃度にドープされた場合には Si が As サイトを置換し一部がアクセプターになることが知られている。また表面には Ga 空孔が形成されやすいことが知られているが、この Ga 空孔が負に帯電していることが知られている。従って、GaAs (110) 表面では幾つかの帶電の状態の異なるサイトを同一試料内に見出すことが可能であり、BH imaging による charge sensitive な観察の対象として適しているものと考えられる。研究の結果、表面下に存在するドナーでは局所的トンネル障壁の減少が、またアクセプターおよび表面の Ga 空孔では局所的なトンネル障壁の増加が観測された。従って実験結果は BH imaging によって電荷の区別がついていると解釈することが可能である。しかしながら測定条件、探針の状態によってはドナーサイトでトンネル障壁が上昇する現象も観察された。検討の結果このような場合には観測されるトンネル障壁の大きさが試料に加えるバイアス電圧の絶対値に対して特異な依存性を示すことが明らかになった。これに関して現在解析を進めている。

(2) レニウムシリサイド極薄膜の STM 観察

レニウムダイシリサイド ($\text{ReSi}_{1.75}$) は狭いバンドギャップを持つ半導体であることから赤外線検出装置などへの応用がなされており、また熱電材料としての研究も多く行われている。極薄い $\text{ReSi}_{1.75}$ 薄膜の熱電特性は膜の形状に大きく依存しており、ナノスケールの $\text{ReSi}_{1.75}$ 結晶の成長の様子を知ることは薄膜の熱電効果を理解する上で重要である。本研究では $\text{ReSi}_{1.75}$ 極薄膜の STM 観察を試みた。実験の結果 Re 蒸着時の基板温度を 1100 K に上げたところナノワイヤー (NW) の形成が認められた。典型的なワイヤーの長さは数十 nm、幅は数 nm である。高分解能の STM 観察によるとこれらの NW 表面はおよそ $0.8 \text{ nm} \times 0.6 \text{ nm}$ の長方形を繰り返し単位とする構造を示しているがこの繰り返し周期はこれ

までに知られている $\text{ReSi}_{1.75}$ と Si (111) のエピタキシャル関係からは説明できない。従って観測された構造はなんらかの表面再構成表面あるいは NW 独自の原子構造を反映したものであると考えられる。

原子サイズ接点の研究

(1) 貴金属ナノ接点の高バイアス下における破断

前年度に引き続き、金属ナノ接点の高バイアス下における破断実験を継続している。破断の原因がエレクトロマイグレーション (EM) であるとすると、EM の活性化エネルギーが経験的に融点に比例することから、破断の電流密度は融点の高い Pt, Mo では高く、逆に融点の低い Al では低くなることが予測される。そこで今回 Pt, Mo, Al 接点を対象として実験を行った結果、Al 接点の破断電流密度は確かに貴金属の場合よりも低くなるものの、Pt, Mo 接点の破断電流密度も同様に低いことが判明した。従ってナノ接点の破断は、金属の融点とは相関を持たないようである。ただし Pt, Mo ナノ接点の場合には断面積評価に難点があり、正確な破断電流密度を知るためにには、必ず信頼性の高い断面積評価法を確立することが先決となっている。

(2) MCBJ による多層カーボンナノチューブの電子伝導実験

前年度から開発を進めていた MCBJ (機械制御破断接点) が順調に稼動し、多くの優れた成果を挙げている。多層カーボンナノチューブについては、コンダクタンスのバイアス依存性 (G-V 特性) を測定し、直線的な G-V 特性を得ている。この G-V 特性は、チューブの電子伝導がパリスティックであるとする考え方と良く整合している。また電極間距離を変えたときの低バイアスコンダクタンスの変化から、チューブと電極間の接触抵抗が全体のコンダクタンスに大きく影響していることを明らかにした。さらにバイアスを増加させてチューブを「焼き切る」実験を行い、ほぼ一定のバイアス電圧でチューブ破断が起きることを見出しているが、これについては未だ妥当な解釈を得るには到っていない。

(3) MCBJ による貴金属ナノ接点の温度評価

高バイアス下に置かれた金属ナノ接点では、電流による接点加熱が重要になる。ナノ接点の温度を直接測定することは困難であるが、接点原子の熱運動に伴うコンダクタンスの 2 準位揺らぎ (TLF) を測定すると、その周波数から接点温度を推定することができる。我々はナノ接点を保持できる MCBJ の特徴を活用して、金ナノ接点のコンダクタンス TLF を 77 K で測定し、その周波数のバイアス依存性から接点の加熱の有無を検証する実験を行った。その結果、少なくとも 1.6 V までの電圧では、顕著な接点加熱の影響は認められなかった。この結果は Todorov らによる理論的な予測と一致している。金以外の金属についても現在研究を進めており、さらに 4 K での実験も計画中である。

教授 酒井 明

助教授 黒川 修

国際融合創造センター

材料デザイン分野

構造用複合材料、超伝導複合材料、多相金属材料、半導体を対象に、ナノ・メゾ構造と機能・特性の相関の実験と解析による解明と、それら成果をベースにしたモデル化・シミュレーション法の開発に注力し、以下の成果を得た。

構造用複合材料の力学挙動

$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}$, SiC/SiC などのセラミック複合材料は高温軽量材料として、宇宙航空機、ガスジェネレータなどへの応用展開が期待されている。本研究では、将来の実用化に向けて基礎データを収集し、基礎的観点から破壊メカニズムを把握し定量化を図り、材料設計や安全・信頼性設計につなげることを目指している。

$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}$ 複合材料については、室温から 2023 K における切欠強度・破壊靭性の変形速度・温度依存性を実験的に調べるとともに、昨年度得た高温変形データおよび有限要素法計算と組み合わせて、そのメカニズムを探った。図 1 に測定結果を示す。この結果は、有限要素法計算結果から、き裂先端の小規模降伏現象・リガメント部の全面降伏現象の温度・時間依存性で説明できることを初めて示した。

連続繊維強化セラミック複合材料 (SiC/SiC) については、高温大気暴露による劣化のメカニズムを明らかにするため、結晶化繊維の大気暴露劣化挙動を調べた。熱安定性に優れるとされる結晶化繊維においても表面酸化、酸化膜下のポイド形成等を原因とする劣化が進行することを明らかにした。

超伝導複合材料の力学的挙動とその超伝導特性に及ぼす影響

長伝道複合線材は作製・使用時に機械的・電磁気学的応力場におかれる。そのため、変形・破壊挙動とその超

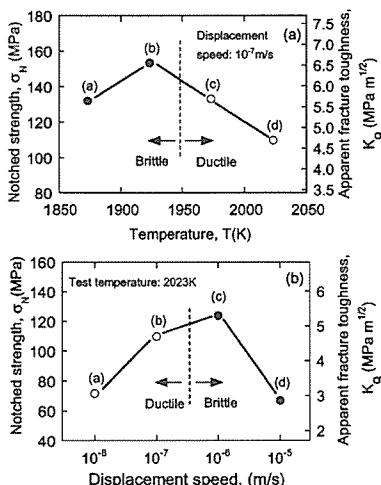


図 1 切欠強度・破壊靭性の変形速度・温度依存性（測定結果）

伝導特性に及ぼす影響の把握は信頼性・安全性・耐久性の確保に向けて重要な課題となっている。Bi2223系超伝導複合材は、コイルに巻くとき、曲げ応力が負荷される。本研究では曲げ応力により導入される損傷の種類・量とその臨界電流に及ぼす影響を調べた。損傷の種類には、フィラメントの横割れ、縦割れ、フィラメントと安定化銀の界面のはく離、圧縮部でのフィラメントの座屈があること、図に示したように、引張応力部と圧縮応力部での損傷量の曲げひずみ依存性から臨界電流を曲げひずみの関数として予測できることをあきらかにした。

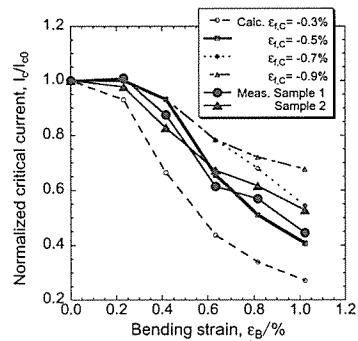


図 2 臨界電流の曲げひずみ依存性とモデル解析結果

埋め込まれた Ge ナノドットの GI-SAXS による構造評価

Si 基板上に GS-MBE で成長した Ge ナノドットを Si で被覆した試料を新たに作成し、その形状などの構造・組織の特徴を GI-SAXS により解析し、MBE 成長 Ge ナノドットと比較した。得られた形状は MBE による Ge ドットよりはるかに扁平であることが² 2次元 SAXS 強度の解析から明らかとなった。GI-SAXS による形状解析結果を断面 TEM 観察と比較した結果、サイズ及び形状とも両者は良い一致を示すことがわかった。一方、TEM 像では困難であるナノドットの界面相互拡散の状況に関しても GI-SAXS の解析の結果、MBE の試料より狭い相互拡散層が存在することが明らかとなった。

Zr 基バルク金属ガラス材料の異常小角散乱法による構造評価

前年度のガラス溶接材用の検討より、ガラス状態での材料中に安定性の高いクラスター構造が存在することが明らかになってきた。そこで本年は組成の異なる 2種類に対して酸素ドープ量を系統的に変化した試料について、未熱処理の金属ガラス中にクラスター成分が存在するか否かを Zr の K 吸収端での異常小角散乱によって検討した。昨年度の結果と比較するとクラスター成分はかなり弱いが、ほぼ同じサイズのものが存在すること、また作成履歴によりクラスターの性格が異なることが示唆された。

教授 落合庄治郎
助教授 奥田 浩司

会報

エネルギー科学研究科教授 石井隆次先生は定年退職された。

石井隆次先生より退職に際して隨筆を頂きましたので掲載します。(水曜会編集)

はじめに

私が京都大学工学部航空工学科に入学したのは、昭和36年（1961年）でした。当時は新幹線も無く、特急「つばめ」で実家の近くの三島駅から京都まで多分7~8時間かかったと思います。丁度、京大の教養部が宇治キャンパスから吉田二本松町（現吉田南）キャンパスに移った年であり、入学当初から毎日時計台を見ながら勉強をしてきました。その後、修士課程、博士課程に進学し、10年かかって同学科の助手に就任しました。その後は研究と教育に専念し、32年間教官として京都大学の中ですごしました。私の生き方の信条は、「前を見ろ、決して後ろを振り返るな。」でした。結果的にそれなりの知識の習得や研究成果を得る事ができたと思う反面、自分の過去の記憶のかなりを失ってしまったように思います。この生き方は現在も変わっていませんが、この平成17年3月で定年を迎え、32年ぶりに過去を振り返ることになり、自分の人生の節目に起きた決定的な出来事のいくつかが思い出されます。

大学入学前

私は昭和16年（1941年）の生まれですから、当然ながら戦後の混乱期の真ん中で小学、中学そして高校の学校生活を送っていました。ほとんどの生徒の家では毎日生活すること、すなわち食べていくことに精一杯の経済状態で、とても高校や大学をめざした勉強は不可能であり、また現実にも考えられない状態でした。私自身、小中学校時代には勉強机さえありませんでした。両親共に昔の小学校しか卒業しておらず、したがって学校から帰ったら家の農作業の手伝いをし、その合間に近所の友達と相撲、水泳、缶蹴り、草野球などの遊びをしてすごしておらず、ほとんど勉強はしませんでした。その当時の私の通信簿の成績は5段階評価で2と3だけでした。今の私の家族は私のことを「捨て育ち」とよく言います。漢字は当用漢字の半分も正確には書けないし、その筆順もかなりでたらめです。しかし漢字の読みは大學の教員としてまったく不自由したことはありません。私は両親から1度も「勉強しなさい」といわれたことがありませんでした。小学校の6年の時、私の兄は中学3年生で、家には兄が勉強に使った数学の参考書が何冊かありました。それらの中から解けそうな例題問題を深い意味も知らずに片っ端から解いてみました。問題文の意味の分か



京都大学名誉教授 石井隆次先生

らない漢字は辞書を引いて調べました。田舎の学校のことでもあり、約1年間で算数の成績は学年でトップになりました。中学に進学してからも兄の残した参考書や問題集を独学で勉強しました。どうしても分からぬ問題は、朝早めに学校に行き、職員室で数学担当の杉山先生に毎日20~30分ぐらい教えてもらいました。さらに杉山先生の数学の時間には、私だけは高校の受験問題を自習することを許していただきました。ただ、私は授業で出される宿題は必ずやっておきました。必ず授業のはじめに先生は全ての生徒のノートを調べ、宿題をやっていない生徒には軽く拳骨で殴ることがよくありました。私は3年間この杉山先生に数学の授業を受けたわけですが、多分1年の中ごろからだったと思いますが、授業開始直後の宿題のチェックを私だけにはしなくなりました。宿題の回答のノートを用意している私の所はすーと素通りして次の生徒の所に行ってしまうようになりました。「自分は先生から信用されている」と感激し、以後数学だけは猛勉強しました。間違いなく杉山先生との出会いが私のその後の進路を決定的にしました。「教育者」のあるべき一つの姿を見たような気がします。

学生時代

大學に入学後、修士課程までは自分なりに順調だったと思います。博士課程に入った直後に大學紛争がおこり、私も当時の研究室の封建的な体質に翻弄され、研究室で孤立し、悩んだままオーバードクターを3年やりました。

この時期が私の大學生活で一番苦しい時でした。この私の苦境を救ってくれたのが大學入学当時からの親友で、同じ下宿にいた土木工学科の岡本厚君でした。彼は私の主張にそれなりの分があるとして、私の属する航空工学科の主任と掛け合ってもらって、私を助手に採用することを了承させてくれました。その後は学科は違っても同じ下宿にいたので、共に48歳まで助手、その後助教授になりました。彼がいなかつたら、多分私は、民間企業に入り、大学での負の思い出の中で失意の人生を送っていたと思います。残念なことに、岡本厚君は7年前に助教授のまま心筋梗塞で亡くなられた。ただ、彼の長男が現在彼が属していた地球工学科に在籍していることは救いです。

航空工学科時代

航空工学科の推進工学講座には、神元五郎教授退官後は長く教授不在の状態が続いていましたが、15年前に森岡茂樹教授が筑波大学から移って来られ、私を48歳の時に助教授にしてくれました。丁度そのころ数値流体力学が盛んになり、航空工学科の松田卓也助教授と数値解析、また梅田吉邦助手と超音速流の可視化実験を協力して行い、この当時の研究が最も面白く、充実した研究成果が得られたように思います。松田助教授は現在は神戸大学大学院理学研究科の教授であり、梅田吉邦氏は本年3月に私と共に定年退職しました。梅田、松田両氏とは現在も協同研究を続けています。さらにこの当時資源工学科の八田夏男教授と研究を通して知り合い、固・気混合流体の超音速および亜音速の噴流の実験及び数値解析の協同研究も行いました。八田先生は教育者としても研究者としても極めて純粹で特異な人でした。教育のために優れた教科書を書き、講義も熱心でした。研究も常に新しい領域に挑戦し、多くの優れた研究成果を残しました。学会活動や無用な役員会などは研究・教育のさまたげになると考え、定年前の数年間を除いて学会発表も一切せず、研究と教育に没頭していました。実質的な教育と研究に関する八田先生の真摯な考え方や姿勢に徹底した信念を感じられ、敬服させられました。

エネルギー科学研究科時代

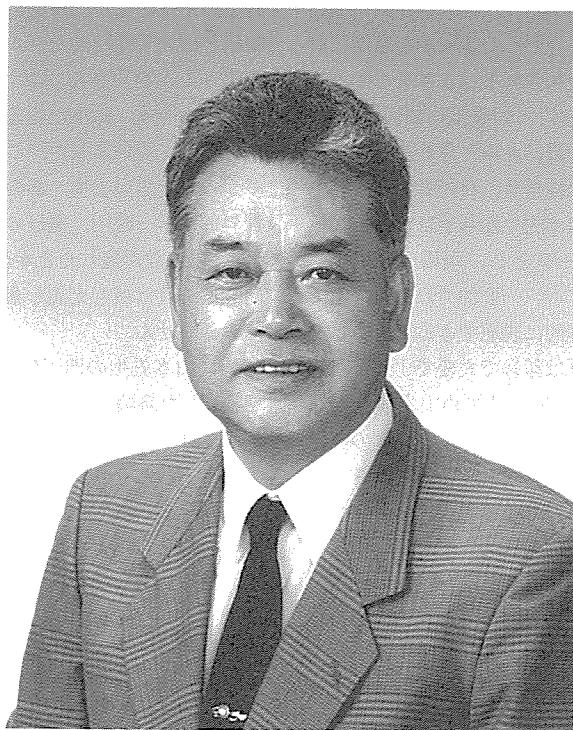
上で述べたように、私が航空工学科で数値解析を行っている当時、資源工学科の八田夏男教授は数値解析の教科書を書いておられ、たまたま私の超音速流体力学の実験と数値解析に大変強い興味を示され、ミスト冷却の協同研究をはじめました。その後も資源工学科やエネルギー科学の分野の幾つかのテーマで共同研究を行いました。後にエネルギー科学研究科が設立された時にエネルギー応用科学専攻に宇宙資源エネルギー学分野ができました。その後担当の中広教授が退官されて、後任の教授を公募することになり、八田先生から私が適任だから是非応募するに強く勧められ、不安もありましたが応募した結果、採用されました。八田先生や小野先生が暖かく迎えてくれ、終始貴重な助言と励ましをいただき何とか新

しい環境に慣れることができました。しかし「宇宙資源エネルギー一分野」といつてもその内容はあまりに広く漠然としていました。平成10年10月に研究室に移った直後に、不安そうな顔をしていた福中助教授と日下助手に部屋に来ていただき、とにかく各自の研究テーマは一切変更しないこと、しかし各自の研究の共通する部分は積極的に助け合うこと、そして学生の研究指導は3人が分担・協力して行うことを確認しました。私が退職するまでの6年半の間に、幸い一人の落伍者もなく学生を社会に送り出すことができました。福中、日下両先生の存在は私にとって本当にありがたいものでした。多くの大変優秀な学生を教育、研究指導ができ、幸い一人の落伍者もなく社会に送り出すことができました。福中、日下両先生と私が宇宙資源エネルギー一分野として、学生の教育・研究指導に、「見事なチームワーク」を發揮できたことは、私にとって何よりも幸せなことでした。ただ、私の最も尊敬する先輩である八田夏男名誉教授が5年前に突然肺癌でなくなられたことは、今の私には一番つらいことです。亡くなる1週間前、日本文理大学から実験中に胸の骨を痛めたらしいので、一度京都に帰り京大病院で精密検査をする予定であるとの電話がありました。そのとき「もし結果が悪いときは書きかけの論文の完成と文理大の学生の研究指導を私に頼む」としっかりと口調で話されていました。しかしそのわずか1週間後に他界されてしましました。多分、八田先生が存命であれば、いまの私の境遇もかなり違ったものになっていたと思います。

こ れ か ら

44年間在学・在職した京都大学を定年退職してから、約4ヶ月が過ぎました。「定年退職」迄はと私なりにかなり無理してきたこともあり、心身共に過労状態です。とりあえず午前中は水泳をし、午後はワークステーションの操作の練習と、体力の回復と次の研究の準備につとめています。独立法人となった京都大学は今後外部からの厳しい評価にさらされることになります。しかしその評価基準は必ずしも明確になっていません。結局は大学の個々の教員の努力に帰着する問題だと思います。それでも研究業績や教育効果の評価は短期間でできるものでは無いと思います。特に研究業績の質的評価と教育者としての適格性、更にはそれらの総合判断としての教員の的確性の評価はどうあるべきか、今の自分にもよく理解できません。特に論文の「数」にこだわる評価傾向は、私には疑問に思えます。若い教員が独創的な研究に最低限必要なリスクを冒すことを避け、「論文のための研究」、「昇進のための研究」に走る事に強い危惧を抱いています。在職中、私自身無意識にその傾向に陥っていた事に気づきました。今、一番の喜びは「論文を書くための研究」ではなく、「自分が楽しむための研究」、「研究のための研究」が、自由にしかも十分な時間的余裕をもってできる事です。来月から企業との共同研究を開始し、10月からは別の大学での講義・研究指導も再開いたします。

工学研究科助教授 山本 悟先生は定年退職された。



山本 悟先生の御略歴

山本悟先生は、昭和40年3月京都大学工学部冶金学科を卒業後、京都大学工学研究科修士課程冶金学専攻修了を経て、同45年3月京都大学大学院工学研究科博士課程冶金学専攻を単位取得の上、退学された。同年4月京都大学工学部助手に採用され、平成15年2月に京都大学工学研究科助教授に昇進し、同17年3月に定年退職された。なお、昭和46年1月には京都大学より工学博士の学位を授与された。

この間長年にわたって京都大学の学生の教育と研究の指導にあたり、多くの人材を育成された。その間、多くの国際会議に参加し、また外国の大学において共同研究や学生、研究者の指導を行って、国際交流にも努力された。

研究の方面では、まず、金属・合金の時効析出の電子顕微鏡による研究、マルテンサイト変態の結晶学的研究に取り組んだ、つぎに鉄におけるセメントイトの黒鉛化と合金元素の影響機構の解明や黒鉛の結晶学的研究を行った。特に球状黒鉛の球状化機構として「気泡説」を提唱し、招待講演として国際会議で報告した。コンピューターが研究室で使えるようになるといち早く研究に活用し、波動方程式を解いて金属・合金の問題をもっと基礎的に解明することを考えた。すなわち、分子軌道法(特に拡張ヒュッケル法)を使って、電子の挙動を追跡し、電子と光子の相互作用という新たな視点から金属・

合金の結合—構造—物性—反応の解明を行い、合金の時効硬化—時効軟化、加工硬化—加工軟化などを解明し、金属材料学の再構築に挑戦した。さらに、水素吸蔵材料の水素吸蔵容量、吸蔵速度、吸蔵放出の可逆性の基礎的解明を行った。

応用としては、ステンレス球状炭化物鉄とでも言うべき新材料を開発した。この材料は、ステンレス鋼の「錆びない」という性質と球状黒鉛鉄の「韌性」を併せ持ち、さらに炭化物の耐摩耗性をも有するため、耐食性と耐摩耗性とを同時に要求される領域で画期的な新材料として活用されるであろう。

山本先生のご退官に寄せて

張 博

山本先生がご退官されると知りながらも、何も出来ないでいる小生としては山本先生に心から感謝するばかりです。何故ならば、小生の研究生活はもとよりこれまでの鋳造現場での実践活動(新技術の開発そして不良対策)を振り返れば振り返るほど、山本先生から得た影響が極めて大きいからです。ややもすると、各種“新材料”的研究開発が脚光を浴び、“ものづくり”が大切だと言われながらも、多くの鋳造研究者の不甲斐なさのために鋳

造、特に鋳鉄は縮小、切り捨ての対象とされているのが現状です。もちろん、その原因是「球状黒鉛鋳鉄の黒鉛が何故丸くなるのか」をはじめとした基本的な疑問に対する答えや、鋳物の製造で提起されるさまざまな問題を解明する努力が意外になされず、「鋳鉄は信頼性がない」という評価を生んだ事情が背景にあると思われます。小生が現在、鋳造現場で多くの技術者、技能者から厚い信頼を受けていられるのは、山本先生から手ほどきを受けた鋳鉄製造の基礎理論をベースとし、現場で遭遇する色々な現象、問題点に対しても、一面的ではなく、全てについて統一的にそして合理的に説明できることを旨としてきたからです。今年の夏は猛暑で大変ですが、三日連続38度に達する中、山本先生をはじめ山本研究グループ全員で「黒鉛の球状化理論としての気泡説」の実証実験に取り組んだことが今でもはっきり思い出されます。おそらく、その時に何事にも中途半端にならず、とことんまで追求しようとする山本イズムが小生の中にしっかりと根づいたのだと思います。これから、広い分野で鋳鉄が信頼性を拡大し、諸材料との競争に勝ち抜くためにも大いに山本イズムを活かして行くつもりです。誠に勝手ですが、山本先生はご退官されましたのでこれからは小生が抱える多くの難問題の解決にご協力を賜りたいと思います。山本先生、本当にご苦労様でした。

(有限会社張技術事務所)

山本悟先生のご退官に寄せて

久保田 耕 平

山本先生と、初めてお会いしたのは、おそらく三回生の電子顕微鏡の学生実験の時で、装置の説明の後、電子線回折の写真を渡されて、解析するよう言われたまま「放置」された覚えがあります。当然、これは先生の記憶にないことでしょうが、何も教えてくれない先生というのが最初の印象でした。

その私が、村上陽太郎先生の研究室に配属され、そこで実施する卒業研究テーマの内容を研究室の各先生から説明を受けた時、思案することもなく山本先生の指導を受けたいと強く希望したのは、今、思っても不思議です。当時の私に、山本先生の研究内容が判るはずもないのに、恐らく新しい学説を生み出そうとする意欲や情熱を感じたとも言えますが、結局、そんな格好の良いものでなく「単純にやってみたい」と思つただけだったと思います。この時、今は横浜国大の教官となっている同期の竹田君も山本先生の指導を強く希望したのですが、定員は一名、どう巧く言いくるめたのか、首尾よく私の方が山本先生の研究グループに滑り込むことになりました。

当時、山本先生は「球状黒鉛鋳鉄の気泡説」という独

自の学説の検証を精力的に進めており、先生の周囲には村上研だけでなく、鋳造冶金の川野研及び鋳造加工の尾崎研と研究室横断的なグループを作っていました。博士課程に張さん、西川さん、李さん等、修士課程に安田さん、熊沢さん等々、錚々たる先輩が寝る時間を惜しんで実験に打ち込んでいました。この先輩達から教わったものも多かったと思います。あの頃の学生の研究室滞在時間は驚異的で、一晩中、電灯の消えることはありませんでした。が、何故か疲れたとか辛かったという思い出はなく、研究室時代は最も充実し楽しかったという思いしか残っておりません。

特に山本先生の門下生にとって、先生との実験データを前にした議論というのは思い出深いものがあります。山本先生は学生と徹底的に議論しました。私達の言うこと、考え方をじっくり聞いて、順に論破していきます。それは時間を忘れてです。朝から夕方までぶっ通しで、昼食を食べながらも議論していました。横から見ると氣狂いじみていたのでしょうかが当人には大変楽しかったものです。

そして、先生は、本質的なことを聞いてきます。「温度とは何か」「平衡とは何か」、「君は何をもって正しいと判断するのか」「何をもって分ったとするのか」ほとんど哲学の世界にまでいくのですが、先生との議論の後、少し賢くなったと言うか、新しい見方を知ったというか、つくづく先生を尊敬したものです。山本先生は、教えてくれない先生どころではなかったのです。

山本先生の研究テーマは、この頃「球状黒鉛鋳鉄の気泡説」から「不確定性原理を基礎にした新しい反応速度論」へ移行していく時期で、これは既存の理論を根底から打ち破ろうとする野心的な試みでした。こうした新進気鋭の先生が新しい理論を生み出す現場に立ち会えたのは本当に幸運だったと思います。

卒業後、この研究の展開にも大勢の人が集まってきたました。京大の田辺先生、先輩になりますが住軽金の吉田さん、東大博士課程の塙さん、同期で阪大の博士課程に進んだ竹田君。山本先生、田辺先生を中心に「物理懇話会」を作り京都で泊りがけの勉強会を続け、その成果は分厚い冊子になっています。その後も「ステンレス球状炭化物鋳鉄」など先生のやる研究には何時も多くの研究者や企業が集まり情熱を燃やしました。

実は今日も先生の退官時に出された二冊の大著と格闘を続けています。そして一生の師と京大で出会えた幸せを噛みしめています。 (三井金属鉱業株式会社)

山本悟先生のご退官に寄せて

吉田 英雄

山本先生とは、私が学部時代からのお付き合いです。

確か、村上陽太郎研究室では助手として指導された2番目の学生かと思います。当時、先生は120kV電子顕微鏡を用いて新しい研究を開始されていた時期でもありました。私はこの電子顕微鏡に惹かれて村上研究室を希望しました。しかしながら、私自身、大学紛争の最中、冶金学科に入学はしたものの、高校時代の数学や物理学での体系化された学問を勉強してきた者にとってはあまりにも経験的知識が中心の講義で、いささか失望を覚え、大学を卒業したら別の道を歩もうかとも考えていました。そんな時に、先生に進路を相談したところ、先生は、金属学は古くからの経験を積み上げてきた学問で、体系化されたものではない。現象が複雑すぎて、原理的に説明されていないことが多い。学問とは、体系化されたものを学ぶことだけではない。むしろ金属学は混沌として矛盾に満ちているからこそ研究する価値があるのだと言われました。この言葉にショックを覚え、学問とはそういうものなのか思い直し、大学院を受験しました。今日、私がアルミニウム材料の研究者として何とかやってこられたのは、この先生の言葉のおかげです。

先生のこの考え方、あらためて現時点でみても一貫しているものと思います。金属学の原理原則は何かということを問い合わせていった結果が、最近出版された、「デモクリトスの原子論と材料学」(2005)ではないかと考えています。もちろん、ここにまでくるには、反応速度論を突き詰めていった結果、不確定性原理に到達し、そこから新しく理論を構築した「新しい反応速度論の試み」(1979)、田辺先生と共に著で、エネルギー、エントロピー、温度の基本概念を深く検討し、量子力学、古典力学、電磁気学、熱力学の相互関係を明らかにした、「エネルギー、エントロピー、温度—素粒子から宇宙まで—」(1981)、その哲学的背景を認識論まで遡って検討した「科学と認識構造」(1984)、それらの基本概念をベースに構築した「新しい材料科学—量子力学に基づく統一的理解—」(1990)と理論的な発展があった結果です。このように金属学を経験の集積から、現代の科学の成果をもとに学問しての体系化を目指されてきた姿勢は、若き頃から一貫しています。

また、先生は決して机上の理論家ではなく、とても実験を大事にされ、実験事実を深く観察された上で仮説を立てられ、従来の理論の限界を探った上で、新しく理論構築をはかる研究者でもありました。私の学生時代の卒論で取り組んだ衝撃変形によるセメントタイトの黒鉛化では、通常の高温での熱処理では白銑はなかなか黒鉛化しませんが、高温での強加工の衝撃変形で即座に黒鉛化が生じるといった問題は、セメントタイトの分解が黒鉛化の律速過程であることを示す実験もありました。こうした実験事実は従来の熱活性では解釈できないため新しい

反応速度論を構築されました。大学院時代の研究テーマは、鉄中の黒鉛の内部構造を電子顕微鏡を用いて解明することでした。ここでも先生の先見性は遺憾なく發揮されました。当時、球状黒鉛鉄中の黒鉛は何故、球状化するのかといった問題に対して、従来からの核説では球形であることを説明することは難しく、むしろガスによる気泡が先に形成され、その中に黒鉛が成長する機構を先生は考えられました。この考え方を実証するために、尾崎良平・川野豊両研究室と共同で、鉄の溶湯中に炉の底からガスを吹き込む実験を何回となく行い、黒鉛が球状化するのを確認しました。私もこの実験にも立ち会いましたが、むしろ、いろんな形状の黒鉛の電子顕微鏡観察を中心に行いました。黒鉛自体は基底面が成長して平板になるが、その気泡界面や他の黒鉛結晶によって成長が阻まれ、双晶を媒介にしてC軸方向へ成長していくことを明らかにしました。これらの成果は「球状黒鉛鉄—基礎・理論・応用—」(1983)にまとめられています。この本は多くの方々の共同研究の成果ですが、黒鉛化、球状化の理論体系を作られたのは山本先生です。

先生は無類の議論好きです。私の大学院時代は電子顕微鏡が中心であったので、静かな夜中撮影して、昼前でてくるという生活でしたが、一度先生に捕まろうものなら、昼飯はお預けで何時間も議論につき合はうはめとなりました。しかし、この経験は、それ以後の私の研究の基礎を考える上で、講義以上に有意義なものでした。ポーリング、ヒューム・ロザリー、エンゲル、ブリュワーなどの著書、論文を中心に金属結合について議論できたことを本当にありがとうございます。議論の対象は、多分時代によって違ったものだと思います。

就職してからは、私もアルミニウムの研究では一人前の研究者になろうと思い、大学の先生方や後輩たちと「物理懇話会、—結合・構造・物性：反応—」をつくり、材料学の基礎について議論する機会を作っていました。この研究会で、結晶粒界、加工熱処理、超塑性、加工軟化などの基礎について議論したことが、その後のアルミニウム材料を開発する上で大いに役に立ちました。

企業の研究者は、日々接するさまざまな現象について、製造現場からあるいは自らの実験結果に対し、なぜ生じるのか、を問われています。製造現場では従来の「理論」では説明のつかない混沌とした現象も多く、これらの現象に対して、原理原則を考え、次の開発に繋げる指針を必要としています。山本先生の構築された結合、構造、物性、反応論に基づく材料学は日々接する現象に対し、考えるための方向性を与えてくれるものと確信しております。今後、更なる発展を期待しております。

(住友軽金属工業株式会社)

平成17年度水曜会大会

- 日 時 平成17年6月11日（土曜）12：00－16：30
- 会 場 京都大学百周年時計台記念館

平成17年度水曜会大会は、6月11日（土）に京都大学百周年時計台記念館にて開催され、懇親会、記念撮影、総会、および特別講演会が行われた。当日はあいにくの雨模様で、近畿地方の梅雨入りが発表され蒸し暑い一日であったが、平成15年に創立100周年を記念して美しく改修再生された時計台での開催であったためか、昨年度を上回る約80名の参加者があった。

懇親会は、記念館2階南東側の国際交流ホールⅠにおいて、午後12時からおよそ1時間開催された。馬渢守教授の司会のもと、まず牧正志会長の開会の挨拶があり、ついで村上陽太郎名誉教授の音頭で乾杯が行われた。料理は京大生協にお願いして、正門東側のカフェレストラン「カンフォーラ」から運ばれたもので、和洋折衷のビュッフェスタイルであった。天井が高く明るい部屋で、会は和やかな雰囲気のうちに終了した。

天気がよければ、クスノキと時計台を前に記念撮影を予定していたが、雨は止みそうになく、懇親会場の窓辺に設営したひな壇を使っての撮影となった。撮影は吉田神社前の中尾写真場にお願いした。その後、会場を隣の国際交流ホールⅡに移し、13時45分より総会が開かれた。総会は、栗倉泰弘教授の司会で進められ、まず、牧会長から平成16年度の事業報告ならびに教室の人事異動などの近況報告があった。ついで、田村剛三郎会計幹事の代理の栗倉教授から会計報告、青木謙治会計監事の代理の齋藤敏明教授から監査報告がなされ、いずれも承認された。続いて、次期役員の推挙がなされ、新会長に芦田譲教授、新副会長に栗倉泰弘教授が選出された。芦田新会長からご自身の研究を交えた就任の挨拶と抱負が語られ、総会は終了した。

同じ会場で引き続いて、特別講演会が開催された。本年度は以下の2件の講演が行われた。

「自動車のグローバル化とともに改革」

アイシン精機株式会社 副社長 林 稔氏（昭和41年冶金卒）

「地震・津波・火山噴火現象と物理探査」

京都大学工学研究科 講師 三ヶ田均氏

これらの内容は「大会記念講演」として本誌にご寄稿いただいているので、詳細はそちらにゆするが、林氏の講演では、部品の設計調達から最先端のシステムに至るまで、人への優しさと環境への優しさを両立させ、自動車産業を支える種々の取り組みが紹介された。なかでも、燃費効率の高いAutomated Manual Transmission (AMT)、横滑り防止のための Electronic Stability Control (ESC)、自動駐車を実現する Intelligent Parking Assist など興味深い新技術について、写真や動画も交えた話があった。三ヶ田氏の講演では、日本人にとって非常に身近な自然災害である津波、地震、火山噴火について、その発生原因、伝達作用、および人的物的被害に至る過程の素人に分かりやすい懇切な解説があった。「津波でんでんこ」に代表される災害時の教訓もさることながら、普段我々が認識していない海底地形や地質の探査の重要性が再認識される内容であった。いずれの講演も説得力のあるもので、参加者は熱心に傾聴した。平成17年度水曜会は、2件の講演が終了した後、午後4時半に散会した。

平成16年度水曜会会計報告

平成17年3月31日現在

収入	支出
前年度繰越金 9,277,241円	会誌印刷代(製版・郵送料込)
会費 3,729,870	23巻7号 2,676,569円
会誌広告掲載料(製版代込)	印刷代(封筒他) 46,099
23巻6号残り 83,780	水曜会大会経費(16年6月12日)
23巻7号 514,725	懇親会 257,761
会誌論文別刷代 37,800	諸経費 909,475
名簿広告掲載料 785,505	名簿発行費(平成16年版) 3,344,820
名簿売上 1,941,800	編集委員会経費 47,300
会誌売上 10,500	会誌原稿料 131,000
水曜会大会懇親会費 275,000	新入生歓迎行事援助 26,720
預金利息 1,291	通信費 92,650
	事務人件費 536,440
	文具、コピー代等 52,834
収入合計 16,657,512円	小計 8,121,668円
上記の通り会計中間報告致します。 平成17年6月11日 会計幹事 田村剛三郎 以上の通り相違ございません。 会計監事 青木謙治	次年度への繰越金 8,535,844円 内訳 銀行普通預金 890,473 銀行定期預金 6,500,000 郵便振替預金 1,039,544 手持現金 105,827 支出合計 16,657,512円

会員消息

2004年度 近藤研・朝木研・河合研究室 合同OB会開催報告

標記の3研究室合同OB会を平成16年12月26日に百周年時計台記念館第III会議室において37名にて開催いたしました。前回平成14年のOB会にて平成16年中に行うことを予定していた会を、昨年より公開になった新生時計台にてとりおこなったものです。近藤先生の新著紹介、朝木先生の熱弁報告および河合先生の研究室現況紹介と続き、教官OBが一人一言ずつ「うろうろ」と話される機会もございました。会の最後には幹事の石井様のご尽力により、今は迎賓室となっている総長室や、時計台内部から屋上まで見学させていただきました。在

学中でも見られなかった場所に一同感激いたしました。写真は携帯電話にて時計台屋上より東向きに撮影したもので旧6号館、工学部総合校舎と吉田山とこの角度で見られるのはここしかございません。次回は近藤先生のご発案で舞妓さんをお呼びして踊っていただくことになりました。真偽の程はご参加くださってお確かめください。

なお連絡先が未だ不明の方がおられますので、ご存知の方がおられましたら幹事（石井秀司助手、hideshi.ishii@materials.mbox.media.kyoto-u.ac.jp）まで連絡をお願いいたします。幹事様、事務局の方々、出席なさった方々とも本当にご苦労様でした。

(66年卒福田光弘、84年卒嶋田利生)



OB会のようす（OB会の他の写真は
<http://www.process.mtl.kyoto-u.ac.jp/>
からみることができます）



時計台屋上から望む旧6号館、工学部
総合校舎と吉田山

赤煉瓦教室の思い出

卒業（昭和26年）から50年余り過ぎると、体調をくずしたりあちらへ旅立っていった旧友も増えている。一昨年舟橋市に住む佐原君とたまたま逢う機会があった。

卒論を仕上げるより絵を描くことに寸暇を惜しんだ彼だったが健在で、昔をいろいろ語り合った。仕事の傍ら画業を続けていることは毎年の年賀状で分かっていたが佐原邸で大小様々な力作を拝見しもはや画伯の域ではないかと感じ入った。話がはずみ、かってわれわれが通った赤煉瓦教室を描いてくれることになった。

ところが参考にしたいお目当ての場所を撮った写真が

無く、港先生や西山先生のお手を煩わしてようやく資料ができた次第。それでも一部は思い出しながら描いてもらうことになり、ついでに欲も出て教室からは見えない比叡山も入れてもらった。そして出来上ったのがこの絵である。

参考にした京都大学百年史写真集によると、採鉱冶金学科教室の建物は1897（明治30）年の大学創立時にこの場所に建てられ、その後増改築があって1925（大正14）年頃撮影された写真では絵と同じ構造の煉瓦造りになっている。

さて、この絵を見ながらわれわれ学生の頃の様子をふり返ってみよう。絵には建物の北半分が描いてある。右

下にある入口が建物の中央で、左に「鉱山学教室」右に「冶金学教室」の看板が掛けてあった。並んでいる窓は二階西側の部屋で、東側が廊下になっている。鉱山と冶金が建物をどのように使い分けていたか覚えていないが、絵に描かれている窓の部屋は全部われわれ鉱床研究室が使っていた。

一番左の部屋が鉱床実験室、ここには数台の顕微鏡と岩石研磨機それにハンマーとタガネ、冬にはダルマストーブが主な備品だった。薄片作りと顕微鏡観察で鉱物鑑定とか、晶出順序などを調べていた。卒論の締め切りが近くなってくると皆夜遅くまで頑張ったものだ。

次の部屋が故鈴鹿恒茂先生の部屋だった、その隣が分析実験室でガラス器具や電気炉が並んでいて、鉱物組成などを調べていた。われわれ6人の卒論生は鉱床と分析の両実験室で勉強したわけだ。

那次が故瀧本清先生の部屋で、入る時は廊下を2～3度往復し深呼吸してからノックした。港種雄先生や故井上正康先生はいつも実験室に居られたように思う。廊下の北の突き当たりに一部屋あり、そこに物探の故伊藤一郎先生が居られた。

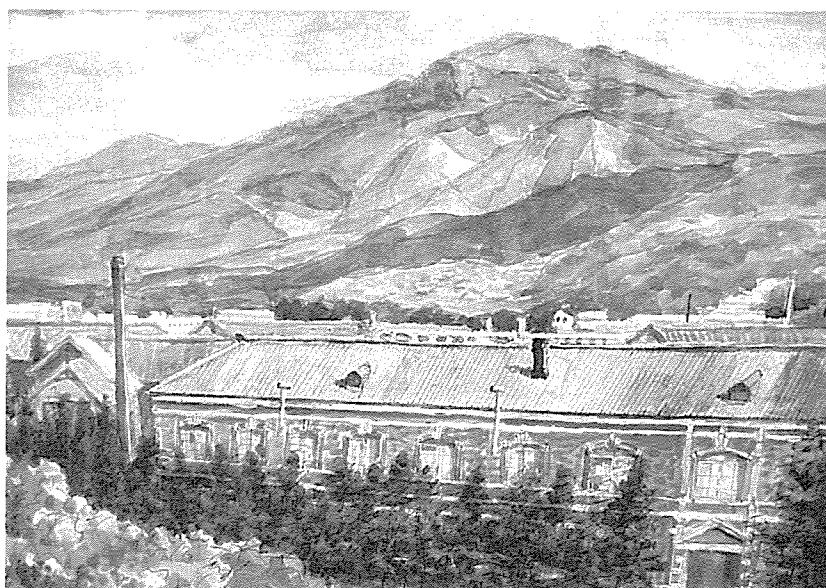
廊下の中ほどに背の低い標本戸棚があって、その左端の引き出しにカキの化石が入っていた。これが別棟標本館の鍵入れであった。井上先生がこれを使ってもよいと言つて下さっていたので、卒業前にその鍵を持って何度も標本館に入った。その頃話題になっていたウラン鉱石の標本を見つけ、手にとってつくづくと眺めたことを思い出す。多少被爆したかも知れない。

冬のストーブに使う石炭はバケツに入れて階段を運んでいたが、そのうち知恵がついて窓から紐で吊り上げることにした。手のあいた者の作業だった。先生方の部屋にいた二人の若い女性事務員も手伝ってくれた。石炭は建物の北側、煙突横の置場から運んだ。

絵には描かれていない建物の右の方には選鉱研究室があったように思う。物探、採鉱、鉱山機械などの研究室はこの建物でなく別の場所にあった。

この絵を見ていると、上記のほかあれこれが浮かんできて、当時の若さが戻ってくるような気がする。昭和も遠くなりつつある昨今、思い出の学舎の絵に目をとめていただければ幸いである。

(長原正治)



昭和26年鉱山学科卒 佐原 猛筆 鉱山学教室水彩画

昭和30年度 治金学科卒業
50周年記念祝賀クラス会

平成17年4月15日、京都大学工学部冶金学科昭和30年度卒業生の卒業50周年記念祝賀クラス会が、京大時計台記念館において、恩師・村上陽太郎先生、森山徐一郎先生、近藤良夫先生のご臨席を得て開催されました。該当者20名中、15名が元気な顔をそろえ、盛会であります。

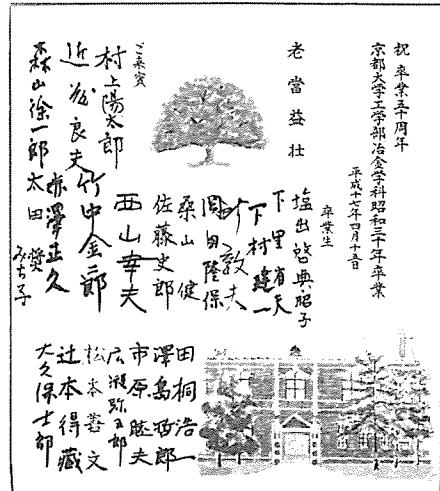
まず、恩師とクラスメートの物故者（3名）のご冥福を祈って黙祷を捧げ、次いで村上先生のご発声で乾杯し、先生方からご祝辞を頂いた後、全員がこの50年の來し方をふり返りつつ、近況を報告し合いました。かつては我が国の高度経済成長を牽引したことを自負する我々ではありますが、今は全員が既に第一線を引退しており、各々悠々自適の生活に入っております。歓談のあと、塩出啓典君（元、参議院議員）の音頭で万歳三唱し、閉会しました。

その後、有志で京大の桂キャンパスを見学し、恵まれた自然環境の中に聳え立つ母校の偉容に感動し、母校の一層の発展を祈念しました。さらにその後、桜花に映える嵐山を訪れ、暮れなずむ京都の春を惜しみつつ、河畔

の「嵐亭」で宴を催し、2年後の再開を誓って散会しました。

一同の感想は“卒業後、50年も経ったのに皆変わっていないいな！”でした。楽しい一日でした。

（幹事、佐藤史郎、岡田隆保）



（イラスト：岡田隆保）



京都大学冶金学科卒業五十周年記念祝賀会 平成17年4月15日 於 京都大学時計台記念館

第1列（左から）太田夫人、太田 獨、近藤先生、村上先生、塩出啓典、塩出夫人

第2列（同上）下村建一、広瀬弥五郎、市原睦夫、下里省夫、竹中金二郎、辻本得藏、大久保士郎

第3列（同上）岡田隆保、所 敦夫、田桐浩一、佐藤史郎、西山幸夫、沢島哲郎

水曜会からのお知らせ

水曜会はこのたびホームページを開設しました。

<http://www.suiyokwai.jp/>

ご利用ください。



水曜会会員 出版図書のお知らせ

[著者] 小池通崇

[題] 安全確保の3原則

—水平展開、リスクアセスメント、安全文化—

[目次]

はじめに

第1章 美浜発電所3号機死傷事故はリスクアセスメントで防げるか？

1.1 美浜発電所3号機死傷事故

1.2 リスクアセスメント

1.3 美浜発電所3号機死傷事故とリスクアセスメント

第2章 安全確保の3原則

第3章 事故はなぜ起きるのか？

3.1 4レベルの防護壁

3.2 本質的安全対策と安全確認型

3.3 リスクゼロの世界はあるのか？

3.4 安全距離と安心

第4章 安全の水平展開（原則1）

4.1 マネジメントシステムと予防処置

4.2 水平展開の方法

4.3 水平展開事例と教訓

第5章 安全のリスクアセスメント（原則2）

5.1 リスクアセスメントの方法

5.2 リスクアセスメント事例と対策

第6章 安全文化の確立（原則3）

6.1 IAEAと安全文化

6.2 行動憲章と倫理規程

6.3 行動規範と「社会的責任」

6.4 安全文化確立の必要条件

おわりに

[概要]

本書は、最新の安全情報をもとに、労働災害等を防止し安全を確保するための重要な3原則を導き出し、それについて具体的に解説を加えた。3原則は、いずれもリスク評価に基づく予防処置に関連している。また、本書はどこから読んでもよいように構成しており、事故はなぜ起きるのかについても解明しやすやかりやすく解説し、「安心」を数式で定義し、リスクゼロの可能性についても触れた。全ての労働に携わる方々及び学生などを対象に書いたもので、労働安全はもちろん、その他の安全にも適用できるように配慮されている。

関西電力美浜原子力発電所3号機で、2004年8月9日に死傷事故が発生した（5名死亡、6名負傷）。8月14日から定期検査が予定されていて、作業員がその準備をしていた。二次系の炭素鋼配管がエロージョン・コロージョンで破損し、流出した蒸気及び高温水に被災した。この事故を契機に、改めて安全確保とは何か、どうしたらこの種の事故を防ぐことができるかを考えた。筆者は、核燃料サイクル開発機構（以下、機構という）の全事業所に、1998年10月以来、事故・トラブルの再発防止・未然防止のために安全に関する水平展開を実施し、また2000年以来リスクアセスメントの普及に努めてきた。

これらの経験をもとに、美浜発電所死傷事故がまずリ

スクアセスメントにより防ぐことができるかを検討した。リスクアセスメントは約25年前から欧米において発達し、日本ではこの10年間に普及しつつあり労働災害減少の手法として注目されている。職場にある危険源を摘出し、人がそれにより被災する障害の程度及びその可能性を、経験に基づいて数値で評価して加算等をし、その値の大きいリスクから優先的に対策を立てていく事前評価法である。簡単で分かりやすい方法が現場では受け入れられている。このときに危険源の表もあり、体系的に網羅的とさえ思える画期的な手法である。したがって、筆者はリスクアセスメント手法を調査し、全事業所に普及していった。

ところが、リスクアセスメントには不完全さがあることに気づいていた。これを、美浜発電所死傷事故をもとに考えてみた。たとえばISO 14121（機械類の安全性—リスクアセスメントの原則）の危険源の表に「高温流体の注入又は噴出の危険源」がある。これを見て、はたして本事故のリスクを摘出できるだろうか？たとえば、酸欠環境の作業では、酸欠の対策は決められていて、リスクはすぐにわかる。しかし、定期検査の準備作業をしていて、その周囲環境の高温二次系配管のリスクに気づくだろうか（もっとも、原子力産業界のほとんど、関西電力でもリスクアセスメントを取り入れていないが）？普通では、気づくのはかなり難しいだろう。リスクアセスメントは非常に優れた手法であるが、発見できないリスクによる事故は、完全には防げないのである。

どうしたら気づくことができるのだろうか。では、これと類似の事故を探してみた。約18年前の1986年12月9日に、美浜発電所3号機とほとんど同じ事故が、米国サリー原子力発電所2号機で発生した（死者4名、負傷者4名）。筆者は、原子力材料・機器の研究をしていたので、米国からの速報が筆者に送られて、その評価と対策についての報告書を書く仕事をした。この事故の対策・教訓を学習していれば、リスクアセスメントにより事故を防ぐことも可能である。また、この事故の教訓をまとめて、全事業所に「予防処置」として情報を与えて、必要な安全対策を指示するならば（これを「水平展開」という）この事故を防ぐことが可能である。即ち、その時の内外の事故等の教訓を水平展開し、地道に対策を立てていくことも必要なのである。リスクアセスメントは体系的・網羅的で優れているが、上記の不完全な部分があり、これを水平展開が補完できるのである。

ところで、これで十分だろうか。職員一人ひとりが尊重されずにやる気がなく、職場に不満を持ち、リスクがわかっていても発言をしないで、社会への責任も果たさなかつたらどうだろう。ここで、組織の基盤としての文化が重要であることに気づくだろう。すなわち、組織の「安全文化」の確立が不可欠となる。「安全文化（Safety Culture）」の概念は、IAEA（国際原子力機関）が1991年にまとめたもので、現在では、この言葉は広く一般産業界でも使われている。

これらリスクアセスメント、水平展開、安全文化の確立を、**安全確保の3原則**と呼ぶ。そして、筆者の経験とともに、これら3原則について各々その効率的な展開の方法を説明し、具体的な事例を図・表をもって示し、そこから得られる安全上の教訓についても示した。

また、これら3原則を効率的に運用していくためには、事故がどうして起きるのか、その原因・対策は何かをよく理解する必要がある。そのために、事故の発生メカニズムについて考察した。例として、 Chernobyl 原子力発電所事故と Three Mile Island 原子力発電所事故の発生メカニズムを考えた。まず、一般に原子力発電所に適用されている安全対策の種類を紹介した。これらの安全対策のいくつかが無効にされて、事故が発生したのである。ここで、ISO 12100（機械類の安全性—基本概念、設計のため的一般原則）の「保護方策」分類に着目し、これらの安全対策と関連付けた。そして、 Chernobyl 原子力発電所等にあたいくつかの安全対策がどのように壊されていくかを示した。この手法を用いると、全ての事故がどうして起きるかが分かり、どうしたら防ぐことができるかが理解できる。そして、人が壊せないようにした、フェイルセーフ、フルプルーフ、「安全確認型システム」などの安全設計の重要性を浮き彫りにした。

次に、3原則を運用して安全確保を達成したときに、科学システムがどのように社会に「安心」を与えるのかについて考察した。例として、産業用ロボットの安全距離について考え、安心と関連付けた。また、危険な物質を取り扱っている施設に対しては、住民は他の施設との比較で信頼度等に差が生じ、精神的な距離が生ずる。この精神的な距離についても論じた。そして、安全対策に安全確認型システム等を適用すれば、理想とするリスクゼロのシステムに近づくことを示唆した。安心を与えるシステムの構築は、システムの面から安全文化的な確立にも寄与することになる。

このほかに、各章の所々に関連付けて、安全上必要とされる知識等を紹介し、この1冊で「最新の安全」が理解できるように努めた。

[著者略歴]

小池通崇（こいけみつたか）

1972年 京都大学工学部卒業（金属加工学科）

1977年 京都大学工学研究科博士課程修了

1978年 工学博士

動燃事業団大洗工学センター（担当役、主管）で新型転換炉材料研究（圧力管照射特性を含む）、核燃料サイクル開発機構安全推進本部（技術主幹）を経て、現在、独立行政法人 日本原子力研究開発機構安全統括部（技術主幹）。

[著書]

『ジルコニウム合金ハンドブック』共著（日刊工業新聞社）

会員通信欄

平成17年度水曜会への返信はがきには、会員の方々から多くのお言葉や近況報告を頂きました。ここにその一部を掲載致します。なお、文章を損なわない程度に表現を変えた部分もあることをお断りいたします。

公荘 惟成（採鉱、昭13）夫婦ともつつがなく過しています。腰痛で昔のように散歩ができません。

高嶋 宏（冶金、昭15）水曜会の名称を承継させ、内容を益々充実し発表することを嬉しく存じます。同年の先輩の減って行くことは淋しい限りですが、若き後継会員のご活躍をお祈り致します。

藤井 成美（冶金、昭16年（12月））多臓器不良で旅行困難。

浅田 幸吉（冶金、昭16）卒業後64年がたち、学術の進歩にはとてもついて行けません。中国鉄鋼の増産が脅威ですね。元気に過しています。

鮫島 正五（採鉱、昭16）高齢のため自宅で静かに過しています。

村上陽太郎（冶金、昭17）お蔭で元気です。毎朝35分程度の速歩と多少の仕事もできて、感謝の日々を送っています。

足立 正雄（冶金、昭17）COPD、肺気腫状態が重症になり外出不可能になりました。（86才）

中尾智三郎（冶金、昭17）水曜会大会案内拝受、元気に過して居ります。

成瀬 光芳（冶金、昭17）病気療養中。

小田嶋 弘（冶金、昭17）昨年秋9月17日家内が病死以後長野市の介護付マンションで健全な年金生活を過して居ります。

盛 利貞（冶金、昭17）加齢のため外出が困難になりました。

有賀 敏彦（冶金、昭17）長生きすると、現役教官は無論のこと会員にも殆んど知己はいなくなりました。学問の動向も全く理解できません。

斎藤 康（冶金、昭18）デイサービスセンターに週4日、お世話になっています。体力低下して車椅子生活でございます。介護認定が3より4になりました。

小山 昌重（冶金、昭18）当方どうにか杖をたよりに散歩をしております。

北村 洋二（冶金、昭18）一人暮しだすが、何かとやっています。周囲は文明の利器に包まれておりますが、会誌を見る度、昔の赤レンガの教室と旧友の顔が浮びます。いろいろ頭の刺激になります。

久芳 正義（冶金、昭18）心不全、腎不全で入退院して

いますが今は元気にはしています。

斎藤 敏夫（鉱山、昭18）お蔭様で元気です。

菅沼 常生（冶金、昭19）高槻中学・高校でまだ現役校長として勤めています。終戦を区切りとして教育界へ入り、55年目（公立32年、私学23年目）で校長として26年目です。もうそろそろ限界です。

下川 敬治（冶金、昭20）毎日自らに課していることを肃々とこなしております。

池田 保（冶金、昭21）現在1～2回／月大阪に出て研究会等に参加しています。身体は元気で1回／週のテニスを楽しんでいます。

佐伯 博藏（鉱山、昭21）年令相応には元気にしており、油絵、旅行等も楽しんでいます。4月には家内と名古屋万博と京都へ行きました。

清水 正（鉱山、昭21）只今入院中。

畑 博（鉱山、昭21）元気でいます。

寺井 士郎（冶金、昭22）80才を過ぎましたがますます元気、年一度同期の友と集まるのが楽しみの一つになりました。

中村 淳三（冶金、昭22）老母、老婦をかかえ外出が自由になりません。

上山 勝美（冶金、昭22）体調不良のため、単身にて外出はできません。

田辺 精三（冶金、昭22）遂に八十路の坂への一歩を踏み出しました。流石に年相応の衰えを感じています。米寿までは現状維持を目指すべく頑張ります。

山崎 豊彦（鉱山、昭22）本年3月一杯で、早大理工学総合研究センターでの研究活動を終了しました。今後は学会、業会の研究活動に対応するだけにしています。東京での同窓会は毎年皆様と楽しく活動して行くことにしています。

小澤 太郎（鉱山、昭22）ゼオライトに銀を担持させた水処理等向け抗菌剤を開発し、特許を得ております。

生長 克巳（冶金、昭23）今年の同期会は入学60周年を記念し一寸盛大に挙行の予定。満80才の傘寿を迎えます。

谷口 利廣（冶金、昭23）NPO法人きずな「ディハウス」で週4日お年寄りにパソコン及びデジカメの指導をしています。

岡田 明（冶金，昭23）仲間の川野名誉教授もなくなり、淋しくなりました。23年冶金卒同友会金友会は毎年開かれています。今年は入学60周年会を京都で開くことにしています。常に金友会への連絡は欠席でも全員有ります。

川端 義則（冶金，昭23）年令相応に健康です。

斎藤 頸（鉱山，昭23）年一回同級会を開いています。在京5名、少なくなりました。

山本 和男（鉱山，昭23）何とか元気に地域の高令者と色々のサークルで楽しくやっております。

三谷 文夫（鉱山，昭23）元気に毎日を過ごしております。天気がよい日には、できるだけ郊外に出かけて、足腰の衰えを防ぐことに努めています。

鷹取 正六（冶金，昭24）55年間に及ぶ会社勤務を終えました。来年80才になります。現在の処、高血圧と前立腺肥大ぐらいのこと、健康上、差程の問題なく、フリーの生活を送っています。世の中の移り変りが早く、自分にとっては、現世が、も早や、未来見学をしているかのように思えることがあります。かえって好奇心にかられます。

鹿取 精一（冶金，昭24）元気で生残っております。

奈古屋嘉茂（冶金，昭24）元気で「ゴルフ」も月2-3回しています。4月15日京大工学部に久し振りに行って時計台の下で食事をし農学部入口の昔のままの下宿にも行き変っていないのでなつかしかったです。

永野 啓（鉱山，昭24）足が弱って、デイサービスに一日おきに車イスで通っています。

石田 巖（鉱山，昭24）脳梗塞と宣告され一寸ガックリしております。年令から見ると当たり前のことで…気にしない様にしていますがあまり自由には出かけられません。

本多 小平（鉱山，昭24）第一国際特許事務所で顧問弁理士として務めています。

木村 治（鉱山，昭26）年令の割には元気です。

森 嘉紀（冶金，昭26）ますますの健康体で楽しく暮しています。

荒川 次郎（冶金，昭26）元気にして居ります。写真を趣味とし、楽しんで居ります。愛車を走らせ、日帰りで出掛けます。猫を5匹飼って居り、忙しいです。

田中 誠一（冶金，昭26）1日1時間目標の散歩を心掛けて何とか健康を保っています。ゴルフの回数は減りました。また、弦楽合奏のグループに入れてもらい、市民音楽祭への参加、介護施設への慰問演奏など地方のささやかな文化活動に励んでおります。

田辺 定男（冶金，昭26）2週間ごとに通院、治療を続けていますが、まあまあ元気です。

二宮 僕（鉱山，昭26）卒業後半世紀余、世の中も自分もすっかり変わりました。新しい時代に幸せが多いよう祈り居ります。

小川 昌平（鉱山，昭26）昨年11月、心臓右冠動脈の狭

窄部にステントを入れましたが、今はテニスもできる身になりました。

京井 勲（冶金，昭27）毎日とにかく元気でのんびり生活しています。

上田喜三郎（冶金，昭27）相変わらずのんびりと日ねもすのたりのたりとくらしております。

松岡 秀夫（鉱山，昭27）軽度の心臓疾患（不整脈）はあるものの、好きなことをし乍ら余生を楽しんでおります。

寺田 孜（鉱山，昭27）家内と2人の気楽な生活を元気にしています。

田山 昭（冶金，昭28）ゴルフとエッセーで楽しんでいます。

浅井 浩美（冶金，昭28）晴耕再読（ゴルフ、麻雀）年齢相応ながら元気に暮らしています。

松浦 菊男（冶金，昭28）①阿波製紙株式会社の相談役をしています。②旧制三高同窓会の行事に携っています。③寮歌祭には出来る限り出席する事にしています。

松村 嘉高（冶金，昭28）日本剪画協会に入会し70の手習いで、剪画をやっています。

倉知 三夫（冶金，昭28）お蔭様で相変わらず元気に過ぎさせていただいておりますが、時代の変化に戸迷っております。兎に角、世界平和に日本国が輝かしい役割を果たすよう祈っております。

松岡 英夫（冶金，昭29）心身共に刺激を求めて外へ出る暮らしをしています。

岩橋 俊之（冶金，昭29）今年3月に埼玉県から豊中千里の自宅へ25年振りに帰って参りました。引続き、文筆活動を継続中です。

三浦 精（冶金，昭29）3月末日をもって、崇城大学を定年退職しましたが、引続き非常勤講師として研究・教育をサポートすることになりました。

江崎 潤（冶金，昭29）年相応に元気です。OB会関係行事と重なり今年も出席できません。時計台記念館は一度見てみたいのですね！

赤澤 正久（冶金，昭30）去る4月15日、嵐山のホテル嵐亭で30年卒の同窓会があり、京都駅から、嵯峨野線の最後尾に乗車した。そこにいた20歳代前半と思われる女性車掌に「嵐山の渡月橋に行くにはどの駅で降りればいいか」と聞いたところ、新幹線方面を指さし、「分かりません。あの辺りに行けば観光案内所があるからそこで聞いて下さい」という。昔は、渡月橋だったが、最近は名前が変わったのかと思いつつ、時間もないでのそのまま乗っていて、前の席の中年男性に尋ねたら親切に教えてくれた。最近の事故をみると、矢張りJR西日本はたるんでいるのかも。

佐藤 史郎（冶金，昭30）冶金学科卒業後50年になりました。現在、アルミと銅の産業の団体（軽金属溶接構造

協会、軽金属クラブ、国際加工銅会議・IWCC)に関っています。

塙出 啓典(冶金、30)街の法律家といわれる行政書士として努力しています。

清滝昌三郎(鉱山、昭30)(財)国際鉱物資源開発協力協会を預かっていますが何とか元気にやっております。今年は卒業後50周年に当たりますので同期生久方振りに京都で集まります。

山上 昭吾(鉱山、昭30)年々老化が進み、エレベーター、エスカレーターの世話になっているサンデー毎日です。井上 瑞城(鉱山、昭30)何とか元気に暮しています。目・耳の老化で若干不自由しています。

栗山 隆勝(鉱山、昭30)知的障害者の入所施設を経営する社会福祉法人の役員をしながら、ボランティアで知的障害者の支援活動をしています。いつまで続けられるか分かりませんが、健康でいる限り頑張りたいと思っています。

吹田 俊一(冶金、昭31)方々に加令によりガタが来ていますが、日常生活には何とか不自由なく暮しています。

武智 弘(冶金、昭31)学校法人福岡工業大学の理事・評議員に加えこの4月から東京事務所長をやって居ります。

佐々 宏一(鉱山、昭31)週の前半は福井工大に出勤し、後半は大学の残務、財団法人の理事長の仕事、委員会の仕事などをしておりますが、お蔭様で元気に過ごしております。

米津栄次郎(鉱山、昭31)地域福祉に尽力しています。田村 敬二(冶金、昭32)世田谷区卓球連盟に所属して頑張っています。

松本 善文(冶金、昭33)元気です。在京の同期諸兄とは、時々会ったり、連絡を取り合っていますが、このところ諸兄恙ないようです。

川口 宜人(冶金、昭33)毎年2~3回京都に泊り旧跡を散策しております。今年も桜の盛りの時期に参りました。学生時代充分に時間的余裕がなく楽しめなかった処が多々あるのに驚き、世界を見るより京都を見るのがむづかしいと感じている昨今です。

本間 良治(鉱山、昭33)脱サラ以来30年、細々とまだがんばってます、83才になったら、会社をやめます。

熱田 善男(冶金、昭34)ひとことで言えば、元気です。約70人の孫たちに算数を教えています。インターネットの世界では、メルマガを2本発行しています。他にメールグループ(マーリングリスト)を5グループ運営しています。研究活動としては、松下幸之助の研究はもう30年近くつづけています。最近は名字の研究にこりだしました。

南浦 基二(冶金、昭34)元気にしております。

八木 貞勲(鉱山、昭34)元気に日々過ごしています。

伊藤 二郎(鉱山、昭34)ITのNPOやボランティア活

動(励合い)を行っています。

柳沢 恒雄(鉱山、昭35)秋田県、鉱山誌の中の石油編47油田と19製油所の概略の書き上げを約3年かけて完了、製本を待つ状態。希望者は秋田県資源エネルギー課に問合せ下さい。

小泉 俊(鉱山、昭35)おかげ様にて変わりなくすごしております。

西田 米治(鉱山、昭35)最近無心に歩くと、とても楽に速くなっているのに気づきました。「無心」=「三昧」です。マンネリ化しやすい中で、なんとかゆうごうしています。

恩田 怜(鉱山、昭36)環境政党を作ろうと頑張っております。

山本 隆造(冶金、昭36)自治会・社協・寺院・ボランティア協会コミュニティ活動で大変です。

石原 和雄(冶金、昭36)完全リタイアでのんびりと毎日を暮らしています。

植田 義(鉱山、昭36)おかげ様で、元気にしております。

岩崎 滋(冶金、昭36)個人情報管理法が施行されました。弊社も、ソフトやハードな鍵の設置に騒動しました。名簿の管理をよろしくお願い致します。

赤井 慎一(冶金、昭36 昭38修士)晴耕雨読で元気です。

秦 瑛(冶金、昭37)この一年、調査報告のため、韓国を良く訪問しております。鉄鋼の街、浦項市は50年前の小幡のような活況に満ち溢れておりまして活き活き致しています。

白井 勲(鉱山、昭37)会社を定年・卒業して以降自営業に転じまして、理系よりも文系の仕事が多くなり、細々と過ごしています。

宮川登規雄(鉱山、昭38)現在、タイ国に在住しております。元気に致しております。タイに行かれる際は、声をかけて下さい。

田村 祥(鉱山、昭38)昨年来、南山教会へ通っております。土曜日は聖書勉強会、日曜日はミサがあります。一家三人車で行き来しています。

西村 孝(冶金、昭38)チタン材料の普及に努めています。

花崎 紘一(鉱山、昭38)結構楽しくやっています。近くにお越の節は御連絡下さい。

村田 謙二(冶金、昭38)住友電工の関係会社に勤務していますが、引退間近です。

井上 直温(鉱山、昭39)H17年6月末、電機資材㈱を退社致します。

小松 啓七(冶金、昭39)卒業後40年を過ぎ、一度同窓会開催などを計画したいと考えています。

鈴木 公明(金属加工、昭40)原子力発電用機器のひび

割れ発生防止基準・規格の制定に傾注いたしております。
倉内 實（金属加工、昭40）引退生活も家庭菜園、サッカー、ゴルフと忙しく、元気でやっております。

木村 篤良（資源、昭40）貧乏暇なしで働いています。
望月 志郎（資源工、昭40）鉄鋼業界（高炉メーカー）は今年も好調との事ですが電炉業界では先行き不透明で、気を引き締めております。

森 邦彦（冶金、昭41）プラスチック加工会社で監査役をやっています。

横山 美泰（鉱山、昭41）この4月にJICAのシニア海外ボランティアとして2年間派遣されていたカンボジアから帰国したばかりです。

櫻井 市蔵（冶金、昭41）私は退職しましたが、研究には未だ興味を持っております。

横山 茂（鉱山、昭41）H16年10月エジプトより帰国、2年間、JICAプロジェクト、金属加工技術向上プロジェクトに従事。

岡島 弘明（冶金、昭41）現在、退職し、畠違いですが、法律の勉強を致しております。

白井 秀明（鉱山加工、昭41）平成17年から、創業130年の白井松器械㈱に勤務、医療・薬業用及び理化学器械を扱っております。環境・バイオにも拡大しています。

小澤 正俊（冶金、昭41）超多忙の毎日です。ようやく素材産業にも社会の注目が…。

大平 公雄（金属加工、昭42）2004年より、仕事をやめて、年金生活です。車やゲームに、ガーデニングに興じております。

廣谷 倫成（冶金、昭42）上司も部下も居ないという、サラリーマン時代には味わえなかった環境で、生産性向上とISOのコンサルタントをしています。光陰矢の如し。“小手の長村”こと長村先生（42年冶金卒の伊藤嘉紹と高校の同級生）以外の先生方のお名前がわからなくなりました。

湯浅 光行（金属加工、昭42）岡山発の技術で社会に貢献すべく产学研連携を推進してます。

速水 弘之（冶金、昭42）昨年9月末をもちまして三菱電線工業㈱を退職致しました。在職中は平成10～12年の3年間に亘り、「新素材特論」の非常勤講師をさせて頂き、また昨年は「未来への新材料科学」講座で1・2回生にお話しをさせて頂くなど本当にお世話になりました。ありがとうございました。これからもよろしくお願ひ致します。

福田 隆（金属加工、昭43）新製品開発の旗振り役をやってます。60才になりました。この4月に川崎市内にマンションを購入してしまい、京都にはしばらく戻れそうにありません。

黒木 正純（冶金、昭43）エネルギー・造船向で超多忙

なるも数年前の昔の価格で、採算は厳しい。しかも、為替と銅合金等の原材料高騰が追い打ち。健康で細く長くが取柄か。

宮本 喬（金属加工、昭43）心臓を痛め、自宅でノンビリしております。

中野 勇男（冶金、昭44）三洋電機㈱研究開発本部フロンティアデバイス研究所IDプロジェクトでイメージングデバイスの開発に従事しております。

浅井 達雄（資源工、昭44）営業秘密管理など情報セキュリティ管理のあり方などを中心に研究しております。裁判所の専門委員、労働局の調整委員などの仕事も仰せつかり、毎日が「師走」です。

野村 俊雄（金属加工、昭44）今年から、勤務先が、住友電工から日新電機に移り、34年振りの京都での生活を楽しんでおります。また、6月以降は、両社のJVの日本ITF（コーティングJeb shop）を担当予定です。

友田 陽（冶金、昭45）独立専攻「応用粒子線科学専攻」を昨年度から立ち上げ中性子散乱等粒子線ナノ解析を用いたエコマテリアル研究に力を入れています。原研、高エネ機精、J-PARC等が近く「地域性と総合性」が特徴の専攻です。

山本 秀治（資源工、昭45）秋田県大館市の会社でがんばっています。

中村 元（資源工、昭46）昨年10月半ばに秋田へ転勤になりました。

川崎 一博（金属加工、昭48）高周波熱処理一筋ですが、微力ながらもう少し夢を追いかけてみたいと思っています。年令には抵抗できませんが、気持ちだけは少しでも若く…のつもりで。皆さんご健康ご多幸をお祈りいたします。

福井 康司（金属加工、昭48）アルミ箔、パウダーベーストの技術開発を担当しています。

高橋 渉（金属加工、昭48）ひさしぶりにみなさまのお顔をみたいと思います。

小西 和幸（金属系、昭49）3月より転居、初めての関東生活です。

朝倉 俊弘（資源工、昭49）大学院専攻の副専攻長、学部のコース長、代議員等の役割のため、会議が多くなって閉口しています。

蛭子 清二（資源工、昭50）元気で、頑張っております。

楠井 潤（金属加工、昭51）シルバー色ブームで、メタリック塗料用アルミフレークの売れゆきが好調です。

宮脇 新也（金属加工、昭53）相変わらずの製鉄所勤務です。業績急改善の鉄鋼業界ですが、いつまで続きますことやら…。

西井 理（資源、昭53）テヘラン、ニカラグア、アルジェリアでJICAの地震防災の仕事をしています。

道本 龍彦（冶金、昭55）技術士（金属部門）の2次試験に合格できました。

及川 初彦（冶金、昭56）グローバル化の波の中、頑張っています。

楠野 春彦（金属、昭57）ベルギーに転勤中。

渢 万寿男（金属系、昭58）加古川で元気にやっています。薄板の製造技術に加えて最近品質保証の仕事に着手しました。

田中 晶（金属、昭58）NTT未来ねっと研究所にあります。

田中 秀敏（金属系、昭59）最近は生産技術・生産管理・品質保証とマルチに仕事しないといけなく、忙しくしています。

後藤 成充（金属、昭59）海外勤務しております。

内山 謙治（金属系、昭60）ハードディスクドライブに使用されている薄膜ヘッドの開発に従事しています。とにかくスピードの速い業界で大変です。

古谷 昭人（資源工、昭60）村田さん元気ですか。石油技術協会で会えますか？

田中 章夫（金属加工、昭61）Z会向け新作問題の作成などをやっております。

古澤 光一（金属加工、昭62）現在オムロンにて、光ファイバ通信の波長多重WDMデバイスの開発をしております。

村岡 敏明（金属加工、昭62）現在、台湾にて現地技術者と一緒にICの設計をしております。

堂ヶ原 満（金属系、昭62）嫁さんと2人の子供（♂×2）と楽しくやっております。仕事の方も、まあ、ほちほちと言ったところです。運動不足によるものか、年齢によるものかおなかの回りにゼイ肉が目立って来ました。早めに手を打たねばと思っております。

岡部 徹（冶金、昭63）東大生研に移り早、4年が経ちました。元気に過しております。

中島 俊明（金属系、昭63）相変わらずです。

長谷川玉絵（資源工、昭63）オーストラリア在住13年日本には、居りません。よろしく

中森 英行（金属加工、平1）近くに居ながらなかなか京都に行けません。皆様のご活躍お祈りします。

古房 宏之（資源工、平1）中国・上海の現地子会社に昨年より駐在しております。

宮本 敏明（金属系、平1）結婚して引越しました。

高濱 義行（冶金、平1）元気です。

清水 建一（金属系、平1）鋼線の製造業に本腰を入れて取り組んでおります。

奥村 英之（金属系、平2）新しい環境にも2年いると少し慣れました。アメリカでのやり方と比較しながらいろいろとがんばっております。

谷本 義典（資源工、平3）大学を卒業し、就職してか

ら10年以上が経過し、仕事上の役割も変化してきた今日この頃です。

藤田 修司（金属系、平3）元気にしてます！

山崎 信彦（資源工、平4）本年4月より社名もかわり現パナソニックエレクトロニクス（株）（旧：松下電子部品）昨年より職種もかわり現在知的財産権を扱う仕事をしております。先立って久しぶりに研究室を訪問させていただきました。私たちが在籍していた頃以上に活気があふれておりました。頗もしいかぎりだと思い、私も気合が入りました。

村守 宏文（金属加工、平9）7月よりカリフォルニア大学サンタバーバラ校に客員研究者として派遣されます。

鈴木 大玄（物理工、平10）ほりほりが遊びにおいでと言つてるのでみんなで行きましょう。

高瀬 善郎（資源工、平10）学生時代に勉強した物探を離れて4年目、津波分野の業務に遭進しています。

山中 貴光（物理工、平10）葉もの野菜（ホウレンソウ、小松菜）の有効育成を研究中です。

西坂 直樹（資源工、平11）元気でやってます。

明父 克幸（地球工、平14）元気にしてます。

川勝 一聰（地球工、平14）会社で新入社員研修をうけております。

楠田 厚史（物理工、平15）就職活動中です。

傍島 農之（物理工、平15 材料工学専攻、平17）ブランドアパレルの輸入業務をしております。

渡邊 哲平（物理工、平15 平17修了）4月よりデンソーに入社しまして現在は三重県の工場（大安製作所）で工場実習中です。

中尾 晃大（材料、平16）元気で勤務して居ります。

鹿子 悟史（物理工、平17）新しい環境でも、牧研スピリットを持って頑張っています。

辻 峰史（材料、平17）現在、福井県高浜の研修所にて研修中、今月末より、現場にて仕事開始予定。

森下 貴申（エネルギー科学研究科、平17）社会人1年生です。頑張ってます。

嶋本 敬介（地球工、平17）ジオメカトメニクス分野朝倉研究室の修士1回生として、授業に研究に励んでおります。

莊司吉之助（元教官）お陰様で健康で業務に励んでおります。

奥 建夫（材料工、平8退職（元教官））マイベースで地道にやっております。

港 種雄（元教官）腰・脚がいたくよわっています。出席の皆様によろしくお伝え下さい。

森 英嗣（材料工、平10年退職（元教官））現在、産業廃棄ガラスのリサイクルプロセスの研究を行っています。お陰様で成果が出てきて、国際会議での発表や特許申請も出来る様になりました。

平成 17 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
ジオフィジクス分野		
伊豆原 渉	波線理論と有限差分法を用いた弾性波動のハイブリッドシミュレーション	京都大学大学院
岡本 拓	三陸沖地震発生帯におけるMT法による比抵抗インバージョン解析	京都大学大学院
鈴木 正憲	海底変動による津波発生時に生ずる疎密波内部伝播の二次元シミュレーション	京都大学大学院
田中 宏明	音響領域周波数を用いた坑井内弾性波探査によるフランクチャ解析	京都大学大学院
宇都宮 大志	個別要素法による三軸圧縮試験のシミュレーション	日本物理探査(株)
山田 信人	ローカルラディアルトレースメディアンフィルタを用いた表面波抑制手法に関する研究	日本地下探査
地質工学分野		
上山 哲幸	格子ボルツマン法による二相流シミュレーションの研究	京都大学大学院工学研究科
田中 大介	超臨界CO ₂ にさらされた貯留層周辺物質の変化に関する実験	京都大学大学院工学研究科
田中 見枝子	地中雜音を利用した地下構造のイメージング	京都大学大学院工学研究科
長村 直樹	南海トラフ付加体形成過程における海山の影響に関する実験的研究	京都大学大学院工学研究科
地殻開発工学分野		
清水 浩之	ライニングを施した鉱石立坑内の流動挙動解析	京都大学大学院工学研究科
杉山 直豊	CO ₂ 圧入井のケーシングセメントに及ぼす超臨界CO ₂ の影響	京都大学大学院工学研究科
内藤 裕太	岩石の空隙構造特性に及ぼす圧力の影響	キヤノン(株)
中村 利宗	空洞群を有する領域の応力解析に対する均質化法の適用について	京都大学大学院工学研究科
豊田 逸平	不連続面を考慮した露天掘り斜面の3次元応力変形解析	京都大学大学院工学研究科
ジオメカトロニクス分野		
今寺 賢志	吊橋ハンガーロープ端末定着部近傍への全磁束検査法の適用について	京都大学大学院エネルギー科学研究所
嶋本 敬介	トンネル変状メカニズムへの覆工パターンと土かぶりの影響についての数値解析的検討	京都大学大学院工学研究科
波多野 浩司	パルスレーザー照射による超音波励起機構に関する基礎的検討	京都大学大学院工学研究科
福岡 正康	ヒステリシスを有する磁性材料の運動に伴う磁界変動の準静的シミュレーションについて	東京大学大学院
地殻環境工学講座		
黒川 進	岩盤不連続面における破壊過程とAEの挙動について	京都大学大学院工学研究科 都市環境工学専攻修士課程
佐藤 健一	岩盤の水理地質構造の評価に対する新しいイメージング手法の適用	京都大学大学院工学研究科 都市環境工学専攻修士課程
田中 悟史	高圧ガス貯蔵岩盤タンクの水封システム設計手法の検討	京都大学大学院工学研究科 都市環境工学専攻修士課程
西谷 広樹	LPG地下備蓄基地における水理地質モデルの構築	京都大学大学院工学研究科 都市環境工学専攻修士課程

氏名	研究論文題目	就職先
資源エネルギー学分野		
栗木 祐一郎	一軸圧縮試験によって形成された Westerly 花崗岩中のマイクロクラック分布	京都大学大学院
黒村 哲宗	ポーラスアルミニウムの圧縮疲労挙動	京都大学大学院
平岡 賢二	圧力変化に伴うメタンハイドレートの生成・分解挙動の観察	京都大学大学院
松元 寛	Ni-W ナノ結晶材料の室温引張り特性	京都大学大学院
資源エネルギープロセス学分野		
大野 大介	カーテン状水膜衝突噴流の流れ構造	京都大学大学院エネルギー科学研究所
小澤 慶祐	延性破壊条件式を用いた3次元有限要素解析による高張力鋼板の成形限界予測	京都大学大学院エネルギー科学研究所
北村 哲平	マグネシウム合金 AZ31 板の高温変形抵抗式	日本航空
栗栖 憲	有限要素法によるチューブハイドロフォーミングの成形性に関する数値的検討	京都大学大学院エネルギー科学研究所
南川 友樹	高温固体面に衝突する液滴の変形および伝熱挙動の数値解析	京都大学大学院エネルギー科学研究所
宇宙資源エネルギー学分野		
大崎 博史	ZnO 薄膜太陽電池の電気化学プロセッシングに関する重力レベルの影響	京都大学大学院エネルギー科学研究所
熊谷 悠	巨大磁気抵抗効果誘起の Co/Cu 多層膜の電気化学プロセッシングに関する基礎的研究	京都大学大学院工学研究所
西村 友作	シリコン系太陽光発電システムの電気化学プロセッシングに関する基礎的研究	京都大学大学院エネルギー科学研究所
横井 慎	重晶石の浮選による高純度化に関する基礎的研究	京都大学大学院エネルギー科学研究所

修士課程修了者

氏名	研究論文題目	就職先
ジオフィジクス分野		
加藤 政史	列車走行による地盤振動の解析に関する研究	京都大学大学院
木村 俊則	構造境界面を組込んだ MT 法のハイブリッドインバージョンに関する研究	サンコーコンサルタント(株)
永井 啓司	表面波探査法による地盤の S 波速度構造解析に関する研究	特許庁
原田 南海子	特性曲線法に基づく CIP 法を用いた音響波動モデリングに関する研究	学校法人 大谷学園
地質工学分野		
植田 諭史	個別要素法を用いた付加体形成のシミュレーション解析	大阪府高等学校教員
亀井 理映	不均質媒質を用いたメタンハイドレート層のモデル化に関する研究	カナダクインズ大学大学院

氏 名	研究論文題目	就職先
地殻開発工学分野		
内 海 一 統	地山の強度劣化による変状トンネルの対策工設計に関する研究	アクセンチュアー(株)
川 崎 彰 和	炭酸ガス帯水層貯留における圧入炭酸ガスの挙動と地層バリアの安全性に関する研究	国際石油開発(株)
藤 田 稔	数値多孔質体モデルを用いた貯留層岩の浸透率評価に関する研究	(株)リコー
依 田 成 正	トンネルにおけるシステムロックボルトの支保効果に関する研究	UFJ銀行
濱 口 一 博	かみ合わせを考慮した岩石不連続面のせん断力学特性評価に関する研究	未定
ジオメカトロニクス分野		
川 勝 一 聰	静的破碎材による岩石破碎機構への熱応力の基本的寄与について	横河電機(株)
浅 井 新 輔	吊橋ハンガーロープの腐食劣化の磁気的非破壊評価について	(株)神戸製鋼所
有 本 拓 也	レーザー超音波法を用いた層状構造の広域面状検査に関する研究	(株)豊田自動織機
福 島 公 之	ロープウェイ設備における策条および搬器拳動のシミュレーションと運行最適計画について	淀川変圧器(株)
地殻環境工学講座		
青 木 悠 二	重金属汚染土壤への動電学的浄化手法の適用性に関する研究	住友金属鉱山(株)
大 場 公 德	クロスホール透水試験による岩盤の3次元水理特性評価システムに関する研究	東洋エンジニアリング(株)
幸 岡 智 也	多次元尺度構成法を用いた岩盤の水理特性評価法に関する研究	NTT 東日本電信電話(株)
中 村 百合子	動的注入工法によるフラクチャーシーリングメカニズムに関する理論的研究	(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構
資源エネルギー学分野		
井 田 拓 良	Silica Coating of Pyrite to Prevent Acid Mine Drainage (酸性坑廃水の発生防止を目的としたシリカによる黄鉄鉱のコーティング)	三菱自動車工業(株)
西 本 武 司	Trace Element Analysis of Lacustrine Diatomaceous Earth for Refining High Grade Silica (高純度シリカ精製を目的とした湖成層産珪藻土の含有微量元素分析)	(株)コーセー
野 村 達 穂	Compressive Properties at Elevated Temperature in Porous Aluminum (ポーラスアルミニウムの高温圧縮拳動)	富士写真フィルム(株)
資源エネルギープロセス学分野		
大久保 武 史	Numerical Investigation on Formability of Tube Hydroforming by Finite Element Method	住友金属工業(株)
蟹 江 智 文	3-D Finite Element Analysis of Forming Limit of High-Strength Steel Sheets	新日本製鐵(株)
塩 谷 優	Three-dimensional Analysis of Collision Dynamics of Droplets Impinging onto a Solid Surface	松下電器産業(株)
森 下 貴 申	Finite Element Simulation of Warm Deep Drawing of Magnesium Alloy AZ31 Sheet	ホンダ(株)

氏名	研究論文題目	就職先
宇宙資源エネルギー学分野		
齊藤友二	Photocatalytic Degradation of Dyes in Aqueous Suspension of Oxide Semiconductor	日揮(株)
玉田良太	Fluid slip at hydrophobic solid wall	住友ゴム工業(株)
南部雅樹	Effects of Magnetic Field and Gravitational Strength on ZnO Thin Film Electrodeposited in Propylene Carbonate	京セラ(株)
西野勇輝	Electrochemical Processing on Hydrogen Energy System under Microgravity	キャノン(株)

博士後期課程修了者

氏名	研究論文題目	就職先
ジオフィジクス分野		
李鍾河 (Lee Jongha)	Shallow subsurface imaging using refraction waves (屈折波を用いた地下浅部映像化に関する研究)	ダイヤコンサルタント(株)
林樹海 (Lin Shuhai)	Study on simulation algorithm of borehole radar for well logging and its application to antenna design (物理検層におけるボアホールレーダのシミュレーションアルゴリズムとそのアンテナ設計への適用に関する研究)	北京中国地質大学地球物理与信息技術学院

博士学位授与者 課程博士

氏名	研究論文題目	主査	取得年月日	備考
ジオフィジクス分野 李鍾河 (Lee Jongha)	Shallow subsurface imaging using refraction waves (屈折波を用いた地下浅部映像化に関する研究)	芦田 譲	平成16年9月24日	
林樹海 (Lin Shuhai)	Study on simulation algorithm of borehole radar for well logging and its application to antenna design (物理検層におけるボアホールレーダのシミュレーションアルゴリズムとそのアンテナ設計への適用に関する研究)	芦田 譲	平成16年9月24日	

博士学位授与者 論文博士

氏名	研究論文題目	主査	取得年月日	備考
ジオフィジクス分野 羽藤正実	地震探査法によるメタンハイドレート探査に関する研究	芦田 譲	平成17年3月23日	米国コロラド鉱山大学大学院地球物理学部修了 昭和61年12月
地殻開発工学分野 森吉昭	ダム貯水池挙動計測総合管理システムの構築に関する研究	齊藤敏明	平成17年3月23日	昭和45年3月 東京大学工部卒業

旧 金 属 系

学部卒業者

氏 名	研究論文題目	就職先
表面処理工学分野 高山 昭一 多田 裕俊 中野 正嗣 藤永 卓士 宮脇 悠 向本 修平	オートクレーブを用いた高温での CdTe 電析 QCM を用いた ZnO 薄膜の無電解析出挙動の観測 塩化銅 (I) 水溶液中への塩化ナトリウムの溶解度 金属イオンを含む疎水性イオン液体の水分含量と物性 電析アルミニウム皮膜のアノード酸化 ジメチルスルホン浴からの Al 電析に及ぼす NiCl ₂ 添加の影響	京都大学大学院 京都大学大学院 京都大学大学院 京都大学大学院 京都大学大学院 京都大学大学院
プロセス設計学分野 大原 弘善	高分解能蛍光 X 線分光器による金属シリサイドの Si K α ケミカルシフトの測定	日本生命(株)
マイクロ材料学分野 稻垣 育亮 内田 悠 大高 幹雄 斎藤 陽平 多田 宏一郎	GaN 成長用 TaN 導電性バッファ層の開発 GaN 導電性バッファ層としてのスパッタ ZrN 薄膜材の開発 p 型 4H-SiC/TiAl における界面反応層の電気特性と構造解析 p 型 GaN に対する GaSb 半導体中間層の開発 Cu-Ti 合金薄膜における Ti の表界面への析出挙動の解析	京都大学大学院 京都大学大学院 京都大学大学院 京都大学大学院 京都大学大学院
量子材料学分野 辻井 貢司 土井 元良 東條 真 浜田 良太 末順 秋	BaTiO ₃ の構造相転移に関する第一原理計算 PLD 法による TiO ₂ -SnO ₂ 固溶体薄膜の作製 Pt (111) 表面への CO 分子吸着反応の第一原理計算 XANES 法による ZnO 中の Co ドーパントの局所構造評価 アルカリ土類シリケートの合成と酸素イオン伝導性	東京大学大学院工学系研究科 東京大学大学院工学系研究科 京都大学大学院工学研究科 京都大学大学院工学研究科 京都大学大学院エネルギー科学研究所
結晶物性工学分野 石田 央 井手 浩充 藤原 公計 宮田 麻衣	Ru ₂ Si ₃ 基シリサイドの結晶構造に及ぼす Re 添加効果 整列ラメラ組織を有する Ti-48Al-8Nb 一方向凝固材のクリープ特性及び引張特性の評価 Ti ₅ Si ₃ 単結晶の力学特性 高リチウムイオン伝導体 (La, Li) TiO ₃ 単結晶の育成と欠陥構造	京都大学大学院 京都大学大学院 京都大学大学院 京都大学大学院
構造物性学分野 新川 智史 西藤 義明 宮崎 孝志 西勝 大 渡辺 建	液体セレンの光誘起過渡電気伝導度測定 液体 Au-Si 共晶合金の X 線小角散乱測定 液体アルカリ二元合金における濃度ゆらぎ L1 ₂ 型結晶における点欠陥による力学緩和 超高温材料 Ir-Nb 合金の高温特性	京都大学大学院 京都大学大学院 京都大学大学院 京都大学大学院 京都大学大学院

氏名	研究論文題目	就職先
材料物理学分野		
木官宏治	高温超伝導体の2次相転移に関する考察	京都大学大学院
宍戸久郎	CuシースMgB ₂ テープ材の熱処理による	京都大学大学院
谷垣武	ナノリソグラフィーによる高温超伝導薄膜へのピンニングセンターの導入	京都大学大学院
藤丸敦史	「電子の空席」による合金(Cu-X系)特性の解釈	ダイキン工業(株)
二見俊介	金属基板上への酸化物バッファー層及びYBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} 超伝導薄膜の作製と評価	京都大学大学院
材質制御学分野		
岩津智永	フェライト鉄中の炭素固溶源におよぼすSiおよびAl添加の影響	日新製鋼(株)
鹿子悟史	低炭素鋼ラスマルテンサイトの冷間圧延組織の発達過程	東京大学大学院
重歳恭寛	窒素添加Ti-Mo合金の応力誘起マルテンサイト変態挙動	京都大学大学院
田中佑允	フェライト系Fe-Cr合金のプラズマ窒化組織	京都大学大学院
藪内聖皓	ラスマルテンサイトの内部組織におよぼす変態時体積変化の影響	京都大学大学院
山本善隆	鉄系マルテンサイトの形態におよぼす変態時体積変化の影響	京都大学学部生
吉田浩久	ラスマルテンサイトの強度におよぼす旧オーステナイト粒径の影響	未定
機能構築学分野		
浅井省吾	有機酸分子の自己集積化に関する研究	京都大学大学院工学研究科
豊川良平	真空紫外光を用いるマイクロ加工プロセスの研究	京都大学大学院工学研究科
藤井章輔	フェロセン誘導体単分子膜に関する研究	京都大学大学院工学研究科
松岡諭史	水素終端化シリコンへの有機分子接合の研究	京都大学大学院エネルギー科学研究所
エネルギー社会工学分野		
大柳友洋	銅酸化物微粒子の反応活性に関する研究	京都大学大学院エネルギー科学研究所
志智一義	メカニカルミリングしたLi-Si系合金の窒素吸収能について	京都大学大学院エネルギー科学研究所
西山裕一	炭化硅素による窒素酸化物の吸着・分解に関する研究	京都大学大学院エネルギー科学研究所
野中康宏	メカニカルミリングを用いたセルロースの分解	新日鐵ソリューションズ
山崎健太郎	TiO ₂ 光触媒の酢酸分解反応における磁場の影響	京都大学大学院エネルギー科学研究所
材料プロセシング分野		
安藤裕一郎	バイオマスのガス化とそのチャーの燃焼速度	京都大学大学院エネルギー科学研究所
岩崎洋	溶融CaO-SiO ₂ -FeO-MgO系スラグの塩素溶解度	京都大学大学院エネルギー科学研究所
笠原秀平	CaO-Al ₂ O ₃ -CaF ₂ -Nepheline系スラグのSulfide Capacity	京都大学大学院エネルギー科学研究所
川崎勇輔	CaO-P ₂ O ₅ -SiO ₂ 系スラグの熱力学	京都大学大学院エネルギー科学研究所
田中裕士	紙による酸化鉄の還元	京都大学大学院エネルギー科学研究所
福田祐樹	溶融塩化物中のCeの酸化還元平衡	京都大学大学院エネルギー科学研究所

氏名	研究論文題目	就職先
高温プロセス分野		
外島光太朗	マンガン系複合酸化物の熱電特性	京都大学大学院エネルギー科学研究所
内藤豪是	溶融塩化カルシウム電解による四塩化チタンの還元	京都大学大学院エネルギー科学研究所
水井智博	Nb-Li-Si-O系の相平衡関係	京都大学大学院エネルギー科学研究所
山本善彦	Ca共還元法によるTi-V-Cr系水素吸蔵合金の製造	京都大学大学院エネルギー科学研究所
吉井一倫	螺旋型熱電発電モジュールの最適設計	京都大学大学院エネルギー科学研究所
エレクトロニクス分野		
岩成朋紀	レニウムシリサイド薄膜のSTM観察	京都大学大学院
宮城国朗	定電流条件下でのAu ₁ G ₀ 接点の生成確率	京都大学大学院
藤本真裕	Au合金ナノ接点の高電流不安定性	京都大学大学院
谷ノ内勇樹	多層カーボンナノチューブの高バイアス電子伝導特性	京都大学大学院
宮崎明彦	低温におけるSi(111)7×7のSTM-BHイメージング	京都大学大学院
材料デザイン分野		
井上陽太郎	Bi2223/Ag-Mg超伝導テープ材の臨界電流に及ぼす負荷歪および試料長さの影響	京都大学大学院材料工学専攻
久原圭	Al ₂ O ₃ /YAG複合材料の高温変形挙動のFEM解析	東京大学大学院
中川英一	放射光異常小角散乱法によるZr基金属ガラスの結晶化前駆段階の検討	京都大学大学院材料工学専攻
林博之	SiCフィラメントの高温待機暴露による力学特性の変化	京都大学大学院材料工学専攻
前田肇	PFZ生成機構のモンテカルロシミュレーション	京都大学大学院材料工学専攻
森本芳史	Siに埋めこまれたGeナノドットの拡散層に対するGI-SAXSと反射率法による評価	京都大学大学院材料工学専攻

修士課程修了者

氏名	研究論文題目	就職先
表面処理工学分野		
川口潤	塩基性水溶液からのCdTe電析におよぼす塩化物イオンの影響	京セラ(株)
小路泰仁	ジメチルスルホン浴からのアルミニウム合金電析	トヨタ自動車(株)
藤堂尚二	ジエチレントリアミン浴からのCdTe電析	住友金属工業(株)
プロセス設計学分野		
小山徹也	小型X線発生デバイスの分析への応用	(株)トヨタ自動織機製作所
田中洋一	Chemical Analysis of Individual Kosa Aerosol Particles (個別黄砂エアロゾル粒子の分析に関する研究)	(株)神戸製鋼所
村上浩亮	X線発生デバイスの開発	住友金属工業(株)
マイクロ材料学分野		
小田垣夏樹	p型GaNに対するコンタクト材の電気特性に及ぼす基板転位密度の影響	未定
森田敏文	Si-ULSI用Cu配線材合金化による自己組織拡散バリア材の開発	NECエレクトロニクス(株)
渡辺哲平	GaN用導電性バッファ層としてのスパッタTiN薄膜材の開発	(株)デンソー

氏名	研究論文題目	就職先
量子材料学分野		
亀山 悟	XANES 法による AlN 薄膜の構造評価	トヨタ自動車(株)
田中 耕平	遍歴電子メタ磁性体 $\text{Co}(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_2$ の磁気熱量効果	アクセンチュア(株)
額田 慶一郎	Eu 化合物の単結晶作製と輸送現象	株ネオマックス
睦月 伸季	$\text{La}(\text{FeSi})_{13}$ の磁気熱量特性に及ぼす Co 置換効果	自営業
山田 直毅	ZnO 中に固溶した Al, Ga および In ドーパントの局所環境	松下電器産業(株)
弓削 是貴	Vibration Contribution to Nucleation Free Energy in Binary Alloy Systems	京都大学大学院工学研究科 博士後期課程
結晶物性工学分野		
寶亮介	Ba-Ge 系クラスレート化合物の熱電特性に及ぼす第三元素添加効果	中部国際空港(株)
辻峰史	整列ラメラ組織を有する TiAl 一方向凝固材の力学特性に及ぼす表面加工層の影響	関西電力(株)
横林政人	Mo-Si-B 合金への耐酸化コーティング	シャープ(株)
構造物性学分野		
傍島農之	流体水銀の金属-非金属転移にともなう密度ゆらぎ	三井物産(株)
西井匠	放射光を用いた流体 Rb の小角散乱実験	東京ガス(株)
堀内尚絃	液体イオウにおける光誘起パターン形成	(株)日立製作所
材料物理学分野		
権藤政信	高分解能走査型ホールプローブ顕微鏡を用いた YBCO 膜中の單一磁束量子の観察	(株)リコー
空野智裕	Al-Zn-Mg-Cu-Mn-Ag 合金の機械的性質に及ぼす Cu, Mn 添加量の影響	三井住友銀行
堀出朋哉	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 超伝導薄膜の微細組織とピンニングメカニズム	京都大学大学院
材質制御学分野		
安中聰	窒素添加 β 型チタン合金の超弾性	トヨタ自動車(株)
川田裕之	Fe-Ni-C 合金の上部ベイナイト組織における炭素量の影響	新日本製鐵(株)
米本篤志	Fe-18Cr フェライト合金のプラズマ窒化組織	JFE スチール(株)
エネルギー社会工学分野		
太田勝己	非晶質の X 線熱膨張測定による自由体積量変化に関する研究	フランス留学
藤井秀昭	自動車広告が消費者に与える影響に関する研究	大阪中小企業投資育成(株)
水島太郎	燃料電池自動車の将来価格と普及に関する研究	三菱商事(株)
山口洋徳	メカニカルミリングした酸化鉄の二酸化炭素分解活性に関する研究	京都大学大学院理学研究科
材料プロセシング分野		
大山智史	溶融 $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{MgO}-\text{FeO}$ 系スラグへの塩素溶解度	JFE スチール(株)
小澤洋	$\text{CaO-Nepheline}-\text{Fe}_2\text{O}_3$ 系スラグの熱力学	大阪製鐵(株)
高温プロセス分野		
浅原紀史	溶融塩化カルシウム電解によるチタン製錬プロセスに関する研究	新日本製鐵(株)
山本幸輔	溶融塩・カルシウム還元によるニオブ及びタンタル粉末の製造プロセス	(株)リコー

氏名	研究論文題目	就職先
量子エネルギープロセス分野 歳原光豊 結城整哉	燃料電池触媒PT/Cの調整過程によるPt粒径／分散への影響に関する研究	日本写真印刷(株)
	不等圧金属板表面加工過程によって生じる微細凹凸構造の形成に関する研究	同和鉱業(株)
エレクトロニクス分野 小林賢吾 箕輪剛	STM-BH法による半導体表面のドーパントに関する研究 高バイアス／高電流下におけるAl, Ptナノ接点の不安定性	博士課程進学 JPモルガン
材料デザイン分野 小川高志 大工彈	GI-SAXSによる自己組織化Si/Ge/Siナノドットの非破壊構造評価	トヨタ自動車(株)
	Bi2223超伝導テープ材の曲げ変形による不均一損傷とその粒界電流に及ぼす影響	(株)電通

博士後期課程修了者

氏名	研究論文題目	就職先
量子材料学分野 岸田逸平	固体電解質におけるリチウムイオン拡散機構の電子論的研究	大阪市立大学(助手)
材料物理学分野 村上浩二	Surface Modification of High Purity Iron and Stainless Steel by Aluminization and Plasma Nitridation	(現)岡山県工業技術センター(社会人ドクター)
エネルギー社会工学分野 Nguyen Thi Anh Tuyet 醍醐市朗	EVALUATION OF ENERGY PRODUCTIVITY IN VIETNAM USING INPUT-OUTPUT TABLE (産業連関表を用いたベトナムにおけるエネルギー生産性の評価) ライフサイクルシンキングに基づいた統合環境システム分析手法に関する研究	Hanoi University of Technology 東京大学大学院マテリアル

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
プロセス設計学分野 井田博之	X-ray fluorescence analysis with portable instruments	河合潤	平成17年3月20日	
量子材料学分野 岸田逸平	固体電解質におけるリチウムイオン拡散機構の電子論的研究	田中功	平成17年3月23日	
材料物理学分野 村上浩二	Surface Modification of High Purity Iron and Stainless Steel by Aluminization and Plasma Nitridation	長村光造	平成17年3月23日	
田中宏樹	アルミニウム合金の組織制御による高機能材開発に関する研究	長村光造	平成17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
材料物理学分野 田中宏樹	アルミニウム合金の組織制御による高機能材開発に関する研究	長村光造	平成17年3月23日	昭和61年3月 京都大学卒業
材質制御学分野 白神哲夫	高強度構造用棒鋼の高性能化に関する研究	牧正志	平成17年1月24日	京都大学大学院工学研究科 金属加工学専攻修士課程 昭和49年3月 終了

水曜会誌卒業年次幹事制の導入について

先の水曜会大会におきまして、下記のような付則が採択され卒業年次幹事を委嘱することになりました。年次幹事は卒業の年次ごとに金属系、資源系より各1名の年次幹事を定め、各系同年次会員の連絡先の掌握や同年次会員を代表して水曜会運営へのご協力をお願いすることになります。既に委嘱の手続きを開始しておりますが、各年次が揃いましたらご報告いたします。年次幹事にご就任頂く会員の方々には、水曜会の活動をより充実したものとするため、何卒ご協力の程お願いいたします。

水曜会年次幹事に関する付則

(目 的)

第1条 水曜会の円滑な運営のため年次幹事を定め、水曜会会长は次の任務を依頼する。

1. 同年次会員の連絡先の掌握、
2. 同年次会員を代表して水曜会運営への協力

(定 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

教室報告

平成16年12月16日	吉住永三郎	特別名誉会員	教員人事
		元教官	<旧資源系>
平成16年9月23日	中牧登良男	昭15・治	平成16年11月1日 村田 澄彦 助教授に昇進
平成12年7月13日	小川 浩三	昭18・治	平成16年12月1日 山田 泰広 助教授に昇進
平成13年11月14日	鋤柄 忠勝	昭18・治	平成17年3月31日 石井 隆次 退職
平成17年1月10日	後藤 俊男	昭20・鉱	平成17年4月1日 尾西 恭亮 助手に採用
平成16年12月19日	本田順太郎	昭20・治	
平成16年12月19日	西田 堯	昭14	<旧金属系>
平成16年9月4日	勝見 健	昭30・鉱	平成17年4月1日 松原英一郎 教授に新任
平成17年2月16日	今井 英雄	昭38・鉱	平成17年4月1日 田中 克志 助教授に新任
逝去日不明	並川 博	昭19・治	平成17年4月1日 岸田 恭輔 助手に新任
平成16年6月8日	多田剛太郎	昭28・治	平成17年4月1日 宇田 哲也 助手に新任
平成16年8月	岡野 豊文	昭23・鉱	平成17年6月1日 市坪 哲 助手に新任
平成16年8月13日	坪田 元幸	昭16・治	平成17年7月1日 松永 克志 助教授に新任
平成16年8月31日	天達 義久	昭18・鉱	平成17年9月30日 古原 忠 退職（転任）
平成16年10月30日	加藤 三郎	昭19・治	
平成16年11月	清水 良男	昭19・鉱	
平成16年11月	三木 正義	昭41・治	
平成17年3月5日	富永 黙	昭20・鉱	
平成17年4月18日	石田 泰一	昭25・治	
逝去日不明	渡辺 洋一	昭33・鉱	
平成17年1月22日	富田 正夫	昭21・治	
平成17年3月9日	南家 英二	昭28・鉱	

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隨時受け付けております。

次号の発刊に向け、當時、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17年度水曜会誌編集委員

委員長	落合 庄治郎				
幹事	黒川 修（編集）	藤本 仁（広告）			
委員	田辺晃生	松岡俊文	松原英一郎	岡部 徹	
	松谷哲也	竹島康志	廣内鐵也	安田 健	
	朝日格	田中義和	山田雅行	武田 啓三	
	石田尚之	中山雅博	福本学		

平成17年10月25日 印刷	平成17年10月30日 発行
編集兼 発行者	牧 正志
印刷者	小林生男
日本印刷出版株式会社	
553-0006 大阪市福島区吉野1丁目2番7号	
電話 大阪(6441) 6594 (代)	
FAX 大阪(6443) 5815	
発行所 京都大学工学部	水曜会
606-8501 京都市左京区吉田本町	
振替口座 京都 01090-8-26568 電話 (075) 753-7531 (大代表)	
銀行口座 みずほ銀行百万辻支店	
普通 476-1242526 水曜会	

水曜会誌投稿規定 (昭和62年4月23日改訂)

1. 投稿要領

- (1) 投稿原稿の著者（連名の場合は1名以上）は水曜会員でなければならない。ただし、水曜会誌編集委員会（以下編集委員会といふ）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き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 学問のあるいは技術的に価値のある内容を含み、会員の参考資料として役立つもの。
- (4) 論文、報告には英文表題のほかに100字前後の英文概要を添付されたい。
- (5) 原稿の長さは必要な図・表を含めて次表に示すとおりとし、これを超える場合は必要経費を負担されたい。但し依頼原稿についてはその限りではない。なお、会誌1頁は図表のないときには2,400字（25字×48行×2列）であり、表題および英文概要是刷上り1/4頁～1/2頁を要することを考慮されたい。

分類		制限ページ数
論	文	会誌刷上り 6頁以内
報	告	会誌刷上り 6頁以内
総	説	会誌刷上り 10頁以内
講	座	会誌刷上り 10頁以内
資	料	会誌刷上り 4頁以内
各種	記事	会誌刷上り 4頁以内

- (6) 投稿に際しては本会規定の原稿用紙を使用し、原稿整理カードを添付されたい。
- (7) 原稿の送付先はつきのとおりとする。
〒606-8501 京都市左京区吉田本町
京都大学大学院工学研究科資源工学・材料工学
専攻 エネルギー科学研究科 内
水曜会誌編集委員会宛

(8) 原稿は水曜会誌編集委員会が受理した日をもつて受理日とする。

(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せ、または内容の修正を求めることがある。

(10) 編集委員会は、用語ならびに体裁統一のため編集係によって文意を変えない程度に投稿原稿の字句の修正をすることがある。

(11) 初校は著者にて行ない、第2校以降は編集委員が行う。初校における原文訂正の必要のないようとくに留意されたい。

(12) 別刷については実費を負担されたい。著者は、著者校正と同時に別刷必要部数を申し出るものとする。

2. 原稿の書き方

(1) 章・節などの区分はポイント・システムによる。すなわち、章に相当する1・緒言などは中央に2行分をとり、節に相当する1・1実験方法などは左端に書き、つきの行より本文を書くようとする。また、項や目に相当する(1)試料などは左端に書き、2字分あけて本文をつづける。

(2) 図面は鮮明なものであること、刷上り図面の大きさは横幅でもって指定するものとするが、横幅は1段（65mm以内）または2段通し（140mm以内）のいずれかとなることを考慮されたい。原図は刷上り図面の少なくとも2倍に書かれたい。この際図面の縮尺を考慮して作図し、とくに図中の文字の大きさについては十分に注意を払われたい。また、原図の左下隅に著者名、論文名、図表番号などを必ず明記されたい。

(3) 単位は国際単位系（SI単位系）によることが望ましい。

(4) 参考のため文献を記す場合には本文の肩に1)、2)などを付し、論文末尾につきの形式で書き加えること。

1) 大塚一雄、宮城 宏：日鉄誌、87, [1001], 521-525, (1971)

2) M.R. Taylor, R. S. Fidler and R. W. Smith: Metallurgical Trans., AIME. 2, [7], 1793-1798, (1971)

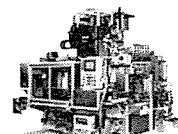
[注] 原稿用紙などは編集委員会までご請求下さい。

ネツレン・誘導加熱のバイオニア 各種高周波焼入・焼戻装置

ネツレンは、創業以来50余年誘導加熱のバ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



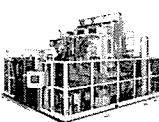
ドライブシャフト焼入焼戻装置



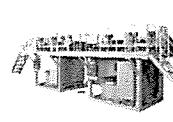
カムシャフト焼入焼戻装置



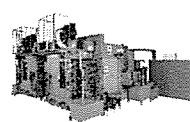
整型汎用焼入装置



大型ショーラース/ギア焼入装置



チェーン焼入焼戻装置



クランクシャフト焼入焼戻装置

NETUREN

<http://www.k-neturen.co.jp>

ネツレン

高周波熱鍊株式会社

●本社 〒141-8639 東京都品川区東五反田2-17-1 TEL 03(3443)5441 FAX 03(3449)3969
オーバルコート大崎マークエスト

●営業部 〒254-0013 神奈川県平塚市田村七丁目4番10号 TEL 0463(55)1552 FAX 0463(55)4238

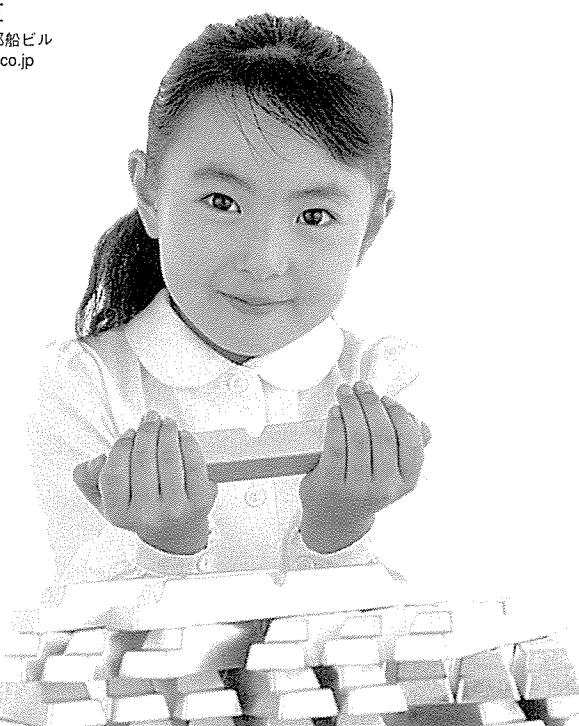
●名古屋営業所 〒470-1101 愛知県豊明市沓掛町八幡前77-41 TEL 0562(92)8338 FAX 0562(92)8666



日本軽金属株式会社

〒140-8628 東京都品川区東品川2-2-20 天王洲郵船ビル
TEL.03-5461-9333 URL <http://www.nikkeikin.co.jp>

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。



ほら、未来が見えてきた。

Suiyōkwai-Shi

TRANSACTIONS OF THE MINING AND METALLURGICAL
ASSOCIATION
KYOTO

CONTENTS

Retirement Memorial Lectures

Supersonic Free Jet	Ryuji ISHII	865
---------------------------	-------------------	-----

Memorial Lecture in the Annual Meeting of Suiyokwai

Grobalization in Automotive Industry and Manufacturing Technology	Minoru HAYASHI	868
Geophysical Explorations for Studying Earthquake, Tsunami, and		
Volcanic Eruptions	Hitoshi MIKADA	874

Lecture

Progress in Metal Science and Its Research Technology		
– Look Back upon My Research Life [IV]	Yotaro MURAKAMI	883

Forum

Essay on the History of November Festival	Yoichi MATSUDA	899
Development of Sheet Hydroforming Simulation Program by Finite Element Method	Takayuki HAMA	905
Looking at the unsaturated zone with an electromagnetic eye	Kyosuke ONISHI	908
HISTORY of Metals	Eiichiro MATSUBARA	913
New Electron Diffraction Method to Identify Crystal Chirality	Haruyuki INUI	916
The Soul of Kounosuke Matsusita	Yoshio ATSUTA	921

Current Studies in Laboratories

Suiyokwai Information	951
-----------------------------	-----

Letters to Editor	958
-------------------------	-----

Kyoto University
Japan