郵政省告示　第159号
昭和42年２月28日　学術刊行物指定

ISSN 0371-408X

水曜會誌

第23巻　第6号

目　　次

大会記念講演
安心・安全な社会資本を支える溶接技術 ……百合岡信孝 …… 563
人との出合い，それが人生　－too kindな人たち－ ……水田　義明 …… 570

論　　文
ステンレス球状炭化物鋳鉄の開発研究 ……西内　滋典 …… 581

総　　説
位相問題に関わるX線回折理論の歴史と新しいX線多波動力学的回折理論の導出 ……沖津　康平 …… 587

講　　座
金属学とその研究手法の進歩　―研究生活を顧みて〔II〕……村上陽太朗 …… 600

談　話　室
p型4H-SiC半導体に対するTiAl基オーミック・コンタクト材の開発 ……着本　　享 …… 616
地質構造モデリング ……山田　泰広 …… 619
孔井を用いた物理探査について　－地表からの物理探査に対する位置づけ－ ……真田　佳典 …… 623
随想　…アメリカよりの想い出…　…… ……奥村　英之 …… 627
災難に逢う時時節には，災難に逢うがよく候 ……新宮　秀夫 …… 630
研究施設紹介　東北大学　学際科学国際高等研究センター　……才田　淳治 …… 638

研究速報 …… 643

会　　報 …… 667

会員消息 …… 679

卒業者名簿 …… 692

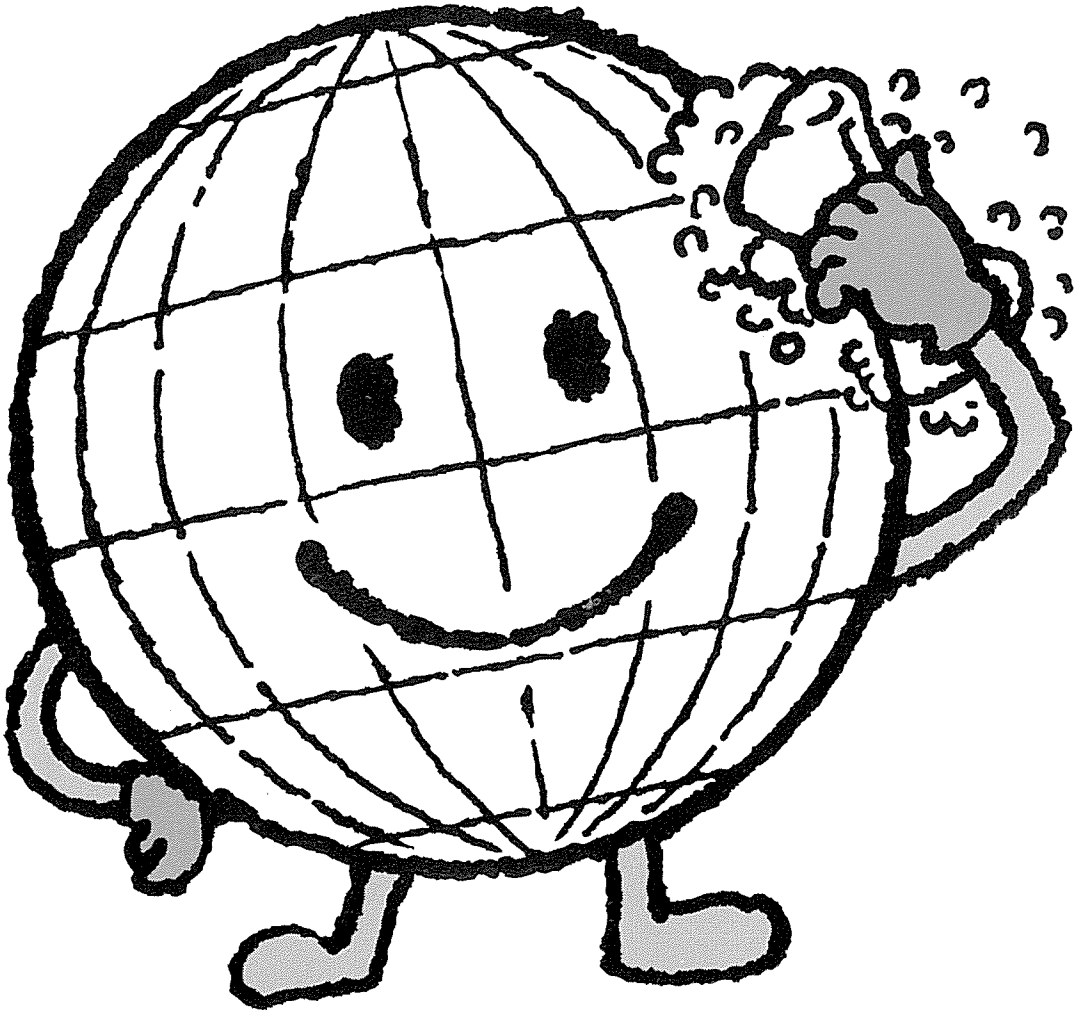
平成16年1月30日発行

京　都　大　学

水　曜　会

DOWA

地球をリサイクリーン。



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

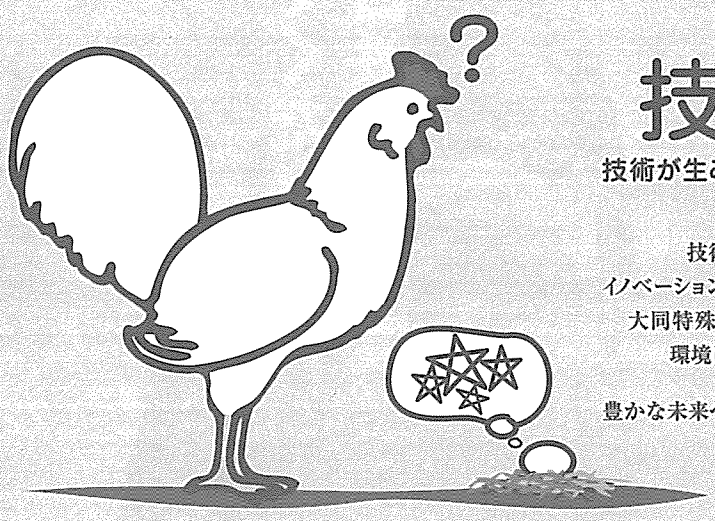
〒100-8282 東京都千代田区丸の内 1-8-2
TEL.03-3201-1062（大代表）

ホームページアドレス http://www.dowa.co.jp/



新日鉄のホームページが、新しくなりました。
情報の鮮度と見やすさが、新しい。
アクセスのしやすさが、新しい。
IR情報、環境情報、グループ情報も、新しい。
いろいろ新しい新日鉄を、さぁ、ご覧ください。

◎お問い合わせは：広報センターTel.03-3275-5016



技術⇔素材

技術が生み出す新素材、素材から生まれる新発想。

技術革新の波が拓く、未知なる世界への挑戦
イノベーション成功のキー・ファクターとして重要なのが素材です。
大同特殊鋼は、特殊鋼をコアとした「技術力」「開発力」で
環境に適応した、新たな素材の世界を創造します。

豊かな未来へ、素材の無限の可能性を追求する、大同特殊鋼。

大同特殊鋼
http://www.daido.co.jp/

NEWJEC

自然と人を技術で結ぶ

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

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

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

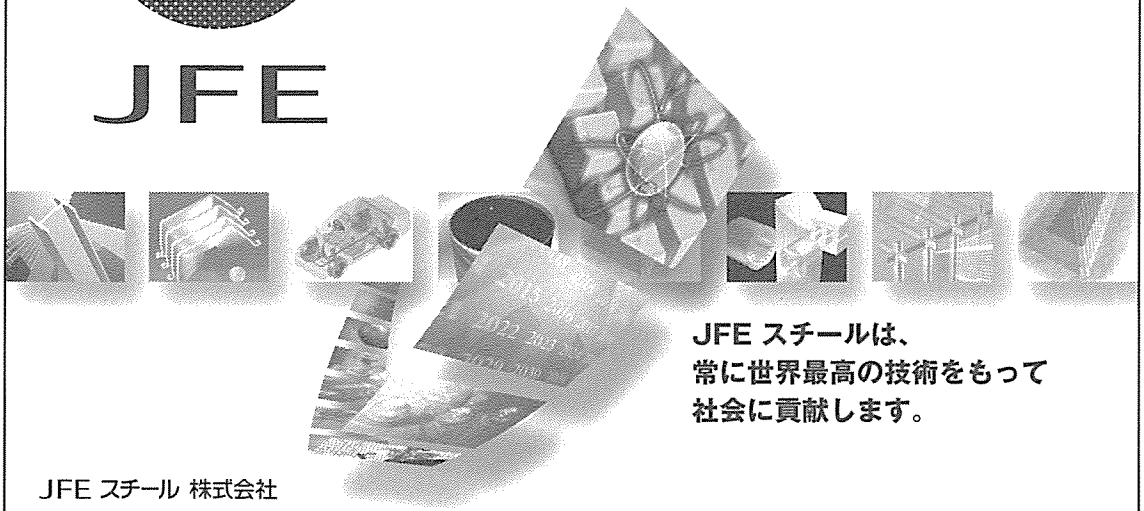
総合建設コンサルタント
株式会社ニュージェック

大阪本社:大阪市中央区島之内 1-20-19　TEL.06-6245-4901
東京本社:東京都文京区西片 1-15-15　TEL.03-5800-6701
URL http://www.newjec.co.jp

9001 ISO 14001 認証登録

挑戦・柔軟・誠実
JFE スチール

JFE



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

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

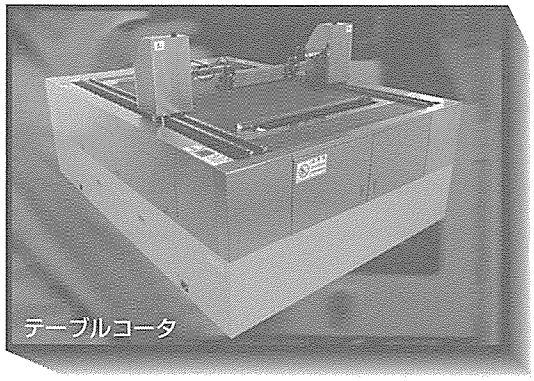
耐磨耗性銅基合金（OMアロイ）
超電導用ブロンズ及び各種青銅
真空溶解による鋳造品

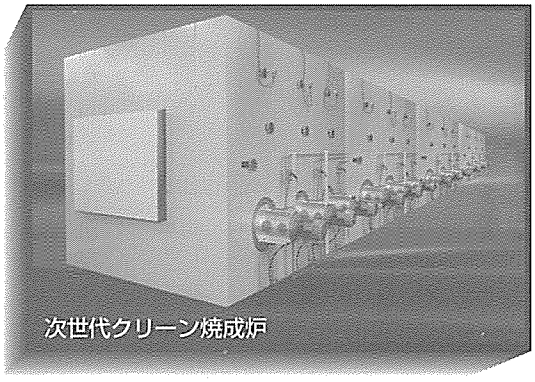
OG 株式会社大阪合金工業所

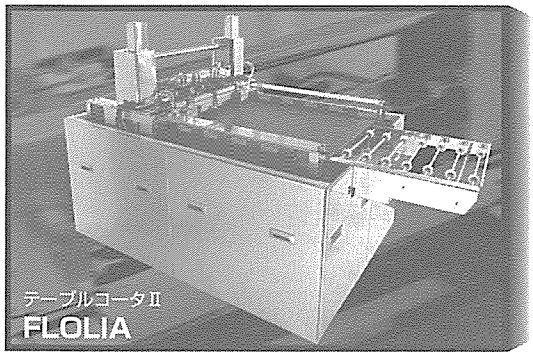
相談役 水田泰次

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

FPD製造プロセス・装置を革新し、実生産の効率とパネル性能の向上を両立する ―― 中外炉のディスプレー総合製造技術。


テーブルコータ


次世代クリーン焼成炉


テーブルコータII
FLOLIA


真空成膜装置 SUPLaDUO



連続塗工・乾燥装置


カート式連続封着・排気装置

超精密塗工技術、クリーン乾燥・焼成技術、真空・雰囲気熱処理技術、真空成膜技術、プラズマ制御技術、封着・排気熱処理技術、エネルギーの有効利用技術、連続搬送技術、量産プロセス技術、環境浄化技術・・・
多種多様な要素技術を結集し、開発・実証テストを積み重ね、製造プロセス全体をトータルに考慮した実生産ラインや次世代プロセスのあり方を想定し、お客様のニーズに最適なプロセスと装置を提案する。
フラットパネルディスプレーのブレークスルーは、**中外炉の「総合力」**が生み出します。

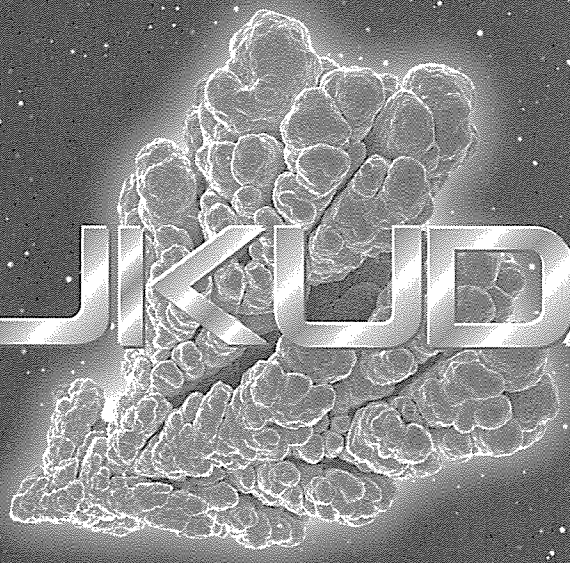
●●● 当社技術研究所に、各種のテスト装置を設置。詳しくは、当社ホームページをご覧ください。●●●

中外炉工業株式会社
ディスプレー事業部
本　　社　〒550-0003 大阪市西区京町堀2丁目4番7号　TEL(06)6449-3778(直通)
東京支社　〒105-0021 東京都港区東新橋2丁目12番7号(住友東新橋ビル2号館) TEL(03)3578-4749(直通)
URL http://www.chugai.co.jp/　E-mail : Web_Master@n.chugai.co.jp

メタルスタイリスト
METAL STYLIST
FUKUDA

金属粉1,000品種以上を揃え
どんなニーズにもお応えします

粉末冶金材料
導電材料
顔料
摺動材料
表面硬化・接合材料
触媒



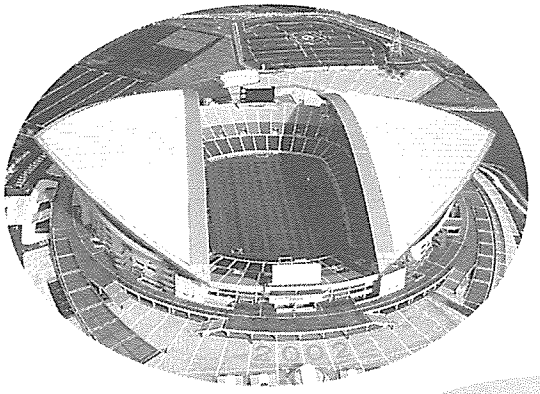
FUKUDA

福田金属箔粉工業株式会社

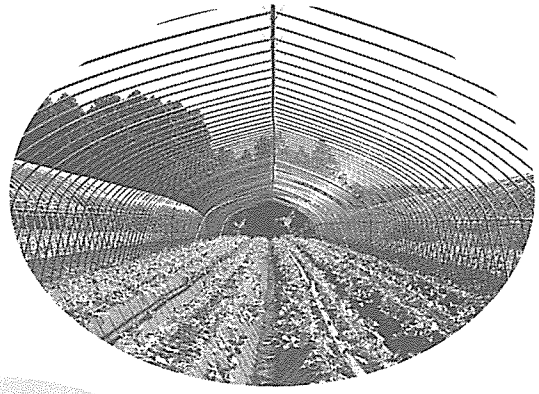
本社・京都工場　〒607-8305　京都市山科区西野山中臣町20番地
TEL(075)581-2161　FAX(075)581-7271
東京支店　〒103-0027　東京都中央区日本橋3丁目9番1号
TEL(03)3271-1230　FAX(03)3271-4425
名古屋支店　〒460-0003　名古屋市中区錦3丁目7番9号
(太陽生命名古屋第二ビル3階)
TEL(052)961-7851　FAX(052)961-0102
関西支店　〒600-8435　京都市下京区松原通室町西入中野之町172番地
TEL(075)361-2315　FAX(075)351-2309
滋賀工場　〒527-0102　滋賀県愛知郡湖東町大字平柳字北浦514番地
TEL(0749)45-0841　FAX(0749)45-0815

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

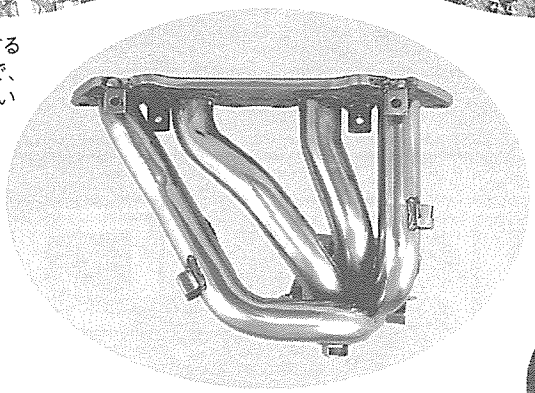
日新製鋼は、独自の最先端技術で、
さまざまな時代のニーズに答えます。



太陽熱で自然に分解・蒸発する
保護フィルムを使用することで、
納品後に大量のゴミを出さない
「タフテンIU」
（埼玉スタジアム屋根材）



産業廃棄物として処理する際、
環境に悪影響を及ぼす
クロムを使用しない
「ZAM−ZC」
（ビニールハウス建材）



クルマの排出ガスの浄化作用を助ける
「排出ガス処理用ステンレス鋼」

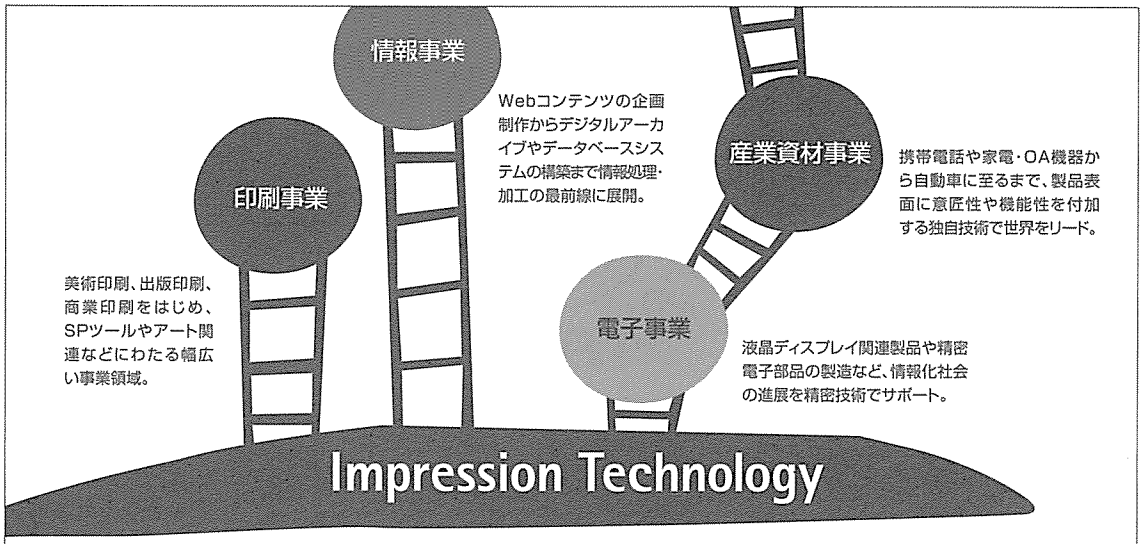


答える鉄

日新製鋼

環境問題など、これからの地球が抱えるさまざまな問題に、
日新製鋼は最先端のスチール加工技術で答えます。

〒100-8366 東京都千代田区丸の内3丁目4番1号（新国際ビル）TEL.03-3216-5566 http://www.nisshin-steel.co.jp



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。

NISSHA
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)
URL:http://www.nissha.co.jp
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(大代表)
事 業 所：京都 東京 大阪 名古屋 神戸 高松 長野 千葉 加賀 亀岡 シカゴ サンディエゴ ダラス プランテーション コペンハーゲン ヘルシンキ デュッセルドルフ ロンドン ソウル クアラルンプール 広州 香港 台北

アイチのオンリーワンテクノロジーにより 社会への貢献をキーワードに商品開発・提供!!

高齢化社会を迎え、義歯の改善により健康生活に貢献。
噛みやすくピッタリ吸着の小型で堅牢な入歯を実現する
超小型のスーパー磁性アタッチメント
マグフィット® DX

ユビキタス時代(情報社会)のニーズに貢献。
携帯電話に搭載可能な 電子コンパス・方位センサを実現させた
世界最小・最高感度
MIセンサ™

光合成を促進し、植物の成長・地球環境のへ貢献。
Fe2+(鉄イオン)を長期間安定して供給できる
新しいタイプの土壌改良材
鉄力(てつりき)あぐり™

軽量化、低消費電力化で省エネ社会へ貢献。
モータの50%小型化を実現させた
世界最高のボンド磁石
マグファイン®

AICHI STEEL CORPORATION
〒476-8666 愛知県東海市荒尾町ワノ割1番地
取扱部門：電磁品事業本部　担当/野村 泰生
TEL. 052-603-9920(ダイヤルイン)

真空の極限を 目ざして…

KYOTO TAKAOSIN

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㈹
FAX (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
FAX (0748) 36-6683

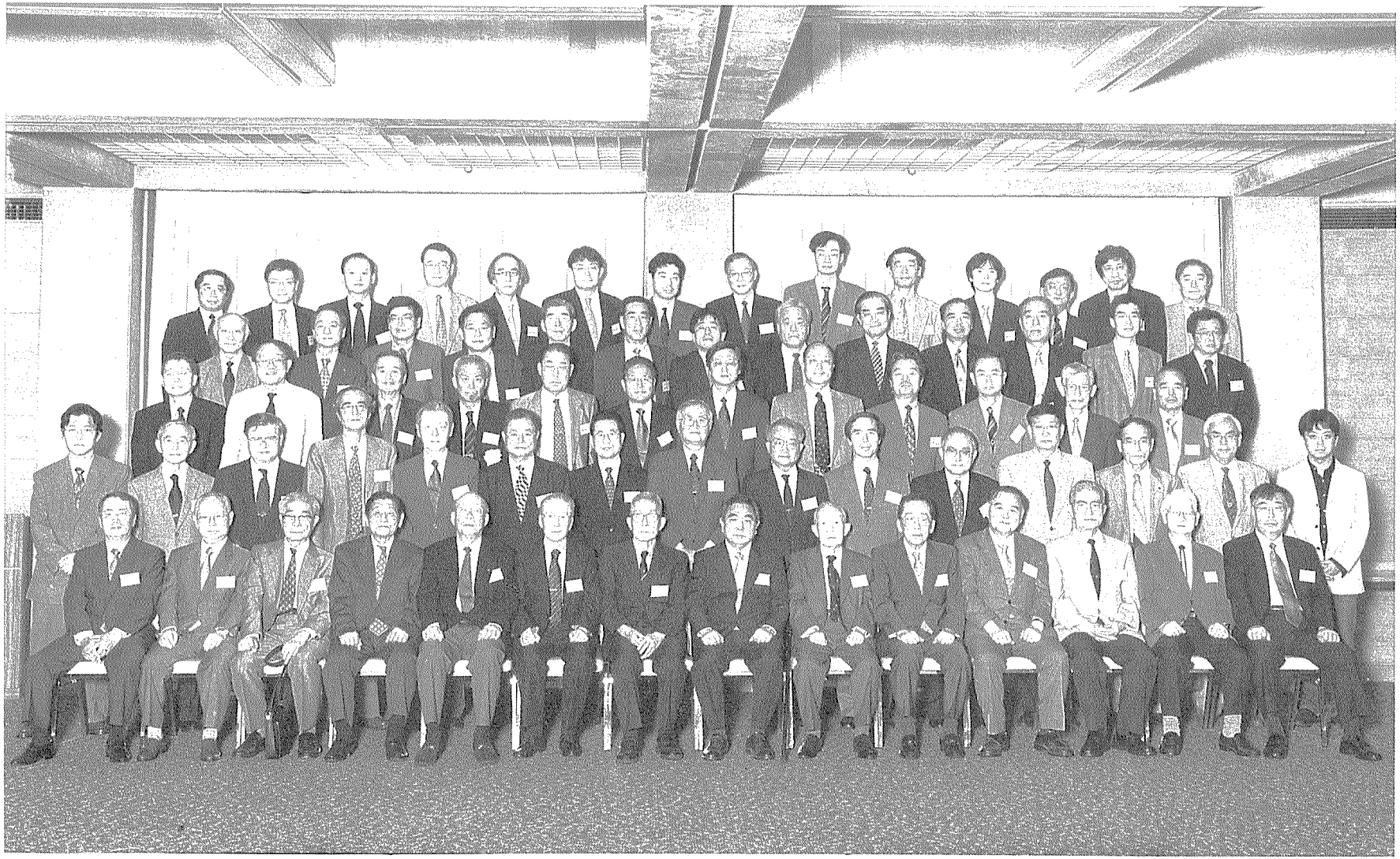
NLM

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

ほら、未来が見えてきた。



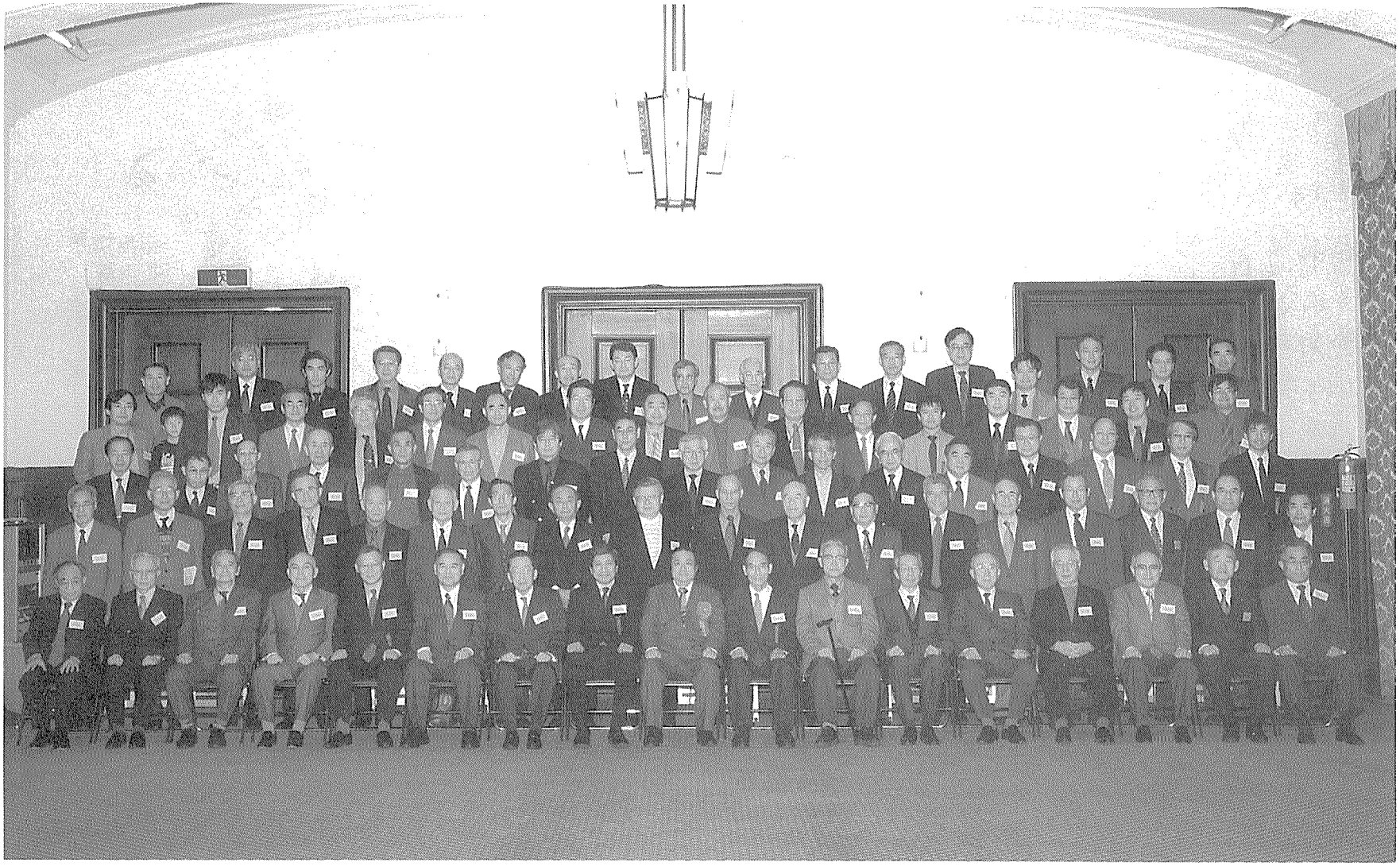
地球をとりまく環境に黄色信号が点滅するいま、より軽く、より強く、よりリサイクルしやすい素材が求められています。
子供たちのために、そして、これからの社会のために。
アルミニウムの進化とともに、あたらしい未来がはじまります。



平成15年度　水曜会大会　記念写真（平成15年６月14日　於 京大会館）



平成15年度　水曜会大会　懇親会寄せ書



平成15年度　京都大学水曜会　東京大会（平成15年11月22日　於 学士会館）





平成15年度　水曜会東京大会　懇親会寄せ書

大会記念講演

安心・安全な社会資本を支える溶接技術

百合岡　信　孝*

Welding Technologies Sustaining Reliable and Safe Infrastructures

by Nobutaka YURIOKA

1. 緒　　言

鉄鋼材料はそのほとんどが顧客で加工されて構造物となり使用される．鋼構造物としては船舶，海洋構造物，橋梁，建築・土木構造物，貯蔵タンク，圧力容器，パイプライン，ペンストック，鉄道レール，自動車，車両など多岐にわたる．そしてこれら構造物はほとんどが溶接構造であり，溶接技術は各製造業において生産のキィテクノロジーとなっている．鉄鋼メーカーも鋼材起因の溶接問題に対して顧客サービスとして解決策を提示する必要がある．本稿は筆者が経験した事例を中心として各種構造物に起こった溶接諸問題を紹介し，溶接技術が構造物の安全性，ひいては安心な社会を維持するためにいかに深くかかわっているかを説明するものである．

2. 船舶・海洋構造物

図1は第二次世界大戦時に輸送船がアメリカのある港に停泊中に真っ二つに破壊した状況を示している．当時，アメリカは欧州戦と太平洋戦とに戦線を拡大し，戦略物資の迅速なる補給が焦眉の的であった．それで，当時の大統領ルーズベルトの号令のもとに大量の戦略物資補給船を短期間に製造することになった．その頃の鋼構造物は船舶を含めほとんどがリベット接合であったが，それでは短期間の大量生産は不可能なので溶接構造での製造を決定した．機械接合であるリベットと異なり溶接は金属の一部を溶融して結合するので金属の原子同士がつながった状態となり，したがって水密性と気密性に優れる．また，リベットのように当金を用いないので構造物を軽量化できる．しかし，溶接では局部を急速加熱・冷却するので金属組織が劣化し，また溶接部に残留応力

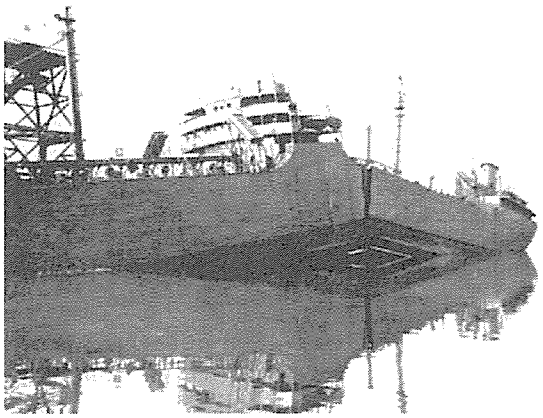


図1　戦時標準船の脆性破壊
A.S. Tetelman, "Fracture of structural materials" Jon Wiley & Sons より

が発生する．そのために，図1に示すように外力が加えられてないのに内部応力（残留応力）で突如，破壊する結果となったのである．

この事故後アメリカは調査団を直ちに結成し，数百の補給船を調べた．その結果，破壊に至らないまでも数多くの損傷が溶接部に認められた．そして，健全部および損傷部にシャルピー衝撃試験を実施し，衝撃値 15ft-lb（21J）以上を有する鋼では損傷が少ないことが統計的に検証された．この 21J という値は現在でも鋼および鋼溶接部の靱性の必要最小規格値になっている．

我が国の構造用鋼は造船業とともに発展してきたと云っても過言ではない．我が国は人件費が高く生産性の向上は国際競争に打ち勝つために至上命令である．図2は船舶外板の溶接の方法を示している．サブマージアーク溶接はフラックスで覆って大電流を用いて溶接し，強

*新日本製鐵株式会社　顧問

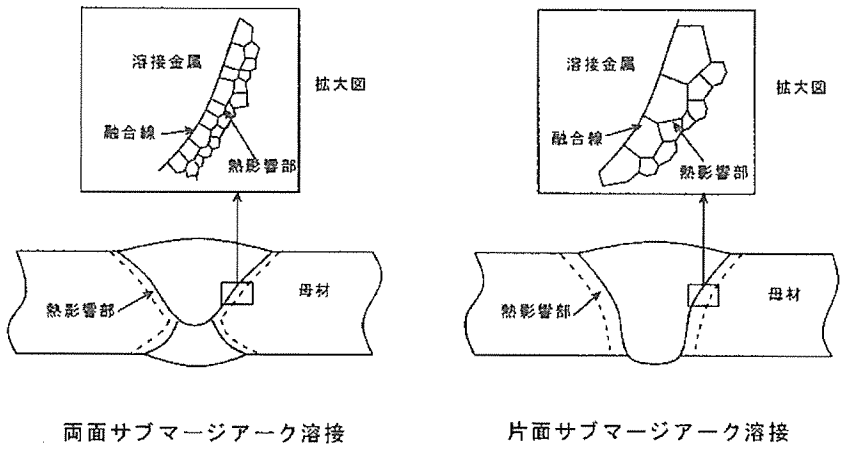


図2　両面および片面サブマージアーク溶接

烈なアーク光は外に漏れない．外国の造船メーカーでは片側を溶接すると大板を表裏ひっくり返してまた反対側を溶接する両面溶接を採用している．一方，我が国では生産性が格段に高い片側から一挙に溶接する片面溶接法を用いる．しかし，この方法では巨大な熱量を投入するので溶接で熱影響を受けたところの結晶粒が粗大になり，溶接熱影響部の靱性が劣化する．そのため，我が国の鉄鋼業は大入熱溶接でも溶接熱影響部が高靱性を保つことができる鋼材を造船メーカーと共同して研究し開発してきた．他の国ではそのような鋼材がなかったので，両面溶接を採用せざるをえず，現在でも両面溶接施工法を続けている．溶接熱影響部の靱性はLNG船やLPG船など高付加価値の船舶に対してさらに高い値が要求され，その要求値を満足できる高級鋼材の生産は我が国の鉄鋼業の独壇場となっている．

原油やガス資源の開発は極地や深海域に及んでいる．図3は水深1000 mのメキシコ湾の原油掘削プラットフォームである．プラットフォームは水深500 mまではやぐら形式の鋼構造物で作られるが，それ以上の深さになると浮き上がろうとする上部構造を海底に固定された下部構造の脚が引っ張って支える形式の構造となり，テンションレグプラットフォームと呼ばれる．巨大な浮力に抗する脚(レグ)は直径1.5 mの大径鋼管であり溶接によって連結されている．レグには高い引張りの軸力が常に働いているので，溶接継ぎ手に欠陥が発生していないか，内部の昇降エレベーターから常時監視を続けている．

プラットフォーム周辺の海底井戸からガスを採取する場合，火山の温泉地獄でみられるように噴出するガスは炭酸ガスや硫化水素を含み腐食性が強く，井戸からプラットフォームまでの採取パイプラインは腐食されガスが漏れることが時折ある．その場合はおわん状(ベル型)の半潜水艇に乗り組んだ溶接士が急行し直ちに溶接補修をすることになる．水深1000 mでは100気圧での溶接となる（ハイパーバリック溶接という）が，溶接自体は1気圧の大気中と大差はない．ただし，溶接士は帰りは潜水病にならぬようゆっくりと10日ほどかけて海上に浮上することになる．

採取された原油，ガスはプラットフォームの上部構造部に集めて，そこで精製して再び海底パイプラインを通して陸地に送る．上部構造は精製工場であり多くの作業者が泊まるホテルが付設された巨大な鋼構造物である．北海などでは厳寒期は気象条件が過酷で，このような構造物にはとくに溶接性に優れた鋼材が使用される．これは実話であるがノールウエイ沖の300 m高さのガス掘削やぐらを据えて操業直前の工事中のときに，ある国の潜水艦がそのやぐらに衝突したことがある．海図にはまだそのやぐらは記載されていなかったのであるが間の抜けた話である．やぐらは鋼管構造であり衝突箇所は大きく湾曲したけれど，鋼管が破れて海水が侵入することもなく，鉄鋼の延性がいかに優れているかを示す事例であった．

3. 橋　　梁

鋼橋はその軽量化が重要であり，そのため溶接の適用は最も早く1930年後半のことである．また，橋脚間距離すなわちスパンを広げるには強度の高い鋼材の使用が望まれるが，溶接割れが発生しやすいという問題があった．この高張力鋼の溶接割れが原因でドイツやベルギーで全溶接鋼橋の破損事故が続発した．その後，鋼板製造に焼入れ焼戻し技術などを導入することにより鋼中炭素低減が可能になり高張力鋼の溶接性は漸次改善されてきた．

図4は世界最長のスパンを誇る明石大橋の架橋工事

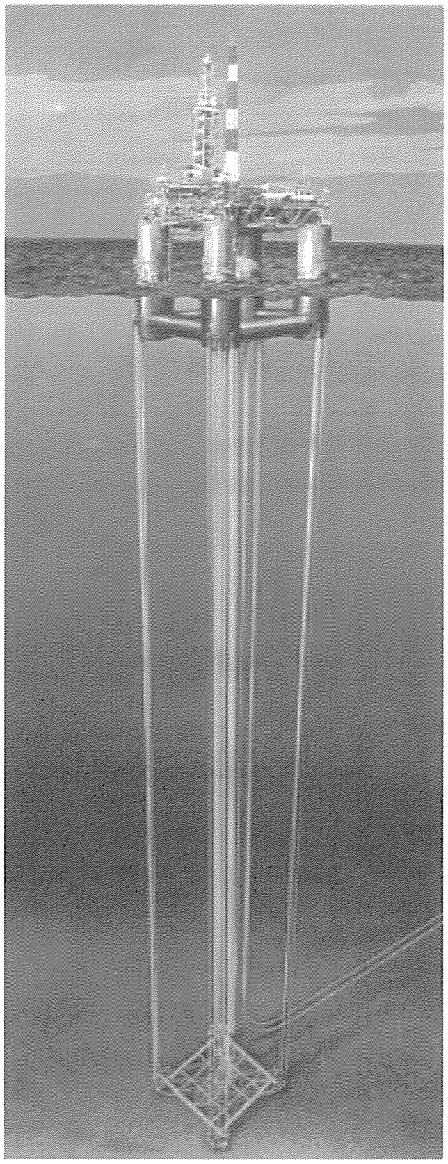


図3　メキシコ湾の石油掘削リグ

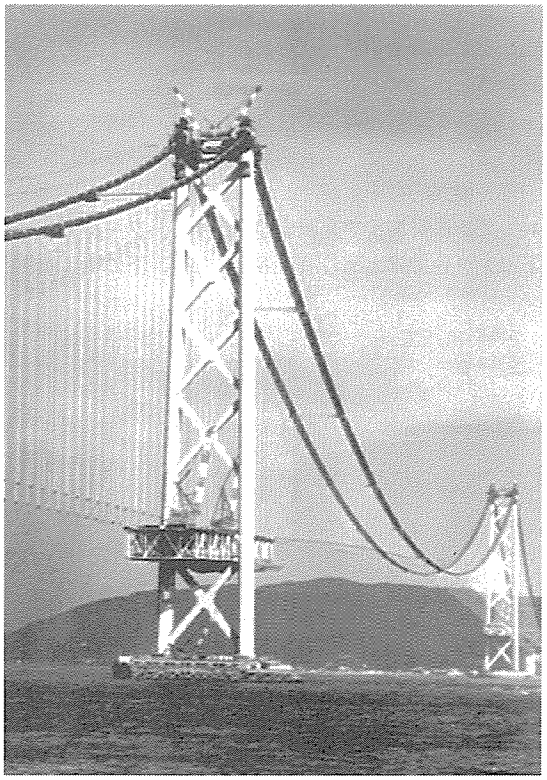


図4　明石大橋の架橋工事

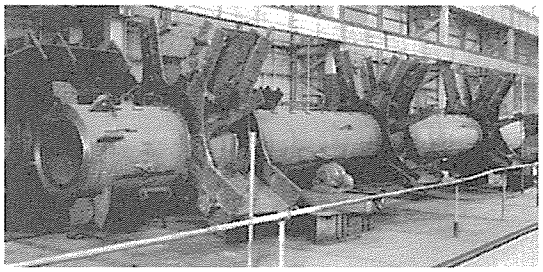


図5　超高層ビルの極厚柱の溶接

の状況である．吊り橋のスパンはケーブルの鋼ワイヤーの強度と橋部の鋼の強度によって決まる．この橋桁には最新の鉄鋼製造技術で溶接性（溶接割れが生じない）が改善された引張強さ780 MPa鋼が使用され，橋桁の軽量化を実現した．ケーブルを支える主塔も鋼製の箱を溶接接合で積み上げたもので300 mの高さがあり，頂上からの眺めは実に素晴らしい．因みに主塔の中にはエレベーターがあり主塔は内側に少し傾斜しているので，真ん中で別のエレベーターを乗り換えることになる．

4.　建築・土木構造物

我が国の高層ビルは地震国であるので，鉄筋コンクリート構造ではなく鉄骨構造である．図5は日本最高の横浜MM21ビルの柱の工場溶接を示している．極厚の円柱にフロアーとなるビーム仕口の取り付け溶接が終わった状態である．この極厚柱をビルの内部と外壁部に配置し溶接接合（柱-柱溶接）して積み上げてゆき強固な構造物を作る．一方，アメリカでは極厚柱はビルの中央に配置し，外周部は細い柱が立っていわば鳥かご構造になっている．同時多発テロのときニューヨークのワールドトレードセンターに旅客機が突っ込んだ際，簡単にビルに突き刺さったのは鳥かご構造であったからである．

突き刺さった航空機の燃料が燃えて，その階の柱は加熱されしばらくすると鋼製柱は軟化し上部階の荷重を支

えられなくなり，その階の上部が崩落してきた．しかし，テレビでの報道で見られたようにそれより下の階も一挙に崩落したのである．上部は崩落することは理解できても下部まで壊れないはずである．これには溶接が関係している．図6はワールドトレードセンターの中心柱の接合部を模式的に示すが，この溝を切ったところを開先といってそこを溶接で充填して接合する．ワールドトレードセンターでは上部の階は溶接したが，下の階は開先は準備してあったが柱-柱の溶接は一切なく，ボルト数本で留めたに過ぎなかった．これは下の階は上からの重い荷重を受け風などによる横荷重によってずれることはないと設計されていたためである．ところがテロによる想定外の上部崩落がありそれに伴い横荷重が加わって，柱がまるで積み木崩しのように倒れていったのが全体崩落の原因である．完全溶接の日本の高層ビルではそのような起こらない．

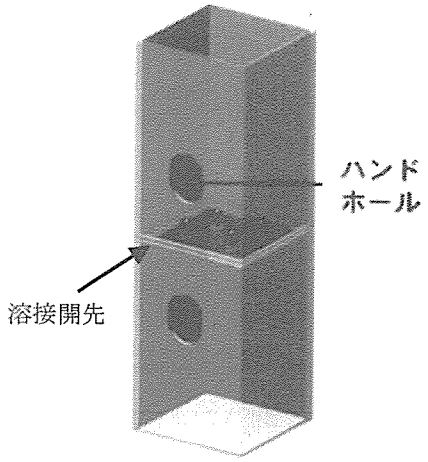


図6　ワールドトレードセンターの柱-柱接合

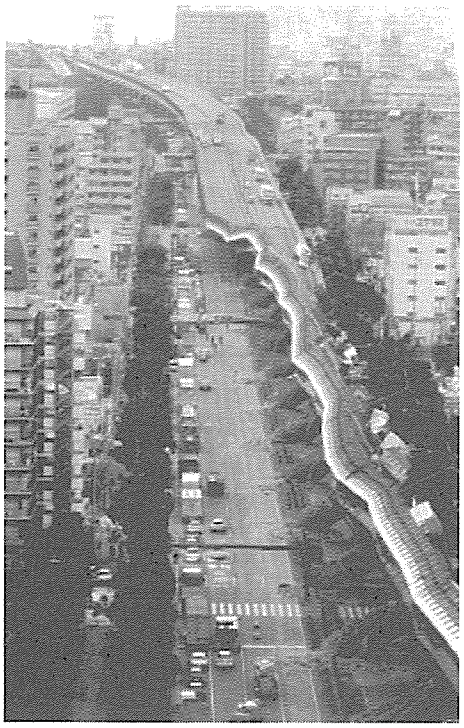


図7　阪神大震災時の高速道路の崩壊

図7は阪神大震災時に崩壊した高速道路である．この道路は鉄筋コンクリート造で支柱の根本の鉄筋溶接部が折れたために起こった事故である．鉄筋もビルの柱と同様に現地で溶接することになるが，一般にガス圧接という方法で鉄筋同士は接合される．この方法では酸素を絞り中性または弱還元性に保ったプロパン燃焼ガスで溶接部を加熱し，十分に温度が上昇した時に上下から急速に加圧して接合が完了する．このガス圧接はレールの現場溶接にも適用され，駅のプラットフォームから見るとレールの腹部にGPWと白くマークされているところがガス圧接部である．ガス圧接では酸素が少しでも過剰となると酸化物が形成され，圧接部に平たく伸ばされた形で残存する．この場合，外見上接合されたように見えても実際は全く接合されていない．金槌でたたくと簡単に折れて平たい破面が出現しこれをフラット破面という．図7は燃焼ガス制御の溶接管理が十分になされなかったため多くの鉄筋が根本で折れて生じた事故である．

5.　パイプライン・ペンストック

石油・ガスはパイプラインによる輸送が効率的である．図8はシベリア北部での高圧大径ガスパイプラインの鋼管-鋼管円周溶接の状況を示している．この場合，鋼管同士をお互いに接触させて一挙に10万アンペアの電流



図8　大径ガスパイプラインのシベリア極寒冷時での溶接

を流しパイプ端を加熱し，十分に加熱された頃に鋼管同士を押しつけて溶接を完了させる．加熱中は鋼管間に火花が飛び(フラッシング)，フラッシュバット溶接と称する自動溶接である．道路もないシベリア奥地でのパイプラインの敷設で，鋼管や電源車など重量物を搬送する必要があり，地面が完全に氷結して重量物積載車が運行可能になる冬から春にかけてしか作業はできない．気温－40℃の昼でも暗き闇のなかで図8に見られるフラッシングがパイプ円周を高速で回転する様は非常に美しい．

シベリアでは気象条件があまりにも過酷なのでフラッシュバットの完全機械化溶接が行われるが，ほとんどの陸上パイプラインの敷設溶接は溶接士による手溶接に依る．その場合，フラッシュバットのように1ヵ所で溶接を完了させるのではなく，数ステーションにまたがって何人も溶接士が溶接を仕上げてゆく．各回の溶接の投入熱量は少ないのでone-shotのフラッシュバット溶接部より靱性は高くなる．シベリアのガスは数千kmに及ぶパイプラインを通して欧州の家庭に直結しているように，欧米ではパイプラインは鉄道網のようにお互いが連結されている．現在，サハリンで石油・ガスの開発が進行中であるが，もし本州にまでパイプラインが通じると我が国は始めてエネルギーラインが外国と直結することになる．

水力発電は水圧鉄管（ペンストック）を通して水を落下させ発電する．この水圧鉄管は各地で見られるが，それらは昭和40年以前に建設されたものである．いまは美観上からトンネルの中に敷設される．我が国の大型水力発電はほとんどが揚水発電であり，昼間は水を落下して発電し，夜間は原子力発電で余剰となった電力で水を上部貯水池に汲み上げている．水力発電所は地中にあって目立たないが原子力発電所が建設されると，水力発電所は必ず対となって建設されているのである．

水圧鉄管中を落下してきた水は下部で分岐し発電機に送られる．図9はその分岐管の溶接の状況である．高圧に耐えるため厚肉で強度が高い鋼を使用するので溶接時に割れが発生しやすい．この割れ発生防止のために常時150℃程度に溶接体を加熱しておく必要があり溶接の環境は極めて厳しく，数分溶接したらすぐに涼しいところに避難するhit-and-away（戦闘機の出撃）方式となる．最近，スイスのモンブラン山系で落差1000 mの水力発電所が引張強さ1000 MPaの高張力鋼の鋼管を用いて建設されたが，稼動後しばらくして溶接部から亀裂が発生し水が噴出し山崩れを引き起こし，ふもとの人家を埋め3名が死亡する事故があった．今もこの発電所は稼動停止中であり亀裂発生の原因を調査している．稼働停止に伴う経済的損失は莫大なものとなっている．

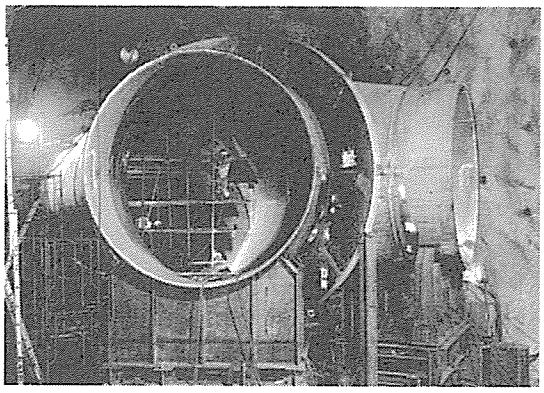


図9　水圧鉄管の分岐管の溶接

6. 容　　器

我が国は島国であり石油・ガスのエネルギー搬送は船舶による海上輸送に頼っている．天然ガスは液化ガス（LNG）としてLNG船で外国から運ばれ，港で一度タンクに貯蔵されてそれから気化してパイプラインを通して発電所や家庭に送られる．図10はその貯蔵タンクの構造を示す．－162℃のLNGに接する一番内部のタンクは9％ニッケル鋼という低温用鋼で作られており，その外側を普通鋼でできた格納容器が覆っている．さらにその外側を戦闘機の衝突に耐えるほどの強度を有するコンクリート容器が覆っている．それでも万一LNGがあふれた場合に備えて土手でタンクは囲まれている．このように3重の安全策を講じているのである．図10のタンクは地上式であるがLNGタンクは地下式が多く，この場合，液圧は周りの土に支えられるので，タンクは薄肉のステンレス鋼構造となる．－160℃の液体に接するとステンレスは収縮するので，溶接施工の常温時ではステンレス壁は冷却収縮を吸収するために蛇腹状となっており，高さ数10 mの凹凸のある壁を溶接する難しい作業となる．

液貯蔵タンクは常圧使用であるが，多くのタンクは高圧使用で一般に圧力容器という．街中で見受けられる球形タンクは家庭用ガスを常温高圧で貯蔵し，高張力鋼で

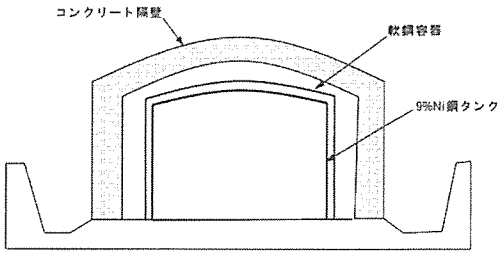


図10　液化天然ガス貯蔵タンク

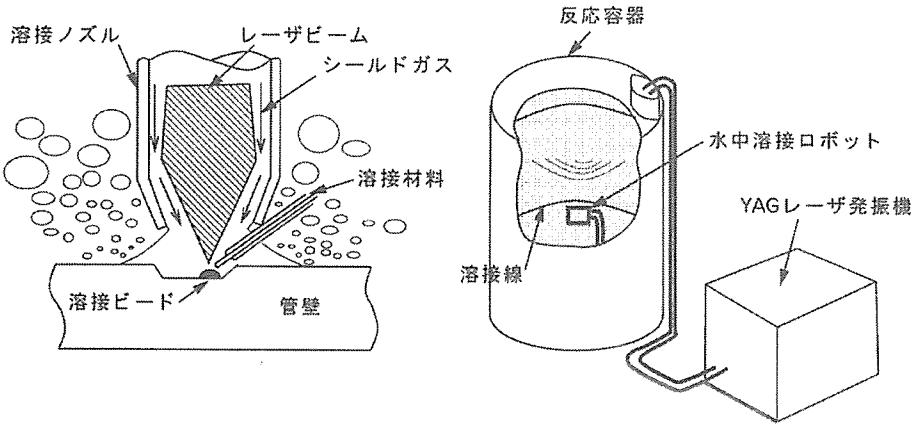


図11　原子炉反応容器の水中補修溶接

製造されている．これら圧力容器は3年毎の開放検査で内部を空にし溶接部を全線にわたって厳密に検査し，安全の確保に努めている．高温高圧の圧力容器としては原子炉もその一つである．今，原子炉の疵が問題になっているが，この疵は主として溶接したときに溶接部に生じる引張りの残留応力起因の応力腐食割れである．原子炉は定期検査で稼動を停止し放射能が漏れないように水を張ったままの水中での検査となる．そして疵が見つかると疵を取り除いて補修溶接を実施するが，これも水中溶接である．最近では，図11に示すように光ファイバーケーブルでレーザーを搬送し遠隔操作で動くロボットのレーザー溶接を行う．

原子炉は一切疵がないものであることを建前にしてきた．しかしモノは使っていくと必ず故障がでてくるものである．建前を通せば，操業に影響にしない小さな疵までも取り除き，補修溶接を繰り返すと炉を傷めることにもなる．そのため，小さな欠陥は許容するとする維持基準が2002年に経産省原子力安全保安院のもとで制定された．原子力アレルギーの強い我が国において米国に遅れること30年にして，合理的な欠陥許容の考え方が制度化されたのである．

7. 鉄道レール

新幹線のような高速走行では全線が溶接によるロングレール化は必須である．また，在来線や私鉄の住宅密集地では高速走行ではないがロングレールでないと継ぎ目で騒音を発するので，ここでもロングレール化が望まれる．図12は米国での貨物列車の運行を示している．このように鉱石や石炭など重荷重の車両が1kmにもつながってゆっくりと走るがここでもロングレール化が要請される．その理由は継ぎ目付近でレールが上下すると路盤が痛み，その保守が大変な作業となるからである．レールの現場溶接もパイプラインと同じで極寒冷地や酷暑の砂漠地帯での環境の作業となるし，我が国では終電が終わり始発列車が走る前の夜中の作業となる．

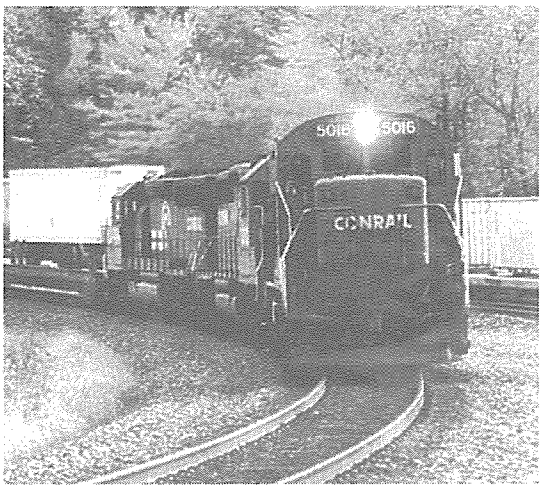


図12　重荷重列車とレール

8. 自　動　車

自動車は2枚重ねの薄板を電極で挟みつけて接合する抵抗スポット溶接で主として組み立てられ，その溶接点数は自動車1台あたり数千にも及ぶ．自動車用鋼鈑は防錆が重要で亜鉛めっきされている．この亜鉛めっき層は耐錆性に優れるのは当然のこととして，プレス成形するときの潤滑性，さらに良好なスポット溶接性を兼ね備えねばならない．スポット溶接時の高温で溶接電極の銅と鋼鈑のめっき層の亜鉛が反応して硬い真ちゅう（ブラス）が電極表面に形成されると電極が劣化し，連続的な溶接ができなくなり流れ作業のラインが停止することに

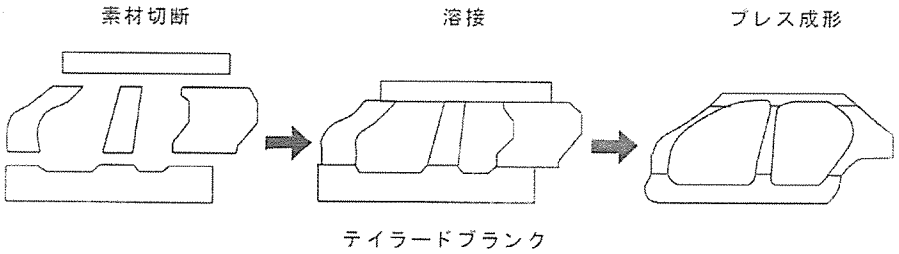


図13　自動車外パネルの工作過程

なる．この電極寿命を長くするために亜鉛めっき層の表面に特殊な合金処理を行っており，各鉄鋼メーカーはこの合金化めっきの技術開発にしのぎを削っている．

一枚の大板をプレス成形してパネルを作るのが以前の自動車外板の製造工程であった．現在は図13に示すように，外板の下部はめっき層の厚い板を，ピラーの部分は強度の高い板を，プレスによる変形が大きくなる部分には深絞り性の優れた板を配置し，それらを溶接してからプレス成形するように変わってきている．布地を裁断し縫製する洋服屋（テイラー）の仕事に似ているのでテイラードブランク溶接という．このテイラードブランク溶接にレーザー溶接またはマッシュシーム溶接が適用される．マッシュシーム溶接は板を重ねて円盤電極で押しつぶしながら通電して溶接する方法である．マッシュシーム溶接部は身近にはお茶やジュースのスチール缶（溶接缶）で印刷されていない個所に細い線として見られる．なお，飲料缶や缶詰の缶は錫めっきである．

9. 車両・航空機

鉄道車両は軽量化のためにアルミ合金が多用されるようになってきた．航空機は当然アルミ合金製である．アルミおよびアルミ合金は熱伝導が高くヤング率が低いので溶接すると変形が生じやすい．また，ジュラルミンなど高強度合金は溶融すると凝固収縮に起因する凝固割れが発生しアーク溶接など溶融溶接は不可能である．そのために，航空機はリベット接合で組み立てられている．

20世紀の末に英国溶接研究所のボール盤工によって摩擦撹拌接合が発明された．これはボール盤での機械加工の延長のようなもので，図14に示すように，2枚の突合せた板を治具で押さえつけながら回転させ，その摩擦熱で金属を再結晶温度（軟化温度）に上げて，金属を機械的に撹拌させて接合する方法である．ただし，摩擦撹拌接合法の適用は溶融温度の低いアルミなどに限られ，鉄鋼材料には適用できない．この方法では加熱温度は低く変形は少ないし，溶融割れは発生しないので，アルミ

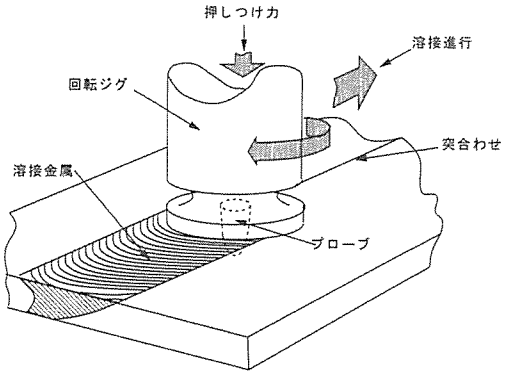


図14　摩擦撹拌接合法

合金の溶接に最適である．我が国では新幹線用車両の製造に適用され，欧州では航空機の胴部の製作に適用されている．疲労設計など航空機の基本設計が適用溶接法の違いから変更されようとしている．

10. おわりに

本稿では学術的内容には一切触れず溶接諸問題を述べてきたが，実は溶接は高温アークプラズマ物理，電源制御，熱伝導，凝固から相変態などの溶接冶金，残留応力や変形の溶接力学，破壊工学など多くの学問分野が関連する総合工学である．筆者は長年にわたって鉄鋼の溶接問題にかかわり顧客対応には広い知識が必要であることを痛感してきた．本稿ではいくつかの章で溶接割れ問題を取りあげたが，溶接時の割れは鋼材成分が関係しており，筆者は鋼材組成を関数とする鋼材溶接性指標を提案しそれはASMEとASTM規格に採用されている．さらに，その指標を基にした溶接割れ防止の予熱基準のISO化が検討されていることを付記する．

溶接は表舞台に立つことはあまりないが，我々の社会基盤をなす多くの構造物の安全性を支える技術であることがご理解いただければ幸いである．

大会記念講演

人との出会い，それが人生 —too kind な人たち—

水　田　義　明*

It is the Life to Encounter People —Too Kind People Much Impressed—

by Yoshiaki MIZUTA

1. はじめに

土木工学や資源工学などの分野で岩盤工学に関する研究を行っている人は多いが岩盤工学と通気学の両方について研究している人は，古くは Jeager，最近では平松が有名であるが，世界でも殆んどいない．筆者は平松先生と岡先生の両方に師事したことから，風と岩との両方に関わる研究を行ってきた．そこで，まず，地球の歴史について概観し，岩盤工学や通気学と関係の深い地圧や地熱が何に起因しているかについて述べ，つぎに，筆者らが行った事例研究の代表例を示す．また，京大時代の交流と研究，山大時代の交流と研究について紹介する．そして，これらの交流と研究を通じて得られた孔内加圧による岩盤応力測定に関する知見について述べる．

2. 地球史を動かす原動力

2.1 地球の年齢に関するケルビン卿とダーウィンとの論戦（19世紀の終り頃）

後年ケルビン卿として名高いウィリアム・トムソンは「生命の住家としての地球の年齢」と題する論文で，地球の年齢はたかだか2000～4000万年にすぎないと述べている．しかし，この結論は当時の地質学者にはとうてい受け入れがたいものであった．深海底における堆積速度はきわめて遅く，1000年に1ミリメートル程度というのが一般的な堆積速度であり，したがって数キロメートルにも及ぶ厚い堆積岩層をつくるには10億年以上もかかることになるからである．チャールズ・ダーウィンはトムソン理論に対する当時の地質学者の一般的な不信感を代表して，かの有名な「種の起源」のなかで，トムソンの見積もりでは，カンブリア紀以降現在までの進化の多様性を説明するには，あまりにも時間が短すぎることから，トムソンが見過している他の要素の存在を示唆している．

ダーウィンが示唆した他の要素は，ほぼ時を同じくしてベクレルやキュリー夫妻(注1)により秘密のベールをはがされつつあった，原子核の放射性壊変によるエネルギーにほかならない．地球はトムソンが想定したように，その誕生以来ただ冷却してきただけではなくて，核壊変エネルギーのために温度が上昇に転じたと考えるべきである．もちろんこうした温度上昇は放射性元素の消耗とともに，次第に衰え，ついには地球は完全に冷却するに至る．

2.2 地球史を動かす原動力，核壊変エネルギー

岩石の中に含まれている放射性元素，ウラン，トリウム，カリウムなどは数億年から数十億年の極めてゆっくりした半減期で，最終的に安定な原子核である鉛に変わって行く．これらの元素が放出する核壊変エネルギーを合計すると，結局，地球を構成している物質の発熱量がわかる．それは平均して1グラム当り年間1億分の5カロリー以下という大変微弱なものである．しかし，地球史のきわめて長い時間のあいだに累積された発熱量は途方もなく巨大なものとなる．地球誕生以来46億年の

*崇城大学工学部環境建設工学科教授

注1．キュリー夫妻とベクレルとの連名でノーベル物理学賞（放射能の研究）がおくられた（1903）．
キュリー夫人にノーベル化学賞（ラジウムの発見とその性質研究）がおくられた（1911）．
キュリー夫妻の長女イレーヌはのちに，F.ジョリオの妻として，両親とおなじく夫婦でノーベル化学賞をうけた（1935）

表1　岩石中のウラン・トリウム・カリウムの含有量（数値は平均値）

	ウラン（ppm）	トリウム（ppm）	カリウム（%）
花こう岩	3.0	12.0	3
玄武岩	1.0	4.0	0.5
かんらん岩	0.001	0.004	0.04
砂岩	0.45	1.7	1.4
深海底泥	1.3	7	2.5

表2　放射性元素同位体の発熱量（現在における値）

ウラン-238	0.71	カロリー／年・グラム
ウラン-235	4.3	
ウラン全体*	0.73	
カリウム-40	0.21	
カリウム全体**	27×10^{-6}	

＊ウラン-238、ウラン-235は現在137.8：1の割合でウランを構成している
＊＊カリウム-40はカリウム全体の0.0117%

間に，繰り返し起こってきた火山の爆発，その原因となった地球内部でのマグマの発生さらには地震や造山・造陸運動といった多彩な地球史のドラマの原動力は核壊変エネルギーにほかならない．表1に岩石中のウラン，トリウム，カリウムの平均的な含有量を，表2に放射性元素同位体の現時点における発熱量を示す．

さきに述べた太陽エネルギーは放射性元素による発熱量のほぼ10万倍にも相当するが，太陽エネルギーは，地球表層の大気や海洋などの運動エネルギーに消耗されるだけで，地球内部の温度上昇にはほとんど影響しない．

2.3　地球の一生

収縮テクトニクスに至るまでの惑星（英語のplanetは，もともとギリシャ語の$\pi\lambda\alpha\nu\eta\tau\eta\varsigma$からでており，さまよえる者といった意味である）の寿命はその大きさと放射性元素の含有率に依存する(注2)．

地球は金星より年老いており，火星や水星より若い．

地球の一生を5段階に分けてその状態を示し，他の惑星，衛星と対比させるとつぎのようである．

(1) 成長テクトニクス（マグマオーシャン）：46億年前のすべての惑星

小惑星が衝突しながら徐々に質量を増やして地球が生まれた．誕生間もない地球は，マグマの海におおわれていた．そして何かの原因でほどなく月が離脱した．

(2) プリュームテクトニクス（プレートなし）：現在の金星，原始地球

40億年前まで．表面のマグマが固まり，厚い原始大気が覆い，プリュームテクトニクスが始まる．

(3) プレートテクトニクス（多数プレート）：現在の地球

40億年前から現在．原始海洋が誕生，プレートテクトニクスが始まる．当初はプレートは1000枚以上あった．内部ではプリュームテクトニクスが徐々に衰えながら現在に至る．遅くとも35億年前には生物が誕生．

(4) 収縮テクトニクス（単一プレート）：現在の火星，水星

10億年未来以降の地球．プレートが厚くなって1枚になり表層は冷えきる．

(5) 最終テクトニクス（単一プレート）：現在の月

さらに10億年未来以降．収縮テクトニクスが終焉する．

2.4　現在における地殻熱流量と地温勾配

地球内部から地殻表面を通って放出される熱流量を地殻熱流量といい，地表での地温勾配と構成物質の熱伝導率との積で与えられる．ただし，地熱地帯，火山で物質の流動にともなって放出される熱量は含まれない．地球全表面での平均値は69 mW/m²程度であり，大陸地域と海洋地域に有意の差はみられない．

上記の熱量が地球外へ放散されるわけであるが，地殻の平均熱伝導率を2.3 W°C・mと見積もれば平均地温勾配は0.03°C/mである．この地温勾配は地殻内でほぼ一定である．地殻の厚さは大陸部で平均35 km，海洋部で平均11 kmである．

3.　風　と　岩　と

3.1　豊羽鉱山における新鉱床開発

注2．放射線元素の含有率が同じであれば，核壊変エネルギーは体積（$4/3\ \pi a^3$）に比例し，放散熱量は表面積（$4\ \pi a^2$）に比例するので，大きいものほど冷えにくい．

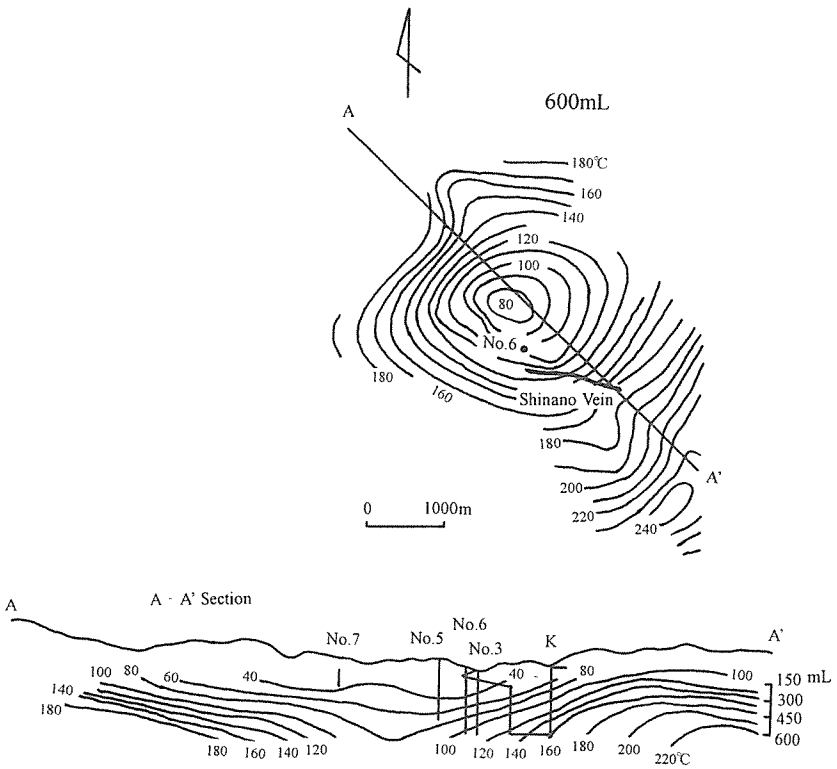


図1　豊羽鉱山周辺の岩盤温度分布

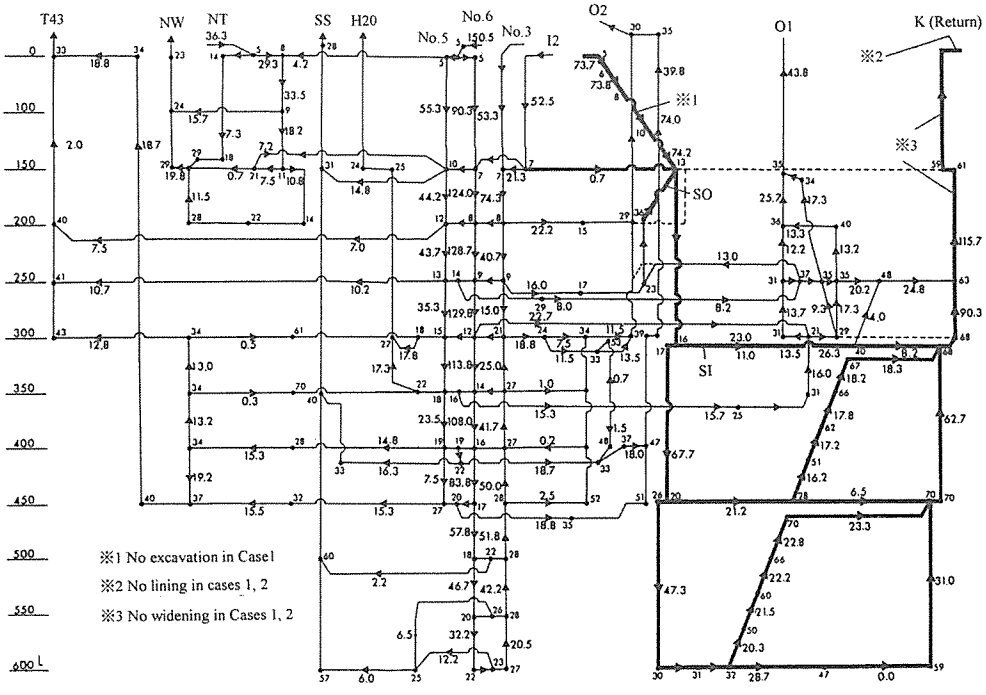


図2　通気系統拡充案3ケース

豊羽鉱山では，かつて新鉱床（信濃ひ）が発見され，これを採掘するための通気系統の拡充について検討されることとなり，水曜会の先輩，賀川鐵一さんに依頼されて，これを指導することとなった．豊羽鉱山における打ち合わせのあと，日鉱金属の坂井慎二さんが山口大学工学部に派遣され，坂井氏の手により，三つの拡充案に対するコンピューターシミュレーションが行われた．

図1に豊羽鉱山およびその周辺の岩盤内温度分布を示す．図から信濃ひは160°C前後の岩盤中にあることがわかる．また既存の立坑の位置（縦断面図のNo.3，5，6，7）から，先人は岩盤温度の低いところから開発していることがわかる．

図2は豊羽鉱山のスタッフによって，あらかじめ考えられた通気系統の3ケースを示している．ただし，ケース1においては，図中に※1で示される大江沢斜坑は掘削しないので，既存の坑道（長年の通気によって既に冷却されている）を経由した気流が新しく開削された通気系統への入気となる．また，ケース1およびケース2においては，図中に※2で示される胡桃沢通洞のライニング施工はしないので，通洞の摩擦係数はライニング施工を行うケース3の場合より大きい．

これら3ケースのモデルに対する数値シミュレーション[1]の結果から，ケース3による通気系統の拡充が行われることとなった．その後，実際にケース3のプランに従って開削が行われ，予測結果より良好な坑内気象のもとで新鉱床の開発が行われた（実際の採掘場では冷水の噴霧が行われたが，予測解析においてはそれを考慮に入れなかった）．

上記の坂井氏は山大と日本鉱業との共同研究の研究員

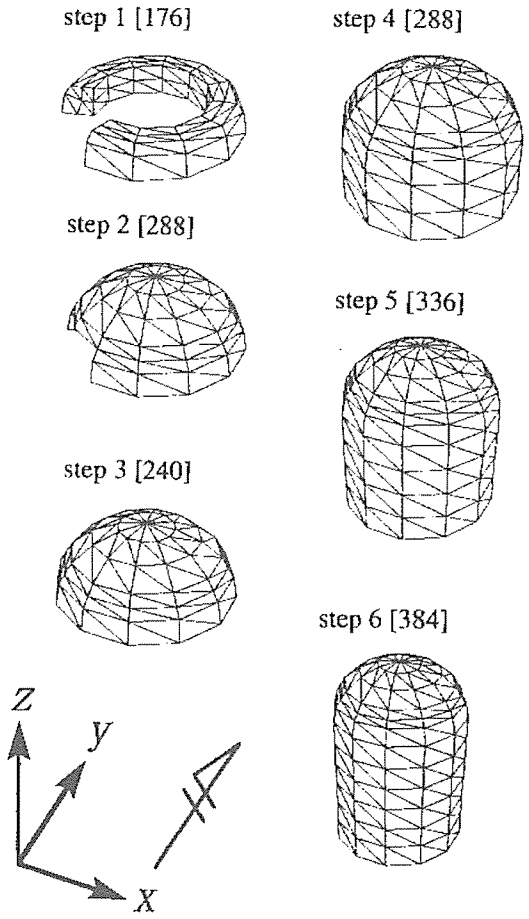


図3　スーパーカミオカンデ用空洞掘削の6段階BEMモデル

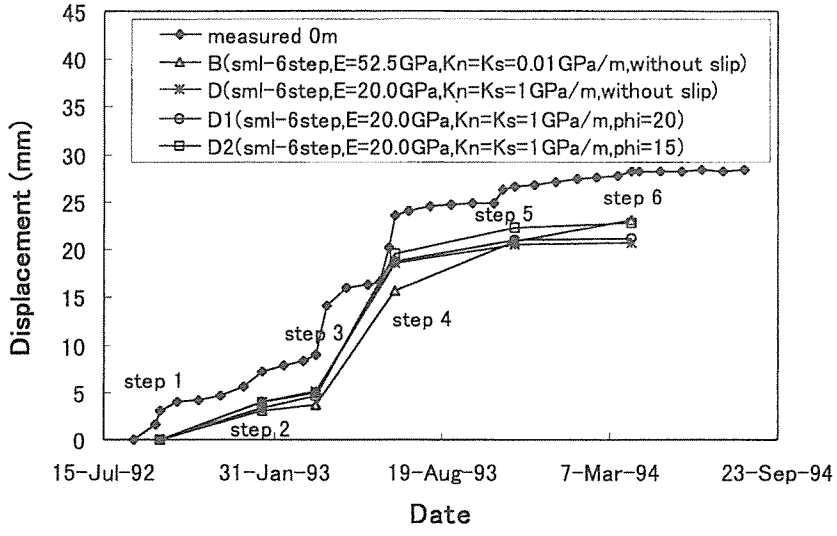


図4　地中変位計No.5の計測結果と対応する解析結果

として山大に1年間留学したことがある．原油の地下備蓄への日鉱の参画に先だって理論武装するために，やはり賀川さんが推進したもので，山大としては第1号の文部省共同研究であった．

3.2 スーパーカミオカンデを収納する空洞の掘削に伴う岩盤応答

ドーム型空洞掘削の進行過程を図3に示す6段階に分けてモデル化を行った[2]．ただし，モデルに導入された境界は空洞表面を表わす図のFSM要素だけではなく，図3には描かれてはいないが，空洞から少し離れたところに水平から60°傾斜した弱面がDDMジョイント要素で表わされている．

空洞径方向に埋設された地中変位計により，空洞周辺岩盤内各測点の変位が実測されたが，地中変位計No.5というのは弱面を貫く方向に埋設されたものである．図4にNo.5の計測結果と対応する解析結果を示す．図から，実測結果，解析結果ともにstep 3から4にかけて大きく変位していること，弱面を導入して内部摩擦角ϕ=15°とした場合に実測結果に近づくことがわかる．

4. 京都時代の交流と研究

4.1 学習塾の創立

筆者は昭和42年に京大資源工学科に助手として採用された．実は平松先生に斉藤敏明か筆者かどちらか助手にならないかと言われたのであるが，斉藤くんには自分が助手になるからきみは博士課程に進学しろといい，平松先生には厚かましくも，助手になりたいが土曜日の午後は休ませてくださいといったら，すんなりと受け入れられた．筆者は学部学生のときから，大阪府立大手前高校の同級生と一緒に大阪で進学塾を経営していて，助手になっても土曜日の午後だけ塾の講師をした．助手になって最初に頂いた月給は30,003円であったが，助手になる前に塾で得ていた収入はその数倍あったからである．斉藤くんが授業料を払っていた3年間，私は給料を貰っていたわけであるが，博士号を取得したのはその後の同じ日であった．

4.2 同級生

筆者は教養課程を通過するのに4年かかったので，3学年にわたって同級生がいるが，第2外国語としてフランス語を履習した（鉱山学科の学生でフランス語を選択した人はいなかった）ので，鉱山学科の同級生ができたのは3年生になってからである．とくに高橋堅之とは同じ部屋に下宿するなど，3つ年下でありながら社会性の高い彼に引っ張って貰う形でその後の学生生活を送った．専門課程に進学したときに，もし彼にめぐりあっていなければ，あるいは筆者の卒業はなかったかもかも知れない．斉藤修二はやはり卒業するまでに年数がかかっていたが，囲碁好きの文学青年であって，口とは裏腹に自分に自信をもっていた．彼らの卒業後，筆者は斉藤修二の下宿に移った．また前記の斉藤敏明は物分りのいい人で，人に逆らうようなことはあまりしなかった．このほか，杉谷嘉昭，三浦義明，本間真美などを相手に頻繁に麻雀を行った（高橋と筆者の部屋が雀荘代わり）．

小門研究室の新井勝は大学院に進み，圧延の研究をした．当時は小門研にもお金がなかったので，筆者の父親が経営していた鉄工所「水田製作所」で小型の圧延機を作った．そして，藤中先生がトラックのエンジンとトランスミッションを利用して作った装置で圧延機を駆動した．後に小門研は宇部鉄工所に本格的な圧延機を作らせることになったが，このときの宇部鉄工所の担当者は元宇部テクノエンジ社長で現常盤工業会（山大工学部同窓会）会長佐々木孝治氏である．

鉱山学科から医学部に編入した同期生が二人いたが，そのうちの一人寮隆吉とは土木工学科の山内勇喜男や前記斉藤敏明とともにキャンプ旅行したことがあって，寮の海外滞在中，彼のアパートに移ったこともある．

4.3 最初の学術論文

当時の京大鉱山学科は採鉱学第一講座(伊藤研)，採鉱学第二講座（平松研），鉱山機械学講座（小門研）などとなっていたが，小門研の製鉄・製鋼学への模様替えに伴い，平松研は鉱山機械を吸収して採鉱機械学講座となった．そこで，中学生のときから父親の鉄工所を手伝っていた筆者にある種の期待がかかり，筆者の最初の学術論文は筆者らが設計・製作した4種類の機器に関する水曜会誌上での下記の報告であった．

地圧状態を監視するための計器の研究
水田義明　平松良雄　岡行俊
水曜会誌　第16巻　第7号　別冊
昭和43年10月発行

4種の機器とは，ボアホール孔底ひずみ測定装置，コンバーゼンスメーター，エクステンソメーターおよび非整



写真1　平松先生，岡先生，グリーブス氏（南ア）



写真2　天野先生夫妻，第4回国際通気学会（ブリスベン）にて

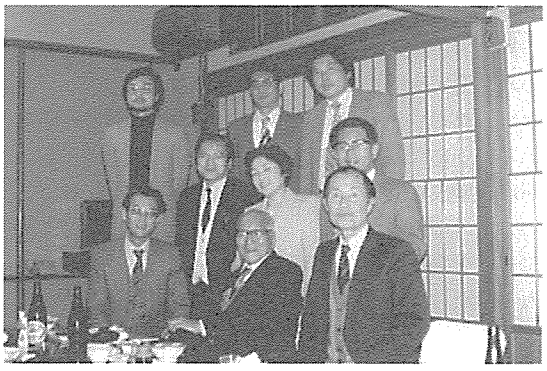


写真3　樋口先生を囲む資源工学科教官：みつや旅館にて

形圧裂試験装置である．これらのうち，エクステンソメーターは南アから訪れた技術者からのパクリである．写真1にはその技術者グリーブス氏が平松先生，岡先生とともに写っている．

4.4　風の先生，岩の先生

大戦後，鉱山学科の先生方はインドネシアなどの資源調査などで軍に加担したとして公職追放となった．新兵として応召した平松先生は最終的には技術将校（中尉）になっていたが，京大に帰ることができた．そこで，先生は日本国内企業をまわって，これから何について研究すればよいかを尋ねた．当時鉱山の深部化が始まろうとしていたので，答えは坑内気象制御をするための通気学であった．先生は後には主として岩石力学の研究を行うようになったが，筆者にとっては風の先生でもある．これに対して，今は亡き岡先生は筆者にとっては岩の先生である．筆者にとってもう一人の風の先生がいる．それは故天野勲三先生（住友金属鉱山-住鉱開発-住鉱コンサルタント-秋田大学）である（写真2）．天野勲三先生とともに発表した論文は国際誌2件，国内誌3件，国際学会2件あるが，一例として，安房トンネルについての論文を参考文献として挙げておく[3]．

5.　山大資源時代の交流と研究

5.1　樋口先生と資源教官OB

前述の塾は6クラスあって，1クラスは12名であった．これは「24の瞳」とキリストの「最後の晩餐」を意識してのもので，12名を越えると講師と生徒の間の緊密な関係を保持できないと考えたからである．私は3クラスにおいて数学を担当していたが，全生徒の名前を完全に暗記していた．

宇部に来てからは，講師の手配だけをすることになった（少なくとも5名以上の水曜会員に講師をして頂いた）．今度は資源工学科の学生全員の名前を暗記し，学生から山口大学学歌などを教わった．また，学生にはきつい勉学を強いたが，これは卒業生からいつまでも「おやじ」と呼ばれて慕われていた故樋口誠一教授から引き継がれてきた気風でもあった．樋口教授は工学部の前身である宇部高等工業学校の初代校長で，元工学部長である（写真3は当時の資源の先生方がよく集まっていた「みつや旅館」でのものであるが，樋口-荻野-水田の3代にわたる開発工学研究室担当者が写っている）．一方では，たびたび学生と一緒に酒を飲んで歌を歌い，テニスやソフトボールをし，ときには自宅に招いて麻雀もした．これらは1学年20名前後であったからこそできたことだと思う．

社会建設工学科に転じてからは学部学生だけで1学年あたり120名前後となり，学生の名前を憶えることは諦めた．また，年を経るにつれて，研究室の全学生約40名についても，名前を憶える努力はとくにはしなくなった．さらに，講義の内容も質量ともに減らした．また，勉強上の学生との格闘もなくなり，私的な交流も薄まった．

過去においては，塾でも資源工学科でも，質の高い製品（生徒や学生）を作ってきたように思う．塾のあった（私が育った）地域は小さな町工場や商店が密集しているところで，一般に教育に熱心ではなかった．ところが塾を巣立った人はどんどん有名高校や有名大学に入るようになった．また，12歳以上年下である山大資源工学科の教え子の中には，本人に確認したものだけで，私の年収を追い抜いた研究者・技術者が同じ国家公務員を含めて数人いる．今後，山大工学部の学部卒業者にそういった人がほとんど出てこないのではないだろうか．

5.2　李喜根先生の奥さんは息子の同級生

韓国が発展途上国として認定されていた最後の年に，世界銀行の助成により，ソウル大学の李喜根先生が筆者の研究室に留学し，奥さんとともに宇部で一年を過ごさ

れた．当時，山大事務からは，光熱費が付加されるという理由で外国人研究者を受け入れることはできないといわれ，筆者が闇で受け入れることについては眼をつぶるといわれた．それが，後には事務から国際交流を勧められるようになるのである．また，当時，筆者の息子は上宇部小学校に通っていたが，李先生の奥さんはその息子のクラスに編入することを希望した．最初，女房が教頭にそれを申し入れたが，前例がないということで，にべもなく断られた．そこで，校長に掛け合ったところ，上宇部小学校が国際交流のモデル校であることから，息子のクラスに入ることができた．担任の下江先生は毎夏，生徒と父母を誘って宇部の海岸でキャンプをしたが，水田夫妻，李夫妻もこれに参加し，海岸に張られた蚊帳の中で，夜を過ごした．写真4は佐野先生の要望で故伊藤一郎先生が山大に特別講義にみえられたときのものである．このとき，李夫妻のほかに中国淮南鉱業学院の鈕万禧先生（前列左端）も山大に来ていた．前列右から2番目の荻野正二先生は水曜会員で，地盤沈下の著しい旧資源分野において助教授を取ってもよいという千載一遇のチャンスに，筆者を山大に導入した先生である．筆者のアメリカ留学は山大に来たからこそ実現したもので，筆者不在中の授業などはすべて荻野先生がカバーして下さった．

5.3 Minnesota Rock Mechanics Mafia

(1) ゴッドファーザー

筆者は昭和53年9月から55年9月までの2年間，ミネソタ大学の Research Associate として，US Geological Survey の助成による「Improved Procedure for Stress Determination by Hydraulic Fracturing」の研究（研究代表者 Prof. C. Fairhurst）に従事した．表



写真4　李喜根先生夫妻，特別講義で来宇された伊藤先生，短期滞在の丑万禧先生と

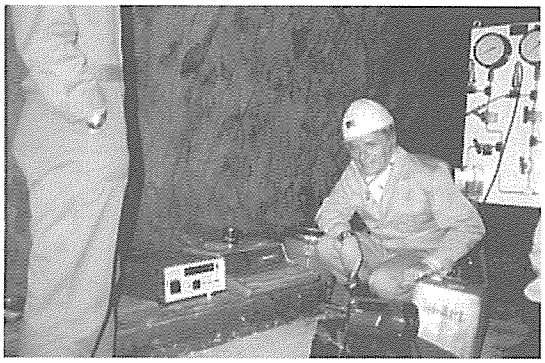


写真5　MMIJ の要請により山宝鉱山を訪れたフェアハースト教授

表3　ミネソタ大学における12ヶ月契約教員の1979-80学年度給与分布

Salary Intervals (2)	Professor (1)	Associate Professor	Associate Professor	Instructor	Total
$50,000 and over	37	1			38
48,000 – 49,999	15				15
46,000 – 47,999	27	2	2		31
44,000 – 45,999	30	3	2		35
42,000 – 43,999	45	5	1		51
40,000 – 41,999	55	9	3		67
38,000 – 39,999	59	8	3		70
36,000 – 37,999	86	15	7	1	109
34,000 – 35,999	89	26	6	1	122
32,000 – 33,999	64	39	6	2	111
30,000 – 31,999	75	64	44	1	184
28,000 – 29,999	39	86	37	1	163
26,000 – 27,999	16	77	92	9	194
24,000 – 25,999	4	60	115	8	187
22,000 – 23,999	1	20	135	18	174
20,000 – 21,999	1	8	86	39	134
19,000 – 19,999		1	31	23	55
18,000 – 18,999			28	26	54
17,000 – 17,999			2	44	46
16,000 – 16,999				14	14
Total	643	424	600	187	1854

3はcollective bargainingへの参加を呼びかけて教員組合が配った，当時のミネソタ大学教員の給与分布表である．あれから23年が経過したが，日本の大学も，独立行政法人化後はこのような給与体系になっていくのだろうか．帰国後，筆者らは資源・素材学会（MMIJ）による「低レベル放射性廃棄物の地下保管のケーススタディ」ワーキンググループの研究の一つとして，水圧破砕応力測定を行った．写真5はMMIJの要請によってフェアハースト教授が現場を訪れたときのものである．Fairhurst率いるMinnesota Rock Mechanics Mafia（後述のJ.C. Roegiersが命名）のメンバーの多くは外国人で，生粋のアメリカ人は後述のS.L. Crouchだけであるといわれている．また，Fairhurst自身英国籍のままであるという．

(2)　ドイツ，フランス，イスラエル（水圧破砕応力測定の権威）

帰国後間もなく，筆者は同和工営（株）落石雅宣氏の後押しにより，当時既にヨーロッパにおける水圧破砕応力測定の権威となっていたMinnesota Rock Mechanics Mafia，の構成員であるルール大学の理学部長Rummel教授とパリ大学のCornet教授を訪ね，水圧破砕応力測定に関する最新の技術について勉強した．両教授ともに懇切丁寧に自分たちが開発した装置を見せてくれ，自分たちのいろいろな経験について教えてくれた．Rummel教授の説明は，研究室や自宅に常時積み重ねて置いてあるワインを飲みながらであった．彼はまたMESSYという応力測定の会社も経営していた．写真6はドリリングをしているところで，傍らに彼の会社所有のワイヤライン方式水圧破砕応力測定システムが写っている．同和工営（株）のワイヤラインシステムの多くはこれに倣ったものである．Rummelは言った．「私が水圧破砕の仕事ができているのは何ゆえか？　Because of Fairhurst」．Cornet教授は当時独身で，狭いアパートに住んでいた．筆者が彼を訪ねたとき，運輸機関のゼネストがあって足を奪われ，宿も見つからなかった．彼は足を棒にして一緒に宿を探してくれた．水圧破砕の権威としては，もう一人イスラエル人のB. Haimsonがいる．彼や後述のHudsonはいろんな国で催される国際学会で顔を会わすことが多く，岩の世界がスモールワールドであることを感じさせてくれる．

(3)　S.L. Crouch

日本学術振興会（JSPS）の助成により，ミネソタ大のProf. Crouchを山大に招待し，Outburst of coal and gasの研究を行った．このプロジェクトは筆者が立案し，荻野先生が申請して，荻野先生と七高で一緒だった吉住永三郎先生が審査して実現したものである．途中から奥さんも来宇した．写真7はそのときのものである．奥さんは歌が非常にうまく，ピアノバーはとくにお気に入りであった．また宇部滞在中に迎えた誕生日に佐野先生が花を届けたときには手放しで喜んでいた．後年，佐野先生夫妻はCrouchの招きで，MTSスカラーシップによりミネアポリスに3ヶ月滞在した．あるとき，Crouchに

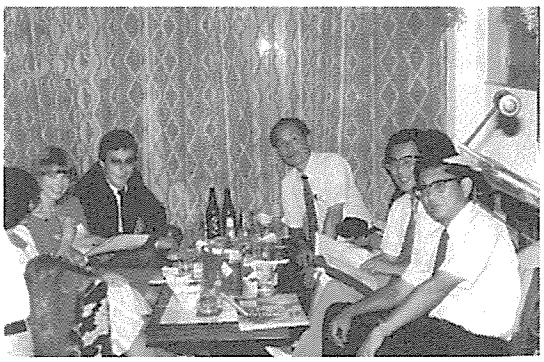


写真7　JSPSの助成により来宇されたクラッチ教授

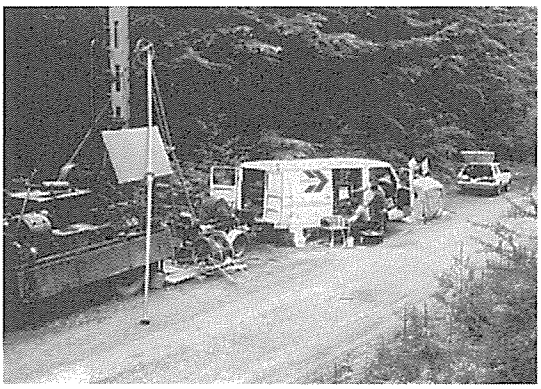


写真6　ルンメル教授率いる会社の水圧破砕ワイヤラインシステム

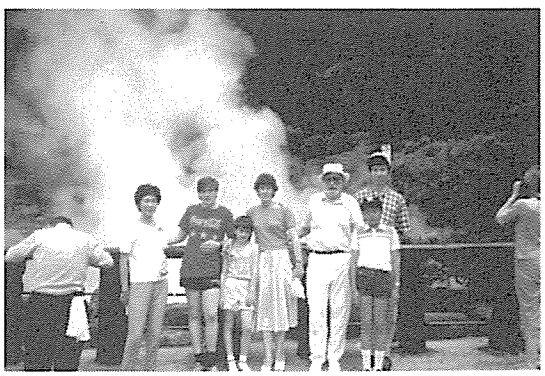


写真8　西日本工学シンポジウム（宇部）に参加したハドソン教授一家

Rummel や Cornet に会ったときの話をして，「みんな Fairhurst には親切にして頂いて感謝している」といったら，Crouch は「彼は kind ではなく too kind なんだ」といい，つぎの話をした．

フランス人研究者がミネソタに来たとき，Fairhurst の奥さんが研究者の息子を湖に連れていき，彼を喜ばすために一緒にボートに乗ったところ，彼は癲癇の発作を起こした．親切にされる側にとっては有難いことが，親切にする側の身内や同僚にとってはハラハラすることにもなるのである．

(4)　英国

写真 8 は Imperial College の J.A. Hudson 一家が山口大の招待により，昭和 61 年に宇部で開催された西日本岩盤工学シンポジウムに参加した折に，筆者の車と前記の坂井さんの車との 2 台で九州旅行をしたときのものである．筆者夫婦の車に Hudson 夫妻を，坂井さんの車に Hudson の子供 3 人と筆者の息子を乗せての旅行で，もし事故でも起きていたらと考えると，筆者もやはり too kind であると思う．ミネアポリスにある ITASCA 社から発売されている，Explicit Finite Difference Method を発展させた UDEC や FLAC を開発したのはミネソタ大の Peter Cundall であるが，最初に UDEC の原型を発表したのは彼が Imperial College の博士課程の学生のときである．

(5)　ベルギー

昨年，オクラホマ大学の J.C. Roegiers が Sabbatical Leave を利用して，3ヶ月間日本に滞在したが，そのうち 11 月の 1ヶ月は夫妻で宇部に滞在した．写真 9 はそのときのものである．JC は国際会議に参加するたびに，その地の女性と仲良くなりたがる人である．そのせいか，何年か前に筆者夫婦が JC の家に 3 泊した折には奥さんの表情は暗く，日本の秋田県にある，眼から涙が流れ出る仏像についての本をくれて，一度そこに行きたいと言っていた．しかし，山口大学の国際交流会館に夫妻で滞在していたときの奥さんの表情は明るく，秋田のその話は出なかった．また，JC の奥さん，石田毅教授の奥さん，中国留学生の妻，筆者の女房の 4 人によるベルギー料理，中国料理および日本料理教室が開かれた．ミネソタ大の Emmanuel Detournay とその妻である ITASCA 社の Christine Detournay は筆者がミネソタ大にいた頃は大学院の学生であった．彼から，来年 8 月 5 日，すなわち Fairhurst の 75 才の誕生日に，Fairhurst の教え子や友人 100 人ほどが集まって祝賀研究会を開き，発表論文を Int. J. Rock Mech. の Special Fairhurst Issue にまとめたいとの e-mail を頂いた．また，12 名ほどの人には事務局で定めたタイトルについての発表をして貰いたく，筆者にはその一人として所定の論文を書いて欲しいとのことであった．



写真 9　サバティカルリーブを利用して宇部に滞在されたロジャーズ夫妻

6. 山大社建時代の交流と研究

オーストラリアのニューカッスル市と宇部市は姉妹都市であり，ニューカッスル大工学部と山大工学部は姉妹校である．この姉妹校締結の下ごしらえのために両市をたびたび往復したのはニューカッスル大のK.H. Moelle と筆者である．Moelle 先生のところには水曜会員二人，すなわち，佐野修（現東大地震研教授）および金子勝比古（現北大教授）が別々に短期留学した．

オクラホマ大と山大は姉妹大学であるが，筆者は工学部国際交流委員長として，前記 JC とともに両工学部の姉妹校締結を推進した．山大の石田毅先生（水曜会員）は JC のところに3ヶ月留学した．筆者は，このほかにも，ミネソタ大工学部や韓国仁荷大工学部と山大工学部との姉妹校締結を推進した（仁荷大と山大は姉妹大学）．上記の石田先生はミネソタ大に1年間留学し，Dr. Labuz と共同研究を行った．

平成2年10月に山大工学部に博士課程が設置されて以来，博士後期課程に入学し，筆者とともに研究を行った下記の9名が博士号を取得した．

①加藤春實　②茂住洋史　③張　暁明　④陳　渠
⑤ Budi Sulistianto　⑥劉　承論　⑦横山幸也
⑧中山芳樹　⑨宇野晴彦

①，⑦，⑧のテーマは応力測定に関するもの，②，⑤，⑥のテーマは影響係数を解析積分によって求める3次元 BEM の開発に関するもの，③のテーマは通気，④のテーマは AE，⑨のテーマは地下大空洞まわりの岩盤挙動に関するものであった．

なお，前記李喜根氏や日本国土開発元専務佐久間彰三氏は京大の論文博士であるが，彼らの指導も主として筆者が行った．

7. 孔内加圧による岩盤応力測定の我が国における実績と将来の展望

写真6に示すような水圧破砕応力測定用ワイヤラインシステムにおいては，水を圧入するポンプとタンクは地表にあり，流量計も一般には地表にある．また，人工亀裂の再開口圧は流体圧と時間の関係（p-t 曲線）から検出するが，亀裂が開口した瞬間，流体はそこに流入するので，流量と時間の関係（Q-t 曲線）から検出できる可能性もある．そこで我が国のワイヤラインシステム（同和工営）には高精度の流量計がプローブ内に装着されている．

一方，乾式一面破砕法によれば，使用する流体は閉回路内にあってすべて回収されるので，プローブ内にポンプとタンクが設置されている．ただし，従来のスリーブを介する載荷方式によれば，亀裂再開口圧を正確に検出することは原理的に難しい[4]．そこで東大地震研究所では筆者が設計した独特の載荷システムおよび独特の亀裂再開口圧検出システムを有するボアホールジャッキ式乾式一面破砕プローブを試作した[5]．このプローブには文献5）に述べられている従来のプローブが有する問題点はない．今後，地震予知などの研究に応力測定を行うとすれば，このような高精度の地殻絶対応力測定が必要になると思われる．

最後に，同じ場所において，繰り返し応力測定が行われた結果の一例を紹介しよう．図5は京大理学部の田中豊先生が，1978～1992 の間に，応力解放法や水圧破砕法により，兵庫県内の平木鉱山や宝殿採石場において繰り返し計測を行った結果を示している．ただし，図において，縦軸は水平方向の最大主応力 σ_H と最小主応力 σ_h の差をそれらの和で除した値 μ_m であり，横軸は西暦年を表わしている．田中先生は μ_m が 0.6 に達したときに地震が発生すると提唱している[6]．浅所（計測箇所）の応力場から深所（地震発生箇所）の応力場を推定することに問題はあるが，地震直後に計測された μ_m の値が激減していることは注目に値する．田中先生退官後から兵庫県西部地震が発生するまでの間は研究が推進されなかったこと，および地震発生後の数年後に田中先生が亡くなられたことは残念である．

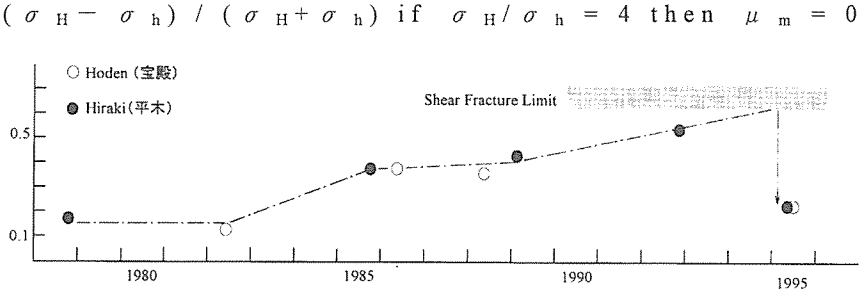


図5　兵庫県内での繰り返し応力測定から得られた μ_m の変化

8. おわりに

はじめに，地球史を動かす原動力としての放射性元素の核壊変エネルギー，それに起因する地殻応力場と地殻熱流量について述べた．

つぎに，風（通気学）と岩（岩盤工学）に関する筆者らの研究成果のうち，それぞれ一例づつを紹介した．とくに，退官前までに行ってきた交流と研究について，京大時代，山大資源時代，山大社建時代の三つに分けて大まかに報告した．また，孔内加圧による岩盤応力測定の我が国における実績と将来の展望について述べた．

参考文献

1) 坂井慎二，柴田健二，竹村　進，水田義明：高温岩盤内の新鉱床開発に効果的な通気系統の拡充—岩盤開発設計のための予測とモニタリング（その4)—，資源と素材，109巻1号，9-15，(1993)
2) B. Sulistianto and Y. Mizuta : Development of 3D Indirect Boundary Element Methods which Consider Joint Slip and Joint Separation, Shigen to Sozai, Vol. 14, 105-110, (1997)
3) 天野勲三，水田義明：トンネル内気象の予測計算，土木学会論文集，387，[II-8]]，(1987)
4) 石田　毅，水田義明，中山芳樹，山下　貢，新宮和喜：乾式一面破砕地圧測定法の理論的・実験的検討，土木学会論文集，708，[III-59]，145-159，(2002)
5) 水田義明，佐野　修：新しく開発された地殻絶対応力測定プローブ（プロトタイプ），月間地球，1 (2004)
6) 田中　豊：応力測定による地殻浅部の破壊予測，第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，251-256，(1998)

論　　文

ステンレス球状炭化物鋳鉄の開発研究

西　内　滋　典*

Development of Stainless Spheroidal Carbide Cast Iron

by Shigenori NISHIUCHI

ABSTRACT

From the viewpoint of global environments and resource savings, long life materials permitting easy recycling are required. In the present work, a trial has been carried out to develop a new type of cast iron, so to speak, stainless spheroidal carbide cast iron. Study was carried out around a fundamental chemical composition, x%C-20%Cr-10%Ni-y%V-Fe, based on the chemical bond theory and the gas-bubble theory. This new cast iron has a microstructure consisting of uniformly distributed spheroidal carbides in the stainless steel matrix, and shows excellent abrasion-resistance, corrosion-resistance and ductility.

1. 緒　　言

ねずみ鋳鉄は材料として，黒鉛が均一に分布し，粗いセメンタイト相をふくまない金属組織を得ることが重要である．健全な金属組織の鋳鉄を得るために，原材料の選択，組成，接種等のさまざまな面から研究が進められた．粗いセメンタイト相を含むねずみ鋳鉄は機械加工を困難にし，しかも加工工具の寿命を短くするため嫌われた．この問題を解決するため川野らは，粗いセメンタイトの晶出を抑える条件を見つけるために，組成とセメンタイトの安定性の関係を調べた．急冷により白銑化した試験片を，950°Cの高温にて保持し，セメンタイトが分解し黒鉛が析出する時の試験片の膨張量を測定し，セメンタイトの安定性を数値化した．その結果，このセメンタイトの安定性と共存する成分との関係が周期律により整理できること，すなわち，鋳鉄の黒鉛化現象が化学現象であると帰結した．この結論はさらに拡張され，大気中の窒素の影響を主原因として，接種や真空溶解による黒鉛化の促進という現象も明らかにした[1]．

これらねずみ鋳鉄の研究においては，「セメンタイト」のない健全な鋳鉄組織を安定して得ることが研究の目的であった．本研究では逆に「セメンタイト」に着目し，その「硬さ」等の性質を積極的に活かした，新しい白鋳鉄系耐久鋳造材の開発を研究目的とした．白鋳鉄材料の持つ脆性の克服をめざし，更に耐摩耗性，耐食性の向上をめざした．

セメンタイトの結晶構造[2]は斜方晶で，Fe原子が実際上最密充填に近い配置をとっている．この結晶は図1に示す様に，三角柱の各頂点に6個のFe原子が配置され，中央にC原子が配置された構造を基本とした板状の積層

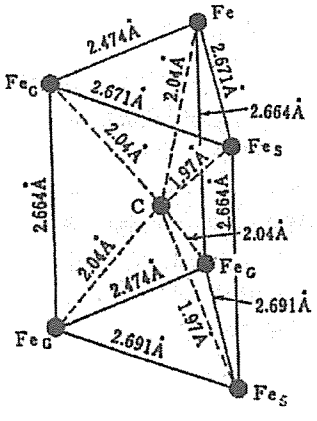


図1　セメンタイトの基本構造

*京都市産業技術研究所分析研究室

構造になっている．そしてこの基本構造内のFe-Fe間の金属結合性とFe-C間の金属・共有結合性がセメンタイトの硬さや板状晶出や脆さの根源であり，また基本構造間のFe-Feの金属結合性がセメンタイトの塑性変形能の根源である．その見地より白鋳鉄材料の靱性を高め新しい鉄系耐久鋳造材を得るためには 1）セメンタイトを炭化物に拡大する．2）炭化物をより等方的な構造に変える．3）炭化物-マトリックス界面への不純物の偏析を抑える．4）マトリックス自体の靱性，耐食性を高める．以上のことが必要と考えた．

さらに，もし炭化物の形状を球状にすることができれば，球状の炭化物を均一分散でき，靱性，耐食性の高い新材料を実現につながると考えた．炭化物の球状化については，球状黒鉛鋳鉄の研究[3]を基礎とした．

この観点から本研究では次のように合金系を構想した．1）鉄を主成分とする．2）炭化物を形成するために3～4 mass%（以下全てmass%）のCを添加する．3）炭化物を安定化するためと炭化物-マトリックスの界面への不純物の偏析を抑えるために約10%のVを添加する．4）マトリックスの靱性，耐食性を高めるために約10%のNiと約20%のCrを添加する．このx%C-20%Cr-10%Ni-y%V-Feの基本組成を中心に研究を進めた結果，球状炭化物が均一に分布した金属組織が得られた．この新しい鉄系耐久鋳造材は，耐摩耗性，耐衝撃性，耐食性に優れた性質を備えていた．

この鉄系耐久鋳造材は「鉄系」と「耐久」と「鋳造」を特徴としている．鋳造加工法は溶解工程があり，精錬が可能であるため，資源リサイクルという社会的要請に原理的に有利な加工法である．また鉄系材料は不純物の感受性が他の材料系に比べ余裕があり，不純物の混入が避けられない資源リサイクルに，原理的に有利である．さらに製品の寿命が長いことは省資源・省エネルギーの観点からも重要である．

2. 実 験 方 法

20% Cr-10% Ni-Fe系母材として市販のステンレス鋼(SUS304)を用いた．成分調整用として高純度黒鉛(99.99%)，電解鉄（99.8%），金属クロム（99.9%），高純度ニッケル(99.9%)，フェロバナジウム(53.71%，80.0%)を用いた．溶解は40 gの少量溶解と50 kg溶解の2種類を行った．両方とも大気雰囲気で高周波による溶解をおこなった．少量溶解では遠心鋳造法により銅鋳型に鋳込んだ．50 kg溶解では銅鋳型およびシェル鋳型に鋳込んだ．溶製した材料の組成分析は次の方法で行った．C，Sは酸素気流中燃焼・赤外吸収法を用いた（EMIA-520SP，(株)堀場製作所製）．その他の成分は蛍光X線分析法（3270E，(株)リガク製），発光分光分析法

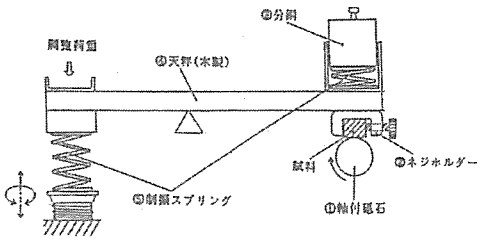


図2 試作した摩耗試験機

（PDA550，(株)島津製作所製）を用いた．溶製した材料をそれぞれ機械加工した後，金属組織観察，かたさ試験，シャルピー衝撃試験，摩耗試験をおこなった．さらにプロペラ形状の製品を試作し溶解時の溶湯の性状と鋳造性を調べた．

なお摩耗試験は図2に示す装置を試作し試験を行った．市販の#80 Al2O3砥粒-ϕ25-2tの軸付砥石を1700 rpmで回転させた．これに試験片を一定荷重(0.2 kg)で一定時間(90 sec)接触させた．試験前後の試料重量を精密天秤で測定しその差を持って摩耗量とした．摩耗量が減少した場合，材料の耐摩耗性が向上したことを意味する．腐食試験は7規定の硫酸中に試験片を入れ，一定時間煮沸した後，試料重量を精密天秤で測定し試験前後の差を持って腐食量とした．腐食量が減少した場合，材料の耐食性が向上したことを意味する．

3. 実 験 結 果

3.1 金属組織

4%C-18%Cr-8%Ni-Fe試料の金属組織を図3に示す．この試料ではクロム鉄炭化物（Cr，Fe）7C3が板状に伸びた組織になっており，その界面は鮮明に腐食されている．

この合金系に10%Vを添加した試料の金属組織を図4に示す．板状のクロム鉄炭化物はVを10%添加することにより，非常に細かな共晶組織になっている．

次に，この金属組織の二次電子像を図5に示す．高倍率の二次電子像で観察すると数μmの球状炭化物が均一に分布した組織になっている．この球状炭化物はマトリックスと色相が異なるため，顕微鏡観察では識別できるが，界面の腐食は鮮明でないため写真では明瞭に識別できなかった．しかし電子顕微鏡の二次電子像で観察すると，炭化物中の炭素が電子を吸収するため，コントラストの良い像が得られた．

さらに，この球状炭化物を立体的に観察するために，テフロン密閉容器を用いて，200°Cの濃塩酸でマトリックスを溶かし，溶け残った球状炭化物を分離し二次電子

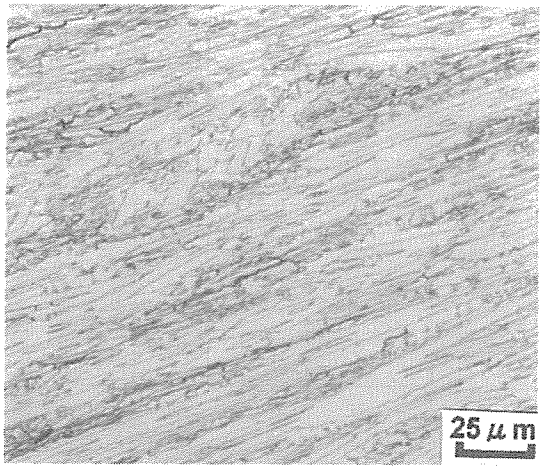


図3　4%C-18%Cr-8%Ni-Feの金属組織（5%硝酸アルコール腐食）

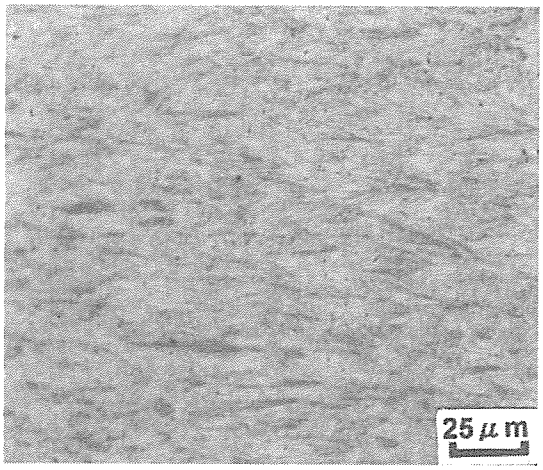


図4　4%C-18%Cr-8%Ni-10%V-Feの金属組織（5%硝酸アルコール腐食）

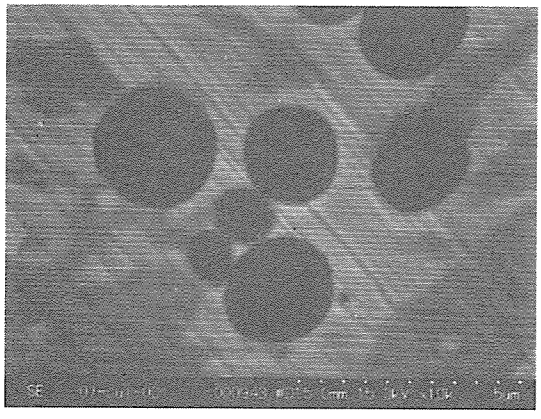


図5　4%C-18%Cr-8%Ni-10%V-Feの二次電子像

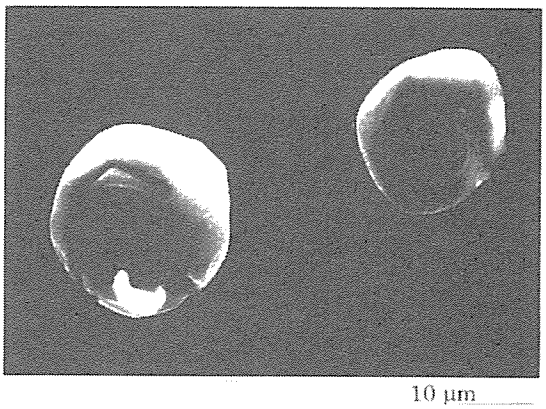


図6　球状炭化物

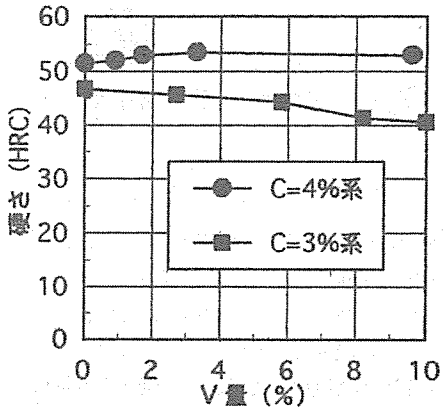


図7　3～4%C-18%Cr-8%Ni-y%V-Fe系合金の硬さ試験結果

像で観察した結果を図6に示す．この炭化物が球状であることが立体的にも明瞭であった．

3.2　硬さ

3～4%C-18%Cr-8%Ni-FeにVを添加した試料のロックウエルC硬さを図7に示す．

硬さについては，4%C系ではVを10%まで添加してもロックウエルC硬さは大きく変化しなかった．3%C系ではVを10%まで添加することにより，かえって軟らかくなった．

3.3　耐摩耗性

硬さと耐摩耗性は一般に高い相関があるといわれている．この合金系も当初，Vを10%まで添加しても耐摩耗性の向上は期待できないと考えた．しかし軸受け材においては，0.6%Cで焼入れ最高硬さ（約HRC65）が得られるにもかかわらず常用材のSUJ2材は1%Cの炭素量が耐摩耗には必要であるとされていること．一方，軟ら

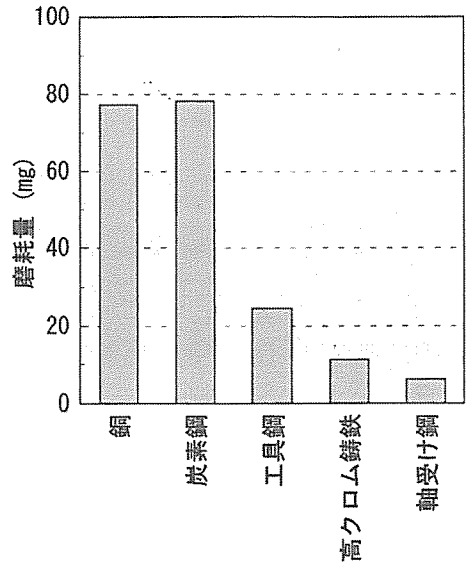


図8　一般的材料の摩耗試験結果

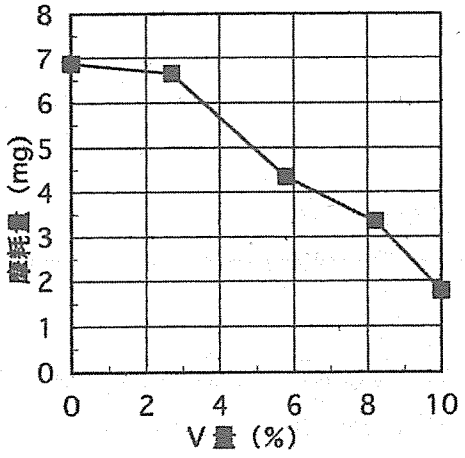


図9　3%C-8%Cr-8%Ni-y%V-Fe系合金の摩耗試験結果

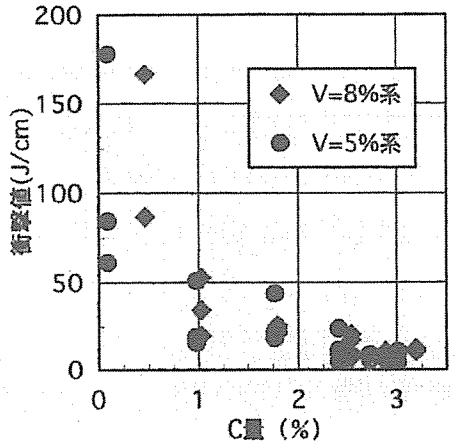


図10　x%C-18%Cr-8%Ni-5～8%V-Fe系合金の衝撃試験結果

かい銅材にダイアモンドを保持させた切削工具は，硬い分散相と軟らかいマトリックス相との組み合わせが重要であることを示唆していること．以上から，ロックウエルC硬さが十分でないという理由で，この合金系の耐摩耗材料としての可能性を断念することはないと考え，耐摩耗性を系統的に評価するために，図2の試験機を考案自作し，耐摩耗性を測定した．まず一般的材料をこの試験機で測定した結果を図8に示す．

銅の生材，炭素鋼（0.45%C）の生材，工具鋼（0.97%C）の生材，高クロム鋳鉄（25%Cr-2.8%C）材，軸受け鋼（0.98%C-1.4%C）の焼入れ焼き戻し材を試験した結果，一般に軟らかいとされている銅の生材，炭素鋼（0.45%C）の生材は80 mg程度の大きい磨耗量を示し，一般にベアリング材として使用され焼入れ焼き戻しの熱処理が施されている軸受け鋼（0.98%C-1.4%Cr）の焼入れ焼き戻し材は10 mg以下の小さい摩耗量を示している．さらにこれらの中間に位置する工具鋼（0.97%C）の生材，高クロム鋳鉄（25%Cr-2.8%C）材はちょうどその中ごろの摩耗量を示している．このことから，この試験法は材料の耐磨耗性を数量化できていると判断してよいと考えられる．

3.3　耐摩耗性

次に，この合金系の摩耗試験結果を図9に示す．

摩耗試験では，Vの増加とともに摩耗量は減少し，耐摩耗性は向上したことを示している．硬さ試験結果ではVの増加とともに硬さが減少しているにもかかわらず，この合金系ではVの増加とともに耐摩耗性は向上しているのは，興味深い現象である．

3.4　靱性

一方，CS分析用に試料を粉砕している時，Vを添加した試料は，他に比較して著しく粉砕がしにくくなっていた．これは靱性が向上しているためと考えシャルピー衝撃試験を行い，靱性を調べた．

結果を図10に示す．

0.5%C以下の領域では150 J/cm²以上の高い衝撃値が得られたが，鋳造品であるため欠陥が混入し100 J/cm²以下の低い衝撃値も見られ，ばらつきの大きい結果となった．2.7%C以下の領域では，C量の増加とともに衝撃値は低下したが，2.7%C以上の領域では衝撃値の低

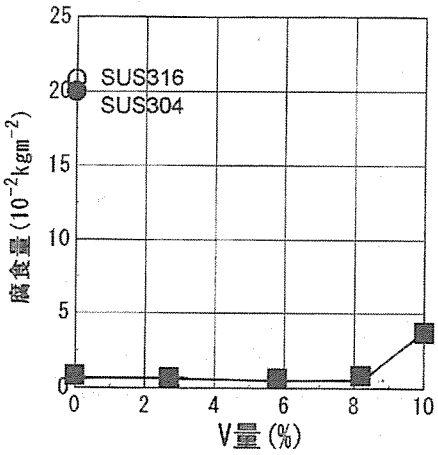


図11　3%C-18%Cr-8%Ni-y%V-Fe系合金の腐食試験結果

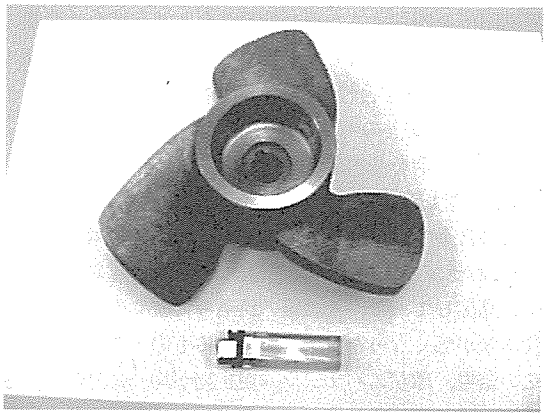
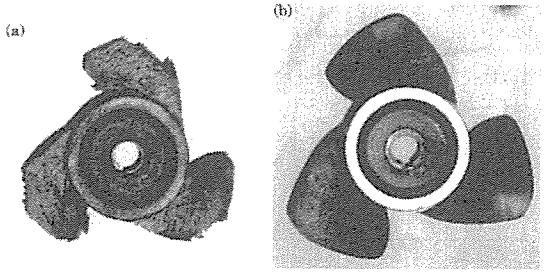


図12　試作例



普通鋳鉄材（39日間使用後）　　ステンレス球状炭化物鋳鉄材（77日間使用後）

図13　実機試験結果

下は止まり，10 J/cm² 以上の値が安定して得られた．3%C以上では5%Vより8%Vの方が若干高い衝撃値が得られた．なおねずみ鋳鉄の衝撃値は0.5～3 J/cm² 程度である．

3.5　耐食性

次に7規定沸騰硫酸に対する耐食性について調べた結果を図11に示す．

この環境では，ステンレス鋼（SUS304，316）と比較して，この合金が優れた耐食性を示していることが分かる．

3.6　鋳造性

次に，この材料で，プロペラを試作した．溶解工程では，のろの大量発生などは見られず溶湯は安定していた．鋳造工程では，湯流れもよく，引け巣なども見られない．全体として，通常の鋳鋼，鋳鉄と同程度の優れた鋳造性を示した．また機械加工性も悪くなく，旋盤加工ができた．試作例を図12に示す．

3.7　実機試験

試作したプロペラを，工場廃水処理装置にて使用し，耐久試験を行った．使用環境は，砂，泥が混じった常温の中性水の撹拌であり，この廃水には，時々礫が混入したり，pHが3～4の酸性水が混入したり，温水が混入したり，有機物が混入する環境である

試験結果を図13に示す．

従来の普通鋳鉄製のプロペラでは39日間の使用で腐食，摩耗損傷が激しく，使用不能となった．これに対しステンレス球状炭化物鋳鉄製のプロペラでは77日間使用後も鋳造時の鋳肌がまだ残っている状態で，腐食，摩耗による損傷がほとんど認められず，試験開始時とほぼ同様のままであった．その後4年の使用後もまだ十分に撹拌能力を保持し現在も稼動中である．このステンレス球状炭化物鋳鉄はこの様な環境での使用に満足できる耐久性を示した．

4.　考　　察

材料を製品に加工し，製品を使用し，最後に廃棄する．これが材料の寿命であるが，地球環境の保全の観点から，製造，使用，廃棄の各過程での，エネルギーと資源の使用をできるだけ少なくする必要がある．そのためリユースやリサイクルに有利な材用が求められる．鉄系の鋳造材はこれに適した材料である．また製品寿命を長くするのも重要で，耐食性，耐摩耗性や靭性に優れた耐久材料が求められる．

鉄系耐久鋳造材を考えるにおいて，化学結合性[4]を基本においた．1）耐摩耗の基本は系の凝集力にあると考え，凝集力を高めるためにp電子性共有結合性の典型元素であるCを選択した．2）C-Feでは結合次数が不足と考え，補うためにd電子性共有結合性の典型元素であるCrを選択した．3）更にC-Fe-Crの共有結合性に依る

界面偏析を緩和するために静電結合・共有結合性元素のVを選択した．4) Feマトリックスの塑性変形能を高めるために，金属結合性でFeに固溶する元素としてNiを選択した．以上の考えに基づきx%C-20%Cr-10%Ni-y%V-Fe系を基本組成とした．

4.1 金属組織

この合金では高温溶湯中でVが優先的に炭素と相互作用し，バナジウム炭化物が先行相としCr, Niに富む融液中に晶出しており，その後の鋳込みに続く冷却過程で，炭素量が低くなった残液が凝固するものと考えられる．その結果，球状のバナジウム炭化物が均一に分散し，さらに，同一炭素量にもかかわらず，Vを添加することにより，過共晶組織から共晶組織にさらに亜共晶組織に変化するものと考えられる．またVが静電結合性を帯びた共有結合性元素であるためバナジウム炭化物内に不純物を一定程度許容できるため，界面への不純物の偏析が軽減され，界面は腐食されにくい．

バナジウムは室温で多量の水素を吸蔵し，高温で水素を放出する元素の一つである．この場合，高温溶湯中で気泡として水素ガスを放出する．この気泡内面は溶湯から離れた自由面であるため，炭化物が保持，集積される．その結果，炭化物は気泡の形に沿って集積，成長し，球状炭化物が形成されると考えられる．

炭化物が球状になることにより，機械加工性が改善された．従来の板状のクロム鉄炭化物が主の金属組織のために難削性である白鋳鉄材料に比較して，機械加工性は向上し，試作品を旋盤加工することができた．

4.2 硬さ

硬さは主としてマトリクッスに依る．Vは優先的に炭化物を形成しマトリクッスから分離するため，硬さを高めないばかりかマトリクッスから炭素をとるため，亜共晶組織になった場合はかえって硬さを低くすると考えられる．一般に機械加工する場合ロックウエルC硬さ50が目安となっている．HRC50以上だと，機械加工が困難になる．HRC50以下だと，機械加工が比較的容易になる．3%C-18%Cr-8%Ni-10%V-FeではHRC40であり十分に機械加工可能である．

4.3 耐摩耗性

実際の摩耗には，多種多様の状況を想定する必要があるが．本実験では，相手材と直接接触する炭化物がVの添加により更に硬くなり，炭化物を保持するマトリクッスとの界面が清浄化された結果，耐摩耗性が向上したと考えられる．

4.4 靱性

炭化物がVの添加により球状になったこと．炭化物とそれを保持するマトリクッスとの界面が清浄化されたこと．マトリックスが過共晶から共晶，亜共晶と変化したこと．板状セメンタイトが減少しオーステナイト量が増加したこと．以上の結果，靱性が増したと考えられる．

4.5 耐食性

炭化物はそれ自体安定であり，耐食性がある．マトリックスはクロム，ニッケルが共存するため，もともと良好な耐食性を持っているが，7規定の沸騰硫酸という環境に対しては，炭素の共存が有効であると考えられる．

4.6 鋳造性，機械加工性，リサイクル性

溶解時，溶湯は安定しており，鋳造性も良好であった．また，鋳造品を旋盤加工することができた．

靱性の向上とともに，機械加工性の向上は重要であり，従来の白鋳鉄材ではできなかった機械材料への適用への展望を開くものである．

一方リサイクルの面からも，この材料は鉄系あり，鋳造加工品である．また基本組成が18-8ステンレス鋼と類似があるため，母材としてステンレス鋼スクラップを用いる事ができるなど，リサイクルに有利な材料といえる．

4.7 実使用

ステンレス球状炭化物鋳鉄は，適当な硬さ，耐摩耗性，靱性，耐食性，鋳造性，機械加工性，をバランスよく備えたているため，腐食性や磨耗の負荷が厳しい環境下での使用において，優れた耐久性を示したものと考えられる．

5. 結　　論

鉄系耐久鋳造材を考えるにおいて，化学結合性を基本においた．x%C-20%Cr-10%Ni-y%V-Fe系の合金について研究を進めたところ以下の結果が得られた．

1) 球状炭化物が均一に分布した金属組織が得られた．
2) バナジウムを添加することにより，硬さは低下したが，耐磨耗性は向上した．
3) 耐摩耗性，耐食性，靱性に優れた性質が得られた．
4) 溶解時，溶湯は安定しており，鋳造性も良好であった．
5) 地球環境保全に有利な鉄系耐久鋳造材が開発できた．

参 考 文 献

1) 井ノ山直哉，山本　悟，川野　豊：反応論からみた鋳鉄，(新日本鋳鍛造協会)，(1992)
2) M.J. Duggin: Trans. Met. Soc., ME, vol. 242 (1968), p. 1091.
3) 張　　博，明智清明，塙　健三　共編：球状黒鉛鋳鉄　基礎・理論・応用，(アグネ)，(1983)
4) 山本　悟，田辺晃生：新しい材料科学，(昭和堂)，(1990)

総　　説

位相問題に関わるX線回折理論の歴史と新しいX線多波動力学的回折理論の導出

沖　津　康　平*

The History of X-ray Diffraction Theory Related to the Phase Problem and Derivation of a New-type X-ray *n*-beam Dynamical Diffraction Theory

by Kouhei OKITSU*

The history of X-ray diffraction theory is reviewed. Furthermore, a Takagi-Taupin-type X-ray *n*-beam dynamical diffraction theory the author has recently derived, is described. The status of the new theory with regard to the phase problem of the X-ray crystal structure analysis is also mentioned. The new theory is written with only one partial differentiation equation supposing that suffixes are taken in $2n$ ways. The new theory has been verified by a synchrotron radiation pinhole topograph experiment whose results were excellent agreements with images computer-simulated based on the new theroy.

1. はじめに

X線結晶構造解析には，位相問題という大問題がある．1914年のBragg父子によるNaClの構造決定直後から，位相問題は発生した．結晶構造因子の位相が測定できないというこの問題に対して非常に多くの克服策が工夫されてきた．パターソン法，重原子置換法，異常分散法，そして直接法．1985年，ノーベル化学賞が直接法を開発した2人の結晶学者，HauptmanとKarleに与えられた．直接法の出現によってX線構造解析の能率は100倍以上アップした．この時点で，解けない位相問題は，ほぼタンパク質結晶だけに限られることとなった．17年後，2002年のノーベル化学賞は，タンパク質の構造決定法に対して与えられた．構造決定法とは，核磁気共鳴法と，構造決定にきわめて有効な情報を迅速に提供する質量分析法．ソフトレーザー脱着法による質量分析法では，島津製作所の田中耕一が受賞することとなった．もはやタンパク質構造解析の世界にも位相問題は，存在しないのか？　結晶学は，あるいは先細りの学問なのか？

答えが出ないのは承知の上で，X線回折理論の歴史をレビューし，新しく導出したX線多波動力学的回折理論と放射光を用いた検証実験の結果を記述する．新理論が位相問題解決の手がかりになるだろうか？

2. X線回折理論の歴史

2.1 運動学的回折理論とX線結晶構造解析

ある1つの結晶の特定の指数 *hkl* のブラッグ反射面には，結晶構造因子という量があり，$F_{\mathbf{h}}$ と記述することが多い．ここで $\mathbf{h}$ は，*hkl* 反射を与える散乱ベクトルで，添え字 $\mathbf{h}$ は反射指数 *hkl* に対応することを示す．結晶中の電子密度は，単位胞を1周期とする周期関数 $\rho(\mathbf{r})$ であるが，$F_{\mathbf{h}}$ は，$\rho(\mathbf{r})$ をフーリエ展開したときのフーリエ係数であり，次の式が成立する．

$$\rho(\mathbf{r})=\sum_{\mathbf{h}} F_{\mathbf{h}} \exp(-\mathrm{i}2\pi\mathbf{h}\cdot\mathbf{r}). \tag{1}$$

$\mathbf{r}$ は，結晶内の位置ベクトルである．上の式(1)の両辺に $\exp(\mathrm{i}2\pi\mathbf{h}'\cdot\mathbf{r})$ をかけて積分することにより，次の式を得る．

$$\frac{1}{V_{cr}}\int_{cr}\rho(\mathbf{r})\exp(\mathrm{i}2\pi\mathbf{h}'\cdot\mathbf{r})\mathrm{d}v = \frac{1}{V_{cr}}\int_{cr}\left\{\sum_{\mathbf{h}} F_{\mathbf{h}}\exp[-\mathrm{i}2\pi(\mathbf{h}-\mathbf{h}')\cdot\mathbf{r}]\right\}\mathrm{d}v. \tag{2}$$

ここで，V_{cr} は結晶の体積，$\int_{cr}\mathrm{d}v$ は結晶全体にわたる積分，$\mathbf{h}'$ は $h'k'l'$ 反射を与える散乱ベクトルである．式(2)の左辺は，次のように表される．

*東京大学　工学部　総合研究機構

$$\frac{1}{V_{Cr}}\int_{Cr}\rho(\mathbf{r})\exp(\mathrm{i}2\pi\mathbf{h}'\cdot\mathbf{r})\mathrm{d}v$$

$$=\frac{1}{V_{Cr}}\sum_{\Delta\mathbf{r}_n}\int_{cell}\rho(\mathbf{r}_{cell})\exp[\mathrm{i}2\pi\mathbf{h}'\cdot(\mathbf{r}_{cell}+\Delta\mathbf{r}_n)]\mathrm{d}v \quad (3)$$

$$=\frac{1}{V_{cell}}\int_{cell}\rho(\mathbf{r}_{cell})\exp(\mathrm{i}2\pi\mathbf{h}'\cdot\mathbf{r}_{cell})\mathrm{d}v. \quad (4)$$

式(3)右辺の$\Sigma_{\Delta\mathbf{r}_n}\int_{cell}\mathrm{d}v$は，左辺の積分を単位胞ごとに行い，それを結晶を構成する全ての単位胞について足し合わせることを意味する．$\mathbf{r}_{cell}$はある一つの単位胞の中の位置ベクトル，$\Delta\mathbf{r}_n$は基本並進ベクトル$\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$, $\mathbf{c}$の整数倍の一次結合$\Delta\mathbf{r}_n=n_a\mathbf{a}+n_b\mathbf{b}+n_c\mathbf{c}$（$n_a$, n_b, n_cは整数）である．一方，逆格子基本並進ベクトル$\mathbf{a}^*$, $\mathbf{b}^*$, $\mathbf{c}^*$は，$\mathbf{a}\cdot\mathbf{a}^*=\mathbf{b}\cdot\mathbf{b}^*=\mathbf{c}\cdot\mathbf{c}^*=1$, $\mathbf{a}\cdot\mathbf{b}^*=\mathbf{b}\cdot\mathbf{c}^*=\mathbf{c}\cdot\mathbf{a}^*=0$, $\mathbf{a}\cdot\mathbf{c}^*=\mathbf{b}\cdot\mathbf{a}^*=\mathbf{c}\cdot\mathbf{b}^*=0$となるように定義されているから，ブラッグ条件を完全に満たすとき$\mathbf{h}'\cdot\Delta\mathbf{r}_n$は，必ず整数である．したがって$\exp(\mathrm{i}2\pi\mathbf{h}'\cdot\Delta\mathbf{r}_n)=1$となり，式(3)の$\Sigma_{\Delta\mathbf{r}_n}$は同じ値の定積分を結晶内の単位胞の数だけ足し合わせることになる．よって，式(4)のV_{cell}は単位胞の体積である．一方，式(2)右辺の$\exp[-\mathrm{i}2\pi(\mathbf{h}-\mathbf{h}')\cdot\mathbf{r}]$は，$\mathbf{h}\neq\mathbf{h}'$の時のみ一定の値1を持つが，それ以外の時は振動する関数となり，$\int_{Cr}\mathrm{d}v$の積分によってゼロになってしまう．したがって，式(2)右辺は次のようになる．

$$\frac{1}{V_{Cr}}\int_{Cr}\left\{\sum_{\mathbf{h}}F_{\mathbf{h}}\exp[-\mathrm{i}2\pi(\mathbf{h}-\mathbf{h}')\cdot\mathbf{r}]\right\}\mathrm{d}v$$

$$=\frac{1}{V_{Cr}}\int_{Cr}F_{\mathbf{h}'}\mathrm{d}v \quad (5)$$

$$=F_{\mathbf{h}'}. \quad (6)$$

式(4)と式(6)を式(2)に代入して次の式を得る．

$$F_{\mathbf{h}'}=\frac{1}{V_{cell}}\int_{cell}\rho(\mathbf{r}_{cell})\exp(\mathrm{i}2\pi\mathbf{h}'\cdot\mathbf{r}_{cell})\mathrm{d}v. \quad (7)$$

式(7)は結晶構造因子が単位胞内の電子密度をフーリエ変換したものであることを示している．

ここで，入射X線と散乱ベクトル$\mathbf{h}'$による反射X線の伝播方向の単位ベクトルを$\mathbf{s}_o$, $\mathbf{s}_{\mathbf{h}'}$とする．$\mathbf{r}_{cell}=0$の位置で伝播方向が$\mathbf{s}_o$から$\mathbf{s}_{\mathbf{h}'}$に変わる散乱の光路を基準にすると，$\mathbf{r}_{cell}$の位置で散乱されるX線の光路は，$\mathbf{s}_o\cdot\mathbf{r}_{cell}-\mathbf{s}_{\mathbf{h}'}\cdot\mathbf{r}_{cell}$だけ長くなる．伝播するX線（波数ベクトル$\mathbf{k}_o$, 振動数$\nu$）の電気変位ベクトル$\mathbf{D}$を$\mathbf{D}=\mathbf{D}_o\exp(\mathrm{i}2\pi\nu t-\mathrm{i}2\pi\mathbf{k}_o\cdot\mathbf{r})$のように表す約束をすると，$\mathbf{r}_{cell}$の位置で散乱されるX線の位相は，$2\pi\frac{1}{\lambda}(\mathbf{s}_o\cdot\mathbf{r}_{cell}-\mathbf{s}_{\mathbf{h}'}\cdot\mathbf{r}_{cell})=-2\pi\mathbf{h}'\cdot\mathbf{r}_{cell}$だけ遅れることになる．また，電子密度$\rho(\mathbf{r}_{cell})$の電子雲は入射X線の波長と振幅に依存する一定の揺れ幅と一定の周期で振動し，その振動によって位置$\mathbf{r}_{cell}$からは，電気変位が$\rho(\mathbf{r}_{cell})$に比例したX線が輻射されることになる．したがって，結晶を構成する1つの単位胞から$\mathbf{s}_{\mathbf{h}'}$方向に輻射されるX線の電気変位ベクトル$\mathbf{D}_{\mathbf{h}'}$は次のようになる．

$$\mathbf{D}_{\mathbf{h}'}\propto\frac{1}{V_{cell}}(D_o^{(\sigma)}\mathbf{e}^{(\sigma)}+\cos(2\theta_B)D_o^{(\pi)}\mathbf{e}^{(\pi)})$$

$$\int_{cell}\rho(\mathbf{r}_{cell})\exp(\mathrm{i}2\pi\mathbf{h}'\cdot\mathbf{r}_{cell})\mathrm{d}v \quad (8)$$

$$=(D_o^{(\sigma)}\mathbf{e}^{(\sigma)}+\cos(2\theta_B)D_o^{(\pi)}\mathbf{e}^{(\pi)})F_{\mathbf{h}'}. \quad (9)$$

ここで，$D_o^{(\sigma)}$および$D_o^{(\pi)}$は，反射ベクトル$\mathbf{h}'$に対するσおよびπ偏光の入射X線の複素振幅，$\mathbf{e}^{(\sigma)}$, $\mathbf{e}^{(\pi)}$はσおよびπ偏光方向の単位ベクトル，θ_Bはブラッグ反射角である．したがって結晶全てからのX線回折強度$I_{\mathbf{h}'}$は，次の式で与えられる．

$$I_{\mathbf{h}'}\propto V_{Cr}|\mathbf{D}_{\mathbf{h}'}|^2 \quad (10)$$

$$=V_{Cr}[|D_o^{(\sigma)}|^2+|\cos(2\theta_B)D_o^{(\pi)}|^2]|F_{\mathbf{h}'}|^2. \quad (11)$$

式(11)を用いれば，結晶構造因子$F_{\mathbf{h}'}$は，X線回折強度$I_{\mathbf{h}'}$の測定により求めることが出来る．おおざっぱに言って，これがX線の運動学的回折理論であり，この理論によってX線結晶構造解析が行われている．運動学的回折理論においては，式(11)のように，X線回折強度は，結晶構造因子の2乗に比例する．

ただし，ここには問題が存在する．まず第1に式(8), (9)を導出する際，入射波は完全にブラッグ条件を満たすことが前提になっている．第2に，結晶は入射X線に全浴されている状態にあり，ブラッグ反射によって入射X線のエネルギーが失われることや，反射X線が再びブラッグ反射されて透過方向に散乱される効果は考慮されておらず，いわゆるボルン近似が適用されている．実際に結晶構造解析を行う際には，結晶を回転させながら反射X線強度の積分強度をとり，その値が式(11)の左辺のようになるよう実験条件を工夫している．それは，小さな単結晶を用いることであったり，熱した結晶を急冷して敢えて多くの歪みを含ませることであったりする．

さらに結晶構造を求めるに当たり，大きな障害がある．式(1)を用いて結晶構造を決定する際，フーリエ係数である$F_{\mathbf{h}}$が求められなくてはならないのだが，$F_{\mathbf{h}}$は一般に複素数である．実験と式(11)から求められるのは，$F_{\mathbf{h}}$の絶対値だけであり，位相を求めることが出来ない．これが，結晶構造解析における最大の難問である位相問題である．

2.2　X線動力学的回折理論

1912年のLaueによるX線回折の発見直後，1914年にはDarwinによって[1,2]，1917年にはEwaldによって[3]，完全結晶中でのX線の振る舞いを記述する理論である動力学的回折理論が構築された．1931年にはLaueによって[4]ブロッホ波の概念を持ち込んだEwald-Laue理論と呼ばれる理論が発表され，今日なお標準的なX線動力学理論とされている．しかしながらこの動力学的回折理論は，長く日の目を見なかった．1950年代後半まで，動力学理論が成り立つほど完全度の高い結晶を入手するこ

とがほとんど出来なかったからである．動力学理論は，華々しい発展を遂げたX線結晶構造解析の陰に隠れるようにして長く顧みられない時代を迎えることとなった．

1950年代後半，シリコンの無転位結晶育成技術が開発されてから，産業側からのシリコン結晶評価への要請も手伝い，X線動力学理論には大きなスポットが当てられることとなった．スリットで細く切ったリボン状のX線入射によるセクショントポグラフ図形に現れるペンデル縞は，加藤の球面波動力学理論[5-8]によって見事に説明された．ボルマンファンの中に積層欠陥を含む場合のセクショントポグラフ図形もまた，加藤，宇佐見，片川[9]，Authier[10]によって解析的に解が求められ，実験結果を見事に再現した[11,12]．

その他多くの理論的仕事の中で，1962年に高木によって発表され[13]その後，高木-Taupinの式[13-15]と呼ばれるようになった方程式は，特筆に値する．従来の動力学理論[1-4]が，X線の波動場を，逆空間で表現しているのに対して，高木-Taupinの式は，波動場を実空間内で表記する理論であり，さらに歪みを含んだ結晶にも適用できたのである．セクショントポグラフにおける転位の像[16-18]，面欠陥の像[19]，強磁性ドメイン壁の像[20]，歪み中心の像[21,22]が，高木-Taupinの式を用いた計算機シミュレーションによって求められ，実験結果をよく再現した．これらの多くは，Epelboin[23,24]によって紹介されている．

加藤は，高木-Taupinの式から出発して，結晶中にランダムな歪みを含んだ結晶におけるX線の振る舞いを記述する統計的動力学理論を導出した[25-30]．この理論は，モザイク結晶中での2波ケースにおけるX線の振る舞いを記述するものであった．

2.3 X線動力学理論の多波ケースへの拡張

Darwin，Ewald，Laueらの動力学理論[1-4]は，透過波と1つの反射波のみが強い，2波ケースを記述するものであったが，これらの理論を二つ以上の反射波が強いケース（多波ケース）へと拡張する試みは，1920年代から1930年代にかけて既に行われていた[31-34]．抜け上がり（*Aufhellung*），遠回り反射（*Umweganregung*）といった現象が，上記の著者らの理論によって定性的に説明された．しかし，上記の多波回折理論の解を求めることは，今日なお，容易ではない．2波ケースの場合は，σ偏光とπ偏光が独立であるため，偏光状態の取り扱いは簡単だが，多波ケースの場合は，偏光の扱いが非常にやっかいなのである．

高木もまた，高木-Taupinの式の多波ケースへの拡張は，非常に難しいとしていた[14]．

2.4 多波ケースによる位相問題へのアプローチ

多波ケースの回折強度分布の中に結晶構造因子の位相情報が含まれることは，1930年代から1940年代にかけて，Ott[35] Bijvoet & MacGillavry[36] Lipscomb[37]らによって指摘されていた．多波の動力学理論は解けないものの，仮にそれを解いたとすると，その解には結晶構造因子の位相情報（三位相構造不変量）が反映される．しかし，現実に構造解析を必要とする結晶は，動力学理論が成り立つような完全結晶ではなく，歪みを多く含んだ，いわばボロボロの結晶である．まして，多波の動力学理論は，完全結晶においてさえ解くことが出来ない．

上の事情を横目で見るように，重原子置換法，同型置換法，異常分散法といった位相問題の克服法は，着々と成果を上げ続け，ヘモグロビン，ミオグロビンといったタンパク質結晶やインシュリン，ペニシリンといった高分子結晶の構造が続々と解かれていった．さらにDNA結晶の二重螺旋構造までもがX線回折法で求められた．これらの結晶構造解析が，位相問題を個々に克服して成功を収めたことは，ほとんど奇跡的と言ってよかった．

また，HauptmanとKarleによって直接法という位相決定法が開発された．この方法は，結晶中の電子密度が正の実数であるという制約が結晶構造因子の位相に非常に大きな縛りを与えることに基づくもので，結晶構造因子の絶対値だけから，位相までをも純粋に数学的に求めてしまう手段であった．比較的小さな結晶については，先に記述したように従来の結晶構造解析の能率を100倍以上アップさせた．

多波回折法による位相決定法は，上に記述したような華々しい成功の影で，ほとんど顧みられることがなくなってしまった．その流れの中で，1974年のColellaの実験[38]は，多波回折法による位相決定法に，再び結晶学者の関心を集めるさせるきっかけとなった[39-43]．そして，今日なお研究が続けられている[44-48]．

ThorkildsenとLarsenらは，高木-Taupinの式を多波ケースに拡張すれば，加藤の統計的動力学理論の適用により，結晶構造因子の位相情報を抽出可能な多波理論が導けるはずだとしている[46,47,49,50]．

Thorkildsenは高木-Taupinの式を3波ケースに拡張した理論を導出したが[49]，その理論は，偏光の効果を無視した近似理論であった．

3. 新しい高木-TAUPIN流多波動力学理論の導出

3.1 理論導出の準備

本論文で記述するX線多波動力学理論の前提には，いくつかの約束事がある．n波理論を導出するのであるが，nの値は，$n\in\{3, 4, 6, 8, 12\}$の場合に限られる．同時反射がある光子エネルギーで起こる場合，12より多くの波が強いケースもあり得るのだが，そういうケースは，この理論では取り扱わない．$n\in\{3, 4, 6, 8, 12\}$の場合

に限られるのは，最も対称性の高い結晶系である立方晶においても，逆格子点(逆格子原点を含む) H_0, H_1, …, H_{n-1} が，一つの円の上に乗るケースというのは，上の場合に限られるからである．たとえば，4つの逆格子点(逆格子原点を含む) H_0, H_1, H_3, H_4 が長方形の頂点として配列する場合は，この理論が取り扱う4波ケースであるが，そうでない場合は，4波ケースとは見なさず，4つの3波ケースが独立に存在しているものと考える．

上記のことに関連するが，結晶中での波数ベクトルの原点であるローレンツ点に，ある程度強い制限を与えている．これは，後述する理論の導出過程で，最終的に得られる偏微分方程式(35), (37)の高い対称性を保証するためのものである．逆格子空間でのローレンツ点の位置ベクトル $\mathbf{Lo}$ を次のように定義する．

$$\mathbf{Lo}=\mathbf{La}-\overrightarrow{LaLo} \tag{12}$$

$$=\mathbf{La}+\frac{1}{2}\chi_0 K\frac{\overrightarrow{LaQ}}{|\overrightarrow{LaQ}|\cos\Theta_B^{(Max)}}. \tag{13}$$

$\mathbf{La}$ は，ラウエ点 La の位置ベクトル，ラウエ点は，逆格子点 H_0, H_1, …, H_{n-1} からの距離が全て同じ値 K (K はX線の真空中での波数)で，$\overrightarrow{LaH_0}$ が入射X線の波数ベクトルとなる点，点 Q は，逆格子点 H_0, H_1, …, H_{n-1} が乗っている円の中心である．また，χ_o は，結晶のX線に対する電気感受率のゼロ次のフーリエ係数である．さらに，$\Theta_B^{(Max)}$ は，$i\in\{0, 1, \cdots, n-1\}$ について同じ値の $\angle QL_aH_i$ である．

3.2　高木流基本方程式の変形

高木は[14]，歪んだ結晶に適用可能な動力学理論基本方程式として次のような式を与えている．

$$(\mathbf{s}_i\cdot\mathrm{grad})\mathbf{D}_i'(\mathbf{r})=\mathrm{i}2\pi K\beta_i'(\mathbf{r})\mathbf{D}_i'(\mathbf{r})-\mathrm{i}\pi K\sum_{j\neq i}\chi_{\mathbf{h}_i-\mathbf{h}_j}[\mathbf{D}_j'(\mathbf{r})]_{\mathbf{s}_i}. \tag{14}$$

$\mathbf{s}_i$ は，i 番目の波の伝播方向の単位ベクトル，$\mathbf{r}$ は結晶内の実空間の位置ベクトル，$\mathbf{D}_i'(\mathbf{r})$ は $\mathbf{K}_i-\Delta\mathbf{k}-\mathrm{grad}[\mathbf{h}_i\cdot\mathbf{u}(\mathbf{r})]$ の波数ベクトルを持つ，結晶中の波の電気変位ベクトルである．ここで，$\mathbf{K}_i$ はラウエ点 La から逆格子点 H_i に向かうベクトル，$\Delta\mathbf{k}$ はラウエ点からローレンツ点に向かうベクトル $\overrightarrow{LaLo}$，$\mathbf{h}_i$ は i 番目の反射を与える逆格子ベクトル，$\chi_{\mathbf{h}_i-\mathbf{h}_j}$ は逆格子ベクトル $(\mathbf{h}_i-\mathbf{h}_j)$ に対応する電気感受率のフーリエ係数，$[\mathbf{D}_j'(\mathbf{r})]_{\mathbf{s}_i}$ は電気変位ベクトル $\mathbf{D}_j'(\mathbf{r})$ の $\mathbf{s}_i$ に垂直な成分ベクトルである．$\beta_i'(\mathbf{r})$ は，次の式で表される．

$$\beta_i'(\mathbf{r})=\beta_i-\frac{1}{K}\frac{\partial[\mathbf{h}_i\cdot\mathbf{u}(\mathbf{r})]}{\partial s_i}. \tag{15}$$

パラメーター β_i は高木の論文[14]で定義されており，厳密なブラッグ条件からのズレを表す．$\mathbf{u}(\mathbf{r})$ は，結晶内の位置 $\mathbf{r}$ における格子変位ベクトルである．β_i をゼロとおいても理論の一般性は失われず（このことについては，原著論文[51]の Appendix A を参照），また，この項は方程式の対称性に対しての障害となるため，ゼロとおいて次式を得る．

$$\beta_i'(\mathbf{r})=-\frac{1}{K}\frac{\partial[\mathbf{h}_i\cdot\mathbf{u}(\mathbf{r})]}{\partial s_i}, \tag{16}$$

where $\beta_i=0$.

さらに，次のようなユニタリー変換により，$\mathbf{D}_i(\mathbf{r})$ を得る．

$$\mathbf{D}_i(\mathbf{r})=\mathbf{D}_i'(\mathbf{r})\exp[+\mathrm{i}2\pi\mathbf{h}_i\cdot\mathbf{u}(\mathbf{r})]. \tag{17}$$

式(16), (17)を式(14)に代入して，多少の計算をおこなって，次のような，変形された動力学理論基本方程式が得られる．

$$(\mathbf{s}_i\cdot\mathrm{grad})\mathbf{D}_i(\mathbf{r})=-\mathrm{i}\pi K\sum_{j\neq i}\chi_{h_i-h_j}\times\exp[-\mathrm{i}2\pi(\mathbf{h}_j-\mathbf{h}_i)\cdot\mathbf{u}(\mathbf{r})][\mathbf{D}_j(\mathbf{r})]_{\mathbf{s}_i}. \tag{18}$$

やや話がそれるが，上の式(18)から，高木-Taupin の式を導いてみよう．2波ケースの場合，i, $j\in\{0, 1\}$ となり複素振幅ベクトル $\mathbf{D}_0(\mathbf{r})$ と $\mathbf{D}_1(\mathbf{r})$ は，次のようにスカラーの複素振幅に展開できる．

$$\mathbf{D}_0(\mathbf{r})=D_0^{(\sigma)}(\mathbf{r})\mathbf{e}^{(\sigma)}+D_0^{(\pi)}(\mathbf{r})\mathbf{e}_0^{(\pi)}, \tag{19}$$

$$\mathbf{D}_1(\mathbf{r})=D_1^{(\sigma)}(\mathbf{r})\mathbf{e}^{(\sigma)}+D_1^{(\pi)}(\mathbf{r})\mathbf{e}_1^{(\pi)}. \tag{20}$$

ここで，ベクトル $\mathbf{e}^{(\sigma)}$ は，入射面の単位法線ベクトル，$\mathbf{e}_0^{(\pi)}$ と $\mathbf{e}_1^{(\pi)}$ は，それぞれ，$\mathbf{s}_0$ と $\mathbf{s}_1$ に垂直な入射面内の単位ベクトルであり，図1に示すような関係にある．式(19)と(20)を式(18)に代入し $i=0$ として，次の式を得る．

$$\mathbf{s}_0\cdot\mathrm{grad}[D_0^{(\sigma)}(\mathbf{r})\mathbf{e}^{(\sigma)}+D_0^{(\pi)}(\mathbf{r})\mathbf{e}_0^{(\pi)}]=-\mathrm{i}\pi K\chi_{-\mathbf{h}_1}\exp[-\mathrm{i}2\pi\mathbf{h}_1\cdot\mathbf{u}(\mathbf{r})]\times[D_1^{(\sigma)}(\mathbf{r})\mathbf{e}^{(\sigma)}+D_1^{(\pi)}(\mathbf{r})\mathbf{e}_1^{(\pi)}]_{\mathbf{s}_0}. \tag{21}$$

さて，ここで結晶中の位置ベクトル $\mathbf{r}$ を $\mathbf{s}_0$, $\mathbf{e}_0^{(\pi)}$, $\mathbf{e}^{(\sigma)}$ で構成される直交座標系（図1参照）を用いて次のように表す．

$$\mathbf{r}=s_0\mathbf{s}_0+e_0^{(\pi)}\mathbf{e}_0^{(\pi)}+e^{(\sigma)}\mathbf{e}^{(\sigma)}. \tag{22}$$

演算子 $\mathbf{s}_0\cdot\mathrm{grad}$ を計算すると次のようになる．

$$\mathbf{s}_0\cdot\mathrm{grad}=\mathbf{s}_0\cdot\left\{\frac{\partial}{\partial s_0}\mathbf{s}_0+\frac{\partial}{\partial e_0^{(\pi)}}\mathbf{e}_0^{(\pi)}+\frac{\partial}{\partial e^{(\sigma)}}\mathbf{e}^{(\sigma)}\right\}$$

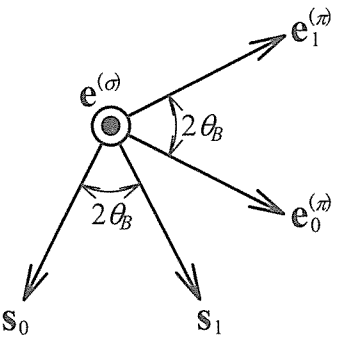


Fig. 1　2波ケースにおける単位ベクトル $\mathbf{s}_0$, $\mathbf{s}_1$ と $\mathbf{e}^{(\sigma)}$, $\mathbf{e}_0^{(\pi)}$, $\mathbf{e}_1^{(\pi)}$ の関係を示している．θ_B は，ブラッグ反射角である．

$$=\frac{\partial}{\partial s_0}. \tag{23}$$

式(23)を式(21)に代入し，互いに干渉し合わない $\mathbf{e}^{(\sigma)}$ の項と $\mathbf{e}_0^{(\pi)}$ の項を辺々比較することにより，次の2つの式を得る．

$$\frac{\partial}{\partial s_0}D_0^{(\sigma)}(\mathbf{r})=-\mathrm{i}\pi K\chi_{-\mathbf{h}_1}\exp[-\mathrm{i}2\pi\mathbf{h}_1\cdot\mathbf{u}(\mathbf{r})]D_1^{(\sigma)}(\mathbf{r}), \tag{24}$$

$$\frac{\partial}{\partial s_0}D_0^{(\pi)}(\mathbf{r})=-\mathrm{i}\pi K\chi_{-\mathbf{h}_1}\cos(2\theta_B)\times\exp[-\mathrm{i}2\pi\mathbf{h}_1\cdot\mathbf{u}(\mathbf{r})]D_1^{(\pi)}(\mathbf{r}). \tag{25}$$

ここで，θ_B は，ブラッグ反射角である．$i=1$ として，式(18)を上と同様な手続きで変形することにより次の2つの式を得る．

$$\frac{\partial}{\partial s_1}D_1^{(\sigma)}(\mathbf{r})=-\mathrm{i}\pi K\chi_{+\mathbf{h}_1}\exp[+\mathrm{i}2\pi\mathbf{h}_1\cdot\mathbf{u}(\mathbf{r})]D_0^{(\sigma)}(\mathbf{r}), \tag{26}$$

$$\frac{\partial}{\partial s_1}D_1^{(\pi)}(\mathbf{r})=-\mathrm{i}\pi K\chi_{+\mathbf{h}_1}\cos(2\theta_B)\times\exp[+\mathrm{i}2\pi\mathbf{h}_1\cdot\mathbf{u}(\mathbf{r})]D_0^{(\pi)}(\mathbf{r}). \tag{27}$$

式(24-27)は，偏光因子 C を，σ 偏光を扱うとき $C=1$，π 偏光を扱うとき $C=\cos(2\theta_B)$ と置く約束をして，複素振幅 D の添え字 (σ) と (π) を省略することにより，次のように表される．

$$\frac{\partial}{\partial s_0}D_0(\mathbf{r})=-\mathrm{i}\pi KC\chi_{-\mathbf{h}_1}\exp[-\mathrm{i}2\pi\mathbf{h}_1\cdot\mathbf{u}(\mathbf{r})]D_1(\mathbf{r}), \tag{28}$$

$$\frac{\partial}{\partial s_1}D_1(\mathbf{r})=-\mathrm{i}\pi KC\chi_{+\mathbf{h}_1}\exp[+\mathrm{i}2\pi\mathbf{h}_1\cdot\mathbf{u}(\mathbf{r})]D_0(\mathbf{r}). \tag{29}$$

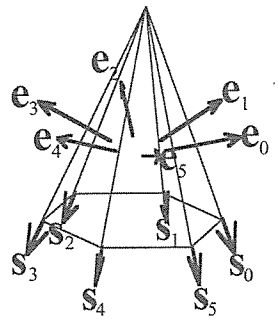
式(28)と(29)は高木-Taupinの式に他ならない．

ところで，高木-Taupinの式は，Ewald-Laueの動力学理論をフーリエ変換することにより簡単に導出することができる．このことは，付録Aに示す．

さらに，高木-Taupinの式で積層欠陥を含む結晶内でのX線のふるまいを記述しようとすると，動力学的回折理論と運動学的回折理論の本質的な違いが見えてくる．このことは，付録Bに示す．結論を先に言うと，運動学理論は，単結晶内の異なる位置から回折されたX線を可干渉でない（インコヒーレント）とする理論であり，動力学理論は，可干渉である（コヒーレント）とする理論なのである．

3.3 基本方程式のスカラー展開

基本方程式(18)は，ベクトルの方程式であるが，これをスカラーの方程式に展開しなければ，解を得ることが出来ない．高木-Taupinの式が，導出されてから40年間にわたって多波ケースに拡張されることがなかったのは，偏光の取り扱いの厄介さによって基本方程式をスカラー展開できなかったことによる．本論文では，X線の偏光状態を記述するにあたって直交するベクトルを基底にするという立場を捨て，斜交するベクトルを基底にするスカラー展開を行ってゆく．



K. Okitsu: Acta Cryst. A59, 235-244 (2003).

Fig. 2 ユニットベクトル $\mathbf{s}_i$ と $\mathbf{e}_i$ $i\in\{0, 1, \cdots n-1\}$ の関係を示している．この場合 $n=6$ である[51]．

図2は，6波ケースにおける偏光の基底となるベクトルの例を示している．$\mathbf{s}_i$ $(i\in\{0, 1, 2, 3, 4, 5\})$ は，i 番目の波の伝播方向の単位ベクトルである．これらのベクトルの始点を1点に定めて頂点とし，終点を結んで得られる6角形（必ずしも正6角形ではない）を底面とする6角錐を考える．この際，単位ベクトルの番号 i は図2のように，6角錐の底面を取り囲む順番で付けられていなければならない．$\mathbf{e}_i$，$(i\in\{0, 1, 2, 3, 4, 5\})$ は，図2に示すように6角錐の斜面の単位法線ベクトルであり，次の式で定義される．

$$\mathbf{e}_i=\frac{\mathbf{s}_{(i-1)'}\times\mathbf{s}_i}{|\mathbf{s}_{(i-1)'}\times\mathbf{s}_i|}. \tag{30}$$

ここで，$(i-1)'$ は，$(i-1)$ を n で割り算した剰余である．例えば，$n=6$，$i=0$ のとき $(i-1)'=5$ である．そうして，式(18)における $\mathbf{D}_i(\mathbf{r})$ および $\mathbf{D}_j(\mathbf{r})$ は次のように表されることになる．

$$\mathbf{D}_i(\mathbf{r})=D_i^{(0)}(\mathbf{r})\mathbf{e}_i+D_i^{(1)}(\mathbf{r})\mathbf{e}_{(i+1)'}, \tag{31}$$

$$\mathbf{D}_j(\mathbf{r})=D_j^{(0)}(\mathbf{r})\mathbf{e}_j+D_j^{(1)}(\mathbf{r})\mathbf{e}_{(j+1)'}. \tag{32}$$

$D_i^{(0)}(\mathbf{r})$，$D_i^{(1)}(\mathbf{r})$，$D_j^{(0)}(\mathbf{r})$，$D_j^{(1)}(\mathbf{r})$ は，スカラーの複素電気変位である．式(18)に式(31)，(32)を代入して次の式を得る．

$$(\mathbf{s}_i\cdot\mathrm{grad})[D_i^{(0)}(\mathbf{r})\mathbf{e}_i+D_i^{(1)}(\mathbf{r})\mathbf{e}_{(i+1)'}]=-\mathrm{i}\pi K\sum_{j\neq i}\{\chi_{h_i-h_j}\exp[-\mathrm{i}2\pi(\mathbf{h}_j-\mathbf{h}_i)\cdot\mathbf{u}(\mathbf{r})][D_j^{(0)}(\mathbf{r})\mathbf{e}_j+D_j^{(1)}(\mathbf{r})\mathbf{e}_{(j+1)'}]_{\mathbf{s}_i}\}. \tag{33}$$

式(33)の右辺の $\mathbf{e}_j$ および $\mathbf{e}_{(j+1)'}$ を $\mathbf{e}_i$ および $\mathbf{e}_{(i+1)'}$ で表すようにすれば，$\mathbf{e}_i$ および $\mathbf{e}_{(i+1)'}$ の項を両辺それぞれ比較することにより式(18)をスカラー展開することができる．一般に単位ベクトル $\mathbf{s}_i$，$\mathbf{e}_i$，$\mathbf{e}_{(i+1)'}$ は同一平面上にはないから，$\mathbf{e}_j$ は，一義的に次のように表される．

$$\mathbf{e}_j=S^{(j,i)}\mathbf{s}_i+C_0^{(j,i)}\mathbf{e}_i+C_1^{(j,i)}\mathbf{e}_{(i+1)'}. \tag{34}$$

$C_0^{(j,i)}$ と $C_1^{(j,i)}$ は，導かれる最終的な方程式(35)，(37)において，偏光因子となる量である．式(34)を式(33)に代入にして多少の計算の後，本理論の最終的な方程式の一つである

次の式を得る．

$$\frac{\partial}{\partial s_i}D_i^{(l)}(\mathbf{r})=-i\pi K\sum_{j\neq i}\sum_{m=0}^{1}\chi_{\mathbf{h}_i-\mathbf{h}_j}\times\exp[-i2\pi(\mathbf{h}_j-\mathbf{h}_i)\cdot\mathbf{u}(\mathbf{r})]C^{[(j+m)',i]}D_j^{(m)}(\mathbf{r}),\quad(35)$$

where $i,\ j\in\{0,\ 1\cdots n-1\},\ l,\ m\in\{0,\ 1\},\ n\in\{3,\ 4,\ 6,\ 8,\ 12\}$.

さらに，次のようなユニタリー変換により $D_i''^{(l)}(\mathbf{r})$ を定義する．

$$D_i^{(l)}(\mathbf{r})=D_i''^{(l)}(\mathbf{r})\exp(-i2\pi\Delta\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}),\quad(36)$$

where $l\in\{0,\ 1\}$.

式(36)を式(35)に代入して計算することにより次の式を得る．

$$\frac{\partial}{\partial s_i}D_i''^{(l)}(\mathbf{r})=-i\pi K\sum_{j=0}^{n-1}\sum_{m=0}^{1}\chi_{\mathbf{h}_i-\mathbf{h}_j}\times\exp[-i2\pi(\mathbf{h}_j-\mathbf{h}_i)\cdot\mathbf{u}(\mathbf{r})]C^{[(j+m)',i]}D_j''^{(m)}(\mathbf{r}),\quad(37)$$

where $i,\ j\in\{0,\ 1\cdots n-1\},\ l,\ m\in\{0,\ 1\},\ n\in\{3,\ 4,\ 6,\ 8,\ 12\}$.

式(37)は，本理論の最終的な方程式の式(35)とは別の形である．

式(37)が式(35)と最も異なる点は，方程式の中に χ_o を陽に含んでいる点である．次の節で式(37)の数値解法を簡単に記述するが，χ_o を位置の関数とすることによって，ラウエケースとブラッグケースが混在する状況や，複雑な形状の結晶，さらにはX線光路の中に位相物体，吸収物体を含んだ複雑な光学系の計算を行うことができるのである．もちろん，高木-Taupin の式と同様，結晶に任意の歪みがある場合にも対応する．

式(35), (37)は複素振幅の基底に図4の $\mathbf{e}_i$, $\mathbf{e}_{(i+1)'}$ をとった方程式であるが，図4の $\mathbf{e}_i^{(\sigma)}$, $\mathbf{e}_i^{(\pi i)}$ を基底とした方程式も導出されている[53]．

4. 新しいX線多波動力学理論の数値解法

方程式(35)または(37)の数値解法は，高木が1962年の論文[13]の中で示した手法と基本的に同じである．異なるのは，2波の場合は，2次元的に小さなクサビで分割して計算を行うのに対して，多波の場合は，結晶は小さな n 角錐で分割して式(35)または(37)を解いてゆく．また多波の場合には，入射波の偏光状態は，ある特定の完全な偏光状態でなければならない．式(37)を6波ケースの場合について解いてゆく例について，以下に記述する．結晶を3次元的に図3のような小さな6角錐で分割する．

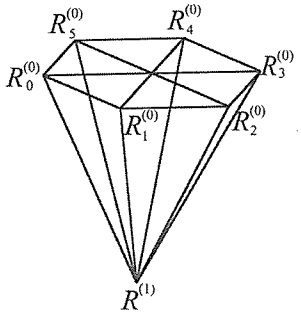
$R_i^{(0)}$ ($i\in\{0,\ 1,\ 2,\ 3,\ 4,\ 5\}$) のそれぞれの点での12ずつの複素振幅から点 $R^{(1)}$ における12の複素振幅が求められるのだが，$|R_i^{(0)}R^{(1)}|$ の長さは，前方散乱に対する消衰距離 $1/(\chi_oK)$ より十分小さくなければならない．式(37)が，$R_i^{(0)}R^{(1)}$ ($i\in\{0,\ 1,\ 2,\ 3,\ 4,\ 5\}$) の中点 Rm_i で成り立つとする次の連立差分方程式を解いてゆくのである．

$$\frac{D_i''^{(l)}(R^{(1)})-D_i''^{(l)}(R_i^{(0)})}{|R_i^{(0)}R^{(1)}|}=-i\pi K\sum_{j=0}^{n-1}\sum_{m=0}^{1}\left\{\chi_{h_i-h_j}\exp[-i2\pi(\mathbf{h}_j-\mathbf{h}_i)\cdot\mathbf{u}(Rm_i)]\times\frac{D_j''^{(m)}(R_i^{(0)})+D_j''^{(m)}(R^{(1)})}{2}\right\},\quad(38)$$

where $i,\ j\in\{0,\ 1\cdots n-1\},\ l,\ m\in\{0,\ 1\},\ n\in\{3,\ 4,\ 6,\ 8,\ 12\}$.

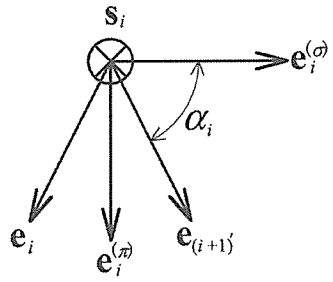
ここで $D_i''^{(l)}(R_i^{(0)})$ と $D_i''^{(l)}(R^{(1)})$ は $\mathbf{s}_i$ 方向に進む偏光状態 l の波の $R_i^{(0)}$ と $R^{(1)}$ における複素電気変位である．$\mathbf{u}(Rm_i)$ は，Rm_i における格子変位ベクトルである．式(38)は未知数 $D_i''^{(l)}(R^{(1)})$ の数が $2n$ の $2n$ 連立1次方程式であるから $2n\times2n$ の行列演算により解くことができる．次章に示す「ピンホールトポグラフ」をシミュレートする場合，結晶表面上の入射点 E_o のみで $D_0''^{(0)}(E_o)$ および $D_0''^{(1)}(E_o)$ に偏光状態を反映したゼロでない値を境界条件として与える．こうすると，結晶内では，入射点 E_o を頂点とする末広がりの「ボルマン6角錐」の中でのみ，ゼロでない波動場の解が得られることになる．

図4は，電気変位ベクトル $\mathbf{D}_i''(\mathbf{r})$ をスカラーの電気変位 $D_i''^{(0)}(\mathbf{r})$ と $D_i''^{(1)}(\mathbf{r})$ に分解する際の斜交する基底ベク



K. Okitsu: Acta Cryst. A59, 235-244 (2003).

Fig. 3　式(35)または(37)を n 波ケースについて解くには，結晶を十分小さな n 角錐に分割する．この場合 $n=6$ である[51]．



K. Okitsu: Acta Cryst. A59, 235-244 (2003).

Fig. 4　$D_i''^{(0)}(\mathbf{r})$, $D_i''^{(1)}(\mathbf{r})$ の基底ベクトル $\mathbf{e}_i$, $\mathbf{e}_{(i+1)'}$ の系と $D_i''^{(\sigma)}(\mathbf{r})$, $D_i''^{(\pi)}(\mathbf{r})$ が基底とする直交する単位ベクトル $\mathbf{e}_i^{(\sigma)}$, $\mathbf{e}_i^{(\pi)}$ の関係[51]．

トル $\mathbf{e}_i$ と $\mathbf{e}_{(i+1)'}$ と，偏光状態を簡単に記述するのに便利な直交する単位ベクトル $D_i''^{(\sigma)}(\mathbf{r})$ と $D_i''^{(\pi)}(\mathbf{r})$ の関係を示している．図4は，単位ベクトル $\mathbf{s}_i$ の起点側から見て描いてある．図からわかるように次のような関係が成り立つ．

$$\mathbf{e}_i=-\cos\alpha_i\mathbf{e}_i^{(\sigma)}+\sin\alpha_i\mathbf{e}_i^{(\pi)}, \tag{39}$$

$$\mathbf{e}_{(i+1)'}=\cos\alpha_i\mathbf{e}_i^{(\sigma)}+\sin\alpha_i\mathbf{e}_i^{(\pi)}, \tag{40}$$

上の式を $\mathbf{e}_i^{(\sigma)}$，$\mathbf{e}_i^{(\pi)}$ について解くことにより，

$$\mathbf{e}_i^{(\sigma)}=-\frac{1}{2\cos\alpha_i}\mathbf{e}_i+\frac{1}{2\cos\alpha_i}\mathbf{e}_{(i+1)'}, \tag{41}$$

$$\mathbf{e}_i^{(\pi)}=\frac{1}{2\sin\alpha_i}\mathbf{e}_i+\frac{1}{2\sin\alpha_i}\mathbf{e}_{(i+1)'}. \tag{42}$$

式(39)と(40)を $\mathbf{D}_i''(\mathbf{r})=D_i''^{(0)}(\mathbf{r})\mathbf{e}_i+D_i''^{(1)}(\mathbf{r})\mathbf{e}_{(i+1)'}$ に代入して次の関係式を得る．

$$D_i''^{(\sigma)}(\mathbf{r})=-\cos\alpha_iD_i''^{(0)}(\mathbf{r})+\cos\alpha_iD_i''^{(1)}(\mathbf{r}), \tag{43}$$

$$D_i''^{(\pi)}(\mathbf{r})=\sin\alpha_iD_i''^{(0)}(\mathbf{r})+\sin\alpha_iD_i''^{(1)}(\mathbf{r}). \tag{44}$$

次の章で述べるシミュレーション結果を求める際，水平偏光入射を仮定したシミュレーションを行う場合，$D_0''^{(\sigma)}(E_o)=1$，$D_0''^{(\pi)}(E_o)=0$，垂直偏光入射を仮定したシミュレーションを行う場合は $D_0''^{(\sigma)}(E_o)=0$，$D_0''^{(\pi)}(E_o)=1$ とおいて，これらの値を式(43)と(44)に代入して，$D_i''^{(0)}(E_o)$ と $D_i''^{(1)}(E_o)$ について解くことにより，実際の偏光状態を反映した境界条件を与える．ちなみに任意のふたつの異なる偏光状態の境界条件について解を得た場合，別の異なる偏光状態についての解は，ふたつの解の1次結合によって得られる．例えば，X線の出射面上の位置を R_e として水平偏光入射のときの解を $D_i''^{(l)}$（*horizontal*，R_e），垂直偏光入射のときの解を $D_i''^{(l)}$（*vertical*，R_e），左ネジ円偏光入射のときの解を $D_i''^{(l)}$（*leftscrew*，R_e）とすると，次のような関係式が成り立つ．

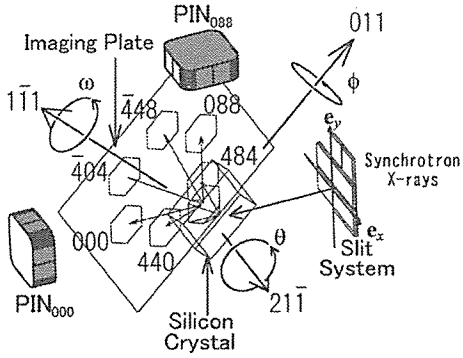
$$D_i''^{(l)}(leftscrew,\ R_e)=(1/\sqrt{2})D_i''^{(l)}(horizontal,\ R_e)+(\mathrm{i}/\sqrt{2})D_i''^{(l)}(vertical,\ R_e) \tag{45}$$

このことは，式(35)，(37)が，線形の方程式であることから，明らかである．

5. 6波ピンホールトポグラフの実験とシミュレーション

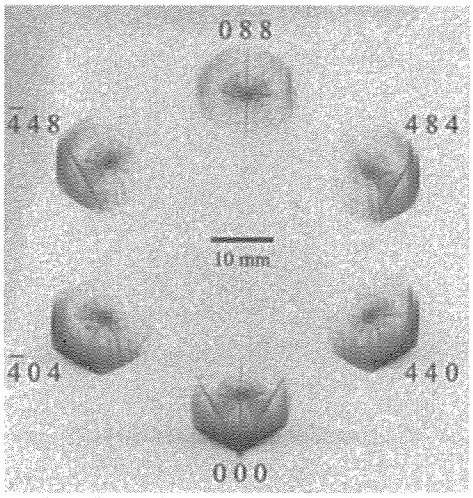
5.1 実験配置

図5は，6波ピンホールトポグラフの実験配置を示している[52]．SPring-8 BL09XU でのアンジュレーターの1次光は，シリコン111の2回反射モノクロメーターで，18.5 keV のエネルギーに単色化され，スリットで，1 mm×1 mm のサイズに絞られた．偏光状態は，完全偏光度0.99以上の水平偏光である．スリットを通過したX線は，厚さ9.911 mm [1 $\bar{1}$ 1] 方位のFZシリコン結晶に入射した．結晶は，図5のように $\phi-\omega-\theta$3軸ゴニオメーターの上にマウントされた．PINフォトダイオード PIN_{088} で088反射をモニターし，PIN_{000} で440反射と $\bar{4}04$ 反射による異常透過を θ 軸を回転させて同時にモニターした．440反射と $\bar{4}04$ 反射による異常透過のピークは，6波の条件が厳密に満たされていないと θ 軸を回転させたときふたつのピークに分かれて観測された．そしてそれらのピークの中間点で，088反射の反射波が観測された．ϕ 軸を精密に調整させることにより，θ 軸を回転させたときの異常透過のピークが一つになり，同時にその位置で088反射の反射波が検出されるようにして，6波の回折条件が完全に満足される



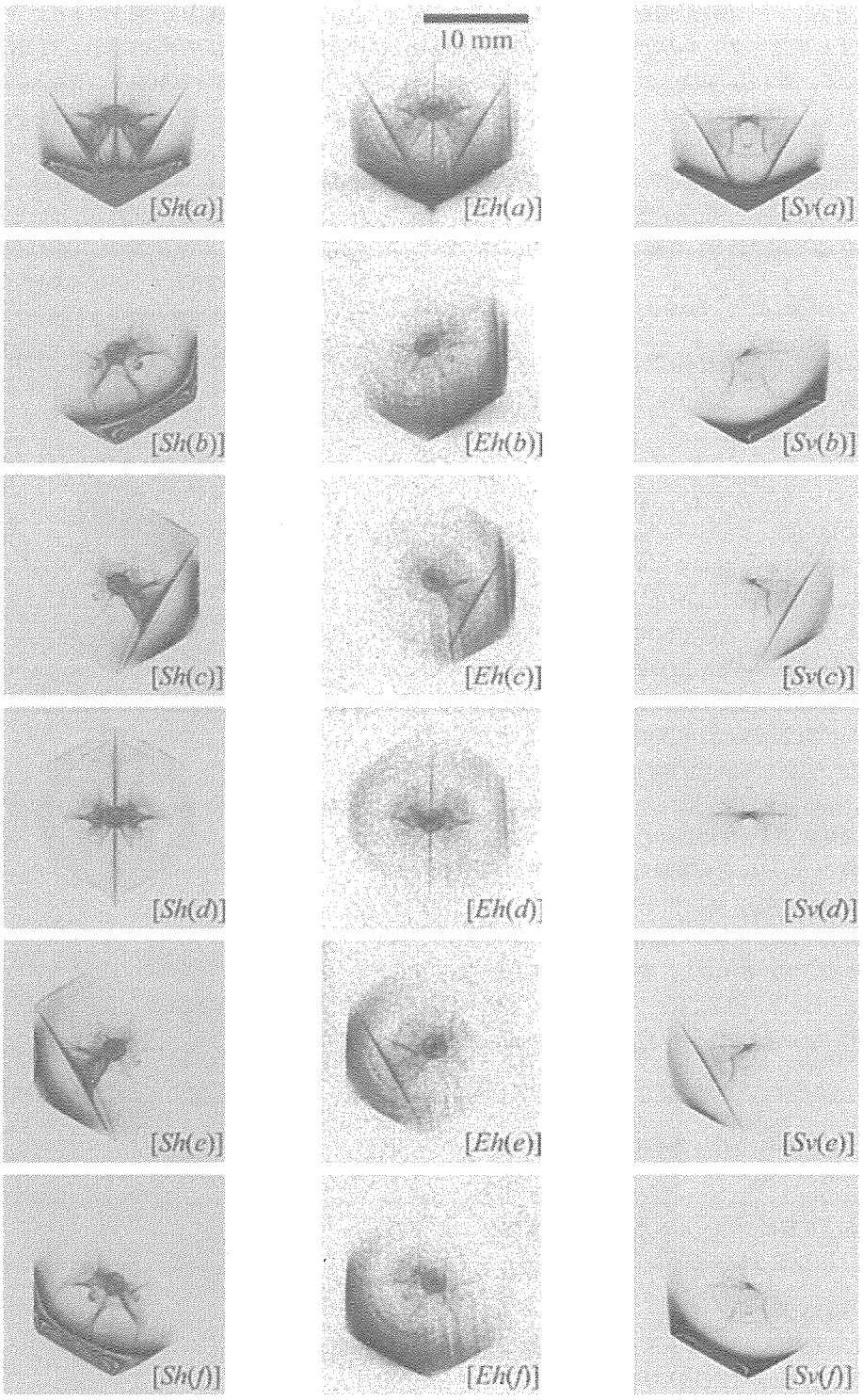
K. Okitsu, Y. Imai, Y. Ueji & Y. Yoda: Acta Cryst. A59, 311-316 (2003).

Fig. 5　6波ピンホールトポグラフの実験配置を示している[52]．



K. Okitsu, Y. Imai, Y. Ueji & Y. Yoda: Acta Cryst. A59, 311-316 (2003).

Fig. 6　6波セクショントポグラフ図形．SPring-8, BL09XU において得られたもの．光子エネルギー18.5 keV（波長0.67 Å），水平偏光（図の横方向に偏光している）の入射で得られた．露光時間30秒[52]．



K. Okitsu, Y. Imai, Y. Ueji & Y. Yoda: Acta Cryst. **A59**, 311-316 (2003).

Fig. 7 6波セクショントポグラフ図形．$[Xy(z)]$ の記号は，$X\in\{S,\ E\}$ は (S) シミュレーションと (E) 実験に対応，$y\in\{h,\ v\}$ は (h) 水平偏光入射と (v) 垂直偏光入射に対応，$z\in\{a,\ b,\ c,\ d,\ e,\ f\}$ は，それぞれ 0 0 0, 4 4 0, 4 8 4, 0 8 8, $\bar{4}$ 4 8, $\bar{4}$ 0 4 反射に対応する[52]．右の列$[Sv(z)]$ $(z\in\{a,\ b,\ c,\ d,\ e,\ f\})$ に対応する実験結果も既に得られている[54]．

ようにした．この状態で，四象限スリットをさらに0.1 mm×0.1 mmまで絞り，試料結晶の$1\bar{1}1$方位の裏面から後方27.3 mmの位置に置いたピクセルサイズ50 μm×50 μmのイメージングプレートに6波の像を同時に記録した．

5.2 実験結果とシミュレーション結果の比較

図6は，露光時間30秒で得られた6波セクショントポグラフ図形である[52]．

図7は，実験で得られた図6の拡大（中央の列）と，実験と同じく水平偏光入射を仮定したシミュレーション結果（左の列）および実験とは異なり垂直偏光入射を仮定したシミュレーション結果(右の列)である[52]．図7左の列のシミュレーション結果は中央の列の実験結果をよく再現するが，右の列のシミュレーション結果は実験結果と明らかに異なっている．このことから，新しい多波動力学理論である式(37)とその数値解を求めるプログラムは，かなり高い確率で正しいと言えそうである．特に，偏光の効果が，新理論において正しく取り扱えていそうである．プログラムは，式(37)の高い対称性のゆえに比較的記述が簡単で，$n=6$以外の場合にもマイナーチェンジで対応する．

図7の右の列のシミュレーション結果に対応する実験結果も既に得られている[54]．

6. ま と め

高木-Taupinの式[13-15]を偏光の効果を無視することなく，40年ぶりに多波ケースの理論へと拡張した．6波ピンホールトポグラフの実験と新理論によるシミュレーション結果は入射偏光の仮定が正しいときのみ，非常によく一致した．新しいX線多波動力学理論が，かなり高い確率で，多波ケースにおけるX線の振る舞いを正しく記述できているようである．

新しいX線多波動力学理論に，加藤の統計的動力学理論の手法を適用すれば，多波の統計的動力学理論が導出できるかもしれない．その理論は，モザイク結晶における多波ケースを正しく記述し，結晶構造因子の位相情報を抽出できる理論になる可能性がある．

謝 辞

本研究は，文部科学省科学技術振興調整費先導的研究等の推進「アクティブ・ナノ計測基盤技術の確立」プロジェクトの一環として行われている．本研究における理論の導出および計算機シミュレーションは，東京大学工学部総合研究機構ナノ工学研究センターの強力X線実験室において行われた．また，実験は，高輝度光科学研究センター（JASRI）の承認（Proposal No. 2002 A0499-NMD3-np)のもとに，JASRIの今井康彦博士，依田芳卓博士，および東京大学新領域創成科学研究科の上ヱ地義徳博士との共同研究として行われたことを明記します．東京大学大学院新領域創成科学研究科の雨宮慶幸教授，JASRIの菊田惺志教授から，コメント，励ましを頂いたことに感謝します．また，東京大学大学院新領域創成科学研究科の浦野雄太氏に協力して頂いたことに感謝致します．

参 考 文 献

1) C.G. Darwin: Philos. Mag., **27**, 315-333 (1914).
2) C.G. Darwin: Philos. Mag., **27**, 675-690 (1914).
3) P.P. Ewald: Ann. Phys. 4. Folge, **54**, 519-597 (1917).
4) M.v. Laue: Ergeb. Exakten Naturwiss, **10**, 133-158 (1931).
5) N. Kato: Acta Cryst., **14**, 526-532 (1961).
6) N. Kato: Acta Cryst., **14**, 627-636 (1961).
7) N. Kato: J. Appl. Phys., **39**, 2225-2230 (1968).
8) N. Kato: J. Appl. Phys., **39**, 2231-2237 (1968).
9) N. Kato, K. Usami and T. Katagawa: Advances in X-ray Analysis, **10**, 44-66 (1967).
10) A. Authier: Phys. Stat. Sol., **27**, 77-93 (1968).
11) J.R. Patel and A. Authier: J. Appl. Phys., **46**, 118-125 (1975).
12) A. Authier and J.R. Patel: Phys. Stat. Sol. (a), **27**, 213-222 (1975).
13) S. Takagi: Acta Cryst., **15**, 1311-1312 (1962).
14) S. Takagi: J. Phys. Soc. Jpn., **26**, 1239-1253 (1969).
15) D. Taupin: Bull. Soc. Fr. Minéral. Cristallogr., **87**, 469-511 (1964).
16) F. Balibar and A. Authier: Phys. Stat. Sol., **21**, 413-422 (1967).
17) F. Epelboin: J. Appl. Cryst., **7**, 372-377 (1974).
18) F.N. Chukhovskii: Kristallografiya, **19**, 482-488 (1974).
19) Y. Epelboin: J. Appl. Phys., **50**, 1312-1317 (1979).
20) C. Nourtier, M. Kleman, D. Taupin, J. Miltat, M. Labrune and Y. Epelboin: J. Appl. Phys., **50**, 2143-2145 (1979).
21) G.S. Green, C.-S. Fan and B.K. Tanner: Philos. Mag. A, **61**, 23-33 (1990).
22) K. Okitsu, S. Iida, Y. Sugita, H. Takeno, Y. Yagou and H. Kawata: Jpn. J. Appl. Phys, **31**, 3779-3785 (1992).
23) Y. Epelboin: Mater. Sci. Eng., **73**, 1-43 (1985).
24) Y. Epelboin: Prog. Cryst. Growth Charact., **14**, 465-506 (1987).
25) N. Kato: Acta Cryst., **A32**, 453-457 (1976).
26) N. Kato: Acta Cryst., **A32**, 458-466 (1976).

27) N. Kato: Acta Cryst., **A35**, 9-16 (1979).
28) N. Kato: Acta Cryst., **A36**, 171-177 (1980).
29) N. Kato: Acta Cryst., **A36**, 763-769 (1980).
30) N. Kato: Acta Cryst., **A36**, 770-778 (1980).
31) G. Mayer: Z. Krist., **66**, 585-636 (1928).
32) J. Weigle and H. Mühsam: Helv. Phys. Acta, **10**, 139-156 (1937).
33) M. Blanc and J. Weigle: Helv. Phys. Acta, **10**, 495-506 (1937).
34) M. Renninger: Z. Phys., **106**, 141-176 (1937).
35) H. Ott: Ann. Phys. 5. Folge, **31**, 264-288 (1938).
36) J.M. Bijvoet and C.H. MacGillavry: Chem. Weekbl., **36**, 330-331 (1939).
37) W.N. Lipscomb: Acta Cryst., **2**, 193-194 (1949).
38) R. Colella: Acta Cryst., **A30**, 413-423 (1974).
39) B. Post: Phys. Rev. Lett., **39**, 760-763 (1977).
40) B. Post: Acta Cryst., **A35**, 17-21 (1979).
41) Q. Shen: Acta Cryst., **A42**, 525-533 (1986).
42) S.L. Chang: Phys. Rev. B, **33**, 5848-5850 (1986).
43) E. Weckert, W. Schwegle and K. Hümmer: Proc. R. Soc. Lond. A, **442**, 33-46 (1993).
44) E. Weckert and K. Hümmer: Acta Cryst., **A53**, 108-143 (1997).
45) E. Weckert and K. Hümmer: Cryst. Res. Technol., **33**, 653-678 (1998).
46) G. Thorkildsen and H.B. Larsen: Acta Cryst., **A54**, 120-128 (1998).
47) H.B. Larsen and G. Thorkildsen: Acta Cryst., **A54**, 137-145 (1998).
48) Y.P. Stetsko, H.J. Juretschke, Y.-S. Huang, Y.-R. Lee, T.-C. Lin and S.-L. Chang: Acta Cryst., **A57**, 359-367 (2001).
49) G. Thorkildsen: Acta Cryst., **A43**, 361-369 (1987).
50) G. Thorkildsen, H.B. Larsen and E. Weckert: Acta Cryst., **A57**, 389-394 (2001).
51) K. Okitsu: Acta Cryst., **A59**, 235-244 (2003).
52) K. Okitsu, Y. Imai, Y. Ueji and Y. Yoda: Acta Cryst., **A59**, 311-316 (2003).
53) K. Okitsu: Submitted to Nanotechnology **15** (2004).
54) K. Okitsu, Y. Ueji and Y. Urano: In preparation.

付　　録

A　Ewald-Laue 動力学理論と高木-Taupin の式の等価性

2波近似の Ewald-Laue 理論を理解する際に，図8のような作図をして，平面波X線が平板結晶に入射するケースを考慮する場合が多い．

筆者による原著論文[51]において n 波ケースの理論を導く際には，ローレンツ点 Lo は，n 個の波数ベクトルに対して等価でなくてはならず，結晶中でのX線の吸収を取り扱う際にも $\overrightarrow{LaLo}$ は，実数成分と同じ方向を向いた虚数成分を持つ必要がある．2波近似の場合，$\overrightarrow{LaLo}$ は，図8に示した単位ベクトルの和 $\mathbf{e}_0+\mathbf{e}_1$ に平行でなくてはならず，吸収を取り扱う場合でも $\mathbf{e}_0+\mathbf{e}_1$ に平行な虚数成分を持っていなくてはならない．$\overrightarrow{LaLo}$ の虚数成分に任意性を許すとする著書も多いが，その扱いだと，基本方程式から最終的な数式を導出してゆく仮定で論理が破綻する．

さて，Ewald-Laue 理論による分散面(図8の双曲線)

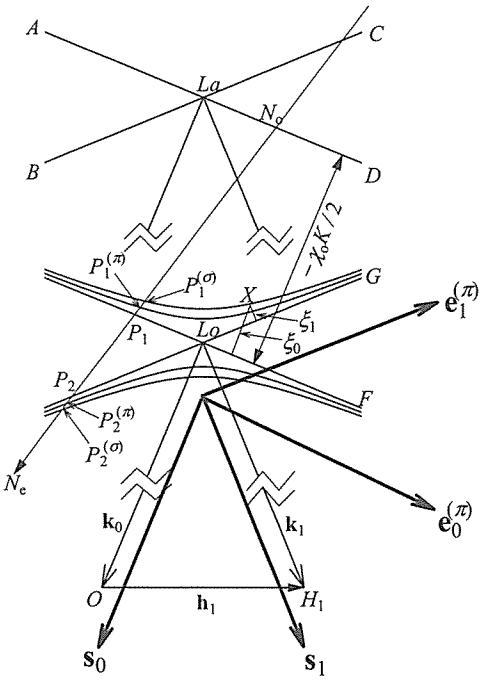


Fig. 8　ラウエ点 La で交わる AD と BC は，逆格子原点 O および逆格子点 H_1 からの距離が空気中でのX線の波数 K と等しい点の軌跡である．ローレンツ点 Lo で交わる P_1F と P_2G は，同様に O と H_1 からの距離が $K(1+\chi_o K/2)$ と等しい点の軌跡である．χ_o は，結晶の電気分極率のゼロ次のフーリエ係数である．AD 上の点 N_o を起点とし O を終点とする波数ベクトルの波が結晶に入射するとき，波の連続の条件より，結晶表面の法線ベクトル（N_o から N_e へ向かうベクトル）が分散面（近似的な双曲線）と交わる点 $P_1^{(\sigma)}$, $P_1^{(\pi)}$, $P_2^{(\sigma)}$, $P_2^{(\pi)}$ を起点とし，終点が O と H_1 の波数ベクトルの波が，結晶中に励起される．この作図法は動力学理論を理解する際の基礎になるものだが，結晶表面が平面でない場合や結晶中に歪みや欠陥が含まれる場合には直接対応できない，などの限界がある．

は，次のように表される．

$$\xi_0\xi_1=\frac{1}{4}K^2C^2\chi_{+\mathrm{h}_1}\chi_{-\mathrm{h}_1}. \tag{46}$$

ξ_0 と ξ_1 は，それぞれ，双曲線からの漸近線 P_1F，P_2G からの距離である（ξ_0 と ξ_1 は，分散面の上のブランチでは正の値，下のブランチでは負の値である）．C は偏光因子で，σ 偏光のとき $C=1$，π 偏光のとき $C=\cos(2\theta_B)$ である．さらに，図8の中で σ 偏光の分散面上に示した点 $X(\xi_0,\ \xi_1)$ において励起される透過波と反射波の複素振幅 $D_0^{(k)}$ と $D_1^{(k)}$ の間には，次のような拘束条件がある．

$$\frac{D_1^{(k)}}{D_0^{(k)}}=\frac{2\xi_0}{KC\chi_{-\mathrm{h}_1}} \tag{47}$$

$$=\frac{KC\chi_{+\mathrm{h}_1}}{2\xi_1}. \tag{48}$$

$D_0^{(k)}(\xi_0,\ \xi_1)$，$D_1^{(k)}(\xi_0,\ \xi_1)$ は，逆空間内の分散面上での透過および反射波の複素振幅である．結晶中の波数ベクトルに与える拘束条件(46)と振幅に与える拘束条件(47)と(48)のみで Ewald-Laue の動力学理論は完結しており，これ以下でもこれ以上でもない．式(46)，(47)，(48)から高木-Taupin の式(28)と(29)を，以下に導出してみよう．

まず斜交座標（ξ_0，ξ_1）で表される分散面上の点 X とローレンツ点 Lo を結ぶベクトル $\Delta\mathbf{k}=\overrightarrow{XLo}$ を図8に描いた $\mathbf{s}_0$-$\mathbf{e}_0^{(\pi)}$ の直交座標系と $\mathbf{s}_1$-$\mathbf{e}_1^{(\pi)}$ の直交座標系を用いて次のように表す．

$$\Delta\mathbf{k}=\xi_0\mathbf{s}_0+e_0^{(\pi)}\mathbf{e}_0^{(\pi)} \tag{49}$$

$$=\xi_1\mathbf{s}_1+e_1^{(\pi)}\mathbf{e}_1^{(\pi)}. \tag{50}$$

実空間内での透過および反射波の複素振幅を $D_0^{(r)}(s_0,\ s_1)$，$D_1^{(r)}(s_0,\ s_1)$ とする．ここで実空間内でのX線波動場 D は次のように記述されるとする．

$$D(\mathbf{r})=D_0^{(r)}(s_0,\ s_1)\exp(-\mathrm{i}2\pi\mathbf{k}_0\cdot\mathbf{r}) +D_1^{(r)}(s_0,\ s_1)\exp(-\mathrm{i}2\pi\mathbf{k}_1\cdot\mathbf{r}), \tag{51}$$

$$\mathbf{r}=s_0\mathbf{s}_0+s_1\mathbf{s}_1. \tag{52}$$

上の式で D には，偏光を表す添え字がないが，これは式(46)の偏光因子 C により考慮される．$\mathbf{k}_0$，$\mathbf{k}_1$ は，図8に示すように $\overrightarrow{LoO}$ および $\overrightarrow{LoH_1}$ である．$D_0^{(r)}(s_0,\ s_1)$ は，$D_0^{(k)}(\xi_0,\ \xi_1)$ をフーリエ変換することにより次のように表される．

$$D_0^{(r)}(s_0,\ s_1)=\int_{\xi_0,\xi_1}^{D.S.}D_0^{(k)}(\xi_0,\ \xi_1) \times\exp(-\mathrm{i}2\pi\Delta\mathbf{k}\cdot\mathbf{r})\mathrm{d}\xi_0\mathrm{d}\xi_1. \tag{53}$$

積分 $\int_{\xi_0,\xi_1}^{D.S.}\mathrm{d}\xi_0\mathrm{d}\xi_1$ は，分散面上のすべてにわたる積分である．ここで式(49)，(50)，(52)を上の式に代入して

$$D_0^{(r)}(s_0,\ s_1)=\int_{\xi_0,\xi_1}^{D.S.}D_0^{(k)}(\xi_0,\ \xi_1) \times\exp[-\mathrm{i}2\pi(\xi_0s_0+\xi_1s_1)]\mathrm{d}\xi_0\mathrm{d}\xi_1. \tag{54}$$

同様にして $D_1^{(r)}(s_0,\ s_1)$ は，$D_1^{(k)}(\xi_0,\ \xi_1)$ をフーリエ変換して次のように表される．

$$D_1^{(r)}(s_0,\ s_1)=\int_{\xi_0,\xi_1}^{D.S.}D_1^{(k)}(\xi_0,\ \xi_1) \times\exp[-\mathrm{i}2\pi(\xi_0s_0+\xi_1s_1)]\mathrm{d}\xi_0\mathrm{d}\xi_1. \tag{55}$$

式(54)を s_0 で微分して，次の式を得る．

$$\frac{\partial D_0^{(r)}(s_0,\ s_1)}{\partial s_0}=-\mathrm{i}2\pi\xi_0\int_{\xi_0,\xi_1}^{D.S.}D_0^{(k)}(\xi_0,\ \xi_1) \times\exp[-\mathrm{i}2\pi(\xi_0s_0+\xi_1s_1)]\mathrm{d}\xi_0\mathrm{d}\xi_1. \tag{56}$$

また，式(54)に，式(48)を代入して

$$D_0^{(r)}(s_0,\ s_1)=\frac{2\xi_1}{KC\chi_{+\mathrm{h}_1}}\int_{\xi_0,\xi_1}^{D.S.}D_1^{(k)}(\xi_0,\ \xi_1) \times\exp[-\mathrm{i}2\pi(\xi_0s_0+\xi_1s_1)]\mathrm{d}\xi_0\mathrm{d}\xi_1. \tag{57}$$

式(55)に同様な手続きを施して，次の2つの式を得る．

$$\frac{\partial D_1^{(r)}(s_0,\ s_1)}{\partial s_1}=-\mathrm{i}2\pi\xi_1\int_{\xi_0,\xi_1}^{D.S.}D_1^{(k)}(\xi_0,\ \xi_1) \times\exp[-\mathrm{i}2\pi(\xi_0s_0+\xi_1s_1)]\mathrm{d}\xi_0\mathrm{d}\xi_1, \tag{58}$$

$$D_1^{(r)}(s_0,\ s_1)=\frac{2\xi_0}{KC\chi_{-\mathrm{h}_1}}\int_{\xi_0,\xi_1}^{D.S.}D_0^{(k)}(\xi_0,\ \xi_1) \times\exp[-\mathrm{i}2\pi(\xi_0s_0+\xi_1s_1)]\mathrm{d}\xi_0\mathrm{d}\xi_1. \tag{59}$$

式(56)と式(59)の比較，および式(57)と式(58)の比較より，次の2つの式を得る．

$$\frac{\partial}{\partial s_0}D_0^{(r)}(s_0,\ s_1)=-\mathrm{i}\pi KC\chi_{-\mathrm{h}_1}D_1^{(r)}(s_0,\ s_1), \tag{60}$$

$$\frac{\partial}{\partial s_1}D_1^{(r)}(s_0,\ s_1)=-\mathrm{i}\pi KC\chi_{+\mathrm{h}_1}D_0^{(r)}(s_0,\ s_1). \tag{61}$$

式(60)と式(61)は，結晶歪みが無いときの高木-Taupin の式に他ならない．結晶歪みを取り扱う場合には，結晶中に無数の積層欠陥が入っている場合を想定すればよいのだが，これについては後述する．

高木-Taupin の式から Ewald-Laue 理論を導くこともできるのだが，ここでは省略する．

B 積層欠陥を含んだ結晶中でのX線の振る舞いについて

積層欠陥を含んだ結晶中でのX線の振る舞いについては，1960年代の終わりに加藤，宇佐見，片川[9]および Authier[10] によってセクショントポグラフの解析解が示され，Patel と Authier によって実験との比較がなされ，解析解が正しいことが示された[11,12]．

積層欠陥を含むケースを考慮することは，動力学理論と運動学理論の本質的な違いを示し，さらに任意の歪みを含んだ結晶に対する動力学理論である高木-Taupin の式や本稿に記述した n-波理論の格子変位の項の意味を直感的に理解する上で重要である．

図9(a)は，積層欠陥を含んだ結晶に対するセクショントポグラフ図形で，加藤，宇佐見，片川[9]による解析解から計算した図形である．想定している実験配置は，図10のようなもので，$A_1A_2A_3$ および $B_1B_2B_3$ を底面とするボルマンファン領域の中に3角形 A_1CB_3 の積層欠陥が入っている．図9(b)は，図9(a)と同じパラメーター

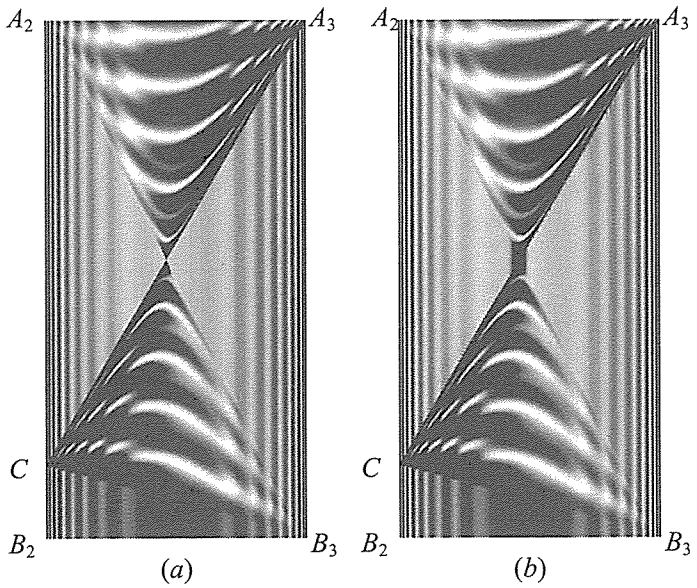


Fig. 9　(a)積層欠陥を含んだ結晶に対する解析解[9]による計算図形と(b)高木-Taupinの式によるシミュレーション図形．図10のような実験配置を想定している．厚さ0.15 mmのシリコン結晶，220の対称ラウエケース，X線の波長は1.5Åを仮定しており，積層欠陥における格子変位 $\mathbf{u}_{SF}$ は，$\mathbf{u}_{SF}=(\mathbf{a}+\mathbf{b}+\mathbf{c})/3$($\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$, $\mathbf{c}$ は，シリコン結晶の基本並進ベクトル）であるとして計算された．

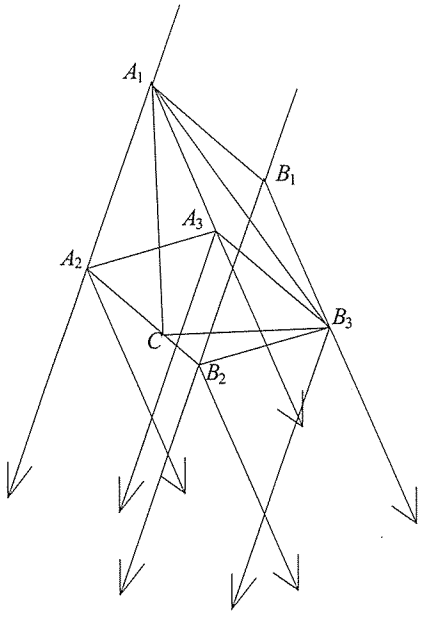


Fig. 10　図9(a)，9(b)を計算する際に想定した実験配置．積層欠陥は，3角形 A_1CB_3 の平面に入っている．厚さ0.15 mmのシリコン結晶，220の対称ラウエケース，X線の波長は1.5Åを仮定しており，積層欠陥における格子変位 $\mathbf{u}_{SF}$ は，$\mathbf{u}_{SF}=(\mathbf{a}+\mathbf{b}+\mathbf{c})/3$($\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$, $\mathbf{c}$ は，シリコン結晶の基本並進ベクトル）であるとしている．

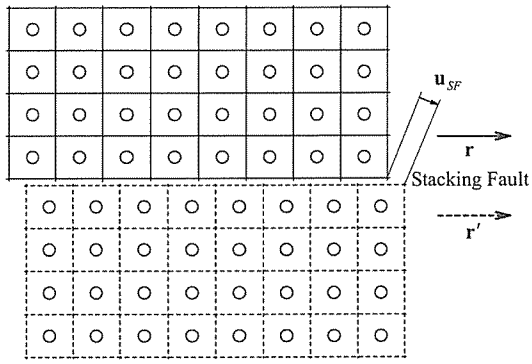


Fig. 11　積層欠陥を模式的に表した図．

で，高木-Taupinの式による数値解を求めた結果である．図9(a)と図9(b)に示した A_2, A_3, B_2, B_3 および C の位置は，図10に示した A_2, A_3, B_2, B_3 および C に対応する．図9(b)を計算する手続きはまことに簡単で，高木-Taupinの式(28)と(29)で，格子変位ベクトル $\mathbf{u}$ に対して，積層欠陥より上では $\mathbf{u}$ にゼロベクトルを与え，下では一定の格子変位ベクトル $\mathbf{u}=\mathbf{u}_{SF}$ を与えるだけで計算できる．

対して，加藤，宇佐見，片川[9]やAuthier[10]による解析解の導出過程は非常にややこしい．まず，積層欠陥がない場合の透過波と回折波の振幅を P_0, P_1 として P 波とよぶことにする．Ewald-Laue理論による透過波と反

射波の振幅比の式(47), (48)は，χ_{+h_1}, χ_{-h_1}を定義したときにとった原点で成り立つ式であるが，積層欠陥を境にして，図11に示すように原点の位置がずれてしまう．P波が次のように表されるとしよう．

$$P=P_0\exp(-i2\pi\mathbf{k}_0'\cdot\mathbf{r})+P_1\exp(-i2\pi\mathbf{k}_1'\cdot\mathbf{r}). \quad (62)$$

ここで，$\mathbf{k}_0'$および$\mathbf{k}_1'$は，分散面上の同じ位置を起点とし，それぞれ逆格子原点Oおよび逆格子点H_1へ向かう波数ベクトルである．上の式で表されていたP波は，$\mathbf{r}'=\mathbf{r}-\mathbf{u}_{SF}$の位置ベクトルの変換により考え直さなくてはならない．積層欠陥より下での波動場D'は，次のようになる．

$$D'=D_0'\exp(-i2\pi\mathbf{k}_0'\cdot\mathbf{r}')+D_1'\exp(-i2\pi\mathbf{k}_1'\cdot\mathbf{r}') \quad (63)$$

$$=D_0'\exp(i2\pi\mathbf{k}_0'\cdot\mathbf{u}_{SF})\exp(-i2\pi\mathbf{k}_0'\cdot\mathbf{r}) + D_1'\exp(i2\pi\mathbf{k}_1'\cdot\mathbf{u}_{SF})\exp(-i2\pi\mathbf{k}_1'\cdot\mathbf{r}). \quad (64)$$

積層欠陥の面上では，PとD'は，同じ値でなくてはならないので，(62)と(64)の比較から，

$$D_0'=P_0\exp(-i2\pi\mathbf{k}_0'\cdot\mathbf{u}_{SF}), \quad (65)$$

$$D_1'=P_1\exp(-i2\pi\mathbf{k}_1'\cdot\mathbf{u}_{SF}). \quad (66)$$

ここで，Q波の透過波と反射波の振幅Q_0とQ_1を次のように定義する．

$$Q_0=P_0[\exp(-i2\pi\mathbf{k}_0'\cdot\mathbf{u}_{SF})-1], \quad (67)$$

$$Q_1=P_1[\exp(-i2\pi\mathbf{k}_1'\cdot\mathbf{u}_{SF})-1]. \quad (68)$$

式(67), (68)を式(65), (66)に代入すると，

$$D_0'=P_0+Q_0, \quad (69)$$

$$D_1'=P_1+Q_1. \quad (70)$$

すなわち，積層欠陥の下では，積層欠陥において発生したQ波が，P波と干渉すると考えるのである．Q波の群速度（あるいはポインティングベクトル）を解析するとボルマンファンを逆さにした3角錐の領域にQ波の波動場が伝播することになり，図9(a), (b)のような「砂時計」の図形が現れることになる．

一方，格子変位の項を含まない高木-Taupinの式(60)と式(61)を使って積層欠陥を含むケースを考慮する場合，やはり$\mathbf{r}'=\mathbf{r}-\mathbf{u}_{SF}$の座標変換を考えることになる．図11で，積層欠陥より上の実空間の波動場$D(\mathbf{r})$が次のように表されるとする．

$$D(\mathbf{r})=D_0(\mathbf{r})\exp(-i2\pi\mathbf{k}_0\cdot\mathbf{r})+D_1(\mathbf{r})\exp(-i2\pi\mathbf{k}_1\cdot\mathbf{r}). \quad (71)$$

このとき，積層欠陥より下の波動場$D'(\mathbf{r}')$は，同様に次のように表される．

$$D'(\mathbf{r}')=D_0'(\mathbf{r}')\exp(-i2\pi\mathbf{k}_0\cdot\mathbf{r}')+D_1'(\mathbf{r}')\exp(-i2\pi\mathbf{k}_1\cdot\mathbf{r}'). \quad (72)$$

$$=D_0'(\mathbf{r}')\exp[-i2\pi\mathbf{k}_0\cdot(\mathbf{r}-\mathbf{u}_{SF})]+D_1'(\mathbf{r}')\exp[-i2\pi\mathbf{k}_0\cdot(\mathbf{r}-\mathbf{u}_{SF})] \quad (73)$$

$$=D_0'(\mathbf{r}')\exp(i2\pi\mathbf{k}_0\cdot\mathbf{u}_{SF})\exp(-i2\pi\mathbf{k}_0\cdot\mathbf{r}) + D_1'(\mathbf{r}')\exp(i2\pi\mathbf{k}_1\cdot\mathbf{u}_{SF})\exp(-i2\pi\mathbf{k}_1\cdot\mathbf{r}). \quad (74)$$

積層欠陥面において，$D'(\mathbf{r}')=D(\mathbf{r})$でなくてはならないから，式(71)と式(74)を比較して，

$$D_0'(\mathbf{r}')=D_0(\mathbf{r})\exp(-i2\pi\mathbf{k}_0\cdot\mathbf{u}_{SF}), \quad (75)$$

$$D_1'(\mathbf{r}')=D_1(\mathbf{r})\exp(-i2\pi\mathbf{k}_1\cdot\mathbf{u}_{SF}). \quad (76)$$

格子変位の項を含まない高木-Taupinの式(60)と(61)は，積層欠陥の下では，$D_0^{(r)}$を$D_0'(\mathbf{r})$と置いて，$D_1^{(r)}$を$D_1'(\mathbf{r})$と置いて成り立たなくてはならないので，

$$\frac{\partial}{\partial s_0}D_0'(\mathbf{r}')=-i\pi KC\chi_{-h_1}D_1'(\mathbf{r}'), \quad (77)$$

$$\frac{\partial}{\partial s_1}D_1'(\mathbf{r}')=-i\pi KC\chi_{+h_1}D_0'(\mathbf{r}'). \quad (78)$$

式(75)と(76)を(77)と(78)に代入して整理すると

$$\frac{\partial}{\partial s_0}D_0(\mathbf{r})=-i\pi KC\chi_{-h_1}\exp(-i2\pi\mathbf{h}_1\cdot\mathbf{u}_{SF})D_1(\mathbf{r}), \quad (79)$$

$$\frac{\partial}{\partial s_1}D_1(\mathbf{r})=-i\pi KC\chi_{+h_1}\exp(+i2\pi\mathbf{h}_1\cdot\mathbf{u}_{SF})D_0(\mathbf{r}). \quad (80)$$

(79), (80)は，結晶全体を図11の実線の格子で区切り，区切られた単位胞の中心における透過波と反射波の振幅$D_0(\mathbf{r})$と$D_1(\mathbf{r})$の間に成り立つ方程式である．

ここで，モザイクの一つひとつが完全結晶であり，それらが積層欠陥によって区切られているという描像で，モザイク結晶を取り扱うことにしよう．図11の実線のような完全格子でモザイク結晶全体を区切り，$\mathbf{r}_n$の領域を含むn番目のモザイクの完全格子からのズレを$\mathbf{u}_n$で表すことにする．式(79), (80)を導出したのと同じ論理で，次の式を導くことができる．

$$\frac{\partial}{\partial s_0}D_0(\mathbf{r}_n)=-i\pi KC\chi_{-h_1}\exp(-i2\pi\mathbf{h}_1\cdot\mathbf{u}_n)D_1(\mathbf{r}_n), \quad (81)$$

$$\frac{\partial}{\partial s_1}D_1(\mathbf{r}_n)=-i\pi KC\chi_{+h_1}\exp(+i2\pi\mathbf{h}_1\cdot\mathbf{u}_n)D_0(\mathbf{r}_n). \quad (82)$$

上の式(81), (82)で$\mathbf{u}_n$を位置$\mathbf{r}$によって連続的に変化する関数$\mathbf{u}(\mathbf{r})$であるとした極限が，式(28)と(29)で表される高木-Taupinの式に他ならない．積層欠陥で区切られた無数のモザイクでの回折を式(81)と(82)で取り扱う場合，$D_0(\mathbf{r})$と$D_1(\mathbf{r})$の位相のズレを考慮し，モザイク一つひとつでの回折を可干渉であるとして取り扱っている．動力学理論でのこのようなX線波動場の取り扱いは，モザイクの一つひとつからの反射には全く干渉性はなく，単に強度の合成であるという考え方をする運動学理論とは根本的に異なる．

講　　座

金属学とその研究手法の進歩 —研究生活を顧みて〔II〕

村　上　陽太郎*

Progress in Metal Science and Its Research Technology—Look Back upon My Research Life〔II〕

by Yotaro MURAKAMI

1. はじめに

前回[1]は最初に私の金属学の研究生活全般の経緯を述べた後，私達が行なった合金状態図の研究とその手法と，最近の進歩した研究手法，特にCALPHAD法と計算機ソフトウエアについて書いた．私の金属学の初期の研究は，合金状態図的研究と時効析出現象の研究の2つに別けられることを述べてある．従って，今回は，アルミニウム合金の析出現象と時効硬化性合金について，古い時代から，進歩した時代を経て現在までの，その時々に話題になった事項を書きたい．

時効硬化現象については，合金を高温から水中に急冷した後，室温或は少し高い温度に置いておくと，自然に硬化する現象であることは，現在では，金属に関係のある人なら大抵の人が知っているが，筆者は大学の講義で始めて聴いたとき，学問らしさの響をもった清新な印象を持った．当時はそのような金属学の初期の時代であった．析出現象との最初の出会いはHD合金押出型材のミクロ組織の観察であった．卒業してしばらくたった頃，西村研究室に共通試料として配布されてきた試料の調査を西村秀雄先生から指示された．これが私の時効析出現象の研究に取り組むようになった動機である．当時，超ジュラルミン（SD）が航空機用材料の主体であったが，戦時中で銅地金が著しく不足してきたので，銅を含まない高力Al合金の探求の結果得られた合金がHD合金である．軍官民の共同研究の委員会の主査であられた本多光太郎先生の名前を取って，HD(Honda's Duralumin)と名付けられた．この合金は表1に示すように，強度はESDより多少劣るが，押出性がよく，SCCにも耐えるよい合金であった．押出速度は，SDで3 m/min，後で述べるESD（超々ジュラルミン）で，1.5 m/minに較べて，30 m/minと優れ，生産性が著しく高いため，戦時中では恰好の材料であった．その組成は，ESDのZnを下げ，$MgZn_2$（重量比でMg：Zn=1：5.4）よりもMg量を多くしたものである．戦後は全く顧りみられることがなかったが，随分長くたった後で，溶接構造用三元合金として，世界各国で研究された．我国では，7NO1（表1）として規格化されている．これについては，9節で述べ

表1　高力アルミニウム合金開発の試験材の組成と機械的性質（7NO1は規格値）

合金名	組成、重量%							機械的性質（単位：kg/mm²）				
	Cu	Zn	Mg	Mn	Cr	Fe	Si	$\sigma_{0.2}$	UTS	伸び、%	H_V	E
HD	–	5.76	2.16	0.87	0.28	0.28	0.28	48.1	57.7	9.4	163	7,700
SD	4.29	–	1.53	0.54	–	0.36	0.47	31.5	48.8	13.8	128	7,300
ESD	2.07	7.63	1.39	0.46	0.15	0.30	0.51	57.7	65.3	10.0	197	7,500
7NO1	–	4.5	1.50	0.50	0.30	0.35	0.30	30.0	37.0	15.0	100	7,300

*京都大学名誉教授（昭和17年，冶金卒）

る．

2. 戦前（1945年以前）の金属組織学の研究手法

戦前の合金開発の手法は，諸外国でも同様であるが，試行錯誤（Trial and Error）的な方法であった．また研究機器も表2に示すように極めてシンプルで，マクロ的特性が測定できるに過ぎず，特に時効析出現象の研究はX線的測定のnmスケールから，一足飛びにmm領域の光学顕鏡組織に移り，重要な中間領域を欠いたものであった．それでも，いくつかの偉大な研究が行われている．

1900年初頭にドイツ兵器弾薬製造会社の研究所で，Alfred Wilmが，当時漸く工業的生産ができるようになったアルミニウム（Al）を合金化して，黄銅並に強度を上げようと努力していた．Alに種々の合金元素を適量添加した多数の試料を調製し，鋼の焼入れ硬化にならって，高温から水焼入して，ブリネル硬度計で硬さを測定していた．そのような繰返しによって，優れた性能の合金を探索する“試行錯誤的”手法である．1906年に，種々語られているように，偶然且劇的に，“時効硬化現象”が発見され，ジュラルミン（Duralumin, D，当時の組成：Al-3.5%Cu-0.5%Mg-0.5%Mn）が発明された．

この大発見と発明が，試行錯誤的手法とブリネル硬度計によって行われたことは誠に幸運であったと言わねばならない．時効析出現象の発端である．当然，何故このような硬化現象が起るかについては多数の研究者によって，研究され，多くの仮説が提案されたが，明確な説明は転位論の発展と，透過電子顕微鏡による薄膜の直接観察まで待たねばならなかった．しかし，一方1919年になって，米国のメリカ教授（P.D. Merica）らによって，時効硬化性合金開発の指導原理が提案された．彼等は，Al-Cu二元系合金状態図のAl側の固溶限が高温から低温に減少していることに着目し，高温で均一固溶体であったものが焼入によって，室温で過飽和固溶体となり，その分解過程における合金の構造変化が原因であるという卓抜な考え方を提示した．この指導原理によって，前号で述べたように，合金状態図的研究の時期と重っていたので，各種のAl合金系で固体溶解度曲線が決定され，試行錯誤的手法によって，マクロ的測定機器を駆使して，1940年頃までに現在実用されている時効性Al合金の基礎系が確立された．

表2　古い時代（戦前）における主な金属組織学の研究手法

(A) 研究方法	試行錯誤（Trial and Error）的，例えば合金探索の場合には，種々の合金元素を添加した多数の試料を調製して，各種の処理を行い，よい性能の合金を，宝探しのように選び出す。その後マクロ的な指導原理が出されても，その本質は変わらない。
(B) 実験方法	マクロ的な方法で，マクロ的性質のみが測定できるにすぎず，ミクロ的な構造は，X線測定法以外には不可能。
(1) 光学顕微鏡写真機 (2) X線管球—ガスイオン型シーラー管とクーリッジ電子管球 (3) 引張試験機 (4) 硬度計—ブリネル硬度計，ロックウェル硬度計，ビッカース硬度計 (5) 示差熱分析器 (6) 示差熱膨張計 (7) 電気抵抗測定法 (8) 耐食性試験法 (9) 電気化学的試験法 (10) その他	

3. 戦前の時効性高力Al合金の開発

ジュラルミンの軽くて強いという性質は，航空機の機体材料として，他の合金で代替し難いことから，更に強力なAl合金が探求され，1930年頃までに，Al-Cu-Mg系において2つの系統の合金が開発されている．1つは，高温時効性の含Si系で，その標準組成は，Cu 4.5，Mg 0.5，Si 0.75，Mn 0.5で，もう1つは，Alcoaによって開発された2024型超ジュラルミン（SD）で，ジュラルミンのMg量を～1.5%と多くしたもので，この合金の最大の特徴は，室温時効（T4）だけでジュラルミンの強度に到達できることである．

SDの常温時効硬化性の解明には，私の恩師西村秀雄先生が1937年に発表された世界的な業績がある．示差熱分析と示差熱膨張変化と光学顕微鏡組織を調べ，Al-Cu-Mg3元系のAl隅の固体平衡関係を確定し，Al固溶体と平衡する2種類の三元化合物の存在を確め，それらを，“S”および“T”と名付け，そのおよその組成を決定した．同時に断面状態図を確定し，Cu：Mg＝7：1（D），および4：1（SD）のCu：Mg比に相当する断面状態図から，（Al）固溶体に対するS化合物（Al_2CuMg）および$CuAl_2$の固溶度の変化を示し，SD合金の常温時効硬化性は，S化合物の析出に関連するものであるという明快な説明を与えた．初期の金属学的研究として高く評価されるべきである．

1935年（昭和10年）頃には，我国においてもSDは実用されていたが，当時の海軍から航空機用材料として，引張強さ（σ_B）がSDより約100 MPa高い600 MPa級の合金の開発の要求があった．当時の住友金属工業（株）伸銅所の五十嵐勇博士らは，昭和10年の8月に研究に着手した．それまでに発表されているSD，Sander合金（Al-8 Zn-1.5 Mg-0.5 Mn），E合金（Al-2.5 Cu-20 Zn-1.5 Mg-0.5 Mn）の3種類の高力合金を基礎にして，Cr-free超々ジュラルミンを開発し，σ_B＝568～686 MPaを達成した．更に最大の問題の応力腐食割れ，

(Stress-Corrosion Cracking, SCC) を解決するために，添加元素としての Mn, Cr, Ti, Mo, Co, Be, Ni, Ag, Ca, Si, Sn 等の効果を，熱処理，組織，腐食環境，応力等の影響とともに短期間で検討した．試行錯誤的方法であるので，膨大な量の研究であったと想像される．SCC に対して，Cr の添加が最も優れ，Mn, Mo の微量添加も有効であるとの結論を得て，Cr, Mn を含む Al-Zn-Mg-Cu 系の耐 SCC 性に優れた高力合金の開発に成功し，“超々ジュラルミン (Extra-Super Duralumin, ESD)”と命名した．実用化した ESD No. 1 合金の標準組成は，Zn 7～9, Mg 1.2～1.8, Cu 0.5～2.5, Mn 0.3～1.0, Cr 0.1～0.4 で，UTS＞570 MPa, $\sigma_{0.2}$＞490 MPa, ε＞5%の機械的性質を有し，更に疲労特性を改良した ESD No. 2 は疲労強度が 196 MPa 以上で，機械的性質は No. 1 と同等の優れた特性を示した．ESD は，1938 年（昭和 13 年）には，12 試艦機（後の零式戦闘機）の主桁（押出型材）とウェブ（板材）に採用され，1939 年には「零戦」1 号機が完成し，その年の暮から本格的生産が始った．この合金は，7000 系の Al-Zn-Mg-Cu 系合金とほぼ同様の組成である．米国の AA に登録は 1943 年であるので，それよりも数年以前に，ESD が我国独自で開発されたことは，当時の我国の研究開発能力の高さの証左を示すものであり，また試行錯誤的手法では，到達する所は同じであることは興味深い．

4. 筆者による初期の電子顕微鏡を用いた析出組織の研究

戦後しばらくして，海外の動向に刺激されて，我国でも，島津製作所と日立製作所で，商品としての電子顕微鏡の製造が始った．1948 年(昭和 23 年)に島津製作所で，5 万ボルトの電子顕微鏡が試作された．西村先生の指示で，アルミニウム合金の析出組織の研究を始めた．当時は薄膜透過法はまだ知られていなかった．酸化皮膜レプリカ法で行った．図 1(a)にその原理を示した．まず試料を電解研磨した後，燐酸アンモニウム飽和水溶液中で陽極酸化を行ない，厚さ 300 nm 程度の皮膜を作る．表面の皮膜層を塩化第 2 水銀水溶液中で剝離し，希塩酸中で洗滌する．酸化皮膜中には，析出相が含まれるか，溶解して抜殻になるので，これを電子顕微鏡内で観察すると，透過する電子線の密度分布から，析出相のサイズと分散状態が，光学顕微鏡では不可能な，1 万倍程度で，極めて明瞭なミクロ組織が得られ，析出組織の観察には極めて有用なことが初めて判り，当時として画期的なことであった．図 1(b)は多分我国で最初（昭和 23 年秋）に筆者が撮影した電子顕微鏡写真である．昭和 24 年頃になって，当時の大阪府立工業奨励館に日立製作所製電子顕微鏡の市販第 1 号機が設置された．館長の石田制一博士の

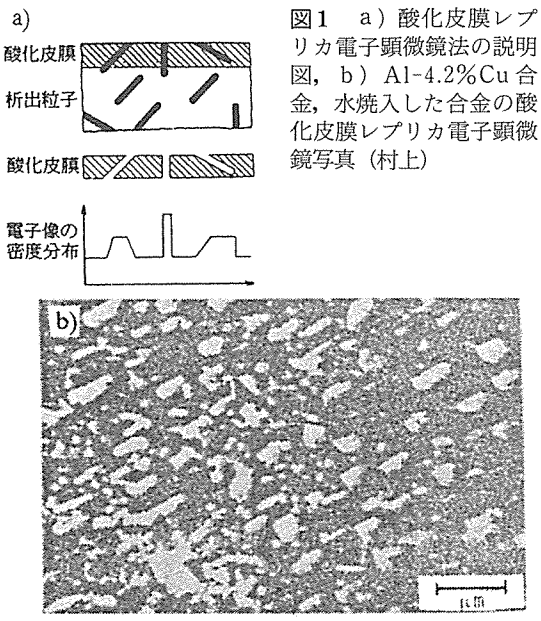


図1　a）酸化皮膜レプリカ電子顕微鏡法の説明図，b）Al-4.2%Cu 合金，水焼入した合金の酸化皮膜レプリカ電子顕微鏡写真（村上）

御好意で，Al 合金の時効析出組織の研究に利用させていただけることになり，週に 1～2 回，1 年以上も大阪に通った．真空系統の故障や光軸合せなどで，1 枚のよい写真を撮るのに今では信じられない苦労をしたが，その成果は大きく，やり甲斐のある仕事であった．析出組織の光学顕微鏡では判らない仕事ができて，大へん幸福であったことが想い出される．

図 2 は，Al-3.12%Cu-0.97%Mg 合金の“S”化合物の析出面を，単結晶試料の X 線ラウエ法による方位解析とすべり帯の方位から決定したもので，左下隅の方位図から判かるように，また，中央のエッチング・ピットからも判定できるが，S 化合物が，{100} と {110} 面（後者はその後の精密な測定で {120} 面）に析出面を持つ板状であることが決定できた．図 3 は，ESD の SCC に対する Cr の効果をミクロ組織的に解明した成果である．Al-8.5%Zn-1.54%Mg 合金とこれに 0.39%Cr を添加した合金の 140°C×5 h 時効試料を用いた．a）は割れが粒界で鋭く起っていること，b）はその粒界の光学顕微鏡写真で，粒界が深くエッチングされているが，析出相の様相は識別できないこと，しかし，c）の酸化皮膜レプリカの TEM 写真では，微細な粒界析出物が連続して析出し，SCC の敏感性を増大することを示している．析出処理温度を高くすると，粒界析出物が粗大化し，連続性を失うことによって，SCC 感受性が弱くなることも判った．また特に Cr を 0.39%添加した試料では，d）に TEM 写真を示すように，化合物による粒界移動の阻止効果で，粒界が弯曲したり，途中で途切れて不規則になり，b）の様相とは全く異なった組織になり，割れが起こ

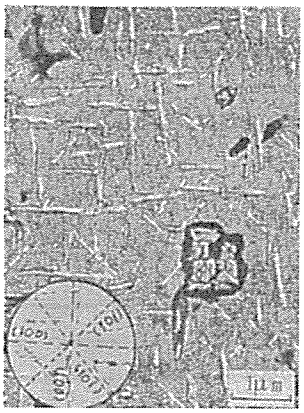


図2　Al-3.12%Cu-0.97%Mg合金の酸化皮膜レプリカ法による“S”化合物の析出面の決定（村上）

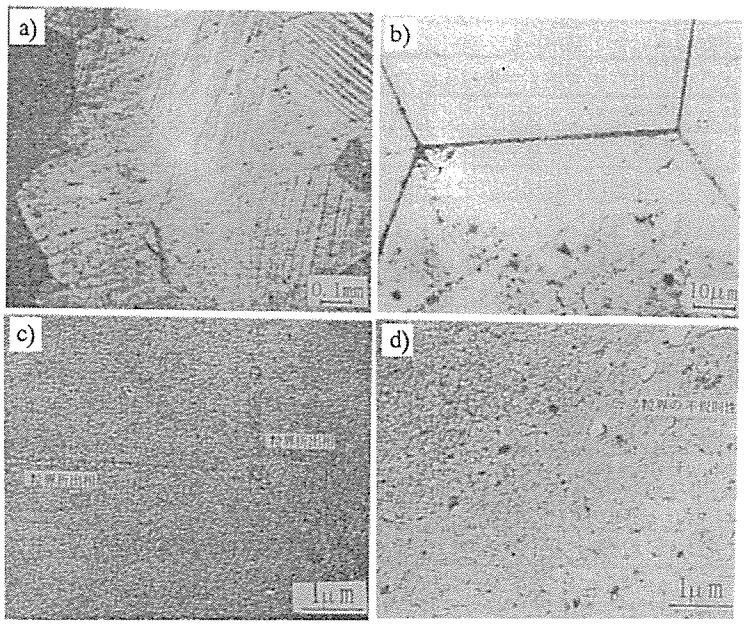


図3　合金の応力腐食割れの酸化皮膜レプリカ法電子顕微鏡観察（粒界析出相の分布と粒界の不連続，不規則性）（村上）：a）Al-8.5%Zn-1.54%Mg合金のSCC割れ，140°C×5h時効（光学顕微鏡写真），b）粒界における連続析出（光学顕微鏡写真），c）粒界に微細析出粒子が連続している（TEM写真），d）Cr 0.39%の添加の効果，200°C×5h時効，化合物の粒界のピン止め効果により粒界が不連続，不規則になる（TEM写真）

り難くなることが，耐SCC性向上の顕著な効果の原因であることを明かにできた．これらは京都大学工学部紀要（英文）に発表した．暫くして，Pergamon社から発行されていた“Progress in Metal Physics（後のProgress in Materials Science）のVol. 5（1954年），No. 4, Report on Precipitation（H.K. Hardy and T.J. Heal編）にそれぞれ，文献として引用されていることを知った．前号にも書いたが，英文で論文を発表することの大きなメリットを初めて深く知った．その後は研究成果は，海外の著名な学術誌に投稿する努力をした．このことが，研究の国際的な評価も得られ，同時に研究室の出身者の海外留学の際の業績評価などに役立つと共に，早くから海外にも多くの知己を持つ助けになった．

5. 析出現象のX線的研究

戦前の析出現象の研究手法として，X線回折法は極めて重要であった．1935年に，G. WassermannとJ. Wertsは，Al-5%Cu合金単結晶の単色Cu特性X線による回転結晶法によって，平衡相，θ-$CuAl_2$とは異なる斑点を見出し，これを解析して，結晶構造がa＝8.2Å，c＝11.6Åの正方晶の化合物であることを決定した．中間相θ'-$CuAl_2$の発見である．次いで1938年には，フランスのA. GuinierとG.D. Prestonが別々に，現在GPゾーン（Guinier-Preston zone）と呼ばれている溶質原子のクラスターが，時効初期に形成されることを発見した．単色X線を照射した場合，入射X線に近い中心の小さい角度の領域及びラウエ斑点のstreaksを解析して，母相の{001}面上に母相に整合なCu原子のplateletが生じることによることを解明した．それまで曖昧であったAl-Cu系の析出過程が“過飽和固溶体—GPゾーン—θ'-$CuAl_2$中間相—θ-$CuAl_2$平衡相”であることが確立され，時効析出現象が大きく進展した．

昭和17年（1942年）頃，西村研究室には，X線装置として，瓦斯イオン管式のシーラー管球が設置されていた．回転式直空ポンプと漏洩装置をバランスさせて，10^{-2}～10^{-3} mmHgの真空を保ちながら，30～80 kVで数mAの電流で，X線を発生する能率の悪い装置で，フイルムの露出時間も長く，福井康興先生（当時の工研助教授）が調整に苦労しておられるお手伝いをしたのが，私の最初のX線との出合いであった．其後私自身の析出現象の研究にX線を利用すること考え，西村先生のお許しを得てクーリッヂ管球を購入できるようになったが，今度は，物資が不足しているので，珪素鋼板とソーダ灰を持って来てもらわないと売れないというようなことがあり，漸くこれらの入手の目途がついて，工場に交渉に行った．昭和20年（1945年）の始め頃であった．各地に米軍の空襲が激化している頃であったが，京都には空襲らしいものがなく比較的のんびりしていた．丁度阪急の中津駅を

下車したとたんに空襲警報が鳴り，工場へ行くのが大へん不安であったことが今でも強く記憶に残っている．このように苦労して入手した管球も，やがてきた終戦とその後の事情で使用できなかったことを大へん残念に思っている．現在X線装置は完全にオートマテックになり，コンピュータ処理で即座にデーターが出る．私にはその進歩は驚きの外はない．

戦後は前述のように電子顕微鏡的研究を始めたので，X線的研究を開始する余裕はなかった．昭和28年(1953年)に教授に昇進した．研究室のスタフも充実してきて，研究の分野も拡がってきた．当時は諸外国から論文をみても，時効析出現象の研究には，X線的な手法は最も有力で魅力的な研究手法であったので，X線装置を充実させてきた．河野修助手（後に助教授）と一緒に，Al-Cu-Mg系，Al-Mg-Si系及びAl-Zn-Mg系合金の析出初期過程に及ぼす塑性変形並びに添加元素の影響の研究を行なった．X線ラウエ法，透過電子顕微鏡法，電気抵抗法等を用いた．X線ラウエ法は，GPゾーンの解明に有効であったが，1枚1枚フィルムに撮影する方法で解析にも手間がかかった．昭和34年(1959年)頃に，理学電機（株）から，回転陽極式の“ローターフレックス”が発売された．クーリッヂ管では，10～20 mA程度の電流しか得られないが，水冷Cu対陰極では100 mAが可能ということであった．研究費が十分でなかったので，変圧器等の電源部分と回転陽極だけを分譲してもらって研究室で組み立てた．これでX線的研究の能率は格段に向上した．

昭和36年(1961年)に，当時の西ドイツのStuttgart市にあるマックスプランク金属研究所に短期間滞在する機会があり，V. Gerold教授の研究室でX線小角散乱法（SAXS法）が，時効初期の研究に活用されていることを知り，種々調査を行った．その後間もなく河野修助教授にそこに留学してSAXS法を修得してもらった．我国では，当時高分子の研究には活用されていたが，合金に対して最初に本格的な適用を始めることができた．同君が阪大教授に栄転が内定していたが，夭逝されたことは返す返すも残念である．研究室において，大学院の田村秀昭（参議院議員・工博），村上正紀（京大教授）その他の多くの諸君によって，SAXS法で水準以上の仕事ができたことは誠に有難いと思っている．現在もSAXS法は進歩した形で長村光造教授に引き継がれて，大きく発展している．

6. 転位論と析出硬化の機構と強靱化の方策

転位論は金属学の進歩に大きく寄与したが，析出硬化の機構も転位論と透過電子顕微鏡によって明快な説明が与えられ，時効性合金の開発に大きな力を与えた．現在では，金属に関係のある人は誰でも，“転位”という言葉と大凡の概念は知っているが，私の大学在学中には，subgrainやmosaic structureなどの語句は聞いたが，dislocátion（転位）やlattic defect（格子欠陥）という言葉は講義には出てこなかった．しかし，昭和4年（1929年）に山口珪次先生（大阪大学教授）が，理化学研究所時代に，世界に先駆けて転位の概念を発表されていることを後で知った．先生はAl単結晶の変形後のX線ラウエ斑点のぼやけの解析から，結晶格子の弯曲がすべり帯の先端に起って，それが加工硬化の原因であることと，現在常識になっている刃状転位の集積によって起こる結晶格子の弯曲を示す図と全く同様な図を示されている．(K. Yamaguchi: Science Papers, Inst. Phys. Chem. Research, Tokyo, 11 (1929), 223) 今では，加工硬化機構等の論文には，この論文が引用されている．又昭和9年（1934年）頃には，G.I. Taylor, M. PolanyiやE. Orowanによって，結晶中の転位という言葉は論文中に発表されているが，我々の大学在学中には，それ程体系化されておらず，重要性の認識もなかった．昭和26年（1951年）頃になって，我国においても，橋口隆吉，鈴木平，山本美喜雄先生らによって，解説書が出されるようになった．関西でも，塑性変形を研究されていた同門の高村仁一さん（京大教授，1993年逝去）や辛島誠一兄（第三高等学校の同窓，阪大産研，後東北大教授，1992年逝去），北島貞吉氏（大阪府大，後九大教授）等が物理冶金談話会で活発な議論をしていられた．一般にも金属学には極めて重要な考え方であることが知られるようになり，私も解説書を読んだり，勉強会に出席して理解するように努力した．昭和32年(1957年)に，日本金属学会の編集で，丸善から，「転位論の金属学への応用」が出版された．転位の概念や挙動，原子空孔等の格子欠陥と金属学の諸問題をまとめて理解するのに大へん重宝な書物であった．この書物を丹念に読んで，転位論の全貌が判かるようになった．其後も内外に多くの書籍が発刊され，私も幾冊かを所蔵しているが，畏友辛島誠一兄が，日本金属学会会報，15巻(1976)，8号，520～523頁に，「転位論と金属学への応用-教科書，参考書を中心として-」と題して，内外の著名な書籍名と内容の解説している．参考書を探すのに有益であるので付言しておく．

昭和31年(1956年)になって，W. BollmannやP.B. Hirschが，ステンレス鋼やAlの薄膜試料を用いて，転位，格子欠陥や内部組織の直接観察を可能にした．当時一般的であった加速電圧100 kVの電子顕微鏡では，約2000 Åの厚さの薄膜にする必要がある．ボールマン法やジェット・ポリッシング法が開発され，電解研磨で作成できるようになった．現在では精密なダイヤモンド・カッターでも良質の薄膜が得られ，大へん便利になっている．

薄膜の透過電顕観察法が可能になったことで，微細な析出相が観察でき，制限視野電子線回折法で，析出相の構造や母相との方位関係を解析することができること．更に高分解能分析電顕では，析出物の化学組成が分析できること，一方結晶中の種々の格子欠陥も直接観察できて，格子欠陥の析出に及ぼす影響，転位と析出物の相互作用が電顕中で，加熱したり，引張応力を与えて，過飽和固溶体からの析出過程や運動転位と析出物の相互作用が，in situ でも観察できるようになり，X線，電気抵抗，比熱，機械的性質の測定を併用することによって，析出硬化機構が明らかになってきた．

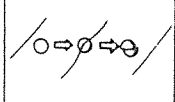
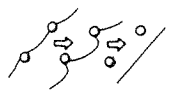
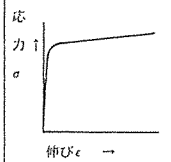
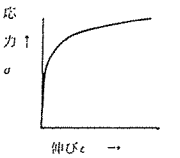
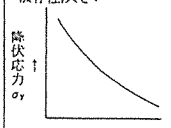
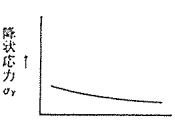
析出硬化は析出粒子が転位の運動を妨害することによって起こる．一方転位の運動が妨害されて，転位の堆積が生じ応力集中が起こると，クラックの核が発生し，その伝播によって破壊する．強靱化の方策は，特定の場所に応力集中が起こらないようにして，有効に転位の運動を阻止するように，ミクロ組織をコントロールすることである．

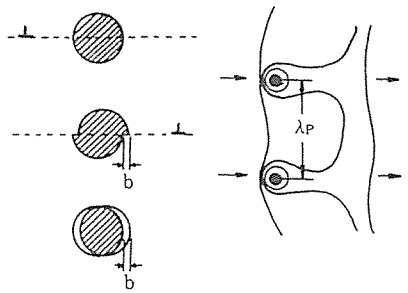
アルミニウム合金の場合，その析出硬化は，粒子のサイズ，粒子間距離および整合性（Coherency）の度合によって，粒子が剪断される場合と，剪断されず転位が bow out するか，交差すべりで転位ループを残して通り抜けるかの何れかによって起こる．

(1) 粒子の剪断による強化：GP ゾーンあるいは小さい整合な粒子の場合は，図4(a)に示すように転位は剪断して進む．この場合の降伏応力 τ_y は，$\tau_y = cf^m r^p$ で示される．ここで，f：容積率，r：粒子半径，指数m，pは正の定数で，τ_y はfとrと共に増大する．パラメーターcは合金によって決まる定数で，(a)図が示すように転位が粒子を剪断する時種々の仕事をするのでそれらによって決まる．粒子とマトリックスとのミスフィット，粒子の剛性，その規則度，粒子-マトリックス界面のエネルギー等が関係しているとされ，理論的な見積りも行われている．

(2) bypass（Orowan）機構：粒子が転位によって剪断されない場合で，析出粒子が成長して強度が高くなるか，強度の大きい分散粒子の場合には，図4(b)に示すように，転位は析出物間を by pass するか，cross slip して，後に転位ループを残す．この場合は粒子の性質は無関係で，τ_y は所謂，Orowan の式，$\tau_y = \tau_0 + 0.8Gb/\lambda_p$ で示される．ここで，τ_0 は粒子を含まない場合の降伏応力で，固溶強化を含む．G：剛性率，b：Burgers vector，λ_p：粒子間距離である．強度は容積率が一定の場合，粒子サイズが大きくなると，λ_p は大きくなるので，低下する．これが過時効による軟化現象の機構である．表3に上記

表3　時効析出の強化機構のモデルとその特徴

	転位が析出粒子をせん断する	転位がOrowanの機構で通り抜ける（交差すべり過程）
転位と析出粒子との相互作用		
析出相の種類と粒子間距離（λ_p）	G.P.ゾーン，整合析出物 $\lambda_p < \sim 10^{-5}$cm	非整合，部分的整合析出物 $\lambda_p > \sim 10^{-5}$cm
加工硬化係数 $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$	小さい 	大きい 
降伏応力の温度依存性	$\sigma_y(T) \propto A - T^{2/3}$ 依存性大きい 	$\sigma_y(T) \propto G(T)$ 依存性小さい 



（a）転位が析出粒子をせん断する場合　（b）転位が析出粒子間を張り出して通り抜ける場合

図4　析出粒子による強化機構

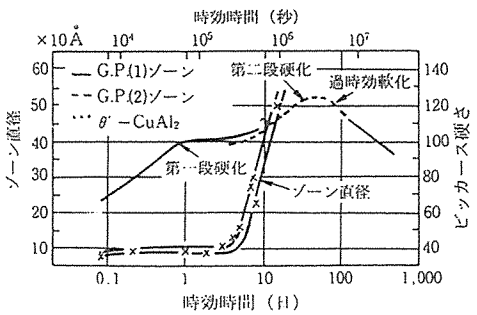


図5　Al-4%Cu 合金過飽和固溶体を 130°C で時効したときの析出物の種類，直径と2段階時効硬化（Silcock ら）

をまとめた強化機構のモデルとその特徴を示した．

これらに関連して，J.M. Silcock らの有名な研究を述べる．図5は時効硬化と析出粒子との関係を明確にしたもので，透過電顕のなかった時代に貴重な指導原理を与えた研究である．X線的研究による析出粒子の同定とビッカース硬さ測定によって得られたもので，Al-4%Cu合金を用いて，GP(1)ゾーンによって第1段の硬化が起こり，GP(2)ゾーン或は微細な θ'-$CuAl_2$ で第2段のより高い硬度が得られる．しかし θ'-$CuAl_2$ が粗大化したり，θ-$CuAl_2$ 平衡相が析出すると過時効軟化が起ることを示している．

図6に引張応力によるクラックの核の発生機構を模式的に示す．(a)はGPゾーンのように転位で剪断される場合には，或るすべり面で一旦剪断が起ると同一すべり面上を多数の転位が運動し，粒界に堆積して大きな応力集中を生じてクラックの発生が起こる．(b)は粒界に無析出物帯（PFZ）が存在する場合で，PFZはマトリックスより弱いので優先的な塑性変形を生じて粒界三重点でクラックを発生し，粒界破壊の原因になる．PFZの幅を拡げる方策が必要である．(c)は粒内に粗大な析出粒子が存在する場合で，粒子界面或は粒子自体が破壊して，内部がボイドやキャビティの発生源となり，ディンプル形成に寄与し，破壊靱性を低下させる．図7はAl-Cu-Mg系合金の含有Fe+Si量を0.5%以下に制限することによって，破壊靱性値 K_{1c} が改善されることを示したものである．Fe+Siの含有量を低下させて，Al-Fe-Si金属間化合物を微細化し，均一分散させることによって，すべり帯を微細化して粒界への応力集中を軽減すると共に，再結晶粒の微細化にも役立つ為である．再結晶抑制元素，Mn, Cr, Zr, Scは，均一化熱処理中に，0.2 μm程度又はそれ以下の強い非整合な析出粒子となり，転位に剪断されず，破壊も起り難いので，合金の強靱化に役立っている．

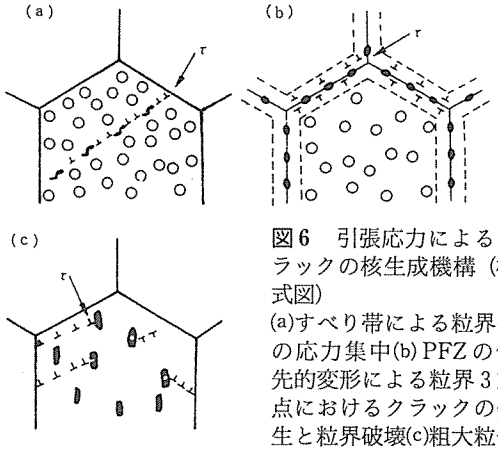


図6　引張応力によるクラックの核生成機構（模式図）
(a)すべり帯による粒界への応力集中(b) PFZの優先的変形による粒界3重点におけるクラックの発生と粒界破壊(c)粗大粒子の破壊によるボイドの形成

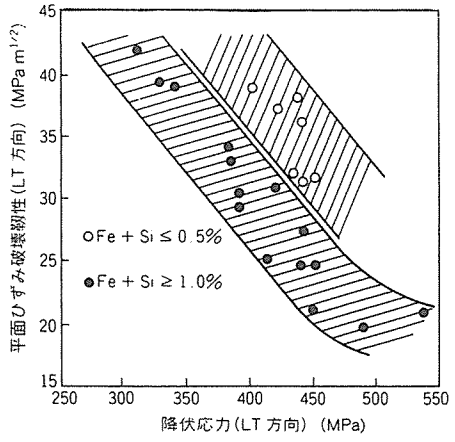


図7　Fe+Si含有量を異にしたAl-Cu-Mg系合金薄板の平面ひずみ破壊靱性（Speidelによる）

7. 最近の金属学の研究・開発の手法

最近の金属学の研究と実験手法は上述のような転位論の発展と精緻なミクロ的実験方法の開発によって，古い時代（表2参照）とは様相が一変している．ミクロ組織・構造とマクロ的特性との繋がりが解明できるようになり，希望するマクロ的特性，例えば強靱化のためには，どのようなミクロ的組織を実現すればよいか予測が可能になっている．それは表4に示すような多数の指導原理が確立されているためで，新しい合金の開発においても，試行錯誤一辺倒ではなく，少数の試料で，系統的且効率的に指導原理を活用すれば望みの成果が得られる．また組織制御のためには，表4に示したような多数の新規のプロセシング技術が開発されている．さらにミクロ組織・構造を解析するための実験機器も精緻で，コンピューターによるデーター処理機能が付加されているので，迅速に正確なデーターが便利に得られる．表4には，(イ)研究方法，(ロ)指導原理，(ハ)プロセシング技術，(ニ)実験方法の要約を示した．金属学の研究をする者には，この程度のことはよく理解し活用できることが求められる．

8. 時効性 Al 合金の二段時効処理の問題

1965年（昭和40年）前後になって，時効析出過程の研究も各種の新しい機器の利用によって各国で急速に進歩し，従来疑問視されていた種々の現象が基礎的に究明されるようになってきた．一方経済の拡大によりアルミニウム合金の需要も盛になり，時効硬化性Al合金も，Al-Mg-Si系合金は窓枠のサッシ材として広く使用されるようになり，又次節で述べるように，Al-Zn-Mg系合金

表4　最近の主な金属学の研究・開発の手法

(イ) 研究方法：金属材料基礎学の進歩により，多数の指導原理が確立し，かつ精緻な実験方法が開発されて，ミクロ組織・構造とマクロ的特性の繋がり解明されて，希望するマクロ的特性にするためにはどのような組織制御が必要かが予測できるようになっている。

(ロ) 指導原理：例えば，強靭化に対しては転位論的理論により，次のような評価式が出されている。

結晶粒微細化強化法，$\sigma_y=\sigma_o+kd^{-1/2}$ (Hall-Petch 式)

強靭化法　$\tau_y=cf^m\gamma^p$, $\tau_y=\tau_o+0.8\,Gb/\lambda_p$ (Orowan の式)

破壊靭性値　$\sigma_c=\sqrt{4E\gamma/\pi a}$, $K_{Ic}=\sigma_c Y\sqrt{a}$ (Griffis の式)

析出粒子安定性　$\ln C(r)/C=2\gamma\Omega/kTr$ (Thomson-Freundlich の式)

バイエルス・ナバロの式　$\dot{\varepsilon}=NbAv_0\exp\{-(U_0-V\tau_i)/kT\}$

温度補償歪速度式　$Z=\dot{\varepsilon}\exp(Q/RT)$ (Zener-Hollomon の式)

(ハ) プロセッシング技術：材料の組織の高度化のために高度なプロセッシング技術が必要で，以下のような方法が開発されている。

急冷凝固法 (Rapid solidification)，メカニカル・アロイング法 (Mechanical alloying)，粉末冶金法 (Powder metallurgy)，熱間（冷間）静水圧プレス法 (Hot (Cold) isostatic pressing, HIP; CIP)，表面改質技術 (Surface treatment techniques)，レーザ加工技術 (Laser techniques) 等。

(ニ) 実験方法：ミクロ組織・構造を解明する精緻で便利な方法が開発されている。

高分解能透過型電子顕微鏡（制限視野電子線回折）(HRTEM, SAD)，エネルギー分散型分析電子顕微鏡 (EDX-ATEM)，走査型電子顕微鏡 (SEM-EBSP)，X線マイクロアナライザ (EPMA)，X線デフラクトメータ (Diffractometer)，X線および中性子線小角散乱法 (XSAS, NSAS)，フラクトグラフィ画像処理法 (Fractography)，オージェ電子分光法 (AES)，二次イオン質量分析法 (SIMS)，X線光電子分光法 (XPS)，断層アトム・プローブ電界イオン顕微鏡 (TAP)，走査型トンネル（原子間力）顕微鏡 (STM, SAM)，メスバウア分光法，陽電子消滅法，放射光の利用等。

は各種の構造物の部材としての用途が拡大し，実用的にも種々の問題が出てきた．これらの合金は最高強度を得るために高温時効が行われる．焼入後，早い時期に高温時効が行われず，長期間室温に放置後に高温時効が行われると，それらの強度に差が出て，しかも両合金系では正反対の結果が出る．時効が二段階に行われることになるので，“二段時効”，“two-step ageng” 又は “split ageing” と呼ばれ興味ある題目として，各国で研究された．筆者の手許にパネルディスカッションの予稿集（軽金属，17巻(1967年，昭和42年)，5号，383～399頁に掲載)がある．筆者が，“時効性アルミニウム合金とその二段時効” と題して，筆者の研究室の研究成果と各国の研究の総説を行い，高村仁一，幸田成康，平野賢一各教授（何れも故人）その他の方々が討論に参加され，東京大学の三島良績教授（故人）が司会をつとめられた．当時の白熱した議論の印象が強く残っている．

Al-Zn-Mg 合金の場合，溶接構造用合金として実用のスイス・アルミの Unidur 合金 (Al-4.8%Zn-1.4%Mg-0.3%Mn-0.15%Cr)は，図8に示すように，焼入後直ちに高温時効を行なうよりも，室温で例えば7日間放置した後，時効を行う方がより高い硬度が得られる．一方，例えば，6061合金 (Al-1.0%Mg-0.6%Si) を 170°Cで5時間時効の場合，室温2日放置後に時効した時，$\sigma_{0.2}=23.9\,kg/mm^2$ に対して，焼入直後に時効すれば $\sigma_{0.2}=29.2\,kg/mm^2$ と予備時効は図9に示すように Mg_2Si 量が多い合金には負の効果がある．析出強化の理論は既に明らかになっていた．また両系の析出過程も解明されて，Al-Zn-Mg 系では，GP ゾーン-中間相 γ'-$MgZn_2$→平衡相 γ-$MgZn_2$，Al-Mg-Si 系では，クラスター→針状 GP ゾーン→棒状中間相 β'-Mg_2Si-板状平衡相 β-Mg_2Si と明かになっていた．二段時効の過程は，透過電子顕微鏡が駆使されて，析出相の種類，大きさやサイズ分布が時効硬化と関連して研究されて，析出強化とミクロ組織との関係が明らかにされた．図10(a)は Al-5.9%Zn-2.9%Mg 合金を−95°Cのアセトン中に焼入後 180°C×3時間時効した場合に粒界の両側にそれぞれ 0.4 μm 程度の幅の PFZ ができることを示すが，これをさらに 20°C×192時間の高温時効を付加すると，PFZ の中により微細な中間相の 0.2 μm 程度の領域が粒界の両側に形成される（同図(b))．これは GP ゾーンが中間相の核生成場所となることを示している．図11は Al-1.2%Mg_2Si 合金の室温3日の放置による析出相の粗大化が示され，強度の低下の理由を明瞭に示している．

二段時効を考える場合に，溶体化温度 T_S，予備時効温度 T_{A1}，第二段時効温度 T_{A2}，溶体化温度より直接焼入した場合に，均一，不均一核生成の生じる境界温度 T_C に関して，次の2つの場合に分けて議論できる．

イ）$T_{A1}<T_C<T_{A2}$ の場合：Al-Zn-Mg 系に相当する．

予備時効 T_{A1} で GP ゾーンが形成されるが，十分に時間が長いと粒子は成長する．T_{A2} に持ち来たされると，不均一核生成の温度であるが，T_{A1}で十分成長し，d_C^{TA2}（T_{A2} で安定に存在できる臨界半径）よりも大きい粒子

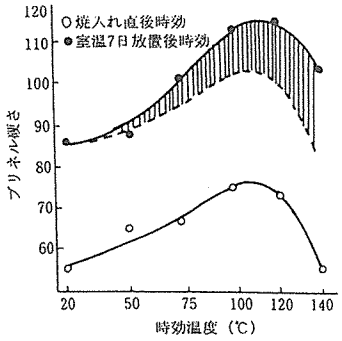
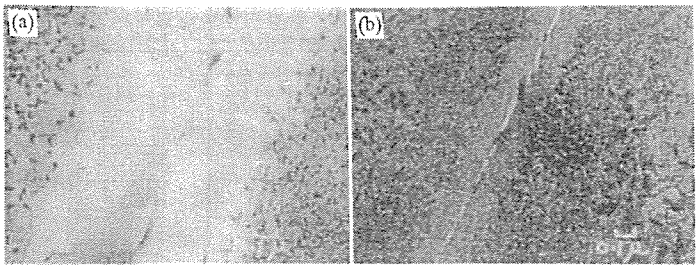


図8　Unidur 合金における室温予備時効の効果



(a) −95°C のアセトンに焼入れただちに 180°C，3時間時効　(b) (a)と同様の処理をした後さらに 20°C，192時間放置後 180°C 2時間時効

図10　Al-5.9%Zn-2.9%Mg 合金の予備時効により粒内析出相の微細化と PFZ における変化（Embury らによる）

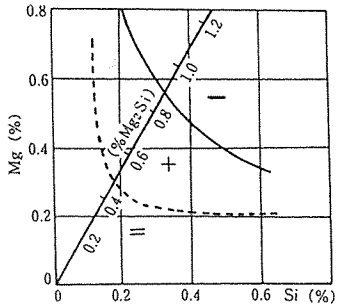
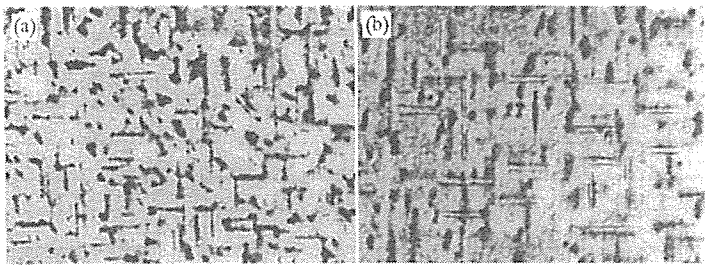


図9　Al-Mg-Si 系合金の組成と予備時効の効果（160°C，16時間時効）



(a) T_S=560°C, T_{A_1} なし, T_{A_2}=160°C，24時間，析出相の平均長さ 220 Å　(b) T_S=560°C, T_{A_1}=20°C，3日 T_{A_2}=160°C，24時間，平均長さ 480 Å

図11　Al-1.2%Mg_2Si 合金の室温3日の放置による析出相の粗大化（Pashley らによる）

は中間相の核となって成長し，強化に寄与できる．

ロ）$T_{A1}<T_{A2}<T_C$ の場合：Al-Mg-Si 系に相当する．

予備時効 T_{A1} で，クラスターが形成される．T_{A1} の時間が長いとクラスターの数は増大し，過飽和度は低下する．第二段の T_{A2} に持ち来たされると過飽和度が更に下るので，d_C^{TA2} は大きくなり，T_{A1} で形成されたクラスターも一部は再固溶する．結果として，数の少ないクラスターから成長する棒状中間相 β' は粗大化し，強度は低下する．

この問題は一応の解決をみて学界の話題から遠ざかっていたが，最近になって自動車の軽量化が燃費向上や米国での CAFE（corporate average fuel economy）の排ガス規制によって，注目され，ボディ用 Al 合金として6000系合金の利用が考えられるようになって，再び注目されるようになった．ボディ用合金として室温で時効硬化が起らず軟質状態でプレス加工ができ，塗装焼付時の170°C×20〜30分の加熱で時効硬化が起こる，ベークハードニング（bake hardening，BH）型合金が要求されてきた．正に往年の Al-Mg-Si 系合金の二段時効現象の復活である．研究者の世代が変っていたので，種々の処理方法が提案されたが，昔に研究されたものと特に変った点はない．焼入後の復元処理や，予備時効温度を室温より若干高くすることによる方法などで解決されている．図12に「復元熱処理プロセス」を示す．

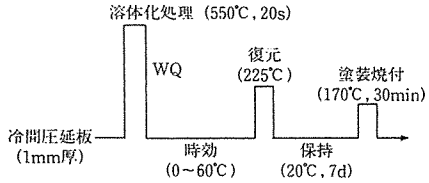


図12　低温塗装焼付処理により高耐力の得られる復元熱処理プロセス

9.　HD 合金が復活した溶接構造用三元合金

古い時代に試行錯誤的方法で開発された時効性合金が金属学と研究手法が発達した時代に再び研究され，優れた特性の合金が開発され，実用化されている経緯を述べたい．我国で先の大戦中に Cu 資源の節約のために，ESD から Cu を除去して押出性の優れた高力“HD 合金”を開発したことは第3節で述べた．この合金は戦後我国では顧りみられることはなかったが，1960年(昭和35年)前

後に，ヨーロッパで溶接構造用三元合金として研究されていた．筆者が1961年（昭和36年）当時の西ドイツのマックス・プランク金属研究所に滞在していた際に，オーストリヤ国レオーベン市で開催された第4回軽金属国際会議(4. Internationale Leichtmetalltagung, Leoben 1961）に出席した．その節，ドイツ・アルミニウムのP. Brennerが，同社が1958年頃から製品化している溶接構造用三元Al-Zn-Mg合金，Konstruktal 21/51（Al-Zn 3.5～4.8，Mg 0.5～1.2，Mn 0.1～1.0，Cr 0.1～0.3）の優れた溶接性と応用例を発表した．屋外に特設されたテント張りの展示場にはこの合金の種々の溶接構造物が陳列されていた状況が今でも想い出すことができる．この合金の最大のメリットは溶接部の強度が，溶接後室温で徐々に回復し，約3ヶ月後には，その強度が母材と同程度に回復すること（図13）で，この図を見て感動した記憶がある．

表5に各国で開発されたこの系の合金組成と機械的性質を示す．母材と溶接後の継手の強度と伸びを示してある．合金組成は3.5～4.5%Zn，1.2～2.8%Mgとかなり広い範囲に変動している．微量添加元素として，Mn，Cr，Zr，Tiそれに Cu，Ag，不純物元素として，Si及びFeが規定されている．これらの合金が開発された手法は，所謂，試行錯誤式一辺倒でなく，多くの指導原理に従い，

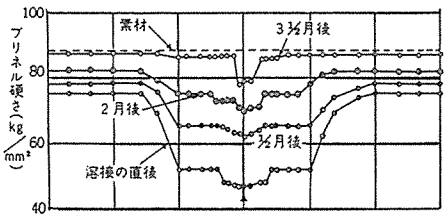


図13　Konstructal 21/51合金の溶接後の室温放置による硬度の回復

表6　突合せ溶接継手の機械的強度におよぼす常温時効時間の影響（Kentによる）

溶接後の時間	0.2%耐力 kg/mm²	最大引張強さ kg/mm²	伸び %	破断位置
溶接直後	11.4	22.8	19	熱影響部で，溶接の中心線より25 mmの部分
溶接後1週間	17.0	30.9	12	〃
溶接後1カ月	19.6	32.7	14	〃
溶接後3カ月	20.4	32.2	11	溶接継手部分の端

母材：Al-4.6%Zn-1.2%Mg合金の6 mm厚押出し材
溶加材：Al-5%Mg合金

表5　諸外国における溶接構造用三元合金の標準組成と機械的性質（Kentによる）

国別	標準組成（重量%） Zn	Mg	Mn	Cr	Zr	時効処理 溶接前	溶接後	機械的性質 (kg/mm², %) 母材 耐力(0.2)	引張強さ	伸び	溶接継手 耐力(0.2)	引張強さ	伸び	備考
独，仏，スエーデン，スイス，米	4.5（最大4.8まで）	1.2（最大1.4まで）	0.2	0.1	0.15	常温	常温	21.5	34.0	20	18.5	31.0	10	
						常温	—	29.0	37.0	15	—	—	—	
仏	3.0	1.2	0.25	0.1		常温	常温	18.5	28.0	20	17.0	31.0	12	母材は主として常温時効材として販売される
						高温	—	28.0	35.5	15	—	—	—	
仏	3.5	2.2	0.3	0.2	0.15	常温	常温	21.5	34.0	17	18.5	31.0	10	
						高温	—	29.5	37.0	15	—	—	—	
カナダ	4.3	1.8	0.7	—	0.15	常温	常温	24.5	34.0	15	20.0	31.0	8	母材は，常温，高温時効材として販売される
						高温	常温	34.0	38.5	12	20.0	31.0	8	
英	4.5	2.5	0.2	0.1	0.15	常温	常温	26.0	35.5	15	21.5	31.0	5	
						高温	常温	38.5	45.0	12	21.5	31.0	5	
						高温	高温	38.5	45.0	12	32.5	37.0	5	
米	4.0	2.8	0.3	0.2	—	常温	常温	26.0	35.5	15	21.5	31.0	5	
						高温	常温	38.5	45.0	12	21.5	31.0	5	
JIS 7N01	3.8～5.0	1.0～2.2	0.20～0.90	<0.30	<0.30	0		<15	<25	>12				JIS規格
						T4		>20	>32	>11				
						T5		>25	>33	>10				
						T6		>28	>34	>10				

（注）　常温時効は1カ月後の値，母材は押出材，溶接はAl-5%Mg溶加材を用い，ミグ法によった。

新しい試験機器を駆使して行われたものである．本系合金は溶接構造物の強力化と軽量化を経済的に達成することを目的とし，強度，靱性，押出し，圧延などの塑性加工性，溶接性，耐SCC性などの諸特性をバランスさせたものでなければならない．そのためには，合金組成と微量添加元素，製造工程，熱処理，特に時効析出処理の検討が，ミクロ組織とマクロ組織の繋りから行われた．

ZnとMgの合金量は，Zn：Mgの量比が2：1と4：1の間にあれば，(Zn+Mg)量が増加する程，機械的性質は向上することが判った．一方強度が大になればそれだけ耐SCC性が低下する．従って，実用合金では(Zn+Mg)量の上限を6%に抑え，特に強度を必要とする場合でも7%を限度にする．この程度の(Zn+Mg)を含有した合金は，高温時効を行なえば，0.2%耐力は35 kg/mm²，引張強さ45 kg/mm²，伸び10%程度にでき，耐SCCにも問題のない合金が得られる．溶接後の強度については，表6に示すように，Al-4.6%Zn-1.2%Mg合金の6 mm厚の押出材をAl-5%Mg合金を溶加材を用いて溶接した場合，溶接直後は11～15 kg/mm²の耐力を示し，熱影響部で破断するが，1週間放置しておくと，合金量の低い場合で，17 kg/mm²，高い場合には21.5 kg/mm²程度にも硬化し，熱影響部の強度の回復が大きくなり，破断が継手部分の端で起こるようになる．溶接部の近傍で溶解しない部分は温度が最も高くなり，距離が中心より離れるにつれて温度は低下する．通常の組成の合金では，温度が350°Cを越えると，高温時効で形成された析出相は再固溶する．約200°Cを越すと，小さい析出相は加熱時間が長いと溶解するか，または粗大化して過時効軟化が起こる．低温時効されてGPゾーンが存在している時には，もっと低い温度で復元が起こる．通常の溶接では熱影響部の加熱冷却の時間はかなり急速で，120°Cを越える部分は30秒以下である．従って，常温時効された母材を使用した場合には復元が生じ，高温時効母材では過時効が起る．溶接継手部分は室温で放置しておくと一ヶ年以上も時効硬化を続ける．母材に水量含有量が通常よりも高い場合に，継手部と母材の境界に，或時間放置後，著しい靱性の低下が起こることがある．熱影響部脆性（heat-affected-zone embrittlement）と呼ばれている．結晶粒が微細な場合は，この現象は起り難い．この合金系の耐SCC性は(Zn+Mg)量の規制と，Cr, Mn, Zrなどの添加と熱処理の適正化で十分な対応ができている．図14にそれらと強度の関係を示す．またSCC現象の機構については，10-4項で述べる．

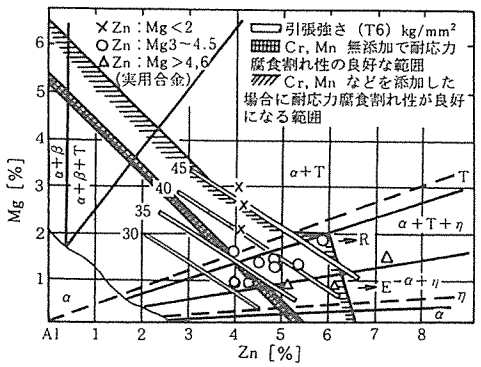


図14　高強度Al-Zn-Mg合金の耐SCC性（R-矢印：圧延材，E-矢印：押出し材）

10.　工業用Al合金における析出粒子の役割

工業用時効析出Al合金には，一般に3種類の大きさの析出粒子が形成され，種々の性質に影響を及ぼし，工業用合金で活用されてその性能向上に役立っている．

(1) Fe及びSiを含む0.5～10 μmサイズの比較的粗大な化合物が，鋳塊凝固中，或はその後の均一化焼鈍，高温加工中に生じる．本質的に不溶性のAl_6(Mn, Fe)，Al_3Fe，α-Al(Fe, Mn)Si，Al_7Cu_2Feなどと，比較的固溶し易いAl_2Cu, Mg_2Si, Al_2CuMgなどで，これらの化合物は中間加工品中で線状に分散する．(2)再結晶抑制元素として添加されるCr, Mn, Zr, Sc, その他の高融点の遷移元素を含む，少し小さい0.05～0.5 μmサイズの，例えば，$Al_{20}Cu_2Mn_3$，$Al_{12}Mg_2Cr$，Al_3Zr，Al_3Scなどのサブ・ミクロン析出或は分散粒子．(3)時効析出処理中に過飽和固溶体から析出し，時効硬化に寄与する0.01 μmまでのサイズの微細粒子．

10.1　バイモーダル粒子組織と微細結晶粒材料

上述の(1)と(2)の2種類の析出物を含有する，所謂bimodal precipitate structureを図15に示す．塑性変形によってサブグレンの網目組織が形成されるが，粗大粒子は変形しないので，その周囲にはサイズの微細な“deformation zone（変形ゾーン）”が形成される．焼鈍すると，図16にNi中のSiO_2粒子の典型的な例を示すように，変形ゾーンは優先的に再結晶が生じるが，そ

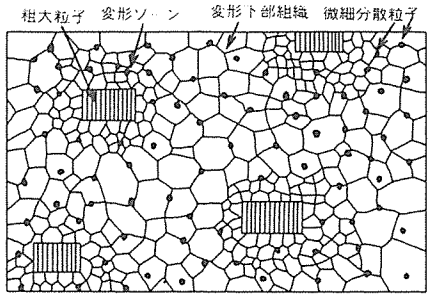


図15　バイモーダル粒子組織を有する合金の冷間加工組織の模式図（Nesによる）

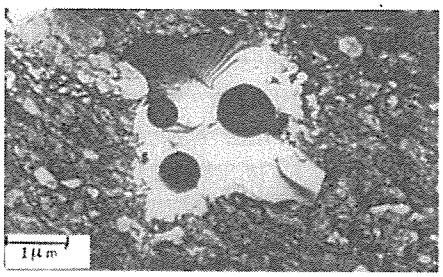


図16　Ni中のSiO_2粒子における再結晶の核生成（Humphreysによる）

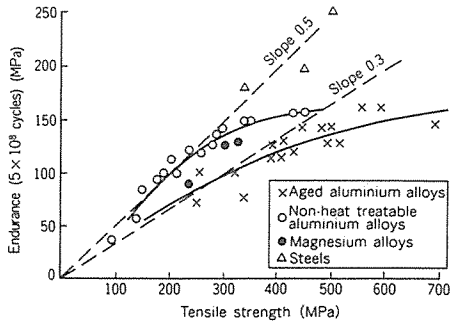


図17　種々の合金の疲労比の比較（Varleyによる）

の他の領域は，微細粒子のZener drag効果で再結晶は起こらない．Humphreysらはin situ HVEMで観察してこの現象を詳細に議論している．Warlimontらは，工業用Al-1%Mn合金を620°C×15～20 h予備加熱して，α-Al (Fe, Mn) Siを，粒子サイズ0.3～0.6 μm，粒子間隔2～10 μmで析出させた．60%冷間加工後，再結晶の通常の限界範囲内の300°C焼鈍では，drag効果が働いて不均一で粗大結晶粒組織を生じるが，500°Cのような高温に急速に加熱してZener dragの役割を果す析出を阻止すれば，変形ゾーンが活性化して極めて微細な数 μmの結晶粒組織が得られる．その結果Hall-Petch式で示すような強靱化ができる．

10.2　析出組織と疲労強度

時効性Al合金では，疲労比すなわち引張（降伏）強度に対する疲労強度の比が極めて小さい．疲労クラックは表面で開始する．機械的切欠，腐食ピット，粗大なすべり帯のように，表面の応力集中の起こる場所に繰返し応力が作用して，extrusionとintrusionが起こり，クラックが発生する．PFZも大きい因子である．図17に種々の合金の疲労限と引張強さとの関係を示す．鋼では疲労比は0.5程度であるが，時効硬化性Al合金では最も小さく，時効硬化の度合が高くなる程，疲労比は小さくなる．析出粒子が転位の往復運動によって，繰返し剪断を受けて小さくなり，Thomson-Freundlich式が示す臨界サイズ以下になって再固溶して消失するため軟化が起こり，応力集中が生じて疲労破壊すると説明されている．従って，耐疲労性を向上させるには，変形が均一に起こり，粗大すべり帯の形成を阻止できるように，転位に剪断されない強力な微細分散粒子の存在が有効である．引張強さと疲労強さを共に増大させるには，bimodal precipitate structureにして，微細析出粒子で引張強さを上昇させ，少し大きく転位に剪断されず，且クラックの開始をも起さない粒子を均一分散させて粗大すべり帯の形成を抑制して疲労強さを低下させないような方法が考えられる．

10.3　微細結晶粒超塑性合金と析出組織

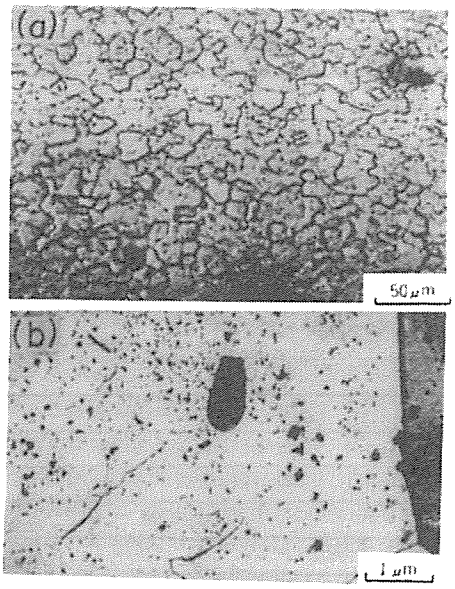


図18　Al-5.8 Mg-0.37 Zr-0.07 Cr-0.16 Mn合金の(a) 490°Cにて$\dot{\varepsilon}=5\times10^{-2}\,\mathrm{min}^{-1}$で200%超塑性変形した場合の光学顕微鏡写真，(b)同上の透過電子顕微鏡写真（松木，及び筆者らによる）

析出組織の制御によって微細結晶粒超塑性Al合金が開発されている．熱的安定性の高い微細結晶粒組織を得るために，再結晶抑制元素として有効な，Cr, Mn, Zrが利用されるが，特にZrは準安定なα'-Al_3Zrとして微細析出し，均一分散するので再結晶粒成長の抑制効果が大きい．図18は超塑性Al合金が注目され始めた初期（1976年）に，松木らと筆者が発表したものである．Al-6%Mg合金に，0.37 Zr-0.07 Cr-0.16 Mnを含有させた合金を，490°Cで$\dot{\varepsilon}=5\times10^{-2}\,\mathrm{min}^{-1}$の速度で200%超塑性変形を行った場合の光学顕微鏡写真(a)で，結晶粒成長は殆んど起っていない．(b)はこの理由を示すTEM写真で，多量に均一分散した微細粒子と，ピン止めされた転位線も示されている．此頃，筆者が今も親しくしている英国のM.J. Stowell教授（現ケンブリッジ大学）らは，

Al-6 Cu-0.4 Zr (Supral 100), Al-6 Cu-0.4 Zr-0.2 Mg-0.1 Ge(Supral 200), Al-Zn-Mg-Zr 系合金を開発し，製品化に成功している．これらの合金は，変形前はポリゴン化した未再結晶粒組織であるが，50～100%の高温変形によって再結晶して微細粒組織になる．α'-Al_3Zr 微細粒子の均一分散によって安定化されたサブグレン組織が変形中に動的再結晶を起すためと説明している．超塑性変形前に静的再結晶で得られた微細粒組織を利用するよりも，超塑性変形中の動的再結晶による方が，組織の安定性も良くて粒成長の度合も小さく，キャビティも形成し難いという報告がある．

高強度 7475 (Al-5.7 Zn-2.3 Mg-1.6 Cu-0.22 Cr) と 7075 合金の微細結晶粒超塑性合金が開発されている．最初，Wert らは，上述の粗大 η-$MgZn_2$ 粒子周辺の変形ゾーンが再結晶核作用をすることに注目し，過時効処理を含む加工熱処理を実施し，約 10 μm の平均粒径の再結晶粒組織を工業的に量産化した．我国でも，7475 合金に対して同様な手法で超塑性合金が開発されている．

10.4 析出組織と応力腐食割れ (stress corrosion cracking. SCC)

筆者の卒業論文のテーマは高力 Al-Zn-Mg 合金の SCC であった．当時から SCC は高力 Al 合金の最大とも言うべき課題であった．双結晶試料を調製し，ブリネル硬度計の圧痕で応力を与えて，3%NaCl 中で浸漬して，破れの時間と組織の様相を調べるのに種々苦労した思いが強く残っている．其後も研究室で，黄銅の SCC を含めて多くの研究を行った．SCC は黄銅で古くから知られているが，Al 合金では図 19 に示すように，必ず結晶粒界から起ることが特徴である．既にレプリカ法電顕の筆者の研究でも述べた．特定の腐食環境と引張応力が同時に作用した場合に著しい脆性破壊を起こす現象で，それらが別々に作用した場合には決して起らない．

Al-Zn-Mg-(Cu)系の 7000 系合金は，Al 合金中で最高強度を示すが，SCC 感受性が高いので，その防止のために，昔の ESD の開発を初め多数の研究が行われた．特に SCC は粒界のみに起こるので，粒界自体及び粒界に関係した組織・構造因子が取り上げられ，粒界構造，粒界析出粒子のサイズと分散，粒界近傍に生じる析出粒子のない PFZ の幅，粒内析出物の違いによるすべり帯の分布状態などの組織因子と合金組成，添加元素などの影響が研究された．表 7 に示すような金属組織学的因子が，筆者が京都大学を退職する昭和 56 年(1981 年)頃までに明かになっている．(村上陽太郎："アルミニウム合金の応力腐食割れ"，軽金属，31 巻(1981)，11 号，748～757 頁に詳しいレビューをした．) 実際的には，T7 過時効処理を施すことによって防止できるが，強度は 10～15%程低下する．一方 SCC の機構についても多数の研究が行われ，7000 系合金の SCC 機構として初期は粒界における陽極溶解説が主流であった．通常の高温時効によって

表7　Al-Zn-Mg3 元合金の耐応力腐食割れ性向上のための金属組織学的因子

(1) 合金組成と添加元素の選択
　(i) (Zn+Mg) 量が 5% 以下では問題は起こらない．
　(ii) Zr, Cr, Mn, Mo, V などの 0.1～0.2% 以上の添加が有効である．
(2) 粒内析出相の種類の影響
　(i) G.P. ゾーンは SCC 性を敏感にする(粗大すべり帯→粒界への応力集中)，中性相しかもその粗大化が有利．
　(ii) 熱処理として高温時効，T7 処理を行なうのがよい．
(3) PFZ の幅の影響
　(i) PFZ の幅の広い方がよい
　(PFZ における粒界への応力集中の緩和
　PFZ における陽極溶出の低下)
　(ii) 焼入速度を遅くする．徐冷焼入，interrupted quenching など時効温度を高く，時間を長くする．T7 処理．
(4) 結晶組織の影響
　(i) 押出組織などのせんい組織の保持が有効．
　(ii) 溶体化処理および押出温度の適正化，再結晶防止元素の添加．
(5) 粒界析出物の影響
　(i) 粒界析出物の粗大化が有効．
　(ii) (3)項と同じ処理．

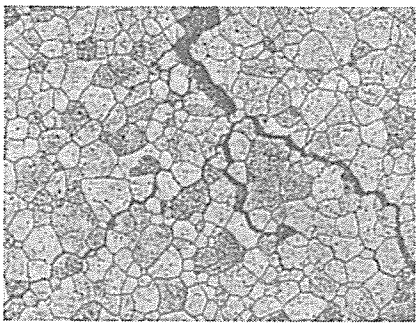


図19　Al-Zn-Mg 合金の SCC，結晶粒界割れを示す．(×100)

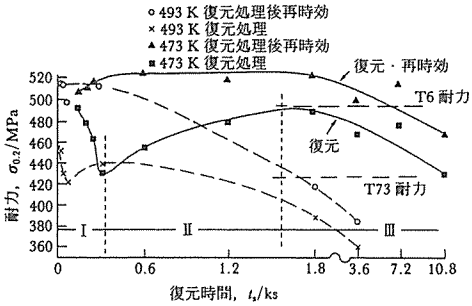


図20　7000 系合金の耐 SCC 性向上のための RRA 法．(Wallace らによる)

粒界にPFZが生じる．PFZは強化に寄与する析出粒子が無くて弱いので，応力集中が起こり，メカノケミカルな優先的陽極溶解が起こり，クラックの核が形成され，その成長・伝播で割れに至るというものである．従って，PFZの幅，粒界及び粒内析出粒子の種類と分布などの因子が考えられていた．昭和38年(1963年)頃，ドイツ・アルミニウムの研究所長のW. Gruhl博士が鋼材に起こると同様な水素脆性（hydrogen embrittlement, HE）説を提唱し始め，筆者にも論文を次々と送ってきた．其後この説が支持を拡め，現在では，陽極溶解説に替ってHE説が一般に受け入れられるようになっている．合金の表面酸化膜中の粗大粒子の近傍でH_2Oの侵入を許す．Cl^-があれば侵入は更に容易になる．酸化膜が破れ，ミクロクラックが形成されると，H_2Oによって粒界領域に溶解が起こり，クラック先端のpHは～3.5程度であるので，$H^+ + e^- \rightarrow H$が生成して粒界に吸着する．合金中のMg原子はHを粒界に引留める役目をし，三軸応力場ではHはクラック先端に濃縮してクラックを進展させ破壊に到ると説明されている．

此頃，7000系の耐SCC性を害することなくT6並みの強度が得られる“復元-再時効（retrogression and reageing, RRA）法”が提案され，Alcoa社では，7150合金（Al-6.4 Zn-2.4 Mg-2.2 Cu-0.12 Zr）をRRA処理する特許826プロセスを開発している．図20にこの方法を図示した．合金をT6処理後，短時間復元（200～260°C加熱）後焼入，T6と同程度の温度で再時効を行う．復元処理で粒内のη'-$MgZn_2$粒子は一部又は全部が固溶するが，粒界析出粒子は粗大化し，粒子数は減少して粒界を被う面積が減少するので耐SCC性と破壊靱性はT7程度に向上する．一方再時効で，粒内にη'-$MgZn_2$粒子が残存粒子を析出核として再析出し，図に示すように復元時間によって強度はT6又はそれ以上に回復する．この方法は耐SCC性向上のみならず，耐EXCO(剝離試験）性の向上にも有効であることが示されている．

11. 我国における先進高比強度 Al-Li 合金の研究開発

Alに比重0.534のLiを添加すると，低密度で高強度の合金ができることが，ジュラルミンの発明に刺戟されて多少検討され，当時でも判っていたようであるがうまく成功しなかった．随分後になって再び研究され，1950年（昭和25年）から1960年（昭和35年）代の初頭にわたって，Alcoaで，X2020合金（Al-4.5 Cu-1.1 Li-0.5 Mn-0.2 Cd）が開発された．米海軍機の主翼上下面のスキン材等に7075合金に代って採用され，当該部材の6%の軽量化を果した．しかし靱性が低く，特に切欠に敏感なためと，損傷許容設計基準の考え方が出てきて，それに合格しないことから，1966年(昭和41年)以後は採用されなくなり1969年（昭和44年）には生産も中止された．最近になって前述のように金属学の進歩によって，時効性Al合金の破壊靱性向上の指導原理が解明され，再び研究開発に拍車がかかった．Al-Li2元系では準安定相δ'（Al_3Li）と平衡相δ（AlLi）が生じる．溶体化温度から焼入中に，微細なδ'相が多量に析出して強化が起こる．しかしδ'相は転位によって剪断され易く，粒界に応力集中を起こす．又時効の進行によって粒界にPFZを生じ，粒界脆化も起る．これらに対して，強靱化の方策としてZr添加が研究された．Zr添加によって図21に示すように，高温でα'（Al_3Zr）が析出し，低温の時効で，この周囲にδ'相がセルを形成し，複合析出粒子ができる．この粒子は転位で剪断されない．さらにZrは非再結晶組織を形成し，加工熱処理で再結晶微細化に導き，強靱化に寄与する．Zrの外にCu，Mgが添加され，表8

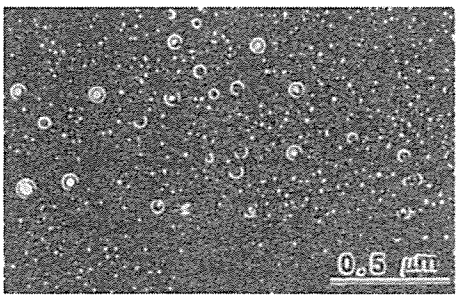


図21　Al-2%Li-0.1%Zr合金の複合析出粒子，中心部：Al_3Zr，外側セル部：Al_3Li，セルは転位に剪断されるが，中心は剪断されない．

表8　AA規格に登録されているAl-Li系合金の組成（重量%）

合　金	化学成分 (%)					
	Li	Cu	Mg	Zr	Fe	Si
8090 (Lital A)	2.2－2.7	1.0－1.6	0.6－1.3	0.04－0.16	0.30	0.20
8091 (Lital B)	2.4－2.8	1.6－2.2	0.5－1.2	0.08－0.16	0.50	0.30
2090 (Alithalite B)	1.9－2.6	2.4－3.0	0.25	0.08－0.15	0.12	0.10
2091 (CP274)	1.7－2.3	1.8－2.5	1.1－1.9	0.04－0.16	0.30	0.20

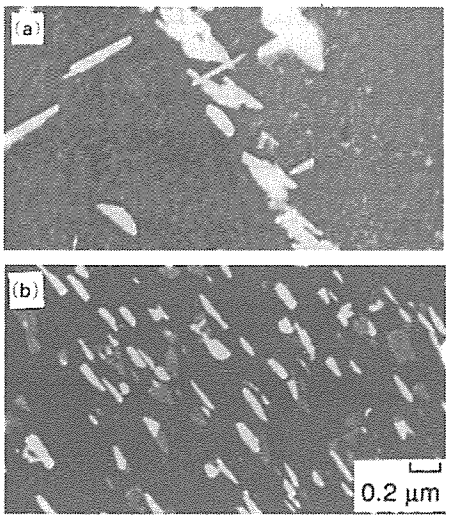


図22 Al-Li-Cu合金の析出組織におけるT_1相の分散の差異．(a)ストレッチングなし，(b) 10%ストレッチング．(Lee and Frazierによる)

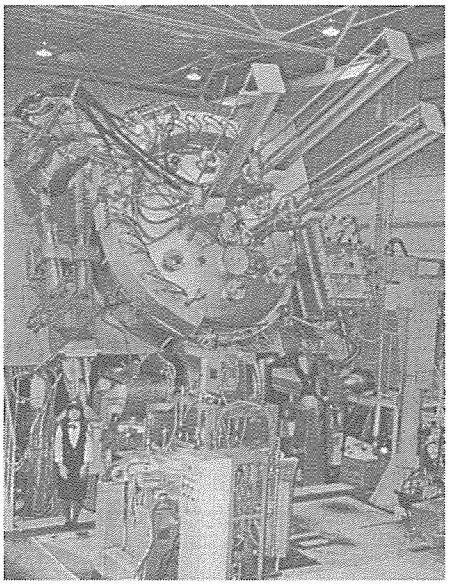


図23 (株) アリシウム四日市研究所で開発された，Al-Li系高強度合金製造のための4トン規模のアルゴンガス-真空溶解装置

に示すようなAAに登録されている合金が開発された．これらの合金は，強化相として，上記の複合析出相の外に，T_1 (Al_2CuLi)，S′ (Al_2CuMg) を含んでいる．またAl-Li-Cu合金は時効前に10%程度のストレッチを加えた加工熱処理によって，図22に示すようにT_1相の分布が微細，均一分散に一変して，強度と靱性が向上する．これらの合金の強度は，8090合金は2024合金と同等がそれ以上，2090及び2091合金T8材は7075合金に同程度で，比強度はこれらより高くなる．これらの合金グループの外に，米国のMartin Marietta社の研究所で，軽量高強度で溶接の容易な，商品名“Weldalite™”が開発され，4種類の合金，2094，2095，2195及びX2096がAA規格に登録されている．標準組成は，Al-Cu-Li-Zr系にAgとMgが0.4%程度添加されている．Cu量は2.7から4.8%まで変えてある．Liは破壊靱性値向上のため1.0～1.6%に制限され，表6の合金グループの2.0～2.4%よりも低く押えてある．人工衛星打上げ用の燃料タンク用材料として利用されている．

Al-Li合金は溶解・鋳造に際して，Liが極めて活性で水と溶湯が反応して水素爆発の問題があったので，DC鋳造に特別な配慮が必要である．第1に溶湯の酸化抑制のために不活性ガス雰囲気にすること，第2に溶湯に浸蝕されない耐火炉材を選定すること，第3にDC鋳造では溶湯との反応性を低くするためエチレングリコールを配合した冷却水を用い，ピットに冷却水を残さないドライピット方式を採用することなど，安全に健全な鋳塊を製造するノウハウを蓄積する必要があった．欧米先進国に遅れを取っていた我国のAl-Li系高比強度合金のR&Dを推進するために，(財) 金属系材料研究開発センター (JRCM) では，設立 (1985年，昭和60年10月) 当初から，アルミニウム系材料の高機能化に関する調査部会 (部会長：筆者) では海外調査等を含めて構想を進めてきた．その結果，会員のアルミニウムの圧延7社が，総経費20億円 (基盤技術促進センター70%，軽圧7社30%出資) で，1996年 (平成8年) 3月迄の7ヶ年を期限として，1989年 (平成元年) 3月24日に (株) アリシウムを設立し，ただちに軽金属押出開発 (株) の敷地内に，四日市研究所の建設を開始した．目標は，4トン規模の実用鋳塊の製造技術と，製造設備を完成させるために，あらゆる関連項目を研究することであった．筆者この研究開発の計画と推進に深くかかわったが，研究は種々の困難を克服して，期限内に図23に示すような4トン規模のアルゴンガス・真空溶解炉とドライピット式連続鋳造設備を完成し，AAに登録されている8090，2090及び2091合金の健全な4トン鋳塊の製造に成功した．これらの鋳塊は幹事会社の圧延設備で，板及びシートに製造され，規格値を上回る性能が確認された．丁度其頃から世界の航空機業界の不況とAl-Li系合金の製品価格が，競合品の価格と比較してかなり高い (3倍以上) 理由等で，世界各国でその利用が停滞し始めた．世界のアルミニウムの製造会社は，この合金の研究開発と製造に膨大な投資を行なったが，現状では，Al-Li系合金はそれに見合う利用がなされていない．しかし，この合金系には，高比強度の特性があるので，近い将来再び復活することを

期待したい.

12. おわりに

金属学が,学問として十分に確立されていなかった1940年(昭和15年)代初期から,金属学が確立されている21世紀初頭の現在までの析出現象の歴史と進展について,私がかかわってきた,その時々の話題をまじえて,主としてアルミニウム合金について述べた.先ず,古い時代のジュラルミンの発明と時効現象の発見から,試行錯誤的な古い合金開発手法とMericaの指導原理によって,我国で世界に先駆けて,ESDとHD合金が開発されことを述べた.その後,転位論の発展と透過電子顕微鏡等を始めとする多数のミクロ組織の解明手法の進歩によって,金属学は大きく発展を遂げ,昔日の面影は全くない程変貌してきた.その間に,学界で大きく話題になったAl合金の二段時効と溶接構造用三元合金について述べた.この問題が両者とも時代の要請で再度取り上げられた経緯を書いた.また析出粒子と関連する,バイモーダル析出組織,疲労強度,微細結晶粒超塑性,応力腐食割れに触れ,最後に,筆者が深く係わった(株)アリシウムにおける我国の軽圧7社のAl-Li系合金の研究開発について述べた.約60年間の金属学の進歩を筆者が係わったAl合金の時効析出の問題から回顧してみて,その変貌と進歩に驚嘆の外はない.次回は,合金状態図と時効析出以外の筆者の行った研究に関連して述べたい.

参考文献

1) 村上陽太郎:金属学とその研究手法の進歩-研究生活を顧みて〔I〕,水曜会誌,23,〔5〕,451-460,(2002)
(本稿の執筆にあたっては,下記の報文から多くを参考にした.参考文献を挙げていないが,下記の報文の末尾の参考文献を見ていただきたい.)

2) 村上陽太郎:時効性合金の基礎的問題とその開発(第19回本多記念講演),日本金属学会会報,13,〔7〕479-495,(1974)

3) 村上陽太郎:アルミニウム合金の時効析出研究の進歩(ESD開発50周年記念特別講演),軽金属,39,〔5〕,364~377,(1989)

4) Y. Murakami: Early and Recent Research on Aluminum in Japan (Keynote Lecture of ICAA-6), Proc. of ICAA-6, Toyohashi, Japan, July 5~10, 1998, 3~14, (1998)

5) 村上陽太郎:最近の時効性合金の基礎的研究と開発,(第35回日本金属学会賞受賞記念講演),日本金属学会会報,29,〔5〕,317~326,(1990)

6) 村上陽太郎:我が国のアルミニウムの研究とその手法-初期と現在,(第1回軽金属学会賞受賞記念講演),軽金属,48,〔8〕407~416,(1998)

7) 村上陽太郎:時効性アルミニウム合金とその二段時効(パネルディスカッション),軽金属,17,〔6〕,383~389,(1967)

8) 村上陽太郎:溶接構造用三元合金の現状と問題点(解説),軽金属,21,〔5〕,366~377,(1971)

9) 村上陽太郎:Al-Mg-Zn系合金〔解説〕,軽金属,21,〔11〕,702~707,(1971)

10) 村上陽太郎:アルミニウム合金の応力腐食割れ,(軽金属基礎講座),軽金属,31,〔11〕,748~757,(1981)

補遺:合金の時効析出に就いて、詳しく勉強したい人の為に、筆者が適切と思う解説書を挙げておく。発行の年代順に挙げたが、4)を最初に読んだほうがよいだろう。

1) H.K.Hardy and T.J.Heal : Report on Precipitation, Progress in Metal Physics, Vol. 5, pp. 143 ~ 278, Pergamon Press (1954).
本書は発行が、1954年(昭和29年)で、当時に日本で読むことが出来た最初の、析出に関する総合的な報告書で、合金の析出の熱力学と運動論を中心にして、X線回折法(TEM法はまだ利用されていなかった。 電顕レプリカ法の記述はある。)を用いて析出相の構造解析を解説したものである。(筆者の論文の引用もある。)

2) A. Kelly and R.B.Nicholson : Precipitation Hardening, Progress in Materials Science(Progress in Metal Physicsの改題)、Vol. 10, pp. 149 ~ 391, Pergamon Press (1963).
TEM観察法が確立されてその利用により、多くの事が解明されて来た頃に書かれた。電気抵抗測定法、TEM観察、X線回折法を中心に弾性的性質、磁気測定を含めて、研究結果を述べている。微量添加元素の効果、加工の影響、析出物の形状の安定性、機械的性質、特に応力-歪曲線、降伏応力、加工硬化、転位と析出物との相互作用等を記述している。

3) 日本金属学会編、合金の時効処理とその解釈、1968年発行。
日本金属学会のセミナーのテキストで、時効析出の基礎過程、溶質原子と格子欠陥の相互作用、合金の析出の速度論的理論、過飽和合金における時効過程と格子欠陥、アルミニウム合金および銅合金の時効過程(筆者)の4テーマに就いて書かれている。

4) 幸田成康監修、合金の析出、丸善書店、1972年発行。
本書は、故幸田成康先生の東北大学を定年退官(1970年3月)の記念事業の一つとして企画出版された書籍で、当時、我国に於いて、時効析出に深く関わっていた14人が幸田先生と共に、各章を分担執筆したものである。発行が30年以上も前であるが、その頃には、時効析出現象の学問が、基礎的にも工業材料学的にも、十分に確立しているので、現在も、この学問の全体を把握するのに格好の書物であろう。

談　話　室

p型4H-SiC半導体に対するTiAl基オーミック・コンタクト材の開発

着　本　　享*

Development of TiAl-Based Ohmic Contacts for p-Type 4H-SiC Semiconductor

by Susumu TSUKIMOTO

はじめに

私は，平成14年6月付けで材料工学専攻マイクロ材料学分野（村上正紀教授）の助手に着任致しました．このたびは水曜会誌に寄稿の機会を設けていただきありがとうございます．本稿において会員の皆様方に着任の御挨拶させていただくとともに，これまでの研究経歴および本着任後の研究内容について簡単に述べさせていただきます．

学生時代（名古屋大学工学研究科量子工学専攻）は透過電子顕微鏡（TEM）を駆使して，原子・分子レベルの“高分解能その場観察法”を用いて高温（～2000℃）における金属やセラミックスなど無機材料の相変態や化学反応，固相-液相界面の動的挙動について研究を行っていました[1-3]．その後，平成12年6月から本着任に至るまでマックスプランク金属研究所（ドイツ・シュツットガルト）においてポスドクとして2年間研究に従事しておりました．ここでの研究内容は，金属/セラミックス界面における化学反応や金属薄膜成長に関するものでした[4,5]．これまでの研究における共通点は，ものづくりのための工学的よりも基礎的な面が大きく，工業的応用を視野に入れた工学的研究にはほど遠かったと言えます．しかし，本着任後は一転し，IT社会の根底を支える「半導体デバイス開発」のための「材料開発」が研究テーマとなりました．工業的な応用を見据えた明確な目標が常に設定されており，これまでとは研究分野等が大きく異なりました．これまで材料プロセスについてほとんど携わった経験がない私にとって，非常に新鮮な雰囲気の中で悪戦苦闘しながらも研究を行っています．

現在，当研究室では半導体デバイスの高速・高性能化および高信頼化に向けた金属薄膜技術の応用に着目し，電極（コンタクト）や配線材料の開発を中心に研究を行っています．具体的な研究内容として，青色レーザーダイオードで注目されているGaNや次世代パワーデバイスへの適用が期待されているSiCなど化合物半導体に対するオーム性電極（オーミック・コンタクト）材の開発や，シリコンULSIデバイス用極微細Cu配線に関した材料開発および材料学的検討があげられます．私はこれまでの研究生活で培われてきた材料評価技術を活かして，迅速な材料評価から常にプロセスへのフィードバックを念頭にこれらの研究開発に携わっています．本稿では現在進行中の「SiC半導体用オーミック・コンタクト材開発」に関する研究について，以下に最近の研究成果を簡単ではありますが紹介させていただきます．

p型4H-SiC用TiAl基コンタクト材開発および形成機構解明

大部分のエネルギー資源を海外からの輸入に頼る我が国にとって，電力エネルギーの有効利用（省エネ）は経済性，環境性の観点からも背負い続けなければならない問題である．省エネ化に向けては半導体デバイス産業も一端を担っており，エレクトロニクスを利用した高効率な電力制御技術（パワーエレクトロニクス）の開発および発展は最重要課題となっている．1998年から5ヶ年計画でNEDO「超低損失電力素子技術開発」の国家プロジェクトが開始されたこともあり，次世代パワーエレクトロニクス・デバイスへの期待は国内外を通じて大きい．近年，従来のシリコンに替わるパワーデバイス用半導体

*京都大学大学院工学研究科　材料工学専攻

としてSiCが注目されている．SiC半導体は超低損失性や高速・高温動作などシリコンに比べ厳しい環境における特性に優れており，大電力・高周波・高温領域でのデバイス動作が可能である．しかし，SiCデバイスの実現には解決しなければならない多種多様な技術的課題があり，その一つに高性能コンタクト材開発があげられる．特にp型SiC半導体に対するコンタクト材開発はコンタクト界面での特性（高いショットキー障壁）から非常に困難とされており，コンタクト材開発，プロセス確立およびコンタクト形成機構解明が急務である．

これまでの研究でp型SiCに対してTiAlコンタクト材が低接触抵抗率（～$2\times10^{-6}\,\Omega$-cm^2）[6]，高熱安定性などの優れた特性を示すことからデバイスへの最有力候補にあげられている．しかし，コンタクト材形成にはコンタクト金属作製後に高温熱処理（1000°C～）が必要であり，高温によるデバイス劣化に伴う信頼性低下が懸念されている．このため，低温化プロセスによるコンタクト材の開発がデバイス適用にとって不可欠である．当研究室では金属（合金）/SiCにおける界面反応によるオーミック・コンタクト形成に着目し，低温反応を利用したコンタクト材開発のプロセス構築を探索してきた．まず，500°CでSiCに反応するNiをTiAl基に添加したNiTiAlコンタクト材は低い熱処理温度（800°C）でオーム性が得られ，TiAlコンタクト材と同様に低抵抗率（$7\times10^{-6}\,\Omega$-cm^2）を実現した[7]．最近では材料学的な観点から固相-液相反応に着目し，Al-Ge共晶系合金（共晶点：420°C）を含むGeTiAlコンタクト材の開発により更なるプロセスの低温化（600°C）に成功した[8]．

さて，なぜTiAl基コンタクト材において形成プロセスの低温化が可能となったのか．これを解く鍵は，接触抵抗率を左右する反応生成物およびコンタクト材/SiC界面近傍における微細構造にある[9]．X線解析（XRD）により，熱処理後のTiAlコンタクト材ではTi_3SiC_2化合物（六方晶）が形成し，NiTiAlコンタクト材においてTiAl系合金とともにAl_4C_3化合物（六方晶）の形成が確認された．次に界面生成物の同定および分布を調べるためにTEMによる界面微細構造解析を行った．TiAlコンタクト材/SiC界面の断面TEM観察の結果を図1に示す．SiC基板上にTi_3SiC_2が板状に形成し，表面や界面にはファセット状の凹凸が観察される（図1(a)）．高分解能TEM像によりTi_3SiC_2/SiC界面は，原子レベルで平坦で清浄な界テラス-レッジ構造をもっており，Ti_3SiC_2がヘテロエピタキシャルに成長している（図1(b)）．一方，NiTiAlコンタクト材におけるTEM観察の結果を図2に示す．TiAlコンタクト材におけるTi_3SiC_2とは異なり，Al_4C_3がSiC基板上に部分的に形成している（図2(a)）．高分解能TEM像（図2(b)）より，Al_4C_3/SiC界面においてもヘテロエピタキシャルで平坦な界面の形成が確認できる．微細構造解析によりTiAl基オーミック・コンタクト材において，SiCに対してヘテロエピタキ

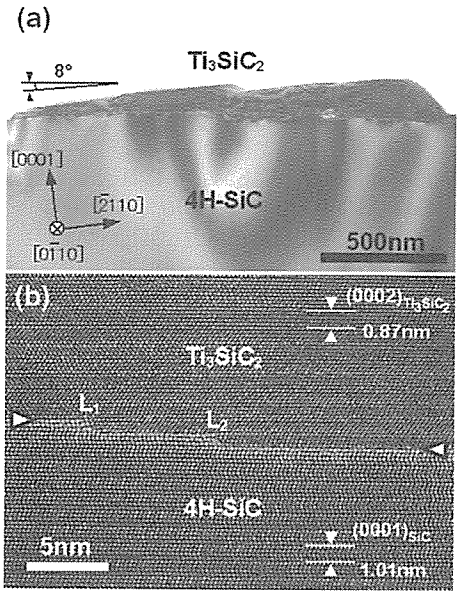


図1　TiAlコンタクト材の界面微細構造：(a)断面TEM像，(b) Ti_3SiC_2/SiC界面の高分解能TEM像．

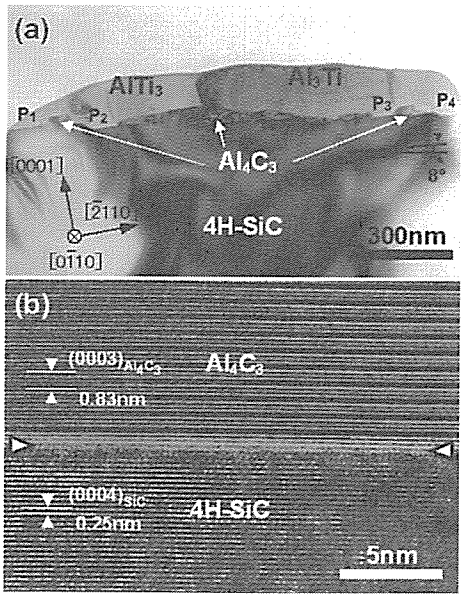


図2　NiTiAlコンタクト材の界面微細構造：(a)断面TEM像，(b) Al_4C_3/SiC界面の高分解能TEM像．

シャル成長したTi_3SiC_2およびAl_4C_3がコンタクト形成に対し明らかに寄与しており，界面におけるこれら炭化物層がp型伝導性の半導体特性を有し，低障壁中間層の役割（ショットキー障壁の低減）[10]を担っていると考えられる．本研究において開発した第三元素添加したTiAl基コンタクト材がデバイスへの工業的応用につながるとともに，コンタクト材開発にとって重要である界面形成機構の解明に向けた基礎的知見が得られた．

参考文献

1) S. Tsukimoto, K. Sasaki, T. Hirayama, and H. Saka, Phil. Mag. Lett., 76, 173 (1997).
2) S. Arai, S. Tsukimoto, H. Miyai, and H. Saka, J. Electron Microscopy, 48, 317 (1999).
3) S. Tsukimoto, S. Arai, and H. Saka, Phil. Mag. Lett., 79, 913 (1999).
4) C. Scheu, M. Gao, K. Van Benthem, S. Tsukimoto, S. Schmidt, G. Richter, and J. Thomas, J. Microscopy, 210, 16 (2003).
5) S. Tsukimoto, F. Phillipp, and T. Wagner, J. Eur. Ceram. Soc., 23, 2947 (2003).
6) O. Nakatsuka, T. Takei, Y. Koide, and M. Murakami, Mater. Trans. 43, 1684 (2002).
7) R. Konishi, R. Yasukochi, O. Nakatsuka, Y. Koide, M. Moriyama, and M. Murakami, Mater. Sci. Eng. B98, 286 (2003).
8) T. Sakai, K. Nitta, S. Tsukimoto, M. Moriyama, and M. Murakami, Appl. Phys. Lett. (submitted).
9) S. Tsukimoto, K. Nitta, T. Sakai, M. Moriyama, and M. Murakami, J. Electron. Mater. (submitted).
10) M. Murakami and Y. Koide, Crit. Rev. Solid State Mater. Sci. 23, 1 (1998).

談　話　室

地質構造モデリング

山　田　泰　広*

Analogue and Digital Modelling of Geologic Structures

by Yasuhiro YAMADA

はじめに

昨年4月に地質工学分野の助手に採用されました山田泰広と申します．伝統ある水曜会のお仲間入りをさせてもらえることになりまして，非常に光栄に存じます．今回は自己紹介を兼ねまして，前職から取り組んでおります研究について，その背景や内容などを簡単にご紹介致します．

1980年代の初頭に，私は高校の地学の授業で人口爆発とそれに関連する食料問題・エネルギー問題の存在を知って衝撃を受けました．これらによって民族紛争が多発することは避けられないと暗たんたる気持ちになったことを今でもはっきりと覚えております．それまで天体に興味を持っていましたが，視線を宇宙から地球に切り替えることにし，この問題に取り組んでいきたいと考えるようになりました．まず「地球」のことをもっと知る必要があると思いましたので，東北大学理学部で地質学を専攻しました．その後，現代文明の根幹をなす社会的分業を成立させるために必須である長距離大量輸送の主役である内燃機関の燃料に注目しました．近年代替エネルギーの開発が進められていますが，私の大学生当時は炭化水素（石油・天然ガス）以外はほとんど実用的ではなかったと記憶しております．その炭化水素鉱床の探鉱開発はどのような方向性や戦略を持って行われているのか，実際の作業現場ではどのような技術が使われているのか知りたくて，卒業後に石油開発会社に就職し，念願の石油・天然ガスの探鉱開発に従事しました．そこで私は探鉱家として新規油ガス田を発見するための地表地質調査・物理探査データの解析や掘削坑井の提案，さらには坑井元での物理検層解析やコア調査などといった現場作業を含め，非常に多くの経験をさせていただきました．このような作業を通じて，私は地下地質構造がどのような姿をし，それがどのようにして形成されてきたのか興味を持つようになりました．そこで会社の研究所に移り，先輩方から教えていただきながら，この問題に関して研究することにしました．私が現在も興味を持って取り組んでおります研究課題は，このようにして始まりました．

皆さんは現在生産中の油田や天然ガス田がどのような場所にあるかご存じですか？　これまで永年にわたって世界中の石油会社が新たな油田・ガス田を探し求め，その開発を進めてきました結果，浅い深度に位置するものや比較的単純な形態のものなどはほとんど枯渇してしまいました．最近の探鉱開発ターゲットは，6000 mにも達する大深度地下，山地やジャングルなどの難地形地域，プレート境界部などでの複雑な地質構造など，難しくなる一方という状況なのです．このような地域・深度では，一般に物理探査を実施しても良質なデータを得ることは困難で，それが探鉱成功率を低下させる原因になっております．

このようなチャレンジングな地域において，探鉱対象となる地質構造の形態を詳細に推定するために開発された手法の一つが地質構造モデリングなのです．現在では，この手法は油・ガス田の規模を決定し，石油・ガスの移動集積とそのトラップとしての地質構造形成のタイミングを検討するため，さらには効率的な坑井掘削デザインを決定する目的にもこの手法は用いられています．

地質構造モデリング

地質構造モデリングでは，モデル実験と数値シミュレーションの二つの手法を使用します．現状では，モデル実験手法のほうがより実績があるために，解析手法として洗練しており，実際に広く応用されています．実験

*京都大学工学研究科社会基盤工学専攻

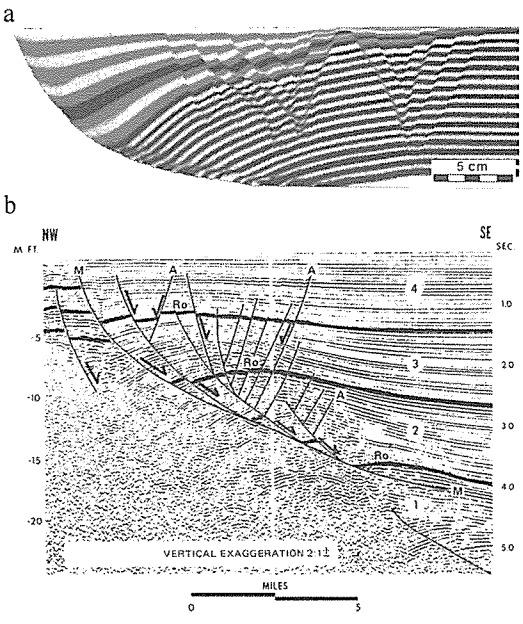


図1 a）砂箱実験例[1]．曲面状の断層上には，その形状に対応して特長的な形態の断層や褶曲などの地質構造が形成される．また，断層運動中に堆積物が供給された場合の堆積パターンは，断層面に向かって広がった楔形形状となることが分かる．b）実際の地質構造例[2]．米国メキシコ湾で実施された地震探査データを，実験結果を基に解釈した結果，断層の形状や形成時期などを詳細に推定することが可能となる．

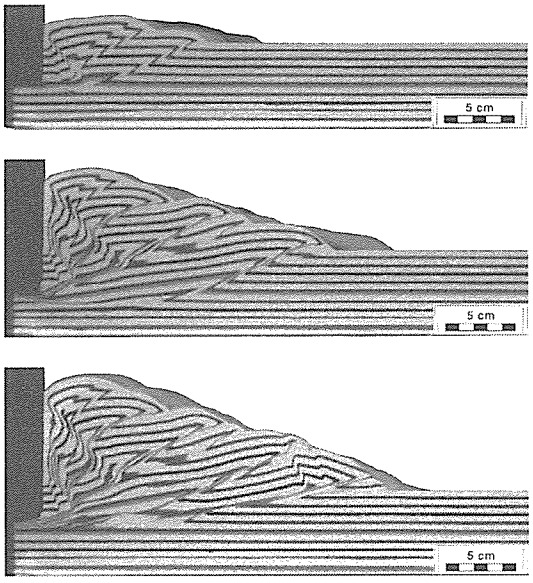


図2 圧縮性の地質構造に対する砂箱実験例[3]．水平に堆積させた砂層を短縮変形させた結果，低角逆断層が一定間隔ごとに形成され，盛り上がった堆積物は全体として三角形の形態となった．このような地質構造は世界各地で観察されている．この実験結果は，圧縮性の変形が見られる地域での地質構造の深部形態を推定する際に特に有用である．

手法としては，実験材料に乾燥砂を用いる「砂箱実験」が一般的で，過去100年にわたって様々な地質構造に対する実験が行われ，世界中の石油探鉱に実際に応用されております．これは乾燥砂の粉粒体としての性質が，上部地殻内での脆性破壊を力学的に近似するには好適であることに由来しております．

代表的な実験例の一つを図1aに示します．これは断層面が曲面で，それに沿って断層上の地層が滑り落ちるような運動をするときに，その地層にどのような変形が生じるかということを砂箱実験によって検討した例です．この実験結果を基に地震探査記録断面図を解釈した結果を図1bに示します．これは米国メキシコ湾での油田探査のために行われた探査で，実験結果との比較によって小規模な断層の形態やその形成時期などについて詳細に推定することが可能となりました．これらは油田の成立条件や規模をコントロールする重要な要因ですので，実験結果がいかに石油探鉱にとって有効であるかご理解いただけると思います．

次に地層が短縮する状況での実験例を図2に示します．これはもともと水平に堆積していた地層を，まるでブルドーザーのように削り取ってゆくように変形させた実験です．このような現象は実は世界中のいたるところで起きています．例えばヨーロッパ・アルプス山脈やヒマラヤ山脈，北米大陸のロッキー山脈というような世界の大山脈の裾野では普通に見られる地質構造なのです．日本周辺でも四国沖の海底でそっくりな地質構造を見ることができます．この実験結果も，複雑に変形した圧縮性の地質構造における石油探鉱に応用されて，数多くの油田が見つけられています．

地質構造モデリングの実際の作業は，以下の流れにしたがって行われます．

a．地質・物理探査データの取得
b．地質断面図などの作成・現在の変形像の確認
c．バランス法などを用いた変形前の状態への復元作業
d．復元作業を通じて一次モデルを設定
e．縮小モデルのための相似律検討
f．forward modelling（実験・数値シミュレーション）

のためのパラメーター検討
g．実験材料の検討
h．forward modellingの実施
i．モデリング結果と現在の変形像との比較・モデルの修正
j．必要に応じてf-i間を繰り返す
k．構造モデルの完成
l．モデルを使用した地質・物理探査データの再解釈
m．詳細な地質構造形態の推定・地質構造形成過程の推定

これだけでは何だかよく分からないかも知れませんので，順番にもう少し説明することにします．「地質・物理探査データの取得」とは，地表地質調査や様々な物理探査を野外で行うこと，あるいは公表された文献・データベースなどから各種の必要なデータを取得することです．これがこれ以降の作業の基本情報になります．

次に「地質断面図などの作成・現在の変形像の確認」ですが，取得したデータに基づいて，岩相分布図や地質断面図・地下地質構造図などのいわゆる広義の地質図を作図することによって，現在の検討対象地域の姿をできる限り正しく理解するということです．

「バランス法などを用いた変形前の状態への復元作業」ですが，ここで登場した「バランス法」とは何でしょうか？　これは以下の考え方に基づく一群の幾何学的な手法の総称のことです．その考えとは，「地質断面図は変形前の状態に幾何学的および運動学的に正確に復元できるように作図されている必要がある」というものです．つまりバランス法に基づいて作成された地質断面図は，変形前の状態に幾何学的および運動学的に正確に復元できるということになります．ただし，このバランス法は非常に多くの方法が提案されているため，対象地域の地質状況を考慮した上でどの方法を使えばよいか慎重に検討する必要があります．

「復元作業を通じて一次モデルを設定」では，バランス法を用いて作図された復元断面図を逆に眺めることで地質構造形成過程を推定します．ここで設定されたものを初期モデルとして作業を進めることになります．

地質モデルを実験で検討する場合には，実験室で実際に作業できる長さや時間にしなくてはなりませんので，これらを大幅に縮小する必要があります．そうしますと，実験で使用する材料の強度や粘性などもそれに合わせて変更する必要があります．このような物理量の関係を記述する法則を相似律と呼んでいます．「縮小モデルのための相似律検討」とは，この相似律の検討のことです．

「forward modelling（実験・数値シミュレーション）のためのパラメーター検討」とは，相似律検討の結果，導き出された岩石物性の比率などを踏まえて，実験・シミュレーションを行うための初期パラメーターを検討することを指しています．ここでは特にforward modellingという言葉を使いました．通常の地質検討作業が「現在」から「過去」に遡るだけであることに対して，「推定された過去」から本当に「現在」の姿が再現できるのかどうか，検討できる手法はforward modellingだけなのです．つまりforward modellingを行わないと，復元作業を通じて設定したモデルが正しいのかどうか判断できないのです．これがforward modellingを行う理由です．

実験を行う際には，相似律とパラメーターの検討によって決定された条件に沿う物性を持つ実験材料を選択する必要があります．通常の実験条件では，かなり特殊な物性を持つ実験材料を使用しなくてはなりませんので，既存の材料を組み合わせるか，新たに材料を開発する必要に迫られることもあります．「実験材料の検討」とはこのような作業を指しています．

次の「forward modellingの実施」でやっとお目当ての作業を始められます．しかし，実験を行う際には端面拘束をできる限り小さくするなどの工夫が必要になりますし，シミュレーションの場合には計算結果が妥当なものになっているかどうかチェックする必要があることは言うまでもありません．

「forward modelling結果と現在の変形像との比較・モデルの修正」では，forward modellingの結果が実際の地質構造の形態とどこがどのように異なっているのか詳細に比較・検討します．この結果から，初期モデルを修正することになりますが，どこをどの程度修正すればよいかということについては，残念ながら現状では試行錯誤しながら決定するしかありません．修正を繰り返してもforward modellingの結果が実際の地質構造の形態と甚だしく異なっている場合には，初期モデルそのものを破棄する必要があります．この場合には，たとえば別のバランス法を用いた復元作業を実施するなどして，全く別のモデルを作成する必要があります．

forward modellingの結果が満足できる範囲内に収束した場合には「構造モデルの完成」とします．ここから先はこの完成されたモデルを使用して，様々な解析作業を行うことが可能になります．たとえば，「モデルを使用した地質・物理探査データの再解釈」とは，モデルを念頭においてデータを再解釈することで，最初の作業では気が付かなかったデータの特徴を見出すことや，解釈の間違いを発見することを目的としております．この作業の結果，より「詳細な地質構造形態の推定・地質構造形成過程の推定」が可能となります．冒頭でご紹介しましたように，石油会社ではこの方法を油・ガス田の規模の決定や，石油・ガスの移動集積とそのトラップとして

の地質構造形成のタイミングを検討する目的，さらには効率的な坑井掘削デザインを決定する目的に応用しております．

最　後　に

気がついた方がいらっしゃるかもしれませんが，この地質構造モデリングという手法は別に石油の探鉱開発だけに限定されたものではありません．むしろ地下地質情報の解析ツールとして，多方面への応用が可能と考えております．特にこの手法は，過去-現在-未来という時間の流れを取り入れることが可能であるため，地下地質の変動履歴を詳細に推定し，これからどの場所にどの程度の変動が予想されるかという未来予測にも応用可能です．私は今後この手法に関する研究を進め，地下廃棄物や地中固定された物質の挙動を推定するための有効なツールとして開発を継続したいと考えております．

私は水曜会のすばらしい先生・先輩方，気鋭の若手の方々とぜひご協力させていただいて，エネルギー・環境分野にも関わる新しい領域を切り開きたいと強く願っております．私が取り組んできましたことは上記しましたが，これに関しましてご興味をお持ちの方はぜひ研究室にお立ち寄りください．

参　考　文　献

1) Yamada, Y.: 3D Analogue Modelling of Inversion Structures. *Ph.D. Thesis, Univ. of London*, 744pp, 1999.
2) Bruce, C.H.: Pressure shale and related sediment deformation-mechanism for development of regional contemporaneous faults. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, vol. 57, pp. 878-886, 1973.
3) Yamada, Y., Matsuoka, T., Baba, K.: Sandbox Modelling: A Tool to Analyze Geometry and Development Process of Geologic Structures. *Proceedings of the EIT-JCRM-AIT Joint Workshop on Rock Engineering*, in press, 2003.

談　話　室

孔井を用いた物理探査について
―地表からの物理探査に対する位置づけ―

真　田　佳　典*

Exploration Geophysics using Borehole
—Relation to Surface Survey—

by Yoshinori SANADA

はじめに

私は平成12年3月に資源工学専攻物理探査工学研究室で博士の学位を授かり，平成15年5月に社会基盤工学専攻地殻工学講座ジオフィジクス分野(旧上記研究室)の助手に就任するまで約3年の間，石油・天然ガス開発サービス会社であるシュルンベルジェ株式会社においてVSP（Vertical Seismic Profiling）と物理検層という孔井を用いた物理探査手法に関わる業務を行ってきた．屈折法地震探査，反射法地震探査，電気探査など地表から行う物理探査に比べてVSPや物理検層は比較的なじみが薄いと思われるので，本稿ではこれらについて簡単に説明する．特に地表から行う物理探査手法との関連性に着目する．このほかに孔井を用いた物理探査にはトモグラフィがあるが本稿では述べない．VSPと物理検層の手法についての詳しい原理・データ処理法については，物理探査ハンドブック（1998，物理探査学会）などをご参照頂きたい．

孔井を用いた物理探査の意義

孔井は掘削する目的によって，各種の物理探査やコア採取のための調査井と，石油や地下熱水などを採取するための生産井に分けられる．しかしながら，掘削には多大に費用がかかるため調査の後にそのまま生産に用いられることも多く，井戸毎に明確に分かれているわけではない．

物理探査を孔井で行うのは，ゾンデとよばれるセンサを調査対象物（通常われわれの関心は地中にある．）により近づけて観測したいという自然な発想からである．しかしながら，深部での高温高圧という過酷な条件のもと数センチの径内で数百から数千mの地下にワイヤー1本でセンサを吊り下げて正確に計測を行うのは容易なことではない．その困難さの理由は，限られた空間にセンサや制御機械・電子回路などを組み込むこと，高温高圧下で正確にゾンデを稼働し，適切な応答値を求めるという技術的な理由からである．しかしながら，例えば物理検層は数十cm間隔で計測され，孔井を用いた物理探査によって得られる情報は，地下から得られる情報をより近くで詳細に表すものであり，地表からのみでは得られない貴重な情報を含んでいる．また，その意義は孔井の掘削には多大な費用がかかることや，その孔井の周辺に目的とするターゲットが存在していないかもしれないというリスク，また計測値からどれだけ情報を引き出すことができるか，などの費用：リスク：効果のバランスによっても判断される．

物理検層

物理検層とは，孔井内にゾンデを降ろし，地層状態や坑井近傍の物性などを深度に対して連続的に計測する手法である．初期の頃は，「検層＝電検(電気検層)」とよばれるほど，比抵抗の測定が主な手法であったが，現在はその測定原理の多さから検層種目は多岐にわたる．主なものをあげると，孔径や温度など比較的直接物性値を測定するものをはじめ，比抵抗，電磁誘導現象，自然電位，自然ガンマ線，弾性波，中性子を用いたもの，核磁気共鳴など，様々な物理現象を用いた検層が実用化されている．計測においては，複数の検層機を連結して計測する場合が多く，1本のワイヤーによって伝達される限られ

*京都大学大学院工学研究科　社会基盤工学専攻

た電力と通信線を最大限利用するための技術が盛り込まれている．計測は連続して行われ，数十 cm の間隔でサンプリングされたデータはケーブルを使って地上に送信される．計測されたデータは，高性能コンピュータによってデジタルデータとして記録される．最近では記録されたデータから現場で簡易な解析を行い，高性能プロッタによって出力することができ，現場での迅速な解釈が行うことが可能である．また，必要に応じてデータを持ち帰り詳細な解析を行うこともある．

解析においては，複数の異なる物性値の検層データを用いた総合解釈が行われ，例えば，複数の検層データの応答の組み合わせからの岩相判別や飽和率の算出などが行われる．

最近では LWD（Logging While Drilling）とよばれる掘削中に検層を行う技術も用いられている．この技術によって，開削後に検層時間を行うよりも大幅に時間を節約することが可能であり，迅速な解析や調査の計画に役立っている．

VSP

VSP は地表で起震した弾性波の直接波と反射波を，孔井内にアームやスプリングで固定したジオフォン（地震計）で計測し，地下の構造を解析する手法である．震源，受振器の配置によって図 1 のような種類にわけられる．計測には 3 成分ジオフォンを用いることが多い．反射波を用いて地下の構造を解析するという点では，地表で反射波を解析する反射法地震探査と共通する部分が多いが，VSP では以下の点が異なる．

1）受振器が地中にあるため反射復路における地表でのノイズの影響がなく，受振器が反射対象物の近くにあるため復路の距離が短くその区間での減衰が少ないので，一般的に地表で取得されるデータより品質がよい．
2）受振器の深度はケーブル長より既知であるので，反射の起こったイベントの深度を直接知ることができる．
3）地表からの直接波も計測するため地表-受振器間の弾性波速度を求めることができる．
4）受振器の水平位置は固定されるので，解析できる範囲が孔井付近に制限される．

震源に関しては，地表で行うためエアガンやバイブロサイスなど反射法地震探査と同じものが用いられる．受振器については，最近では複数のゾンデを連結し効率よく計測が行われている．解析については，反射法地震探査と同様の手法が用いられるが，以下の点が異なる．1）直接波と反射波の分離処理が必要である．2）CDP による速度解析を行わない．3）直接波をウェーブレットとして

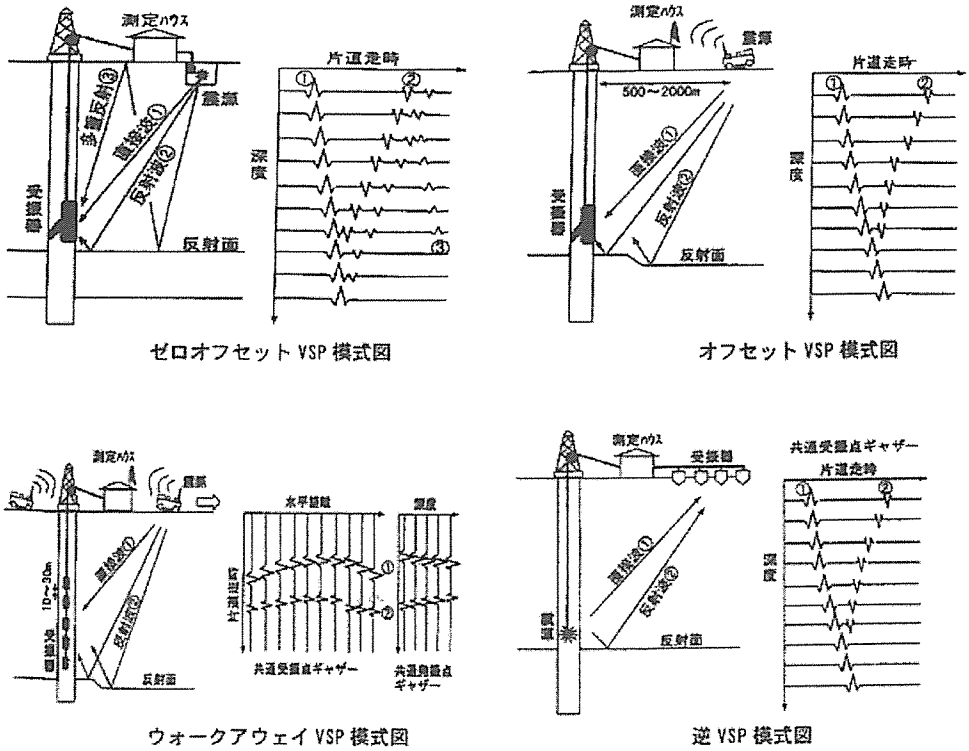


図 1　種々の VSP 計測の模式図[1)]

デコンボリューション処理が行える．

また，孔井内で起震し，地表に設置した受振器で計測する方法を逆VSPとよび，特に掘進時のドリルビットの振動を用いるものをSWD（Seismic While Drilling）という．

孔井を用いた物理探査の位置づけ

探査の順序については，調査井の位置や深度は，通常地表からの物理探査の解析結果によって決定されるので，孔井を用いる物理検層やVSPもその後で行われる．

解析に関しては，地表で行う物理探査も孔井を用いる物理探査も，同じ地下構造を対象としているので，計測方法が異なっても，同一モデル上で行わなければならない．総合解析を行う際に重要なことは，計測値の位置（深度と水平位置）の一致である．以下に反射法地震探査，VSP，物理検層の深度の決定方法と計測精度，水平方向の探査領域についてまとめた．

- 物理検層
  - ▶深度の決定方法　ケーブル長をもちいるので信頼性は高い
  - ▶深度方向の観測値の精度　連続測定を行うため細かい深度サンプリングの計測値
  - ▶水平方向の探査領域　孔壁の周辺
- VSP
  - ▶深度の決定方法　受振器深度と反射波を比較．
  - ▶深度方向の観測値の精度　最下部の受振器より上部の信頼性は高い．下部は反射波の往復走時のみ
  - ▶水平方向の探査領域　孔井の近傍
- 反射法地震探査
  - ▶深度の決定方法　速度解析より求めた速度情報により深度に変換（記録データは往復走時）
  - ▶深度方向の観測値の精度　速度解析に依存
  - ▶水平方向の探査領域　震源・受振器を広域に展開することにより広域の探査が可能

以上のように，物理検層は深度に対する詳細な探査が行えるが孔壁の周辺しか計測できない．一方，反射法物理探査では深度は速度解析に依存してしまうが，広域のデータ取得が可能で構造を大局的に探査することに優れている．VSPはその間を取り持つ関係にあるといえ，これらを補完的に用いることによって，それぞれの持ち味が，さらに生かされることになる．総合解析では，これらの位置を補正し，同一の時間軸または深度軸に挿入し対比，解釈を行う．図2に反射法地震探査の記録にオフセットVSPの記録と検層データを挿入したものを示す．

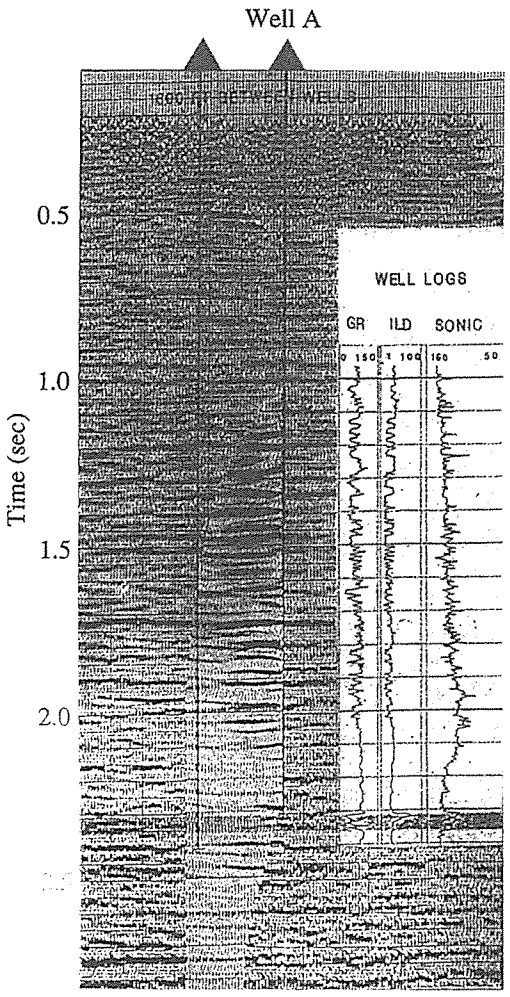


図2　反射法地震探査とオフセットVSPと物理検層データ（自然ガンマ線，比抵抗，P波速度）との対比

おわりに

歴史的には地表で行ってきた物理探査手法を孔井内に適用してきたという経緯があるが，技術革新によって狭い坑井内でも様々な計測が行われるようになり，現在では個々の手法での計測方法，解析方法が非常に進歩している．（もちろんその推進力は，石油ビジネスが巨大な資本を注いできたからに他ならない．）特に物理検層は，様々なセンサによる計測の宝庫であり，総合解析の手法も発達しているように思われる．もちろん，検層データは孔壁に沿った深度の1次元データでしかないので，2

次元，3次元化の進んでいる地表からの物理探査と簡単に比較することはできない．しかしながら，これらの融合によって，新しい研究の視点が発見できればよいと思っている．

最後になりましたが，水曜会誌でこのような紹介の機会を頂きました水曜会誌編集委員会のみなさまには感謝を申し上げます．また，私自身も視野を広げ研究，教育活動にする励む所存でありますので，今後とも皆様方のご指導・ご鞭撻のほどよろしくお願い申し上げます．

参考文献

1) 物理探査学会，物理探査ハンドブック（1998）
2) Schaffner, J., Reisinger, M. and Rutherford, J. W.: Offset vertical seismic profiles define shale boundaries in Morgan's Bluff field: THE LEADING EDGE, 13, no. 11, 1095-1100. (1994)

談　話　室

随想　…アメリカよりの想い出…

奥　村　英　之*

Essay —Memories from America—

by Hideyuki OKUMURA

私は十余年にわたって磁性材料に関わってきた．決して長いとはいえないが，私なりにそれなりの愛着を持って「磁気（magnetism）」というものに接する事が出来るようになった．思えば子供の頃，鉄の粉が紙の上で不思議な形を描き（永久磁石が紙の下にあるのだが），またそれに手を触れないでも動かすことが出来ることにとても興味を覚えたことは今でも記憶に新しい．物（者）と物（者）とが目に見えない不思議な力で引かれあう（惹かれあう），或いは反発しあう，という現象は私たちが生きる上でもかなり人間の根本に迫ったトピックであるように思われる（ちょっと強引か？）．それが何故そうなるのか，どういう現象であるか，未だに全てをわかったとは到底言えないが，かなりの「想像（創造？）」力を駆使してその刻々と変化する状態を頭に思い描くことは出来るようになった．

そもそも磁性とはなんぞや？　これはなかなかの大問題である．後でも少し出てくるが，実は全ての物質はある意味では磁石なのであり，これは全ての物質が電子を持ちそれが凄いスピードで動いていることを考えれば明らかであろう．いや本当は電子の自転つまりスピンの方がもっと重要なのであるが，いずれにしろこれらの大変基本的な現象は，我々人間の体（の構成物質）も含んだ全ての物質で一秒いや一瞬たりとも休みなく起こっていることであり，そこからも「Everything is magnetic.」と私が言っても決してはったりにはならないのがわかって頂けると思う．とは言っても一般に磁石と言った時に人々が考えるのは，そして実際に世の中で使われているのも，強磁性つまりフェロ或いはフェリ磁性であり，それ以外の「弱い」磁性は特殊と考えてよいであろう（勿論重要でない，という意味では決してない）．これらの強磁性体においては磁気の働きを演出する「磁性電子」なるものが存在し，原子間に働く強い正の交換相互作用のために，それらの有能な電子が“協力して”自発磁化なる摩訶不思議な現象を引き起こすのである．さて，我々が普段マクロにつまり間接的に「力」の作用を通じて感じたり目にしたりするものは大雑把に言って磁性電子の協力現象なのであるが（かなり大雑把ですみません），その個々の現象はかなり小さい．ボーア磁子といって一つの磁性電子から得られる磁気モーメント（ergs/Oe＝emu）は10のマイナス20乗にも満たない．しかし何と言っても数が多いのである．私はいつも驚くのであるが，クリップの端に小さな磁石を近づけると（触らなくても！）即座にクリップ全体が磁石となるのは皆知っているが，その瞬間に実はその中の何千兆個の更に何百万倍もの数の磁性電子が一斉にビシッと一定方向に揃うのは，ある意味では怖ろしい．協力することが如何に大切かを我々に語ってくれているかのようにも思える．

私はピッツバーグ大学でW.A. Soffa先生のご指導のもと，Ph. D.（Philosophy of Doctor）を取ったわけであるが，その論文タイトルは“The relationship between structure and magnetic properties in ultra-fine grained/nanostructured FePd alloys”（超微細粒或いはナノ構造の鉄パラジウム合金における磁性と微細構造との関係）であった．Soffa先生は相変態や電子顕微鏡において知られる大変教育熱心な先生であり，授業や研究のみならず個人的にもいろいろとお世話になった．私のいい加減な英語がかなりましになったのも，きちっと英語で発表することも含めてこの先生のおかげであると思っている．さてパラジウムは今でこそ金や白金と同じ位値段が高いので実生活への応用を考えるのは難しいが，10年ほど前はそれ程でもなかったので，FePd合金

*京都大学大学院　エネルギー科学研究科　エネルギー社会環境科学専攻

は硬磁石材料としての可能性を秘めていたといえる．それは，化学量論組成の FePd(50at%)合金は結晶磁気異方性定数が大きく(～17 million ergs/cc)，磁化も～1100 emu/cc と魅力的なためであるが，保持力がバルク材で200～300 Oe とそれ程大きくならないのが一つの謎となっていた．私はこの PhD の論文でナノ材料特有の磁化反転機構を提唱し，またそれをこの系に応用し，少なくともその一つの解答を与えることができたと思う．また，プロセスの仕方つまり FePd 磁石の創り方によっては保持力が 10 倍以上になることを実験で示し，その定性的・定量的な解析を行った．X線を用いての結晶子の定量的な解析，電子顕微鏡（透過型及び走査型）を用いての定量的な観察なども詳しく行った．ナノ材料に特有である，新規(noble)な特性を調べるため，さまざまな条件の下で FePd 合金を作成し，それらのキュリー温度や磁化，保持力を丹念に調べた．一般にナノ材料においてはその超微細構造や膨大な比表面積などによって特異な性質が現れることが多々報告されている．私の研究した FePd 合金においても，microstructure に敏感でないはずのつまり structure-insensitive であるはずのキュリー温度や磁化（これらは intrinsic property として知られている）が，まるで structure-sensitive のようにつまり extrinsic property のように振舞うなど，珍しい特性が観察された．これを定性的のみならず，さまざまな仮説を立てて定量的に解析したのはこの合金系に於いては少なくとも私が最初であると自負している．この系において準局在モーメントモデル，つまりある仮定を置いてフントの法則を適用し，興味深い値を示した磁化をうまく説明できたことは，この FePd 合金におけるスピン密度の揺らぎ（fluctuation）が小さいことを示唆しており，この分野に一つの波紋を投げかけることが出来たと私なりに喜んでいる．

その後デラウェア州立大学ではバルク磁石の分野で高名な George C. Hadjipanayis 教授の研究室にポスドクとして厄介になり，主に希土類磁石の硬磁性とその微細構造との関係を調べた．希土類磁石では鉄やコバルトなどの遷移金属と違って軌道角運動量がクエンチ（quench）していなので一般的に 1 原子あたり大変大きな磁気モーメントが現れる．また，その他にも特徴的なのは，その軌道がある結晶方位に釘付けされているため，大きな結晶磁気異方性を示すことである．このため一般に希土類金属を用いた磁石には大変大きな保持力(coercivity)を持たせることが可能である．よって最大エネルギー積（maximum energy product）もアプローチ次第で，勿論磁化が重要なのではあるが，著しく伸ばすことが可能となる．MRI など医学方面でも活躍しているネオディミウム鉄系磁石（Nd-Fe-B）はその良い例で，現在世界最高の最大エネルギー積を誇っている．ただ，この磁石は温度特性があまり芳しくなく，温度管理が大変重要となる．また一般に希土類金属は大変反応性が高く，酸化して燃えやすい．従って磁石の高性能を保つには，或いは製造の段階でも，外気に触れないように特に注意を払う必要がある．これはもともと希土類金属の値段が比較的高いのに加えて，製造コストをかなり上乗せすることとなる．私が関わった研究としては，液体急冷によるそのネオジ鉄系や Fe-Pr-B 系磁石の作製とその性能の解析（微細構造を調べることにより機構を解明）やガドリニウムのナノ粒子を作製してその変わった物性つまりナノ磁性を調べること，そして微量添加物がそれらの物性にどう影響を与えるか，などであった．これらを大学院の学生と一緒に楽しく且つ精力的に研究させてもらったのであるが，その他にも次世代の磁気記録方法と目される垂直磁気記録に用いる Fe-Pt や Co-Pt 合金の研究（ナノワイヤーやナノ粒子，そして薄膜）も学生とともに行った．世界最高の（その時点ではそうであったと思う）保持力を見つけたり，など，なかなかエキサイティングな事もあった．目が回るほどの忙しさとはまさにこの事で週に 1 回以上は必ず何かを皆の前で発表するほどであったが，学んだ事も多く大変有益な約 2 年間であった．この間ギリシャのロードス島での磁性学会にも参加させてもらって，この分野で世界トップレベルの方々とビールを交えながら親交を深めることができたし，また他にも沢山のいい想い出を創る事が出来た．日本のナノ 2000 国際学会では未熟とは知りながらも何と教授代理で招待講演を発表させて頂いたし，アメリカ DOE（Dept. Of Energy）の会合がニューメキシコ州サンタフェ市で行われたときにも代理役を仰せつかって発表を行った．教授の希望に添えたかどうかはいささか疑問ではあるが，ハヂパナイス教授が事あるごとに目をかけて下さったのには心から感謝をしている．

さて，我々が一般に磁石と呼ぶものは大きく 2 種類に分けられる．いや，本当は前記のように我々の身の回りにあるもの全てが magnetic であり磁性を持っているのであるが，ここではそうした論議ははずしておく．すると我々が日常磁石として受け入れ実際に実益に供しているものは，概ね 2 種類に分けて差し支えないと思われる．つまり，硬磁石（永久磁石）と軟磁石である．硬磁石はその名の通り，一度磁化されると消磁（demagnetize）しにくい，つまり磁気的に‘硬い’のであり，逆に軟磁石は一度磁化されても消磁が容易く‘軟らかい’のである．私がペンシルベニア州ピッツバーグ市にあるカーネギーメロン大学（CMU）の DSSC（Data Storage Systems Center）という新しい建物で研究させて頂いた期間は，その後者である「ソフト」な磁性を勉強させてもらった．

私はマックヘンリー教授とロックリン教授との2つのグループに顔を出していたのであるが，どちらのグループのミーティングもなかなか特色があり，それでいてデラウェア大学のハヂパナイス教授のグループとは全く異なっていて興味深かった（ちなみに3人ともクリスチャンである）．2人の教授にも大変親切にして頂き，ミーティングでの議論も自由にさせて頂いたし，研究も自分のやりたい事をやりたいようにさせて頂いた．本当に感謝している．私が関わった具体的なプロジェクトとしては，(i)日立金属ファインメット組成のSi/C比を変化させた場合の磁性や微細構造の変化を定量的に解析する事（磁化というマクロな概念（量）をミクロな視点から見直す，など）や，(ii)ハイティーパーム(HITPERM)というCMUで開発された軟磁性材の薄膜を垂直磁気記録の裏打ちに用いた場合に必要とされる高周波特性や磁気特性，またそれと関係してそれらの特性と微細構造（薄膜の数，厚み，そして膜間の材料の厚さなども含む）との関連性の研究，(iii)新しいソフト磁性材の開発，などが挙げられる．これらのどの分野に於いても何らかの発見が出来た事は本当にラッキーであった．特に(iii)においてはアメリカの特許申請をする予定であり，手伝ってくれた優秀なアメリカの学生や自由な研究を容認して下さった2人の教授に心から感謝したい．また，サンフランシスコで行われた磁性学会で教授の代役という大役も仰せつかった．かなりのプレッシャーがかかり滅入ったが何とか無事こなす事ができ，良い経験となって本当に良かった．

最後になるが真面目なお話ばかりではアメリカらしさが伝わろうはずもない事は重々承知しているので，少しは羽目を外した話も入れてみようと思う．旅行の体験談のようなさっくりした話から危ない所ではいかがわしいお店の話，そして感動話ではクリントン大統領に手紙をもらった話まで，余りに沢山あって到底ここには書ききれないのであるが，これを読んでくれている人々の中には留学等を考えている方もいるかもしれないので，日本人の習性についての笑い話をひとつここで披露しようと思う．私がピッツバーグ大学に着いて間もない頃，当然「呼び捨ての洗礼」を受けた（その前に早口英語の洗礼を受けたのは言うまでもない）．博士課程の先輩等に「ひで」と呼ばれるのは親近感が湧いて良いのであるが4回生などの後輩にも何の敬称もなしで「ひで」と呼ばれて，“おお，ここはアメリカだ”と思ったものである．こんな事はすぐに慣れたのも束の間，次は先生（ソファー先生）が私に会うたびに怪訝な顔をしていらっしゃる．さてどうしたものか恐る恐る聞いてみると“Don't bow, Hide!'(お辞儀をしないように，ひで！)”ということであった．これはいけない，今まで会うたびに無意識にお辞儀をして先生をuncomfortableにしていたとは不本意である，明日からはしないよう努力しようと思った．しかし悲しいかな，礼儀正しい（…）日本人の習性がそんな簡単に直るはずもなく，廊下ですれ違うたびに無意識に腰が折れてしまう．特に廊下が長い時などは（これがまた実際に長いのである，工学系の建物は！）それ以外どうしたらよいか見当もつかない．そこで向こうの先生も考えたものである，私がお辞儀をしたら，それに負けじというくらい深々とお辞儀を返して下さったものである．これには私も面食らった，というか向こうの作戦成功である．こんな事を大先生にさせ続けられる訳もなく，2-3回これを繰り返すうちに私のお辞儀‘癖’は全くなくなってしまい，アメリカ生活を無事踏み出す事が出来たのであった．と同時にお辞儀をしない日本人がここに完成したのである…

それでは，最後までこの拙文を読んで下さったことを感謝しつつ，この辺で筆を置きたいと思います．

講　話　室

災難に逢う時時節には，災難に逢うがよく候

新　宮　秀　夫*

Tempus Destruendi Tempus Aedificandi

by Hideo SHINGU

ま　え　が　き

エネルギー・環境の問題を考える非営利特定法人（NPO）を始めて3年目になる．NPOというと何か「役に立つ」ことを皆でやろう，という雰囲気があるようだが，当方は一向に役に立つ事をやらずに「なんで節約が大切なんや？」といった「どうでもいい事だけれども大切な事」を「考える事」をしている．

世の中みなが「役に立つ事」を目指しており，大学の先生までが「論文よりも特許」などという言葉を口にして恥かしくないご時世なのだが，また時代が変われば，役に立たないこと，が持てはやされるようになるのかも知れない．

本稿では，そんなNPO活動をしている間に，いろいろ本を読んだり調べたりして面白いと感じた事柄とそれについての考察を，次に何か文章をまとめるためのメモのつもりで，いくつか紹介してみようと思う．これらに関して更に詳しい知識や考察，あるいは筆者の思い違いや間違いをお教え頂ければ幸いである．

1.　災難に逢う時節には，災難に逢うがよく候

良寛（1758-1831）が71歳の時（1828年）に新潟県の三条で大地震が起こった．三条から30キロほど南の島崎というところに住んでいた良寛は，三条の惨状を見て，

なからへむ　ことや思ひし　かくばかり
変はりはてぬる　世とは知らずて
かにかくに　止まらぬものは　涙なり
人の見る目も　忍ぶばかりに

と，運命にほんろうされる人間の姿を嘆いているが，親しい親戚の人宛の見舞いに，

「災難に逢時節には，災難に逢がよく候．死ぬ時節には，死ぬがよく候．是ハこれ災難をのがるる妙法にて候」

という有名な手紙を書いている．

今の若者がこの手紙の文句をどう思うだろか興味を持ったので，昨年から技術者倫理の講義を受け持っている大学の一年生（工学部）のクラス90人に感想を書かせて見た．ところが，先ず手紙の文句を紹介して説明を始めた時に何か雰囲気がおかしい．念のため確かめて見たら，なんとクラスの中で良寛という名前だけでも聞いたことのあるものが5名しかいなかった！

良かれ悪しかれ，日本の歴史，文化は仏教ぬきには理解もエンジョイも全く不可能なのだから良寛さんの名前くらいは学校で教えて欲しい気もしないでは無いが，ちなみに，一休さんについて聞いたら全員が知ってた．漫画にあります，という答えである．良寛は漫画にないらしい事がこれで判った．ところで，「災難に逢時節には…」の感想だが，ケシカラン言葉だと言う者も何人かいたが，大半はいい言葉と思う，とか，どうにも出来ないことは受け入れるよりしかたがない，という感想であった．西洋の国でこんな質問をしたらこのような「受けいれる」という答えは少ないのではないかと想像できる．

日本は災害の多い国であることは確かなのだけれども，災害が社会の繁栄を妨げて来たと思うのは大間違いであるらしいと最近教えられた事がある．ひとつは地すべり地帯に沿って集落が形成されていると言う調査結果

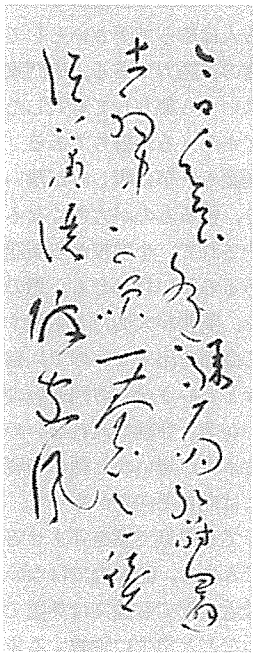
*特定非営利活動法人（NPO）
京都エネルギー・環境研究協会
606-8145 京都市北区小山堀池町15-7
TEL & FAX 075-213-8075
e-mail enekan@mbox.kyoto-inet.or.jp
http://web.kyoto-inet.or.jp/org/enekan/

の話である．地すべりによる土地の軟弱化は住むには危険なのだか，土地が柔らかいことは耕作には都合がいいらしい．地すべりなんて起こっても何十年に一度なのだから起こればアンラッキー，起こらなければ穀物の収量が多い土地に住めてラッキー，という考えも「受け入れ」思想につながりそうだ．

河川の氾濫域が肥沃なのは周知のことだが，氾濫によって家も時には人命も失われるのは「しかたがない」わけである．関東ローム層は雨が降るとぬかるんでラグビーの試合が泥だらけで大変になると聞いたが，そこは肥沃で農地は豊かである．そのローム層は富士山の噴火物の堆積なのだから，富士山がドカンといけば関東地方は大災難である．そんなこと何百年か何千年に一度なので，ひとは平気でいられる．

また，災難が社会を活気づける事は日本では昔から常識だったらしい話がある．江戸時代初期に地震が続いた後に「焼け転け白蟻，大明神」というお札が神棚に祀られたらしい．火事と地震（転け）と白蟻の害がなく家々がいつまでも建替えの必要がないと，建築業，大工，左官はお手上げで，今で言えば景気が沈滞することになる，というわけである．聞くところによると建築学会の会議室に掛かる額の裏にはこの文句が書いてあるそうだ（真偽は不明）．

いづれにせよ，災難は困ったことなのだが，災難もまた幸せをもたらす，災難なくして幸せなし，というのが自然の営みである．これを良寛さんは，端的に手紙に書いたと見ると納得がいく．エネルギー・環境の視点でこれを考えれば，災難に逢えるのは生きていればこそであり，今の世の安易な生活を求めて技術に頼り，エネルギーを浪費し環境を汚染して人類の存続を危険にさらす，というのは大いなる愚行ではないか，と良寛さんにお教え頂いたことにしよう（大愚は良寛の号）．



良寛の漢詩

今日乞レ食逢二驟雨一　暫時回避
古祠中　可レ唉一襄与二一鉢一　生
涯蕭灑破家風

2. GMF（遺伝子組み替え食物）とジェボンズのパラドックス

ニューズウィーク誌といえば昔は進歩的とか言われて，アメリカの週刊雑誌のもう一つの代表タイムの保守的な論調と対比されたものだった．しかし最近はなんか論鋒が鈍って政府の御用誌的な記事が多くて面白みが減った．政府の御用誌というよりは，何でも金で解決，というWTO的，単細胞的，西部劇的な雰囲気になっている．さて，その9月12日号に，アフリカは食物に困って人々が飢えに苦しんでいるのに，収量の多いGMF（Genetically Modified Foods）を導入しないのはおかしい，という記事がある．それによると，GMFが導入されない理由はGMFを受け入れないヨーロッパに気兼ねしている為だということである．ヨーロッパの機嫌をそこねたら，食料の援助がもらえなくなるらしい．

ヨーロッパがGMFを受け入れない理由は，科学的根拠の無い新技術アレルギーのためである，根拠のない好き嫌いの為に多くの人が飢えるのは倫理的に困った問題だ．というのが4頁に渡る記事の主張である．

これほど断定的に，新技術を導入する側に立って雑誌記事が書かれると，首をかしげたくなる．GMFにせよ他の新技術にせよ，「安全である」という「科学的根拠」は論理的に絶対に示せない問題である．確実に「安全でない」ことは示せるけれど「安全である」ことは人類が滅びるまで観察して初めて，その期間は影響なかった，とだけしか「科学的」にはいえない．

例えば，フロンガスはオゾンホールを作ることが判明して製造禁止になったが，それまで長い間「安全である」として散々冷房器具に大量使用されていた．「安全でない」証拠は何時出るか不明だけれど「安全である」という「証拠」を出すには無限の時間が必要なのである．

だから，戦戦兢兢として深淵に臨み，薄氷を履む，ような気持ちで新技術の導入をしよう，と言うならまだしも，経済的な大きな利益があるのにGMFを感情だけから拒否するのは人道的でない，と主張するのは権威ある雑誌としては拙いのではないかと思う．特に穀物という皆が食べるものについては，リスクが小さくても，そして利益が大きいからと言っても，何かあった時の被害の重大さを考えると，慎重の上にも慎重でなければならない．

もう一つ，新技術に関して気にしなければならない事

は，「便利になる」ことがいつでも「世の為，人の為」に良いのか，という問題である．イギリスの経済学者ジェボンズはエネルギー効率の良い新技術はそれによって生産量が増加するので，かえってエネルギー大量消費を助長する，といういわゆるジェボンズのパラドックスを1865年に「石炭問題」という本に書いている．同様の事態は農耕技術が出来て人々が豊かになったか，という問題についても言える．耕作による食料増産はすぐに人口増加を呼んで，結局農地不足，土地の取り合い，戦争，というコースが世界中で起っているのである．産業革命は大きい富を社会に生んだはずだが皆がリッチになるどころか，多数の貧困者が出てしまった．その貧困を「救う」為というキャッチフレーズで20世紀を通じて科学技術の革新が奨励され，みながそれに励んで来た．しかし現在でも，世界一金持ちの大国にホームレスの人，治療を受けられない病人が多数存在している．GMFをアフリカで使わないと飢餓が救えないのではなくて，社会体制が悪いから飢餓が出るのである．GMFの供給は，企業が利益を挙げるという目的にはピッタリだが，利益が挙がるとか，得をするという事柄にたいしてはそれが「安全である」事を願望する気持ちも強くなる．願望が正邪の判断を曇らせる最大の原因であることは，歴史が繰り返し教えている．

3. 英語コンプレックスからの開放：英語上達の必要はない

ジョセフ・コンラッドは「ハート　オブ　ダークネス」と言うタイトルの小説を19世紀末に書いた．ポーランド生まれのイギリス人船乗りの書いたこの本は結構有名なのだが，思うに，有名である大きな理由の一つはタイトル「Heart of Darkness」がアッピールするためであろう．岩波文庫に「闇の奥」として中野好夫訳で出されている．直訳すれば「闇の心」となることは中学生でも判るが，それでは闇を擬人化した雰囲気でダメである．「闇の奥」とした訳者の気持ちは判るが，奥，はハートとは違いしっくりと来ない．闇，という謎っぽいものの，心臓部分，最も暗い闇の中心，といった雰囲気が原題にはある．適訳は日本語では無理なのであろう．

中味は，アフリカが暗黒大陸と呼ばれていた時代に，暗黒大陸の真ん中で象牙を集めていて殆んど連絡の無くなった男，クルツ，をコンゴー河を遡って探しに行く主人公の語り，という形式の小説である．暗黒大陸の真ん中の暗黒さ，黒人と白人のゲンナリする関係なども，ダークネス，というタイトルに含まれているようだが，一番のダークネスは，クルツ，の心の闇ではないかと思える．人間の心を覆う闇みたいなものをクルツという謎めいた，俗物かつ超人みたいな人物に凝縮しようとしたらしい，と勘ぐって何度か読んでみたけれども，結局読後感は「いいタイトルだな」である．

クライマックスを書いてしまうのは全く気が引けるけれども，英語の原文を見る人は殆んどないと思うので，訳の難しさの例としてこの小説の「決め」の一言を紹介しよう．クルツにはパリに残した婚約者がいる．クルツは暗黒大陸の中心から「救出」されてコンゴー河を下る途中で死んでしまい，語り手の主人公が遺品を届けに行く．主人公がクルツの最後を看取った事を知り婚約者は，いまわの言葉，を聞かせて下さいとせがむ．そこが問題なのだが「The horror！ The horror！」と叫んだクルツの最後の言葉を告げようとして，主人公の口から出た言葉は「The last word he pronounced was-your name」だった！

Horrorはホラー映画のホラーだから「怖ろしい！怖ろしい！」と言った雰囲気らしいけれども，中野は「地獄だ！　地獄だ！」と訳している．クルツは死にのぞんで人生を総括した，と憶測するならば，地獄だと訳すのは少し面白くない．けれどもクルツの頑迷さを察すると死ぬ時に怖がったという印象も拙いかもしれない．自分が怖ろしいのではなくて，お前達，この世は怖ろしい場所だったよ，とか言ってる雰囲気と取ったけれども，ご不満の向きは，岩波文庫を読んで下さい．

さて，前置きばかり長くなったけれど，言いたいことは，所詮英語をいくら勉強しても，とてもまともに英語の本を読むことさえ無理なんだということである．中野好夫も，あとがき，にこの岩波文庫の訳（1958年）は前訳（1940年）が間違いだらけだったので，すっかり訂正したと記している．そしてこれでも自信がないので，誰かもっといい訳が出来る人はやって下さいとしている．中野好夫にしてこの程度の英語力である，専門家になるのでなければ，外国語はいくら努力しても大したレベルになることを最初からアキラメるが勝ちである．アキラメたとたん，どんな外国語も一挙に親しみが湧いて，原典を覗いて見る気になり，得るものが大きくなる．

今英語教育が持てはやされて，小学校から英語教育をしよう，なんて動きがあるらしいけれども，愚の骨頂とはこのことを言うと思う．英語が大切だと主張する人達は，ガイジンに混じって会話を出来ないので，自分も英語ができたらなあ！　などという全くお門違いの嘆きを楽しんでいるのではないか？　会話に入れないのは英語のせいでなく，会話するネタが無いか，話の内容が違うだけなのである．会話には向き不向きがあって，話し上手な人は言葉を知らなくても平気で話を弾ませることが出来る．会話は会話力できまる，語学力ではない．

もっというならば，最近大学でも論文は英語で書かないと世界で認められないなどと学生に説教する先生が結

構いる．小生も恥ずかしながら昔はそんな気持ちで英語の論文を書こうとしてあせっていたけれども，本当にオリジナルないい仕事なら何語で書いてもいいものはいいとタカをくくるべきだと今は思っている．最近も論理学の英語の本に引用してある肝心カナメの論文が日本語の古い論文だったが，早速原典をみるとたった一頁にちょろっと式が書いてあるだけだった．大学の先生も学生に説教するなら，先ず自分の納得出来るいい仕事をすることを教えるべきで，何語で書きなさい，などと下らんことを言うのは本末転倒というものである．

日本語が判らずには英語も，どんな外国語も判るわけが無い．日本語を深く理解してこそ外国語の理解も出来るようになる．英語の教育なんてせいぜい中学からで充分で，小学校の大切な時期に異文化の言語を教えるくらいなら，前節に書いた良寛さんの事蹟でも教えたらどうだろうか？　文部科学省はそんな事も教えないでガイジンと何を喋らせようというのでしょうかね．

4. 王者的学問と奴隷的学問（哲学でいくか，科学でいくか）

学問はどんな学問も同じで，別に序列があるなんて考えてみなかったが，アリストテレスは，上位の学問とか王者的学問があり，それに対して，付随的な学問，奴隷的な学問があると「形而上学（けいじじょうがく）」に書いている．王様が貴くて，奴隷は賤しいと思わなければ，学問の貴賤，という話ではないが，アリストテレスは何を言おうとしたのだろう．

アリストテレスの本は多いが彼の発想はいつも，物事の根源，始まり（アルケー）に「こだわり」を持つのが特徴である．「けだし，始まりは全体の半ば以上である」と倫理学の本にも書いている．そうなると，学問の根源はどこにあると言うのだろう？

「形而上学」の第4巻（ガンマ巻）3章に，全ての学問は何かの基礎の上に築かれるもので，その基礎となるものは「公理（axiom）」と呼ばれるものである．と先ず述べて，数学であれ，自然学であれ，公理，すなわち誰が見ても「あたりまえ」な原理の上に築かれるものであるが，それらの学に従事する者は，その「公理」そのものについてそれが真か偽かを語ろうとしない．故に，それらの学者達より上位に立つ学者がいるのであって，上位に立つ学者は「第一の知恵（第一の哲学）」すなわち，公理そのものの考察も含めた実体の全体を全体としてありのままに研究する，と書いている．

要するに，公理，というルールを「あたりまえ」だからと受け入れて，ルールの中で学問を詳しく，細かく，壮大に築く多くの学問は「奴隷的」であることになる．それに対して，「あたりまえ」がほんとにあたりまえか？などと，全く役に立たないことを考えるような学問すなわち第一哲学は「王者的」と言えるらしい．この事はきわめてはっきりと「このような学（第一哲学）は，生活の必要という点では他のいずれの学もこの学以上であるが，この学以上に優れて尊い学はこれ以外には一つもない：第1巻（アルファ巻）2章」と明記されている．

さて，王者的な学問があるらしいことは判ったが，そのような学の考えるべき「あたりまえ」な「公理」とは何だろうか？　「あたりまえ」な事の代表は「矛盾律」と言われるものである．律，などと言う漢字がつくとイカメシイけれども，要するに，矛盾する事柄は認めない，という原則である．「これはAである，かつ，これはAではない」と言われたら誰もそんなバカな事は無い，と断言するだろう．そのとき人は「矛盾律」を受け入れているのである．だから，矛盾律は「公理」としてすべての学問の基礎となっている．つまり矛盾を認める学問など無いわけである．しかし，第一哲学をする者だけは「それホント？」と考えるのであり，そこが「他の学問」と大いに違うところなのである．

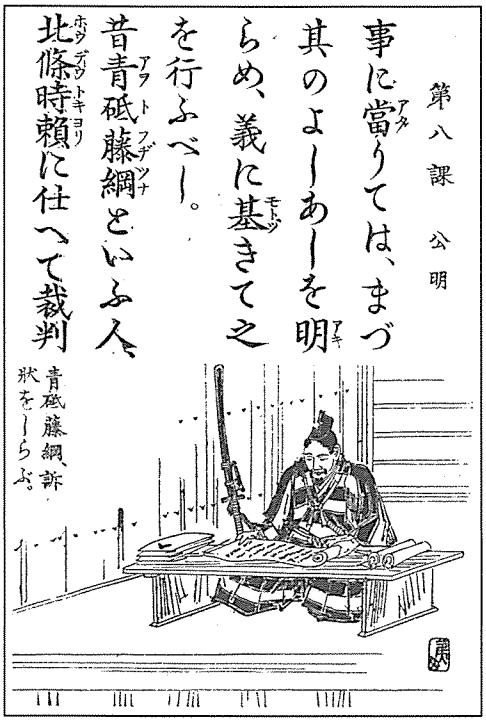
以上に述べた中で，他の学問，というのを一応「科学」と言い換えると，「哲学」と「科学」の関係というか，両者の歴然たる相違が明解になったと思う．「科学」はアリストテレスがいみじくも指摘した通り，生活の役には立つ．しかし，それはあくまでも，無条件に受け入れた「公理」に寄りかかっている便宜的な（奴隷的）方便にしか過ぎない．しかし，ふわふわと人生を面白おかしく過ごすならよいが，少しでも「はてな」と思う人は，面白おかしいことがちっとも面白おかしくなくなって，悩むことになる．

「哲学」は王者的に考える事が仕事で「矛盾律」といえども「あたりまえ」と思わない．つまり解決の無い問題について考えるのものなのである．悩みを楽しむ学，とでも言えるのだろうか？　ちなみに，日本国は「科学技術創造立国」を国是（こくぜ，国がよって立つ基本方針）と宣言している（科学技術基本計画，閣議決定1996年）．優れて尊い学問ではなく，奴隷的学問に全力を挙げる，という宣言ですな，とアリストテレスなら言うかもしれない．

5. 青砥藤綱とイェーリング

十文の銭を誤って川に落とした青砥藤綱は，五十文の銭を使ってそれを拾わせた．人がそれは「小利大損である」と笑ったが，藤綱は「使った五十文は，人の利益となった．十文は自分に戻った，合計六十文が天下の利となったのだ」と答えたので，笑った人は「舌を振って感心した」．

これは太平記（鎌倉時代から室町時代へと世の中が変



實驗日本修身書　巻四　尋常小學生徒用　明治二十六年六月発行

青砥藤綱は小学校で教えられていた

化する激動の時代をドラマチックに描写した歴史書的，古典の大傑作．後醍醐天皇が政権を鎌倉幕府から取り返すあたりがクライマックス，楠正成の活躍などが記されてる．戦争のことが満載されてるのに，なんで太平記なんや？）に書かれた有名な逸話の要約である．

有名な，というのは「有名だった」と書くべきかもしれない．青砥藤綱（あおとふじつな）は前記の良寛よりまだ若者の間での知名度は低い．前述のクラス 90 名の中でたった一人「何となく聞いたような気がします」という者がいたくらいである．歌舞伎「白波五人男」の最後に裁きの決着をつけるのが青砥藤綱ということだから，江戸時代には知らない人はいなかったのだろう．

さて，藤綱の説明を聞いた人は，舌を振って感心した，らしいが確かに感心はしなくても何か意味ありそうな逸話だなとは思える．小生は子供の時にこの話を聞いたが 60 年経っても聞いた時のことを覚えている．行動の意外性がポイントのようであるが，学生にアンケートを求めたら，偉い人だ，意味ない，金持ちにだけ出来ることだ，自分ならしない，などの回答のなかに「自分もよくそんな事をしますよ」というのがあった．これには驚いたが，よく考えるとこの学生は鋭い点を衝いている．自分の持ち物が無くなった時にそれにこだわって家中探すことは誰にも経験がある．百円硬貨をあそこに置いたはずだが無い，となると一時間も探す．マクドナルドの時給でも 850 円なのだから，百円を一時間探したら，青砥藤綱以上の小利大損である．しかし，それは日常的に我々のしていることだった訳である．それをやることの意味を日本的と西洋的の対比で少し考えてみよう．

藤綱の行為の意味は太平記には「天下の利」としてあり，これは一応，納得出来そうだし，昨今の経済学で考えれば景気対策としてこんなことも大いに実行されているようである．ところが，最近知ったことだが，ドイツの法律学者イェーリングの「権利のための闘争」という本に藤綱の事例と全く同じシチュエーションが論じられている．

この本は知る人ぞ知る有名なものらしいが，要するに，権利を守るのは自分であり，待ってても誰もあなたの気持ちを察してあなたの利益を守ってくれはしないと説教している．そして，少し気を許したら，何時の間にかあなたの権利は根こそぎ人に奪われてしまいます．些細な権利の侵害を見過ごすことは，あなた自身の，引いてはあなたの国家の将来を危険にさらすものですと主張している．つまりどんな小さな権利も身を挺して守るべく闘うのがあなたの「義務」なのです．と，誠に簡明直截，単純明快，単細胞これにすぐる者なし，大うけ間違いなし，の発想がピシャリと書いてある．

例として，藤綱の逸話と同じく「水中に 1 ターレル落とした人が，2 ターレル使ってそれを拾うか？」という話を出して説明されている．イェーリングは，この話を聞いて「拾います，という人はいないと思うが，それがイケナイのだ」と述べている．つまり，自国の 1 マイルを他国に侵された時に，何万人の犠牲者がでても戦争して奪い返さないと，結局どんどん侵略されて国が滅びる，1 ターレルを見逃すのは 1 マイルの侵略を許す気持ちに通ずるのだと主張するのである．だから，水に落とした 1 ターレルはあなたのお金の所有権を守ると言う意味で，2 ターレル使って回収するのは「義務」ですよ，立派な国家はそのような国民によって支えられるのです，と書いている．

藤綱派は「天下の利」を思って銭を拾う，イェーリング派は「自分と自国の権利」を守るために銭を拾う，となるようである．そうなると，前述の良寛ならどうするか？　と考えるのも面白いかもしれない．「誰かが拾うかもしれないから，ほっときましょ」と言うのが良寛派である，と仮にしよう．するとやはり，良寛派は平和的である．

藤綱は五十文で先ず松明を買って照明したらしいから，天下の利の為に無駄なエネルギーを浪費したことにはなる，景気のためにエネルギーを大量使用する社会の先例かもしれない．イェーリングの著書「権利のための闘争」には，その「答え」のような本としてヒトラーの

「我が闘争」がある．権利に敏感すぎると何でも自分の権利に見えて来る危険性の例かも知れない．良寛流は出来事をなんでも「受け入れ」てジタバタしない，という哲学なのだろうか？ 昨今の世界の動きを見ると良寛流を広めるのは至難のようである．しかし，本気で考えれば「受け入れる」発想でないと，地球環境保全に必要なエネルギー節約のための抜本的な行動は不可能であろう．

6. 「もがな」：願望をあらわす助詞

最近，環境汚染のデータを「科学的」によく調べると，環境問題は，温暖化を含めて，世間が騒ぐほど深刻な事態ではない，と主張する本が出版され，アメリカでベストセラーになり，日本語にも訳した者が出て，これも売れている．「科学的」というと皆がなるほどと思う点を衝いているのだが，調べてみると一番の主張は「多少環境が汚れても先ず今のままの産業活動を続けて金をかせいで，そのあとで，儲かった一部で手直しをすれば良い」というのである．手直しできる程度の地球環境変化しか起きない，と平気で断言する者は本人がなんと言おうと「科学者」ではあり得ない．

気象や生物活動が如何に複雑なものであり予測が困難かは，数十億羽（今の世界人口くらい）もいたアメリカの旅行バトが，科学者の予想を裏切って，乱獲と森林破壊のため数十年で20世紀始めに絶滅した例をあげるだけで良いだろう．こんな本が売れるのは，環境変化が深刻でない事を願望する気持ちを持つ，人間の弱さの現われである．願望は人間の判断を曇らせる最大の原因となることはGMFの所にもすでに触れた．

あまりバカバカしくてうんざりしたので，願望を優雅に楽しんだ我々のご先祖さまの文化遺産をしのんで終わりにしよう．

小倉百人一首のなかで，願望を表わす助詞「もがな」の使われている歌が6首ある．

年代順に挙げる．

三条右大臣

なにしおば あふさかやまの さねかづら
ひとにしられで くるよしもがな

藤原義孝

きみがため おしからざりし いのちさへ
ながくもがなと おもひけるかな

儀同三司母

わすれじの ゆくすえまでは かたければ
けふをかぎりの いのちともがな

和泉式部

あらざらむ このよのほかの おもひでに
いまひとたびの あふこともがな

右京大夫道雅

いまはただ おもひたえなむ とばかりを
ひとづてならで いふよしもがな

鎌倉右大臣（源実朝）

よのなかは つねにもがもな なぎさこぐ
あまのおぶねの つなでかなしも

謝 辞

「役に立たない」NPO活動をご支援頂いている多数の方々に感謝いたします．知人，友人が多いのは勿論ですが，ホームページを見て参加して来る方もいます．多様性の世の中を感じずにはいられません．こんなオモロイことがあるよ，なんて情報をお寄せ頂ければ幸いです．
連絡先，NPOの紹介は下記アドレスに載せてあります．
e-mail enekan@mbox.kyoto-inet.or.jp
http://web.kyoto-inet.or.jp/org/enekan/

蛇足（Snake Legs）

1. Tempus Destruendi Tempus Aedificandi「破壊するに時があり 建てるに時がある」は旧約聖書から，Liber Ecclesiastes，コヘレトの言葉3，（聖書，日本聖書協会）．

「災難に逢時には……」は良寛書簡から，良寛全集下巻366頁，東郷豊治編著，東京創元社(1959年初版)．良寛は曹洞宗の禅僧だったが，寺も持たず和尚の称号さえもなかった．歌や漢詩を作り，独特の書を描き，好んで子供と手毬で遊んだ．多くの人に慕われ，晩年になって，貞心尼という若い尼さんと親しくなり，歌のやり取りをして優雅に暮らしたようである．親しい人達に看取られて死んだあと，近隣のあらゆる宗派の坊さんや，神主も葬式に加わり，雪の中，千人もの参列者があったそうである．貞心尼の書いた良寛との歌のやり取り集「はちすの露」の最後に「貞，くるに似て かへるに似たり おきつなみ，師，あきらかりけり きみがことのは」とある．

地すべり地帯に人が住む話は，「公共哲学9巻」地球環境と公共性，東京大学出版（2002年）原田憲一：将来世代から見た資源・公共性，より引用．そこに，江戸時代に起きた安政大地震の後，鯰を題材にした「鯰絵」が大流行し，始めは鯰を封じ込めるような絵だったが，やがて景気が返って良くなったので「鯰宝舟」が描かれた事が紹介されてる．国家予算の10倍以上の大借金をチャラにするために，大震災をひたすら待っている国がどこかにあるかも知れない．

2. Newsweek September 12, 2003, What Green Revolution?



鯰絵―震災と日本文化．監修　宮田　登，高田　衛．発行所　株式会社　里文出版より
「繁昌たから船」なかき銭　とれるつもりて　ミないさみ　なみよりふえる　手間の　よきかな

「戦戦兢兢　深淵に臨む如く　薄氷を履む如し」は「詩経，小雅：小旻（しょうびん）」にある文句，新釈漢文大系 111，詩経（中）334 頁，明治書院．

3. Joseph Conrad: Heart of Darkness（1902 年初版）．「闇の奥」中野好夫訳，岩波文庫（1958 年初版）．コンラッドは他に「青春」という短編が有名．石炭を積んでイギリスからインドに向かう船に若者（コンラッド？）が乗って初めての航海を経験する話．出航の直前に船からネズミが逃げ出すのを見て，おかしい，と思ってたら果たして航海途中で石炭が発火，救援の船に引っ張ってもらったら船倉に風が入って燃え出して沈没，想像では書けないリアルな緊張と感動，「青春」という題もピッタシ．

4. アリストテレス：「形而上学（上，下）」出隆訳，岩波文庫．Aristotle:「Metaphysics, books I-IX」Translated by Hugh Tredennick, Loeb Classical Library, Harvard Univ. Press.（ギリシャ語，英語，対訳）．引用は主に出隆訳によった．

「王者的学」は英訳では「supreme science」，「奴隷的学」は「subsidiary science」とされている．ギリシャ語では，「アルキコタテー」，「フペレトウセス」という語がつかわれ，それぞれ，「支配者の」，「隷属的の」というような意味らしい，別の文章に「ドウロス，奴隷」という言葉もこれに関連して使われている．

「矛盾」を悩まずに認めるのは宗教である．般若心経の「色即是空，空即是色」は論理的には矛盾である．キリスト教でも，神の子であるイエスが死んで蘇った事は「不可能だから確かなのだ（certain because it is impossible，テルトリアヌス：キリストの肉）」と説教されている．結局「哲学」と「宗教」と「科学」とは森羅万象に対する，全く異なったアプローチすなわち「住み分け」であると理解出来る．

5. 太平記巻第 35「北野通夜物語事付青砥左衛門事」に滑川に十文落とした話が載ってる．：太平記(三)，日本古典文学大系 36，岩波書店．

藤綱は「青砥稿花紅彩画（あおとぞうしはなのにしきえ，通称，白波五人男），河竹黙阿弥作」などの歌舞伎に判官として登場する．

Rudolf von Jhering: Der Kampf ums Recht（1872 年発表）：イェーリング「権利のための闘争」小林孝輔，広沢民生訳，日本評論社（1978）34 頁に 1 ターレル落として 2 ターレル使って拾う話が出てる．同書表紙に，モットーとして，「闘争のなかに汝は汝の権利を見出すべし」と書かれている．

6.「環境問題に手直しなし」は前掲「公共哲学9巻」“はじめに”参照.

百人一首の解説書としては，江戸時代のベストセラー「百人一首一夕話」尾崎雅嘉著，大石真虎挿絵，が抜群に面白い．一首ごとに詠み人の経歴やエピソードが面白く紹介されてる．岩波文庫上下二冊になって出てる．

Abstract

How useful, is the key word for the assessment of everything in present world. Even in academic society, some people say patent is preferred to the paper publication. Aristotle wrote in “Metaphysics” that philosophy, which investigates the very beginning of everything, is the most divine science, and, although the least necessary, the most excellent. Following are six essays, which are written rethinking the usefulness as the measure of judging our conduct.

1. Ryokan, a Zen Buddhist (1758-1831), wrote a famous letter to his friend after the big earthquake in Sanjo (1828): “When hardship comes, there is no better way to evade it than accepting it”.

2. In reference to the use of the genetically modified foods (GMF), one should aware, while one example is enough to disprove the safety of any technology, it is impossible to prove it safe unless you have infinite time of observation. One should behave, as if walking on thin ice, as it is written in old Chinese poem (Shi Jing).

3. Difficulty of translation of foreign language is discussed referring to the last word by Mr. Kurtz “The horror! The horror!” in Heart of Darkness by Joseph Conrad. It is nonsensical to start teaching English to primary school pupil as the government is trying to do. The most important matter for children is to master Japanese language well. Only after mastering their own language and their own tradition and culture, they may understand subtle expression in foreign languages.

4. Aristotle says philosophy is the only supreme science and other sciences are subsidiary. It seems that present society is all out to go along with the subsidiary learning because these are useful.

5. What would you do if you drop 100 yen into a river at night? Aoto Fujitsuna, a noble samurai in Kamakura era, purchased lanterns for 50 mon and recovered 10 mon he dropped in a river. He rationalized his conduct saying that total of 60 mon was reserved benefiting the whole economy of the society. Rudolf Jhering claimed, in his book “Der Kampf ums Recht (1902)”, that it is your duty to recover 1 thaler dropped in a well by using 2 thalers. Only by doing so you can protect your own right. Negligence of minor rights eventually destroy your crucial rights thus leads to the defeat of your country. Monk Ryokan would have just walked away saying “Somebody will pick it up tomorrow, I gave her a luck!”.

6. Being desirous always misleads the judgment of one's decision. “First we earn money, we can take care of the environment later using only a small part of those money”. Such is a basic idea of a recently published good selling book by a “scientist”. Only by the wishful prospect such book can be written. No environmental degradation can be recoverable. Irreversibility is a rule of universe every scientist knows.

“mogana” is an old Japanese word meaning to be desirous. Our ancestors enjoyed being desirous in very elegant way. There are six poems, each uses “mogana” in Teika Fujiwara's Hyakunin Isshu, one poem by one hundred people. These are splendid indeed but the translation is too difficult for me since I started learning English only in my secondary school.

談　話　室

研究施設紹介
東北大学　学際科学国際高等研究センター

才　田　淳　治*

Center for Interdisciplinary Research, Tohoku University

by Junji SAIDA

東北大学は，開学以来「研究第一主義」，「門戸開放」，「実学尊重」の理念を基に，これまでに数々の教育研究の成果を挙げてきました．これらの設置理念は，例えば最近の総長や研究所長等の書いた種々の文章や挨拶にも頻繁に述べられていますし，東北大学に在籍する教官や事務・技術職員とっての共通のアイデンティティになっていると考えてもいいのでしょう．これらの設置理念の中でも特に「研究第一主義」の伝統は学内にいると色濃く感じることができますし，またそれを如実に示しているものとして附置研究所の充実があげられるかと思います．

私は，金属加工学科在籍時の指導教官が当時東北大学金属材料研究所から移られたばかりの小岩昌宏教授(現，名誉教授）であったことが縁で，卒業後の鉄鋼メーカー在職時とその後の科学技術振興事業団での研究員時代を通して，京都にいた年月よりはるかに長い年月（通算で約10年)を仙台で送ることになりました．この間のほとんどを金属材料研究所の増本健教授(現，名誉教授，(財)電気磁気材料研究所　所長）と現所長の井上明久教授の御指導のもとアモルファス合金及び金属ガラスの研究を行い，平成6年には博士（工学）をいただくことができました．私が特に深く関わってきた金属材料研究所は東北大学附置研究所の中でも代表的存在といっても過言ではないと思いますが，研究に対するアクティビティの高さや，それをサポートする人，設備，環境を兼ね備えた施設であると同時に国内外にきわめて開かれた組織で研究者の交流も非常に盛んです．この仙台での10年間の研究生活は私にとってきわめて充実し，そして日々，新しい発見に満ちた有意義な経験であったと思っており，小岩，増本，井上各先生を始めとして関係各位に感謝を申し上げる次第です．

さて，そろそろ本題に移りたいと思いますが，私はこの4月より金属材料研究所から表題にあります東北大学学際科学国際高等研究センターの助教授として赴任いたしました．こちらにきてまだ5ヶ月程度でセンターのすべてを知り尽くしているわけではないのですが，私が経験した東北大学附置研究所とは違ったユニークな面も多くあり，この度水曜会誌への投稿という貴重な機会を戴きましたので，概略ではありますがぜひ紹介させていただきたいと思います．学際科学国際高等研究センター（Center for Interdisciplinary Research）は，東北大学全学の横断的かつ流動的研究組織を形成し，これまでの学問領域にとらわれない研究（分野横断型研究＝学際研究）を実践する場として平成7年4月に設立された学際科学研究センターを基盤にし，平成15年4月に現組織に改組されたものです．そして学際研究を通じて，次世代の新しい学問と産業の創出に寄与することを設置目的にしています．

旧組織である学際科学研究センターでは，萌芽的かつ将来の発展が期待される斬新な新研究分野をいろいろな学問領域の人が集まって一定期間研究を行うシステム（これをプログラム研究と呼んでいます）を運営してきました．プログラム研究では学内公募に対して応募された研究提案を課題選定委員会で審査し，パスすれば申請者（研究代表者）に3年間本センターの研究スペース，

*東北大学　学際科学国際高等研究センター
昭和61年・金属　卒
(連絡先：Tel：022-217-5752，Fax：022-217-5756，
E-mail：jsaida@cir.tohoku.ac.jp)

研究設備と研究資金（3年間で最大3000万円程度）が与えられ，全く自由な雰囲気で研究を行うことができます．つまり，研究者個々の独自の発想のもとにテーマ提案と研究の遂行が行われる仕組みです．研究代表者は研究遂

プログラム研究一覧（2003年9月現在　進行中のもの）

物質と生命の分子融合研究プログラム

研究代表者　樋口　秀男（大学院工学研究科　助教授）

兼務　神尾　好是　（大学院農学研究科　教授）
兼務　前川　英己　（大学院工学研究科　助手）
兼務　篠原　健一　（大学院工学研究科　助手）
兼務　鈴木　聡　（加齢医学研究所　助手）
協同　杉本　諭　（大学院工学研究科　助教授）
協同　犬飼　潤治　（大学院工学研究科　講師）
協同　久保　裕司　（医学部附属病院　助手）

シリコン表面の化学活性と電極材料への展開研究プログラム

研究代表者　粕壁　善隆（留学生センター　助教授）

兼務　恒川　信　（金属材料研究所　助手）
協同　藤野　豊　（留学生センター　教授）
協同　須藤　彰三　（大学院理学研究科　教授）
協同　渡辺　明　（多元物質科学研究所　助教授）
　　粕谷　厚生　（学際科学研究センター　教授）

強磁場を利用したタンパク質の高品質単結晶育成法の確立と生体高機能性材料への応用研究プログラム

研究代表者　佐崎　元（金属材料研究所　講師）

協同　中嶋　一雄　（金属材料研究所　教授）
協同　圓山　重直　（流体科学研究所　教授）
協同　塚本　勝男　（大学院理学研究科　助教授）
協同　宇佐美徳隆　（金属材料研究所　助教授）
協同　松井　拓郎　（金属材料研究所　中核的研究機関研究員）

フォトニック微粒子のセンシング機能とナノ医療研究プログラム

研究代表者　武田　元博（医学部附属病院　助手）

兼務　大内　憲明　（大学院医学系研究科　教授）
兼務　川添　良幸　（金属材料研究所　教授）
兼務　佐竹　正延　（加齢医学研究所　教授）
兼務　小林　芳男　（大学院工学研究科　助手）
協同　石田　孝宣　（医学部附属病院　助手）
協同　大貫　幸二　（医学部附属病院　助手）

点欠陥制御工学による金属間化合物の新展開研究プログラム

研究代表者　吉見　享祐（金属材料研究所　助手）

兼務　小川　智久　（大学院生命科学研究科　助教授）
兼務　加藤　秀実　（金属材料研究所　助手）
協同　吉川　昇　（大学院工学研究科　助手）
協同　川原　浩一　（大学院工学研究科　助手）

大学における研究戦略と研究・教育のあり方をめぐる基礎的戦略研究プログラム

研究代表者　井原　聰（大学院国際文化研究科 教授）

兼務　静谷　啓樹　（情報シナジーセンター　教授）
兼務　堀江　薫　（留学生センター　教授）
兼務　不破　和彦　（大学院教育学研究科　教授）
兼務　南澤　究　（大学院生命科学研究科　教授）
兼務　仁田　新一　（加齢医学研究所　教授）
兼務　中西　八郎　（多元物質科学研究所　教授）
兼務　中田　俊彦　（大学院工学研究科　助教授）
兼務　葉　剛　（大学院国際文化研究科　助教授）
兼務　劉　庭秀　（大学院国際文化研究科　助教授）

環境保全とクリーンエネルギーの開発・普及に関する技術的・社会経済的条件の解明研究プログラム

研究代表者　大村　泉（大学院経済学研究科　教授）

兼務　重野　芳人（留学生センター　教授）
兼務　長谷川公一（大学院文学研究科　教授）
兼務　明日香壽川（東北アジア研究センター　助教授）
兼務　中澤　重厚（大学院工学研究科　助教授）
兼務　伊藤　豊彰（大学院農学研究科附属農場　助教授）
兼務　劉　庭秀（大学院国際文化研究科　助教授）
兼務　高橋礼二郎（多元物質科学研究所　助教授）
兼務　篠原　久（大学院農学研究科　助手）
兼務　大村　道明（大学院農学研究科　助手）

図1　学際科学国際高等研究センターにおけるプログラム研究
（2003年9月現在進行中のもの）

行に必要な客員教官の招聘や場合によっては非常勤研究員も採用することができ，希望する研究体制にかなり近いものを構築することが可能です．プログラム研究の要件は，複数の分野（部局）にまたがった研究者で構成されていて，先にも述べましたように新学問領域の創成や新産業分野の創出につながることが期待されている斬新なテーマということです．従って，申請者の役職やこれまでの実績はあまり考慮されませんから，特にアイデアと行動力に富む若手研究者には極めて魅力的なプログラムといえるのではないかと思います．研究代表者になれば兼務教官として本センターに籍をおいていただき，元部局で発生していた講義等の用務も軽減され，自身の研究アイデアのもと，まさに名実ともに研究に集中する環境が与えられることになります．もう一つ，教育という観点からも多くの成果がでています．本センターに在籍する学生や研究員はテーマの性格から複数の学問分野から参集しています．彼らが分野を超えて交流し，互いに刺激しあう状況は人間形成や教育成果にも非常にプラスになっています．そのために各種の交流スペースを設け，また居室をパーティションで区切られただけの大部屋にして相互の交流がやりやすいようにしています．

図1には2003年9月時点で進行中のプログラム研究をまとめたものを示します(役職は，申請時のものです)．これらの課題をみれば，一般に言われる工学，医学，理学，人文科学等多岐にわたったテーマが採択されていることがわかるとともに，その研究組織が多くの領域の研究者によって構成された極めてユニークな形態になっていることがおわかりいただけるのではないかと思います．終了もしくは進行中のプログラム研究には，現在東北大学で進められている医工学連携（京都大学でも同様のものがあるように聞いております．）の先駆けとなるようなテーマもあり，その意味でも次代を先取りした研究内容ではないかと考えることができます（詳しくは，当センターのホームページをご覧いただきたいと思います．http://www.cir.tohoku.ac.jp/j/)．プログラム研究は年間4件程度採択され3年間で収束しますが，特に顕著な成果がでておりかつ更なる発展が期待されるテーマには所定の評価と審査を受けた後，引き続き研究を継続できる制度もあります．これまでに16件のプログラム研究が終了していますが，それぞれのプログラム研究は原則として中間時と終了時に学内外の委員による評価を受け，成果についてコメントを戴くとともに今後の研究へのフィードバックをすることになっています．プログラム研究に参画した学内教官は3年間の研究成果をもとに，終了後原則として元部局に戻り更なる展開と飛躍を目指しますし，学生や研究員(ポスドク)は研究によって培われた広範な知識，技能，人脈等をベースに新しい可能性を求めて内外にステップアップしてゆくことになります．このような体制で運営された学際科学研究センター全般の研究活動に対し，平成10年度に外部委員による全体評価が行われ，斬新な運営形態とユニークな研究成果の発信に対して，大変に高い評価を戴くに至りました．

以上のように高い評価をいただいたセンターではありますが，同時に近年の学術分野が多くの分野を巻き込んで急激な進歩を見せ，それに伴う大学への産業界および社会からの多様な期待・要請を考慮すると，さらに高度な国際的学際研究を行う必要性が生じてきました．このような背景から，平成15年度に旧組織を改組し，学際科学国際高等研究センターを新たに設置するに至りました．新組織ではこれまでの基本的な設立理念とその元で実施されてきたプログラム研究は継承しつつ，さらに専任教官を配置してより高度な視点からプロジェクト研究を組織し遂行することを大きな柱としています．このための組織として，6名の研究部専任教官，2名の企画部専任教官と外国人を含む16名の客員教官の他，学内複数部局から多数の兼務教官があらたに研究を推進する体制になりました．図2には組織運営体制を示しています．ちなみに私は企画部の専任教官として，自身の研究活動とともにセンターでの研究企画，評価，広報等を行っています．

本年度は，昨年以前からの継続として7つのプログラム研究を遂行していく他に，社会的に重要な領域である6つの分野，すなわちエネルギー，情報・認識，人間・知性，地域・環境，生命・健康，自然・宇宙を設定し，専



図2　学際科学国際高等研究センターの組織・運営体制

任教官を中心にしたプロジェクト研究やセンター共同研究といった活動を展開していく予定になっています．

また，近い将来，附置研究所間の連携強化を目指したプロジェクト研究や国際学際研究拠点の形成も予定されています．これらの施策により，国内の研究機関において先駆的な役割を果たしてきた本学の分野横断型学際研究システムを国際的に，そしてより高次元に発展させていくこと（高次学際科学研究）を目指しています．



図3　学際科学国際高等研究センターの位置図

私のような若輩の者が言うまでもなく，国立大学の法人化によって大学，研究所そしてセンターにおいても将来のビジョンを見据えた改革や提案が必要になってきました．これまでの実績がどうこうではなく，今後何をアウトプットとして出せるのか，それを社会にどのようにアピールするのかが問われているように感じます．その意味で東北大学の「研究第一主義」の理念を法人化に際して具現化する一つの形が本センターの改組とそこで展開される研究活動ではないかとも感じています．

本センターは現在，学内共同教育研究施設という性格から研究代表者は学内教官にしか開かれてはおりませんが，客員教官や共同研究者等で国内外の研究者が非常に活発な交流を続けています．その観点から，水曜会会員の皆様とも今後多くの分野で研究協力が実現していくことができればと考えています．ぜひ，皆様のご協力をよろしくお願い申し上げます．本センターは青葉山地区の西端にあり，まわりに誘惑されるネオン等もなくてまさに雑念なく（？）研究に没頭できる場所にあります（図3の地図を参照下さい）．仙台の中心部からは少し離れていますが，ぜひ水曜会会員の皆様には来仙のおりに足をお運び下さい．

最後に日頃のご無沙汰をお許し願いたいのですが，今夏約10年ぶりに京都大学を訪問しました折り（前回訪問時は水曜会100周年記念大会で，現在の工学部総合校舎がまだ影も形も無かった時代です．），大学院工学研究科材料工学専攻沼倉先生とディスカッションしていた中で，本誌に執筆するお話をいただきました．沼倉先生には貴重な機会を与えていただき，この場をお借りして感謝申し上げたいと思います．

研究速報

1990年代半ばの大学院重点化に始まる改組により，従来の資源工学教室，冶金学教室，金属加工学教室の各講座は，現在は大学院工学研究科の資源工学専攻と材料工学専攻，大学院エネルギー科学研究科（独立専攻）のエネルギー社会・環境科学専攻，エネルギー基礎科学専攻とエネルギー応用工学専攻，および国際融合創造センターに所属するに至った．さらに2003（平成15）年春の改組により，工学研究科資源工学専攻に所属していた研究室は社会基盤工学専攻と都市環境工学専攻に所属することとなった．

重点化された大学院は「専攻」から成り，専攻内の各研究室は「専任講座」あるいは「基幹講座」を構成する複数の研究「分野」のいずれかとなっている．関係研究室の所属と名称は現在次の通りである．研究速報はこの順に掲載した．後出の卒業生・修了生名簿においては，見出しとして単に講座名あるいは分野名のみを示した．

〈旧資源系〉

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	（芦田教授）
	地質工学分野	（松岡教授）
	地殻開発工学分野	（齋藤教授）
	ジオメカトロニクス分野	（花崎教授）

工学研究科　都市環境工学専攻

地殻環境工学講座	（専任講座）	（青木教授）

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	宇宙資源エネルギー学分野	（石井教授）
	資源エネルギープロセス学分野	（宅田教授）
	資源エネルギーシステム学分野	（楠田助教授）

〈旧金属系〉

工学研究科　材料工学専攻

材料設計工学講座	（専任講座）	（足立教授）
材料プロセス工学講座	表面処理工学分野	（粟倉教授）
	プロセス設計学分野	（河合教授）
	マイクロ材料学分野	（村上教授）
材料物性学講座	量子材料学分野	（和田助教授）
	結晶物性工学分野	（山口教授）
	構造物性学分野	（田村教授）
材料機能学講座	材料物理学分野	（長村教授）
	材質制御学分野	（牧教授）

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	（石原教授）

エネルギー科学研究科　エネルギー応用科学専攻

エネルギー応用プロセス学講座	材料プロセシング分野	（岩瀬教授）
	高温プロセス分野	（鈴木助教授）

エネルギー科学研究科　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	（吉田教授）

国際融合創造センター

	エレクトロニクス分野	（酒井教授）
	材料デザイン分野	（落合教授）

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14年度の主な研究タイトルと内容を示す．

格子ボルツマン法を用いた岩石間隙内の流体挙動解析に関する研究

EOR技術の研究の一環として，格子ボルツマン法を用いた石油貯留層内部の流体挙動解析を行った．まず，フラクチャを対象として流体流動解析を行い，3乗則からの乖離に関するパラメータの導出を行った．また，多孔質岩石においては，続成作用を考慮にいれた流体流動解析を行い，孔隙率と浸透率の関係は続成作用の違いによって種々変化することを明らかにした．

個別要素法による不連続面を伝播する波動のシミュレーション

個別要素法では地殻媒質を仮想ばねでつながれた粒状体から構成されていると考える．これらの仮想ばねの及ぼす力による粒子の運動方程式をタイムステップごとに解いていくことで波動伝播をシミュレートすることができる．本研究では，その応用として不連続面をモデル化して波動伝播のシミュレーションを行い，それらの受振記録から不連続面における透過係数，反射係数を算出した．

粒状体モデルによる弾性波波動伝播と破壊現象の数値シミュレーション

岩盤のような媒質に対して個別要素法を用いることによって，弾性波の伝播現象，ホプキンソン効果，発破による破壊などの波動が作り出す破壊現象のシミュレーションを行うことができた．この結果は連続体内で生じる破壊，破断現象の解析において非常に興味深い結果である．

波動特性を考慮したフレネルボリューム法トモグラフィ解析

フレネルボリューム法トモグラフィは波動の周波数を考慮できる手法である．本研究では，波動論および周波数領域における波動のモデリングから波動の特性について検討した．そこから導かれた波動特性を考慮した重み係数を設定した．数値実験およびモデル実験データの解析を行った．その結果，高い周波数を用い重み付けの範囲を拡大することにより解析精度が向上した．

3次元浅層反射法による堤体内部の空洞調査

河川堤体内部に空洞が存在すると堤体の強度が低下し，最悪の場合異常降雨時などに破堤に至る危険性がある．そのような災害を未然に防ぐために，3次元浅層反射法による堤体内部の空洞調査を行った．堤体内部に直径30および50 cmの空洞を設置し，S波浅層反射法を行って，得られたデータを処理・解析した．その結果を3次元可視化表示することにより，空洞の連続性をとらえることができた．また，2次元有限差分法による数値シミュレーションを行い空洞の大きさと反射振幅との関係を明らかにした．

海洋MT法によるリモートリファレンス処理の有効性に関する研究

近年開発された高精度の海洋MT法装置を用いて，福島沖の日本海広域の構造調査が行われた．海洋MT法のデータをサンプリング同期，時刻同期，適切なパラメータの抽出を行うことにより，従来の陸上MT法のデータと同様のMTパラメータを算出した．海洋MT法のデータを陸上のサイトのリモートサイトとして解析を行うことにより，解析の精度を向上させることができた．

エアスパージングによる空気移動領域の比抵抗法によるモニタリング

汚染土壌・地下水の浄化工法の一つであるエアスパージングにおいて，浄化効果が期待される範囲（空気移動領域）を正確に把握することは，工法の効率向上・経済性において非常に重要である．本研究では空気流れの可視化・有効な電極配置の決定のための数値実験，およびガラスビーズと塩水で作った模擬土壌を用いた室内実験を行った．模擬実験から得られた結果を逆解析することによって得られた比抵抗分布図は，実験モデルをよく再現したものとなった．

地中レーダの分解能の限界に関する基礎的研究

本研究の目的は，数値実験による地中レーダの分解能の検討です．高い周波数の電磁波が，どのように地中を伝播するのかをシミュレーションし，さらに受信記録から地下の物性値を解析した．逆解析においては，周波数を大きくすることによって振幅は減衰するが，送信点，受信点の配置によってどれくらいまで周波数を大きくできるかを検討した．

屈折法走時トモグラフィに関する研究

屈折法による地下構造の解析は土木工学分野で最もよく使われる手法である．しかしながら従来からの手法は，比較的単純な層構造の深度・弾性波速度の把握にとどまり，より複雑かつ，3次元構造の解析にはトモグラフィの手法がより適切と考えられる．本研究では，アイコナール方程式によるアルゴリズムを用いることによって3次元の計算を非常に効率よく行うことができた．この計算手法を用いて，2次元と3次元モデルの比較を行い，本手法の有用性を示した．

教　授　芦田　譲
助教授　菅野　強
助　手　真田　佳典

工学研究科　社会基盤工学専攻

地殻工学講座 地質工学分野

1. メタンハイドレート賦存量評価法に関する研究

メタンハイドレート（MH）とは低温・高圧下で水分子とメタン分子が篭状の構造を形成している状態を言う．近年，MHは大陸縁辺域・永久凍土域など，自然界に広く存在することがわかってきた．このMHは，地球温暖化の影響因子および将来のエネルギー資源として注目されている．したがって，MHの賦存域・賦存量を正確に把握することが今後，環境問題・エネルギー問題を議論する時には必要不可欠になると考えられる．本研究では，その端緒としてMH層の地質モデルを構築し，このモデルに対して地震波の応答を知るため，1次元波動伝播シミュレーションにより検討を行った．このモデル作成に際して検討を行った結果，物理検層データやMHコアから，MHは未固結堆積物中にランダムに分布していることがわかった．そのため，本研究においては，MH層はMHが高濃集している高速度ユニットと未固結堆積物からなる低速度ユニットのランダムな互層であるとした．このモデルは，反射法地震断面の特徴的な強振幅逆位相の反射面，海底擬似反射面（BSR）の周波数依存性をシミュレーションでき，MH層の岩石物理モデルの基礎としうると考えられる．今後，ブランキング等のMH探査特有の現象について検討を行い，モデルの改良，2次元化を進め，P波速度分布とMH濃集率の関係を明らかにしていきたい．

2. ボーリングコアを利用した評点方式による岩盤分類基準の開発

岩盤分類は岩盤の地質学的な性状や工学的性質などを理解する際，利用されている実務的手法である．従来，我が国では，記述方式や組み合わせ方式が利用されているが，海外では多数の分類要素を定量的に取り扱えるRMR法などの評点方式を用いている．そこで，本研究ではボーリング柱状図作成手法として定着しているJACIC様式を用いてダム基礎岩盤調査データを用いて，RMR法に基づく評点方式による岩盤分類基準の開発を行った．合わせて，岩の色調に関する分類要素の定量化も行った．まず，剪断強度と色調の関係は，L＊a＊b＊表示系において，b＊値の相関が高いことが分かった．次に分類基準開発については，ボーリング柱状図から必要なデータを取り出し，数量化II類にて解析を行った．その際，的中率の向上を目指し，分類要素の取捨選択と区分の見直しを行いながら解析を繰り返した．その後，解析の結果を考慮にいれて評点を設定した．これによると，閃緑岩における分類基準的中率は93.4%であった．以上のことから，評点方式にて岩盤分類を実施することが可能であると考えられる．

3. 節理群区分における最適クラスタリング方法の検討

集合体として岩盤の工学特性に強い影響を与える節理の分布性状を適切に把握するには節理を群ごとに評価する必要がある．この適切な群区分手法の確立を行うため，本研究では階層的クラスター分析手法を用いて群区分を行い，最適手法の検討を行った．このクラスター分析を行うためにはクラスター間の距離の定義方法が重要であり，①最近隣法，②最遠隣法，③群間平均法，④郡内平均法，⑤重心法，⑥メディアン法，⑦Ward法の7手法を用いて検討を行った．検討の際に，あらかじめ岩盤にかかる応力状態から，岩盤に生じるであろう各方向に向かう節理群の分布状況を，方向分散，トレース長，開口幅について推定し，推定された分布状況と最も近しい節理群分布を示した手法を最適な手法とみなした．その結果，クラスター結合によって失われる情報量を最小にするように結合を行う距離の定義方法であるWard法による群区分が最も整合的であった．

4. 軟岩からなる貯水池斜面の侵食予測に関する研究

軟岩からなる貯水池斜面は，気象の影響による風化・浸食や，波浪による洗掘を生じて浸食が進む．これらについて定量的に評価・予測を行い，対策を講じる必要がある．本研究は，調整池建設予定地において，斜面の浸食特性について検討し，将来の浸食を予測した．建設予定地に試験掘削のり面を設け，劣化・浸食の進行状況についてモニタリングを行った．さらに，調整池建設予定地内の既存の農業用貯水池において，湖岸浸食についての実態を調査した．湖岸浸食には表面からの浸食，洗掘による浸食およびスラビングによる浸食があり，この浸食により斜面の崩落が生じる．調査結果を基に3次元有限要素法を用いて波浪洗掘による湖岸浸食のメカニズムおよび崩落時の浸食距離について検討・予測した．解析の結果，湖岸浸食とスラビングによる崩落の繰り返しにより斜面の浸食が生じることが確認された．また，過去の浸食距離は調査データと合致し，次回崩落時の浸食距離の予測も行うことができた．さらに，農業用貯水池の最大対岸距離と浸食高の関係から，調整池建設後には浸食速度が2〜3倍程度になることがわかり，浸食防止対策が必要であると考えられる．

5. 格子ボルツマン法による単一フラクチャ内の流体解析

フラクチャ内の流体挙動は地熱や石油開発においては非常に重要なテーマであり，現在も精力的に研究が進められている．これに関しては実験的研究と同時に数値シミュレーション手法の開発も行われてきた．本研究室では，非常に複雑な境界条件を有する場合の流体挙動を正確に計算できる手法として，近年注目を浴びている格子ボルツマン法の手法開発を進めてきた．この新しい流体計算法の地質工学的な適用問題として，フラクチャの境界面がフラクタルであるときの流動挙動のシミュレーションを行った．3次元フラクチャに対する数値解析手法としては，2次元近似手法であるレイノルズの方程式の解法を用いる手法が知られているが，ここでは上記格子ボルツマン法の適用を行った．その結果3次元の単一フラクチャ内における正確な流動特性の考察が可能となった．さらにフラクチャの浸透率をコントロールする最も主要なパラメータは，開口幅の平均値と同時に，開口幅の標準偏差であることが，本研究と通して明確となった．また平均開口幅の3乗則からの乖離の様子もより明らかとなった．今後は多相の流動解析の手法開発を目指す．

教　授　松岡　俊文
助教授　平野　　勇
助　手　山田　泰広

工学研究科　社会基盤工学専攻

地殻工学講座
地殻開発工学分野

〈システムロックボルトの支保効果に関する研究〉

ロックボルト支保について，一般的な設計手法が確立されているとは言えず，ロックボルトの長さや打設間隔については経験的に決定されているのが現状である．ロックボルト支保の設計を合理的に行うには，ロックボルトがその周辺岩盤に与える影響を明らかにし，その効果を定量化する必要がある．また，実際には複数のロックボルトを打設してシステムロックボルトを形成するため，その支保効果は隣接するロックボルト間の相互作用を考慮に入れて評価されるべきものである．本研究では，全面接着型のロックボルトについて二次元有限要素法解析を行いロックボルトが岩盤に与える影響と複数のロックボルトの相互作用について検討した．また，これらの結果に基づいてシステムロックボルトの支保効果について考察を行った．その結果，複数のロックボルトの相互作用により空洞周辺に圧縮応力帯が形成され，これが空洞の支保効果に影響する可能性があることがわかった．

〈地すべりによるトンネル覆工変状に関する研究〉

これまでの研究により，山形自動車道白鬚トンネルの覆工変状の原因がトンネルを横切る地すべりであることがわかってきた．そこで，地すべりを抑止抑制する方法として押さえ盛土と深礎杭の効果について三次元有限要素法解析を行うことで検討した．ここで，押さえ盛土は，変状が発生している箇所を含む地すべり区間の 1/4 を斜面に沿って厚さ約 30 m で地すべり面の下限から高さ約 70 m まで盛土するものである．また，深礎杭は，地すべり面を貫くように長さを 80 m とし，変状が発生している箇所を含む地すべり区間の 1/2 を 5 m 間隔で 17 本打設するものである．解析の結果，地すべり変位の低減率は押さえ盛土単独で 3%程度，深礎杭単独で 8%程度，それらの併用でも 10%程度と小さく，ここで検討した方法では地すべりの抑止抑制効果をほとんど期待できないことがわかった．このことから，さらに大規模な抑止抑制工法や他の有効な工法の検討が必要であることがわかった．

〈立坑内の鉱石流動挙動に関する研究〉

鉱石の運搬に用いられる立坑において，スムーズな鉱石流動が鉱石の定常的な生産と立坑の維持管理の観点から重要である．しかし，ライニングが施された立坑では，しばしば鉱石の脈動による立坑周辺岩盤の振動や鉱石の詰まりが発生し問題となっている．本研究では 2 次元個別要素法を用いて鉱石の寸法，鉱石間および鉱石ライニング間の摩擦係数，立坑下部の漏斗部の形状を変化させて立坑内における鉱石流動のシミュレーションを行い，鉱石の脈動現象や詰まり現象を再現することを試みることでこれらの現象の原因と防止策について考察した．その結果，鉱石の脈動現象や詰まり現象は，鉱石粒子の寸法と粒子間および粒子ライニング間の摩擦係数に依存して発生している可能性があることがわかった．また，これらの現象の発生を抑えるには，鉱石粒子の寸法を小さく一様にすること，摩擦係数を小さくすることが有効であることがわかった．

〈岩盤不連続面せん断力学特性の寸法効果に関する研究〉

岩盤不連続面のせん断力学特性の寸法効果は，材料強度の寸法依存性を無視すると表面の幾何学的な形状特性によって決定されるものであり，不連続面そのものの寸法よりも不連続面上のかみ合っている凹凸の寸法に依存するものと考えるのが妥当である．本研究ではこのことを確かめるため，かみ合わせ寸法を 2 mm, 4 mm, 6 mm に調整し，それぞれの接触点数がほぼ同じになるように不連続面の大きさを調整したの岩石不連続面供試体モデルを作成してそのせん断試験を行い，不連続面のせん断力学特性に及ぼす不連続面のかみ合わせ寸法の影響について調べた．その結果，かみ合わせ寸法の増加にしたがってピークせん断強度が低下し，せん断変位の増分に対する垂直変位の増分，すなわちダイラタンシー角が小さくなることを確認することができた．また，既に提案している JRC の寸法効果を評価する理論式の妥当性を検討したところ，Barton らが提案している JRC の寸法効果を評価する経験式よりも正しい JRC を決定できることが確認された．

〈炭酸ガスの地層貯蔵に関する研究〉

温室効果ガスである炭酸ガスの大気中への排出量を削減することは緊急の課題であるが，炭酸ガスを地中の帯水層に圧入して貯蔵する方法がその排出量を削減する方法の一つとして有望視されている．しかし，炭酸ガスを効率的に貯蔵するためには帯水層での炭酸ガスの飽和拡散挙動，流動挙動を詳細に検討しておくことが重要である．本研究では，多成分系油層シミュレータを用いて帯水層の浸透率と帯水層における圧入位置を変えたケースについてシミュ-ションスタディーを行い，これらの炭酸ガスの挙動について検討した．その結果，炭酸ガスは帯水層全体に広がることはなく帯水層の圧入地点上部に高密度に蓄積することがわかった．また，炭酸ガスの拡散は鉛直方向の浸透率に大きく影響され，水平方向の浸透率にはあまり影響されないことがわかった．今後，さらに多くのケースについてシミュレーションスタディーを行い，詳細に検討していく予定である．

教　授　齋藤　敏明
助教授　朝倉　俊弘
助　手　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

吊橋ハンガーロープ端末固定部の非接触超音波法による劣化検査

当研究室では，本四架橋などの大型吊橋を対象として，その橋桁を懸吊しているハンガーロープ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きた．昨年度までに，ハンガーロープの通常部分については，全磁束法と名付けている磁気検査法によって，その腐食劣化の程度を鋼実質断面積の減少量として，しかも全長に渡って定量的に評価できることを，検査装置の製作，実橋にての検査を通じて実証した．また，検査対象ロープを取り外して，全磁束法による検査結果が信頼のおけるものであることを確認した．今年度は，現場管理においてその腐食劣化が最も危惧されており，全磁束法の適用が困難なハンガーロープ端末部の検査法として，超音波反射法の適用を試みた．ワイヤロープは細い素線の集合体であって，一般の接触式変換子によっては，効率良く超音波をロープ内に導入することも，また検出することも困難であるため，磁歪効果を利用して波動の発生・検出を非接触で行う方法について，現地実証試験を行った．大鳴門橋における試験の結果，この方法が大型吊橋のハンガーロープ端末定着部の検査に利用できるものであること，すなわち，端末固定部からの反射波の性状から，その劣化程度がおおよそ評価できることが示された．

レーザードップラー振動計を用いた超音波速度分散特性の精密計測

近年，対象にレーザー光を照射しその反射散乱光のドップラーシフトによって対象表面の微小な振動を観測する方法が注目されている．この方法は，従来の圧電変換子にはない優れた特徴，すなわち，非接触であって対象表面の振動を乱すことなく忠実に計測することができ，かつ，その周波数帯域がかなり広いという特徴を持っている．当研究室では，このレザードップラー振動計（LDV）をつかった超音波伝播挙動の精密な計測と，その非破壊評価への応用について研究している．昨年度は，基礎的な検討として，以下の3つの事柄について確認した．1）LDVとスキャニングミラーとの組み合わせによって，材料表面の波動の伝播を2次元動画像として観測できることを示した．2）また，再帰反射シートを対象材に貼付し，レーザー光を異なる複数の傾斜方向から観測することで，表面の動的な変位からP波，S波などのモード分離が可能であることを示した．3）さらに，板材を対象に，波動の伝播方向に複数個の観測点を設けることで，検出波動記録群から板波表面波の速度分散特性を求めることができ，その結果が理論速度分散曲線と良く一致することを確認した．

電気ポテンシャル法による欠陥イメージングのための逆投影法

材料表面において任意の2点間に通電を行ったときの表面電位分布の計測値から，材料中に含まれる欠陥の位置や大きさを求める問題，すなわち電気ポテンシャル法欠陥イメージングは，いわゆる非線形逆問題である．したがって，欠陥形状などのパラメータ推定には，適当な初期値からはじめる繰返し最適化手法に頼らざるを得ない．当研究室では，その非線形最適解が，初期値に大きく依存するものであることを念頭に，より合理的な初期値の選定の方法として，X線CTと同様なバックプロジェクション法の開発に取り組んでいる．電気ポテンシャル法の場合，その電流経路が直線ではないため，X線と全く同様の方法は採用できないが，幸い2次元問題に限定すれば，複素関数の利用によって，その電流場を関数表現し，部分的な比抵抗変化による電流場の乱れを，摂動場として理論的に定式化できる．したがってその解にもとづいて，観測された表面電位の異常を，等ポテンシャル線上に逆投影することが可能となる．本年度は，複数欠陥を有する円形導体について，この方法が有効であることを確認するとともに，逆投影像から欠陥の初期推定を行って，最終的に欠陥の形状と大きさ・方向を求める一連の逆解析法の手順が，有効に機能することを確認した．

ロープウエイにおける索条システムの静的つりあい形態の逐次連成解析

運転速度の上昇や搬器の大型化に対する要望が増すにつれて，今日のロープウエイ設計においては，支索・曳索・搬器などが運行に伴ってどのような動きをするか，精度良く予測できることが必要となっている．当研究室では，このようなロープウエイ全体系の動的挙動を予測するシミュレーション法の開発に取り組んでいる．そのなかで本年度は，支索軌道上の任意の位置に搬器が存在するときの支索・曳索・支柱・懸吊器からなる索条システム全体系の静的なつりあい形態を簡便に求める方法について検討した．索条を複数の線状要素で近似表現する離散化解析手法ではあるが，重錘緊張された索条が，搬器の移動によって支柱間に繰り出されて長さが変化する状況を，通常の有限要素法的な考えで解析することは困難である．そこで，新たなつりあい形態を獲得するには支柱間にどれだけの長さのロープが必要かという，要素長を未知数とする非線形連立方程式の形に定式化する方法を提案した．さらに，索条システムという支索軌道と曳索形態が連成する系を，支索と曳索の方程式系を交互的に解き，その収束解として，最終的な系全体のつりあいを求めるという手法を提案した．開発したシミュレーション法による計算結果と，八海山ロープウエイでの実地測定，すなわち，支索重錘の上下動や，曳索駆動トルクなどの計測結果とを比較したところ，非常に良い一致が認められた．

教　授　花崎　紘一
助教授　塚田　和彦
助　手　李　　令琦

工学研究科　都市環境工学専攻

地殻環境工学講座

地殻環境工学，資源開発システム工学，地下開発工学を主たる専門分野とする当講座においては，地下構造物の建設と地盤環境に関する種々の研究テーマを取り上げ，研究を推進している．以下に研究速報として研究テーマ6例について，研究内容の要旨を報告する．

1. Geoinformaticsの利用による統合的地質モデルの構築法に関する研究

高レベル放射性廃棄物処分サイト建設においてはサイト特性調査や建設・操業時の品質管理，並びに地質環境条件のモニタリングを目的として，計画段階から建設段階そして保守段階に至るまで多岐にわたる調査及び計測が実施され，サイトの力学特性や透水性等の岩盤特性に関する大量の情報が取得され，常に更新されることになる．したがって，取得されたデータを逐次蓄積すると同時に，処分サイトの岩盤特性を体系的に評価し，迅速に可視化可能な情報データベースを構築する必要がある．そこで，本研究では高レベル放射性廃棄物処分場の建設に際して考えられる課題を想定して，Geoinformaticsを用いた岩盤特性の評価及び統合的地質モデルの構築について検討を行った．

2. 地山の比抵抗探査結果を用いたトンネル湧水予測システムに関する研究

トンネル湧水の問題はトンネルが地下水面下に施工される限り避けられない問題であり，トンネル工事の成否を左右する重要な要素ともいえる．トンネルへの湧水は地山の性状を著しく劣悪にし，切羽の作業能率や坑内運搬能力を著しく低下させるなど，設計・施工に大きな関わりを持つ．したがって，事前に湧水予測を行い，多量の湧水が生じる可能性が生じる可能性がある箇所には対策を講じる必要がある．そこで本研究では，簡易かつ一次的近似として十分な精度で湧水予測を行うシステムを提案することを目的として検討を行った．

3. 動的注入工法による低透水性岩盤へのグラウト注入効果に関する研究

高レベル放射性廃棄物の地層処分施設などの岩盤地下貯蔵施設では，遮蔽性・長期安定性といった貯蔵施設としての高度な機能が要求される．そのため，これまで岩盤改良の対象とされなかった低透水性岩盤の微小亀裂へのシーリングが必要となる．そこで，動的注入工法によるグラウト注入メカニズムを実験及び理論解析から明らかにし，それに基づく効果的な注入仕様の決定方法を明確にすることを目的に検討を行った．

4. 動電学的土壌浄化技術における重金属の浄化促進効果に関する研究

動電学的土壌浄化法は，pHに対して緩衝性を示す地盤に対する適用は困難であり，また，浄化に比較的長時間を要するという課題をもつ．本研究では錯形成反応を利用することによる緩衝性地盤での浄化促進及び透水性の比較的高い地盤での電位勾配と動水勾配の併用による浄化促進について実験的に検討した．

5. 大断面トンネルの3次元地質モデル及びその力学特性の評価

掘削断面積が200 m²にも及ぶような大断面トンネルを掘削する際には，天端部や側壁部の崩落などの安全対策が特に重要となる．そこで本研究では，これらの対策を効率的に実施，及び合理的な支保の選定を行うために，TBM掘進や反射トモグラフィによって得られるデータから，大断面トンネルの力学特性を精度良く評価する手法の検討を行った．

6. 岩石の破壊現象と微小破壊音に関する基礎研究

地下発電所等の大規模な岩盤地下空洞を高地圧下に建設する場合，合理的な空洞を設計するには掘削による応力変化に伴って形成される緩み領域の発生・進展を正確に検知する必要がある．そこで本研究では応力変化に伴う微小亀裂の形成メカニズムを解明するために，微小破壊音（AE）に着目し，破壊の進展と微小破壊音について基礎的な検討を行った．

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科　エネルギー応用科学専攻

資源エネルギー学講座
宇宙資源エネルギー学分野

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

1)　気泡と微粒子の衝突に関する数値的研究

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

2)　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 μm）-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 μM 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．

3)　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．

4)　リサイクル要素技術

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．

5)　非平衡エネルギー材料プロセシング（地上実験）

太陽電池発電や電気自動車の普及をめぐって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非平衡電気化学プロセシングに期待が集まっている．ULSI 電析銅配線技術，金属ナノワイヤー配列，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を in-situ 測定やモデリングにより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．

6)　宇宙ステーションでの非平衡電気化学プロセシング

宇宙空間での非平衡電気化学界面現象の理解はスペースシャトルや国際宇宙ステーション内のエネルギー変換及びライフサイクルの維持からも重要である．落下塔に搭載したレーザー干渉計で微小重力場の電極界面現象をその場計測した．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を検討中である．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についても研究を行いつつある．

教　授　石井　隆次
助教授　福中　康博
助　手　日下　英史

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

チューブハイドロフォーミングの数値解析

チューブハイドロフォーミングは断面積が軸方向に変化する円筒状部品を製造する技術で，従来の成形プロセスと比較すると，複雑な形状部品が成形可能で，部品の軽量化や高強度化，製造工程の削減に貢献するという利点がある．チューブハイドロフォーミングでは，成形金型に円筒管を設置し，その両端を密封し，ついで軸方向に力を加えつつ，円筒管内に流体を注入していく．円筒管は注入された流体から受ける応力によって変形し，型どおりの部材が成形される．この際，流体の注入量や，軸方向の押出し量の設定が不適切であると，部材に破裂による割れやひびが生じたり，しわや座屈が発生する．本研究では，有限要素シミュレーションによって，チューブハイドロフォーミングプロセスの最適な加工条件を見出すことを試みた．部材の割れを予測するために，本研究室で考案した延性破壊予測手法を導入した．また，数値計算結果の妥当性を検証するため，管直径 22 mm，厚さ 1 mm のアルミニウム合金を用いた実験も行なった．その結果，破裂による破壊が発生する成形限界における変形プロセスの数値解析結果は，実験と良好に一致することが分かった．また，注入流体の圧力を周期的に変化させるハンマーリングと呼ばれる手法を導入すると，圧力を一定に保った場合に比べ，破裂や座屈の発生が起こりにくくなることが明らかになった．さらに，ハンマーリングの周波数も重要な因子であり，周波数が低い場合は，成形性向上の効果が期待できないことも分かった．

（井上　大輔，現新日本製鉄）

加熱固体壁面に連続衝突する液滴の変形挙動

液滴群を高温固体面に衝突させ，その表面を冷却する技術はスプレー冷却と呼ばれ，様々な素材製造プロセスで利用されている．その冷却能を高精度に予測するには，微視的な観点から物理現象を詳細に理解することが必要不可欠である．これまで，単一液滴と固体面の衝突に関する研究が数多くなされているが，それらの研究で得られた知見をスプレー冷却の流れに適用することは残念ながら出来ない．その理由は，実際のスプレー冷却では冷却面近傍で液滴同士の相互干渉が頻繁に起こるので，単一液滴衝突と比べて，はるかに複雑な流れになっているからである．そこで，本研究では複数の液滴を固体面に衝突させ，液滴の相互作用効果を明らかにすることを目的とした．まず，液滴間距離，固体表面温度が液滴の衝突およびその後の変形挙動に及ぼす影響を実験によって観察した．液滴は直径約 0.5 mm の水であり，衝突速度は約 4.0 m/s である．その結果，表面温度が比較的低い場合（＝120°C），先に衝突した液滴が固体平板上で薄い円盤状に変形したときにつぎの液滴が衝突すると，衝突点から王冠状の薄い水膜が形成されることが明らかになった．王冠状の水膜は複数液滴衝突に特有の物理現象であり，液滴の衝突間隔が長くなるほど大きな水膜が形成される．この変形挙動は，数値解析によっても研究し，王冠の形成機構を解明した．表面温度が高い場合（300-500°C）には，固液界面で沸騰が起こり，液滴は固体面で分裂する．したがって，液滴の干渉挙動は非常に複雑である．衝突間隔がある程度長くなると，先に衝突した液滴が分裂，飛散するので，相互干渉はなくなることが明らかになった．

（竹崎　一誠，現新日本製鉄）

高張力鋼板の成形限界予測

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

（坪井　崇浩，現ローム）

教　授　宅田　裕彦
助教授　藤本　　仁

エネルギー科学研究科　エネルギー応用科学専攻

資源エネルギー学講座
資源エネルギーシステム学分野

生物起源珪藻土からの機能性材料用シリカの精製

近年，半導体素子をはじめとする先端技術産業の発展に伴い，機能性シリカ製品の需要は増加しており，今後もこの傾向は続くものと思われる．機能性シリカでは，不純物の存在が特性に影響するため，原料となるシリカには純度の高い水晶や石英が用いられている．しかし，Siの地殻存在度が大きい割には，高純度シリカの埋蔵量は少ない．したがって，将来的に大量に供給が可能な新しい機能性材料用シリカ原料の開発が必要となる．また，機能性材料用シリカは，フィラーなどの用途に応じて球状などの形状が要求されている．そこで，本研究室では，埋蔵量が豊富な生物起源珪藻土を用いて，機能性材料用シリカの精製について検討している．珪藻土に含まれるシリカは，石英などとは異なり非晶質であるため，苛性アルカリに可溶である．また，溶解度は弱アルカリ性付近以下のpHで最小となる．よって，珪藻土をアルカリ溶解後，pH調整により析出したシリカを回収することができる．そこで，シリカ及び不純物の析出に対するpHの影響を調べると，酸性側とアルカリ側ではシリカの析出挙動に違いが見られ，Si，Al，Feは酸性及びアルカリ性領域において，溶解する傾向にあることが明らかとなった．なかでもFeはpH 4以下の領域においてシリカよりも溶存している割合が高いことが判明した．つづいて，機能性材料に適した球状をもつシリカの精製について，アニオン系高分子凝集剤であるポリアクリルアミドを用いて球状シリカを精製する実験を行ったところ，直径5 μm程度のシリカ粒子が確認された．これにより，珪藻土からの機能製材料用シリカ精製の可能性が示唆された．

シリカコーティングによる有害元素の溶出防止

操業を停止した金属鉱山では，流入した雨水や地下水が坑道付近の硫化鉱物や堆積場の廃石と反応し，硫酸性で多量の重金属を含む酸性坑廃水が発生する．この問題に対し，発生した坑廃水への処理方法は確立されてきているが，廃石への直接的な処理は確立されていないため，半永久的な処理と莫大な処理費用が必要となる．そこで，新たな処理技術として化学的に安定なシリカで廃石表面を被覆することで，酸性坑廃水の発生を根源的に防止する手法が考えられている．

これまで本研究室では，シリカ源として珪藻土を溶解した水溶液を用い，廃石表面をシリカで被覆する手法について検討してきた．しかし，シリカによって廃石表面を被覆する際の現象は様々な要因を含み複雑であり，有害元素の効果的な溶出防止のためには，より基礎的な条件における現象を正確に把握する必要がある．そこで，シリカ溶液として珪酸ナトリウム水溶液を，有害元素の溶出源として黄鉄鉱を用いて，シリカによる被覆を行う際の基礎的な現象について検討した．具体的には，用いるシリカ溶液のpHおよびシリカ濃度について条件を変えて実験を行った．

その結果，黄鉄鉱粉末をpH 7付近に調整した高濃度シリカ溶液（シリカ濃度2500～5000 mg/l）中で撹拌することで黄鉄鉱粒子間がシリカによって充填され，その際，処理に用いるシリカ溶液への鉄の溶出量も最も小さいことがわかった．また，用いるシリカ溶液の濃度が大きいほど黄鉄鉱粒子間のシリカによる充填が速やかに行われる傾向が見られた．今後はシリカによって黄鉄鉱粒子間を充填した試料の溶出試験を行うとともに，カラム実験を行い，現場への適応性を評価していく予定である．

光学顕微鏡によるガスハイドレートの生成・分解挙動の観察

エネルギー資源の枯渇問題や地球温暖化をはじめとする環境問題が深刻化する中，クリーンな新エネルギー資源の開発が早急に求められており，そのひとつとしてメタンハイドレートが注目されている．メタンハイドレートは，天然では高緯度地域の永久凍土層中あるいは大陸縁辺域の海底下に分布しており，我が国周辺の海域においてもその存在は確認され，その資源量は莫大であると推測されており，次世代型エネルギー資源として高いポテンシャルを備えている．しかし資源開発に向けては未だ研究段階にあり，経済的な回収には解決すべき種々の問題を抱えているのが現状である．

また一方で，地球温暖化の主要な原因のひとつであるCO_2の排出量削減が国際的課題となっている．大気中のCO_2濃度の増加を緩和する手段のひとつとして，人的に発生したCO_2を回収し，ハイドレート化して深海底に処分することが提案されている．また，メタンハイドレート鉱床からメタンを回収した後の空間にCO_2ハイドレートを貯留する方法も検討されており，これが実現すればエネルギー資源の生産とCO_2の処分が同時にできるという魅力がある．しかしながら，このような手法は未だ構想の域を出ず，その実現に向けて解決すべき課題は多い．

メタンハイドレートを資源として活用し，またCO_2ハイドレートの深海底処分を実現させるためには，それらの生成・分解挙動を正確に把握する必要がある．そこで本研究では，高圧セルを用いることで，メタンハイドレートおよびCO_2ハイドレートの生成・分解過程を偏光顕微鏡により直接観察した．その結果，生成条件や生成する相によって生成する結晶の形状が異なり，その形状によって分解の様子や安定性も異なる様子が観察された．

助教授　楠田　　啓
助　手　陳　　友晴

工学研究科　材料工学専攻

材料設計工学講座

ZnOは，6 GPa以上の高圧負荷でウルツ鉱型構造から岩塩型構造に相転移することが知られている．ウルツ鉱型ZnOはワイドギャップの機能性材料として多彩な応用が期待され，さまざまなドーパントやプロセス条件が検討されている．しかし，岩塩型ZnOについては，高圧実験によりその存在が確認されているが，常圧下まで保持することが困難なため，ほとんど研究はなされていない．本研究では，添加元素を固溶させて岩塩型ZnOを作製する手法に着目し，ZnO量の多い岩塩型試料を合成することを目的とした．

超高圧発生装置を用いて，岩塩型ZnO固溶体を合成することを試みた．その結果，何も添加していない試料では岩塩型構造を得ることは出来なかったが，MgOを20 mol%添加することで常圧下で岩塩型構造を得ることにはじめて成功した．また，NiO添加でも高圧負荷前と比較し岩塩型構造の領域が増大した．同時に，高圧負荷による2元系平衡状態図の固溶領域の拡大を確認できた．また，薄膜作製法を用いて，同様の合成を試みた．添加していないZnO膜はウルツ鉱型構造しかできなかったが，MgOを10 mol%添加したターゲットを用いて岩塩型ZnO膜が作製できた．【国須】

BCC-HCP変態はIV属遷移金属の，Ti, Zrに見られる同素変態であり，また，B2型金属間化合物の変態機構や拡散を理解するうえでも重要であるので，多くの研究がなされている．しかし，疎な構造をもつBCC構造が，高温において安定に存在する原因については未だに議論が分かれている．

そこで本研究では，格子振動の自由エネルギーを精密にもとめる手法を確立し，TiのBCC構造の安定性を，格子振動の効果から調べることを目的とした．

振動の自由エネルギーを精密に求める手法として，本研究では，Suttonらが開発した近似法，phonon-DOS法，Frenkel法をとりあげた．まず，予備計算として，これらの手法からAlの自由エネルギーを計算した．その結果，Frenkel法とphonon-DOS法は信頼のできる計算手法であることがわかった．

TiのBCC構造，HCP構造の基底状態における，それぞれのフォノン状態密度を再現するようなポテンシャルをもちいて，自由エネルギー計算をおこなった．その結果，振動の自由エネルギーは1800 K付近で逆転した．これより，それぞれの結晶構造におけるフォノンの状態を考慮することで，振動の効果が適切に求められ，その振動の効果によりBCC-HCP変態が再現できることがわかった．【立岡】

セラミックス材料では微量元素添加によるキャリア導入，欠陥生成や格子の歪みに伴う局所化した電子状態などが，さまざまな特性発現の起源となっている．本研究では，ホスト材として典型的な酸化物であるMgOとZnOに対してAl, Ga, Inの3価元素を個別に添加し，3価元素添加による欠陥の生成機構について考えた．

理論予測では，第一原理計算法として平面波基底擬ポテンシャル法を用い，雰囲気に依存した欠陥の生成エネルギーを求め，電荷補償機構の雰囲気依存性を評価した．実験による電荷補償機構の評価は，陽電子寿命測定により行った．ZnOへのAl添加，MgOへのAl添加，Ga添加系について，各3価元素を数十at. ppm～数百at. ppm程度微量添加した焼結体を作成し陽電子寿命値を測定した．結果は，ZnOへのAl添加系については，Al添加に伴うZn空孔の生成，及びその雰囲気依存性を理論予測，実験の両面から評価することができた．また，MgOへのAl, Ga添加については，MgO中のMg空孔生成を同様に理論予測，実験の両面から評価することができた．この成果はNature Materials誌に掲載された．【松井】

これまで遷移金属$L_{2,3}$-edgeの解析には半経験的手法が用いられてきたが，XANES/ELNESを局所構造の解析に積極的に活用していくためにはパラメータを用いない非経験的手法が必要となる．そこで，第一原理計算による3d遷移金属$L_{2,3}$-edge XANES/ELNESの解析も行われるようになってきた．本研究では，この第一原理計算に対称性を取り入れることで，より大規模な計算が行えるようにした．

多体効果を取り入れるために1電子近似ではなく多電子の計算を行わなければならないが，多電子系波動関数を表すのにスレーター行列式の線形結合を用いる．この前に，スレーター行列式を2重群のクレプシュ-ゴルダン係数を使って線形結合させ，対称化スレーター行列式とすることで，少ないスレーター行列式で多電子系波動関数を表すことができる．得られた理論スペクトルは実験スペクトルをよく再現することができた．【宮前】

教　授　足立　裕彦
助教授　西谷　滋人，田中　　功

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

シリコンに代わる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化合物半導体は，太陽光から電気エネルギーへの理論変換効率が高い1.45 eVの禁制帯幅であることから広く研究され，n型CdSとp型CdTeのヘテロ接合構造を有する薄膜太陽電池として実用化されている．このCdTe層の電析法を用いた成膜には，歴史的に硫酸酸性の水溶液が使用されているが，Te (IV) イオンの溶解度が小さい欠点がある．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（アルカリ性）の電解浴を開発した．本年度は，得られたCdTe薄膜を導電性基板から不導体樹脂上に剪断転写する手法を開発し，電析CdTe薄膜の伝導度およびHall効果測定を行った．その結果，(i)硫酸酸性浴からの電析CdTeはas-depositedでn型だが，塩基性浴からのCdTeは太陽電池材料として望まれるp型であること，(ii)CdTe薄膜の比抵抗は10^8 Ωcmと高いことが判明した．水溶液からの電析CdTeのHall効果測定に成功したのは世界初である．一方，TEM観察によって塩基性浴からのCdTe薄膜の結晶粒径は約10 nmであると判明した．このように電析CdTe薄膜は一般に，as-depositedの状態ではキャリア密度が低く，結晶粒径も小さいため，これを太陽電池材料とするには，ドーピングによるキャリア増加や熱処理による結晶粒成長が重要となる．本年度は，銅イオンやナトリウムイオンの電気化学ドーピングや，電析後の熱処理，また窓材となるCdSの湿式成膜に関する研究も行った．

ジメチルスルホン浴を用いるアルミニウム複合電析

水溶液から電析することの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，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，引火性が低く，また，平滑な純アルミニウム皮膜を得ることも可能である．さらに，水溶液からは分散性良く共析させることが困難なナノサイズの親水性微粒子も，分散性よく共析させることができる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，多様な分散粒子と組み合わせることにより，新しい機能性薄膜創製プロセスやマイクロマシン技術など応用範囲も広く，当研究室では，多角的な応用研究を進めている．例えば，粒径10 nm程度のTiO_2微粒子を均一に分散性良く共析させることに成功しており，現在その光触媒活性について検討している．

新しいイミド系室温溶融塩からの金属電析に関する研究

不揮発性かつ不燃性といった特徴をもつイオン性液体（室温溶融塩）はグリーンケミストリーを指向する新しい溶媒として，電気化学プロセスや有機合成溶媒への適用が検討されている．溶媒自身がイオンであるため，いくつかのイオン性液体は，誘電率の低い有機溶媒と比べて金属塩の溶解性が高く，耐還元性や耐酸化性に優れ，広い電位窓をもつ．なかでも当研究室では，脂肪族4級アンモニウム陽イオンと含フッ素イミド型陰イオンからなる，電位窓5ボルト以上の疎水性のイオン性液体に着目し，水溶液からは電析できない著しく「卑な」金属の電析溶媒としての可能性を探っている．本年度は引き続き，Zn-Mg系等のマグネシウム含有合金の電析を検討した．また，希土類金属を含む合金薄膜の電析を目標とし，希土類イオンの酸化還元挙動に関する詳細な研究も行った．

塩化銅（I）を含む電解浴からの銅の電解採取

銅の主要資源である黄銅鉱$CuFeS_2$の製錬は乾式法が主流であるが，SO_2ガスの発生とその固定による硫酸の過剰生産の問題を孕んでいる．これに対し，黄銅鉱をCu^{2+}イオンやFe^{3+}イオンなどの弱い酸化剤で浸出し，イオウを元素状で固定する湿式法が研究開発されている．なかでもオーストラリアの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価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．この電解採取ではスポット状のカソードを用いることで銅をデンドライト状に還元析出させて回収する．当研究室では，電解浴組成や電解条件とデンドライト形状および電析銅中の不純物の相関関係を系統的に解明する研究を行っている．

誘起共析型Ni-Mo合金めっき浴の設計とその応用

Ni-Mo合金皮膜は，クロムめっきの代替として有用である．本研究室では，硫酸酸性の電解浴を用いる光沢Ni-Mo合金めっきの研究を行っており，めっき浴の各種スペクトルの多変量解析を用いた浴中の化学種の同定や，その際に得られるみかけの平衡定数を使った半経験的なめっき浴の設計を試みてきた．現在，このめっき皮膜の応用の一つとして，酸化チタン微粒子との複合めっき（分散めっき）を行い，耐食性と環境浄化機能を兼ね備えた新しい皮膜の作製を検討している．その結果，NO_2や有機物の分解活性を有する，皮膜を得ることに成功している．

教　授　粟倉　泰弘
助教授　平藤　哲司
助　手　邑瀬　邦明

工学研究科　材料工学専攻

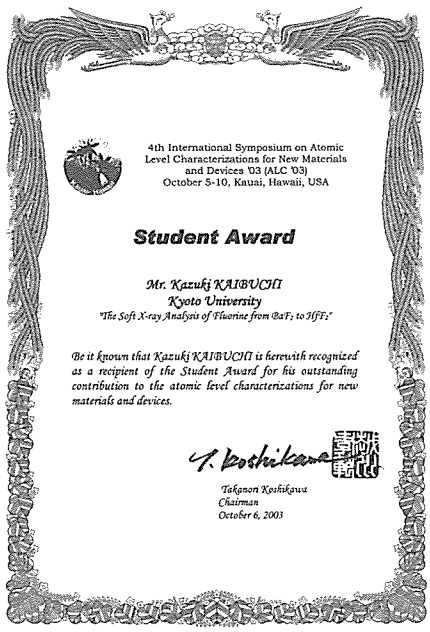
材料プロセス工学講座
プロセス設計学分野

(La, Ce, Y)-(Co, Rh, Ir, Ni, Pd, Pt) 2元系における水素吸収-放出反応の解析

R-M (R=La, Ce, Y; M=Co, Rh, Ir, Ni, Pd, Pt) 2元系について水素吸蔵量，吸蔵速度，吸収-放出特性を測定し，拡張 Hückel 法による解釈を行った．得られた主要な結論は以下のとおりである．(1)水素吸蔵量はMの増加につれて1次の関係で減少する．これは電子の非占有状態数によって説明可能である．(2)水素吸収反応速度はエネルギーの揺らぎと電子の非占有状態数の積とよい相関がある．(3)水素吸収-放出反応は R-M-H 結合エネルギーが大きいとき放出は起こりにくい．(水谷晴美，古謝裕介)

希土類フッ化物のフッ素 Kα 蛍光X線スペクトルの化学結合効果に関する研究

希土類のフッ化物のフッ素 Kα 線には強いサテライトが出現する．またこのサテライト強度は，4f 電子数と相関があるように見える．X線吸収スペクトルとX線発光スペクトルを測定した結果，フッ素 2p 軌道と希土類の浅い準位の交叉回避が化学効果の原因であることがわかった．本研究はハワイ・カウアイ島で開催された原子レベルキャラクタリゼーション国際会議においてスチューデントアワードを受賞した．(貝淵和喜)


4th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '03 (ALC '03)
October 5-10, Kauai, Hawaii, USA

Student Award

Mr. Kazuki KAIBUCHI
Kyoto University
"The Soft X-ray Analysis of Fluorine from BaF_2 to HfF_4"

Be it known that Kazuki KAIBUCHI is herewith recognized as a recipient of the Student Award for his outstanding contribution to the atomic level characterizations for new materials and devices.

Takayoshi Koshikawa
Chairman
October 6, 2003

Fe-Si 系の Si 化学状態の研究

ケイ素鋼や鉄シリサイド ($FeSi_2$, FiSi) では $Fe^{\delta+}Si^{\delta-}$ になっていると信じられていたが，SiKα 線の高分解能蛍光X線スペクトルを測定したところ，ケミカルシフトの方向は $Si^{\delta+}$ であることがわかった．(姿　祥一)

Sn の高分解能蛍光X線分光

錫の蛍光X線スペクトルを金属，SnO，SnO_2 について測定したところ，錫の0価，2価，4価という酸化数から期待されるケミカルシフトを観測できなかった．これは，Sn の内殻に空孔ができたときに価電子の再配置が生じて，いずれも同一の有効電荷になることが原因であることがわかった．(弓削是貴)

エアロゾルの研究

SPring-8 において走査電子顕微鏡 (SEM) とX線顕微鏡の光軸を合わせて同時観察する装置を設置し，電子線とX線で励起した元素分析を粒子別に行えるようになった．またエアロゾルの反応性についてさまざまな研究を行った．(豊田仁寿，山添裕啓)

その他面白い研究

電子レンジを用いてプラズマを作り，X線を発生させる実験 (村島浩文) や，銑鉄一千万円事件の裁判資料を調査して，事件の真相を明らかにする研究 (河合巌) を卒業研究として行った．

教　授　河合　　潤
助教授　田邊　晃生
助　手　石井　秀司
助　手　永園　　充

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

p型 GaN および InGaN に対するオーミック・コンタクト材に関する研究

GaN はワイドバンドギャップ半導体として青色発光素子への応用が期待されており，高出力レーザダイオードの実用化・高信頼化にはp型 GaN に対する低抵抗オーミック・コンタクト材開発が不可欠である．p-GaN に対するコンタクト材の設計手法には，低障壁中間層を利用した多層構造が検討されており，InGaN は GaN に比べてバンドギャップが狭く界面におけるショットキー障壁の低減化が見込まれ中間層として有望視されている．本研究では，p型 InGaN 中間層に対する低抵抗オーミック・コンタクト材の開発を目的とした．MOVPE 法によりp型 GaN 上にエピタキシャル成長させた p-$In_xGa_{1-x}N$ (x：～0.16，キャリア濃度：4×10^{18} cm^{-3}) を基板に用いて，仕事関数の異なる金属薄膜(Pt, Pd, Au など)を真空蒸着法により作製した．p-InGaN 上に成膜したコンタクト金属の仕事関数および熱処理（300～600°C，10分）による電気特性（微分抵抗値）変化により，p-InGaN に対する接触抵抗率の仕事関数依存性が確認されたが，オーム性が得られなかった．AFM や TEM による構造解析から p-InGaN 表面には下地基板（GaN）の格子欠陥（転位，粒界）が原因で生じたV型ピットや凹凸が多数確認された．本研究における高接触抵抗（非オーム性）は，InGaN の表面形態不良に伴うコンタクト材/InGaN 界面での非接触部形成に起因したと示唆された．今後，InGaN 基板の表面ピットの低密度化などの表面形態改善により，接触抵抗率の低減化を目指す．

低温プロセスによるp型 4H-SiC 用 Ge/Ti/Al オーミック・コンタクト材の開発

多形をもつ SiC の中でも，4H-SiC は優れた特性を有することから次世代ハイパワー・高周波デバイスへの応用に期待されている．SiC に対するオーミック・コンタクト材の開発は，デバイスの実用化に向けて急務である．現在，コンタクト材の低接触抵抗化と同様に低温形成(<800°C)プロセス確立は，高信頼性デバイスの開発にとって最重要課題となっている．昨年度は，SiC に対して低温反応する Ni や Co に着目し，800°Cの低温熱処理による界面反応を利用した NiTiAl や CoTiAl オーミック・コンタクト材の開発に成功した．本年度は共晶合金による液相/固相（SiC）間の界面反応を利用して，更なる低温での TiAl 基オーミック・コンタクト材の開発が目的である．TiAl コンタクト材をベースに Ge を第三元素として添加した GeTiAl コンタクト材は，600°Cの低温熱処理によりオーム性を示した．Ge 添加した TiAl コンタクト材は従来の Ni や Co を添加したコンタクト材とは異なり，低温（共晶点：420°C）で Al-Ge 共晶合金の液層を形成することにある．GeTiAl コンタクト材形成の低温化には，SiC と液体 Al-Ge の低温反応が大きく寄与したのは明らかである．また，TiAl 基コンタクト材に形成した Ti_3SiC_2 や Al_4C_3 が界面反応生成物として確認され，GeTiAl についても同様のコンタクト形成機構を有すると推察された．本研究で開発した GeTiAl コンタクト材は，次世代 SiC デバイスへの応用が期待される．

微細 Cu 配線材における抵抗率の材料学的限界への評価

近年の ULSI デバイスの高性能・高集積化に伴い，従来の Al 合金配線材に替わり，より低抵抗な Cu 配線材への移行が進められている．しかし，配線幅 100 nm 世代以降の超微細配線では，配線材の伝導電子の平均自由行程が配線幅と同程度となり抵抗率上昇が顕著になる．昨年度は粒界散乱による抵抗上昇が寄与しない“準”単結晶 Cu 薄膜材の作製に成功し，抵抗率の膜厚依存性および粒界の影響について調査した．本研究では，単結晶 Cu 配線材の抵抗率の配線幅依存性を実測することにより Cu 配線材の「限界」抵抗率を実験的に抽出し，次世代配線材およびデバイス開発に対して Cu 配線材の材料学的限界を検討した．抵抗率測定には，室温粒成長により結晶粒が粗大化した Cu 薄膜材を FIB 装置により選択加工し，配線幅 100～1000 nm の微細配線パターンを作製した．配線幅に対する抵抗率変化は理論モデルによく一致し，単結晶配線において粒界散乱が無視でき配線幅 100 nm の抵抗率は 2.0～2.2 $\mu\Omega$-cm であった．配線材には耐 Cu 拡散用バリア材が不可欠であることから，今後配線幅に対して Cu 配線の有効配線幅は 100 nm 以下になることは必至である．現行の配線設計において，配線微細化に伴いデバイス設計の許容を越える抵抗率上昇が懸念されることが明らかとなった．

スパッタ Cu 薄膜の粒成長挙動におけるターゲット純度の影響

室温粒成長（異常粒成長）は Cu 薄膜材に見られる特有の現象であり，薄膜材/基板界面の近傍に生じる歪みが成長に対する駆動力の一因と考えられる．昨年度，室温粒成長における基板や膜厚などの影響について議論してきた．本研究では，薄膜特有の歪みによる粒成長促進モデルによって Cu 膜中の不純物が室温粒成長に及ぼす影響について着目し，純度の異なるターゲット材（Cu-4N, 6N）を用いて成膜されたスパッタ Cu 膜の室温粒成長挙動を実験的に比較・検討を行った．厚膜（1 μm）において，成膜後室温保持での粒成長に伴う抵抗率の変化は，ターゲット純度に大きく依存しなかった．一方，薄膜(0.1 μm) では 6N-Cu 膜に比べて 4N-Cu 膜の方が成膜後初期に抵抗の減少率が大きく，最終的に抵抗率は低純度 4N-Cu 膜で低い値を示した．微細構造に関して，厚膜ではターゲット純度に関係なく結晶粒が成長したに対して，薄膜において 4N-Cu 膜は粒成長速度が速く，最終的に 6N-Cu 膜より粗大な結晶粒が観察された．以上より高純度スパッタ Cu 膜は室温粒成長が抑制されており，粒成長機構を従来の不純物による粒界ピン止め効果のみでの理解は困難である．一般に薄膜材では歪み緩和機構が粒界・表面拡散クリープであり，室温粒成長は歪み緩和が駆動力として作用していると考えられる．高純度膜では，低純度膜に比べて粒界などに偏析した不純物が少なく，クリープによる歪み緩和が容易であり，粒成長の駆動力が低減したとすれば，本実験結果を理解することができる．

教　授　村上　正紀
助　手　守山　実希，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

一次転移を用いた低温磁気冷凍材料の開発

磁気冷凍は磁気熱量効果を利用する冷凍法である．本研究では水素液化用の磁気冷凍材料の開発を目指し，低温で一次磁気相転移を起こす RCo_2（R：希土類元素）系および Mn_3GaC 系の磁気熱量効果について調べた．これらの化合物では，一次転移点付近で大きな磁気熱量効果が期待される．

低温でフェリ磁性から常磁性への一次転移を示す RCo_2 系においては，$Ho(Co_{1-x}Ni_x)_2$ が 40-100 K の温度範囲で大きな磁気熱量効果を保ったまま転移点を変化させられることがわかった．

Mn_3GaC は 160 K 付近で反強磁性-強磁性一次転移を起こすが，その転移点付近で大きな磁気熱量効果が得られることがわかった．また，高磁場中でも非常にシャープな一次転移が保たれることを反映して，磁場を増したときの磁気熱量効果の温度依存性は台形型になるという特徴的な結果が得られた．さらに，Mn を Co で置換することにより使用温度域を低温側に大幅に拡げられることがわかった．これらの結果は $Ho(Co_{1-x}Ni_x)_2$ および $Mn_{3-x}Co_xGaC$ が，低温域における磁気冷凍材料として有望であることが示している．

R-Ge 化合物の低温比熱

近年，極低温の利用は工学，医学的分野で急速に広がっている．極低温冷凍機としてよく利用されているギフォード-マクマホン（Gifford-McMahon: GM）式冷凍機は冷凍サイクル中に「蓄冷器」と呼ばれる構造をもっている．蓄冷器内には蓄冷材という作業物質が充填されており，冷媒ガスとの熱交換を行う役割を果たす．このため蓄冷材には冷媒ガスよりも大きな比熱を持つことが求められ，大きな磁気比熱を示す磁性化合物が広く使われている．しかし，現在もっともよく用いられている $HoCu_2$ の比熱も 10 K 以下の低温では圧縮状態の冷媒ガスの比熱と比較すると遥かにおよばず，さらなる蓄冷材の開発が求められている．

そこで本研究では，極低温域で蓄冷材開発を目的とし，希土類元素と Ge の金属間化合物に焦点を当て，Er_3Ge_4，Ho_3Ge_4 ならびに擬二元系化合物 $(Er_{1-x}Ho_x)_3Ge_4$ などについて研究を行った．その結果，Ho_3Ge_4 は，ネール点 $T_N=11$ K，磁気再配列温度 $T_{t1}=9$ K，$T_{t2}=6.6$ K の三つの転移点が存在することが確認した．この化合物の比熱を測定したところ，8 K から 20 K の広い温度域で $HoCu_2$ を越える比熱を示していることを見出した．一方，Er_3Ge_4 はネール点 $T_N=6.8$ K，$T_t=3.7$ K と低く，4 K 以下の低温域で用いる蓄冷材として有望な材料である．これらの化合物の擬二元系 $(Er_{1-x}Ho_x)_3Ge_4$ では，Ho の添加量に従って比熱のピーク温度がほぼ線形に変化することがわかった．つまり Ho の添加量を変えることによって，4 K から 10 K の温度域で比熱のピーク値を調節することができ，必要な温度に対応した蓄冷材の作製が可能となることを明らかにした．

$BaVS_3$ の金属絶縁体転移

$BaVS_3$ は六方晶ペロブスカイト構造を持ち，V 原子は c 軸方向に 1 次元鎖，c 面内で三角格子を形成する．古くよりこの物質は 70 K で金属絶縁体転移を起こすことが知られており，そのメカニズムについては様々な可能性が論じられてきた．本研究では低温での磁気構造を明らかにする目的で多数の $BaVS_3$ 単結晶を c 軸方向に配向させた試料について中性子散乱実験を行った．その結果，

1）$BaVS_3$ の c 軸方向のスピン相関が強磁性的であること，2）結晶学的に 2 つに分裂した V サイトにおいてスピン，電荷とも大きな差がないこと，3）磁気構造は c 面内で三角格子 120° 構造に格子不整合の変調を導入した構造であり，c 軸方向にはらせん型構造であることを明らかにした．これらの結果に加えて，最近 X 線回折実験によって見いだされた結晶の超格子構造をふまえ，$BaVS_3$ の金属絶縁体転移について新しいモデルを提唱した．すなわち，$BaVS_3$ は V の c 軸方向の 1 次元的な配列によるパイエルス不安定性と c 面内の狭いバンドに由来するモット・ハバード的な不安定性が協力的に働く相転移であると考えられる．

バナジウム四面体化合物の構造と磁性

立方晶カルコゲナイド化合物 AV_4S_8（A＝Ga, Ge）は，電子論的には $(V_4S_4)^{n+}$ cubane 型クラスタと $(AS_4)^{n-}$ 四面体が NaCl 型にイオン結合した系であると考えられ，$(V_4S_4)^{n+}$ クラスタは磁気的に他のクラスタから比較的よく孤立している．GaV_4S_8 および GeV_4S_8 は V_4 クラスタがそれぞれ 1 つ，2 つの不対 d 電子を共有する系であり，前者は $T_C=13$ K の強磁性体，後者は $T_N=18$ K の反強磁性体であることが知られている．本研究ではこれらの物質について NMR と中性子回折の実験を行い，超微細結合テンソルの各成分を定量的に議論した．その結果これらの化合物では低温域で等方性磁場より異方性磁場が顕著に大きく，かつクラスタ内の近接原子からのトランスファー磁場が比較的大きいことがわかった．すなわち内部磁場の大きさは磁気モーメントの大きさではなく，むしろ磁気モーメントと局所対称軸のなす角度および近接原子のスピンの向きできまっていることがわかった．3d 遷移金属磁性体ではオンサイトの等方的な接触磁場が内部磁場の主因であると信じられているが，本研究では従来の常識とは全く反する結果を見いだした．

助教授　和田　裕文

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

金属ボライド単結晶の力学特性に与えるB原子集合形態の影響

金属ボライドには様々な種類が存在するが，Boronの組成比が増加するに従い，その結晶構造中のB原子の集合形態は次元と対称性が増加する．本研究では金属ボライドの中でも，六角網目構造を持つダイボライド(CrB_2, TiB_2, ZrB_2)，正8面体構造を持つヘキサボライド(LaB_6)，正20面体構造を持つボロンカーバイド(B_4C)の単結晶を用いて硬度，弾性率，塑性変形挙動を調べた．得られた結果は以下のように要約できる．(1) Vickers硬度は金属ダイボライド→ LaB_6→ B_4C とB原子集合形態の次元が高くなるに従って硬度が増加する．(2)いずれの金属ボライドも結合力が強く C_{11} の値は高いが LaB_6 の C_{12} および C_{44} は比較的小さく剪断に対する結合力が弱い．金属ダイボライドのYoung率はいずれもa軸方向の値がc軸方向よりも大きく，層状化合物的な性質を示す．(3) TiB_2, LaB_6 および B_4C 単結晶は圧縮試験温度範囲で塑性変形することはなかったが，CrB_2 と ZrB_2 単結晶は700℃以上で塑性変形する．CrB_2 では柱面a+cすべりが，ZrB_2 では柱面a+cすべりに加え底面aすべりが観察された．

高濃度合金添加TiAl合金一方向凝固材のラメラ方位制御とクリープ特性

TiAl系金属間化合物は次世代の軽量耐熱構造材料として期待され，実用化を目指した研究がさまざま行なわれている．我々は，Al当量という概念をもとに，さらなる特性改善を目指し合金化TiAl一方向凝固材を作製することを行なってきた．本研究では，耐酸化特性に優れるといわれるNb, Taの高濃度添加合金組成につき，一方向凝固によるラメラ方位制御の方策につき検討し，作製した一方向凝固材にクリープ試験などを行った．得られた結果は以下のように要約できる．(1) TaのAl当量は高濃度まで一定と取り扱えるが，NbのAl当量は添加量に応じて変化する．Nb添加のAl当量は高濃度領域で低濃度添加よりも低い値となり，ラメラ方位制御には有利となる．(2)決定したNb, TaのAl当量を用いれば，TiAl合金のラメラ方位制御が可能であり，そのクリープ特性は非常に優れている．(3)これらの試験片耐酸化性はNb, Ta添加量が増えるに従い向上し，8at.%Nbもしくは6Nb-2Ta添加で非常に優れている．

M (M=Mo, Nb)-Si-B系共晶合金の力学特性

高温強度と室温靱性に優れた超高温材料のデザインとして，Moや Nbの高融点金属と Mo_5SiB_2 (T_2)，Mo_5Si_3 (T_1) 相との複合化が考えられる．本研究では，T_2/Mo_{ss} 2相共晶組織と $(Mo, Nb)_{ss}/T_1/T_2$ 3相共晶組織の力学特性と微細組織の関連について検討した．T_2/Mo_{ss} 2相共晶組織の母相は T_2 であり，Moの形状は微細な棒状と棒状組織の間に見られる粒状に2分される．得られた室温靱性値は約11 MPa$\sqrt{m}$ と，T_2 単相材と比較して格段に向上した．棒状Mo相が母相 T_2 相から完全に抜け落ちた跡，棒状Mo相が破断面より低い位置で破断したためできた窪み，高い位置で破断したためできた出っ張りが見られ，T_2/Mo_{ss} 界面がクラック進展抵抗になっている．1500℃での強度は約700 MPaと，他のMo基及びNb基複相材と比較して強度が約2倍と高くなった．一方，$(Mo, Nb)_{ss}/T_1/T_2$ 3相共晶組織では，T_2/Mo_{ss} 2相共晶組織と比較して，高融点金属の体積分率が増加し崩れた層状組織となる．層状の $(Mo, Nb)_{ss}$ は棒状 Mo_{ss} 相ほどクラック進展抵抗とならず靱性値が低くなり，棒状 Mo_{ss} 相を有する T_2/Mo_{ss} 2相共晶合金が高温強度と室温靱性に優れる組合せであることを示した．

Mo_5X_3 (X=Si, B, C) 単結晶の物理的，機械的性質

超高温構造材料として期待される Mo_5X_3 (X=Si, B, C) の基礎物性について結晶構造の観点から比較検討した．Mo_5X_3 は Si, B, Cの分配により正方晶 $D8_l$, $D8_m$, 六方晶 $D8_8$ 構造の1つに結晶する．基礎物性は，Mo_5SiB_2 ($D8_l$) と，Mo_5Si_3 ($D8_m$) と Mo_5Si_3C ($D8_8$) の2グループに分別される．Mo_5SiB_2 は他の化合物より，高強度，高クリープ強度，高いヤング率等を示し，1500℃までで活動可能なすべり系は唯一 (010) [001] のみである．他の2つの化合物では2つ以上のすべり系が1300℃より活動可能となる．熱膨張の異方性は，他の2つの化合物 (α_c/α_a〜2) に対し低下する．一方，ヤング率の異方性は大きく，他の2つの化合物で異方性が小さくなる．電気抵抗の温度依存性はいずれの化合物も高温になるに従い温度勾配がゼロに近づく電気抵抗の飽和現象を示した．Mo_5Si_3C では高い残留抵抗を併せ持つため電気抵抗は温度の変化によりほとんど変化しない．電気伝導でも，Mo_5SiB_2 の室温での電気抵抗は3つの化合物の中で最も小さく，電気抵抗の飽和値に至る温度が最も高いなど，結晶構造による物性の差異が明らかになった．

バルク及び薄膜 Zn_4Sb_3 の熱電特性

β-Zn_4Sb_3 は1.2 eVのバンドギャップを持つ化合物半導体であり，菱面体構造を有するため低い熱伝導率を示し，高い熱電性能が期待できる．本研究では，Inドーピングや薄膜化により更に熱伝導率を低減させる研究を行った．Inドーピングによる効果は小さかったが，薄膜化により無次元性能指数ZTが460 Kで約1.2と，バルク材の約1.7倍となることを見出した．この最大のZTを示す薄膜のゼーベック係数はバルク材と比較してほぼ等しく，電気伝導率は向上したため，出力因子が増加した．電気伝導率の増加は，β-Zn_4Sb_3 薄膜に点在するZn粒子に起因すると考えられる．熱伝導率はバルク材の約半分まで減少した．この薄膜の膜厚は約300〜400 nmで，薄膜を構成する β-Zn_4Sb_3 結晶粒は約50 nmと微細になる．従って，結晶粒界増加による格子熱伝導率の低下が，電気伝導率増加に伴うキャリアの熱伝導率増加を大幅に上回ったためと考えられる．本研究の β-Zn_4Sb_3 薄膜では，従来の単相薄膜で見られた熱伝導率の低減のみならず，薄膜化しても出力因子が増加するという特異な結果が得られた．

教　授　山口　正治
助教授　乾　　晴行
助　手　伊藤　和博

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

今年度は3名の新しいスタッフを迎えた．昨年10月に香川大学工学部へ助教授として転任した田中克志教官の後任に，7月1日付で松田和博助手が着任した．また，4月1日付で宮嶋直樹技官，6月1日付で21世紀COE研究員として坂口佳史氏が着任した．本稿では，研究室で取り組んでいる研究テーマの最近の動向について紹介する．

原子や分子が凝縮して金属になるとき，どのような過程を経て金属になるのか．逆の見方をすれば，金属はどのように膨張・解離して絶縁体となるのか．この物質科学における最も基本的な問いに答えるために，我々は，平成11年度から15年度まで，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」を進めてきた．本年度が最終年度になる．

超臨界条件下におかれた金属流体は，ファンデルワールス流体にはない多様で興味深い物性を示す．代表的な液体金属である水銀やアルカリ金属は，臨界点を超え，液体から気体へと連続的に膨張する過程で金属-絶縁体転移を起こす．このように大きな物性変化が，原子配列の変化，臨界点近傍の密度ゆらぎ，クラスター形成等とどのような関連性を持つかを調べることは大変興味深い．特別推進研究では，我々が独自に開発してきた高圧実験技術をベースとし，第三世代大型放射光施設SPring-8の異なる3つのビームラインに実験装置を設置し，超臨界金属流体の構造研究，すなわち(1)X線回折測定により短・中距離構造，(2)X線小角散乱測定により密度のゆらぎ等の長距離構造，さらに(3)X線非弾性散乱測定により動的構造について研究を行ってきた．臨界点の高い金属流体の研究は，現代の実験技術をもってしても容易ではなく，特に，諸物性を理解する上での鍵となるミクロ構造の研究は，長年手付かずの状態であったが，我々の高温高圧技術と放射光を組み合わせることによりその構造研究が可能になった．これまでの研究により新たな事実が分かり，また，新しい展開があった．

その一つは，流体アルカリ金属に関するものである．最近のX線回折測定によって，膨張してゆく流体ルビジウム中に，非常に早い段階で，すなわち1200℃という臨界温度（1744℃）から遠く離れた金属領域において，二原子分子Rb_2が出現するらしいという興味深い事実が明らかになった．ルビジウムの気体中には，水素分子H_2のように安定なRb_2が安定に存在するが，液体金属中に出現したRb_2は，明らかに気体中のものとは異なる．伝導電子による遮蔽を受け不安定で寿命の短い分子であろう．この特異なRb_2の現れる領域は，伝導電子と分子に局在する電子とが共存する新しい物質相であるといえる．新たな展開を見せてきたアルカリ金属流体についてX線非弾性散乱測定を行い，ダイナミクスすなわち原子分子の離合集散の様相を明らかにすることは大変興味深いことである．

最近，米国のNellis博士らによる水素分子の爆縮実験により，3000 K，1.4 Mbarという超高温高圧下で，水素が金属（流体金属水素）になることが明らかにされ，水素がアルカリ金属の仲間であることが初めて示された．水素分子の圧縮過程は，本研究のアルカリ金属流体の膨張過程のまさに逆のプロセスである．したがって，膨張するアルカリ金属流体の構造研究は，実施が不可能である流体金属水素の構造研究を行っていることになり，大変重要である．この意味で，我々のアルカリ金属流体研究は，木星に関わる研究でもある．木星内部には流体金属水素が存在し，そのハイドロダイナミック効果により木星特有の強い磁場が生じていると考えられている．表面にある水素分子気体が中心に向かって圧縮され金属化するとき，水素分子が木星の深いところで直接アルカリ金属へ転移するのか，あるいは，特異な共存状態を経て浅いところで金属になるかは，木星磁場の起源に関わる重要な問題である．また，この研究は材料としての金属水素，すなわち，室温超伝導体であると予想され，核融合や高効率エネルギー源として将来必ず重要な意味を持ってくるであろう金属水素に関わる研究であり，夢をかきたてられるところである．

最後に平成14年度修士学位論文を紹介して，本稿を閉じる．

伊藤英之：「超臨界流体水銀の構造解析」
伊藤　有：「放射光を用いた超臨界流体水銀のX線小角散乱実験」
岡村大輔：「α鉄中におけるクロムと炭素・窒素の相互作用」

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

Bi2223超伝導膜における相形成過程

Bi2223超伝導膜の高J_c化にはBi2223相の単相化が必要である．しかし，Bi2223超伝導膜を作製する際，不純物相を含んでしまうためBi2223単相にすることが難しい．そこで，Bi2223相の体積分率向上のため，作製の中間段階である仮焼時の条件を明らかにすることによってBi2223相形成過程を調べることを目的とした．すると，主な相としてBi2212相と3430ss相が仮焼時に存在している場合が本焼後のBi2223相の体積分率が大きくなることが分かった．また，テープ材を作る際のPIT法と違って，今回用いたCSD法では仮焼時にAgが存在しているため，Bi2223相作製の最適温度はAgが存在しない場合と比べて低くなっていることが分かった．

Y系超伝導体薄膜の二軸配向化

Y系超伝導体薄膜を線材として応用するには長尺化が臨界電流密度の向上が不可欠である．高臨界電流密度のY系超伝導体を得るには2軸配向化が要求される．長尺化のため基板として金属基板を用いるが，金属基板上に$Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$を作製するには2軸配向化したバッファー層の作製が必要となる．そこでバッファー層作製の基礎研究としてMgO基板にPLD・MOD法によって$BaZrO_3$を作製し，さらにその上にPLD法によって$Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$を作製し評価を行った結果，高度に2軸配向化した$Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$が得られた．またY系超伝導体薄膜の作製法の研究としてTFA-MOD法の研究を行った．TFA-MOD法を用いてさまざまな作製条件で$Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$を作製し，XRD測定の結果から体積分率を得た．これをアブラミプロットによって解析した結果から，TFA-MOD法では$Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$が3次元成長している可能性がある可能性が示唆された．

前熱処理が及ぼす（Bi，Pb）2223相形成への影響

(Bi，Pb)2223超伝導材料は線材実用化に向けて広く研究・開発がなされているが，特に近年米ASC社特許に見られるように本焼前にAr雰囲気中で前熱処理を行うことが話題となっている．しかし，(Bi，Pb)2223相形成に前熱処理雰囲気が及ぼす影響が定量的に調べられた例はない．そこで本研究では前熱処理雰囲気が（Bi，Pb）2223相形成に及ぼす影響を定量的に調べることを目的に実験を行った．その結果，前熱処理雰囲気の酸素分圧が減少するに従い，本焼時（Bi，Pb）2223相形成まで潜伏期が短くなる傾向が見られ，pure-Ar雰囲気下では1073 K前熱処理時に体積分率にして約20%の(Bi，Pb)2223相が形成されていた．これは酸素分圧減少に伴い(Bi，Pb)2223相形成に必要なPbリッチな液相の形成温度が低下したことが要因と考えられる．

シース材としてFeを用いたMgB_2線材の調製

MgB_2粉末を金属チューブに充填し，長尺加工するPowder-In-Tube法は線材化に非常に有効な手段である．今回，シース材としてFeを用いてMgB_2線材を作製し，様々な熱処理を施し，特性の変化を調べた．線材加工中にMgB_2中に導入されていた歪が熱処理により解放されたことにより，臨界温度が上昇し，30 K付近のJ_c特性が大幅に向上した．しかし，高温の熱処理を施したことにより，線材内部のMgB_2粉末の結合性が上がり臨界電流密度（J_C）は増加した一方で，高磁場でのJ_c特性は低下した．また，シース材として用いたFeが反応し，FeBやFeB_2層が生成したため，シース材としてはMgやBと反応しない金属を用いた方が良いことが分かった．

FE-SEM/EBSPを用いたAl-Zn-Mg合金の回復挙動の観察

Al-Zn-Mg系合金は高強度であるが，耐SCC性に劣る．高強度を維持しつつ，耐SCC性を向上させる方法として，予備時効，温間圧延，温間焼鈍を施し，微細亜結晶粒組織を得る方法が有効である．今回，FE-SEM/EBSPを用いて加工変形組織の回復過程を観察することにより，予備時効時間の最適化を行った．温間圧延後の試料には，方位ゆらぎが小さい転位セルからなるMatrix bandと，大きく方位の変化が存在するTransition bandが圧延方向に平行に交互に並んでいた．予備時効を623 Kで360 ks以上施した試料ではTransition bandの占める割合が多く，温間焼鈍によりTransition bandから大角粒界を有する粒が多く生成することが分かった．一方，予備時効が3.6 ks以下では，Matrix band中の隣接する転位セル間の方位差が小さいため，回復により形成された亜結晶粒の粒界傾角が小さく，強度が低下した．高強度で耐SCC性の良い合金の作製のためには36 ksの予備時効が最適であることが分かった．

Mn金属間化合物の制御によるAl-Zn-Mg基合金の高強度化

P/M法により作製されたAl-Zn-Mg-Cu-Mn-Ag合金中にはQ相，Al_6Mn相といったMn金属間化合物が析出し，特に棒状の前者の析出物が繊維強化をもたらすことが分かっている．今回，Q相，Al_6Mn相の析出挙動を観察するとともに，合金組成を制御することにより，Q相の析出量の制御を試みた．その結果，粉末のCIP体を予備過熱する過程でQ相，Al_6Mn相の順番で析出し，また，Cu/Mnの比を増やすことによりQ相の存在比率が増加することが分かった．よって，予備加熱条件と組成を最適化することにより，さらに高強度化ができる可能性が示唆された．

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

工学研究科　材料工学専攻

材料機能学講座
材質制御学分野

本研究室では，鉄鋼材料やチタン合金などの構造材料の組織制御に関する基礎研究として相変態・析出・再結晶の組織学的・結晶学的研究を主に行っている．同時にこれらと密接に関係する現象（形状記憶効果，超塑性など）の機構解明や強度，延性などの機械的性質の向上に関する研究も行っている．2002年度は主に以下のテーマについて研究した．

1. 鉄合金のマルテンサイトおよびベイナイト組織に関する研究

高強度鋼における最も基本的な変態生成物であるラスマルテンサイト中の転位密度の組成依存性について種々の組成を持つFe-CおよびFe-Ni 2元合金において精密に測定した．Fe-C合金での転位密度は，0.6 mass%Cまでは炭素量に伴い増加するが，それ以上の炭素量になると双晶変形による歪緩和が起こるために逆に低下する．Fe-Ni合金でも転位密度はNi量に伴い増加するが，その上昇分はCの場合に比べて小さい．種々の因子とマルテンサイト中の転位密度の関係について検討した結果，転位密度はマルテンサイト変態時の体積膨張の大きさと最も相関があると考えられる．

Fe-Ni-Mn合金において変態初期にオーステナイト粒界より生成するラスマルテンサイトの結晶学的特徴を調べ，ラスマルテンサイトの方位（バリアント）は母相粒および粒界面の方位によって規制され，粒界面と平行最密方向とのなす角度が小さく，最大歪みの方向が母相中のすべり系のバーガースベクトルに平行に近いものが優先的に生成する傾向があることがわかった．また，加工オーステナイトから生成したラスマルテンサイトはオーステナイト中の転位を受け継ぐことが明らかとなり，ラスマルテンサイト内部の高密度転位の起源として，母相中に導入された転位の受け継ぎがあることが示唆された．

Fe-Ni-C合金の上部ベイナイト組織におよぼすオースフォームの影響について調べた．オースフォームの有無に関わらず，炭素量の増加および変態温度に伴いベイナイトのブロック幅が大きくなる傾向が見られる．オーステナイト中にサブグレインが形成される高温オースフォームでは，パケット径の微細化およびブロック幅の粗大化が起こるのに対して，マイクロバンドが形成される低温オースフォームでは，逆にパケット径が粗大化されブロック幅の微細化が起こることが明らかとなった．またベイニティックフェライト中にはオーステナイト中の転位組織が受け継がれるために，オースフォームによりベイナイト中の転位密度が増加し強度も上昇するが，その度合いはオースフォームドマルテンサイトと比べて小さいことがわかった．

オーステナイト母相が残留するFe-Si-Mn-C合金の上部ベイナイトの異相界面構造を調べた結果，オーステナイト/ベイナイト界面には結晶構造の変化を担う変態転位および変態歪の剪断成分を緩和する2組の転位ループが存在し，glissileな構造を持つことが明らかとなった．ラスマルテンサイトもベイナイトと同様の界面構造を示すことから，ベイナイトの成長では置換型原子の拡散は必要ではないことが示唆された．

2. 炭窒化物を用いた構造用材料の組織制御に関する研究

単純組成過共析鋼（Fe-Mn-Si-C）のフェライト（α）組織の析出・分散強化における強化相としてのセメンタイト（θ）の分散状態（形状，サイズ，分布）を制御する目的で，層状θを含むパーライトをA1点以下で温間圧延・焼鈍および（$\gamma+\theta$）二相域でのγ化＋焼入れ焼もどしした場合の微細二相組織と機械的特性について調べた．その結果，(1)温間圧延材では，αは小角粒界の割合が多いサブグレイン組織からなるが，焼入れ焼もどし材では大半が大角粒界で囲まれている，(2)焼入れ焼きもどし材の強度-延性バランスは温間圧延材よりも一般に良いが，温間圧延材に焼鈍を行うと，加工組織の回復により低強度側での延性が焼入れ焼もどし材とほぼ同等まで向上することがわかった．

Fe-M（M：Ti，V，Nb）二元合金のプラズマ窒化における窒化物析出組織を調べた．窒化による硬化は主として合金-窒素クラスターの微細析出に起因し，表面付近に形成される粗大な鉄窒化物の寄与はほとんどないこと，(2)窒化の進行に伴い，微細クラスターから安定相である合金窒化物への遷移が起こることが明らかとなった．

また，Ti合金での炭化物を用いた組織制御に関する基礎的研究として，種々の組成のTi-V-C3元合金を作製し，様々な温度での平衡組織を観察した結果，V添加により$\beta/(\beta+TiC)$相境界が低C側に移動し，包析温度が低温に移動することが明らかとなった．

3. 鉄鋼における結晶粒微細化に関する研究

鉄鋼の変態組織の微細化に直結するオーステナイト母相粒径の微細化および微細オーステナイト粒からの変態挙動について調べた．機械構造用鋼SCM435におけるオーステナイト⇔マルテンサイト繰返し変態による粒径の微細化では最小約5μmまでの微細粒組織が得られた．逆変態処理の温度が低いほど，逆変態の保持時間が短いほど，オーステナイト粒径は微細になった．繰り返し数が増すと，3回までで急速に粒径が微細になるが，その後は定常粒径となった．また，マルテンサイトを焼もどした後逆変態させると，残留セメンタイトのピン止め効果によるオーステナイト粒径の微細化が若干認められた．

焼もどしマルテンサイトの強加工＋逆変態処理とマイクロアロイ元素（V）の微量添加による合金炭窒化物のピン止め効果を併用して微細オーステナイト粒組織（最小粒径で約2μm）から急冷して得られるラスマルテンサイト組織についての組織観察を行った結果，Fe-0.2Cラスマルテンサイトではγ粒径の微細化に伴いパケット径が小さくなるが，ブロック幅に関してはあまり変化しないこと．γ粒径が5μm以下ではパケットの微細化による強度上昇は見られなくなること．C量がより高くなると，強度のγ粒径依存性が小さいことなどがわかった．

教　授　牧　　正志
助教授　古原　　忠
助　手　森戸　茂一
技　官　振本　昌治

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

当研究室では，地球環境調和型社会システム構築を目指したエネルギー・資源の有効利用と評価システムの体系化を大きな目的としている．この目的に対して，(i)材料学的，(ii)社会・経済的，そして(iii)教育・政策的アプローチで研究を行っている．ここに三つのアプローチごとに最近の主な成果を紹介する．

材料学的アプローチ

○　ボールミルによる光触媒の活性に関する研究

光触媒用アナターゼ型酸化チタン粉末のメカニカルミリングを行うと，凝集した酸化チタン粒子の多孔質状表面がNO_2の吸着・分解に寄与するため，NOx分解率が1.4倍程度向上する．また，メカニカルミリングの手法の違いによって酸化チタン(Anatase)粉末の結晶構造変化に相違が生じることが明らかになった．また，可視光領域の光を吸収することが可能である酸化タングステンをアルミナボールおよびポットを用いてボールミルすることにより，出発試料を上回る光触媒能を有する酸化タングステンが得られた．

○　窒素吸蔵合金の開発

$LaNi_5$合金の窒素吸蔵能力が初めて確認され，また吸収温度の違いによって金属内での窒素原子の状態が異なり，そのため窒素放出能に違いがあることが示された．また，安価なミッシュメタルを用いて粉末冶金法により作製したセリウム鉄系金属間化合物においても窒素吸蔵能を確認した．これらは，アクティブディスアセンブリ指向材料や真空材料への応用が可能である．

○ FeOによる二酸化炭素の固定

大気中の二酸化炭素の固定を目的として酸化第一鉄による二酸化炭素の還元反応に着目した．この反応では，酸化第一鉄は酸化されてマグネタイトに，二酸化炭素は還元されてグラファイトになる．またマグネタイトは2385 Kで酸化第一鉄に還元され，その熱源は太陽炉を使う事が可能である．これは，究極的には太陽光を熱源として酸化鉄を媒介したエネルギーシステムが可能になることを示している．本研究では，酸化第一鉄をメカニカルミリング処理を施すことにより二酸化炭素を炭素まで還元することに成功した．

○　繰り返し圧縮圧延法による新材料開発

繰り返し圧縮圧延法は多くの2元系金属合金に応用されてきたが，多元系合金についての研究はまだ少ない．本研究で用いたZr-Ni-Cu-Al 4元系合金では繰り返し圧縮圧延法による多層膜の作製は困難であったが，Al箔を挟むことにより，箔試料の接合性が上がった．よって接合性の悪い金属箔同士の組み合わせでも，Al箔を接着剤のように用いることで多層膜を作製できる可能性がある事がわかった．

その他，繰り返し圧縮圧延法によるNi-Nb系合金のナノレイヤーバルク材の作製や低融点金属を含む合金(Sn-Zn，In-Pb，In-Zn)のメカニカルアロイングによるナノスケール多層膜バルク材の作製などを行った．また，古代製鉄法であるたたら製鉄における鋼精錬機構に関する研究も行い，鉄の還元反応機構を明らかにした．

社会・経済的アプローチ

○　ベトナムにおけるセメント産業の近代化によるCO_2排出削減

近年，ベトナム経済はエネルギー需要が大きく増加する方向に変化しつつある．本研究では，最近発行された1996年のベトナム産業連関表にエネルギー産業連関モデルを適応し，経済活動とエネルギー需給について分析を行った結果，ベトナムの工業生産の中でセメント産業が非常に多くのCO_2を排出していることが判明した．本分析に基づき，1億5000万米ドルの投資があれば，年間17万4000tのCO_2排出を削減でき，またベトナムの全セメント工場を近代化することによりセメント工業からのCO_2排出量を35%削減できることを明らかにした．

○　仮想摩擦係数を用いた旅客輸送におけるエネルギー効率の評価

今後の省エネルギー施策に資する目的で，陸上・海上・空中の輸送機関のエネルギー効率を輸送形態の別に依らず，統一的に評価できる仮想摩擦係数と呼ばれる指標を作成した．その指標を用いることにより，種々の輸送機関のエネルギー効率を統一的に評価できた．その主な結果として，平均して旅客は同重量の貨物の6倍の空間を占有し，平均乗車率は75%程度，旅客における最適旅行速度は110 km/h程度であり，航空機以外の輸送機関では社会システムにおけるエネルギー効率の改善に大きなエネルギー削減の可能性があることがわかった．

その他，日本における平均燃費規制の可能性とその影響についても研究を行った．

教育・政策に関するアプローチ

○　環境問題に関する知識と環境行動に関する調査研究

環境問題の解決には，技術開発，法制度をはじめとする社会システム，経済的な支援などが重要であるが，それらに加えて重要なのが人々の意識である．大学生を対象に環境問題に関する知識と環境行動についてアンケートを行った結果，環境問題に関してよく知っている人は環境にやさしい行動をしていることが分かった．これは，環境問題について教育が環境行動を導くことを示しており，環境教育の重要さが再認識された．しかし，知識は有していても行動が伴わない人たちもおり，このような人たちに対してどのような働きかけをすれば行動が伴うようになるか検討する必要があることを示した．

その他，「循環型社会形成と企業の意識に関する研究」なども行った．

教　授　石原　慶一
助教授　奥村　英之
助　手　山末　英嗣

材料プロセシング分野講座

$CaO-FeO-P_2O_5$ 3元系スラグのFeO，P_2O_5 活量測定

1. 緒言

$CaO-FeO-P_2O_5$ 3成分系，Fig. 1の組成a，b (CaO/P_2O_5=5/2モル比) における FeO の活量および P_2O_5 の活量を2種類の実験方法により測定したので報告する．

2. 実験方法・原理

2.1. 実験I，FeO 活量測定

Fig. 2に示すように純鉄るつぼ中に銀と実験組成のスラグを入れ，1423 K～1634 K において液体{Ag-Fe}と固体純鉄と共存させた．スラグ中の FeO と Fe との平衡酸素分圧を Mo+MoO_2 を参照極とするジルコニア酸素センサーにより測定して FeO 活量を求めた．

2.2. 実験II，FeO，P_2O_5 活量同時測定

Fig. 3に示すように純鉄るつぼ中に純銅と実験組成のスラグを入れ 1573 K に保持した．液体{Cu-Fe-P}合金と〈Cu-Fe-P〉固溶体を共存させた．スラグ中の FeO と {Cu-Fe-P} 中の Fe との平衡酸素分圧を測定し，FeO の活量を求めた．一方{Cu-Fe-P}合金の[*wt%P*]，[*wt%Fe*]，[*wt%Cu*] より P_2O_5 活量を求めた．

3. 実験結果・考察

実験結果の一例として Fig. 1に a_{FeO} (実験Iによる) と等温断面図との関係を示す．Fig. 1(b)に示す通り温度の上昇と共に組成a，bの FeO 活量は共に減少した．

教　授　岩瀬　正則
助教授　藤原　弘康
助　手　長谷川将克

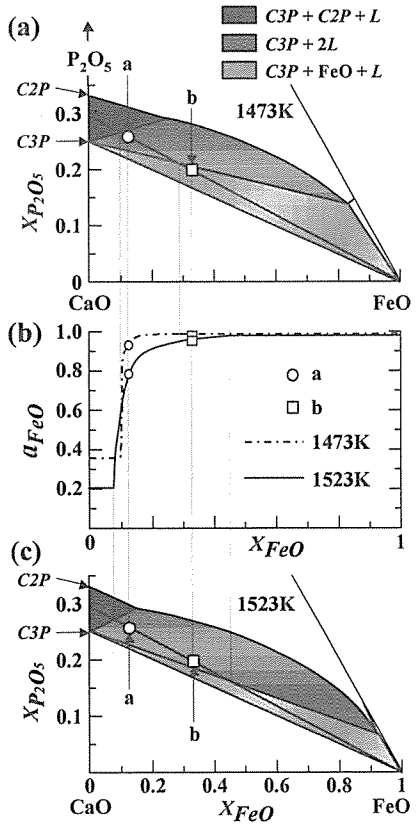


Fig. 1 Relationship between activities of FeO for slags a CaO/P_2O_5 mole ratio of 5/2 and the isothermal sections of the system $CaO-P_2O_5-FeO$.

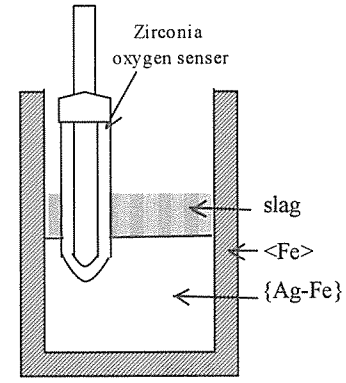


Fig. 2 Experimental setup for measurment of activities of FeO.

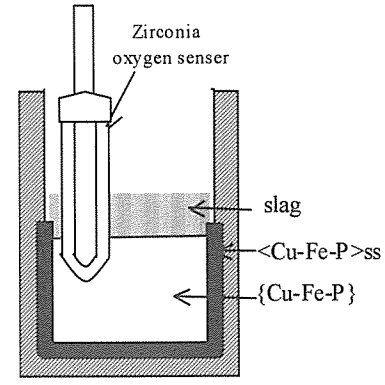


Fig. 3 Schematic Experimental setup for measurment of activities of FeO and P_2O_5.

エネルギー科学研究科　エネルギー応用科学専攻

エネルギー応用プロセス学講座 高温プロセス分野

・溶融塩化カルシウム電解による酸化チタンの還元

本研究室ではクロール法に代わる新たなTi製造プロセスとして$CaCl_2$溶融塩電解法を用いたCa還元法(OS法)を提案している．一方，溶融$CaCl_2$中でTiO_2を電気化学的に直接還元するFFC法がFrayらによって提案されている．両者は操作的には大きな違いが見られないが，還元原理において大きな違いがある．本研究では溶融塩電解法における両者の還元原理の区別化に焦点をあてながら，還元原理解明を目指した．

溶融塩電解法における還元は，OS法の主張するようにCaの生成を伴うものであり，Caが充分に存在するかどうかがTiO_2の還元に大きな影響を与えることを実験により証明し，FFC法の主張する還元原理の問題点を指摘した．また，電解時には，Caは陰極表面に一様に分布し，そこでは強い還元力を得ることができるが，陰極から離れると還元力が急激に弱まり充分な還元は得られないこと，及び，副反応によるCa消費が激しく，還元の効率を大きく下げる要因となることがわかった．

また，本研究ではOS法の効率化，高純度化を目的とした基礎研究を行い，以下の知見を得た．すなわち，還元過程ではCa活量を高くたもたないと効率の良い還元が得られないこと，OS法では粉末のTiO_2を原料とするが，TiO_2を薄く設置しないと充分な還元は得られないこと，及び，溶融塩中のCa濃度やCaO濃度測定は中和適定を利用して可能であるが，溶融塩から特定の場所の塩を取り出す方法と，取り出した塩を酸化させることなく分析することが必要であること等である．これらの課題を克服することにより，OS法の工業化を可能にできると思われる．

・酸化ニオブ及び酸化タンタルの溶融塩を用いたカルシウム還元

金属ニオブ及びタンタル（以下，Nb及びTaと記す）を製造する新しいプロセスとして，Nb及びTaのそれぞれの安定酸化物である五酸化二ニオブ・五酸化二タンタルを原料とし，液体のカルシウム還元により直接に金属Nb及びTaを生成させる提案を行った．このプロセスは溶融塩化カルシウムを反応媒体とする熱化学反応であり，還元副生成物である酸化カルシウムを還元中に溶解させて除去するものである．

本研究では，(1)生成Nb及びTa中の酸素濃度の低減，(2) Nb及びTa粉末の微粉末化，(3) Nb及びTaの類似点及び相違点の議論，(4)コンデンサ材料としてのTa製造に関する評価及びその実現可能性，を目的とした．

1223 Kでの還元反応で得られた黒色の粉末は，X線回折による分析の結果，金属Nb及びTaであった．酸素濃度分析の結果，両者とも0.5～1.0 mass%程度であった．粒度分布測定の結果，還元条件に応じて粉末試料の平均粒径は1 μm～50 μm程度に制御できた．Nb及びTaは周期律表において同族元素であるが，その還元機構には，還元過程において違いがあった．また，Ta_2O_5を用いて実際にコンデンサを作成したところ，その電気容量は汎用品にまさるものであった．

・溶融$CaCl_2$中での電解Caによる金属酸化物還元

溶融$CaCl_2$中で金属酸化物をCa還元し，還元副生成物のCaOを電気分解して再びCaにリサイクルする新製錬プロセスを，様々な分野に応用するため，14種類の金属酸化物で実験を行い，その成果と問題点について検証した．そして，実験を通して本プロセスの詳細なメカニズムについて考察した．

実験の結果，Ca還元反応の標準自由エネルギー変化が正となる希土類の一部を除いて，ほとんどの金属酸化物の還元に成功した．また，試料にNb_2O_5を用いて，反応時間と不純物濃度の関係を調べる実験を行ったところ，反応時間を長く取ることで還元・脱酸を進行させ，低酸素濃度の金属Nbを得ることができた．一方，プロセス中で炭素が発生して試料に混入することが判明し，これを防ぐことが今後の課題として残った．

・混合溶融塩中でのTiO_2の還元・脱酸

TiO_2の溶融$CaCl_2$中におけるCa還元によりTiを得るプロセスに関して，本研究では溶融塩に新たにKClを加え，溶融塩の融点を下げることにより省エネルギー化を目指した．生成Tiの酸素濃度をもとに，最適な溶融塩の混合比，及び反応温度を検討した．

その結果，Caの融点1112 Kを下回る1073 Kにおいて7.2 ks保持するという条件の下では，KClを10 mol%加えた場合に酸素濃度2400 mass ppmのTiを得ることができ，同条件で反応浴として$CaCl_2$のみを用いた場合の5300 mass ppmという値を下回り，低温化と共に高品質化にも成功した．また，Caが固体状態で存在しても本プロセスによる還元反応は十分に進行することが分かった．

さらに，純$CaCl_2$の融点を下回る973 Kにおいて，KClを24 mol%含む反応浴を用いて実験を行った結果，酸素濃度は12000 mass ppmと高い値であるがα-Tiを得ることが出来た．

本プロセスにおいてTi中の酸素濃度に大きな影響を与えるのは溶融塩に対するCa，及びCaOの溶解度であることがわかった．よって混合溶融塩を用いて本プロセスを低温化する場合，$CaCl_2$に混合する塩の種類やその添加量，そして反応温度を選定する際には，あらかじめCaやCaO溶解度に関する十分な検討を行わなければならない．

その他，熱電材料を用いた発電に関する研究，高融点金属であるTaのシリサイドの標準自由エネルギーの測定などを精力的に行っている．

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

助教授　鈴木　亮輔
助　手　植田　幸富

エネルギー科学研究科　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

当研究室では高温超伝導銅酸化物，カルコゲナイドガラス半導体および機能性金属などの材料について機能発現や作製プロセスなどの研究を行っている．本研究室は2つの地区に分かれており，宇治地区では下記テーマ1～3について，吉田地区ではテーマ4について研究が行われている．

1. 銅酸化物超伝導体における元素置換による不均質ナノ構造と相転移

ペロブスカイト型銅酸化物の混晶であるナノ構造固溶体において，我々が見出した負性抵抗を含む特異な非オーミック伝導現象（Supercond. Sci. Technol. 15 (2002) 1133），およびこの現象に深く関わるパーコレーション過程の解明を行い，構造制御と機能発現の相関に興味ある知見を得た．このような系で発現した現象は均質系に基づくバンド構造モデルやキャリヤー濃度の濃淡を主役とするような単純な描像のみでは理解しえない不均質系特有の複雑で多彩な挙動を示すことを明らかにしてきた．たとえば，$Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_y$のナノ構造固溶体においては，構成単位であるY-123とPr-123の結晶単位胞のおのおのが異種の単位胞で囲まれると，CuO_2面内の電子軌道の共有化により，孤立単位胞が擬似変化して周囲に同化すると思われるパーコレーション過程が見出された（Phys. Rev. B60 (1999) 9325）．この非古典的過程は銅酸化物ではかなり小さな領域で局所超伝導が可能なことを示唆し，ナノスケールでの微細構造に新たな知見を与えるものである．最近，このような銅酸化物についてイオンサイズや価電子の異なる元素による置換プロセスの系統的な研究を行っており，相転移の発現や抵抗の異常変化について興味ある現象を見出しており，目下その詳細を解明すべく努力している．

2. 銅酸化物超伝導体における臨界電流と化学ドープによる磁場誘起型磁束ピニング効果

Y-系銅酸化物$YBa_2Cu_3O_y$（Y-123）は強磁場において高い超伝導電流を可能にする次世代超伝導線材用の物質として最近着目されている．現在，高い臨界電流の実現のための磁束ピニングセンターの形成が重要な課題となっている．最近我々は，カチオン添加による元素置換により磁場中でピニングが強められるという磁場誘起効果を見出し，とくに磁気モーメントを持つ希土類元素のBaサイトでの置換がこの効果を強めることを明らかにした．(Physica C, 391 (2003) 1)．顕著なピニング効果はYb-123にPrを添加した系にも見出され，YbとPrのイオンサイズの相違が重要な役割を果たすことを明らかにした（Physica C, 391 (2003) 8)．このピニング効果は，超伝導の秩序パラメターが局所的に低い微小領域が添加元素サイト近傍に形成されることを示し，置換元素や置換サイトに依存して様々に変化する．現在はY-123結晶におけるCuIおよびCuIIサイトを置換サイトとして，臨界電流とピニング効果について調べている．

3. カルコゲナイドガラス半導体における不純物や欠陥の準位と分光測定

カルコゲナイトはS, Se, Teなどのカルコゲン元素とIV族のGeやV族のAs, Bi, Sbとの化合物半導体で，ガラス転移を行うのが特徴である．これは赤外線透過性が良いなどの利点があるが，より特徴的なことは，光照射に対して構造敏感で，結晶化相転移，光黒化，光ドーピング効果などの光誘起現象が生じるため，光メモリーなど光機能応用の大きな可能性があることである．当研究室では，この化合物の中でも主としてGe-S系の化合物の電子構造と光学的特性を調べてきた．この系の研究は当初，価電子バンド端のポテンシャルの空間的乱れをパーコレーション構造の見地から探ることを目的としていたものである．発光強度，X線光電子分光やラマン分光の測定を行いながら，ギャップ内不純物欠陥準位や原子配位局所構造を調べ，特にその発光スペクトル測定から光照射劣化効果などの光誘起現象の詳細を明らかにした（J. Non-Cryst. 315 (2003) 107)．この研究に引き続いて量子効率の高い希土類元素添加カルコゲナイドガラスGa_2S_3-GeS_2-La_2S_3-Pr_2S_3の発光現象についても研究を着手し，今年度からは新たに，燃料電池材料用セラミックスYSZにおける伝導性イオンと格子欠陥の相互作用のプロセスを分光学的手段により調べている．

4. DCアークプラズマジェットを用いた材料の表面改質や物質合成

吉田地区研究室では，DCアークプラズマジェットを用いた材料の表面改質や物質合成の研究が行われている．大電流低電圧のDCアークプラズマは，プラズマガスとして用いる種類と混合比によって，超高温に熱せられ，音速近傍まで加速された非常に化学反応性の高いラディカル種ないしはイオン種を作ることが出来る．アルゴン中にメタンと水素を微量添加して金属基板にプラズマジェットを吹き付けると容易にダイヤモンドやダイヤモンドライクカーボンの生成を実現できる．又，アルゴン中に水素と窒素ガスを同時に添加して，チタン等の反応性の高い金属基板に吹き付けると，平衡的なガス反応よりも桁外れに大きな速度でチタンナイトライド（TiN）の厚い被膜を作ることが出来る．当研究室ではこれらの特異なDCアークプラズマジェットの性質を利用して，高機能性の厚膜や表面改質を試みている．特に，これらの硬膜や改質部の組成，構造，組織を原子レベルの超ミクロな分析技術を駆使することによって明らかにすると共に，その生成機構の材料学的な解明に取り組んでいる．既に，これらのプラズマ反応では水素のラディカル種ないしはイオン種が大きな役割を果たすことに当初に見出し，幾つかの公刊論文で評価を受けている．今後は，これらのプラズマ反応の適用を炭化物や硼化物に広げると共に，リサイクルや廃棄物処理技術への応用を試みる予定である．

教　授　吉田　起國
助教授　冨井　洋一
助　手　蜂谷　　寛

国際融合創造センター　創造部門

エレクトロニクス分野

1. 研究速報

STMによる材料表面の原子レベル評価

(1) 水素終端Si(111)1×1表面下のドーパントのSTM-BHによる観察：シリコン結晶中のドーパント原子の空間分布に関する情報は電子デバイスの評価において重要な情報である．最近の電子デバイスの微細化に伴い，例えばMOSトランジスタのゲート長は数十nmまで縮小しており，このような微小なデバイスでは個々のドーパントの位置がデバイス全体の特性に影響を与えることが指摘されている．走査トンネル顕微鏡(STM)を使用すれば原子分解能での観察が可能であるが，STMでは通常表面の原子しか観測することができない．ところが試料表面における静電遮蔽が弱い場合にはSTMによって試料内部の様子を観測できる場合があり，このような表面として例えばGaAs(110)が知られている．本研究では同様に表面での静電遮蔽効果の小さいと考えられる水素終端Si(111)1×1表面を作成し，実用的に重要なSiの結晶内部（表面近傍）のドーパントの分布をSTMおよびトンネル障壁高さ（バリアハイト：BH）イメージングによって高い空間分解能で観察した．図1はAsドープのn型Siウエハーを用いて作成した水素終端Si(111)1×1表面でのSTMおよびBHイメージングの結果である．STM像では表面下に存在する帯電したAs原子は直径5nm程度の明るいスポットとして観察されている．一方同時に得られたBHイメージングの結果はこのサイトで静電ポテンシャルがおよそ1.5eV低下していることを示しており，解析の結果，STM像の定性的な変化の様子およびBHの低下量は，As原子周辺の遮蔽された静電ポテンシャルを考えることで説明が可能なことが明らかになった．

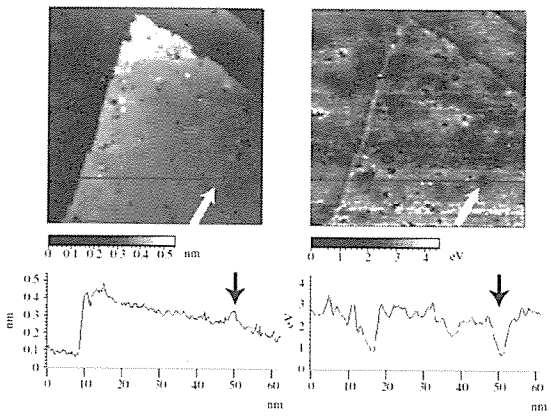


図1　水素終端Si(111)1×1表面でのSTM観察（左）およびBH像（右）．STM像上で明るくイメージされているサイトでBHが低下していることがわかる．

(2) $ReSi_{1.75}$表面のSTM観察：結晶物性工学研究室より試料の提供を受け$ReSi_{1.75}$(100)表面のSTM観察を試みた．$ReSi_{1.75}$では結晶中にSi空孔列が形成されるが，空孔列および周辺のSi原子の位置は必ずしも明らかではない．STMによる$ReSi_{1.75}$(100)表面の観察の結果，2種類の異なる構造の表面が観察され，これは$ReSi_{1.75}$中のSi空孔列の表面に対する方向の違いに対応しているものと考えられる．しかしながら，STMにおいてこれらの表面の詳細な原子配置を決定するには至らなかった．現在，表面の処理方法の改良，またSTM像の解釈を助けるための電子状態計算の導入を行っている．

金属単原子接点の高バイアスコンダクタンス

(1) 高バイアス下におけるAu合金単原子接点の研究：前年度の研究により，Agとの合金化によってAu単原子接点の高バイアス安定性が改善されることが示唆されたことから，合金化の影響をより詳しく調べるために，Ag，Cu，Pt，Pdを17-26%含む5種類のAu合金について，単原子接点の高バイアスコンダクタンス測定を行い，単原子接点の生成確率pを調べた．データのばらつきのために合金化によるpの定量的な増加は確認できなかったが，pのバイアス依存性は溶質元素によって明らかに異なっており，Ag・Cuを添加した合金のpは純Auのそれとほぼ同じバイアス依存性を示すのに対して，Pt・Pdを溶質とする合金のpはバイアスの増加とともに急速に減少することが明らかになった．このpの溶質元素依存性は，溶質による電子散乱などでは説明されず，原因はまだ解明されていない．一方，単原子接点が持続する平均時間（寿命）のバイアス依存性はいずれの合金においてもほぼ同一であり，このことはAu合金単原子接点では，溶質原子ではなくAu原子が接点位置を占めていることを示唆している．

(2) Al，Cu単原子接点の研究：Auの単原子接点は約2Vのバイアス下でも観測され，優れた高バイアス安定性を示している．この安定性の原因を調べるために，非Au金属の代表としてAlおよびCuを取り上げ，単原子接点の高バイアス特性を調べる研究を室温・超高真空環境下で行った．Al単原子接点の生成確率pは約0.8Vで消失し，Al単原子接点の高バイアス安定性は，Auには及ばないことがわかる．Al単原子接点は電子透過率の低い伝導チャネルを有することが知られており，この透過率の低いチャネルでの電子反射が，高バイアス／高電流下でpを減少させている可能性が考えられる．しかし，Auと同様に電子透過率の高い単一チャネルを有するCu単原子接点のpも約0.8Vで消失しており，少なくとも伝導チャネルの透過率は，単原子接点の高バイアス安定性とは無関係であることがわかる．現在のところ，どのような要因が単原子接点の高バイアス安定性を決定しているのか，十分な理解が得られておらず，引き続き他の金属の単原子接点を対象として研究を継続している．

教　授　酒井　　明
助　手　黒川　　修

国際融合創造センター　創造部門

材料デザイン分野

本研究室では，複合材料，多相金属材料，半導体のナノ・メゾ構造と機能・特性の相関の実験と解析による解明，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とその応用による新材料デザインを目指している．2002年度は以下の研究を行った．

各種複合構造材料の力学特性評価とモデル化

広範な構造用複合材料について，メゾ構造と力学特性の実験的評価とモデル化に取り組んでいる．主な成果は以下のように要約される．

＊超高温材料として実用化が期待されている Al_2O_3/YAGセラミック融液複合材料の1800-2000 Kでの変形挙動の構成式を導出し，それと有限要素解析を組み合わせたモデル化により脆性-延性遷移温度の歪速度依存性を定量的に説明した．

＊C/C，SiC/SiC，SiC/BMAS（結晶化ガラス）複合材料の引張・曲げ強度，破壊靭性などの力学特性決定機構における界面の役割を実験的に評価するとともに，界面剝離および縦割れの臨界エネルギー解放率を実験的に評価する手法を開発した．

＊自動車部品への応用が期待されている粒子強化アルミニウム複合材料の環境暴露劣化機構についてピットサイズと劣化後強度の相関を明らかにするとともに，統計解析に基づき疲労時のパリス則を説明した．

＊自動車ボディ材として広く用いられているGA鋼板の金属間化合物コーティング層の多重破断挙動の有限要素法解析から，コーティング材の強度を明らかにするとともに，加工時に問題となっているコーティング層のフレーキング・パウダリングプロセスを明らかにした．

繊維強化複合材料のメゾメカニカルシミュレーション

「繊維・マトリックス・界面のメゾスケール損傷形成の素過程」―「メゾ損傷間の力学的相互作用と集積プロセス」-「材料強度・靭性」の統一的記述法の開発を目指している．今年度は，特に残留応力が界面剝離および引張強度に及ぼす影響のシミュレーション法の開発に注力した．シェアラグアナリシス法とモンテカルロ法を組み合わせることにより，残留応力が構成材破壊，界面剝離を促進・抑制する条件を明らかにするとともに，繊維の線膨張率がマトリックスのそれより高い場合・低い場合の複合材強度を予測できる手法を開発した．また，平行して，有限要素法を利用したシミュレーション法を考案し，繊維軸に垂直方向の破壊強度の実測値を定量的に説明した．

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

超伝導線材は作製・使用時に機械的・電磁気学的応力場におかれるため，変形・破壊挙動とその超伝導特性に及ぼす影響の把握は信頼性・安全性・耐久性の確保に向けて重要な課題である．本年度は，Nb-Ti/Cu，Nb_3Al/Cuおよび Bi2223/Ag 複合線材中のフィラメントの引張・曲げによる変形・破壊挙動とその臨界電流およびn値に及ぼす影響の把握に注力した．主な成果は，以下の通りである．

＊静的応力下でのフィラメントの損傷形態（脆性フィラメントの破断，延性フィラメントのマルティプルネッキング），損傷の空間分布と臨界電流・n値の相関の把握

＊延性フィラメントのマルティプルネッキング形成におけるフィラメントと銅の降伏応力・加工硬化の差の影響のモデル計算に基づく解明

＊繰り返し応力下での主クラックおよびサブクラックの形成と臨界電流との相関把握

＊損傷を受けた短尺試料の臨界電流・n値の統計分布から，長尺試料のそれらを推定する手法の提案．

ナノ多相材料の粒界近傍組織形成過程の計算機モデリング

Al基の構造用合金を高性能化する場合，粒界の無析出帯（PFZ）の形成過程を制御する因子を特定することは疲労強度などの諸特性改善のために重要である．しかし実験的には分離の困難ないくつかの因子が影響を与えるため，計算機シミュレーションを利用した組織形成への支配因子特定は重要である．従来バルク中のナノクラスター形成過程の解明に使われていたモンテカルロシミュレーションを粒界近傍の組織形成過程の予測に適用するため連続体熱力学とのハイブリッドモデルを作成し，挙動が比較的単純な2元系合金についての検討を開始した．本年は作成したモデルにより粒界析出を原因とするPFZ形成過程をシミュレートし，以下の結果を得た．

＊粒界析出と粒内析出が同時に進行する場合，粒界析出については析出物，PFZ幅の放物線則を再現した．

＊PFZの構造の特徴としては粒界近傍の無析出帯，粒内の一様なクラスター成長領域と，その境界にある遷移領域の3領域が明瞭な境界を持って形成される．

＊遷移領域はバルク内の粒子間距離の程度の厚さである．従って粒界への溶質の溶け出しによって析出物サイズがPFZ境界に近づくにつれて漸次小さくなるという現象は認められない．これは従来の粒界析出をともなうPFZの顕微鏡観察結果とも一致する．

薄膜・表面近傍のナノドット構造の解明

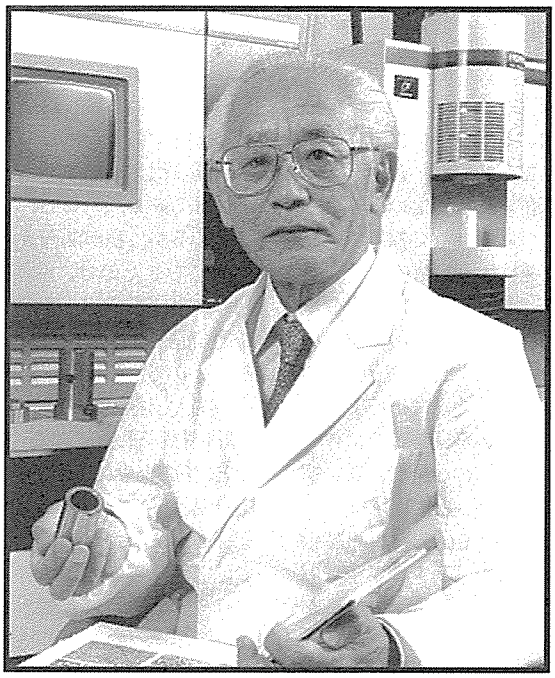
格子定数の異なる半導体などの組み合わせで形成されるSi/Ge材料などのナノドット，あるいはナノクラスターなど，固体中に埋めこまれた状態での構造評価が重要である材料を対象として，放射光を利用した反射配置小角散乱（GI-SAXS）法の開発および反射率などの従来法との組み合わせ評価手法の確立を進めている．

教　授　落合庄治郎
助教授　奥田　浩司

会　　報

追　悼

特別名誉会員　川野　豊先生



川野豊先生は，6月14日逝去された．享年78.

先生は，昭和23年京都帝国大学工学部採鉱冶金学科を卒業後，高等学校教諭を経て，昭和26年本学工学部助手に採用され，昭和34年助教授，昭和60年教授に昇任され，鋳造冶金学講座を担任された．昭和63年停年により退官され，京都大学名誉教授の称号を受けられた．

先生は，冶金学，中でも鋳造冶金の分野で優れた研究業績を残された．日本鋳造協会の論文賞受賞の対象となったセメンタイトの黒鉛化に対する添加元素の影響の系統的研究は，日本代表論文として，モスクワの国際会議に発表され，国内外の高い評価を受けた．以後先生の研究は，黒鉛の粒状化，球状化の研究にも広がり，その成果は，「球状黒鉛鋳鉄」(アグネ)，「反応論から見た鋳鉄」(新日本鋳鍛造協会)などの著書にまとめられた．このような研究活動は，定年後も継続され，その成果は画期的な新材料「ステンレス球状炭化物鋳鉄」の開発となって最終的な実を結んだ．この間，国内的には，日本鋳造協会の各種委員として，また鋳造業界では技術指導などをされた．国際的にも，韓国，中国などとの学術交流をすすめられ，関連学協会の発展や後進の育成に多大の貢献をされた．

同期のどうしようもない腐れ縁の川野君とのお別れ

関西大学名誉教授　岡田　明

昨年(平成14年)9月20日，入院している川野君を家内とお見舞いに行った時の奥様の献身的なお姿を拝見してから僅か9ヶ月(平成15年6月14日)で，川野君は残念ながら帰らぬ人となられた．奥様，御親族様に対して謹んでお悔やみ申し上げます．

川野君は昭和23年に私とは違って堂々と卒業された冶金科同期（金友会）の親友である．私は昭和20年の終戦で加藤君と共に城大から京大に転入させて貰って，森田志郎先生の研究室を希望？して配属され，苦労して何とか卒業できた京大生として似付かわしくない変り者です．その後，森田先生のお情けで助手として採用されたが，先生の真面目で厳しいご指導に耐えかねて，昭和25年10月に先輩教官の庄司さんに御迷惑を掛けて研究室を飛び出し，宮崎県の高等学校に逃げ込んだのです．その後何の因果か，平成3年に亡くなられた森田先生を「厳格でしかも妥協の無い御性格」と水曜会誌に追悼文を書いた川野君が，斎藤大吉先生（我々の卒業の翌年に亡くなられた）創立の“京都大学鋳造学”の後継者になる運命を担う事になったのです．

昭和27年の夏休みの或る日，徹夜で研究室の熱膨張計に付きっきりの彼を宮崎から訪ねた．“研究に学生は邪魔だ”と自信たっぷりに云い切ったのは研究者の神髄かも知れないが，その後の彼の教育・研究に対する積極的な姿勢からは考えられない事であった．昭和63年卒業の沢田君が「野球少年」として頑張るとともに，「夢の新素材」の開発に貢献した学士論文を提出したのは，そのほんの一例にすぎないのである．

川野君の森田研での先輩・尾崎良平先生(平成元年6月に亡くなられ，川野君と私で水曜会誌の追悼文を書いた)が，昭和35年，関西大学に鋳造冶金学研究室を作り，私を助手として呼んで頂いたのが昭和36年であった．その頃から，日本鋳物協会の関西支部で再び私は川野君と森田先生に係わりをもつ事になったのである．鋳物技術“基礎研究会”では川野君が井ノ山，(故)倉井両先生と共に委員会の森田先生の片腕となり，研究会や支部の運営に尽力し，研究も地道ではあるが独創的で，井ノ山先生に「我々の研究の邪魔になる？」と言われながらも自ら学生と共に研究室で徹夜実験をしていたのである．

川野君は昭和63年に，退官記念講演「鋳造技術の流れを辿って」を，記念パーティでは「燃えると云うことは」を熱弁し，さらに川野研祝賀同窓会で私が祝辞を述べ，その後川野夫婦と岡田夫婦4人で楽しい食事をした事を懐かしく思い出す．

退職後も山本，田辺先生等と協力して，その理論的成果である“反応論から見た鋳鉄”の出版となり，これを基盤として若干の企業を含めた「球相材料研究会」が発足し，球状炭化物鋳鉄の発明として実を結ぶことに繋がったのである．その会員（三共合金鋳造所）の中の松田哲夫氏が，何と私が勤めていた宮崎の高等学校を昭和25年に卒業されていた（川野君の告別式の後で本人から聞いた）ことは，偶然とは云え驚きであった．

昭和10年に，川野君は水曜会・教室100周年記念号に「京都大学・鋳造学100年の歴史」という題で，「鋳造材料学への量子力学の導入から21世紀の金属材料科学の夢まで」について詳しく具体的に論じている．

以上，京都大学鋳造学の100年間の充実した伝統を川野君が守り続けられたのは，何を隠そう同期で腐れ縁の私のお陰であったのである．すなわち，森田先生の助手の任務に耐えかねて，私が高等学校教員として逃げ込んだからである．

ところが，私が関西大学で43年間も好きな教育・研究に専念できたのは，関西大学に来て可成り後になって判った事であるが，実は川野君が瀬田工業高校にいた私を尾崎先生の助手に推薦してくれたお陰であったのである．それだけでなく，中国・韓国との学術交流，私の助手の関大出身の三宅先生を新宮研究室の研究員に推薦，“球相材料研究会”，“夏の学校”でのコミュニケーションなど，私の人生に生き甲斐を与えて呉れたのが川野君(岡田が腐れ縁）だったのである．

権力や世間に阿る事のない川野君の言葉：東洋の土壌で創造性のある独自の研究と技術を開発しよう．自然に帰りうる素形材は金属のみであるので，その再生を考えよう．金属材料として特に鉄を見直そう．東洋の諸国とフェアに提携しよう．

これらは川野君ならではの含蓄のある言葉である．川野君は一途で歯に衣を着せず，ズバリと物を云う気性なので，きわめて心優しく思い遣りがあるにも拘わらず，誤解を受ける事もあったが，鋳造界に量子力学的な新風を巻き起こし，学問的は勿論，技術的にも多大な偉業を残されたのである．

最後に，日本いや世界にも稀でユニークな鋳物好きの愛国的そして fighting dreamer 的研究・教育者である川野君のご冥福を祈り，追悼文とさせて頂きます．

川野先生を偲んで

山崎隆雄

川野先生の訃報を知ったのは6月14日（土）の水曜会大会のお昼前の頃でした．翌週初めにはどうしても抜けられない先約のために当日夜に帰宅しなければならず，ご葬儀等の詳細のご連絡を頂きながらお参りできなかったのは本当に残念な事でした．

川野先生とのお付き合いは私が修士課程の2回生のときに当時の鉄冶金学研究室から鋳造冶金学研究室に転籍した時に始まりました．この転籍は，学部の卒業研究課題が白銑の急速黒鉛化の研究であり，修士課程に入ってもそれを続けていましたが，沢村先生の定年退官に伴う指導教官の変更に基づくものでありました．この頃の

鋳造冶金学講座研究室は森田教授，尾崎助教授，助手として川野先生，井ノ山先生とほかに職員として倉井さん，辻さんで構成されていました．ただ残念なことはこれらの先生方でご存命なのは，井ノ山さんと辻さんのお二人になってしまった事であります．

川野先生と私とは卒業年次で9年も隔たってはいたものの，生意気にもいつも先生の事を「川野さん」と呼んでいました．当時川野先生は先任の助手として3回生の学生実験全般の準備と指導，4回生の卒業研究実験の指導に加え，ご自身の白銑の黒鉛化に及ぼす各種元素の影響についての研究を進められていた関係で，寝食を忘れ実験の合間に少しづつの睡眠をとりながらの，まさに24時間の連続勤務といえるような働きを続けておられました．そんな極めてお忙しい中にも拘らず私の研究の遂行から学会での研究発表の準備にいたるまで本当に細かいところまで公私共に親身になっていろいろご指導を頂きました．試験片の作成については，コーテッドサンドを使ってのシェルモールドの準備，工学研究所の中にあった炉室のクリプトル炉を使っての白銑の溶製と鋳造等について，まるでご自分のことのように真っ黒になって，指導していただくというよりは私の代わりに事に当たって頂く方が多かったように憶えています．さらに黒鉛化の挙動を見るためには，ディラトメータで初析セメンタイトとパーライトセメンタイトの分解による体積膨張を時間との関係で求めるのですが，電気炉は手製の均熱帯を確保した物を使えましたが，自動温度調節記録計はなく，トランスと抵抗器で出来るだけばらつきを少なく一定の加熱冷却速度ならびに保持温度を作り出すのには大変な苦労がありましたが，これを先生は，傍目から見る限りではいとも簡単にこなされていました．ディラトメータも当時のものは殆ど手造りで勿論自動記録ではないので，とくにセメンタイト安定化元素の影響を調べる場合は，一度実験を開始すると長時間装置から離れる事が出来ないために，帰宅は終電車でという状態は日常茶飯であり，時には徹夜でという事もしばしばあったように記憶しています．このような事でご家族には大変不自由でお淋しい思いをおかけになった事と思いましたが，先生の仕事にかける情熱，研究環境からくる重圧に耐える不屈の精神力と強靱な体力にはただただ驚嘆するだけでありました．このように書きますと先生はまるで仕事一辺倒人間のように見えますが，時には超多忙の合間をぬって京都市の南のほうにありましたご自宅にお招きいただいて音楽談義に花を咲かせた一時を持った事も遠い昔の思い出の一齣であります．

この時期に白銑の黒鉛化に及ぼす各種元素の影響についてなされた研究は，後に学位論文としてまとめられるとともに，可鍛鋳鉄にかかわる仕事をする場合に，非常に貴重な情報源となっています．

私はこのような院生生活を3年間続けましたが，事情がありまして鋳造冶金学研究室を離れ沢村先生が進めておられた関西鉄鋼短期大学の設立準備作業をお手伝いするようになり，それに伴い自然川野先生初め研究室の皆様方とは次第に疎遠になってゆきました．その後も私は関西鉄鋼短期大学に4年間勤務ののち高周波熱錬㈱に入社しそれに伴い住まいも神奈川県に移りましたので，先生とは昭和60年6月に開催された還暦祝賀記念鋳造冶金学研究室同窓会の時にお会いしたくらいで，あとは年賀状の交換と時たま電話で近況をお伝えする程度で30年近い年月を過ごしてきました．今を去る10年近く前のある日先生から電話があり，京都市工業試験場で鉄の溶解に使う高周波発振機が要るようになったので都合をつけてほしいとのご要望がありました．詳しい話を聞きますと，鉄系耐久鋳造材の開発に関する研究を同試験場の金属分析研究室の西内研究員（昭和41年修卒）と共同でするためのものであるとの事でしたので協力させていただくことになりました．実験装置が完成し西内さんの実験室で久し振りにお会いした先生は研究にかける情熱は昔と変わらず，青年のごとく研究の内容と予想される成果について語っていただきました．その様子は全く往時を髣髴とさせるものでありましたが，唯一気がかりであったのは，随分痩せられていて，熱をこめて話された後はかなりお疲れになっていた事でした．後で聞いた所によると糖尿病がよくない状態にあるとの事でしたが，この時以後また無音に過ぎるような時期が続いていました．今年は年賀状も来なくて，体調不良に悩まれているのではと案じていた矢先に訃報に接したのでした．傘寿を目前にして亡くなられたのは大変残念な事ですが，いまはただ在りし日の先生を偲びつつ謹んで哀悼の意を表しますとともにご冥福をお祈りいたします．合掌

平成15年9月7日

（高周波熱錬㈱社友　昭和32年卒）

哀悼，川野　豊先生

菅　原　清　介

先生から会いたいとの連絡を奥様より戴いたのは，六月六日（金）でした．次週の十日午後2時頃ご自宅にお伺いし午後四時半頃まで，お話しを致しました．在宅介護に変わられてから，精神的にも安定されたのか，血色も良く，研究の進捗状況のこと，景気低迷下での私共の会社の状況のこと，等をお聞きになりこの状態では，回復されるのも早いのではないかと思われました．只，危惧した事は，喋られると痰が絡むので，その都度，奥様が，取り除いておられたので，手足がご不住なだけに，だれも居られない節は自己処理がお出来にならないので，どうかなと考えもしておりました．お会いしてから四日後早朝に突然の訃報に接し，予想もされず，まさかと驚くばかりでした．只，大勢居られる諸先輩を差置いて最後にお会いし，お話し出来きたことが，私にとって，印象強く残り非常に良かったと感慨無量であります．

私事ですが，先生は高校一年時代の担任であり，昭和

26年4月森田研究室に研究生として入室した時，先生も5月に入室され，それ以来，52年間のお付き合いであり，公私ともにご指導を戴きました．昭和26～29年頃，先生の助手時代の研究室は，森田先生が厳しくまさに地獄の一丁目状態で，朝早く，夜遅く，週に一～二回の徹夜で実験，森田先生に叱責され再実験とそれは大変な状況でした．夜中の十二時ごろ旧試金室横の中庭で，三高寮歌，琵琶湖周遊の歌をキャンプファイヤーもどきで，拳を振り良く通る声で歌っておられました．眠気覚ましにもなるのか，気合をいれて，また実験をされる連続で，痔病で休まれた以外それは元気印そのものでした．当時食事も外食券が必要な時代で，よく拙宅で弁当を作り，二人で分け合って朝食をとったことが懐かしく思い出されます．私は意志が弱く3年でリタイアしましたが，先生は最後まで初心を貫かれたのには，驚異としか思われません．先生は絶えず他人の研究を机上で繰り返すのみでは，研究とは云えない．真理は実験でしか得られない．実験の積重ねによる新しい創作を行う事を身上とすべきだ，が信念であり退官後も病気で休養されるまで実験の虫を晩年まで続けられたことは，驚嘆に値すると同時に多くの人を尊敬させた原因と思われます．

先生は，人生意気に感じる一本気な性格の為，歯に物を被せず，単刀直入に鋭い突っ込みをされる為，誤解を招き易いことが多かったようです．先生の性格が多少わかっているつもりの私も，良く諍いをしたものです．もう付き合いはしないと思っていても，二三日するとけろっとして，電話がかかり，又，仲良くなる，の繰返しでした．私も川野マジックに最後まで掛かった一人かも知れません．多分あの世で高笑いされている事でしょう．

先生は私と同年代に近い弟さんを少年期に亡くしておられたので，私を弟のように思って戴いたのかもしれません．就職を始め何かと親身の教導戴き，近年では，私の経営センスを心配してか，会社は大丈夫か，が口癖でした．先生が二十数年来研究開発された球状炭化物鋳鉄も球相研究会が発足し学術的にも深更され，これからの市場ニーズにマッチすべく諸業界にフイールドテストを展開中の矢先，この成果を見ずして他界された先生を偲ぶとき，もう少し長生きして戴きたかったと残念でしかたがありません．

先生は“人の一生と信仰のこころ”の随筆の中で，“死は無”と考えている．病苦や死の恐怖は宗教によって癒されきれない．自分自身の信仰を創設する方向に努力することが大切である．として宗教に頼ることを拒否されていました．晩年は糖尿病で食事療養をされておられ，酒もカラオケも自粛されていましたが，天国では，痛飲，哄笑，得意の喉を披露しながら，楽星遊風の墓標の通り若き青年時代に戻られ大自然を悠々自適の漫遊をされておられることでしょう．衷心よりご冥福をお祈り致します．合掌．

川野豊先生をしのんで

西 内 滋 典

1974年の春，鋳造冶金研究室へ配属となりました．研究室には川野豊先生，井ノ山直哉先生，倉井和彦先生がおられました．修士課程も合わせ，私が在籍した三年間は，三先生の四大研究，すなわち1)鋳鉄の黒鉛化機構，2)球状黒鉛の球状化機構，3)球状黒鉛鋳鉄のマトリックスの靱性，4)ガス成分元素の影響，の研究がまとめ上げられる佳境の時期でありました．そのため，研究室全体が大変活気に満ちて，各研究グループで毎日活発なディスカッションがなされていました．鋳造冶金学の発展の見地から見れば，「記述的科学」「分類的科学」の段階から「法則的科学」「予言の科学」への飛躍の時期であったと言えるでしょう．

鋳鉄の黒鉛化機構の研究については，それまで鋳鉄の白銑化の問題は，あの銑鉄を使うとチルし易いが，この銑鉄を使うとチルしにくいといった「遺伝性」といった概念で捉えられていました．川野豊先生は鋳鉄の黒鉛化機構について永年研究された結果，鋳鉄の黒鉛化に及ぼす共存元素の影響が周期律表にて整理ができることをつきとめられました．セメンタイトの安定性と黒鉛化現象を結び付けることで，「遺伝性」から「化学」へと，大きな飛躍を成し遂げられました．私達生徒はこの学問の飛躍を直接目の前にし，大きな感動を覚えました．

その後，大学を退官されてからも，「できの悪い子」はことさら可愛いのか，私の職場によく足を運ばれ，この年に至るまで手厚い生涯教育をしていただきました．

そして，ねずみ鋳鉄にとっては害そのものの「セメンタイト」を逆に利用しようと，新しい鉄系耐久鋳造材の開発を提案され，菅原清介，山際幾雄，両先輩に山本悟先生を交えて研究を進めました．最初の作品は「鉄系セラミックス」と称した材料で，特に耐磨耗に優れた材料を開発することができました．その後数多くの材料開発を経て，「ステンレス球状炭化物鋳鉄」という耐食性，耐摩耗性，靱性，等に優れた新しい鉄系耐久鋳造材を開発するに至りました．これらの材料開発は，化学結合性理論，気泡理論，量子力学的エネルギーの揺らぎに基づく化学安定性理論，の三つの基礎理論をバックグランドとしていました．それに加えて，川野先生の夢と叱咤と汗がありました．病に臥される直前まで，毎日毎日，試験片を研磨され，顕微鏡観察されておられる，先生の真摯な御姿は，研究をともにした生徒の脳裏から永久に離れないと思います．

(昭和50年卒業)

川野先生からいただいた宝物

結 城 勇

「この反応メカニズムがわからない．誰か研究してくれないか？」

3回生の鋳造冶金学の講義の時の川野先生の言葉です．これが川野先生と私の出会いでした．この言葉に誘われて，4回生から修士までの3年間川野研でお世話になりました．川野研（鋳造冶金学研究室）では，写真にありますように，白衣と帽子を身につけて溶解鋳造の実験研究をしていました．写真の真中の川野先生も白衣を着られていますが，講義中でも研究室内でもよくこの姿で見えました．今回，先生の追悼文のご依頼を受けまして，たまたま今でも手元に置いていました当時の実験ノートを見ながら先生とのやり取りを思い出しています．

私の研究テーマは，「白銑の第1段黒鉛化反応速度論の研究」です．先生との最初の出会い「この反応のメカニズムがまだわからない．誰か…」のテーマです．

このテーマを始めた4回生の最初のころ，少しだけ実験して，理論がわからないで悩んでいると，「わからないことはわからないと正直にいう謙虚さが大事だ．理論がわからなければ，まず，その現象を確かめる実験を考えよ．」

M1のとき，こんな理論でどうかな？　と少し自信を持って相談に行くと，「添加元素によっては第1段は変わらないかやや速めるのに対して，第2段はやや遅らせるものがある．なぜか？　自分で考えろ．いろいろな実験をやって，考察できる理論を考えろ．その点を結ぶと線ができている．それだけ実験をやる．やれば見えてくる．」

M2になって，自分なりの理論を作り上げていくと，「君はそう考えるか．ぼくはこう思う．僕には長年の経験があるからな…．でも，それは，ぼくの考えであって，君が実験をやるのだからどんなことをしようと自由である．自分の考えで実験しなさい．ただし，責任は自分で持つこと．」

先生はよく，「実験の数では誰にも負けない．グラフの点がそのまま線になる」と口にされました．「当たり前のことを当たり前と思わない，定説でも敢えて本当かと疑ってみろ．」とも聞きました．今になって思えば，「どれだけ実験に裏打ちされているかが，科学者・技術者にとって大事か．つまり，現物を見ることの重要さ」を伝えたかったのではないかと思います．

また，先生は，「これはよくわからない．今までの理論では説明できないので，何とか自分で真の理論を見つけたい．」とよく言われていました．講義プリントの中でも，「鋳造は，数千年の歴史があるが，近年の科学をもってしても，未だ解明し得ない多くの問題を残している．解明される可能性がある課題に富み，特に若い研究者の触手の動く興味深い研究分野である．」と書かれていました．つまり，実験をいくらやっても，いかに実験を多くやって自信があっても，わからないことはわからないと正直にいう謙虚さ．しかし，それと同時に，いつかはわかってやろうとする気構え，貪欲さも感じました．科学者・技術者にとって，謙虚さと貪欲さを備えていることの大切さを伝えたかったのではないかと思います．

さらに，講義やゼミの中では，世界の生産量・シェアー，歴史の話をしばしば聞きました．講義のプリントには，全体としての位置付け，経緯，学問を学ぶ意義もよく書かれていました．時には，「琵琶湖の面積を知っているか．」とか突拍子もない話も聞きましたが，裏には，「科学者・技術者は全体を見よ．回りを見よ．」ということを言いたかったのかと思います．

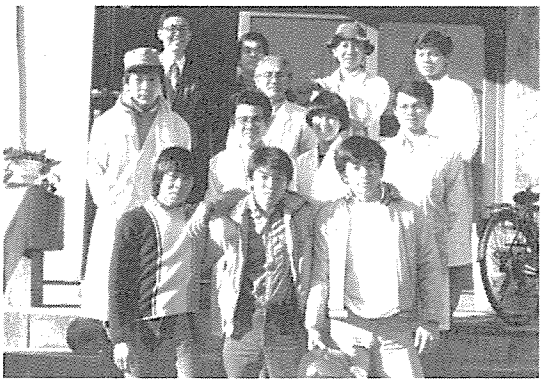
このように，先生からは，科学者・技術者に必要なものとして，①実験しろ（現物を見ろ），②謙虚さ・貪欲さ，③全体を見ることを学びました．

川野先生のユニークさは研究だけではありません．ゼミ旅行で，山口へ行った時，津和野の街を一人で自転車に乗って走り回っておられました．当時は50歳くらいだったと思いますが，「あのバイタリティはどこからくるのだろうか？」と先輩と話をしていましたが，今改めて振り返ってみると，実験・研究と同じで，「自分で確かめる，自分の足で見る」ということを実践されていたのかと思います．

川野先生にお世話になって社会に出てから20余年が経ちました．卒業後も「この本を書いているが，読んでみないか？」「今度，新しい学会を作ったが，一度話を聞きに来ないか？」等々，声をかけていただきました．その都度，新たな刺激をいただき，科学者・技術者の生き方を伺いました．①実験しろ（現物を見ろ），②謙虚さ・貪欲さ，③全体を見る，これら3つを科学者・技術者としての生き方，私にとっては，先生からいただいた宝物と思っています．

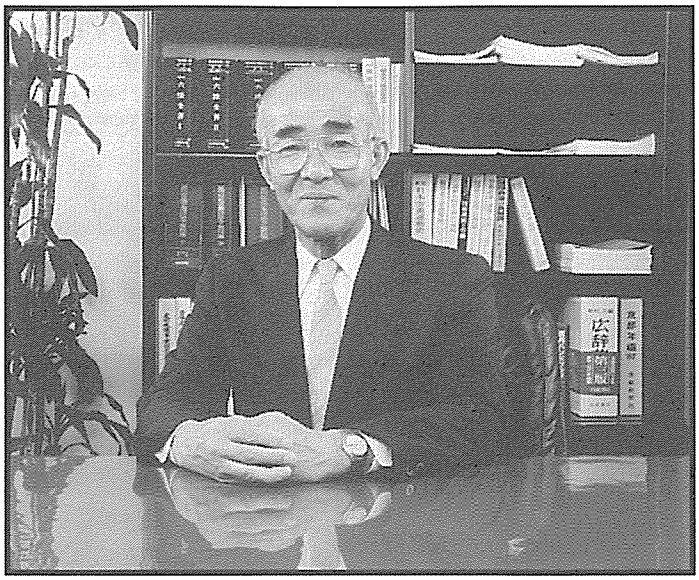
先生が亡くなられた今，直接恩返しすることはできませんが，今後，この宝物を回りの人に少しでも伝授できればと思っています．川野先生のご冥福をお祈り申し上げます．

（トヨタ自動車株式会社）



追　悼

水野政夫先生



略　　歴

昭和21年９月　大阪帝国大学工学部冶金学科卒業
昭和22年１月　任文部教官尉３級工学部溶接工学教室勤務
昭和26年３月　大阪大学講師
昭和26年12月　大阪大学助教授
昭和36年11月　工学博士
昭和39年４月　京都大学教授工学冶金属加工学教室溶接工学講座担任
昭和62年３月　停年退官　京都大学名誉教授
昭和62年12月　雇用促進事業団顧問
昭和63年４月　京都職業能力開発短期大学校校長
平成４年３月　停年退職
賞罰　藍授褒賞（昭和62年11月）勲三等旭日中授章（平成12年11月）

ご縁――水野先生を憶う

近　藤　良　夫

世のなかにはご縁というものがある．このことは年をとるとだんだん判ってくる．いまからでは，半ば後悔を含めてだが，大切にしなければならないものだとつくづく思う．

私の生まれた左京区田中里ノ前町の家には，その後水野先生ご一家が住んでおられたし，言うまでもなく水野先生と私とは，左京区役所の第四錦林小学校で二年生から卒業まで同級であった．室戸台風が吹き荒れたのはその四年生の時であった．台風のあとの吉田山は松がほとんど倒れ，赤い地肌をのぞかせていた．

二人でがんばった受験勉強のかいがあって，幸い揃って京都一中へ入学した．水野先生は体も大きく，スポーツマンで剣道やラグビーで活躍しておられた．1941年に私は第三高等学校に入り，水野先生は一年あとで京都工芸専門学校を経て，大阪大学の溶接工学科に進まれることになり，小学校以来10年あまりの二人の同級生活はいったん中断することになった．

1961年に金属系学科には新しい学科として６講座から成る金属加工学科が創設され，その学年進行によって，３年後の1964年には溶接工学講座が新しく設けられたのである．水野先生はその初代の教授として，大阪大学

からその古巣とも言うべき同講座へ転任してこられた．あえて古巣と呼んだのは，上にも述べたように，水野先生はそのお誕生から，大阪大学へ進まれるまでずっと京都に居を構えておられただけでなく，奥様も第四錦林小学校の同級生だったからである．

水野先生は1963年ヘルシンキで開催された溶接工学の国際会議の帰途，MITに留学中の私を訪ねてケンブリッジのアパートに立ち寄られた．子供たちは水野先生に公園で遊んでもらったことをいまでもよく覚えている．

水野先生の研究室は，旧工学部6号館3階の西南隅に近いところにあり，たまたま私の研究室に間近いところにあった．二人はここで定年まで約23年を過ごすことになる．これも水野先生と私とのご縁なのであろう．このわれわれの研究室は，西側は大学正門，時計台，本部事務棟と眺望の広げた素晴しいところにあったが，その一面，1969年頃から始まった大学紛争の間は，時計台は「竹本助手処分反対」の落書きで汚され，また六号館の南隣りの花谷会館の前では火炎瓶が投げかわされる騒ぎまであった．あの騒ぎからすでに30年余り，時計台，本部建物の改修が進んでいる現在では想像もできない，大きい変化である．

この大学紛争の間には，いろんなことがあったが，水野先生と私にとって忘れがたいことを一つだけ述べておこう．

1969年9月に予定された工学研究科の入試は，その直前に行われた教室主任と学生との「団交」の結果，機動隊の導入なしに行われることとなった．しかし講義室で平常どおりに院入試を行おうとすると学生が入ってきて潰されてしまう．そこ工学研究科では各系ごとに学外でそれぞれ独自の方法で入試を行なうこととなった．水野先生と私は教室主任ではなかったが，主任からの依頼をうけて次のような計画をたてて，実施した．

受験生約60名を2台の観光バスに分乗させ，1日でバス内で試験を実施する．当日朝，受験生は数名毎にそれぞれの教官のもとに集合して，京都駅に向う．

バスの1台（A）は京都駅に待機して受験生を収容する．また他の1台（B）を三谷伸銅の構内で空車で待機させる．バスAは三谷伸銅に向い，構内で受験生はバスAからバスBに乗換える．空車になったバスAは三谷伸銅を出て，名神高速の滋賀県のパーキングエリアに向い，そこで待機する．一方バスBは三谷伸銅の構内で十分な時間を経た後，バスAと同様に名神高速の滋賀県のパーキングエリアに向い，ここでバスBと合流する．バスA，Bに受験生を分乗させた後，ともに養老パーキングエリアに向い，若干の休憩の後に，試験を開始する．

この「篭抜け大作戦」は成功に終った．試験が終ってバスから降りた受験生からは「先生さすがですね」とほめられた．一方，教室主任からは「そんなことをして三谷伸銅に火炎瓶でも投げ込まれたらどうするのですか」と冗談ともお叱りともつかぬ批評をいただいた．

水野先生と私とのおつきあいは，二人の小，中学校時代，現役の大学教官時代，停年退官後の名誉教授時代を通算すると約五十年になる．まさに半世紀に及ぶおつきあいなのである．この長いおつきあいを通じて私は数多くのことを学んだ．

物事の成功には，卓越したリーダーシップが不可欠である．このことは多くの人が説くところである．しかしたんにこれだけではなく，優れたリーダーに加えて，優れたサブリーダーもあわせて不可欠なのである．水野先生は，いささか失礼だが，リーダーよりもサブリーダーとして優れた人材であったと思う．リーダーやチームメンバーとのチームワーク，心配りなどがその重点であるが，これらの基礎として重要なのは，サブリーダの強い責任感なのであろう．

いまは水野先生との深いご縁に感謝し，そのご冥福を謹んでお祈りする次第である．

（京都大学名誉教授）

水野政夫先生を偲んで　京都大学での思い出

小　林　紘二郎

水野先生が溶接の研究室を持たれて，私たち昭和42年卒の同期の大西健介，浜中亮明，磯部賢太郎，太田正則，永岡栄之，いまは亡き杉野　茂君が先生の研究室の実質2期生であったと思います．私は水野研究室ではありませんでしたが，スポーツを好み，酒をこよなく愛した明るいお人柄のために，先生は学生の間でとても人気がありました．先生とは私が助手になってから警咳に接する機会が多くなりました．大学紛争の折，高村仁一先生を京大総長にと動かれた折，大学院入試が過激派学生に妨害される危険があった折，など何か有事の際にすごい力を発揮されるのを体験しました．

ゴルフにおいて，尾崎良平，円城敏男，新宮秀夫，小野勝敏，大石敏男，藤村侯夫，中村藤伸，菊池潮美の諸先生方と一緒に朽木，大原，京都，東城陽，信楽など色んなところに行かせていただきました．それほどお上手とは思いませんでしたが，ルールに明るく，マナーに厳しかったことが印象的です．尾崎先生の定年退官の記念行事として，水野先生が企画された尾崎カップをかけたコンペを，どなたが優勝されたのかは忘れましたが，京都ゴルフ場で楽しませていただきました．

マージャンもお好きでして，しばしばお相手をしていただきました．新宮秀夫，大石敏男，澤本　崇の諸先生が主なメンバーだったと思います．出町柳の喫茶店「風月堂」の二階の雀荘は，水野先生の阪大時代の教え子（桜井さん）が経営しておられまして，いつも料金の大割引をしてもらいました．先生抜きでも時々行かせていただき特典を利用させていただきました．お酒のほうは，私

がからっきしだめなもので，めったにお付き合いできませんでしたが，祇園をこよなく好まれて，「よしはつ」や「にきなみ」にお供したことがあります．

大阪大学に転勤してから

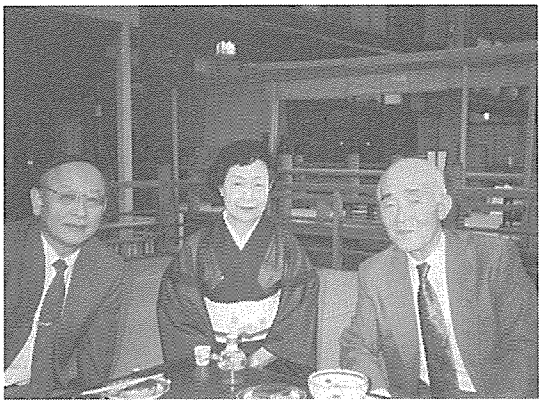
平成元年に私が阪大教授として赴任することを，尾崎良平先生がお亡くなりになられる前にお伝え出来たことをせめてもの幸運と思いました．大阪大学工学部生産加工工学科（元，溶接工学科：現在，生産科学専攻）は，京都大学金属系とはもともと深い関係にありました．京大に溶接の講座がなかったため，阪大の大西　巌先生(昭和19年に講座を開設）に講義に来ていただいていたそうです．京大を昭和30年に卒業された佐藤史郎(元住軽金社長）さんもその授業を受けたとおっしゃっておられますので，相当長い間，来ていただいていたようです．その大西先生の助教授をしておられたのが水野先生で，私は，大西先生を初代とし，水野先生の弟子の菊田米男先生が二代目，その講座の三代目教授として赴任したわけです．

三代目教授として講座を預かりましたが，私の着任前に，菊田先生はすでに他界されておられました．大西先生にはご挨拶に伺い，責任の重大さを感じ，ご指導をお願いいたしたかったわけですが，なにぶんにもご高齢であられる上に健康を害しておられましたので，それも成りませぬ内に他界されてしまわれました．水野先生は，葬儀に際し，人の心をうつ，真心こもった気配りと，采配で，未熟な私を助けて下さいました．

講座の初代，二代目の亡き後，多くの卒業生たちの大学へ来た時のよりどころ，博士号の申請場所としての講座の役割と，恩師や旧友と語らう場としての同窓会の必要性を感じ，設立することを決意いたしました．「大西・菊田・小林研究室合同同窓会」は平成10年7月11日千里阪急ホテル・クリスタルホールに百数十人の参加を得て第一回目を成功させました．その後，二年おきに継続いたしております．第一回目の開催にあたり，恩師がほとんど居られない状態でした．水野先生を引っ張り出さない限り格好がつかないと考え，その趣旨をご説明するために，水野先生の信任の厚かった小野勝敏先生に仲介を取っていただき，平成10年6月4日に鴨川の川床料理「栄家」にお誘いしました．そのときの写真を出させていただきます．先生はもちろん全面的に協力され，大成功へとつながったわけです．この講座の流れの卒業生は社会で大活躍をされていて，藤村宏幸(荏原製作所会長)，河井清和（元三菱重工副社長），中藤　信（前石川島播磨重工副社長），池淵浩介（トヨタ自工副会長）など枚挙に暇がありません．

おつかれ

水野政夫先生のことですから，あの世とやらへいかれた今も，先に行っておられる方々から大歓迎され，才能を遺憾なく発揮されて人々から慕わせておられることと思います．私も遅かれ早やかれ，いずれ必ず参ります．



西木屋町の「栄家」にて水野先生，女将と私（1998年6月4日）

（大阪大学大学院教授：工学研究科生産科学専攻）

恩師水野政夫先生を偲んで

永岡鋼業株式会社
代表取締役社長　永　岡　栄　之

20年前，私の学位取得を見届けるかのように逝った父恵（永岡鋼業㈱創業者）に変わり，実の父親のような存在に思えたのが義父と水野先生でありました．久々に山口県光市に尋ねてきた義父と夕食を共にしていた6月25日の夜，先生の訃報が届きました．ここ3〜4年，何度か病院に通われていたしたが，至って気丈でいつも冗談交じりに御自身の病状を事細かに解説されていましたのに，あまりに突然の知らせで言葉を失ってしまいました．誠に痛恨の極みであります．僭越ではありますが水野門下生の一人として先生の御遺徳を偲び拙文を捧げます．

先生は昭和39年4月に京都大学教授として着任され昭和62年3月に退官されるまでの23年間，教育者として数多くの一般学者の教育指導に情熱を注がれたのはもとより，150名有余の水野研の学生を世に送り出しました．私は昭和41年から4年間，水野研究室の第3期生としてNi基耐熱超合金やアルミニウム合金の溶接でご指導を受けました．先生はまだ40歳台前半の若さで研究に対する姿勢はつとに厳しく，指導は夜半まで続くこともしばしばでした．一方では，水野研恒例の夏の天の橋立合宿旅行，秋の京都北山縦走あるいは2月の吉田神社のお祭りなどにもご家族を伴なって参加され，学生との融和，学生同志の協調にも細かな気配りを見せられました．同年代の水野研卒業生にとっては懐かしい学生生活の思い出のひとこまとして深く記憶に留められていることでしょう．

先生の学生としてのご功績は枚挙に暇がなく，短い紙面では書き尽くせぬことはご賢察の通りです．溶接関連

分野を中心に数多くの足跡を残され，各種の表彰とともに平成12年11月の秋の叙勲では勲3等旭日中綬褒章受賞の栄に浴されました．誠にめでたきことでございました．軽金属溶接構造協会の理事として活躍されていた先生には，卒業して石川島播磨重工業㈱に就職した後も低温用アルミニウム合金の溶接で長きに渡りご指導を頂きました．メンバーの一員として加わった施工法委員会では水野先生主導のもと溶接欠陥防止マニュアルが作成され，この書は今もアルミ溶接欠陥防止3部作（気孔，割れ，歪）として溶接施工管理の現場で活用されています．

先生の教育者，学者としての業績は勿論のことですが，その心温まるお人柄でも多くの人を惹き付けました．酒と会話をこよなく愛され，宴席では先生の廻りにはいつも笑いが絶えませんでした．興じてくるとやおらポケットから紙を取り出され，名人芸の折り紙を披露されました．その技と造詣の深さは先生自筆の著「干支四方山話」で知ることができます．我が家に飾られた十二支の折り紙を見る時，「永岡，仕事の方はどうや」，「そうか，そりゃあええなー」，「世の中，そんな甘いことあらへんでえ」などなど京都弁の優しい問いかけが聞こえてきそうで，実の父のように心配しかつ喜んでくれたお姿が甦ります．

平成12年の9月，私と同期生の濱中亮明君が住職を務める滋賀県愛東町の百済寺で弥勒菩薩像の開眼供養がありました．教え子の一世一代の大儀式を心から喜んでおられました．手術後にもかかわらず，山奥へと続く長い石段を例の大股で駆け登られ，始めてお披露目された柔和な表情の弥勒菩薩の前で静かに手を合わされたお姿が忘れられません．

水野先生本当に長い間ご指導有難うございました．安らかにお眠りください．合掌

（昭和44年金属加工学修士課程終了，京都大学工学博士）

故水野先生を偲ぶ

藤　井　忠　臣

先生は，大阪大学の動教授を経て昭和39年に40才の若さで京都大学教授として着任され，昭和62年3月に退官されるまでの23年の間，150名の学生を教育し，社会に送られました．私は水野研究室の2期生として4年間ご指導を頂きました．

水野先生へのご自宅には毎年正月新年のご挨拶にお伺いしていましたが，今年の正月の訪問時には，病状を事細かに説明され，医者からの「5年生存する確率30%」との診断に対して，苦痛を伴う治療は受けずに自然に任せて頑張るとにこやかにお話しておられましたが，このように早く逝ってしまわれるとは思われませんでした．この盆にも訪問させていただくつもりでしたが，誠に残念なことです．あと2日(6月28日)で80才をお迎えになるお年で，後輩の方々には80才になられることを記念して同窓会を企画していただいており，先生も大変楽しみにされていましたのに重ね重ね残念なことです．

しかし，先生の足跡は公私とも偉大なものがあり，大往生と思います．

先生の学者としての足跡は，そのご高名から察する余りあり，各種学協会はもとより，京都府知事，通商産業大臣などからも多くの表彰を受けておられます．殊に，平成12年秋の叙勲では，勲3等旭日中綬褒章を授与されましたが，翌年の水野研究室有志による記念パーティーで，先生はその勲章の製法などを詳細に説明して下され，誠ににこやかなご様子でした．

先生は，学者としての業績のみならず，心温まるお人柄で，学術教育のみならず人間教育もお受けした感が強いように思われます．研究室では，よく話し合いをもたれ，決して指示すると云うことはなく，何が問題か，その問題を解明するにはどうすればよいかを考えさせるように指導され，成果は重視されませんでした．この成果を求めるのではなく，問題を考えることが大学教育の主旨であることを教わり，社会に出て座右の銘として勇気を得ることが出来ました．また，先生は理論や理屈より実験データを重視され，実戦経験で物事を判断することも教わりました．

先生は，人の面倒見がよく，私たちは父親のように慕っておりました．先生のご自宅に訪問する学生が多く，学位論文作成の指導はもとより，仲人，転職に際する就職先の斡旋，その他各種の人生相談など枚挙に暇がありません．私の人生にも多くの有益な示唆を頂きました．

また，先生の幼少の頃からの折り紙の趣味は達人といえるほどで，毎年正月には創作の干支の折り紙を頂きましたが，その出来映えと難解さはもとより，謹呈して頂いた300頁近くに及ぶご労作「干支四方山話」には折り紙に関する造詣の深さにも驚かされるばかりです．

先生はその他色々なことにご興味を抱かれ，最近では吉田神社のお祭り用御輿に必要な鉾を軽量で強靱なアルミ合金で製作することに尽力され，地域住民の方々から喜ばれたというエピソードは一つの現れです．

学生時代に先生から推薦されました内村鑑三の著者「後世への最大の遺物」にあります“生きる目的は後世に何らかの遺物を残すことである”という教えは，先生はまさに実践され，私たち学生に多くの偉大な遺物を残していただきました．重ねて御礼を申し上げますとともに，長い間ご苦労様でございました．心よりご冥福をお祈り致します．安らかにお眠り下さい．

平成15年8月盆

（京都大学金属加工学科水野研究室　第2期卒業生）

平成15年度水曜会大会

●日　時　平成15年6月14日（土曜）10：00―16：00
●会　場　午前　京都大学本部　旧資源系教室，旧金属系教室　　午後　京大会館

平成15年度水曜会大会は6月14日(土)に開催された．午前中は，京都大学本部構内の旧資源系教室ならびに旧金属系教室において，研究室見学会が行われた．午後からは会場を京大会館に移し，懇親会，記念撮影，総会および特別講演会が行われた．本大会の参加者は約80名であった．

懇親会は，京大会館101号室にて12時15分よりおよそ1時間開催された．栗倉泰弘教授の司会のもと，まず長村光造教授の開会の挨拶があり，次いで向井滋名誉教授の音頭で乾杯が行われた．会は終始和やかな雰囲気であった．

同室で恒例の記念撮影が行われた後，会場を210号室に移し，13：40より総会が開かれた．総会は河合潤教授の司会で議事が進行され，まず，長村光造会長から平成14年度の事業報告がなされた．次いで栗倉泰弘会計幹事から会計報告，芦田譲会計監事から監査報告がなされ，いずれも承認された．続いて，次期会長の推挙がなされ，新会長に斎藤敏明教授が選出された．斎藤新会長から就任の挨拶と抱負が語られ，総会は終了した．

引き続き，特別講演会が開催された．本年度は次の2つの講演が行われた．

「安心・安全な社会基盤を支える溶接技術」

新日本製鐵（株）顧問　百合岡信孝氏

「人との出会い，それが人生―too kind な人達―」

山口大学名誉教授，崇城大学教授　水田　義明氏

これらは記念講演として本誌に掲載されているが，百合岡氏は船舶，ガスタンク，原子力発電所，建物，橋梁，パイプラインなど様々な構造物の安全性と溶接技術の関わりを紹介された．また，水田氏は長年にわたる研究と，その中での出会った人との間に起こったエピソードについて話された．これらの講演はいずれも，非常に興味深く，参加者は熱心に傾聴した．平成15年度水曜会大会は，この講演終了後，午後4時過ぎに閉会した．

平成14年度水曜会会計報告

平成15年3月31日現在

収　入		支　出	
前年度繰越金	11,515,420円	会誌印刷代（製版・郵送料込）	
会　費	3,739,811	23巻5号	2,343,202円
会誌広告掲載料（製版代込）		印刷代（封筒他）	47,775
23巻4号	626,420	水曜会大会経費（14年6月22日）	
23巻5号	40,000	懇親会費	310,901
会誌論文別刷代	15,750	諸経費	1,033,158
名簿広告掲載料（製版代込）	830,355	水曜会東京大会経費（14年12月14日）	
名簿売上	2,007,231	懇親会費	629,262
会誌売上	9,000	写真代	72,997
水曜会大会懇親会費	245,000	諸経費	1,291,456
水曜会東京大会懇親会費	695,000	名簿発行費	3,187,369
水曜会東京大会写真代	68,000	会誌原稿料	222,000
東京水曜会からの寄付金	84,414	役員会経費	136,892
会誌23巻4号発行経費精算	13,851	通信費	82,340
預金利息	2,558	事務人件費	488,000
		文具，コピー代等	36,791
収入合計	19,892,810円	小　計	9,882,143円
		次年度への繰越金	10,010,667円
		内訳　銀行普通預金	161,303
		銀行定期預金	9,000,000
		郵便振替預金	762,498
		手持現金	86,866
		支出合計	19,892,810円

上記の通り会計報告致します．
平成15年6月14日
会計幹事　粟倉泰弘
以上の通り相違ございません．
会計監事　芦田　譲

平成15年度水曜会東京大会

●日　時　平成15年11月22日（土曜）14：00—21：00
●会　場　東京都千代田区神田錦町　学士会館本館　202号室講堂（大会）210号室大会議室（懇親会）

平成15年度水曜会東京大会は11月22日（土）千代田区神田錦町学士会館本館にて行われた．本大会の参加者は約110名であった．大会は202号室講堂にて午後2時より開会した．水曜会副会長の牧正志教授の司会のもと，まず日比野敏副会長から挨拶があり，続いて会長の斎藤敏明教授から挨拶と水曜会および京都大学の現状報告がなされた．

引き続き午後3時より特別講演会が開催された．本年度は以下の講演が行われた．

「資源・環境・エネルギー問題とバイオテクノロジー」

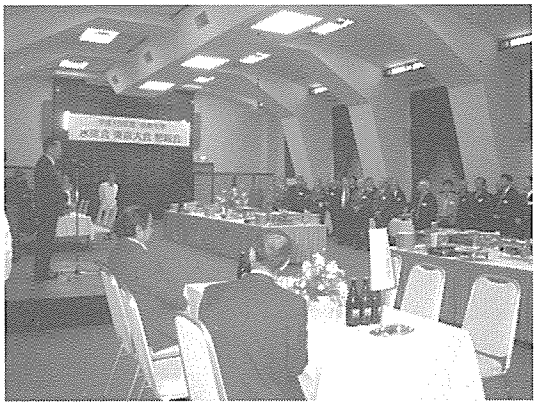
東京大学大学院　農学生命科学研究科　応用生命工学専攻

教授　五十嵐泰夫氏

講演者の五十嵐氏の専門分野は微生物学である．五十嵐氏は微生物を利用した廃棄物の分解に関する研究を精力的に行われており，バイオテクノロジーの活用による環境調和型かつ省エネルギーの廃棄物処理の実現を目指されている．講演は非常に興味深く，参加者は熱心に傾聴した．講演後も活発な質疑応答があり，公演時間の90分は瞬く間に過ぎた．

ついで，講演者の五十嵐氏を交えて参加者全員による記念撮影が行われた．午後5時より210号大会議室室に会場を移し懇親会が行われた．笹尾春夫氏の司会のもと，まず日比野敏副会長より開会の挨拶があり，ついで近藤良夫名誉教授の音頭で乾杯が行われた．会の途中，琵琶湖就航の歌が歌われたり，数件のスピーチがなされ，また参加者による恒例の寄せ書きが作成された．懇親会は終始和やかな雰囲気で進行し，参加者は旧交を温めた．懇親会終了後，平成15年度水曜会東京大会は午後7時頃に閉会した．





会員消息

27会福島大会
（昭和27年鉱山学科卒クラス会）

昨年の卒業50周年記念京都大会に引き続いてクラス会を開催した．少し趣向を変えてという会員の意向で，場所を福島県の岳温泉に設定した．東北と云うが，東京から新幹線で約1時間の便利な土地である．

平成15年6月11日15時に郡山駅集合，出迎えのバス約40分で創業100年という旅館「松渓苑」に着いた．ここは安達太良山山麓の鄙びた温泉地である．出席者は同伴の御夫人6名を含めて18人であった．旅館の大広間でのクラス会は地元の銘酒を味わいながら，近況報告，半世紀前の懐旧談等に花が咲き，至福の一夕を過ごして全員ご満悦の体．館内の酒房での2次会，さらに部屋に戻ってからの3次会と夜の更けるのを忘れて大大盛会！

翌12日は二本松市で高村光太郎の「智恵子抄」の智恵子生家等をメインに観光して15時に郡山駅で解散した．折角の東北なので会の前後に蔵王や松島などの観光を楽しんだ方も多かったようである．梅雨時で天候が心配されたが，級友諸子の普段の精進の賜で，バッグの中の傘は使わずじまいであった．

去年のクラス会で今後は毎年開催しようということが決議され，来年は山陰のどこかで開く予定で新幹事を指名した．尚，クラス会に出席できない人を含めて全同級生（卒業生31名の中21名が存命）による「回し文」を始めており，間もなく3巡目に入り継続実施の予定である．クラス会や回し文に今後も達者で参加し続けたいというのが70歳台半ばを過ぎた我々の願望である．

樹齢400年の松の大木と安達太良山の湧き水を取り入れたという昔ながらの和風旅館の庭園で撮った記念写真で，出席者を紹介します．

（平成15年度幹事：砂田・松岡・山田）



後列左から松岡，入江，岡村，山田，高林，砂田，
中列左から堀池，辻，中永，団，青山，寺田，
前列左から砂田，松岡，入江，青山，寺田，高林各夫人

昭和31年度冶金学科卒業クラス会

平成15年5月15日14時30分，クラス総勢23名中，15名が宿舎の東京ベイ・有明ワシントンホテルに三々五々に集合した．古希を越えた懐かしい顔を見つけて，ヤー，オーの声が響く．

卒業40年を過ぎた頃から始められたクラス会も4回目を迎えた．浜松，京都，志摩に続き，今回は東京組が幹事の指名をうけた．

東京は殆どの方が一度は住んだところで，衆知のところばかり，幹事は東京近郊も含めてその場所の選定に一苦労．

そこで，最近，開発が著しい「お台場」に目をつけた．さらに，幹事の一人がその「お台場」に昨年来ボーリングが行われている事を目撃した．そして，そのボーリングは，温泉テーマパーク大江戸温泉物語として開業される事が報じられた．懇親会をここで行うこととし，計画がすすめられた．

当日，ホテルに集合後，早速，一昨年オープンし，評判の高い，日本科学未来館（館長　宇宙飛行士　毛利衛）を見学した．最先端の科学技術に関する情報発信拠点，さらに，科学をひとつの文化として身近に感じさせる事等を目的とした施設．話題の，ノーベル賞研究の基となったスーパーカミオカンデの模型（クラス会員の一人は神岡鉱業所勤務経験者），超伝導電車，ヒトゲノム，宇宙から見た今の地球，ロボット等に目を見張る展示物が多い．この超軽薄短小の世界を前に，かつては，重厚長大の花形産業に属し，日本経済の発展に大いに寄与した過去に深く思いを馳せる冶金科学者，立派な設備に目を見張らせながらも，ボランテイアの若い女性の説明に魅せられる冶金科学者等，さまざまな見学方法で一時間半を終えた．

ついで，大江戸温泉物語へ．参加者が1名増え，総勢16名となる．ここは，江戸情緒を再現した総床面積約10,000 M²の湯屋．各自18種類の浴衣から好みの柄を選び浴室へ．裸の付き合いの中で，お互いにオナカの大きさをジロリ．入浴後は，江戸の町並みの中につくられた懇親会場，その名も八百八町「花蝶の間」へ．好みの浴衣を着ての懇親会は，これまた壮観．酒量は減ったが口角泡を飛ばす舌戦は昔と全く変わらず，直ぐに予定の時間が過ぎた．ホテルに戻りラウンジで二次会．といっても酒量はさらに減り，コーヒーで舌戦の続き．

翌日は，台場施設の見学日．生憎，東京地方は昨日来，梅雨を思わせる霧雨曇天模様．所要等で4名が帰郷したので，総勢12名で出発．「ゆりかもめ」一日券を使用して，自由の女神像（パリ・セーヌ河に建つ自由の女神像のレプリカ）遠望，フジテレビ本社見学，小香港ブラブラ，懐古街台場一丁目散策により所定の行程を終了．寄る年波か，足の速さが鈍る．再度，昼食会場のワシントンホテルに戻り，最上階の特別室へ．東京港越しに，霧雨に煙る東京を眺めながら再度懐古談．

次回のクラス会日程を取り決め，お互いの健康を祈願しつつ予定の14時少し前に散会となった．

（幹事：長澤・野村）



写真は日本科学未来館にて
左から国井，木村，竹内，吹田，藤田，荒木，土川，河内，菊川，田畑，海田，長澤，野村
池田，倉井は都合によりこの後の懇親会に参加した

昭和32年冶金学科卒クラス会

6月14日（土）水曜会大会に合わせて同期会（昭和32年冶金卒業）を開催しました．水曜会総会から出席させていただいた者も半数程度いて，大変興味深い特別講演を拝聴した上に，学生時代の助教授の先生方（勿論現在は大御所になっておられますが）にもお目にかかることが出来，すっかり気分は学生時代に戻って会場の「熊魚菴」に集まりました．

古来，中国の最高の珍味を「鯉唇熊掌」と言ったそうで，これにちなんで命名されたというお店を選んでくれたのも中国通の一瀬君ならではと感服し，一段と料理への期待も膨らみました．なかには卒業以来，45年振りという者同士も居たと思うのに，いきなり「おいお前」風に会話が弾みだしたのも心地よいことでありました．次々と出される料理はさすが「たん熊」の支店だけあってなかなかのものでありました．しかし，だべるのに夢中で果たして何人が板さんの腕前を正しく評価できたかは疑問でありました．

次回は命の在るうちにということで，3年後の水曜会大会の日に京都で幹事は例によって一瀬君，と決まり和気藹々のうちに，降り続いた雨も上がり無事お開きになりました．

出席者　一瀬英爾，田中克芳，田村敬二，長坂祐介，成田進，福田隆博，丸橋茂昭，森甲一，山崎隆雄，石部浩，竹中金二郎，三田村外喜男　以上12名（文責：三田村）



38水曜会同窓会（昭和38年冶金学科卒業）

平成15年6月14日18時から，卒業40周年同窓会を京大会館で催した．当日の水曜会大会で百合岡信孝君の特別講演があったので，それを聴講した後の会合である．20周年同窓会を皮切りに今回6度目の会合で，対象者43名に対して出席者は16名とまずまずの出足であった．大谷泰夫会長の発声で会は始まり，ひとり持ち時間5分で近況を報告し合った．サラリーマン時代を振り返った話が多かったが，今だからいうという秘められた話もあり，同窓会の気楽さと共にサラリーマン卒業を感じさせる面もあった．中には持ち時間が過ぎてもまだ30年前の話をする人もおり，近況報告は途中打ち切りになるのではないかと心配したが，皆の協力を得て無事予定の時刻に終え，遠くは関東，九州へと帰路についた．

今回は吉村忠良君のような卒業以来はじめて出席する人もいたが，40年の歳月を全く感じさせず学生時代と同じ雰囲気になれるのは同窓会の不思議なところである．殆どの人が社会の第一線を退きつつある年代であるが，

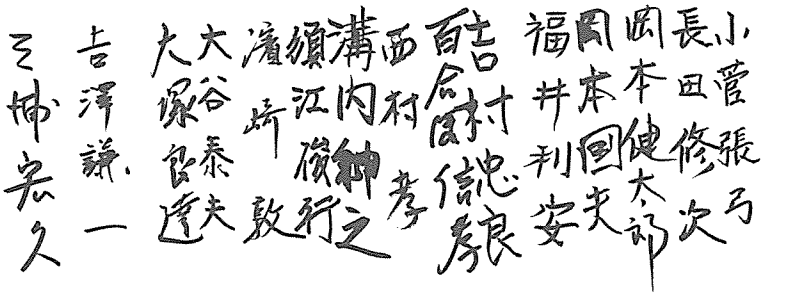
皆見かけは結構若い．これは見る方が相手を学生時代の残像と重ね合わせていること，話にまだまだ元気があること及びそれぞれ第二の仕事に情熱を燃やしているためか．今後毎年開催との声はまだなかったので，次回は2～3年後の水曜会大会に合わせて開催することで，琵琶湖周航の歌を合唱して終えた．

（幹事：吉澤記）



（前列）左から大塚良達，西村孝，福井利安，吉村忠良，宮木美光，長田修次，岡本健太郎
（後列）左から岡本国夫，溝内紳之，百合岡信孝，大谷泰夫，須江俊行，濱崎敦，小菅張弓，吉澤謙一
途中退席：三浦宏久

冶金学科卒業40周年
38水曜会
平成15年6月14日
於　京大会館



近藤研・朝木研・河合研究室合同 OB 会

標記の OB 会を平成 15 年 8 月 16 日京大会館にて開催しました．参加費は同伴者無料としたため家族連れも多く，約 60 名の出席となりました．琵琶湖周航の歌などを全員で合唱し盛り上がりました．OB 会の案内を葉書・e-mail で OB 全員に出しましたが，このような会は初めてのため，住所録が不備で宛先不明で帰ってきた葉書も多く，研究室 OB の消息をご存知の方は，田邊までご連絡ください，OB 会は夕方から場所を研究室（工学部総合校舎 8 階）に移し，実験室など見学の後，京都で最もよい場所から大文字を観賞しました．平成 16 年中にも同様の OB 会を予定しています．今回参加できなかった OB はぜひご出席ください．

（田邊晃生）



二八会 50 周年記念会
（S28 年冶金学科卒）

二八会は卒業 50 周年を記念して晩秋の京洛の地で開催する事になり，11 月 26 日（土）午後 2 時京大正門前に 25 名（含夫人 5 名）が参集した．京大本館は化粧直しのため塀が設けられ，現場は混雑し旧冶金学教室の所在も判然としない状況下にある．全員時計台をバックに記念撮影後倉知、西村両幹事の先導で 5 階の教室に赴き、粟倉教授より冶金学科の変遷の説明を聴講する．即ち冶金学科はＳ 36 年冶金学科と金属加工学科 2 部門となり，Ｈ 6 年に機械工学科，航空工学科，原子核工学科等々と統合して物理工学科となり，その中の材料科学コースとして現在に至っている．時代の要請に対応した必然的な結果だと思う．田辺助教授の先導で実験室の見学を行う．最初の室では多数のパソコンが設置され度胆を抜かれる．次いで透過電顕によるチタンアルミニウムの結晶構造の解析とバナジウム鋼の定量分析の実演を見学する．最先端技術を駆使した実験装置に感じ入る．しかしビーカーで攪拌実験装置を見る時，設備的には改良されてはいるが，原理的には往時と変っていない事に気付きホットすると同時に懐しさがこみ上げる．最後に別棟の 8 階から東方の「大文字」西方の「妙法」を望見する．8 月 16 日の送り火を見るには最適の場所である．意図的な設計か或は偶然の産物か．

新しい建屋，実験装置，屋内雰囲気，研究内容，あまつさえリラックスされた先生方の服装等々，滄海変じて桑田となるを見るにつけ今浦島は隔世の感を深く抱きつつ京大キャンパスを後にした．

次の会場の高台寺「閑人」に向う。出席者の半数は徒歩約 1 時間 20 分後に到着しその健脚ぶりを実証する．午後 6 時倉知幹事の挨拶と最年長星野君の乾杯の音頭で開宴となる．半世紀という長年月を生き抜き再会出来た事及びご夫人が 5 名と昨年より増加した事は誠に喜ばしい限りである．しかし曾ての紅顔の美青年も鬢髪霜を置く風貌になっているのも自然の成りゆきで致し方あるまい．酒量が増すにつれ懐旧談に花が咲く．渡辺君は未だ現役で油の事業に関係し世界を股にかけ活躍中で，昨日ニューヨークから帰国し馳せ参じた由．慶賀の至りである．しかし寄る年波には勝てず，三村君と津田君から怪我の話が披露される．他山の石とせねばならない．常連の町田君が腰椎骨折でリハビリ中で今回は欠席となっている．本復を心からお祈りする．又三井の神岡鉱山の話から派生して小柴氏のカミオカンデのニュートリ

ノの発見によるノーベル賞について侃諤の論争が展開された．同氏は強靭な忍耐と卓越した行動力でノーベル賞を“奪取”したものであり，正に「一高」型の典型といえよう．秋の夜の時の流れは早く，最後に今や国民歌となっている「琵琶湖周航の歌」を全員肩を組んで陶酔と恍惚の中に全曲斉唱して掉尾を飾り，西村幹事の閉会の辞で幕を閉じた．

来年の二八会は関東地方での開催が決り再会を約して帰路についたが，数名は京の巷を彷徨し余韻を楽しんだと聞いている．

二八会の卒業者は44名，生存者は35名で生存率は80%と高い数字を示している．これは学生時代適切に学びよく遊び，交誼の輪を拡げて培われた人間性の賜ではないかと思っている．しかし油断は禁物，黄泉の国に旅立つ者も目につく様になった．時の流れは非情であり冷厳である．待って欲しいと歎願しても，待てと命令しても無視して矢の如く流れて行く．残された時間は極めて貴重であり大切にしたいものである．

（松浦記）



（後列左より）笠島，高野，渡辺，津田，三村，山岡，川村，星野，倉知，城戸，森田，（中列左より）梅田，松浦，岩田，田山，川島，浅井，青木，（前列左より）浅井夫人，松村，安田夫人，舛村夫人，城戸夫人，川島夫人，西村

冶金学科新制28年卒業50周年会報告

私達のクラスは，新制の第1回生で新制の大学院も発足し，20名でした．（中村為昭君のみ大学院から入学）．それが早いもので卒業50周年になりました．そこでそれを記念して集まろうじゃないかということになり，平成15年11月27日～28日に京都唯一の温泉，亀岡市の亀岡ハイツで集まりました．

50年の年月は長く，8名の方が亡くなられ，病気等で4名欠席，出席者は，（敬称略）石田寛，井上欣一，小原好二郎，田川舜朗，西村義雄，堀敬二，薬師寺正雄，植田正明の8名でした．しぶとく生き残ってきた面々ですので，会は盛り上がり，翌日の午前2時頃までだべりました．

その中で印象に残った話は，西村秀雄先生と小磯良平画伯についての西村義雄君（秀雄先生のご子息）の話でした．西村先生が昭和3年から4年にかけてフランス留学されたとき，小磯良平画伯も丁度フランスに留学されていて，お二人は親交を結ばれたそうです．ご一緒に写生なども行かれたことが，先生の日記に残っています．（詳しくは，西村秀雄のフランス留学日記抜粋：西村義雄：水曜会誌21巻9号平成4年12月）このとき画伯の描かれた「南仏ニース風景」の絵を画伯から西村先生に譲られ，西村家で保管しておられたのですが，西村義雄君の神戸市立の小磯記念美術館に寄贈されて，展示されるようになったとのお話でした．小磯良平画伯の数少ない貴重な風景画です．

同期会のほうは，嵯峨の紅葉や久しぶりの京都散策をして学生時代を懐しみました．

（植田正明記）



昭和40年資源卒業生同窓会

平成15年9月15日，16日に昭40年資源卒の同窓会が開催された．大学に集合の後，トロッコ列車で亀岡に向かい湯の花温泉で一泊．翌日はゴルフ組みと保津川下り組に別れ久しぶりに旧交を温めた．参加者は14名であった．

（齋藤記）



会 員 通 信 欄

平成15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致します．

向井　滋（冶金，昭12）数えで91才になりました．ね込むこともなく，平常通りの生活をしています．

公荘　惟成（採鉱，昭13）つつが無く過しています．

平松　良雄（採冶，昭13）年をとって弱っていますが，まだ元気です．

髙嶋　宏（冶金，昭15）米寿を迎えましたがおかげで元気で，水曜会誌を楽しく勉強しております．

成瀬　一郎（採鉱，昭16）その日暮し乍ら，何とか日々を過しております．

村田　信（冶金，昭16）86歳になりました．足の弱り方がひどく，懸命に歩いています．

柳沢　雅勇（冶金，昭16）今のSARS発生前に1ヶ月「ジャカルタ」へ旅行をして来ました．足腰に加齢の重さを感じますが，何とか独居生活を続けています．

宮崎勢四郎（冶金，昭17）老化現象は進行中ですがまだ自立しております．

村上陽太郎（冶金，昭17）お蔭で健康で，元気で，あまり暇でない毎日を感謝しながら過しています．

成瀬　光芳（冶金，昭17）自宅静養中．

三谷　裕康（冶金，昭17）左眼緑内障で道楽の絵が描けなくなってまいりました．右眼は健全ですので読書三昧の生活を続けています．

久芳　正義（冶金，昭18）まだ遠くには出かけられませんが5月27日に82歳の誕生日を迎える予定です．

三宅　敏夫（冶金，昭18）ぼちぼちながら何んとか元気です．今年中に例年のごとく昭18年冶金のクラス会が出来ればと願っています．

伊吹　昭男（冶金，昭19）バンビ農園（自家経営）不順れな仕事，大した事は出来ませんが，お蔭様で目下無事に過しています．

下川　敬治（冶金，昭20）幸いに健康に恵れ毎日楽しく過しています．

荒川　武二（冶金，昭20）齢相当に元気に過しております．

太田　豊彦（冶金，昭20）大分年を感じる様になりました．JFEスチール順調な様でほっとしています．

佐伯　博蔵（鉱山，昭21）昭和18年入学以来60年，年令相応には元気で傘寿を迎え，油絵，旅行等も楽んでいます．4月京都をたづね，古都のしだれ桜，新緑をエンジョイしました．

相原　和穂（冶金，昭21）伸銅業を生涯の仕事としてやって来ました．苦しいことも楽しかったことも有りましたが，身体が健康だったことが最高でした．

畑　博（鉱山，昭21）H12年11月水頭症を患い，手術1ヶ月入院，治癒以後療養，現在，何事もなく現在に至る．

小山田　進（鉱山，昭21）体調不良で唯今入院中ですが快方に向って頑張っております．

池田　保（冶金，昭21）元気に過しています．一部の会社のQC指導をしています．又，週1回若い人とテニスを楽しんでいます．

田辺　精三（冶金，昭22）今年の阪神タイガースは目下，春の快進撃中．HTが勝ちYGが負けた次の日はインターネットで各社のスポーツ欄をみて悦に入っています．

山崎　豊彦（鉱山，昭22）本年までは大学の研究所で研究しています．東京では昭和22年卒業の同窓生と年一度は会っています．

寺井　士郎（冶金，昭22）冶金学科という名称がなくなってから何年になるのでしょうか．今もし学生であったら余りにも細分科された学科の選択にとまどうかも知れません．昭和は遠くなりにけりという思いです．

和邇　博（鉱山，昭22）年令の割には元気な方

で何かと忙しい毎日を送っています．但し1日の活動時間は短かくなって来ました．

生長　克己（冶金，昭23）老後を心配する娘の言葉に動かされこの年で近所に転居しました．

中原　克幸（冶金，昭23）元気に過しています．

岡田　　明（冶金，昭23）毎年1回昭23年卒冶金科の会合（金友会）を関西で開催して，楽しんでいます．

三谷　文夫（鉱山，昭23）卒後55年が経ちました．歳相応に元気でいます．少し前になりますが，あるビールを飲む会で，近藤良夫，水野政夫両先生にお会いし，久しぶりに昔の話がはずみました．

岡野　豊文（鉱山，昭23）本年4月末を以て中村展設（株）を退職，完全にフリー人生に入りました．

奈古屋嘉茂（冶金，昭24）当社の水曜会々員も殆んど居なくなりましたが皆元気でやっています．

鷹取　正六（冶金，昭24）卒業後，55ヶ年にもなりますが，元気にしています．今日は，同期の奥谷君，平野君と，宝塚ホテルで懇親雑談をしましたが，同窓生というものは，いつまでたっても，一味違う親密さを感じますね．

奥川　卓爾（冶金，昭24）まあ，恙なくやっております．

神保健二郎（鉱山，昭24）鉱山学科24年卒業は，「京大KK24会」の会合を毎年開催しています．今年も10月24～25日，一泊して開催します．毎回8名程度集まり，おかげ様で元気にしています．

小田　正三（鉱山，昭24）会社を長男が引継いで居りますのでそれを手伝って居ります．

小西　恭三（冶金，昭25）年を重ねますにつれて，色々病気が出て来てますが，通院することが，運動になると思い，頑張っています．

冨岡　敬之（冶金，昭25）近藤良夫先生と月1回の研究会でお会いしていますが，先生は月1回のペースで海外出張をしておられます．私も見習って元気でやっております．

佐光日出海（冶金，昭25）元気に過しております．

荒川　次郎（冶金，昭26）健康管理を第一とし，趣味の写真活動に熱中して居ります．

森　　嘉紀（冶金，昭26）さいわい健康な毎日を楽しんでいます．

木村　　治（鉱山，昭26）平和を切望しながら，程々に過しております．

田中　誠一（冶金，昭26）一応元気に過しております．地方の文化活動に，時々参加しております．

田辺　定男（冶金，昭26）週一回病院に行き加療中ですが体調も良く健康ウォークを続けています．

松岡　秀夫（鉱山，昭27）リタイヤーして10年，好きなことをして過しています．身心の衰えは否めませんが，何とか元気です．

谷口　昭雄（鉱山，昭27）歳波にはなんとか元気でやっています．

寺田　　孚（鉱山，昭27）会員の皆様のご発展を願うとともに水曜会がしょぼくれないことを期待しています．

前波　　力（冶金，昭27）地域社会，福祉関係が定職となっています．

浅井　浩実（冶金，昭28）“陽のこりて暮れるに未だ遠し”今年は卒業50周年になるがまだ元気でパソコンをマスターすべく頑張っています．

岡本　成基（鉱山，昭28）心筋梗塞後次々と発病していますが後期老人（75才以上）になったのですから止むを得ません．

笹栗　弘喬（鉱山，昭28）お蔭様で元気です．昨年半ばからリタイア済みです．

西村　義雄（新・冶金，昭28）眼の白内障が多少進んで来たので，近い将来，手術が必要かなと思っております．それでも，今年の桜も十分楽しめました．まだ当分，元気でいられそうです．

岩田　徳重（冶金，昭28）昨年5月第2の人生の先生業もリタイヤし，自適に過しています．今年は卒業50周年で，旧学友と会えるのが楽しみです．

倉知　三夫（冶金，昭28）お蔭様で相変らず元気に「平和と民主主義をすすめる左京懇談会」で平和と民主主義を宣言した日本国憲法を世界へ展開する方途について考え，ボランティア活動をやっています．21世紀の学問は平和と環境に役立つものが必要です．

田山　　昭（冶金，昭28）ウォーキングで健康づくりをして何とか元気にしています．

小島　勢一（冶金，昭29）地域のシニアーの集いや各種団体で講師を務める傍ら，趣味仲間との交流が広がり，知人，友人が年々増えています．

三浦　　精（冶金，昭29）少子化を迎え私学は学生の確保に生き残りをかけて必死です．教務部長をさせられ走り廻って居りますが何とか研究はつづけて居ります．

松岡　英夫（冶金，昭29）週一回のテニスで楽しんでいます．先日の水曜会誌（vol.23，No.5）の村上先生の研究生活を顧みて〔I〕を興味深く読みました．次回を楽しみにしています．

山之内種彦（冶金，昭29）歳をとるとともに，情

報の収集量が少なくなりました．

泉　　泰通（冶金，昭29）地域の交流や，有機自然農法による家庭菜園，ウォーキング等の行事に追われています．

赤澤　正久（冶金，昭30）3月で定年退職し，非常勤講師として学生との接触をしております．

髙田　利男（鉱山，昭30）昨年3月に職を離れ，自由の身となりました．71才になっておりますが元気で生活を楽しんで居ります．

清滝昌三郎（鉱山，昭30）今年古稀を迎え，この四月には春の叙勲を受けて，記念すべき節目の年となりました．

井上　瑞城（鉱山，昭30）元気で過しております．

佐藤　史郎（冶金，昭30）今更ながらも，銅管の普及，とくに水道給水管として，について考えています．ほぼ毎日，出社（相談役）しています．お立寄り下さい．

塩出　啓典（冶金，昭30）水曜会の会合が，東京のように広島でもやってほしいと願っています．広島でも過去に何回かやったが，つづいていません．

荒木　泰治（冶金，昭31）元気にスポーツなども愉しんでいます．

長澤　元夫（冶金，昭31）今年6月末で日本金属を卒業します．

米津栄次郎（鉱山，昭31）NPOリーダー養成講座を経て，4月に，池田市公益活動促進協議会に入会．「民」が運営する事で見えて来る，新鮮な可能性に挑戦しています．

田村　敬二（冶金，昭32）韓国ALDEX社はAl脱酸材をポハン製鉄に納入．Metal Hydride生産計画中，それに指導で参加しています．

岡田　時一（鉱山，昭33）平成11年2月東横化学を退社しました．現在転居し，娘夫婦と住んでいます．脚の具合が今一つ，散歩の毎日です．

伴　誠二（冶金，昭33）4年前，神戸製鋼を退職致しました．

神尾　恭一（鉱山，昭33）グローバル産業（株）を退職し，自宅にいます．

松本　善文（冶金，昭33）元気に過しております．雑事に逐われる日々ですが…．

本間　良治（鉱山，昭33）今年70才になりましたが，まだ現役でがんばっています．

谷口　章八（鉱山，昭33）元気にしております．日本では鉱山がほとんどなくなり，時に淋しさを感じます．

児玉　幸夫（鉱山，昭34）伊能ウォークでは完歩証はもらえなかったのですが，地図コンテスト，体験記は，努力賞をもらいました．そして当地マラソン大会では完走証をもらいました．1kmでしたが13分でした．来年は2kmに挑戦するつもりです．

林　　明夫（冶金，昭34）入退院で気力の消滅がないように頑張っています．

明田　　莞（冶金，昭34）元気で，仕事をやっています．

尾竹　嘉三（鉱山，昭34）剣神社に宮司として元気に奉仕しています．

熱田　善男（冶金，昭34）H15年4月3日，古希を迎えました．春夏秋に続く人生の冬のシーズンに入ったわけです．

西田　米治（鉱山，昭35）地元の商店街や住宅地に対する地域活性化法の適用，TMO（タウンマネジメントオーガニゼイション）の設立，社会実験などの変革に注目している今日此頃です．学科も教室の名前もすっかり変り，知った先生も2人，…….遠くにありて思いつつ．

小泉　　俊（鉱山，昭35）皆様のご多幸をお祈り申し上げます．

嶋﨑　義尚（冶金，昭35）元気です．

武川　哲也（冶金，昭35）謡・仕舞，ウォーキング等趣味に明暮れの日々を送っています．

阿部　光延（冶金，昭35）時折り発展途上国技術者の教育活動に参画しながら，自適の生活を送っております．

久賀　俊正（鉱山，昭35）短期間，青森県六ヶ所村に来ています．

山本　隆造（冶金，昭36）自治会長，民生委員などで福祉活動に従事しています．

赤井　愼一（冶金，昭36）2002年12月に完全退職し，年金生活に入りました．家庭菜園やたまのゴルフの他，新宮先生の「エネカン」などにも参加し元気に過しております．

小澤不眠夫（鉱山・大学院修士，昭36）お蔭様で日々元気に過しております．先日久し振りに京都を訪ね，東山の景色と雰囲気に学生時代を想い出しました．

森定　祝雄（冶金，昭36）今年3月31日で退職し，自由の身となりました．元気に過ごしております．

彼島　秀雄（冶金，昭36）昨年9月，勤務先の東京から京都へ戻りました．

恩田　　怜（冶金，昭36）この春，神戸市会議員三期目の当選を果しました．

岩崎　　滋（冶金，昭36）今年3月15日，京都大

学高等教育教授システム開発センター主催の第2回大学教育研究集会にて，発表させて頂きました．

名和田　進（冶金，昭37）平成14年春日本軽金属退職．

井手　謙三（鉱山，昭37）アラビア石油を定年退職して5年になります．毎日スポーツ（テニス，卓球，時々ゴルフ）散歩等楽しく過しております．

白井　勲（鉱山，昭37）企業を定年退職後，経営コンサルタントとして細々とやっています．

岡本健太郎（冶金，昭38）非常勤となり，郷里（淡路島）と現住所をいききしてます．

西村　孝（冶金，昭38）チタン材料の更なる普及に走りまわっています．

長田　修次（冶金，昭38）この3月末に新居浜高専を停年退官し，大阪・茨木市に転居いたしました．目下，リフレッシュ中．

花崎　紘一（鉱山，昭38）現役最後の水曜会大会になります．卒業後ちょうど40年の当日行われるクラス会で同級の皆さんに会えるのを楽しみにしています．

三浦　宏久（冶金，昭38）大阪・茨木で研究を楽しんでいます．

田村　祥（鉱山，昭38）専門学校で「インターネットテクノロジー」科を履習し今は職探しです．昨日，「愛・地球博ボランティアセンター」に応募し面接試験を受けましたが果して結果は如何，何しろ年齢で？

津島　健治（冶金，昭39）毎回，水曜会誌を楽しみにしています．

望月　志郎（資源工，昭40）スクラップ乱高下の中，生き残りをかけて頑張っております．

木村　元信（鉱山，昭40）平成15年3月末を以て，会社生活を終え，自由人となりました．

三浦　義明（資源，昭40）自宅待機しています．京都かインドネシアに住んでいます．

吉田　興一（冶金，昭40）住友電気工業（株）を定年退職し，東大阪の特許事務所に勤務しています．

森　邦彦（冶金，昭41）昨年11月に昭37年入学工学部2組会（T2会，大部分水曜会員）を京都，長浜で行い，次の日は湖東三山の紅葉，彦根カントリーのゴルフで旧交を温めました．

白井　秀明（金属加工，昭41）電線メーカーに入りながら，電線以外の開発に没頭して30余年．ものを創り，世の中に遺ることがうれしいと感じる歳になりました．たとえそれが小さな部品や蔭の材料でも．

岡田　駿（資源，昭42）H15.4.に秋田製錬（株）から現在のイー・アンド・イーソリューションズ（株）に変りました．環境関係のコンサルティング会社です．

速水　弘之（冶金，昭42）はや今年定年を迎える年となりました．あっという間に過ぎ去った35年強の企業エンジニア人生でした．とても充実していましたことに心より周りの方々に感謝しております．若い頃，定年の挨拶におけます「お陰様で無事大過なく勤めることができました」という言葉には，何となく物足りなさを感じておりましたが，いざ自分自身が定年を間近に迎えた今，この言葉の持つ重さ，深さを，しみじみと身にしみて感じ入っております．

嶋田　高光（金属加工，昭42）昨年7月末67ヶ月ぶりに中国（北京・上海）駐在より，帰国．

黒木　正純（冶金，昭43）今年も超多忙．仕事のある幸をかみしめています．

木村　隆義（冶金，昭43）昨年10月にスタートしたエム・エスジンク（住友金属鉱山と三井金属鉱業の亜鉛事業総合会社）で記録的な低価格の逆境の中頑張っています．

髙山　新司（金属加工，昭43）我々の年代も定年に近づき，一洙の淋しさを感じています．小生の方は毎年約20人の学生の面倒を見なければならず感じている暇もありませんが．

吉川　正昭（資源工，昭43）建設関係も不況のため，就職先や，（学生の入学希望も）少なくなってきました．

淺井　達雄（資源工，昭44）昨年7月に長岡技術科学大学経営情報系教授に着任しました．国立大学では，他にない学科ということで，特色を出していこうとしています．

丹羽　正男（資源工，昭44）現在，子会社京滋ニチユ（株）へ出向中．

波戸　浩（金属加工，昭44）平成15年4月に夫婦で渡英しました．一年程滞在の予定です．

中野　勇男（冶金，昭44）シリコン半導体素子を1チップにシステム化したシステムオンチップ（SOC）の技術開発担当です．

木村　悦治（冶金，昭44）元気でやっております．

宮崎　純（冶金，昭46）神戸製鋼所の研究開発部門で企画業務を行っており，限られた資原でいかに効率良く研究開発を行うか日々頭を悩ませております．

西村　正夫（資源工，昭46）（株）奥村組を早期退

職し，6月から国立宮城工業高等専門学校(情報デザイン学科教授）に就任の予定．

中島　正博（資源工，昭47）元気で頑張っています．

出浦　　昇(資源工，昭47)昨年10月に台湾から任期満了帰国しました．海外事業本部勤務です．

土井　育郎（資源工，昭47）神田駅より3分のところに越しました．

中山　俊夫（金属加工，昭48）毎日忙しくしくおります．

朝日　　格（冶金，昭48）アルミ板の営業をやっています．技術力＝商品価値が世の中で正当に評価されない現実と苦闘中！

髙畠　　章(金，昭49) 2002年7月に大阪転勤となりましたので住所も京都に戻って参りました．これを機会に水曜会との接点が増えればと思っております

小西　延明（金属系，昭49）現在，名古屋に単身赴任中です．留守宅近くに京大桂坂キャンパスが完成間近となってきました．広大なキャンパスで緑も多く，そのうち散歩で訪門したいと思っています．

髙畠　　章（金属加工，昭49）丸紅のハウスエージェンシーりえぞん企画（株）に出向しております．

成吉　幸雄（金属加工，昭50）周南製鋼所（ステンレス一貫工場）は2回目の着任ですが，早いもので着任後1年が経過しました．

楠井　　潤(金属系，昭51)滋賀県に住んで17年になりました．交通事情が毎年少しずつ便利になってきました．

中尾　禎造（冶金，昭52）和歌山に来て2年が経過しました．少々和歌山弁が混じるようになりました．

向井　　孝（金属系，昭52）冶金研究所で製綱関係の仕事をしています．

宮脇　新也（金属加工，昭53）相変らず条鋼の圧延を担当しています．

矢内　雅造（金属系，昭54）厳しい環境下，波にのみこまれないよう必死にがんばってます．

室崎　宏治（資源，昭54）教育改革で大きく変っていくことと思いますが，世界をリードしていく教育を打ち立ててほしいです．

道本　龍彦（冶金，昭55）今の会社に転職して，もうすぐ3年になります．4月から組織変更があり，技術と品質管理担当の兼任になりました．

北村　公亮(資源工，昭55)水曜会誌23巻5号掲載の「多変量解析を応用したスポーツ工学（丸橋氏著)」，興味深く拝見いたしました．昨今のゴルファーは実に細かい質問をされる方が多く，シャフトのトルク，モーメント慣性，重心深度等対応するサイドも大変です．ただ，もっと多くの方がスポーツに親しめるような素材が開発されることを期待しております．

須川　壮己（資源工，昭55）相変わらず息もつかずに働いています．でも，厳しさが緩む気配がなかなか感じられず，くじけそうになりますが，まぁここが頑張りどきでしょう．

大石　哲也（冶金，昭56）シンガポールから倉敷に戻って来ました．

川上　正弘(金属加工，昭56)今年4月異動して，JFEエンジニアリング（株）所属となりました．

山地　勝仁（資源，昭57）今年四月ブラジルへ転勤のためよろしくお願いします．

福本　則浩（資源工，昭58）5/1付で八幡から君津に転勤となりました．

田中　　晶（金属系，昭58）NTT未来ねっと研究所に勤務しております．

吉留　良史（資源工，昭58）先日，NHKこどもニュースの取材がありました．こども向けということで，リラックスし，楽しく収録できました．

河澄　英輔（資源工，昭59）4月から新会社JFEエンジニアリングに移り，毎日千葉から横浜まで通勤しています．

渡辺　俊樹（資源工，昭61）5月1日より名古屋大学に異動し，地震火山・防災研究センターにおいて新しい分野に取り組んでいます．

山本　尚志(冶金，昭61)IT不況で厳しい状況が続いていますが，新商品開発を進めて早く再建したいと頑張っております．

安藤　章作（金属系，昭61）アメリカ・ロサンゼルスに赴任になりました．

南　　浩一（資源，昭62）今年の4月に5年間過ごしたジャカルタから帰国しました．

木本　　隆(冶金，昭62) 2003年1月より，三洋パシフィック投資顧問（株）に勤務しております．「企業再生ファンド」の運営会社で，①不良債権②事業会社の株式③不動産の信託受益権への投資助言を行います．

岡部　　徹（冶金，昭63）東北大→東大に移って早2年半が経ちました．

西尾　裕司（冶金，平元）ほんだ歯科（東大阪市）において，虫歯・歯周病予防，顎関節症治療，口臭治療などに力を入れて取り組んでいます．

古澤　　元（金属系，平元）6年間の米国駐在から帰国し，本年より自宅住所も変わりました．

中森　英行（金属系，平元）この前取引銀行支店長以下行員様対象に鉄と鋳物のセミナーの講師として1時間程熱弁をふるって参りました．

中野　博志（資源工，平2）会社に入って10年がすぎました．不景気ですが，目下，奮闘努力の毎日です．大学も研究室も名称が変わり，時の流れを感じてしまいます．

山本　健一（金属系，平元）4月末にフジテックを退職いたしました．6月からジャトコ株式会社に勤務します．世間の荒波にもまれていますが，何とか頑張っています．

黒川俊一郎（資源工，平2）あいかわらずWindows OS関連の仕事を続けております．

谷本　義典（資源工，平3）ゲーム業界にも“再編”の嵐が吹いています．

瀬戸　順孝（資源工，平3）京大・工学部も次年度より電気・化学系から順次桂へ移転が始まるとのこと，“心の故郷”が失われていくようで寂しい限りです．

平田　岳夫（資源，平4）元気に工場勤務いたしております．

田中　一郎（冶金，平4）今年4月から1年の予定でニュージーランドのアルミ製錬工場へ出向することになりました．

中村　哲也（金，平5）2002年10月に東大生産研から，SPring-8に移りました．

神谷　　岳（資源，平6）電子部品メーカーで高周波計測技術の研究をする傍ら，弁理士として特許事務所の経営を行っています．

小島　雄三（資源工，平7）ここ数年“無職”という状態を続けているが，“日本て，こんな社会だったかな？”と思うことがしばしば．

宇佐見隆行（金属系，平7）昨年8月に横浜へ転勤，11月に結婚しました．

津井信一郎（金属系，平9）アラバマ州立大学で居ります．

中谷　　巌（冶金，平9，材料工学，平11）結婚しました．

荻野　智行（資源工，平10）相変わらず焼却炉，ボイラ関連のCFDの仕事をしています．

山内　　聡（物理工，平11）現在，働きながら予備校に通って，弁理士の勉強をしております．

木森　達郎（物理工，平11）H14年10月に結婚しました．現在，北九州に住んでおります．

山下　俊幸（物理工，平12）東京での勤務となりました．

蜷川　典泰（物理工，平12）環境問題，特に化学物質関連の研究を行っています．

村田　唯介（物理工，平14）大学在学時に学ばせて頂いた事を糧に日々精進しております．

古田　慶太（地球工，平15）先生方，お世話になりました．元気でやっております．本当にありがとうございました．

宮谷　義六（元教官）何とか元気で，日々を送っています．

森　　英嗣（元教官）こちらでは産業廃棄ガラスのリサイクルの研究を行っており色々と成果が出てきました．皆様とまたお会い出来る日を楽しみにしております．

段野　　勝（元教官）昨年第2の学校も退職して1年が過ぎました．毎日元気に過しています．

中村　陽二（元教官）足をわるくし目下リハビリ中です．

港　　種雄（元教官）平成6年背椎狭けり病で手術，爾来，腰，脚がいたく歩行に難渋しています．

奥　　健夫（元教官）TEMをやりつつも新しい分野に興味をもっております．

平成15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		
加藤政史	地中レーダの分解能の限界に関する基礎的研究	京都大学大学院
木村俊則	海洋MT法におけるリモートリファレンス処理の有効性	京都大学大学院
永井啓司	3次元浅層反射法による堤体内部の空洞調査	京都大学大学院
原田南海子	エアスパージングにおける空気移動領域の比抵抗法によるモニタリング	京都大学大学院
安井利尚	個別要素法による不連続面を伝播する波動シミュレーション	京都大学工学部
地質工学分野		
植田論史	ボーリングコアを利用した評点方式による岩盤分類基準の開発	京都大学大学院
亀井理映	メタンハイドレート賦存量評価法に関する研究	京都大学大学院
高馬秀勝	節理群区分における最適クラスタリング方法の検討	長谷工コーポレーション
地殻開発工学分野		
中川雄介	立坑内における鉱石流動挙動シミュレーション	京都大学大学院
依田成正	ロックボルト支保による周辺岩盤の応力変形挙動	京都大学大学院
内海一統	地山の強度劣化を考慮した既設トンネルの変状解析	京都大学大学院
川崎彰和	帯水層を対象としたCO_2圧入シミュレーション	京都大学大学院
藤田稔	数値多孔質媒体モデルの作成とその応用について	京都大学大学院
古田慶太	トンネル先受け鋼管の打設角の影響を考慮した支保効果の検討	
ジオメカトロニクス分野		
浅井新輔	吊橋ハンガーロープ端末固定部の超音波劣化評価について	京都大学大学院
有本拓也	索道搬器の動揺抑制機構の最適化に関する研究	京都大学大学院
辰巳直行	ワイヤロープ非破壊検査への磁歪超音波法適用に関する基礎的検討	京都大学大学院
福島公之	架空索道における索条システムの形態解析法の構築	京都大学大学院
松本和彦	有限要素法による並列複数円孔周辺の応力解析の岩石破壊技術への応用	㈱MCエクスプロレーション
地殻環境工学講座		
青木悠二	動電学的土壌浄化技術における重金属の浄化促進効果について	京都大学大学院
幸岡智也	低透水性岩盤への動的注入効果に関する実験的検討	京都大学大学院
左海裕幸	大断面トンネルの3次元地質モデル及びその力学的特性の評価	京都大学大学院
辰巳剛規	岩石の破壊現象と微小破壊音に関する基礎的検討	京都大学大学院
中村百合子	動的グラウト工法における注入メカニズムに関する理論的検討	京都大学大学院

氏　名	研　究　論　文　題　目	就　職　先
宇宙資源エネルギー学分野		
小　林　　航	電析 Bi 薄膜微細構造に及ぼす強磁場および重力レベルの影響	京都大学大学院エネルギー科学研究科
斎　藤　友　二	光化学反応による水溶液中の有機物の分解に関する基礎的研究	京都大学大学院エネルギー科学研究科
玉　田　良　太	液体中における3球の運動の理論解析と数値解析	京都大学大学院エネルギー科学研究科
西　野　勇　輝	シリカ超微粒子のエマルション浮選による濃縮に関する研究	京都大学大学院エネルギー科学研究科
南　部　雅　樹	色素増感型太陽電池の電気化学プロセ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科
資源エネルギープロセス学分野		
蟹　江　智　文	高張力鋼板の成形限界予測への延性破壊条件式の適用	京都大学大学院エネルギー科学研究科
塩　谷　　優	固体面に衝突する液滴の変形挙動の数値解析	京都大学大学院エネルギー科学研究科
村　上　史　生	揚固管に曲がり部分を持つエアリフトポンプの特性	京都大学大学院エネルギー科学研究科
大久保　武　史	有限要素法を用いたチューブハイドロフォーミングの数値解析	京都大学大学院エネルギー科学研究科
森　下　貴　申	マグネシウム合金 AZ31 板の高温変形特性	京都大学大学院エネルギー科学研究科
資源エネルギーシステム学分野		
井　田　拓　良	シリカコーティングによる有害元素の溶出防止	京都大学大学院
荻　原　俊　輔	銅における長期需給動向	東京三菱銀行
後　藤　直　子	ラマン分光法によるガスハイドレート分解の考察	京都大学大学院
白　石　純　一	日本国内における二次資源需要動向の分析	京都大学大学院
西　本　武　司	生物起源珪藻土からの機能性材料用シリカの精製	京都大学大学院
野　村　達　穂	光学顕微鏡による CO_2 ハイドレートの生成・分解過程の観察	京都大学大学院

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		
Bui Thi Thanh Huyen	Study on Subsurface Structure and Rock Properties Estimation Based on 3D Seismic and Well Log Data	京都大学大学院
浅　田　裕　二	局所化及び逐次解析によるクリッギング法の推定精度の向上	㈱インクス
重　松　秀　樹	弾性波を用いたドリルビットの先端位置の推定	伊藤忠商事㈱
村　上　宏　徳	エアスパージングにおける空気移動領域調査への比抵抗トモグラフィの適用	大阪ガス㈱
橋　村　　忠	波動特性を考慮したフレネルボリューム法トモグラフィ解析	国際石油開発㈱
三　善　孝　之	格子ボルツマン法を用いた岩石間隙内の流体挙動解析に関する研究	京都大学大学院
若　月　然太郎	粒状体モデルによる弾性波動伝播と破壊現象の数値シミュレーション	㈱ベンチャーリンク
地質工学分野		
木　羽　智　洋	軟岩からなる貯水池斜面の侵食予測に関する研究	兵庫県県庁

氏名	研究論文題目	就職先
地殻開発工学分野		
石井智也	水没空洞が周辺の地下水挙動に与える影響に関する研究	森北出版㈱
梅谷洋介	地すべりによるトンネル覆工変状に関する研究	三井物産㈱
遠藤希典	岩石不連続面のかみ合わせとせん断力学特性に関する研究	三菱商事㈱
中山学	フラクチャーの接触状態とその浸透率に関する研究	日立造船㈱
ジオメカトロニクス分野		
足立良平	容量型プローブを用いる誘電性材料の非破壊検査に関する研究	㈱日本総合研究所
田原健	2次元欠陥分布推定のための電気ポテンシャル法逆解析について	㈱日立製作所
森田宗良	レーザードップラー振動計を用いた超音波速度分散特性の精密計測について	㈱NTTデータ
周圓	Application of Multiresolution Analysis to Picture Image Registration（多重解像度解析による写真画像の整合に関する研究）	
地殻環境工学講座		
神村大介	地山の比抵抗探査結果を用いたトンネル湧水予測システムに関する研究	㈱日本総合研究所
黒川義民	動的注入工法による低透水性岩盤へのグラウト注入効果に関する研究	㈱ザイマックス
宇宙資源エネルギー学分野		
伊沢深紘	酸化チタンの光触媒作用による有機物分解に関する基礎的研究	衡田国際特許事務所
木内大輔	Water Electrolysis under Microgravity	三菱重工業㈱
長尾翔	攪拌容器内での微粒子初期凝集に関する理論解析	住友商事㈱
森末将文	Effect of Gravitational Level to Nucleation Phenomena of Electrodeposited Metal	㈱半導体エネルギー研究所
矢野悟宇	珪素化合物微粒子の浮選に関する基礎的研究	サントリー㈱
資源エネルギープロセス学分野		
井上大輔	Finite element analysis of optimum condition for hydroforming of tube	新日本製鉄
竹崎一誠	Experimental and numerical study of successive collision of two water droplets with cold and hot surfaces	新日本製鉄
坪井崇浩	Prediction of forming limit of high strength steel sheets using ductile fracture criteria	ローム
資源エネルギーシステム学分野		
大山栄成	岩石表面に見られる風化現象の観察	特許庁
木村隆一	メタンハイドレートおよびCO_2ハイドレートの生成・分解挙動	特許庁
古川和彦	21世紀における銅の需給動向	日鉱金属
方堂毅	珪藻土を用いたシリカコーティングの生成と有害元素溶出防止	㈱インクス

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		
上坂進一	波動現象を利用した地下可視化技術の高精度化に関する研究	ソニー㈱
地殻開発工学分野		
日外勝仁	岩盤斜面の危険度評価に関する研究	北海道開発土木研究所

氏　名	研　究　論　文　題　目	就　職　先
ジオメカトロニクス分野		
李　令琦	Studies on Advanced Signal Processing in the Field of Nondestructive Testing Based on Multiresolution Analysis（多重解像度解析に基づく非破壊検査信号処理に関する研究）	京都大学工学研究科助手
地殻環境工学講座		
山本真哉	深部地質環境評価のための情報地質学の適用に関する研究	財団法人電力中央研究所我孫子研究所

博士学位授与者　課程博士

氏　名	研　究　論　文　題　目	主　査	取得年月日	備　考
地殻環境工学講座				
山本真哉	深部地質環境評価のための情報地質学の適用に関する研究	青木謙治	平成15年9月29日	
資源エネルギーシステム学分野				
別所昌彦	機能性材料への適用を目的とした高純度シリカ精製に関する研究	西山　孝	平成14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
地殻開発工学分野				
北川修三	軟岩トンネルでの膨圧現象と対策工法に関する研究	齋藤敏明	平成14年7月23日	昭和45年3月京都大学理学部卒業
ジオメカトロニクス分野				
早崎　勉	GPSによる情報化施工に関する研究	花崎紘一	平成15年3月24日	京都大学農学部農業工学科　昭和45年3月 京都大学大学院農学研究科　昭和47年3月
地殻環境工学講座				
前島俊雄	大規模岩盤空洞の情報化設計システムに関する研究	青木謙治	平成15年1月23日	早稲田大学理工学研究科建設工学専攻/昭和54年3月修了
森　孝之	岩盤地下空洞における掘削影響領域の評価技術に関する研究	青木謙治	平成15年3月24日	早稲田大学教育学部理学科/昭和52年3月卒業
植出和雄	原油岩盤タンクの水封機能評価技術に関する研究	青木謙治	平成15年3月24日	京都大学工学部資源工学科/昭和46年3月卒業
資源エネルギーシステム学分野				
寺田道直	岩盤内部の亀裂の可視化と評価に関する研究	西山　孝	平成15年3月24日	

旧 金 属 系

学部卒業者

氏 名	研 究 論 文 題 目	就 職 先
材料設計工学講座		
小田垣 夏 樹	Fe-Cu-Ni 系における Cu 析出自由エネルギー変化の第一原理計算	京都大学大学院工学研究科
小 林 賢 吾	Al，MgO の有限温度物性の第一原理計算	京都大学大学院工学研究科
平 野 貴 詩	ZnO の p 型ドーパントについての第一原理計算	㈱電通
堀 内 尚 紘	析出クラスター生成のエネルギー計算法の比較と熱力学的考察	京都大学大学院工学研究科
前 田 直 仁	PLD 法による Si_3N_4 薄膜の作製	
三 嶋 貴 大	鉄酸化物の $L_{2,3}$-edge XANES スペクトルの理論解析	ソニー㈱
表面処理工学分野		
柿 平 貴 仁	電析法による Bi-Te 系金属間化合物の成膜	東京大学大学院
小 路 泰 仁	ニッケル-金属微粒子複合電析	京都大学大学院
藤 堂 尚 二	塩基性浴からの CdTe 電析におよぼすナトリウムイオンの影響	京都大学大学院
東 野 匡 容	塩基性浴からの CdTe 電析におよぼす浴温度の効果	東京大学大学院
溝 田 尚	塩化銅（I）を含むハロゲン化ナトリウム濃厚水溶液からの銅デンドライト析出	東京大学大学院
村 上 浩 亮	化学浴析出法を用いる透明導電性基板への CdS 半導体成膜	京都大学大学院
プロセス設計学分野		
河 合 巌	裁判における分析化学の役割について	自営
姿 祥 一	高分解能蛍光 X 線分光器による Si Ka 線スペクトルのケミカルシフトの測定	東大大学院
松 岡 良 輔	X 線の全反射に関する研究	東大大学院
村 島 浩 文	電子レンジを使った X 線発生装置を作る研究	自営
山 添 裕 啓	黄砂粒子の表面状態とその生成に関する研究	㈱東海理化
弓 削 是 貴	蛍光 X 線スペクトルを用いた Pd の電子状態に関する研究	京大大学院
マイクロ材料学分野		
亀 山 悟	ULSI デバイス用 Cu 配線材の微細組織に及ぼすバリア材の影響	京都大学大学院
辻 峰 史	ULSI デバイス用 Cu 配線材における界面ボイドの成長機構に関する研究	京都大学大学院
新 田 研 太	p 型 4H-SiC に対する Ti/Al 基オーミック・コンタクト材の界面微細構造に関する研究	京都大学研究生
箕 輪 剛	p 型 GaN に対する Ni/Au オーミック・コンタクト材形成における Ge 添加の影響	京都大学大学院
森 田 敏 文	スパッタ Cu 薄膜材の室温粒成長に及ぼすターゲット純度の影響	京都大学大学院
渡 邉 哲 平	p 型 InGaN に対するオーミック・コンタクト材形成における熱処理温度の影響	京都大学大学院
量子材料学分野		
田 中 耕 平	Fe_3Pt の強磁性に及ぼす Ir 置換効果	京都大学大学院
睦 月 伸 季	Ho $(Co_{1-x}Ni_x)_2$ 化合物の磁気熱量効果	京都大学大学院
伊志嶺 朝 之	$Gd_{1-x}Er_xNiSi$ の低温比熱	東京大学大学院
額 田 慶一郎	充填スクッテルダイト型 As 化合物の作製	京都大学大学院
山 中 邦 夫	遍歴電子メタ磁性 La $(FeCoSi)_{13}$ の磁気相図	東京大学大学院

氏　　名	研　究　論　文　題　目	就　職　先
結晶物性工学分野		
梶本剛志	HAADF-STEM 法による WSi_2 の（001）面欠陥解析	東京大学大学院
合田達郎	(V, TM) 5SiB2（TM＝Fe, Mo）化合物における新規熱電材料の探索	東京大学大学院
傍島農之	整列ラメラ柱状組織を有する TiAl-DS 材の作成と力学特性の評価	京都大学大学院
西井匠	Ba-Ge 系クラスレート化合物の構造と熱電特性	京都大学大学院
山田直毅	FZ-TSM 法による SiC 単結晶の育成と結晶性評価	京都大学大学院
横林政人	パック・セメンテーション法を用いた Mo 基複相材への耐酸化コーティング	京都大学大学院
構造物性学分野		
川口潤	二相分離をおこす液体合金の濃度ゆらぎの研究	京都大学大学院工学研究科材料工学専攻
富田一行	超臨界流体セレンの密度ゆらぎの研究	東京大学大学院工学系研究科マテリアル工学専攻
材料物理学分野		
権藤政信	Bi2223 超伝導膜における相形成過程	京都大学大学院
志井秀行	PLD 法におけるペロブスカイトバッファー層の作製と YBCO 超伝導薄膜の 2 軸面内配向制御	京都大学大学院
空野智裕	温間圧延を用いた微細亜結晶粒を有する Al-Zn-Mg-Cu 基合金の開発	京都大学大学院
寶亮介	前熱処理がおよぼす Bi-Pb2223 相形成への影響	京都大学大学院
堀出朋哉	ナノドットを用いた YBCO 薄膜の臨界電流密度の向上	京都大学大学院
堀田耕一郎	Cu-Sn 線材における反応拡散過程の考察	東京大学大学院
材質制御学分野		
安中聡	Ti-V 合金の変態組織におよぼす炭素添加の影響	京都大学大学院
小川高志	微細オーステナイト粒から生成したマルテンサイト組織	京都大学大学院
川田裕之	Fe-Ni-C 合金のオースフォームドベイナイト組織におよぼす炭素量の影響	京都大学大学院
土工弾	オーステナイト母相転位のラスマルテンサイトへの受け継ぎ挙動	京都大学大学院
八木恒	Fe-M（M：Ti, Nb, V）二元フェライト合金のプラズマ窒化組織	東京大学大学院
米本篤志	高炭素鋼の超微細（$\alpha+\theta$）二相組織の機械的性質	京都大学大学院
エネルギー社会工学分野		
今木智隆	メカニカルアロイングによる WO_3 結晶構造変化	京都大学大学院エネルギー科学研究科
高原徳守	循環型社会形成と企業の意識に関する研究	㈱ドリームインキュベータ
中奥洋	FeO による二酸化炭素の固定	東京大学大学院
林宏樹	たたら製鉄による鋼精錬機構に関する研究	東京大学大学院
山口洋徳	繰り返し圧縮圧延法による Zr-Ni-Cu-Al 4 元系金属多層膜の作製	京都大学大学院エネルギー科学研究科
山下紀明	ミッシュメタルを利用した窒素吸蔵合金の開発	京都大学大学院地球環境学科

氏名	研究論文題目	就職先
材料プロセシング分野		
大山智史	CaO-SiO_2-Al_2O_3 系スラグと水蒸気-塩化水素混合ガスとの反応	京都大学大学院
小澤洋	CaO-P_2O_5-FeO 系スラグの熱力学	京都大学大学院
玉井慎一	混合ガスの平衡時における各気体成分の分圧計算	京都大学大学院
寺澤将幸	溶銑レベル計の作動原理	京都大学大学院
福田紀之	酸素プラズマによる鋳鉄管耐食性皮膜の形成	日新製鋼㈱
矢野康博	高酸素分圧・溶融塩化物中で使用可能な酸素センサーの開発	京都大学大学院
高温プロセス分野		
浅原紀史	混合溶融塩中での TiO_2 の還元・脱酸	京都大学大学院
塚本真之	起電力法によるタンタルシリサイドの標準生成自由エネルギー測定	京都大学大学院
仲井智至	太陽熱を利用した熱電発電システムに関する研究	京都大学大学院
早川和志	酸化タンタルの直接還元における適切な還元剤と溶融塩の組み合わせに関する研究	京都大学大学院
牧雄一	Ca 還元における副生成物 CaO の溶融塩中への溶解除去	京都大学大学院
山本幸輔	溶融 CaCl2 中での電解 Ca による金属酸化物還元	京都大学大学院
エレクトロニクス分野		
井上祐介	Si (001) 表面の C—タイプ欠陥のバリアハイトイメージング	京都大学大学院（エネルギー）
越智亮平	金合金ナノ接点のコンダクタンスの溶質元素による相違	リコー
楠田厚史	貴金属単原子接点の高バイアスにおける安定性の比較	京都大学研究生
松本諭	$ReSi_{1.75}$ (100) 面の STM 観察	京都大学研究生
材料デザイン分野		
阿部洋太郎	埋め込まれた Ge ナノドットの X 線小角散乱法による構造解析	東京大学大学院
永井崇	Bi2223/Ag 超伝導複合テープ材の引張り変形・破壊挙動とその臨界電流に及ぼす影響	東京大学大学院
宮崎暢	Bi2223/Ag 超伝導複合テープ材の臨界電流に及ぼす曲げ変形の影響	東京大学大学院
吉原教明	PFZ 生成機構のモンテカルロシミュレーション解析	東京大学大学院

修士課程修了者

氏名	研究論文題目	就職先
材料設計工学講座		
国須正洋	岩塩型 ZnO 固溶体の高圧合成および薄膜合成とその評価	京都大学大学院
立岡徹之	振動の自由エネルギーの精密計算と Ti の BCC-HCP 変態への応用	㈱トーマツコンサルティング
松井雅史	ZnO および MgO における多価溶質元素の局所環境	ソニー㈱
宮前亨	3d 遷移金属 $L_{2,3}$-edge XANES/ELNES の第一原理計算による解析	マツダ㈱
表面処理工学分野		
荒井健太郎	CdTe 太陽電池の窓材としての CdS 半導体成膜	京都大学大学院
植松幹夫	塩基性浴からの電析 CdTe 薄膜の熱処理	㈱豊田自動織機
小田暢	ジメチルスルホン浴からのアルミニウム複合電析	松下電器産業㈱
古市佑樹	銅イオンのドーピングによる電析 CdTe の低抵抗化	住友金属鉱山㈱

氏　　名	研　究　論　文　題　目	就　職　先
プロセス設計学分野		
水谷晴美	Characteristics of Hydrogen Absorption-Desorption Reaction in R-M (R=Y, La ; M=Co, Ph, Ir, Ni, Pd, Pt) Binary Systems	トヨタ自動車㈱
マイクロ材料学分野		
藤本一平	p型GaNおよびInGaN化合物半導体用オーミック・コンタクト材に関する研究	リコー
量子材料学分野		
大北洋平	新蓄冷材を目指したR-Ge系の低温比熱の研究	キャノン㈱
中堂博之	バナジウム四面体化合物の構造と磁性	京都大学大学院（理・D）
藤平哲也	一次転移を用いた低温磁気冷凍材料の開発	京都大学大学院（D）
松井恒平	$BaVS_3$の金属絶縁体転移	富士重工㈱
結晶物性工学分野		
大宮裕司	高濃度合金添加TiAl合金一方向凝固材のラメラ方位制御とクリープ特性	㈱ローム
岡本範彦	金属ボライド単結晶の力学特性に与えるB原子集合形態の影響	京都大学大学院（D）
熊谷康顕	M（M=Mo，Nb）-Si-B系共晶合金の力学特性	東京大学大学院（D）
筒井真楠	（β-An_4Sb_3）基バルク・薄膜材の熱電特性（英文）	京都大学大学院（D）
林　泰輔	Mo_5X_3（X=Si，B，C）単結晶の物理学的，機械的性質	京都大学大学院（D）
構造物性学分野		
伊藤英之	超臨界流体水銀の構造解析	住友電気工業㈱
伊藤有	放射光を用いた超臨界流体水銀のX線小角散乱実験	ヤマハ㈱
岡村大輔	α鉄中におけるクロムと炭素・窒素の相互作用	本田技研工業㈱
材料物理学分野		
小野友昭	トリフルオロ酢酸塩溶液を用いたMOD法によるYBCO超伝導薄膜の結晶成長プロセスの検討	松下電器㈱
清水広朗	Al-Zn-Mg-Mn基合金の高強度化に関する研究	サントリー㈱
武智篤	MOD法によるYBCO超伝導薄膜用ペロブスカイト型酸化物バッファー層の作製と評価	三菱電機㈱
山本健治	MgB_2超伝導線材の調製とその特性	豊田自動織機㈱
材質制御学分野		
菊本一乃	オーステナイト-マルテンサイト繰返し変態によるオーステナイト粒の微細化	トヨタ自動車㈱
坂本健太郎	Fe-Ni-C合金のベイナイト組織におよぼすオーステンフォームの影響	新日本製鐵㈱
西川潤	ラスマルテンサイトの転位密度および組織形成における母相粒界の役割	福井村田製作所㈱
宮本吾郎	組成勾配下における析出kinetics	京都大学大学院博士後期課程進学
エネルギー社会工学分野		
角本昌彦	繰り返し圧縮圧延法によるバルクアモルファスの作成	トヨタ自動車
延原功一	メカニカルアロイングによる酸化チタンの結晶構造変化とその光触媒活性に関する研究	昭和シェル石油
細井威男	低融点金属を含む多層膜のメカニカルアロイングによる作製とその評価	住友金属
山本将史	平均燃費規制の可能性とその評価	JICA
若松貴史	仮想摩擦係数を用いた旅客輸送におけるエネルギー効率の評価	㈱ファーストリティリング

氏名	研究論文題目	就職先
材料プロセシング分野		
岸本 祐	$CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO-FeO$ 系スラグの熱力学	JFE スチール㈱
末松芳章	$CaO-SiO_2-FeO$ 系溶融スラグの H_2 ガスによる還元	新日本製鉄㈱
豊田人志	$CaO-SiO_2-Al_2O_3$ 系スラグと水蒸気-塩化水素混合ガスとの反応	㈱神戸製鋼所
早川 光	$CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO$ 系スラグの Sulfide Capacity	本田技研工業㈱
矢田千宏	$Na_2O-SiO_2-Fe_xO$ 系スラグの熱力学	京都大学大学院
高温プロセス分野		
小野洋平	酸化ニオブ及び酸化タンタルの溶融塩を用いたカルシウム還元	㈱リコー
福井慎次	溶融塩化カルシウム電解による酸化チタンの還元	キャノン㈱
量子エネルギープロセス分野		
板垣 愛	銅酸化物 Nd-123 系における Pr と Sr の添加効果と不均質構造	日産自動車㈱
大橋秀樹	Pr^{3+} 添加 $Ga_2S_3-GeS_2-La_2S_3$ ガラスの光学特性と構造	任天堂㈱
川上剛史	銅酸化物超伝導体 Yb-123 系の磁束ピニング特性にもたらす Pr 置換効果	京都大学大学院
田村伴紀	Pr 基銅酸化物 PBCO-Ag における複合構造と電気伝導特性	ニチコン㈱
エレクトロニクス分野		
竹井知裕	水素終端 Si 表面の STM-BH 観察	大和證券
溝端順一	アルミニウムの微小接点における量子化コンダクタンス	東芝 (平成15年 8 月10日 逝去)

博士後期課程修了者

氏名	研究論文題目	就職先
材料設計工学講座		
巽 一厳	First Principles Quantitative Study on Local Environments of Solute Atoms in Advanced Inorganic Materials	名古屋大学工学研究科 (助手)
表面処理工学分野		
三宅正男	塩基性浴および酸性浴からの電析 CdTe 薄膜の電気的特性および微細構造 (Electrical and Microstructural Characterization of CdTe Layers Electrodeposited from Basic and Acidic Aqueous Electrolytes)	東京大学生産技術研究所 (助手)
材料物理学分野		
菅野未知央	Michano-Electromagnetic Property of Bi2223 Superconducting Composite Tapes	独立行政法人物質・材料研究機構
材質制御学分野		
森谷智一	鉄合金の上部ベイナイトに関する結晶学的研究	名古屋工業大学材料工学科
量子エネルギープロセス分野		
原田琢也	The Study of Chemical Doping Effects on the Flux Pinning Properties in Y-123 Cuprate Superconductors (Y-123 高温超伝導体の磁束ピニング特性にもたらす化学ドーピング効果)	古河電気工業㈱

博士学位授与者　課程博士

氏　名	研究論文題目	主　査	授与年月日	備　考
材料設計工学講座 巽　一厳	First Principles Quantitative Study on Local Environments of Solute Atoms in Advanced Inorganic Materials	足立裕彦	平成14年9月	
表面処理工学分野 三宅正男	塩基性浴および酸性浴からの電析CdTe薄膜の電気的特性および微細構造(Electrical and Microstructural Characterization of CdTe Layers Electrodeposited from Basic and Acidic Aqueous Electrolytes)	粟倉泰弘	平成15年3月24日	
マイクロ材料学分野 川上俊之	p型ZnSeおよびp型GaNに対するオーム性電極に関する研究	村上正紀	平成15年3月24日	
材料物理学分野 菅野未知央	Michano-Electromagnetic Property of Bi2223 Superconducting Composite Tapes	長村光造	平成15年5月	
材質制御学分野 森谷智一	鉄合金の上部ベイナイトに関する結晶学的研究	牧　正志	平成15年3月24日	
量子エネルギープロセス分野 原田琢也	The Study of Chemical Doping Effects on the Flux Pinning Properties in Y-123 Cuprate Superconductors(Y-123高温超伝導体の磁束ピニング特性にもたらす化学ドーピング効果)	吉田起國	平成15年3月24日	

博士学位授与者　論文博士

氏　名	研究論文題目	主　査	授与年月日	備　考
松井元英	Enhancement of field-trapping capabilities and mechanical properties of Nd-Ba-Cu-O bulk superconductors	長村光造	平成15年3月	京都大学工学研究科材料工学専攻修了（平成9年3月）
坂田　敬	固溶強化型Interstitial Free鋼の深絞り性向上ならびに低降伏比化に関する研究	牧　正志	平成14年11月	大阪大学大学院基礎工学研究科化学工学専攻修士課程修了（昭和54年3月）

水曜会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，水曜会会長は次の任務を依頼する．

1．同年次会員の連絡先の掌握，

2．同年次会員を代表して水曜会運営への協力

（定　　員）

第２条　年次幹事を各卒業年次ごとに旧資源系（鉱山）１名，旧金属系（冶金）１名を定めるものとする．

（任　　期）

第３条　任期は２年とし，重任は妨げないものとする．

（委　　嘱）

第４条　年次幹事の選任は，同年次会員の推薦により会長が委嘱するものとする．

この付則は平成15年６月14日より施行する．

逝　去　会　員

平成９年５月14日	福田十四男	昭23・鉱
平成13年11月７日	大倉　長喜	昭20・鉱
平成14年	古賀　正夫	昭23・鉱
平成14年６月	永田　敏秀	昭27・冶
平成14年６月21日	高橋　庄二	昭26・冶
平成14年６月23日	阪口　　章	昭41・金
平成14年７月	山下　　博	昭27・鉱
平成14年８月４日	西田　　弘	昭28・新冶
平成14年10月	藤原　正長	昭15・採
平成15年１月３日	福塚　賢二	昭16（12月）
平成15年１月８日	千原　　學	昭20・冶
平成15年１月９日	平野　仁士	昭19・鉱
平成15年１月15日	小山　雅史	昭35・鉱
平成15年１月31日	畠山　直隆	昭20・鉱
平成15年２月18日	後藤　二郎	昭46・金
平成15年３月	森沢　一平	昭10・採
平成15年３月５日	杉　　玲二	昭28・鉱
平成15年５月２日	中山　次郎	昭22・鉱
平成15年５月21日	守川喜久雄	昭13・冶
平成15年５月28日	浅野　正敏	昭10・採
平成15年６月６日	伊藤　正史	昭43・金
平成15年６月14日	川野　　豊	特別名誉会員昭23・冶
平成15年６月24日	水野　政夫	特別名誉会員元教官
平成15年７月15日	森本　一男	昭31・鉱
平成15年８月25日	久保　忠明	昭29・新冶
平成15年11月18日	重松　恒信	元教官
逝去日不明	吉村　英夫	昭26・冶

教　室　報　告

教官人事

＜旧資源系＞

平成15年３月31日	西山　孝	定年退官
平成15年４月１日	山田泰広	助手に任官
平成15年４月１日	李　令琦	助手に任官
平成15年５月１日	渡辺俊樹	名古屋大学に転出
平成15年５月１日	真田佳典	助手に任官
平成15年４月１日	藤本　仁	助教授に昇任

＜旧金属系＞

平成15年２月１日	山本　悟	助教授に昇任
平成15年４月１日	奥村英之	助教授に任官
平成15年７月１日	松田和博	助手に任官
平成15年10月１日	石井秀司	（助手）東京大学から転入

平成15年度水曜会誌編集委員

委員長　河合　潤
幹事　沼倉　宏（編集）　新苗正和（広告）
委員　安達　毅　石田　斉　石原慶一　伊藤俊秀
岡田孝夫　木成寿英　澤井　隆　田口功平
田中　功　谷口裕一　中村雄一　西山佳孝
福井久智　藤村隆志　松岡俊文

平成16年1月25日　印刷　　平成16年1月30日　発行
編集兼発行者　齋藤敏明
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　みずほ銀行百万辺支店
普通　476-1242526　水曜会

水曜会誌の原稿募集について

水曜会誌編集委員会

本委員会では，学術研究や技術開発の成果，操業報告，特定の課題や分野の解説・啓蒙・普及など，会員の皆様が関与されている様々な領域や分野についての研究・業務に関する原稿，あるいは皆様の近況，意見，展望など幅広い原稿を募集致しております．

投稿原稿は，論文，報告，総説，講座，資料，各種記事（談話室，会員消息，会員の声，会員通信欄など）に分類されております．投稿方法につきましては投稿規定をご参照ください．

(1) 論文：他の刊行物に未発表のもので，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を対象としております．

(2) 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を対象としております．

(3) 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を対象としております．

(4) 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を対象としております．

(5) 資料：学問的あるいは技術的に価値のある内容を含み，会員の参考資料として役立つものを対象としております．

(6) 談話室：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す．次のようなものを対象にしております．

○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

(7) 会員の声：会員の皆様の幅広い意見・提言を募集する「会員の声」を設けております．

(8) 会員通信欄：水曜会大会返信葉書の通信欄を始め様々な形で寄せられておりますお便りを掲載致しております．

(9) その他：(6)〜(8)の何れかに区分させて頂くことになると思いますが，“同窓会誌”的な肩の凝らない気楽な記事（…の思い出，…の頃，等々）についても，“学会誌”としての体裁維持も念頭におきながら，積極的に掲載したいと存じます．

また，このほかに取り上げるべき企画や記事などご提案がございましたら編集委員会までお知らせ下さい．

次号の発刊に向け，常時，会員の皆様からの投稿をお待ち致しておりますので，奮ってご応募くださるようお願い致します．投稿を予定されて今回，間に合われ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．

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）は水曜会会員でなければならない．ただし，水曜会誌編集委員会（以下編集委員会という）で認めた場合はこの限りではない．

(2) 投稿原稿は論文，報告，総説，講座，資料，会員消息などとし，分類指定がない場合には編集委員会が判定する．

(3) 投稿原稿の分類はつぎの基準にしたがうものとする．

a．**論文**　他の刊行物の未発表のもので，独創性をもつ著者の基礎研究または応用研究の成果，技術の開発改良などを内容とするもの．

b．**報告**　現場の操業報告などに類するもので，学術的に価値があると認められるもの．

c．**総説**　特定の問題について普遍的に広い視野から解説し，その推移を知るうえに役立つもの．

d．**講座**　特定の問題について掘り下げて解説し，会員の啓蒙，再教育に役立つもの．

e．**資料**　学問的あるいは技術的に価値のある内容を含み，会員の参考資料として役立つもの．

(4) 論文，報告には英文表題のほかに100字前後の英文概要を添付されたい．

(5) 原稿の長さは必要な図・表を含めて次表に示すとおりとし，これを超える場合は必要経費を負担されたい．但し依頼原稿についてはその限りではない．なお，会誌1頁は図表のないときには2,400字（25字×48行×2列）であり，表題および英文概要は刷上り1/4頁～1/2頁を要することを考慮されたい．

分　類	制限ページ数	
論　　文	会誌刷上り	6頁以内
報　　告	会誌刷上り	6頁以内
総　　説	会誌刷上り	10頁以内
講　　座	会誌刷上り	10頁以内
資　　料	会誌刷上り	4頁以内
各種記事	会誌刷上り	4頁以内

(6) 投稿に際しては本会規定の原稿用紙を使用し，原稿整理カードを添付されたい．

(7) 原稿の送付先はつぎのとおりとする．

〒606-8501 京都市左京区吉田本町
京都大学大学院工学研究科資源工学・材料工学専攻　エネルギー科学研究科　内
水曜会誌編集委員会宛

(8) 原稿は水曜会誌編集委員会が受理した日をもって受理日とする．

(9) 投稿原稿に対し，編集委員会は査読を行って掲載の可否を決定する．また，査読結果に基づき編集委員会は投稿原稿に対して問合わせ，または内容の修正を求めることがある．

(10) 編集委員会は，用語ならびに体裁統一のため編集係によって文意を変えない程度に投稿原稿の字句の修正をすることがある．

(11) 初校は著者にて行ない，第2校以降は編集委員が行う．初校における原文訂正の必要のないようとくに留意されたい．

(12) 別刷については実費を負担されたい．著者は，著者校正と同時に別刷必要部数を申し出るものとする．

2．原稿の書き方

(1) 章・節などの区分はポイント・システムによる．すなわち，章に相当する1・緒言などは中央に2行分をとり，節に相当する1・1実験方法などは左端に書き，つぎの行より本文を書くようにする．また，項や目に相当する(1)試料などは左端に書き，2字分あけて本文をつづける．

(2) 図面は鮮明なものであること．刷上り図面の大きさは横幅でもって指定するものとするが，横幅は1段（65 mm以内）または2段通し（140 mm以内）のいずれかとなることを考慮されたい．原図は刷上り図面の少なくとも2倍に書かれたい．この際図面の縮尺を考慮して作図し，とくに図中の文字の大きさについては十分に注意を払われたい．また，原図の左下隅に著者名，論文名，図表番号などを必ず明記されたい．

(3) 単位は国際単位系（SI単位系）によることが望ましい．

(4) 参考のため文献を記す場合には本文の肩に1)．2）などを付し，論文末尾につぎの形式で書き加えること．

1) 大塚一雄，宮城　宏：日鉱誌，**87**，[1001]，521-525，(1971)

2) M. R. Taylor, R. S. Fidler and R. W. Smith : Metallurgical Trans., AIME. **2**，[7]，1793-1798，(1971)

[注] 原稿用紙などは編集委員会までご請求下さい．

SEI

素敵な未来を奏でたい。

パッドの上で指が踊り、美しい音色が心に響く。
それは全てのパッドが役割を果たしてこそ心に届くもの。
このフルートのように、一世紀の間に蓄積した技術で心に響く未来を創る、
それが住友電工なのです。



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倶楽部
インターネットによる
予約システム

当社の受付予約システムの導入で「3つの削減・3つの満足」を実現。

うれしい システム1
残席表示で
不要な問合せから
解放されます。



うれしい システム2
受付番号の自動返信。
リアルタイムの送信で
申込者の不安を解消。

削減
・時　間
・経　費
・事務負担

うれしい システム3
事務合理化。

満足
・残席表示
・受付番号発行
・携帯電話対応



うれしい システム4
安さの秘密は汎用性。
プランにあわせた
時間貸し、期間貸し。

受付けると同時に申し込みされた方に、
Eメールにて受付番号を自動返信致します。

詳しくはホームページをご覧下さい http://www.jpp.co.jp

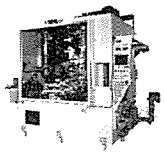
日本印刷出版株式会社

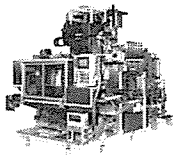
お問い合せ先
〒553-0006 大阪市福島区吉野1-2-7
TEL 06(6441)0076 e倶楽部係 FAX 06(6443)5815

ネツレン　誘導加熱のパイオニア

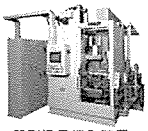
各種高周波焼入・焼戻装置

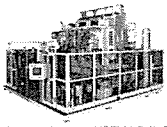
ネツレンは、創業以来50余年誘導加熱のパイオニアとして常に最先端技術の研究・開発に力を注いでまいりました。これからも顧客のニーズに対応した小型・省エネ・高信頼性で生産性の高い高周波焼入装置を提供してまいります。

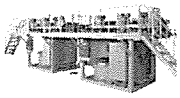

等速ジョイント焼入焼戻装置

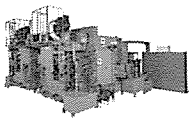

ドライブシャフト焼入焼戻装置


カムシャフト焼入焼戻装置


竪型汎用焼入装置


大型シュー/レース/ギア焼入装置


チェーン焼入焼戻装置

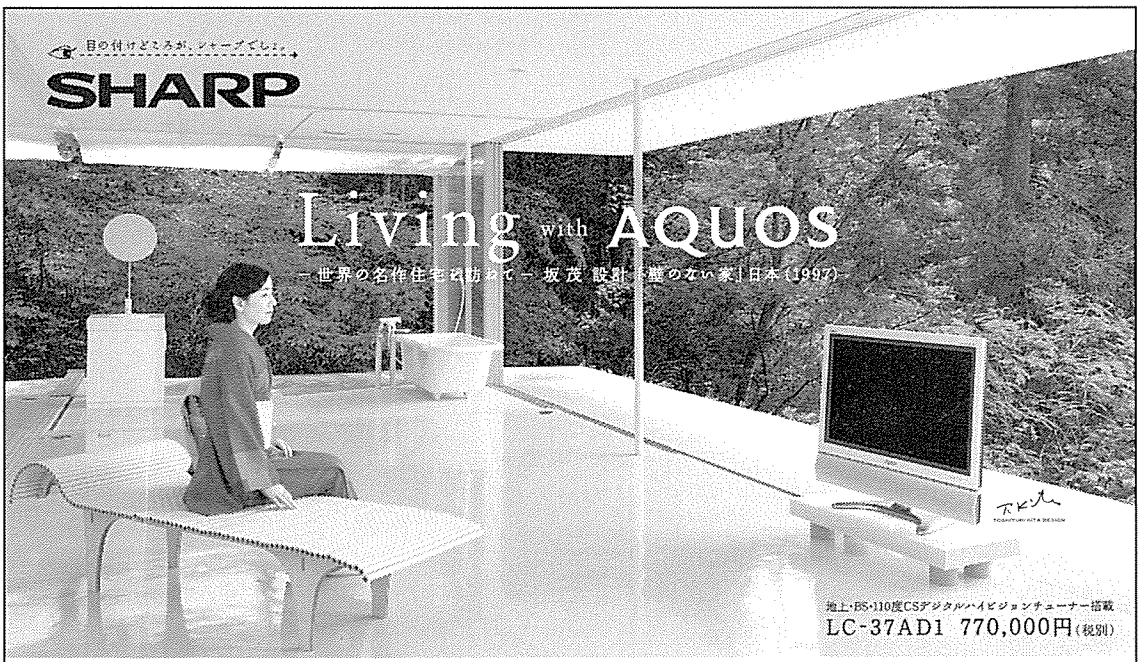

クランクシャフト焼入焼戻装置

NETUREN　http://www.k-neturen.co.jp

ネツレン
高周波熱錬株式会社

●本　社　〒141-8639　東京都品川区東五反田2-17-1 オーバルコート大崎マークウエスト　TEL 03(3443)5441　FAX 03(3449)3969
●営業部　〒254-0013　神奈川県平塚市田村5893　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

目の付けどころが、シャープでしょ。
SHARP



地上・BS・110度CSデジタルハイビジョンチューナー搭載
LC-37AD1　770,000円(税別)

省エネルギーで長寿命※。
環境を考えた液晶テレビで、リビングをいい環境に。

シャープ株式会社　●お問い合わせは…〒545-8522 大阪市阿倍野区長池町22番22号 電話(06)6621-1221(大代表) シャープ株式会社 AVシステム事業本部 液晶デジタルシステム営業部
●テレビのV型(37Vなど)とは、有効画面の対角寸法を基準とした大きさの目安です。●価格は希望小売価格(税別)です。●消費税等及び配送・設置・付帯工事、使用済み商品の引き取りなどの費用は、価格には含まれておりません。●ご購入の際は、必ず「保証書」の必要事項をご確認のうえ、大切に保管してください。●ご使用の際は、必ず「取扱説明書」をよくお読みのうえ、正しくお使いください。　※低消費電力約195W・バックライト寿命約60,000時間

シャープホームページ
http://www.sharp.co.jp

January 2004

CODEN : SUIYAA
Vol. XXIII, No. 6

Suiyōkwai-Shi

TRANSACTIONS OF THE MINING AND METALLURGICAL
ASSOCIATION
KYOTO

CONTENTS

Memorial Lecture in the Annal Meeting of Suiyōkwai

Welding Technologies Sustaining Reliable and Safe Infrastructures ····· Nobutaka YURIOKA ····· 563

It is the Life to Encounter People —Too Kind People Much Impressed— ····· Yoshiaki MIZUTA ····· 570

Article

Development of Stainless Spheroidal Carbide Cast Iron ····· Shigenori NISHIUCHI ····· 581

Review

The History of X-ray Diffraction Theory Related to the Phase Problem and Derivation of a New-type X-ray *n*-beam Dynamical Diffraction Theory ····· Kouhei OKITSU ····· 587

Lecture

Progress in Metal Science and Its Research Technology —Look Back upon My Research Life [II] ····· Yotaro MURAKAMI ····· 600

Forum

Development of TiAl-Based Ohmic Contacts for p-Type 4H-SiC Semiconductor ····· Susumu TSUKIMOTO ····· 616

Analogue and Digital Modelling of Geologic Structures ····· Yasuhiro YAMADA ····· 619

Exploration Geophysics using Borehole —Relation to Surface Survey— ····· Yoshinori SANADA ····· 623

Essay —Memories from America— ····· Hideyuki OKUMURA ····· 627

Tempus Destruendi Tempus Aedificandi ····· Hideo SHINGU ····· 630

Center for Interdisciplinary Research, Tohoku University ····· Junji SAIDA ····· 638

Current Studies in Laboratories ····· 643

Suiyōkwai Information ····· 667

Letters to Editor ····· 679

Kyoto University

Japan