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10号

目　　次

退職記念講演
鉄鋼材料の魅力―そのミクロの世界― ……牧　正志 ……1115
日本国内の資源・エネルギーを取り巻く状況 ……芦田　譲 ……1125
金属から見たヒトと自然 ……田邊　晃生 ……1141

大会記念講演
「資源循環型社会を支える素材産業の環境・リサイクル事業への取組み」……浅尾　晴彦 ……1153
岩の力学研究40年の回想 ……菅原　勝彦 ……1162

談　話　室
マラウイの非金属鉱産物事情 ……横山　羌泰 ……1172
松下幸之助論／その憂鬱な晩年 ……熱田　善男 ……1177
金属磁性体における幾何学の効果 ……中村　裕之 ……1182
規則性シリカメソ多孔体の触媒化学への応用 ……山本　孝 ……1188
太陽電池用シリコンバルク多結晶の新しい成長方法 ……野瀬嘉太郎 ……1194
強相関電子系及びフラストレート磁性体の研究 ……田畑　吉計 ……1198
X線CTを用いた岩石水理試験法に関する基礎的研究 ……深堀　大介 ……1204
剛塑性体の最適設計 ……西藤　潤 ……1208
周波数変調方式原子間力顕微鏡を用いた単一分子スケールでの有機材料評価 ……一井　崇 ……1212
酸化還元反応を利用する金属析出 ……八木　俊介 ……1216

研究速報 ……1220

会　　報 ……1244

卒業者名簿 ……1281

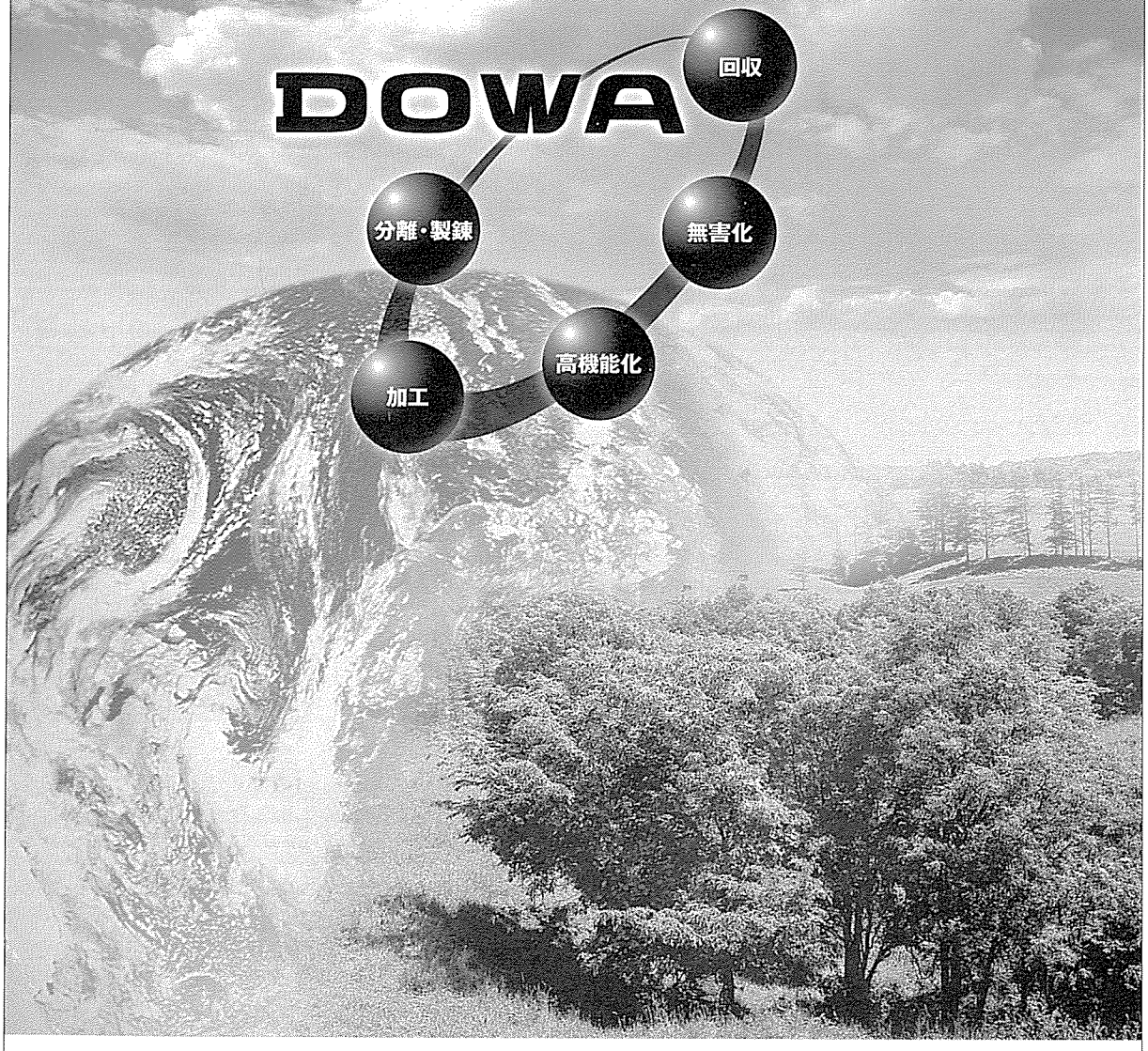
平成 19 年 10 月 30 日発行

京　都　大　学

水　　曜　　会

資源循環をテーマに、
産業と地球環境に貢献する。

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



DOWAホールディングス株式会社

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


AICHI STEEL
あなたの笑顔が、
わたしのしあわせ。
人と人、そして人と自然の
コミュニケーションを大切に、
幸せな未来を
あなたといっしょに
創造したいと願っています。
愛知製鋼株式会社
〒476-8666
愛知県東海市荒尾町ワノ割1番地
TEL 052－604－1111（代表）
http://www.aichi-steel.co.jp/


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

MICRO FINE
● ミクロファイン鋼 ●
KD11S
NIPPON KOSHUHA STEEL CO.,LTD.



抜群の加工性を誇る汎用冷間ダイス鋼。



KD11Sの特長

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

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

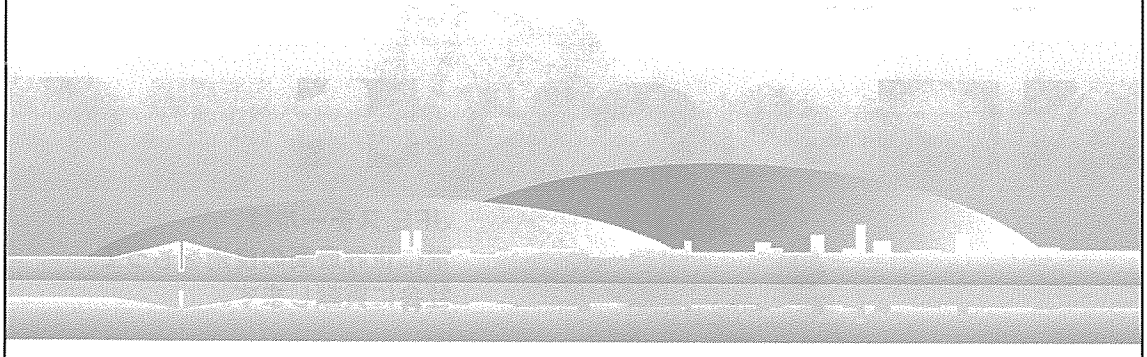
2 優れた金型寿命。
●満足のいく金型寿命、品質向上が得られます。
●冷間ダイス鋼としてハイテン材の曲げ、
絞りにも対応します。

日本高周波鋼業株式会社 http://www.koshuha.co.jp

NEWJEC
総合建設コンサルタント

ISO 9001 14001 認証登録

自然と人を技術で結ぶ。



株式会社 ニュージェック
大阪本社／大阪市北区本庄東2-3-20 TEL. 06-6374-4901
東京本社／東京都江東区新大橋1-12-13 TEL. 03-5625-1801
http://www.newjec.co.jp

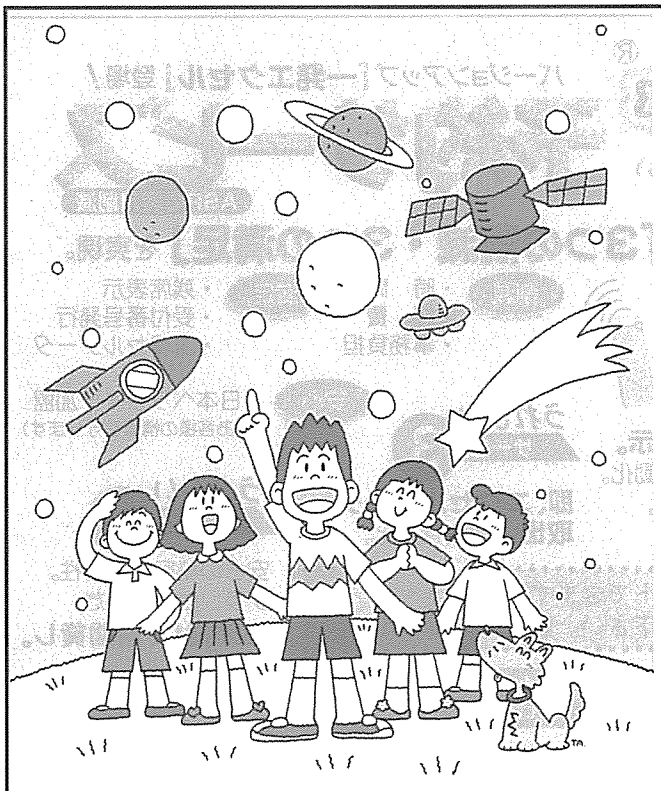


石油、天然ガスの採掘井に取り付けた地上の設備で、バルブを組み合わせた形から“クリスマスツリー”と呼ばれている

クリスマスツリーからのプレゼント

“クリスマスツリー”を通して地球から贈られてくる
石油や天然ガスなど、未来への希望をつなぐ
貴重なプレゼントを皆さまのもとへ安定供給。

JAPEX
石油資源開発株式会社
http://www.japex.co.jp/



未来、承ります。

あなたが描いている未来は、どんな姿ですか。
人や地球への思いやりが欠かせない21世紀。
新しい時代にふさわしい金属として、
注目を集めているのがアルミニウムです。
街、ビル、車、そしてリサイクル…。
アルミニウムを通した豊かな未来づくり、
住友軽金属にお任せください。

住友軽金属
〒105-8601 東京都港区新橋5丁目11番地3号
TEL.03(3436)9700 FAX.03(3434)6464
http://www.sumitomo-LM.co.jp

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　〒606-8395　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　〒523-0056　滋賀県近江八幡市古川町 1173-68　(0748) 36-6682
FAX (0748) 36-6683

楽々e倶楽部®

もう9時から5時までといわせない
Webを利用した24時間稼働する

バージョンアップ『一発エクセル』登場！

予約サービス

ASPで費用削減

当社の受付予約サービスの導入で「3つの削減・3つの満足」を実現。

削減
・時　間
・経　費
・事務負担

満足
・残席表示
・受付番号発行
・エクセルデータ

安心
・日本ベリサイン加盟
（お客様の情報を守ります）

うれしいサービス1
残席表示で
不要な問合せから
解放されます。

うれしいサービス2
受付番号の自動表示。
会費納入期日等も自動化。
申込者の不安を解消。

うれしいサービス3
即、エクセルデータ取出。事務合理化。

うれしいサービス4
安さの秘密は汎用性。
プランにあわせた
時間貸し、期間貸し。



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

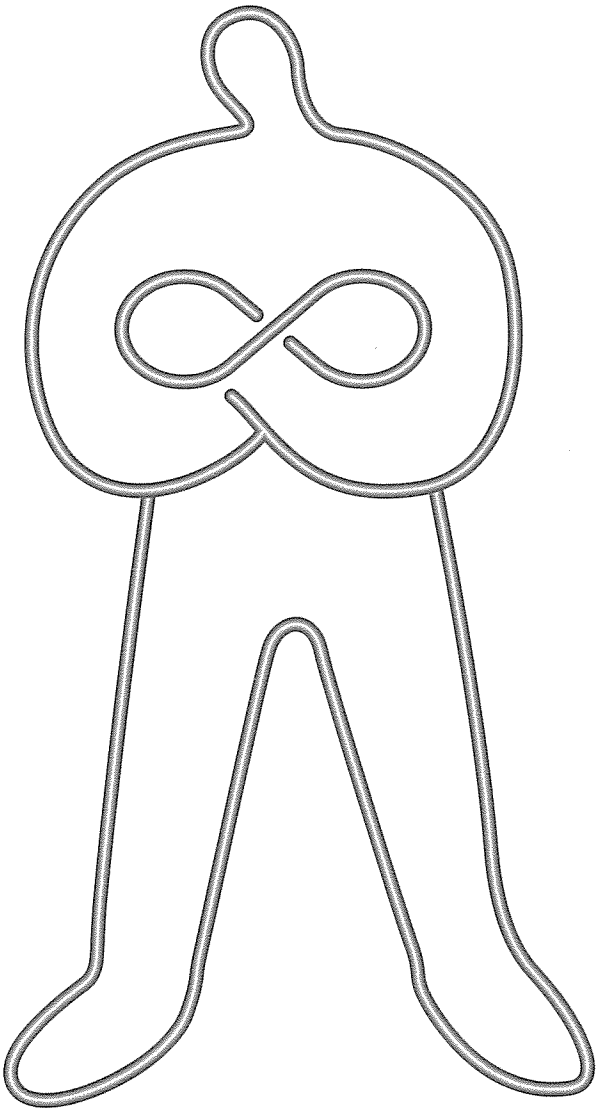
詳しくはホームページをご覧下さい　http://www.jpp.co.jp
https://jpp.jp/demo/（デモ版）

デモ版あります

日本印刷出版株式会社

お問い合せ先
〒553-0006　大阪市福島区吉野1-2-7
TEL 06(6441)0075 e倶楽部係　FAX 06(6443)5815

メタルスタイリスト



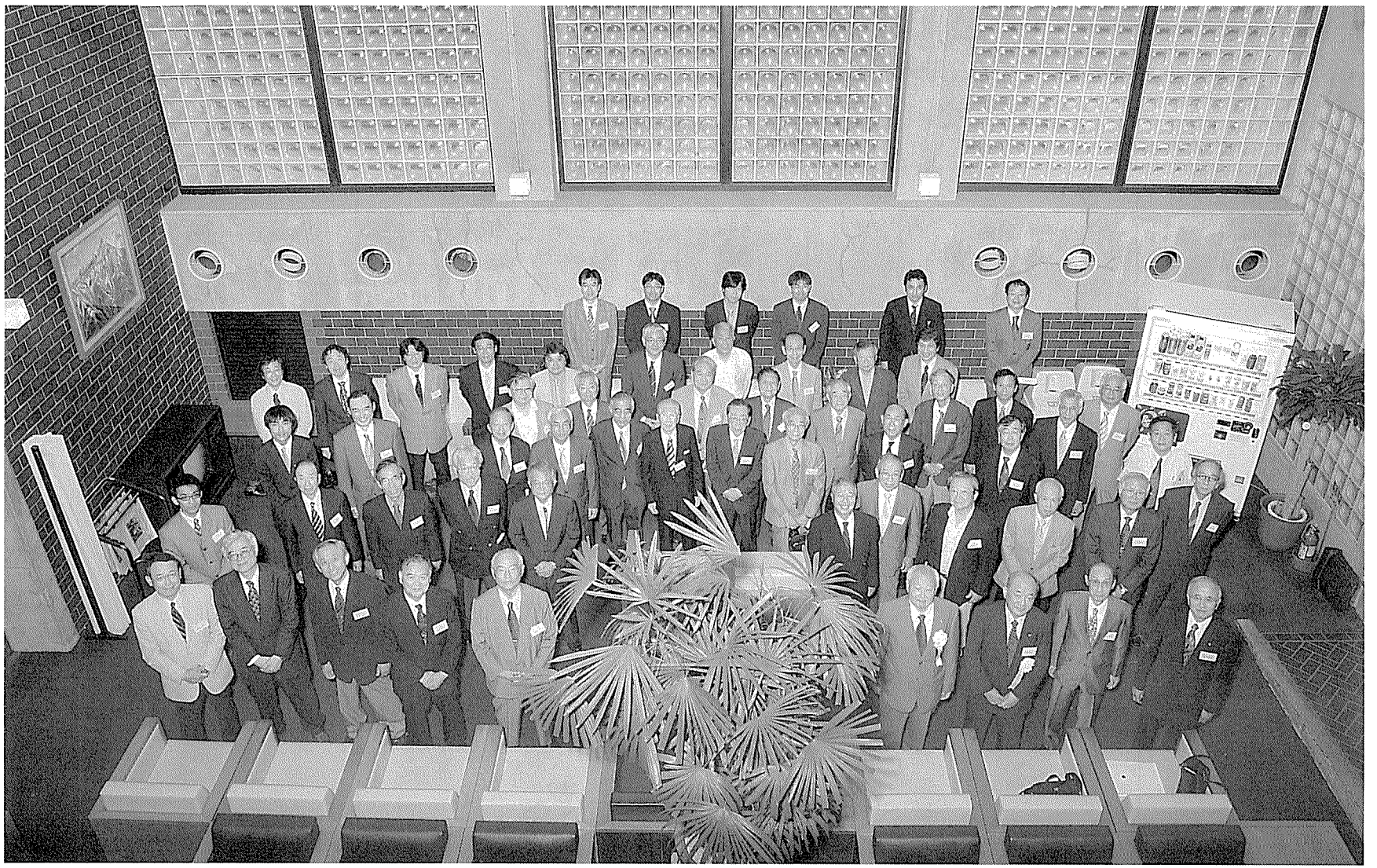
福田金属箔粉工業株式会社

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

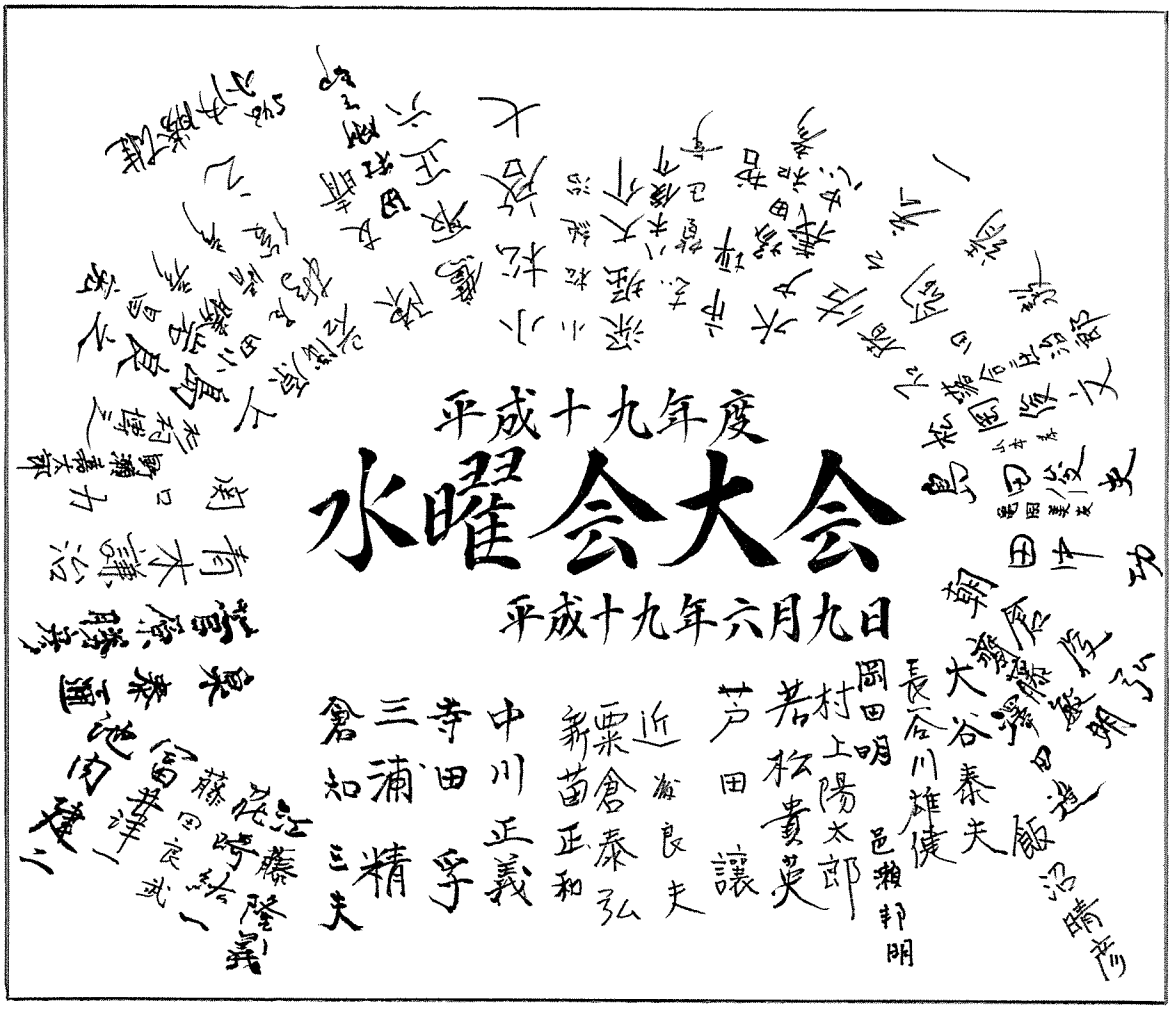


ステークホルダーの皆様から「信頼される会社」へ

〒104-6111東京都中央区晴海一丁目8番11号（トリトンスクエア/オフィスタワーY）
連絡先：人事労政部人事室（担当：明治）
TEL:03-4416-6160　Eメール:recruit@sumitomometals.co.jp



平成19年度　水曜会大会　記念写真（平成19年６月9日　京大会館にて）



平成19年度　水曜会大会　懇親会寄せ書

退職記念講演

鉄鋼材料の魅力 —そのミクロの世界—

牧　　正　志*

Attraction of Steels from the World of Microstructure

by Tadashi MAKI

1. はじめに

私は昭和41年3月に金属加工学科を卒業して以来，約40年の間，一貫して鉄鋼材料の研究を行ってきました．主な研究分野は，相変態や再結晶による組織制御，つまり鉄鋼材料の熱処理の基礎に関するものです．多くの材料がある中で，鉄鋼材料の研究を長い間続けてこられた理由は，最も重要な工業用材料であることも一因ですが，それよりも何よりも，鉄および鉄合金の素晴らしさ，物質としての面白さとその魅力に取り憑かれたためです．ここでは，長年の研究を通じて私が常々感じてきたミクロの世界からみた鉄鋼材料の魅力について述べてみたいと思います．

2. 鉄鋼材料はなぜ多様な用途に対応できるのか

我々は日頃の生活で鉄を意識することはあまりありませんが，周りを見渡すと非常に多くの鉄製品が存在することに気がつきます．鉄鋼材料は，大規模な土木構造物，建築物，自動車，鉄道，船舶，電機，各種機械などあらゆる分野に使用されており，我々の生活になくてはならない構造用素材です．量的にも他の金属材料に比べて圧倒的に多く，水や空気と同じようにあまりにもありふれているため，その重要性と有り難みが分からない存在です．供給の規模，経済性，工学的信頼性などから考えて，鉄鋼材料に取って代わる材料があるとはとうてい考えられません．鉄鋼材料の重要性は今後も変わることなく，構造材料の主流として位置し続けることに疑いはないでしょう．

なぜ，鉄鋼材料がこのように工業的に重要で大量に使用されているのでしょうか．安価であるとか，加工性に優れているとかいろいろな理由が挙げられますが，多様な用途に対応できる最大の理由は，広範な強度レベルをカバーできることにあります．構造材料には種々の特性が要求されますが，最も基本的なものは強さ（強度）とねばさ（靱性）です．図1[1]に示したように，鉄鋼材料は引張強さで約200 MPaという軟らかいものから4 GPa程度という強くて硬いものまで非常に広範な強度レベルをカバーできます．これが他の材料には見られない鉄鋼材料の素晴らしさであり，大きな魅力なのです．

3. 鉄鋼材料はなぜ広範な強度レベルをカバーできるのか

鉄鋼材料の基本は炭素量が約2 mass%以下の鉄(Fe)-炭素（C）合金であり，これに目的に応じて種々の合金元素が添加されています．鉄鋼材料が非常に幅広い強度レベルを発現できるのは，鉄と炭素の合金であること由来しています．図2は鉄-炭素合金の状態図です．この状態図が大変うまくできているのです．

鉄は室温では体心立方晶（bcc）のフェライト（α）で，温度を上げると面心立方晶（fcc）のオーステナイト（γ）に変わります．これが相変態です．高温側に低温と異なる別の固相（γ）が存在することが，鉄-炭素合金の重要な点です．オーステナイト相があるお陰で，熱処理によって室温での組織を作り直すことができるのです．例えば図3の亜共析鋼で示すように，オーステナイトの高温域（例えば1200℃）での熱間圧延（鍛造）後の放冷によって粗くて不均一なフェライト＋パーライト組織になった鋼材でも，もう一度オーステナイトの低温域（例えば850℃）に加熱して空冷すると，均一で微細なフェライト＋パーライト組織に変えることができます．これが，焼ならし（焼準）処理です．

オーステナイトから種々の速度で冷却することによっ

*新日本製鐵株式会社顧問

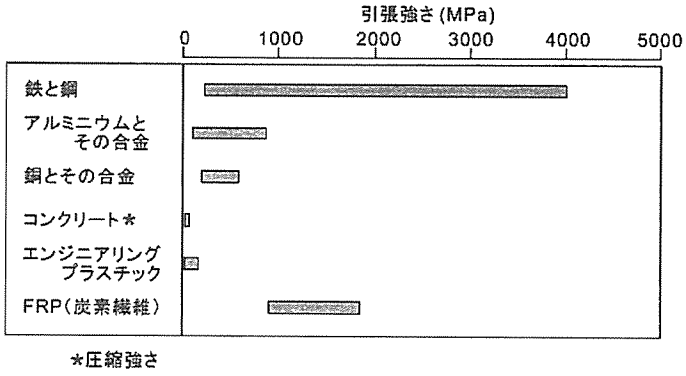


図1　各種工業材料の強度レベル[1]

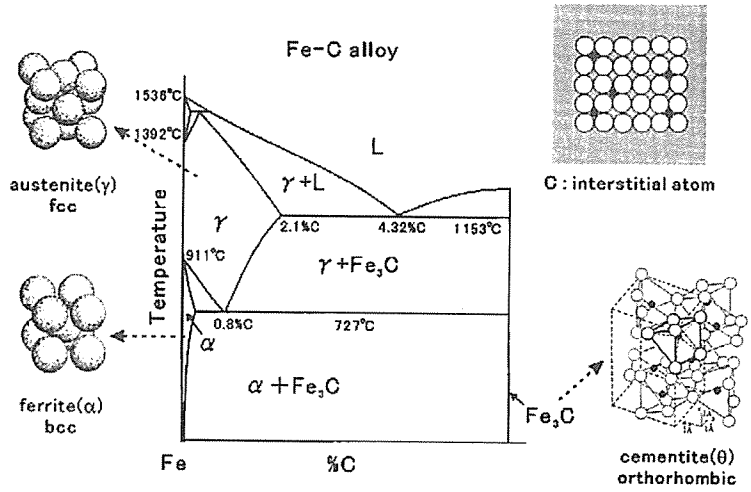


図2　鉄-炭素合金の平衡状態図

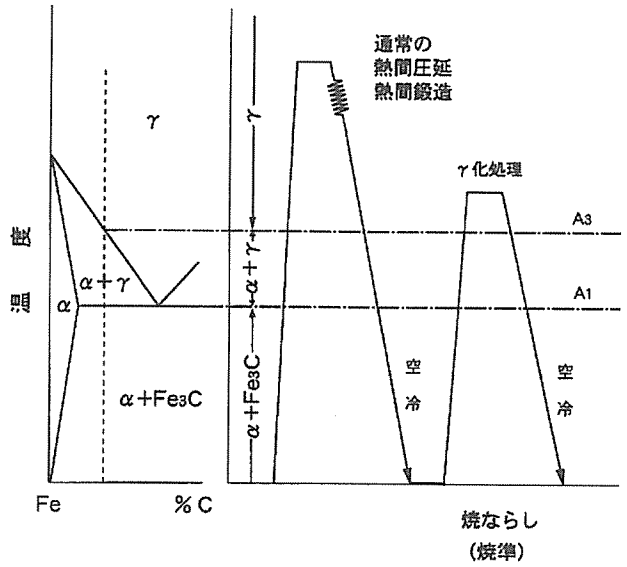


図3　熱間圧延（鍛造）材の焼ならし処理と鉄-炭素状態図の関係

て大変バラエティにとんだ変態組織が得られます．図4は鉄-炭素合金において，オーステナイトから生成する変態組織を炭素量および冷却速度でまとめたものです．徐冷により，純鉄および極低炭素鋼ではフェライト（α）組織が，共析鋼（0.8%C 鋼）ではパーライト（P）組織（フェライトとセメンタイト（Fe_3C）の層状組織）が生成します．亜共析鋼ではフェライト＋パーライト組織になります．冷却速度を大きくすると過冷却によって変態温度が低下し，それぞれの組織が微細になります．さらに臨界冷却速度以上で冷却（通常は水焼入や油焼入）すると焼きが入り，いずれの炭素量でもマルテンサイト組織になります．また，中間の冷却速度でベイナイト組織が得られる場合もあります．

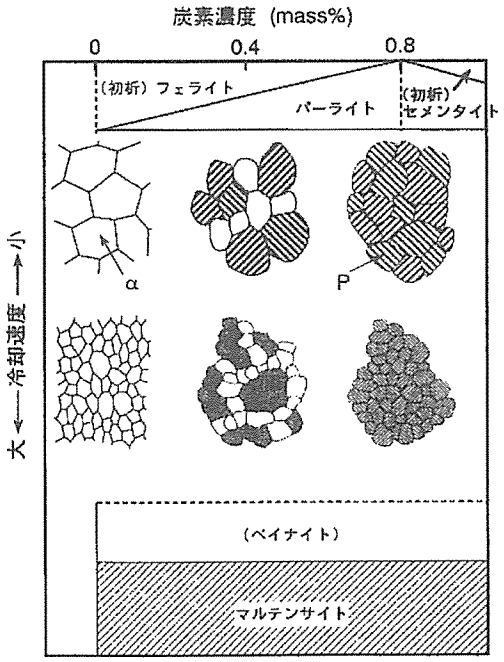


図4　炭素鋼の各種変態組織と炭素量および冷却速度の関係

このように，炭素量や冷却速度を変えると変態組織を様々に変えることができ，各変態相が図5[2]に示すようにそれぞれ異なった強度レベルを持っているのです．これが，鉄鋼材料が幅広い強度をカバーすることができる理由です．つまり，我々は用途によって利用する変態組織を使い分けて，様々な強度を得ているのです．

鋼は強度レベルによって，図6[3]のように軟鋼，高張力鋼，強靱鋼，超強力鋼などと呼ばれます．これらを組織的に見ると，炭素量の少ない軟鋼は主としてフェライト組織，非調質高張力鋼はフェライト＋パーライトです．これら空冷によって生成する変態生成物では，パーライト組織の約 900 MPa 程度が最高強度です．一方，マルテンサイト組織は焼入れ焼もどしによって約 600 MPa 以上 4 GPa 程度までの非常に広範な強度をカバーすることができます．鉄鋼材料の強化にとってマルテンサイトが（つまり，焼入れ処理が）いかに重要であるかが分かると思います．

4.　鉄鋼材料にはなぜ様々な相変態があるのか

鉄鋼材料になぜ様々な相変態が存在するのか．その秘密は，前述したようにオーステナイト相の存在にあります．鋼の熱処理の出発組織（母相）がオーステナイトであり，この母相から様々な相変態がおこり，図4のようなバラエティに富んだ変態組織が得られるわけです．図7は鉄-炭素合金と代表的なアルミニウム合金であるアルミニウム-銅合金の状態図を比較したものです．鋼の場合には熱処理の出発組織がオーステナイト（γ）相でしたが，アルミニウム合金の場合にはこれに匹敵する高温での固相がありません．それゆえ，アルミニウム合金

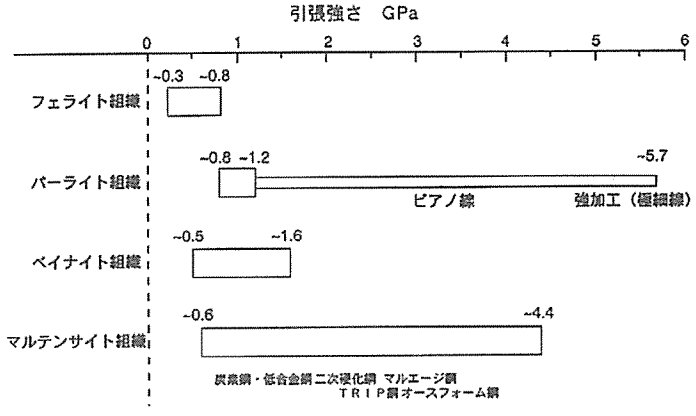


図5　鋼の各種組織の強度レベル（実験室的データも含む）[2]

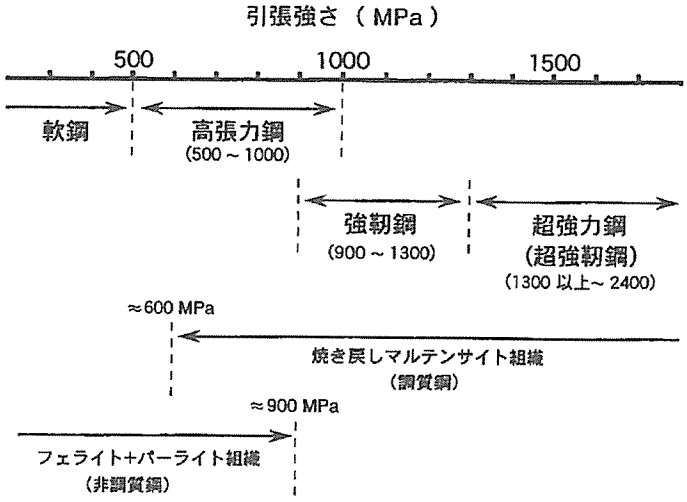


図6 鉄鋼材料の強度レベルによる分類と組織[3]

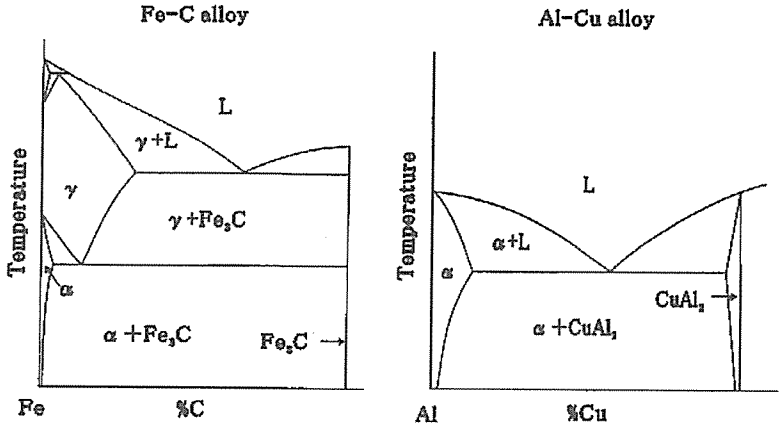


図7 鉄-炭素合金とアルミニウム-銅合金の平衡状態図の比較

ではパーライト変態やマルテンサイト変態などがなく，鋼のような多様な熱処理が行えません．図7の二つの状態図を見ると，鋼のオーステナイト相の存在の有り難さを再認識させられます．

固相→固相変態には拡散変態と無拡散変態という，機構の全く異なる変態があります．図4でいうと，フェライトやパーライトが拡散変態で，マルテンサイトが無拡散変態で生成した組織です*1．オーステナイトからの冷却速度を大きくしていくと，変態のタイプが拡散変態から無拡散変態（マルテンサイト変態ともいう）へと変化します．金属・合金は結晶であり各原子は決まった格子位置に存在しますが，実は原子は高温では頻繁に位置交換をして移動しています．これを原子の拡散といいます．状態図に従って高温でおこる通常の相変態や析出では，鉄原子や合金原子が拡散することによって相の結晶構造や組成が変わります．これが拡散変態です．原子の拡散は高温では頻繁におこりますが，温度依存性が非常に大きく，温度が低くなると急激に移動頻度が低下します．

純鉄の鉄原子の体拡散の頻度と温度の関係を図8に示します．900℃では個々の鉄原子は1秒間にそれぞれ10万回程度もジャンプ（位置交換）しています．700℃になると700回/秒程度，400℃では鉄原子が一回ジャンプ

*1 ベイナイトに関してはその変態機構が，パーライト変態などと同様な拡散変態であるという説とマルテンサイトと同じ無拡散変態であるという説があり，長年にわたり論争が続いており，いまだ完全には決着がついていない．ただし，筆者らは，kinetics や結晶学的観点から一連の研究を行った結果，ベイナイト変態は基本的にはマルテンサイトと同じ無拡散変態であると考えている[4]．

Fe原子の拡散

温度(℃)	ジャンプ回数	結晶構造
1400	10^8(回/秒)	bcc
1200	10^5(回/秒)	fcc
1000	10^4(回/秒)	
900	10^5(回/秒)	bcc
800	10^4(回/秒)	
700	700(回/秒)	
600	20(回/秒)	
500	0.3(回/秒)	
400	13(分/回)	
200	1800(年/回)	
R.T.	10^{18}(年/回)	

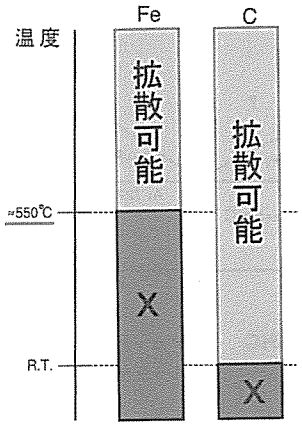


図8　鉄原子の拡散頻度と温度の関係，および鉄原子と炭素原子の拡散可能な温度域の比較

するのに13分，200℃では1800年もかかる計算になります．要するに，鉄原子は室温近傍では動かないのですが，高温に上げていくと拡散が頻繁におこるようになり，この原子の拡散によって相変態（結晶構造の変化や組成の変化）や析出が起こるわけです．つまり，相変態や析出は原子の拡散がその基礎になっているのです．鉄合金の場合，鉄原子が1秒間に1回動く（拡散する）温度は約550℃です．このあたりの温度が，鉄原子が動くか動かないかの目安になり，鋼の熱処理を考える場合，重要な意味を持ってきます．つまり，おおざっぱには500～550℃以上で鉄原子が動く（拡散する），これ以下の温度では動かないと言えます．鉄以外の合金元素，たとえばモリブデンやニッケルなどの置換型合金原子はすべて鉄原子と同じで，やはり約550℃以下で拡散できなくなります．拡散でもう一つ大切なことが，炭素の拡散です．炭素は，原子サイズが小さい（直径で鉄原子の約60%）ために合金元素として鉄に添加された場合，図2の右上に示したように鉄原子の隙間の位置に存在して固溶します．これを侵入型原子といいます．侵入型原子の拡散は，鉄原子や置換型合金原子と比較して極めて速く，しかも低温でおこるのが特徴です．図8の右に示したように，炭素原子は室温より少し上（40℃近傍）で，1秒間に1回ジャンプします．それゆえ，鉄-炭素合金では，550℃～40℃の温度範囲は，鉄原子や置換型合金原子は動けないが炭素原子は自由に動けるという，特異な温度範囲にあります．このような温度域でおこる鋼の熱処理がベイナイト変態やマルテンサイトの低温焼もどしです．このように鉄－炭素合金は，溶媒原子（Fe）と溶質原子（C）の拡散する温度域が大きく異なるという大変珍しい合金なのです．ちなみに，金属中に侵入型に固溶する元素は，炭素以外には窒素，酸素，水素があります．これらはいずれも不純物，有害元素として嫌われる場合が多く，積極的に合金元素としては使われません．炭素を基本的な合金元素としている鉄鋼材料は，この点からもユニークな合金といえます．

話を前にもどして，急冷するとなぜ焼きが入るのか，つまり冷却速度を大きくするとなぜ拡散変態からマルテンサイト変態に変化するのかについて，共析鋼を例にして考えてみます．図9は，オーステナイトから種々の冷却速度で冷却した時の変態開始温度の変化を模式的に示したものです．パーライト変態（共析変態）がおこる温度A_1点は平衡状態図（図2）では727℃になっています．しかしこの727℃という温度は，非常にゆっくりと冷却した時の変態開始温度であり，実際の熱処理ではこの温度よりも低い温度で変態がおこります（これを過冷却現象という）．図9に示すように，A_1点（状態図に示されている温度をAe_1点，冷却時の変態点をAr_1点と呼び区別する）は冷却速度が大きくなるにつれて低下し，ある冷却速度以上になるとパーライト変態がおこらなくなります．この冷却速度が上部臨界冷却速度で，焼入れを考えるときには重要な冷却速度になります．なぜ，上部臨界冷却速度が存在するのでしょうか．それは，これ以上の冷却速度で冷やすとオーステナイトが500～550℃以下，つまり鉄原子が拡散しなくなる温度まで持ち来たされ，拡散変態であるパーライト変態がおこらなくなったからです．

要するに，相変態には二つの機構，つまり拡散変態と無拡散変態があり，オーステナイトからゆっくり冷却すると原子が拡散する温度範囲で拡散変態（これが通常の状態図に従っておこる変態）がおこりますが，急冷して拡散変態がおこらないうちに550℃程度以下の温度（鉄原子が拡散出来なくなる温度）までオーステナイトを持ち来たらすと，もはや拡散変態はおこり得ず，代わりに無拡散変態（マルテンサイト変態）がおこるようになる

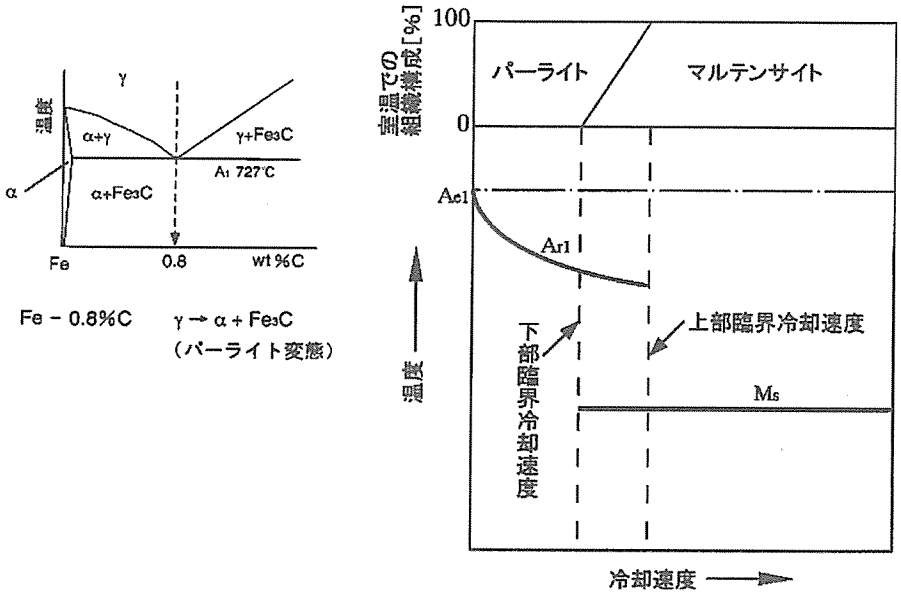


図9　共析炭素鋼の変態点に及ぼす冷却速度の影響および室温組織

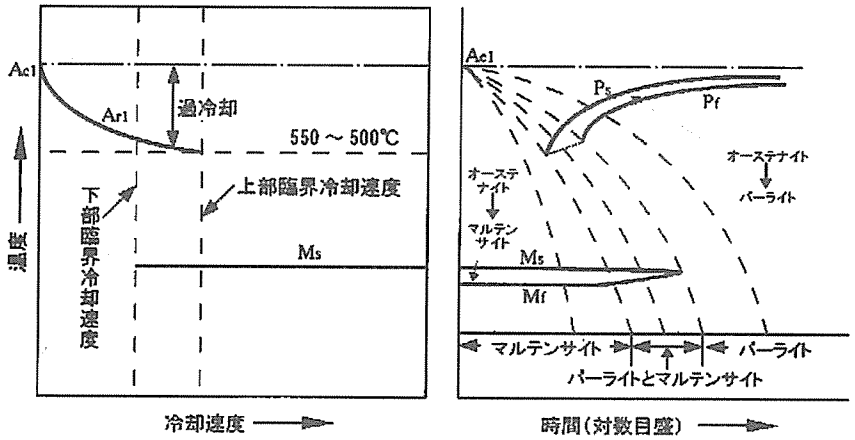


図10　共析炭素鋼の変態点に及ぼす冷却速度の影響と CCT 線図の関係

わけです．これが焼入れ処理です．焼入れはマルテンサイト変態を起こさせるのが目的ですから，そのためには競争相手として拡散変態があり，冷却中に競争相手の拡散変態が先に起こってしまえば焼きが入らなかった，ということになるわけです．図9と CCT 線図の関係を図10に示しておきます．

5.　なぜ鉄鋼材料の組織が変わると強度レベルが変わるのか

鉄鋼材料には，オーステナイト相のお陰でいろいろな相変態があり，それぞれの変態組織の強度レベルが異なるために，広範な強度レベルをカバーできることを述べてきました．それでは鋼の変態組織が変わると，なぜ強度レベルが大きく変わるのでしょうか．

もう一度，図2の状態図を見てください．鉄-炭素合金では，室温ではフェライト（α）とセメンタイト（Fe_3C）の二相組織です．ここで特徴的なことは，フェライトは炭素をほとんど固溶しないことです．室温では数 ppm しか炭素を固溶しません．それでは，鋼には何のために炭素を添加しているのかというと，添加した炭素を鉄との化合物であるセメンタイトという形で使っているのです．つまり，図4に示したいずれの組織においても全て $\alpha + Fe_3C$ 二相組織，つまり軟らかい純鉄（フェライト）中に非常に硬いセメンタイトが存在している

組織状態なのです*2．鉄-炭素合金では，セメンタイトの体積率（%）は15.3×[mass%C] で表せますので[5]，共析鋼（0.8%C）で12.2%，1.0%C の高炭素鋼では15.3%ものセメンタイト量になります．これは，通常の非鉄合金では第二相の量が数%程度であることを考えれば，鉄-炭素合金は第二相の分量が大変多い合金であるということができます．これも，オーステナイトでは炭素を多く固溶し，フェライトはほとんど固溶しないという特徴のお陰です．

この多量に存在する硬いセメンタイト（Hv＝1000 程度[6]）の形態やサイズを変えることによって，フェライト母相は純鉄で軟らかい組織であるにもかかわらず，鉄鋼材料は幅広い強度レベルが発現するのです．図11はフェライト中に存在するセメンタイトの典型的な三つの形態を示しています．微細粒子を均一に分散させるもの，薄膜を積層させるもの，そして線を細かく並べるもの，が考えられます．これらのなかの，セメンタイト粒子が微細分散した状態がマルテンサイトの低温焼きもどし組織，セメンタイトの薄板を密に積層したものがパーライトです．つまり，図12に示すように種々の熱処理によってセメンタイトの形態やサイズを変化させるとともに，炭素量によってセメンタイト量を変化させて，強度を広範に変化させているわけです．

6. パーライト変態の有り難さ

鉄-炭素合金に共析変態（パーライト変態）があったことが大変ラッキーでした．共析変態は一つの固相（A）から二つの固相（(B) と (C)）が同時に生成する反応であり，このとき二相が層状に生成するという特徴的な組織になります．鉄-炭素合金では $\gamma \rightarrow \alpha + Fe_3C$ という反応が 0.8%C の組成の合金でおこります．このときに生成するパーライト組織（図13）は，軟らかいフェライ

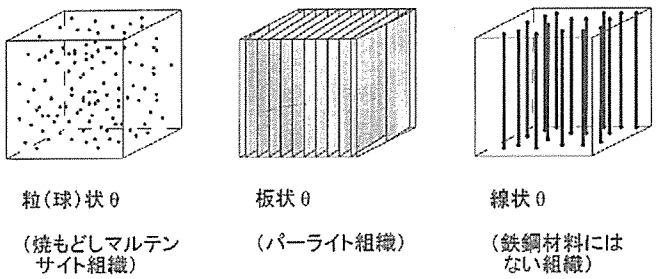


図11　鉄-炭素合金におけるフェライト（純鉄）中のセメンタイト（θ）の存在形態

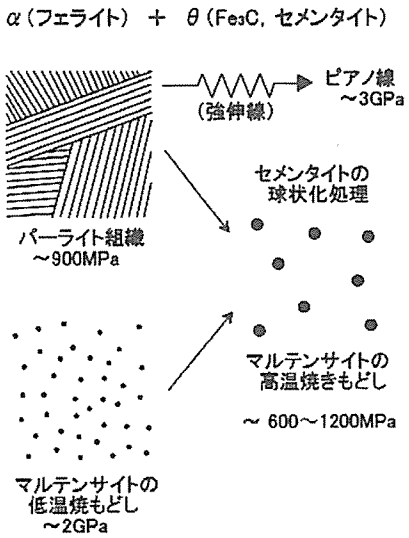


図12　共析鋼の熱処理によるセメンタイトの形態と分散状態の変化

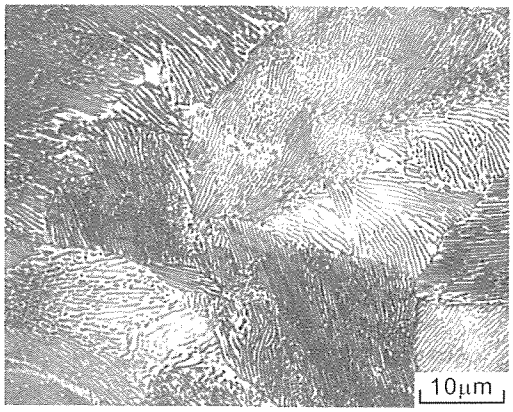


図13　共析鋼のパーライト組織（光学顕微鏡組織）

*2 マルテンサイトは焼入れ状態では単相（炭素過飽和のフェライト）で，焼もどしによりフェライトとセメンタイトの二相になる．

ト地に硬くて薄いセメンタイト板が0.1～0.5 μm という極めて細かい間隔で層状に積層された組織です．これは素晴らしい天然の複合材料といえます．このような微細な層状組織を人工的に作ることができるでしょうか．パーライト組織は鉄鋼材料の貴重な財産です．これのお陰で，炭素という安価な合金元素をわずか0.8% 添加するだけで，引張強さ 900 MPa という高強度が得られるのです．亜共析鋼の空冷材はフェライト＋パーライト組織ですが，その引張強度は図14に示すように炭素量によって直線的に上昇します．これは炭素量が増すほど強いパーライト組織の分率が増えるためで，空冷材の強度上昇が炭素量を増加するだけで容易に可能なのもパーライト変態のお陰なのです．

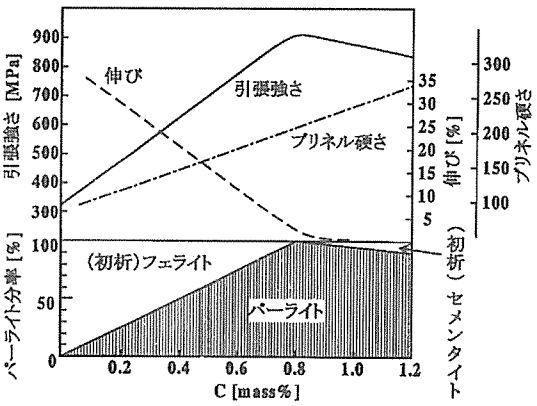


図14　炭素鋼の空冷材の組織と引張強度，伸び，硬さに及ぼす炭素量の影響

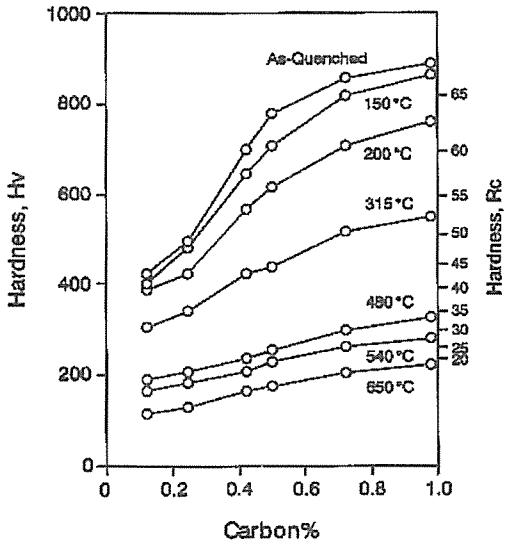


図15　炭素鋼マルテンサイトの焼もどしによる硬さ変化

さらに，パーライト組織は大きな加工硬化を示すため，図5に示すように3～4GPaという実用鋼での最高強度を示すピアノ線として利用されており，極細線では鉄鋼材料の実験室的最高強度（5.7GPa）が得られています*3．

7．鋼のマルテンサイトの素晴らしさ

鉄鋼材料が他の金属材料に見られぬ非常に広範囲の強度レベルをカバーできるのは，先に述べたように，硬くて強いマルテンサイトのお陰です．通常，マルテンサイトは焼もどして使用されるので，過飽和炭素は炭化物として析出します．それゆえ，焼もどしマルテンサイトの強化の主因は析出強化と転位強化です．

高炭素鋼のマルテンサイトを 150～200℃ の低温で焼もどすと，数 nm 程度の微細な ε 炭化物（$Fe_{2.4}C$）が多量に析出し，図15に示すように大きな析出強化によって高強度，高硬度が得られます．析出強化は大変有効な強化法[2]で，図16に示したように強化量は析出粒子間距離（λ）の逆数に比例します．そして，λを小さくするには，析出物の体積（f）を多くするか，析出物半径（r）を小さくする方法があります．できるだけ多量の析出物を，できるだけ均一微細に分散させるのが，析出強化に

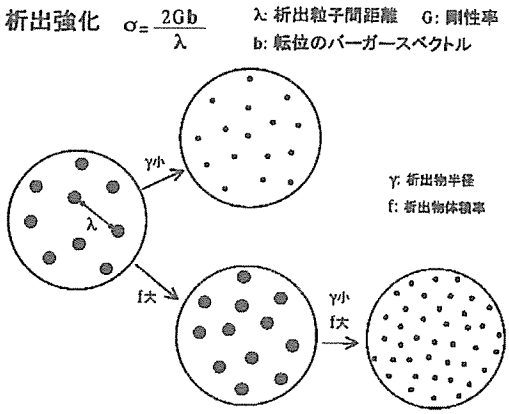


図16　析出物の分散状態と析出強化量の関係

*3 最新の解析機器を用いた研究により，パーライト組織を強伸線加工すると，ラメラセメンタイトがナノ粒子化することや，セメンタイトが溶解してフェライト中に炭素が過飽和に固溶することなど，今まで想像もしなかった現象がおこっていることが明らかになってきた．ピアノ線は昔に開発された古い材料であるが，その超高強度化の謎や内部組織の秘密が最近になってようやく明らかになり，その結果，大ひずみ加工によって大変面白い組織変化がおこることを我々に教えてくれた[2]．

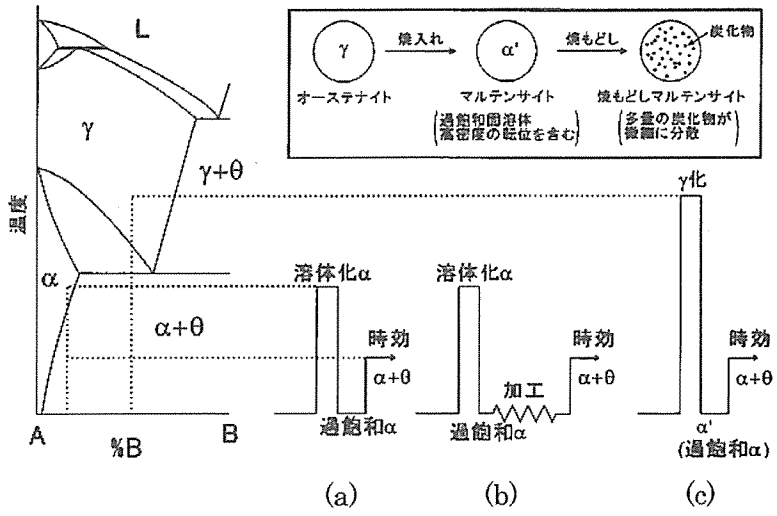


図17　溶体化材（(a)，(b)）および焼入れ材（c）の時効析出の比較

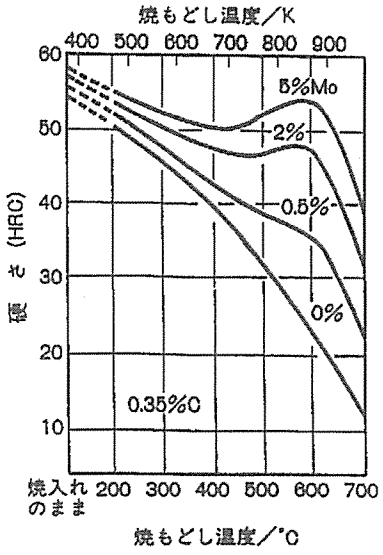


図18　マルテンサイトの焼もどし軟化抵抗におよぼすモリブデン量の影響（0.35%C 鋼）

は最も有効です．

このような析出強化という視点から見ると，鋼のマルテンサイトの素晴らしさを再認識させられます．例えば，図17 (a) に示したように，通常の溶体化処理により過飽和固溶体を得たのち時効する材料では，溶体化温度での合金元素の固溶量に制限があるため，析出物の体積率はそれほど大きくできません．そこで，より高強度化のためには，できるだけ細かい析出物になるように (b) に示すような時効前に加工を施す加工熱処理が行われます．これは，加工によって導入された転位を析出の核生成サイトとして利用し，均一微細な析出物を得ようとするものです．ところが，図17 (c) のようにマルテンサイト変態をみると，合金元素を多量に固溶する高温相（鋼ではオーステナイト）を母相として，原子の拡散を伴わない無拡散変態で生成するため，母相に固溶していたすべての合金元素はマルテンサイト中にも過飽和に固溶することになります．つまり，マルテンサイト変態は著しい過飽和固溶体を得る手段なのです．しかも，マルテンサイトには高密度の格子欠陥（転位）が存在しているので，焼入れたままで図17 (b) の加工熱処理を施した状態になっていると見なせます．このように，マルテンサイトは，多量の析出物を均一微細に生成するための極めて好ましい条件を自然に備えており，析出強化を最大限に利用できる優れた組織なのです．

このように高炭素鋼マルテンサイトを200℃近傍で低温焼もどしを行うと，微細な鉄炭化物（ε炭化物）が多量に析出することにより大きな析出強化がおこり，高強度（高硬度）が得られるわけです．ところが，高炭素マルテンサイトでも500～700℃での高温で焼もどすと図15に示したように硬さが大きく低下してしまいます．これは，高温で焼もどすと図12のようにセメンタイトが容易に粗大化してしまうからで，析出強化から見たときのセメンタイトの欠点です．

このセメンタイトの欠点を補い，マルテンサイトの高温焼もどし時に析出強化を発現させたのが，焼もどし二次硬化です．二次硬化とは，鋼にモリブデンやバナジウムなどの炭化物生成元素を添加すると，図18に示すように550℃近傍の温度での焼もどしによって硬さが再び上

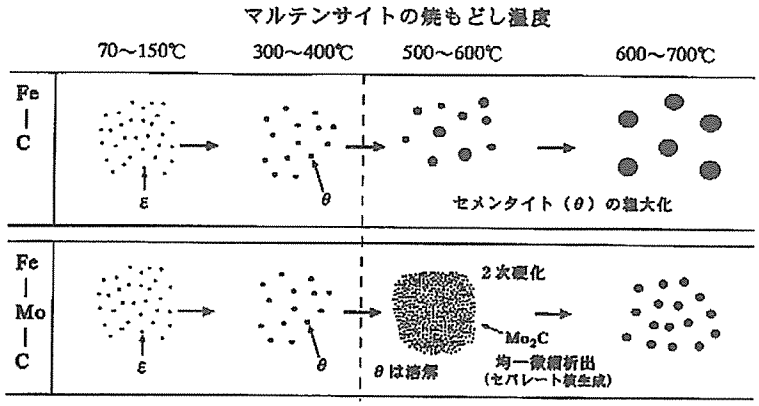


図19 炭素鋼およびモリブデン添加鋼におけるマルテンサイトの焼もどし時の析出炭化物の比較

昇する現象です．図19にモリブデン添加鋼の焼もどし二次硬化の理由を模式的に示しています．炭素鋼の焼もどしでは，温度の上昇により鉄炭化物（ε炭化物またはセメンタイト）は粗大化し，強度は単調に低下します．ところが，モリブデンを添加した鋼では，550℃ 近傍でセメンタイトに置き換わってモリブデン炭化物（Mo_2C）が均一微細に析出するため大きな析出強化が起こるわけです．550℃ 近傍で Mo_2C 析出が開始するのは，この温度になるとマルテンサイトに固溶していたモリブデン原子が拡散しだすからです．自然に起こる炭化物の遷移現象をうまく利用した熱処理の例と言えます．

8. おわりに

鉄鋼材料が広範な強度レベルをカバーできる秘密が，鉄-炭素合金の状態図にあることを述べ，熱処理をミクロの世界から眺めてみました．この状態図の素晴らしさのお陰で，多様な相変態があり，様々な熱処理が可能なのです．鉄鋼材料は研究すればするほど，他の金属・合金と比較すればするほど，素晴らしい材料だということが分かります．重厚長大な構造物を構成する鉄鋼材料が，美しいミクロの世界を持ち，ナノレベルでの精緻な組織制御でその特性を発揮していることを知らない人が大勢います．鋼（Fe-C 合金）が如何に素晴らしい材料であるかを，できるだけ多くの学生さんに感じ取っていただければと願っています．

私は，長年，鉄鋼材料の研究に従事してきました．この間に時々「鉄鋼材料は成熟した材料でもう研究することがない」とか，「鉄鋼産業は成熟産業で，材料としての発展はない」などの言葉を耳にしましたが，とんでもないことです．これは鉄鋼材料をまったく理解していない人の言葉です．鉄鋼材料は決して成熟した材料ではありません．まだまだ発展途上の材料で，多くの可能性を秘めています．鋼が有している本来の能力を，我々はまだ十分には引き出していません．例えば，強度に関していうと，引張強さで1～2 GPa 程度の鋼は高強度鋼ですが，それでも鉄の本来有している強度（理想強度）の高々 10～20% 程度です．鉄鋼材料はまだまだ強くなるはずです．工業的重要性はもとより，研究対象としても，解決せねばならない問題が山積している，魅力にあふれた材料です．参考文献の[1, 7, 8]を読んでいただくと，鉄鋼材料の魅力をさらに知っていただけると思います．

なお，本稿の内容は，私が定年になるまで長年担当してきた学部4回生講義「金属材料学」の4～5回分の講義内容のエッセンスを取りまとめたものであり，熱処理技術協会誌の「熱処理」に掲載された記事（熱処理，44 (2004)，231）をもとにしたものであります．

参考文献

1) 矢田浩：ふぇらむ，1 (1996), 185.
2) 牧正志：ふぇらむ，3 (1998), 781.
3) 牧正志：熱処理，37 (1997), 5.
4) 牧正志：まてりあ，46 (2007), 321.
5) 高木節雄：第 141，142 回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会編，(1992) p.1.
6) 梅本実，土谷浩一：鉄と鋼，88 (2002), 117.
7) 谷野満：ふぇらむ，1 (1996), 41.
8) 西沢泰二：ふぇらむ，1 (1996), 108.

退職記念講演

日本国内の資源・エネルギーを取り巻く状況

芦　田　　譲*

The Current Status of Resources and Energy in Japan

by Yuzuru ASHIDA

1. はじめに

最近，国内外の学会，マスコミ，メディア等を通じて「オイルピーク」という言葉を耳にする．これは世界の石油生産がピークを迎え減退に転じるというシナリオである．石油生因説として有機説をとろうと，無機説をとろうとも，石油は化石エネルギーであり，有限であることに変りはない．有限なものを生産，消費するときには，必ず生産のピークがある．問題はそのピークがいつかである．それは究極可採埋蔵量，価格/財務条件，インフラ，採鉱投資，回収率等によって変ってくる．究極可採埋蔵量については3兆バレルであるいう説から1.8兆バレルであるという説がある．また，オイルピークの時期については，2004年だったとする説，2010年頃，いや2050年以降，さらには280年先だとする説が入り交じっている．ここで重要なことは，ピークとかバブルとかはその真っ只中にいるときはそれと認識しなくて，それらが過ぎてからピークだった，バブルだったと気付くことである．したがって，先を予測して，複数の対応策，シナリオを用意しなければならない．

2. エネルギーとは

資源とエネルギーの違いはコストである．資源として存在しても，コスト的に採算が合わなければ使われない．そのいい例が日本の石炭である．日本には石炭は資源としてはあるが，海外炭に比べて高値であるために現在はエネルギーとしては使われていない．資源はどこに，どういう形で，どのぐらいの密度であるかということが問題である．例えば，太陽エネルギー，海水中のウラン，金等の資源は大量にあるが，密度が薄い．したがって，それを集めるのにコストがかかる．一方，ウラン鉱床とか金鉱床は地球が長い年月かけて凝集してくれたのだから，それを見つけて採り出せばいい．さらに，蜂蜜を考えると，ミツバチが花の中に分散している蜜を集めてくれる．さらに受粉もやってくれる．これを人間がやると，大量のレンゲ畑を作って蜜は採るが，大量の廃棄物を出すことになる．

エネルギーの利用価値を評価する指標としてEPR（Energy Profit Ratio：エネルギー利得率）がある．これは出力のエネルギーを，それを得るのにかかった入力のエネルギーで割ったものである．1なら損得なし，1以下なら損失である．

エネルギー問題というのは，国家の安全保障上，非常に重要なものである．現代社会はエネルギー，工業原料，運輸，食料において石油・天然ガスに依存している．防衛の観点からも石油がなければ自衛隊の戦闘機，艦船は機能しない．国内の油，ガス田は一種の地下備蓄といえる．地上や洋上タンクとかで現在，180日分の備蓄をしているが，油，ガス田を見つければ10年か20年分位の備蓄ができることになる．

リスクマネジメントとしてSWOT解析が必要である．Strongなのか，Weakなのか，Opportunityなのか，Threat，つまり脅威なのかを予測し，解析して対策を立てる必要がある．リスクマネジメントに基づき，これしかないというシナリオではなく，こういうシナリオもある，こういうシナリオもあるという複数のシナリオが必要である．ピークとかバブルが厄介なのは，その真っ只中にいる時はそれと気付かないことである．ピークやバブルが終わってから，あのときがピークだった，バブルだったと気付くものである．したがって，先を予測し，SWOT解析を行い，対策をたてる必要性がある．

*京都大学名誉教授，NPO法人環境・エネルギー・農林業ネットワーク理事長

2.1　最近のエネルギー事情

現在のエネルギー事情をみると，供給については北海油田の減退が予想以上に激しく，サウジアラビアの油田に水がついてきている．石油発見のピークは，もう40年前に過ぎている．また，石油生産のピークはアメリカでは2004年であったという人もいる．一方，石油の需要はBRIC's諸国の近代化によって急激に伸びている．石油はなくなりはしないが減退し，安く豊かな石油から高く乏しい時代になってくる．当然，需要と供給の関係で油価が値上がりする．2005年は，バレルあたり60ドルだったが，2007年はバレルあたり70～80ドルになっている．

表1に1945～1960，1970～1990，1990～1999年の期間における年平均の発見量と1990～1999年における消費量を示す．この表をみると1990～1999年にかけて毎年発見量の4倍もの量を消費しているのがわかる．図1は1930年から現在までの石油の発見量と生産量を示す．これによると石油発見のピークは1967年であり，1980年には生産量が発見量を超えている．

石油の代りのエネルギーがあれば問題はない．石油の用途としては発電，工業原料と輸送がある．発電は太陽光，バイオマス，風力，原子力等で賄い，工業原料用の炭化水素は石炭，バイオマスからもってこざるを得ない．輸送は現在の所ほとんどが石油・天然ガスに依存しているから，戦略としては発電は石油・天然ガス以外で賄い，石油・天然ガスは輸送の方に回して，できるだけ長持ちさせようということになる．

燃料電池，水素はどうかというと，燃料電池に必要な水素は，現在は石油・天然ガスからのものを使っている．さらに，燃料電池の電極触媒に白金を使っているが，白金の可採年数は，もう30年を切っている．また，水素は空気中にはほとんどなく，水という形である．だから，電気分解するのにコストがかかる．EPRを考えたらまだ実用段階ではない．

日本周辺海域には，メタンハイドレートが日本の天然ガスの年間消費量の100年分あるという説がある．メタンハイドレートはメタンガスがシャーベット状の水の中に含まれているので，井戸を掘っても出てこない．何十億とかけて井戸を掘り，数m位の長さのコアの中に含まれるメタンガスを取っても，EPRを考えた場合採算に合わない．したがって，現在ではエネルギーとしては使えない．

表1　石油発見量と消費量の推移

時　期	年平均石油発見量（10億バーレル）
1945～1960	35
1970～1990	23
1990～1999	6
1990～1999	年平均石油消費量:25

2.2　石油の可採年数

図2は世界の石油の残存確認可採埋蔵量と可採年数（Reservoir/Production; R/P）の推移を示したものである．R/Pというのは，現在の確認可採埋蔵量をその年の生産量で割ったものである．これは40年位前から30～40年で，現在は41年である．だから翻って考えれば40年たっても，まだ40年あるのではないかという議論が出てくる．しかし，これは誤りである．なぜならば，40年前は地下を探す技術は大したことなく，アクセスのできる所しか探していなかった．今は，探査技術は非常に高度になっており，あらゆる地域を調査している．この状態での40年というのは非常に厳しい．今までは新規の埋蔵量の発見があったが，今後は新規の埋蔵量の発見が少なくなってくると考えざるを得ない．

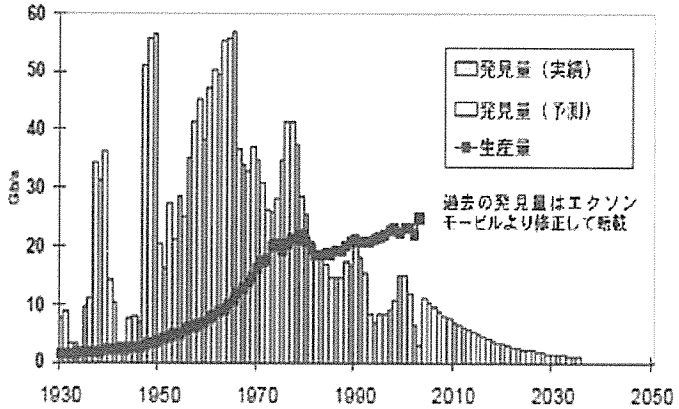


図1　石油発見量と生産量の格差

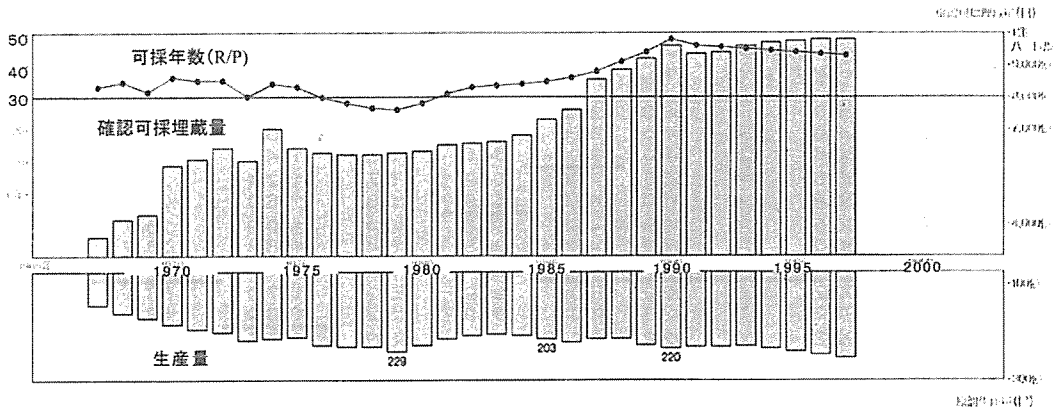


図2　世界の石油の残存可採埋蔵量と可採年数

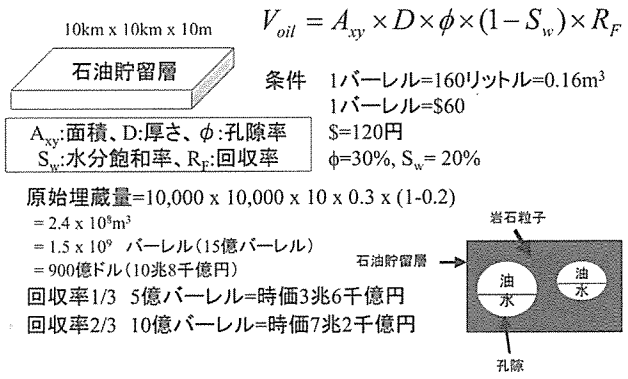


図3　石油の可採埋蔵量の計算方法

図3は確認可採埋蔵量の計算方法を示したものである．石油はプールみたいなところに溜まっているのではなく，岩石の中に空隙があり，その中に水と一緒に混じっている．例えば，縦横 10 km×10 km の面積，厚さ 10 m の石油貯留層があるとする．これはあまり大きな規模の油田ではない．この資産価値を見積もるために，まず埋蔵量を計算する．縦×横の面積に厚さを掛けて貯留層の体積がでて，それに空隙率を掛けると，石油と水が入る体積がでる．それから水の分を引くと，埋蔵量が計算できる．しかし，重力だとか内部の粒子間圧力があるので，石油は井戸を掘っても全部は出てこない．自噴してくるのはせいぜい10%か，条件によって20%である．それで，もう1本井戸を掘って，そこから水やガスで油層に圧力をかけて押し，回収率を上げる．それでも40～60%位しか採れない．これの資産価値を計算してみる．1バレルは160リットルである．油価が60ドル/バレル，1ドルが120円，空隙率が30%，水の飽和率が20%とすると，埋蔵量が10,000×10,000×0.3×(1−0.2)m³になり，これをバレルに直し60ドル/バレルと120円/ドルをかけて価格にすると約10兆円になる．石油産業のいい所は大きなリスクがあるが，一つ油田を見つければ，10年かその位，その会社はやっていけるという利点がある．

表2は可採埋蔵量の変化を示したものである．可採埋蔵量は政策，経済的な状況により変化する．なぜならば，可採埋蔵量は石油貯留層の面積，厚さ，空隙率，水分飽和率，回収率により決まるから，これらデータの見直しにより可採埋蔵量は変化するからである．データを見直したら，石油貯留層が大きかったとか，空隙率が30%じゃなくて40%だったとか，水の量が少なかったとなると，埋蔵量がすぐ変る．現実にオイルショックのときにアブダビ，ドバイ，イラン，イラクなどは1987年から1988年の間に約3倍埋蔵量が増えている．この間に新たな大油田が見つかったわけではない．それが一挙に3倍になっているのは，OPEC諸国の石油生産量の割り当ては埋蔵量によって決められることから，油価が上がると埋蔵量を増やせば生産量を増やせるからである．

2.3　石油・天然ガスの成因

石油・天然ガスはどうしてできるのでだろうか？これには2つの説がある．無機説と有機説で，無機説は，地

表2　OPEC諸国の可採埋蔵量の変化

	巨大油田							
	アブダビ	ドバイ	イラン	イラク	クーウエイト	中立地帯	サウジアラビア	ヴェネズエラ
1980	28.0	1.4	58.0	31.0	65.4	6.1	163.4	17.9
1981	29.0	1.4	57.5	30.0	65.9	6.0	165.0	18.0
1982	30.6	1.3	57.0	29.7	64.5	5.9	164.6	20.3
1983	30.5	1.4	55.3	41.0	64.2	5.7	162.4	21.5
1984	30.4	1.4	51.0	43.0	63.9	5.6	166.0	24.9
1985	30.5	1.4	48.5	44.5	90.0	5.4	169.0	25.9
1986	30.0	1.4	47.9	44.1	89.8	5.4	168.8	25.6
1987	31.0	1.4	48.8	47.1	91.9	5.3	166.6	25.0
1988	92.2	4.0	92.9	100.0	91.9	5.2	167.0	56.3
1989	92.2	4.0	92.9	100.0	91.9	5.2	170.0	58.1
1990	92.2	4.0	92.9	100.0	91.9	5.0	257.5	59.1
1991	92.2	4.0	92.9	100.0	94.5	5.0	257.5	59.1
1992	92.2	4.0	92.9	100.0	94.0	5.0	257.9	62.7
1993	92.2	4.0	92.9	100.0	94.0	5.0	258.7	63.3
1994	92.2	4.3	89.3	100.0	94.0	5.0	258.7	64.5
1995	92.2	4.3	88.2	100.0	94.0	5.0	258.7	64.9
1996	92.2	4.0	93.0	112.0	94.0	5.0	259.0	64.9
1997	92.2	4.0	93.0	112.5	94.0	5.0	259.0	71.7
1998	92.2	4.0	89.7	112.5	94.0	5.0	259.0	72.6
1999	92.2	4.0	89.7	112.5	94.0	5.0	261.0	72.6
2000	92.2	4.0	89.7	112.5	94.0	5.0	259.2	76.9
2001	92.2	4.0	89.7	112.5	94.0	5.0	259.3	77.7
2002	92.2	4.0	89.7	112.5	94.0	5.0	259.3	77.8

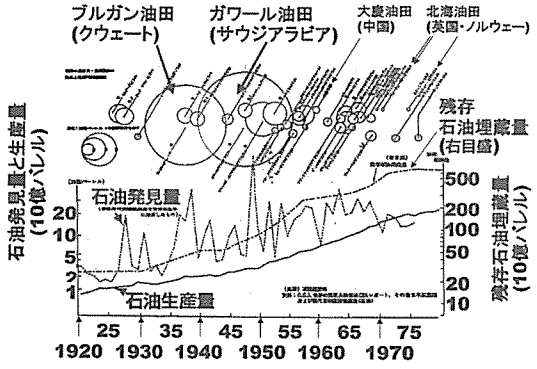


図4　世界の巨大油田の発見年と埋蔵量の規模

下深部において炭素と水素から合成してできたとか，あるいは地球の創生時に存在しており，その後長い年月をかけて移動，集積したという説である．一方，有機説は，動植物からの有機物が，地下において酸素のない還元状態の環境下で熱作用によりケロジェンになり，さらに炭化水素に変化したというものである．天然ガスは石油からさらに温度が加わって熟成が進んだものである．だから，両者は基本的にもともとは同じものである．現在は有機説が定説になっている．油価が上がると，石油は幾らでもあるという無機説が出てくる．これはとんでもない間違いである．というのは，エネルギーというのは凝集してなければ利用できないからである．成因説として有機説であろうと無機説であろうと油田・ガス田という形に集まってなければエネルギーとしては使えない．

有機説の立場に因り油・ガス田形成の条件を考えてみる．まず，根源岩が必要である．泥岩に含まれる有機物が熱変性を受けて石油ができる．次に石油を貯める貯留岩が必要である．岩石の空隙の中に石油が貯まるから，空隙の多い砂岩，石灰岩とか凝灰岩が貯留岩になる．凝灰岩とは火山灰が堆積したものである．古墳の石棺とか大谷石が凝灰岩である．空隙が多くあるから，そこに石油が貯まる．それから背斜構造，断層，層位封塞とかのトラップ，すなわち，“わな”により石油が閉じ込められねばならない．次にシールにより石油が逃げられないようにする蓋が必要である．さらに，熟成するための熱と，泥岩でできて貯留岩に貯まることから，移動するための力が働く必要がある．これらの条件があると，油・ガス田が成立する．移動しないで根源岩の周りにとどまったものがオイルシェールである．これは泥まみれの油である．また，移動してきたけれども，シールとかトラップがなくて地表近くに出てきて揮発性のものが蒸発して，重質油が貯まったのがオイルサンドである．

図4は世界の巨大油田の発見された年とその埋蔵量の大きさを示したものである．幅50 km，長さ280 kmもの大きさの世界最大のガワール油田は1948年に見つかっている．次に大きいのがイラク戦争の時にイラクが火をつけていったクウェートのブルガン油田で，1935年に見つかっている．それに比べて，大慶油田や北海油田ははるかに小さい．大きなものは当然見つけやすいことから，現在はある程度大きなものは見つけてしまったと言っても過言ではない．だから，これからは小規模なもの，経済的に条件の悪い所のものを探していかざるを得ない．

2.4　ハバートカーブ

図5はハバートカーブと呼ばれるものである．これはハバートがマルサスの人口論の理論を用いて石油の埋蔵量の予測をしたものである．マルサスは「人口の力は人間のための生活資料（食料等）を生産する地球の力よりも限りなく大きい」と述べている．マルサスの人口論とは，人口は等比級数的の増加するが，生活資料は等差級数的にしか増加せず，人口の増加速度が生活資料の増加速度を上回るから，人類は将来的に困窮に瀕する，すなわち，人口増加は人口に比例するが，病気だとか食料事情の悪化による減少は人口の2乗に比例するという説である．ある年の生産量をy，埋蔵量をxと置くと，生産量の増加率は，$dy/dt = ax - bx^2$ という関数になる．ここで，aは埋蔵量が十分小さいときの増加速度，bはaを究極の可採埋蔵量で割った定数であり，それまでの石油の生産量から近似して求める．この微分方程式を解くと，ある年の生産量が，$y(t) = (a/b)(1/1 + c \cdot \exp(-at))$ で得られる．ここで，$c = a/bx(0) - 1$ である．このx(t)がロジスチックカーブである．キャンベルはこのハバートの予測に基づき，アメリカの石油生産のピークが1970年であり，究極埋蔵量は1.8兆バレルと予測した．これに対して，石油生産にマルサスの人口論が適用できるのかとの反論がある．また，オイルショックとかがあると，少しピークがずれてくる．これをとらえてハバートの説は間違いであると言っている人もいる．ブッシュ大統領のエネルギーアドバイザーのシモンズはハバートモデルに最新のデータを適用して，世界の石油生産のピークは2004年であったと予測した．

図6は資源ピラミッドモデルで，可採埋蔵量は回収率や価格が上がったり，パイプライン等のインフラが整備されたり，探鉱投資が多くなると，それはどんどん増えていくという楽観論である．

図7に示すように，究極埋蔵量の予測に対して一番悲観的なキャンベルは1.8兆バレルだとしている．一方，楽観論者はアメリカの地質調査所で，彼らは数学的なモデルではなくて，探鉱，堆積盆地のデータを用いて推定究極埋蔵量は3兆バレルであるとしている．しかし，3兆バレルであるということは，これは限りがあることを自ら認めていることになる．1.8兆バレルで可採年数が41年だとすると，3兆バレルを単純に比例計算すると68年になる．41年が68年になるだけで時間稼ぎはできるが根本的な問題は変らない．

石油がなくなっても天然ガスがあるという話がある．天然ガスは石油ともともとでき方が同じであり，温度がさらに上がり，熟成が進むと天然ガスになる．天然ガスのR/Pは65年といわれている．楽観的なアメリカの地

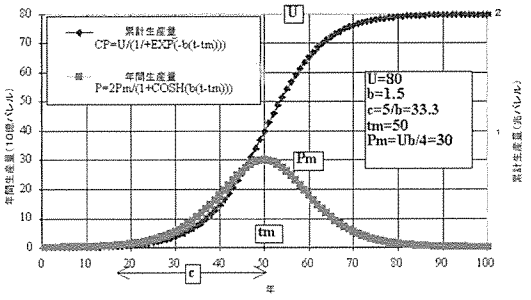


図5　ハバート曲線（累計生産量と年間消費量）

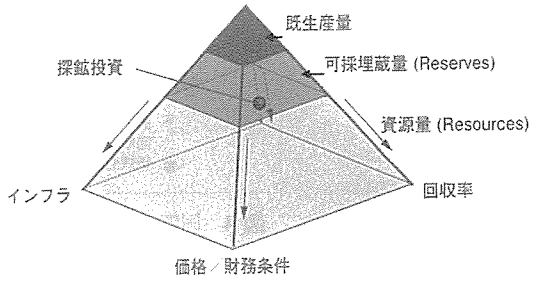


図6　資源ピラミッド

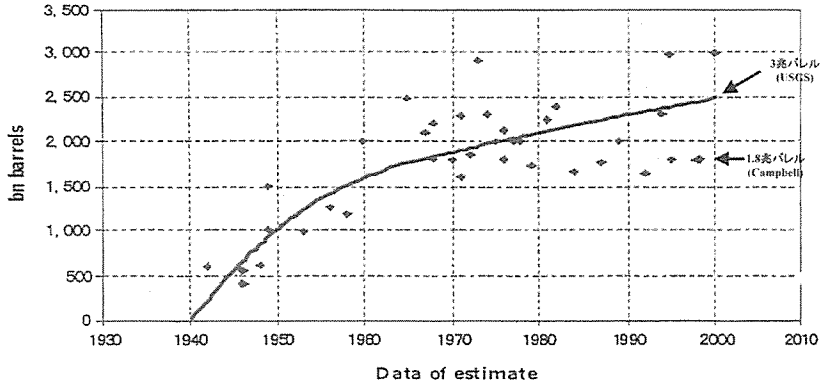


図7　推定究極可採埋蔵量

質調査所は130年だといっている．可採年数とは可採埋蔵量をその年の生産量で割った値であることから，石油が少なくなって天然ガスをどんどん使い，例えば生産量が年間5%ずつ増えていくと複利で計算するから，130年といっても40年に過ぎない．

2.5　世界の石油の需給予測

図8は国際エネルギー機関（IEA）による予測である．これによると，既存油田からの量は，2004年頃から減退する．新規の生産井の掘削による既存油田からの増産，回収率向上による増産，オイルサンド，オイルシェール等の非在来型油田の開発を加えても，需要を賄うためには，新規の油田を見つけなければならない．さらに，図9は最大手の石油会社であるExxon-Mobilによる予測である．これによると2004年をピークにして，生産量は減退し，探鉱投資による増産を加味しても，毎年4～6%生産が減少する．したがって，急激に増加する需要を賄うには，新しくエネルギーを調達しなければならない．一方，日本の経産省の2030年におけるエネルギー需給予測を図10に示す．これによると，油価が上昇すると，それまで生産できなかったオイルサンドやオイルシェールが開発可能となり，2030年でも十分な供給量があるとしている．また，日本の石油連盟の石油・天然ガス資源の供給量に関する見解を図11に示す．これによると，石油はまだ280年あるとしている．しかし，オリノコ重油やオイルサンドは，生産するのにコストがかかることから，一部の条件のいい所しか開発されていない．したがって，資源量としてあっても，エネルギーとしての利用は当分見通しが立っていないのが実情である．

アメリカのブッシュ大統領は2006年の一般教書で，「脱石油依存症」を宣言し，エタノール燃料の開発に本腰を入れると述べた．オイルピークが2004年か2030年以降であるかによって，リスクの程度が全く異なってく

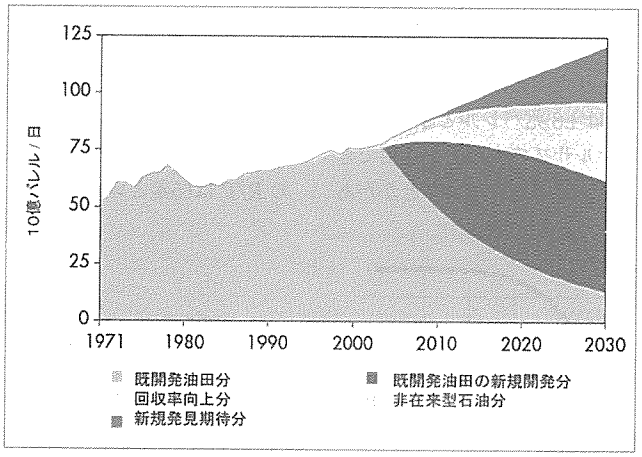


図8　国際エネルギー機関（IEA）による世界の石油需給予測

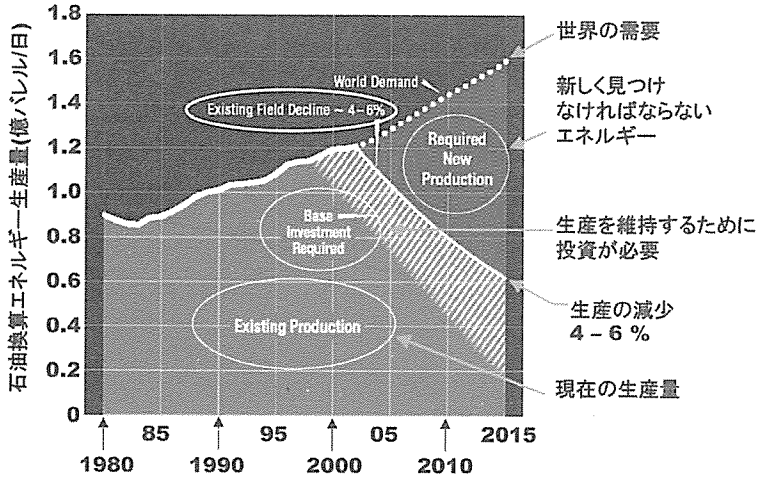
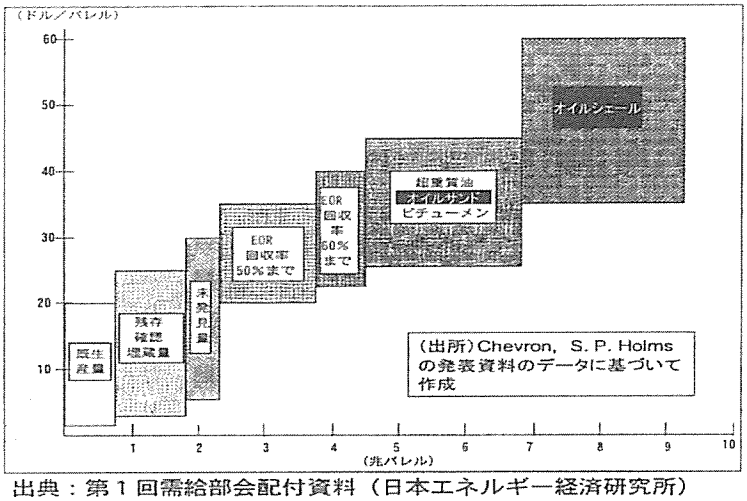


図9　Exxon-Mobilの石油需給予測



出典：第１回需給部会配付資料（日本エネルギー経済研究所）

図10　経産省エネルギー需給部会での石油供給予測

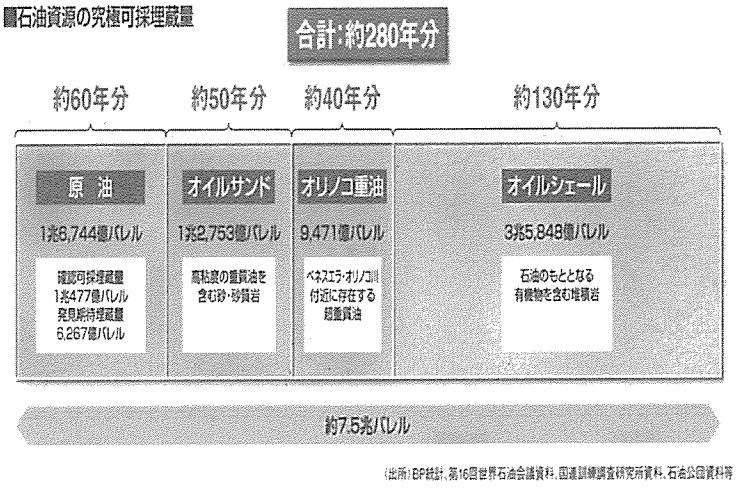


図11　石油連盟の石油供給予測

る．したがって，将来を予測し，SWOT 解析（Strong, Weak, Opportunity, Threat）し，リスクマネジメントを行い，複数のシナリオを用意しなければならない．

3.　物理探査とは

物理探査とは，人工地震を起こしたり，電流を流して地下内部を調べる技術である．その結果，石油や金属資源，あるいは断層があるかどうかということを調べる．アメリカでは石油産業を中心として，大きな資金の投入と豊富な人材がある．物理探査業界から考案された技術として，IC 回路とアレープロセッサーがある．IC 回路は Texas Instrument 社が野外での使用に耐えうる軽くて丈夫な装置に対する要求から考案した．それから，物理探査は大量のデータを扱うことから，それを高速で処理するために IBM が開発した演算装置がアレープロセッサーである．

物理探査技術のうちで石油探査のために一番よく用いられるのは，反射法地震探査である．これは声を出して山彦の返ってくる時間を測り，空気中の音波の伝わる速度を掛けて２で割って距離を測る山彦の原理を地下探査に応用したものである．図12は金華山沖合の日本海溝での反射法地震探査断面である．左側が日本列島，右側が太平洋側である．地震波が出て，海底で反射して返ってくるのにかかる往復時間が10秒だとすると，地震波の水中の伝播速度は 1,500 m/s であるから，そこの水深は 7,500 m になる．図中「A」の反射面は太平洋プレートの日本列島への沈み込みである．図中「B」の反射面が，地殻とマントルとの境界，すなわちモホロビチッチ不連続

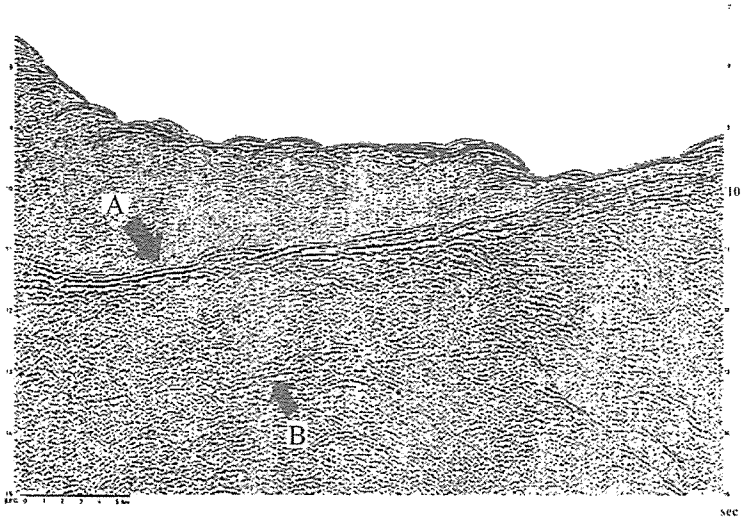


図12　太平洋プレートの日本列島への沈み込み

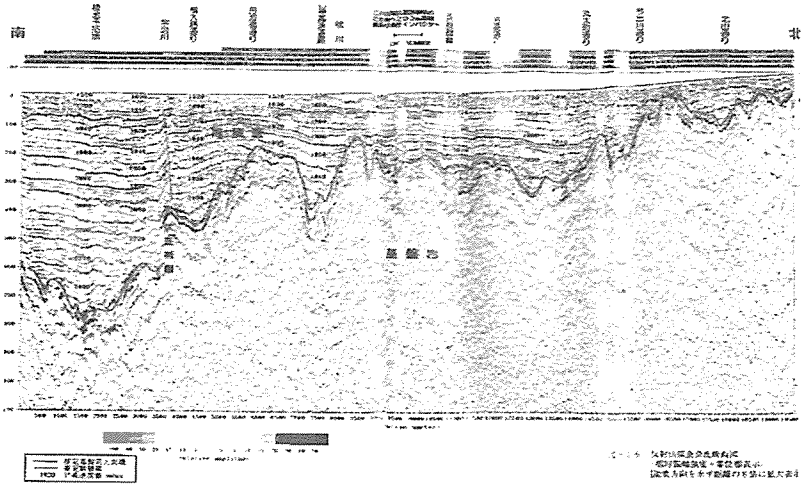


図13　京都市内の地下構造

面である．沈み込み帯の上にあるのが付加帯で太平洋の堆積物が日本列島の下に押し込められている様子が分かる．

図13は，京都市内を北から南にかけて調査した反射断面である．これにより基盤岩の形と，従来認められていなかった断層の存在がわかった．

図14は地下構造の形と，そこにどれ位の地震波の伝播速度をもったものがあるかを示した図面である．油，天然ガスがあると，ない場合に比べて地震波の伝播速度が遅くなる．図中「A」に背斜構造，「B」に正断層がある．泥岩の所でできた油が，砂層を通って移動してきて，「A」にくると，横への移動は砂層が断層で切れてなくなって動けないし，上に移動しようにも速度が速い，固い地層が上に蓋をしていて動けない．そこで，「A」に

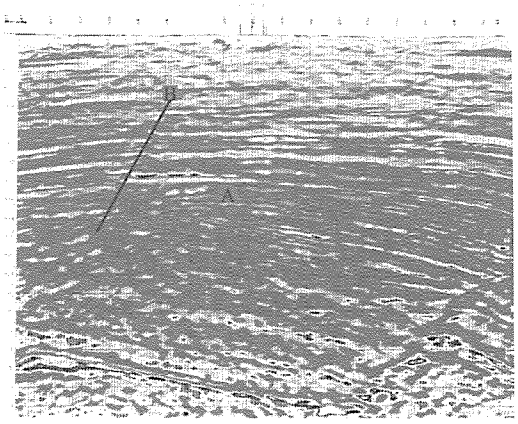


図14　合成音響インピーダンスログ

油，天然ガスが貯まる．実際，そこから大量の天然ガスが発見された．

3.1　3次元調査

地下を詳細に調べるには地下を3次元的に診る必要がある．図15は女性の絵である．これは若い女性とも年をとった方ともどちらにも見える．真実は一つだから，どちらかが間違っていることになる．その間違いはもともと3次元のものを2次元に閉じ込めたことから生じている．図中の「A」を耳とみるか目とみるかによって見方が変ってくる．しかし，回転情報を与えれば，どちらかすぐに判断できる．そのためには3次元調査をする必要がある．

図16はカナダの陸上の3次元地震探査断面で，3次元データを地表に水平なある深度で輪切りにしたものである．2次元だと鉛直断面しかわからないが，3次元調査をすると地下を輪切りにしたスライス断面ができる．この図面により昔，3,000年前の川の流れの様子を知ることができる．川が蛇行していると，湾曲部内側は流速が遅くなり粒が大きくて重い砂が貯まる．したがって，砂の貯まっている所を掘れば油，ガスが見つかる可能性が大きくなる．

図17は2次元調査と3次元調査による地下構造図の比較を示したものである．3次元によると，断層とかが非常に詳細にわかり，複雑な地下構造が正確にわかる．ある日本の会社がベトナム沖で3次元反射法地震探査を行い，その結果30本井戸を掘って27本石油を当てている．

3.2　3次元物理探査船

海上で3次元調査をするには，図18に示す専用の物理探査船が必要である．空気を圧縮して海中に瞬間的に放出して人工地震を起こし，地震計を25～50 m 間隔で100個位つないだケーブルを10～20本位引っ張り，GPSで位置を測りながら時速5ノット位の速度で3次元調査を行う．3次元調査は30年ほど前から世界では通常的に行われている．現在，石油会社は原油価格高騰によって新たに油田を探す探鉱努力に資金を投入しており，海域での物理探査は非常に活況を呈している．

現在，物理探査船はこの数年間で世界で125隻に増加している．CGG社が5から13隻，Fugro社が6から7隻，Veritas社はCGG社に買収されたが，6から7隻，Western Geco社は19から22隻，PGS社は12隻，中国が4隻から12隻，韓国が2隻，インドは1隻から3隻に増加している．一方，日本は1隻も持っていない．現在でも，世界第6位の経済水域を持っている我国に専用の三次元物理探査船がない．2004年に経産省が大臣の復活

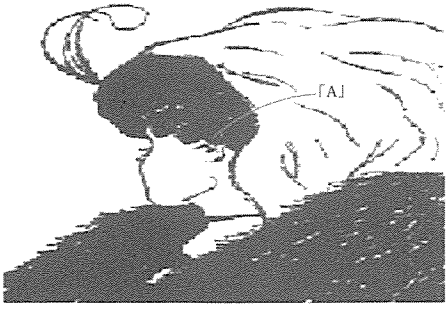


図15　3次元調査の必要性

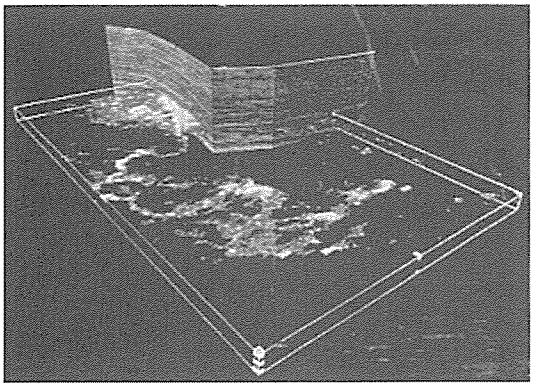
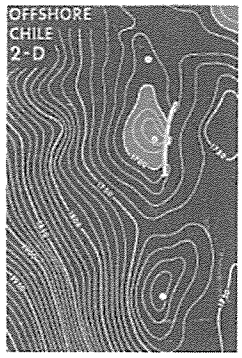
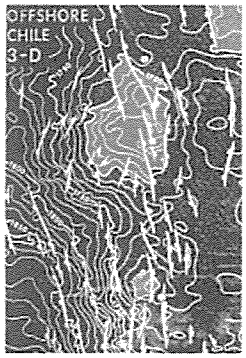


図16　タイムスライス断面



2次元データによる構造図



3次元データによる構造図

図17　2次元と3次元調査による地下構造図の比較



図18　3次元物理探査船

折衝で247億円の建造予算を付け，2007年度の秋にやっと中古船を1隻購入する予定である．

3.3　日本周辺の調査地域

図19に日本の石油・天然ガス田の分布を示す．日本にも小規模ながら日本海側を中心に新潟，山形，秋田県，それと北海道に油・ガス田がある．北海道の新千歳空港の南でかなり大きなガス田が生産している．

図22の断面は，三陸沖での反射法地震探査記録である．2001年，この海域に深度4,000 mまで坑井を掘削した．ガス層が4層あり，テストした2層から23万 m^3/day の石炭起源のガスが発見された．ジュラ紀には現在の日本列島の東側に，もう一つ親潮古陸という大陸があった．二つの大陸間が湖の堆積環境で，ジュラ紀には炭酸ガスが今より約10倍多く，非常に大きな木が多く成長し，それが石炭になった．数千年前に日本海が開いたとき，その大陸が沈み込み，頂部が削られ，現在は水深1,000～2,000 mになっている．今後，常磐沖から三陸沖，勇払，夕張，稚内，サハリンにかけて，昔，湖だった所が石炭起源のガス田として注目される．

図23は岩船沖油・ガス田である．油田の開発にかかる費用は，物理探査に数億円，試掘井を1本掘るのに大体3,000 m位の深度で数十億円である．現在，掘削リグの賃借料が物すごく上がり，3,000～4,000万円/日かかる．この試掘井で油がみつかっても廃坑にし，さらに何本か

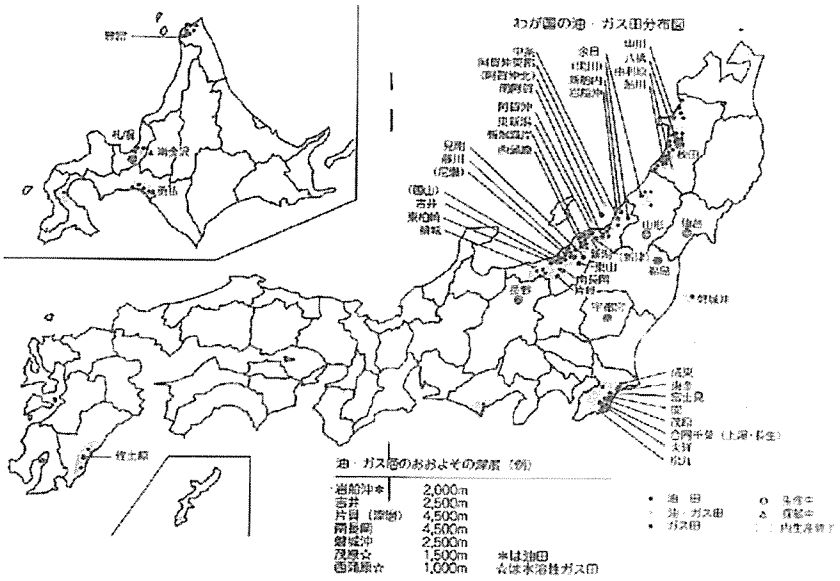


図19　日本の油・ガス田分布図

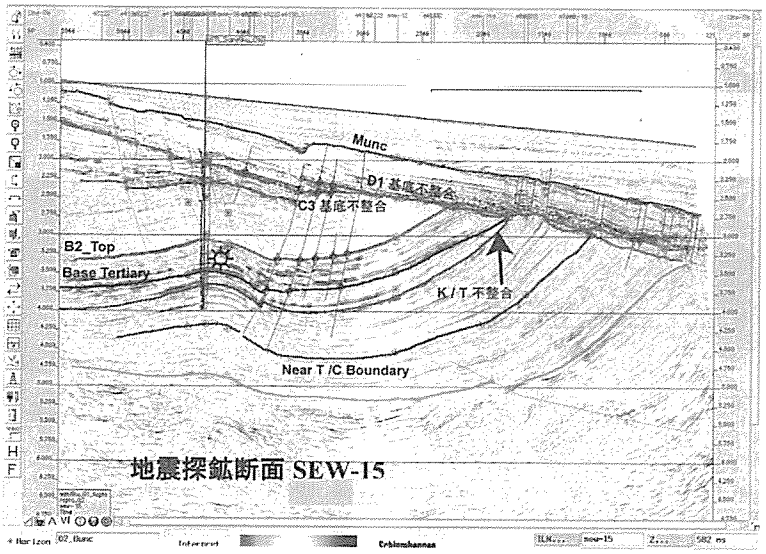


図22　三陸沖の反射法地震探査断面図

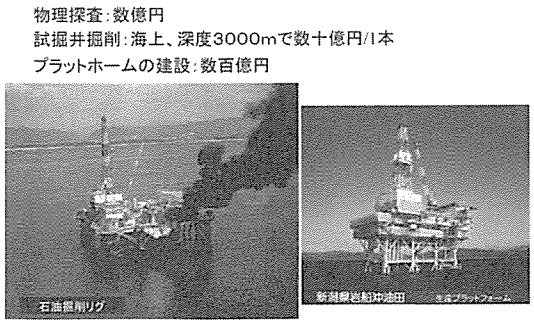


図23　石油開発のための費用

表3　国による基礎調査（昭和42年から平成15年度まで）

基礎試錐		費用（億円）
海上（27坑）		823
陸上（36坑）		706
計（63坑）		1,529
基礎物理探査	**作業量**	**費用（億円）**
海上　2D測線長	117千km	
3D面積	28,770km^2	
小計		317
陸上　2D測線長	3千km	
3D面積	83km^2	
小計		204
合計		
2D測線長	120千km	
3D面積	28,853km^2	521

の試掘井を掘り油田の広がりを調べて一番条件のいい所に生産プラットホームを設置して，そこから生産井を枝掘りして生産する．生産プラットホームの建設に大体数百億円かかる．

3.4　国内石油・天然ガス基礎調査

経産省の事業として国内石油・天然ガス基礎調査がある．昔は層序試錐と称して，石油が出ないかもしれないが，そこに坑井を掘れば探鉱上波及効果が非常にあるという所も掘られていた．国の基礎調査は従来5ヵ年計画で実施していた．しかし，現在は5ヵ年と限定せず，その後の探鉱とか坑井掘削の結果により有望地域ができることから，毎年見直して最も有望な所から実施している．さらに，坑井を掘る前には3次元物理探査を行い，企業も探鉱努力を行うという基本方針で基礎調査を実施している．

表3に既存の基礎調査の作業量とその費用を示す．昭和42年度から平成15年度までに基礎調査として，坑井が海上で27坑，陸上で36坑が掘られている．その費用が1,529億円である．物理探査は一部3次元調査があるが，ほとんど2次元調査である．その費用が521億円である．だから，基礎調査全体で約2,000億円を投資した．図20



図20　基礎試錐の位置

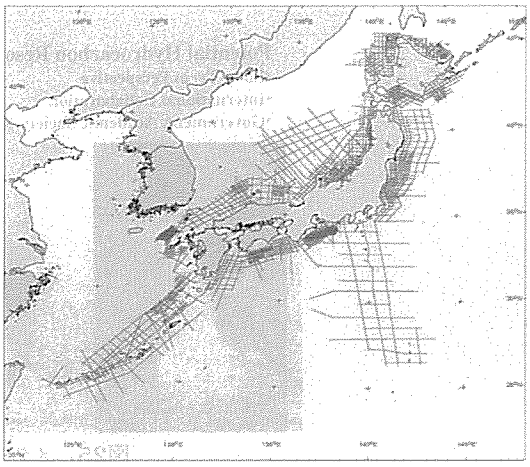


図21　基礎物理探査測線図

に既存の基礎試錐で掘った坑井の位置を示す．図21が海上地震探査の測線図である．これをみると，沖縄周辺はほとんど調査していると思われるが，日本全体が入るスケールを考えると，測線間隔は20～30 km 間隔である．したがって，日本の油田規模の5～10 km からみれば，概査を実施したにすぎない．もっと詳しい調査が必要である．東シナ海は中国が詳細な物理探査をしている．日本も最新の3次元調査物理探査を実施すべきである．

3.5　オイルサンドの開発

図24はオイルサンドの開発の図である．オイルサンドとは，油が移動してきたが，トラップがなくて地表近くに貯まり，揮発性のものは蒸発して重質油成分が溜まったものである．したがって，常温では流動しない．まず，坑井をオイルサンド層に水平に5 m 間隔で2本掘る．

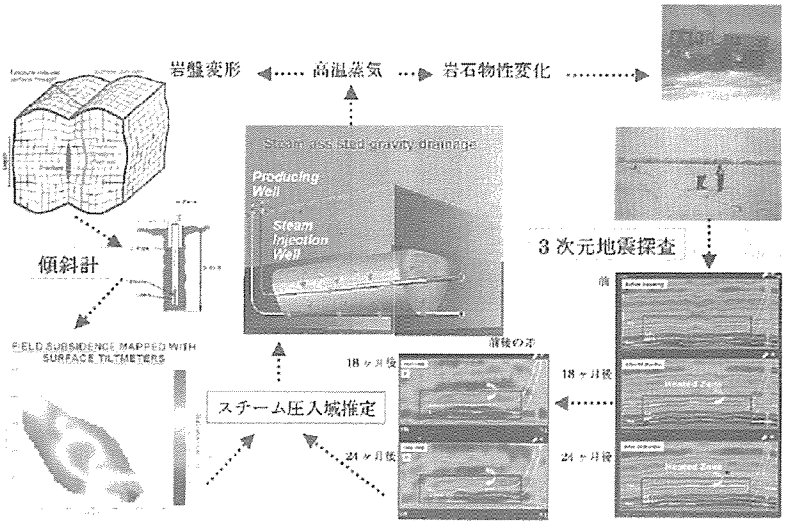


図24　オイルサンドの開発のためのSAGD法

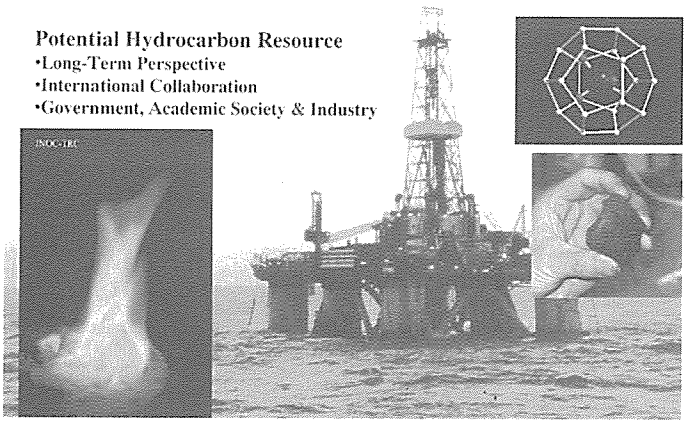


図25　メタンハイドレートの開発

ある程度の深度があると鉄管を水平に曲げて掘ることができる．そこに290℃位の蒸気を2～3年間入れてオイルサンドを溶かし，蒸気の空洞を作る．外側に追いやられた油は温度が低くなり，重くなって下方に落ちてくる．それをもう一方の井戸で回収する．これがSAGD (Steam Assisted Gravity Drainage) という技術である．1990年代になり，水平掘，SAGD，3次元地震探査技術の開発により，カナダのオイルサンド開発が実用化段階に入った．しかし，290℃の蒸気を2～3年も入れることから，自噴してくる油田に比べてコストがかかるが，カナダでは現在生産をしている．

3.6　メタンハイドレートの開発

メタンハイドレートはシャーベット状の水分子の中にメタンガスが入っている．ハイドレート化すると，水1リットルにつき，150リットルほどのメタンガスが閉じ込められる．

図25はメタンハイドレート開発の図である．国内石油・天然ガス基礎調査で，御前崎沖で井戸を深度4,000 mまで掘削し，メタンハイドレートを回収した．しかし，水深2,000～3,000 mの所で何十億円もの資金をかけて井戸を掘り，数mの長さのコアに含まれるメタンガスが採れたとして，EPRは1以下である．したがって，メタンハイドレートを溶かして液体か，気体にしてメタンガスを採り出す技術の開発が必要である．

図26に示すように，メタンハイドレートができるのは，大水深の海域かツンドラ地帯である．海水中の温度が下がって海底面で4℃位になるとする．海底以下では温度が大体100 mにつき5℃位地温が上がる．したがって，メタンハイドレートの安定境界と地温曲線に囲まれた斜線部分がメタンハイドレートが胚胎する所である．海底

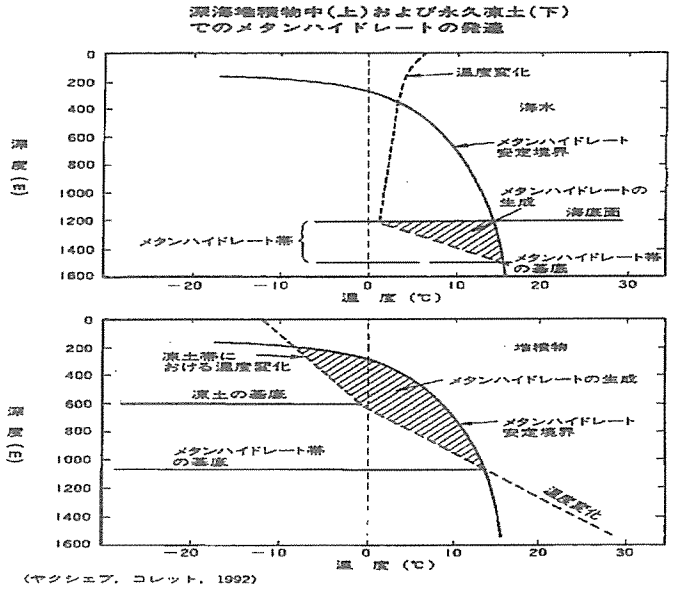


図26　メタンハイドレートの生成条件

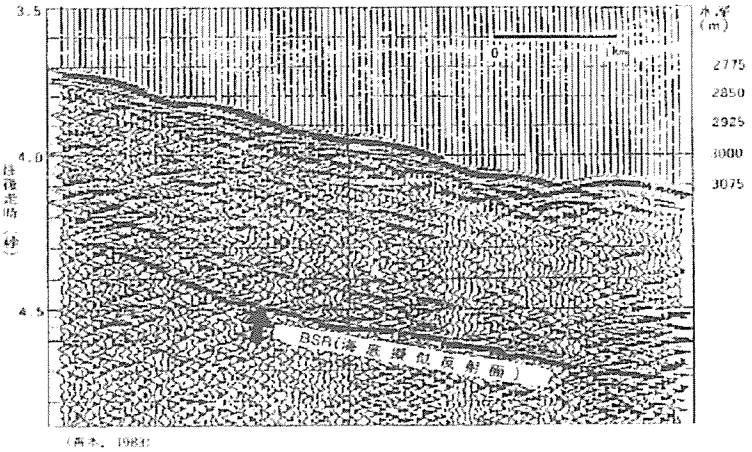


図27　地震探査記録上の BSR

でメタンハイドレートが生成するには，水深が必要になる．温度が大体4℃位だとすると，メタンハイドレートの生成は圧力の関数になることから，反射法地震探査の記録断面上に，図27に示す海底に平行した BSR (Bottom Simulated Reflector) と呼ばれる特異な反射面が出てくる．

BSR がメタンハイドレートの下部からの反射ではないかということで，BSR を日本周辺の海域で探したところ，図28に示す南海トラフトとか，いろいろな所で BSR が見つかった．もし，BSR がメタンハイドレートだとすると，推定埋蔵量は日本の天然ガスの年間消費量の100年分だという説がある．天然ガスが100年分もあるとすれば，エネルギーの供給上大変重要な意味をもってくる．

メタンハイドレートの探鉱を御前崎沖の基礎調査として2次元，3次元の地震探査をやり，32本の坑井を掘削した．その結果，BSR は必ずしもメタンハイドレートの賦存とは一致しないということが明らかになった．したがって，推定埋蔵量は見直すべきである．また，エネルギーとして利用するには EPR を考えなければならない．

4.　大陸棚画定

大陸棚画定について述べる．日本の領土が，うまくすれば戦争をしないで3倍になる可能性がある．国連の海洋法条約があり，日本は1996年7月20日に調印した．

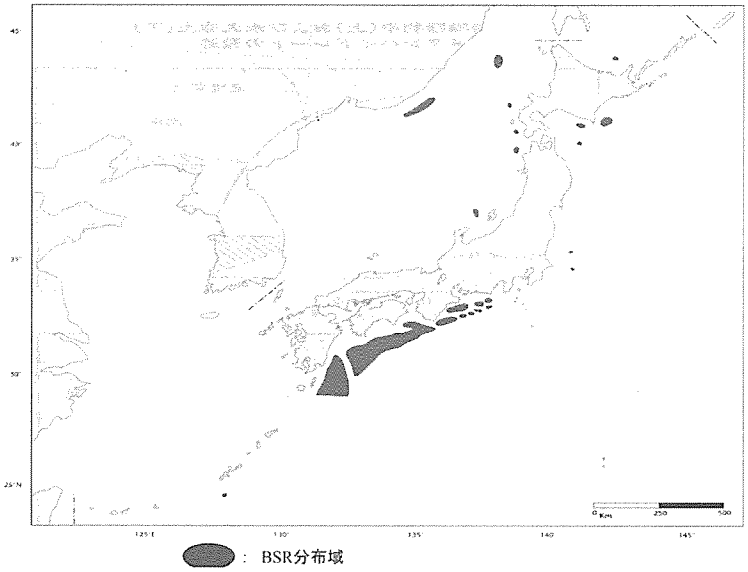


図28　日本周辺の BSR の分布域

7月20日が海の日になったのはこの日に因んでいる．この条約は非常に複雑であり，国連の中に大陸棚限界委員会ができ，科学的・技術的ガイドラインが1999年5月に公布された．この時から10年以内にレポートを出して国連が審査して，大陸棚と認めれば，その国の大陸棚になる．200海里の経済水域の外側に大陸棚が広がる可能性がある．

大陸棚画定のルールとしては，まず通常則として，大陸斜面脚部，すなわち大陸棚斜面の最大傾斜点から60海里，あるいは堆積層の厚さが大陸斜面脚部からの距離の1%になる地点のどちらか遠い方がある．ただし，これには制限則があり，水深2,500 m＋100海里，あるいは，350海里のいずれか遠い方が限界である．通常則が適用できない場合は，陸続きであるということを自ら証明する必要がある．日本は残念ながら堆積層が薄く，水深2,500 m＋100海里は200海里の中にある．だから，日本は大陸斜面脚部＋60海里，あるいは350海里でいくか，陸続きであるということを証明する必要がある．大陸棚の延長が認められない所は，今までどおり200海里である．国連は係争地域，たとえば日韓，日中の大陸棚画定には関与しない．

大陸棚画定のルールを図29に示す．領海が12海里，排他的経済水域（EEZ）は200海里である．大陸棚傾斜の最大変化点＋60海里，あるいは堆積層の厚さが大陸棚斜面からの距離の1%になる点のどちらか遠い方で通常則による大陸棚が決まる．ただし，制限則による350海里，あるいは水深2,500 m＋100海里のどちらか遠い方ということで大陸棚が画定する．大陸棚とEEZの違いは，EEZは海水面以下が含まれるのに対し，大陸棚は海底から下ということになる．

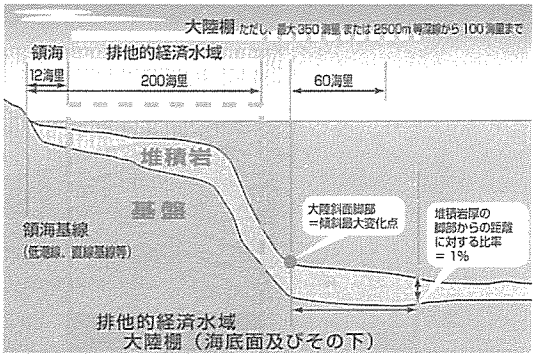


図29　海洋法条約による大陸棚の定義

それを例を用いて説明したのが図30である．太い点線と200海里の経済水域との間が新たに大陸棚として認められると，200海里のEEZから外側の部分だけ領土が増えることになる．

図31に示すように，日本の大陸棚拡大の可能性のある所は日本の領土の2倍位ある．したがって，戦争をしないで領土が3倍になる．そのためには日本はプレートの沈み込帯であるから，陸続きであるということを証明するために十分なシナリオが必要である．例えば，九州パラオ海嶺が九州とつながっているかを調べなければならない．中国は沖ノ鳥島は島ではなく岩だといっている．たとえ，島であっても灯台があるだけでは駄目で，何らかの経済行為が伴っていなければ認められない．内閣府の中に現在対策室ができて調査を実施しているので，国連の審査を通ることが期待される．

図32は日中・日韓中間線の油・ガス田である．日本側

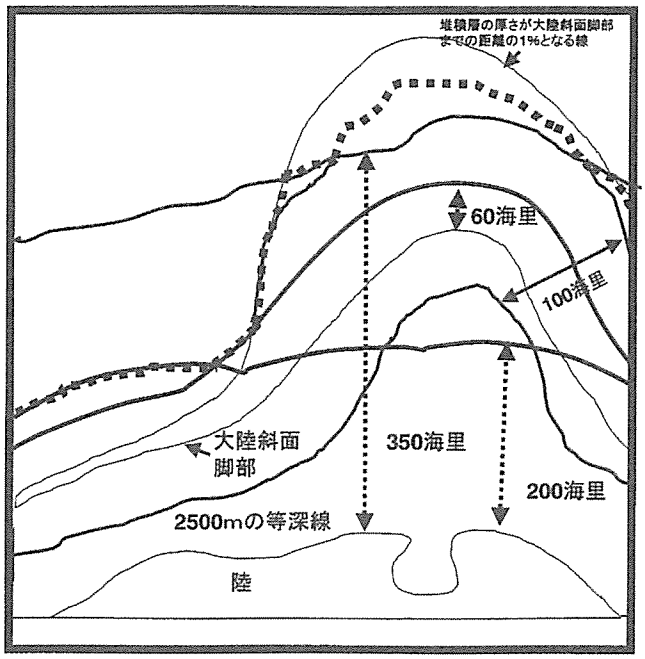
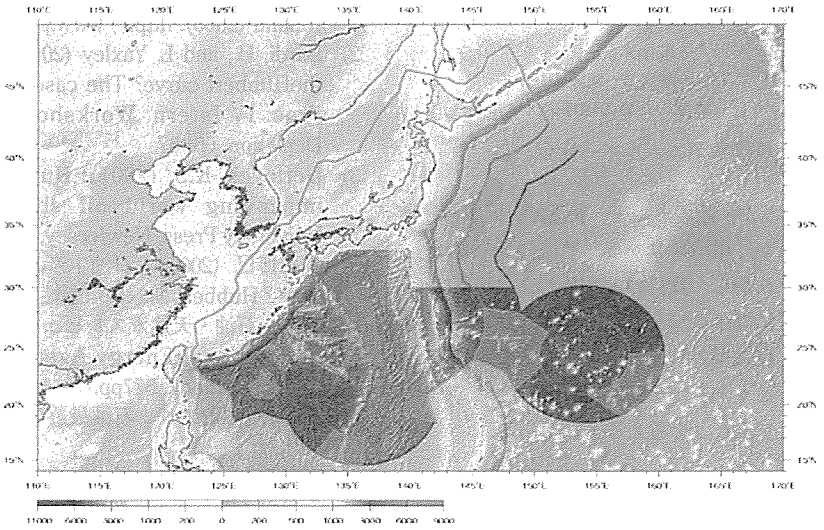


図30　平面図による大陸棚の定義



拡大域面積 総計 約65万km²　国土面積の約1.7倍

図31　日本周辺の大陸棚拡大期待域

は境界線は日中の中間線といっているが，中国は沖縄トラフまでが中国だといっている．春暁ガス田，日本名は白樺であるが，これは中間線から西側に5km位しか離れていない．地下構造を十分調べて議論する必要がある．ストローで吸い取られるという表現があるが，そんな簡単なものではない．断層が1本あれば，別の構造になる場合があることから，十分調査して交渉しないと駄目である．春暁ガス田からパイプラインを既に生産している平湖ガス田まで引いて，いつでも生産しているという話もある．

5.　地域調和・地方分権型社会の構築

現在，日本のエネルギーの自給率は15%を切り，食料自給率が40%をきっている．石油に支えられた文明には翳りがみられる現在，石油依存症を脱却したエネルギーと食料の自給自足を目指した地域調和・地方分散型社会の構築が必要である．図33に示すように自然エネルギーの利用を考えるべきである．自然エネルギーは広く

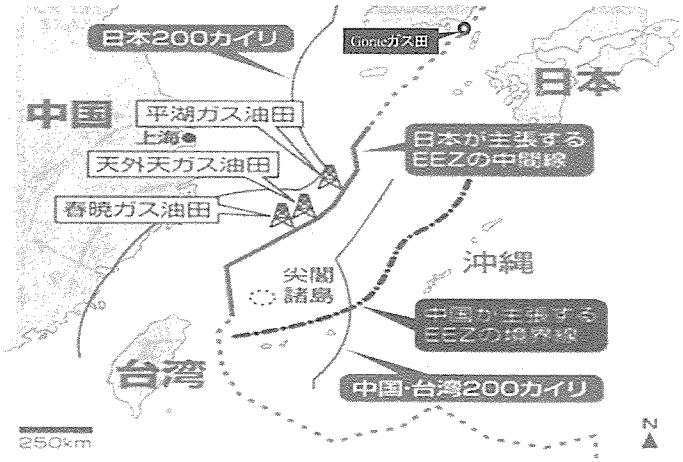


図32 日中・日韓中間線付近の油・ガス田

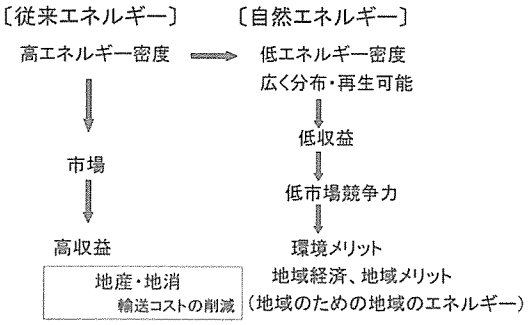


図33 地域調和型エネルギー社会

分布，再生可能であるが，低エネルギー密度で，低収益，低市場競争力であるが，環境メリット，地域経済や地域メリットがある．それから，食料の地産地消をする必要がある．日本は輸送にコストがかかりすぎる．今後，石油が高く乏しくなり在来型の輸送ルートが使えなくなった時に食料の輸送をどうするかが問題である．地域で作った物をそこで消費することを考えるべきである．

6. おわりに

現代社会は，電力，工業化学，農業，漁業，運輸等の産業のあらゆる分野において石油に依存している．まさに，石油依存症である．この頼りとする石油は化石エネルギーであり有限である．したがって，石油に依存している各分野において，脱石油の対策を練らなければならない．インフラの整備は一朝一夕にはできなく，20～30年の長期間が必要になってくる．日本も国家戦略としてエネルギーの基本戦略を策定しなければならない．要するに，日本の目指す方向はアメリカ型なのか，EU型なのか，キューバあるいはブラジル型なのか，はたまた日本独自の道を模索するのか今から考えなければならない．今，我々が準備を行えば，持続型社会への移行は比較的ほんだ円滑に，かつ効果的に行えるが，エネルギー政策の変更を強制されるまで放置すれば，移行には経済的に大きな費用を必要とし，破滅的なものになるであろう．

参考文献

1) Association for the Study of Peak Oil and Gas, Ireland (2006): http://www.peakoil.ie/peakoil.
2) Bardi, U., and L. Yaxley (2005): How general is theHubbert curve? The case of fisheries, Proc. Proc. IV Intern. Workshop on Oil and Gas Depletion, 66-67.
3) Deffeyes, K.S. (2001): Hubbert's Peak: The impending world oil shortage, Priceton University Press, NewJersey, 208pp.
4) 本田博巳（2005）：石油生産ピークは今年中に来るか？Hubbert 曲線の信憑性と探鉱開発技術者の役割，石油・天然ガスレビュー，39 (4)，67-77.
5) International Energy Agency (2004): World Energy Outlook, 577pp.
6) 石井吉徳（2004）：石油最終争奪戦，日刊工業新聞社.
7) 本村眞澄（2004）：ピークオイルは近づきつつあるのか？，石油・天然ガスレビュー，28 (11), 1-7.
8) 芦田 譲（2004）：海洋における物理探査技術動向，海洋調査協会報，77, 9-17.
9) 芦田 譲（2005）：大陸棚画定のために必要な調査ならびに今後への提言，学術の動向，第10巻，第2号，42-46.
10) 芦田 譲（2005）：日本列島をめぐる領土と資源エネルギー，エネルギー総合工学研究所，第28巻，第1号，48-57.
11) Yuzuru Ashida and Hitoshi Mikada (2006): Recognition of oil peak in Japan, Proc. 8th SEGJ Int. Symp.,13-15.
12) 芦田 譲（2007）：石油・天然ガスの資源評価，エネルギー・資源，Vol. 28, No. 1, 25-28.

退職記念講演

金属から見たヒトと自然

田　邊　晃　生*

Humans and the Nature in Terms of Metals

by Teruo TANABE

はじめに

金属を生産し，金属を利用し，あるいは金属を研究している者にとって，金属は鉱床として，製品として，材料として，すでに身近に存在していることが前提であり，それを当然のこととして受けとっている．そしてこのような文明を享受しているわれわれが，それがなぜ可能なのかといった疑問を発することはほとんど見られない．そこで人類とその文明が生まれ「発展」した過程を金属という切り口で振り返り，その根源にまで立ち戻ってみようと考えたのである．

われわれは宇宙論の成果としてビッグバン理論が有力な考えであることを知っている．しかしその理論によれば，宇宙開闢（びゃく）後に物質の代表としての原子が生まれたが，それは水素やヘリウムがほとんどを占め，金属元素が生成することはなかったのである．金属元素は巨大な星が最期を迎える時，すなわち超新星爆発において初めて合成されることが明らかにされた．超新星爆発は2002年のノーベル物理学賞を受賞した小柴らの仕事と深いつながりがある．さらに敷衍すると，われわれ人類は金属を用いて文明を築き上げているのであるが，今のレベルの能力で金属を地中から掘り出すことができるのは，地球のダイナミクス，すなわち地球内部と表面の大規模な動きが大きな役割を果たしていることも，知っておく必要があるだろう．

一方，われわれ自身を見つめ直してみると，生命の誕生は地球という希有な存在が前提となっていることに気づかされるのである．生命の基となっている物質は星間物質として宇宙のあらゆるところで見つかっているが，それが組み合わされて生命活動が実現するためには適切な環境が必要であり，また金属元素が不可欠の存在となっていることにも驚かされるところである．

このようにして，金属が元素として，鉱床として，材料として，製品として世の中に生まれ，さらにそれらを認識し，理解し，利用する知的生命体の内部にも金属が存在しているという点に思いをはせる必要がある．そしてそのヒトが驕り高ぶったとき，自然からの「逆襲」として公害・自然破壊・健康被害が生じていることにも目を向けなければならない．本稿では，そのような思いで宇宙・地球・人間と文明との関係を金属という面から簡単に見つめてみることとした．

1.　金属元素の創成

1.1　真空のゆらぎが宇宙を生む

宇宙の誕生については多くの物理学者たちが研究してきたが，現在の宇宙論の到達した結論によると，約137億年前には宇宙のすべての物質はきわめて限られた「空間」内に閉じこめられおり，超高温・超高密度の輻射（放射）の集まりだったと考えられている．それが急速に膨張して温度と密度が低下し，宇宙の冷却過程で水素やヘリウムの原子核が生成したものと推察されている．この宇宙論はハッブルによる銀河の観測結果が大きな転換のきっかけになったことはよく知られている．ハッブルは多くの銀河を精密に観測する中で，遠方の銀河ほどそのスペクトルが赤方偏移し，しかも赤方偏移（銀河の後退速度）の大きさが銀河までの距離に比例していることを見出した．これは現在の宇宙がどんどん膨張していることを示しており，逆に時間を遡れば，この宇宙は一点に集まってしまうことになる．それを理論的に説明するために出されたのがガモフの「火の玉宇宙論」（ビッグバン理論）である．

では，なぜ宇宙は火の玉から出発したのだろうか．そ

*元　工学研究科材料工学専攻

の疑問に対しては，誕生した宇宙は真空自身がもっているエネルギーによって急激な「インフレーション」が始まったとする理論が有力視されている．その考えによると，宇宙は時間・空間が定義できない真空状態にあったが，量子力学的ゆらぎによって現在の宇宙の「核（種）」が生まれたという．その後でインフレーションという現象が起こり，このインフレーションの最中に真空のエネルギーが熱（放射）のエネルギーに変わって，高温高密度のビッグバン状態になった，というのである．ビッグバン説を唱えたガモフは，冷却中に自由電子が核にとらえられて原子が生成すると，輻射（光子）が自由に運動し出す（「宇宙の晴れ上がり」と称する）ので，その頃の輻射の名残りが観察されるはずであると予言していた．そしてその証拠となる宇宙背景放射と言われるものが，ペンジャスとウィルソンによって発見された．それは，赤方に大きく引き延ばされた2.7 Kの黒体放射スペクトルとみごとに一致していたのである．

一方，それは宇宙のあらゆる方向にあまりにも均質でありすぎるという疑問が指摘された．というのは，宇宙の温度が低下してさまざまな物質や銀河が生まれる事実，銀河の不均質な分布を示す宇宙の大構造（グレートウォール，泡構造）などの発見，このようなことは宇宙初期の均質な放射分布からは説明できないからである．それらの疑問に答えるため，宇宙探査衛星COBEが1989年に打ち上げられ，全天にわたって10万分の1程度の極めてわずかな温度のゆらぎを測定した．さらに2001年には，WMAP衛星によってより精密な測定がなされ，100万分の1の精度で温度ゆらぎの分布が得られたのである．これらの測定によってインフレーション理論の予測する密度ゆらぎの大きさなどが再現できたと言われている．また詳細な解析から，宇宙の年齢が137±2億年であることが明らかにされたのである．

1.2 金属元素は超新星爆発で生まれる

元素の存在度：地球上にはさまざまな隕石が降っている．永年にわたって調べられた結果，隕石はその組成や形態によってさまざまな分類がなされてきた．その一種であるC1型炭素質コンドライトは，いわゆる非揮発性元素の存在量が太陽大気のそれときわめて類似していることから，太陽系の始源的固相物質と見なされている．この結果をもとに，主要元素は太陽大気から，微量元素はコンドライトの分析値からとり，Siを仲立ちにして（Siの原子数を10^6として）統一したものが，いわゆる宇宙の元素存在度である（図1参照）．この図から見られる一般的な特徴として，次のような点が挙げられる．(1) 原子番号の小さい元素は一般に多く存在し，大まかには質量数の減少関数となっている．水素単独で93.4%，水素とヘリウムの2元素で99.9%を占めている．(2)

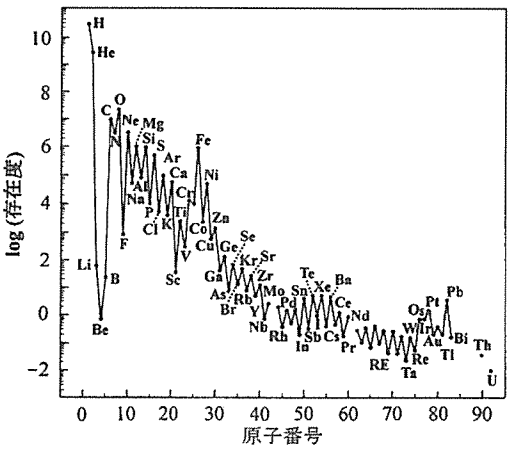


図1 元素の原子番号と宇宙存在度の関係

Feを中心とする元素が，その前後の質量数をもつ元素に比べ100～1000倍も豊富に存在している．(3) Li, Be, Bは軽い元素にもかかわらず，その前後の質量数をもつHe, C, N, Oに比べて極端に少ない．(4) 原子番号が偶数の元素は隣接する奇数の原子番号の元素よりも存在度が大きい（Odd-Harkinsの規則）．

元素の起源：それでは，これらの元素はどのようにして生まれてきたのか．元素の起源に関しては，1957年に提出されたB_2FH（4名の名前の頭文字）理論があり，それは星の進化の各段階における多様な核反応によって全核種の存在度を説明しようとするものである．太陽程度の質量（2×10^{30}kg）あるいはそれより大きな質量の星では，重力による収縮で星の温度は上昇する．中心温度が10^7K程度になると，もっとも多い水素同士の相互作用によって少量のHeが生成され

$$4{}^1_1\mathrm{H}\rightarrow{}^4_2\mathrm{He}+2e^- \quad \text{(p-p連鎖反応)}$$

その際に放出されるエネルギーによって中心温度がさらに上昇する．太陽よりも大きな質量をもつ星では，「Betheサイクル」などによって中心温度が10^8Kに達し，そうなるとHe原子同士の相互作用によってC, O, Ne, Mg, Si, S, Ar, Ca, Tiなどが生成する（He-燃焼プロセス，α-プロセス）．さらに中心温度が上がると，少量の中性子が発生して，すでに生成している核種に中性子付加反応（s-プロセス）が起こり，Kなどはこの段階で生成される．中心温度が10^{10}K程度になると，あらゆる種類の核反応が平衡状態になり（e-プロセス），原子核として最も安定なFeが合成され，不安定な原子核は分解する．

超新星爆発：このような段階では，星は急激に収縮（重力崩壊）し，その後に大爆発が起こるが，これを超新星爆発と称する．現在その残骸として確認されている

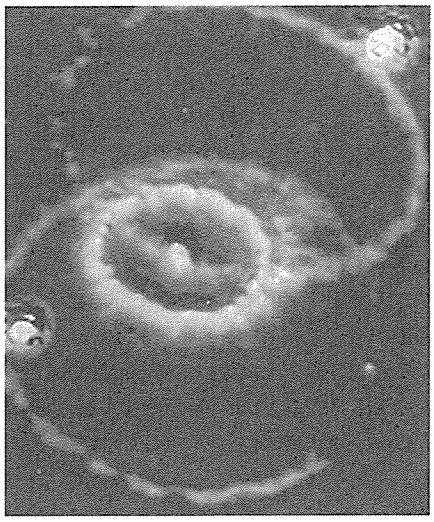


図2　大マゼラン星超新星 SN1987A (NASA)

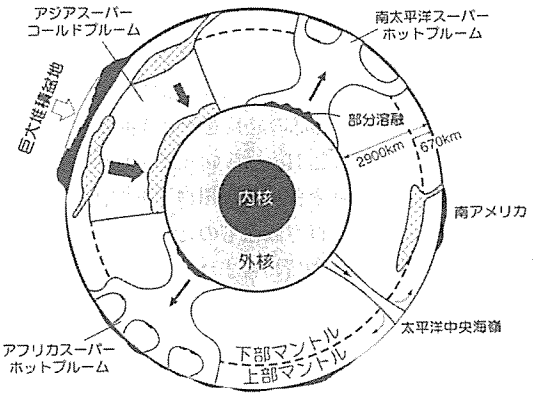


図3　地球内部の大規模な上昇流と下降流
（丸山・磯崎「生命と地球の歴史」岩波，p41）

ものが200個ほどある．歴史的に有名なものとしては藤原定家が『名月記』(1054年）の中で紹介したもので，現在「かに星雲」がその残骸として残っている．また16世紀にはデンマークの天文学者ティコ·ブラーエが記録しており，カシオペア座にある．金星よりも明るく輝き昼間でも観察できたため，当時の人々を驚かせたようである．最近では1978年に観測された大マゼラン星雲の超新星爆発 SN1987A がある．この星雲は地球から約17万光年のところにある．南半球からでないと観測できないが，そのときの明るさは太陽の1億倍にもなったという．しかし何と言っても特筆すべき出来事は，そのとき発生したニュートリノについて，小柴らが岐阜県の神岡鉱山に設置した施設「カミオカンデ」で観測したことであろう．この成功がノーベル賞受賞につながったとされている．太陽からのニュートリノを観測すべく観測精度を改善する工事が完了した2ヶ月後に，17万年余の旅を終えたニュートリノの来襲があったのであるから，まさに絶妙のタイミングであったと言えよう．

2.　金属鉱床の形成

2.1　いつ地球は生まれたのか

地球がほぼ現在のような形になったのはいつ頃か．イギリスのケルビン卿は，地面を掘っていくと深さとともに温度が上昇する現象をとらえ，当時の最新理論であったフーリエの伝熱理論に基づいた冷却速度の計算から，地球の年齢として2000万～4000万年という見積もりを出した．これはあまりにも短かすぎる結果であるが，地球には放射性同位体があって，それが壊変することで発熱していることが考慮されていなかったのである．現在では，この放射性物質の壊変速度が温度や圧力によらず一定であるという現象を利用して，地球の年齢が約45.6億年であると推定されている．

2.2　地球内部の構造と運動

いわゆる京都学派の理論によれば，原始太陽の赤道面周辺に集積したガス成分や微粒子の不均一分布から，まず微惑星と言われるものが成長する．その後，微惑星の集積によって原始地球が月よりも大きなサイズになる頃には，天体の衝突によって発生する熱量が外の空間に放出されるエネルギーよりも大きくなる．そのため表面の温度は徐々に高くなって，地球はマグマの海で覆われることになった，というシナリオである．

この間に，含有されていた揮発性の物質（H, He, N, O, Cl など）は原始大気を作り，鉄などの重い金属成分は中心部に向かって沈んでコアが誕生する．相対的に軽い岩石類は表面に向かって上昇し，地球の大部分を占めるマントルとなった，と考えられている．熱いガスがゆっくり冷えるという化学平衡論を適用した凝集理論によると，次のような段階を経て固相が生成することが分かってきた．まず Os, W, Zr, Re などの高融点金属が凝集し，次いでコランダム Al_2O_3 が生成する．そして温度が下がると，Ca と Ti が $CaTiO_3$（ペロブスカイト）や $Ca_2Al_2SiO_7$（ゲーレナイト）として凝縮し，その後 $MgAl_2O_4$（スピネル）や $CaAl_2Si_2O_8$（アノーサイト）などが生成する．星雲の温度が1400 K 以下になると Fe-Ni 合金がまず凝縮し，ついで Mg_2SiO_4（カンラン石），$MgSiO_3$（輝石）や $NaAlSi_3O_7$（アルカリ斜長石）が形成される．この1400～1000 K の温度範囲で凝縮する物質が隕石や惑星の主要な構成物質となる．

2.3　「水の惑星」が形成される

太陽系において木星より外側にある惑星の大気は主と

して水素とヘリウムであり，地球型惑星（水星～火星）の大気とはかなり異なっている．この地球型惑星の大気がどのようにして形成されたかは，希ガスが重要な手がかりを与えてくれる．すなわち，現在の大気中の希ガスは太陽系の平均組成に比べて何桁も少なくなっている事実である．そこで，地球の成長過程で捕捉された（一次）大気は主として H_2 と He から成っていたが，太陽からの紫外線による励起と強い太陽風によって，この原始大気はほとんど吹き飛ばされたものと考えられた．そして，固体として集積した物質に含まれていたものが地球の形成後に内部から出てきて，それが現在の大気を構成している，というのである．

マグマの海が主としてかんらん石の溶融体であると仮定して熱力学的な検討を行うと，溶融マグマから鉱物の結晶が析出し始める時期に，それと平衡にある大気の成分は定性的には次のような量的関係にある．

$$H_2O > CO_2 > HCl > SO_2 \sim N_2 > H_2 > CO$$

マグマの海が固化した後は，この大気組成はほぼ固定されるが，水素は地球の重力では1万年以内に散逸してしまう．地球が水の臨界温度 647 K 以下に冷えると，水蒸気が凝縮して熱い原始海洋が形成される．水惑星の成立である．直ちに HCl は溶解して希塩酸の海洋が形成されたはずで，塩酸成分は岩石と反応して短時間で中和される．中和された海水は NaCl が主成分となり，温度低下とともに SO_2 や CO_2 の溶解度は増大して岩石と相互作用するため，大気の成分としては N_2 が主体となる．そして西オーストラリアやグリーンランドのイスア地方で見つかっている鉱物や岩石の解析から，少なくとも38億年前，地球形成の8億年後には海洋が存在していたことがわかっている．

2.4 金属鉱床の形成

以上述べてきたように，地球の内部構造が決まり表面には大気と海水が形成されたが，さまざまな留まることのない運動によって，地殻中にはある特定の元素や鉱物が，平均的な岩石と比べて著しく濃集している場所が形成されるようになった．そのうち特に経済的に利用価値のあるものを鉱床と呼び，その鉱床を構成する有用鉱物の集合体を鉱石と称する．

マグマの活動：上部マントルか下部地殻において部分的に溶融が進んでマグマが発生する．マグマはほとんどあらゆる金属元素を含んでいるので，温度が下がるとさまざまな鉱物が晶出する．結晶分化の初期には Mg や Fe に富むケイ酸塩鉱物（かんらん岩や輝石），あるいは酸化物（スピネル）が出てくるが，この時 Cr や Ni が選択的に取り込まれ，マグマ溜まりの底に集積して鉱床となる．マグマ中には硫黄分もある．そして溶融硫化物がケイ酸塩から分離し，その間に Ni, Cu, Co あるいは白金族元素が硫化物中に濃縮することが実験的にも確認されている．カナダのサドベリには，このような形で Ni や Cu を含有した硫化物鉱床が存在している．

プレート運動と熱水作用：マグマの結晶分化作用が進むと，アルカリ金属や（軽）希土類元素のように鉱物相に入りにくい元素は残存メルト中に濃縮され，また Ag, Zn, Pb 等もメルト中に濃化し，流体中に溶解した金属元素は H_2S などの作用で最終的には硫化物として沈殿する．このようにして形成される熱水鉱床は，プレートテクトニクス理論によって理解されている．深海底の海嶺では高温の熱水が噴き出しており，そこには閃亜鉛鉱，黄鉄鉱，黄銅鉱などが沈積しているのが観察されている（図4）．南北アメリカ大陸の西海岸沿いのプレート沈み

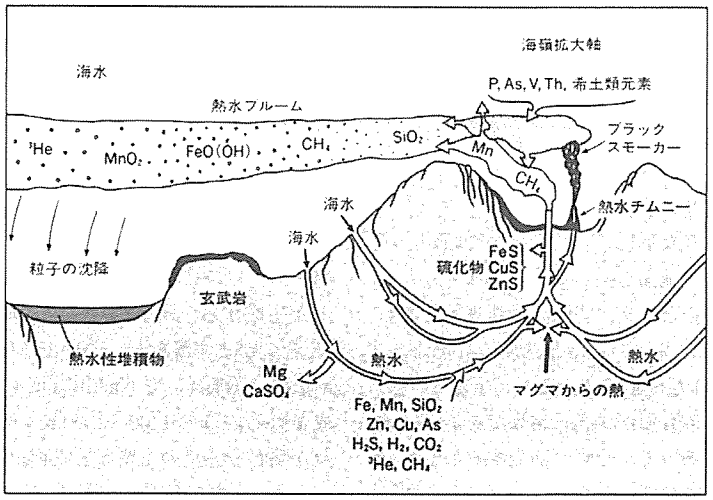


図4 熱水噴出活動（蒲生俊敬，科学，Vol.66(1996),p485）

込み帯に分布する斑岩銅鉱床，あるいは日本の第3紀層（1300万年ほど前）中に形成された硫化物である黒鉱の鉱床（たとえば小坂・内ノ岱鉱床）も，海底の熱水活動によって形成されたものである．

堆積ー酸化還元作用：堆積作用に伴って金属元素が濃化する場合には，大規模な鉱床のできることが多い．世界各地の先カンブリア時代の地層には，チャート（放散虫といわれる動物性プランクトンの殻，SiO_2を主成分とする微細粒子の堆積物）の薄層と鉄鉱物の薄層が交互に積層した縞状鉄鉱床が広く分布している．この時代になぜ鉄の酸化物が多量に沈殿したかは，地球の大気の変化・生物の進化を考えるうえでも重要なカギとなる．

風化作用で濃集：ボーキサイトの鉱床やラテライト鉱床は，風化作用によって他の元素が溶脱して濃化した例である．また硫化物として濃集していた銅が風化作用によって水溶液中に溶解し，Cu_2SやCuSとして再沈殿して濃集化することがある．このような2次富化帯の鉱床としてチリのチュキカマタ鉱床が挙げられる．

3. ヒトの誕生

かつて人類最初の宇宙飛行士となった旧ソ連のガガーリンは「地球は青かった」との名言を残した．また最近では，インターネットを通じて星や惑星の鮮明な画像を簡単に入手することができるようになった．確かに地球は青い星であるという意味で，地球というものの際だった存在が改めて認識させられる．地球表面の3分の2は海水で覆われ，その平均深度は3800 mであると計算されている．また地球上の水は97%が海水で，氷は2%余り，そのうち80%が南極に存在している．金星や火星と比較して，地球はその大きさと適切な太陽からの距離によって，幸運にも「水の惑星」になったと言えよう．

3.1 生命の起源ー物質進化の飛躍

ダーウィンは進化論を確立することによって生物の進化を神の手から解放し，また1864年にパスツールは独創的な「白鳥の首のフラスコ」実験によって，先行する親なしには生物が自然発生することがないことを明らかにした．自然発生説が否定されると，次には原始地球上での生命の起源の課題が現れることになる．

この問題を考えるに当たって，われわれは生物も地球も宇宙の産物であることを確認しておくことが大切である．すでに述べように，希ガスを除くと元素の存在度の順序はH>O>C>Nとなる．われわれ生体を構成している元素も，生体の大部分が水，タンパク質，脂肪であることを反映してH>O>C>Nという順序になっている．つまり，定性的には生体は宇宙に多く存在する“軽い”元素を利用して作られていることが分かる．主要元素のHとOが結合した水分子は宇宙にもっとも多く存在する分子であって，その結合性からイオン結合や水素結合が活躍する場を与えるものである．一方，炭素はその電子構造から共有結合が主役を担い，何百万という多彩な炭素化合物を生み出す能力を有し，生体を構成する有機化合物の中心元素である．

3.2 化学進化と生物進化

生命誕生の謎を解明しようとする研究の先鞭をつけたのがオパーリンである．地球上の生命の誕生に先立って，まずさまざまな有機化合物が生成し，それらの化学物質の進化によってさらに高次の機能をもつ高分子化学物質，生命といわれる高度の機能をもつ物質系，原始生命が誕生したと考えたのである．

明確な物質進化の立場からアミノ酸の生成を確認したのはユーリとミラーの実験（1953年）が最初であろう．かれらは地球大気が還元性の雰囲気であると考え，CH_4-H_2O-NH_3-H_2からなる混合気体に火花放電を行った．その結果，グルタミン酸などの必須アミノ酸が合成されていたのである．その後もう少し酸化性の混合ガスで実験も行われ，その場合でも各種アミノ酸が検出され，原始大気の中で有機物が比較的容易に合成されたであろうと推察される．

しかしながら，それにしてもアミノ酸合成のレベルと，タンパク質や核酸の生成，あるいは複雑精緻な機能を有する細胞・生物の誕生との間には，未だ越えがたい壁が横たわっている．江上不二夫らの研究グループは，(1) 化学進化は原始海洋中で行われた，(2) 海水中の遷移金属イオンが触媒作用を果たした，(3) 濃度の高いものが金属酵素に取り込まれた，という前提のもとに，Zn, Mo, Fe, Cu, Co, Mnなどの金属イオンを通常の海水よりも多量に（10^3〜10^5倍）含む水溶液（「修飾海水」と称する）を準備し，各種アミノ酸との混合液を加熱した．すると分子量が数千ないし数万の重合体が生成し，微小な球状のものも見られた．またリン脂質とヌクレオシドを連結させた複合体を合成し，核酸類似のらせん構造体が形成されるのを観察している．

3.3 細胞の時代

最初の生物は，化学進化で生成した有機化合物を食糧として生きていたバクテリアだったと考えられている．その後，水と炭酸ガスから太陽光のエネルギーを受けて光合成できる生物が出現した．その中には酸素を放出するもの（シアノバクテリアなど）があって，地球環境を大きく変えてしまうことになった．しかし中には呼吸によって酸素を取り入れ，効率よくエネルギーを獲得する生物も生まれてきたのである．そして大気中の酸素が増大して地球大気の上層にオゾン層ができたため，有害な紫外線を遮断して生物が陸上で棲めるようになった．ま

ず植物が上陸し，ついでそれに依存する草食動物が陸に上がっていった，というシナリオが描かれている．

多細胞生物の出現：DNAが核膜で保護された細胞をもつ真核生物は，約15～10億年前に出現したと考えられている．真核生物の出現から数億年経って多細胞生物が生まれた．地質年代でカンブリア紀の前は「先カンブリア紀」と一括されているが，それはカンブリア紀，約6億年前になって，多様な生物が爆発的な速度で登場するのが見られるからである．それまで50種程度だったものが，カンブリア紀には8000種以上の生物種が見られ，まさに爆発的な増加である．

種の絶滅と進化：緑藻や三葉虫などが海の中で繁栄した「古生代」，裸子植物と爬虫類の栄えた「中生代」，被子植物とほ乳類の時代といわれる「新生代」，というような変遷を経て，現在では数百万あるいは数千万種の生物が地球上に共存していると言われている．それぞれの地質年代の区切りには，生物群の大量絶滅があった．古生代から中生代に変わるペルム紀末，約2億5千万年前に海洋生物の「科」の大半が消えた．当時の海洋が極端な酸素欠乏状態に陥ったことが，チャート層の地質解析によって明らかにされている．また中生代と新生代の境界，6500万年前の白亜紀末は，1億数千万年のあいだ地球上を支配した恐竜と，永年にわたって繁栄を続けてきたアンモナイトなどが絶滅したことで知られている．地層の境界付近で高濃度のIrやOsが検出され，小さな天体の衝突が絶滅の原因だとする説が有力である．

3.4 霊長類の進化とヒトの誕生

ヒト上科ヒト科に分類されている人類は，いかにして他の類人猿と分かれてきたのか，興味のもたれるところである．ヒト科のもっとも古い化石は，エチオピアのアラミスで1994年末に発見された．アルディピテクス・ラミダスと命名され，推定年代は440万年前である．ラミダスは二足歩行というヒト科の特徴を持っている．2002年にチャドで発見された猿人と見られる化石は600～700万年前と推定されているが，猿人化石かどうか疑問が出されている．

人類揺籃の地ー東アフリカ：主要な人骨化石の出土地はアフリカ大地溝帯に沿った分布をしている．アフリカ大陸は西から東まで熱帯林が続いていたが，1500万年前に小さなプレートが東アフリカの南から北にかけて移動して衝突し，南はタンザニアから北はエチオピアまで数千キロにわたって蛇行する2本の断層を生んだ．このような大きな地殻変動の結果，2本の地溝帯に挟まれた低い谷間は乾燥を続け，サバンナが形成されたのである．人類の祖先が樹木から地上に降り二足歩行の道に入ったのは，このような自然の大きな変動によると，一般に理解されている．

現代人の祖先：このような人類の化石による調査研究とは別に，やはり分子生物学の方面からのアプローチで近年話題になっているのは「ミトコンドリア・イブ」である．ウィルソンらがアフリカ，アジア，ヨーロッパ，オーストラリア，ニューギニアの5つの地域から147名（現代人！）を抽出し，DNAの配列パターンを調べて系統樹を作成した結果，全てのミトコンドリアDNAタイプの共通祖先は約20万年（28万～14万年）前のアフリカ人であり，その後に各地へ移住していった，というのである．

4. 文明と金属産業

ヒトがサルの仲間から別れたとき，直立することで前肢が自由になり，道具を操るのに便利になったと見られている．ヒトが最初に利用した本格的な道具は石（石器）であった．マンモスのような巨大な獲物に対しても石製の鏃（やじり）を打ち込んで仕留めたことが，その化石から分かっている．この時代が石器時代である．

4.1 古代文明と金属

金属利用という点から見ると，有史以前においては，人々は自然金属，すなわち製錬せずにすでに金属状態で存在する金や銀・銅，あるいは宇宙から飛来した隕鉄などを利用したとするのが定説である．古代エジプトの遺跡，ファラオの墓には金や銀の貴金属製品その他の宝石類が埋葬されている．この頃には自然銅だけでなく，いわゆる製錬された金属，スズとの合金である青銅が大量に使用されるようになった．青銅はその装飾的な色彩もさることながら，工具あるいは武具としての有効性から急速に利用が増し，いわゆる青銅器時代を形成することとなった．

鉄の時代：なお，歴史的に強い関心が寄せられているのは，技術史家から「民主的金属」と称されている鉄の製錬である．酸化物から製錬された鉄の製品が登場するのは小アジアに興ったヒッタイト帝国の時代（BC1500年頃）であると考えられている．『ダンネマン 大自然科学史』によれば，鉄製品がエジプト王墓に見出され，製錬跡と見られる廃滓も発見されているようだが，全体から見ると極めて少量である．鉄は銅や銅合金などに比べて融点がかなり高い金属であるが，逆に強度などがはるかに優れているため農耕機具や武器に利用され，強大な帝国を支えたと言われている．ただし『鉄の歴史』のベックなどは，固体の還元反応を利用すれば銅合金の製造よりも低温で可能なので，「青銅の時代」の後に「鉄の時代」を位置づけることが，必ずしも妥当だとは言えないと述べている．

古代文明と環境破壊：最古の文明の一つであるメソポタミアの地，ほぼ現在のイラクの地は砂漠地帯となって

いるが，かつて文明が開かれた頃は広大な森林が広がっていた．メソポタミアの文明を支えた煉瓦造りや金属製錬のために，周辺が砂漠化したのである．キプロス島やギリシャのアッティカの森，エルバ島，イベリアなどの森林も銅や銀の製錬のために食いつぶされていった．製錬に伴う亜硫酸ガスなどの排煙でも周辺の樹木が枯れ，人体にも影響を及ぼした．またローマでは上水道が発達し，現在でもその遺跡が残っているが，その水道管に鉛を使用していた．また鉛製の容器でワインを飲むため被害が急速に広まるなど，鉛の日用品を通じてローマ帝国は衰退していったとする歴史家もいるほどである．

4.2　産業革命の光と影

4世紀末から5世紀にかけてローマ帝国が崩壊して東西に分裂し，時代は中世に入る．その後ルネッサンスを経て文明の中心はイタリアからヨーロッパ北西部に移っていった．この中世は採鉱と冶金の技術が飛躍的に向上した時代である．その内容はアグリコラの著した『デ・レ・メタリカ』に詳しく述べられている．

鉄の製錬については，14～5世紀に高炉法の原初的な形がドイツ（オーストリア帝国）で確立し始め，ベルギー・フランスへと広がり，16世紀にはイギリスが鉄鋼製品の輸出国になるところまで成長する．18世紀後半，ワットの蒸気機関の発明が契機となってイギリスで産業革命がおこり，その後ヨーロッパ中に広まっていく．これは製鉄業においても大きな影響をもたらす．それまではイオウ分のため石炭を製鉄の燃料として使用することができなかったが，コークスでそれが可能となるとともに，蒸気機関の力が加わって製鉄業に一大飛躍が訪れたのである．そして生産された鉄自体が産業革命で勃興した産業機械などに利用されていった．図5には，イギリスにおける鉄の生産量がどのように変化してきたか，それが示されている．

しかしながら，製錬に伴う亜硫酸ガスの大量発生によって周りの樹木は枯れ，イギリスの大気汚染は極めて深刻な事態に至っていた．煤煙に覆われた工業の町マンチェスターなどにおいて，蛾の羽の色が黒化する現象（メラニズム）が調査されている．いろいろ工業規制法などが制定されるが，生産の増大速度に追いつかず被害は拡大していった．20世紀に入る頃にはスモッグという造語が市民権を得るまでになった．そして1952年12月にロンドンで極めて濃度の高いスモッグが発生して多数の死者が出たのである．有名なロンドンのスモッグ事件である．それ以前においても，ヨーロッパのミューズ川の渓谷で起きたミューズ事件や，アメリカ・ピッツバーグのドノラ事件でも多数の被害者が出ている．

4.3　日本における鉱業の発展

図6には，日本で開発された鉱山が数多く記載されている．現在ではほとんど休止状態・閉山となっているが，なぜこれほど多いのか？それは太平洋プレートがユーラシア大陸のプレートにぶつかり，その下に潜り込む所に日本という国があるからである．戦国時代から江戸時代にかけて，各大名が経済的基盤を固めることもあって，鉱業史上まれに見る発展がなされた．特に金山・銀山の急速な開発がなされ，大増産がみられた．大森銀山（1562年），生野銀山（1542年），佐渡金山（1601年），その他，石見銀山，伊豆・甲斐金山，神岡銀山などがこの頃に開発されている．その後，赤沢銅山（後の日立銅山），足尾銅山（1610年），別子銅山（1690年）などが開かれて，銅の生産も隆盛を極める．また鉱山における一種の職業病が「気絶（ケタヘ）」（酸欠），「烟瘴の気」

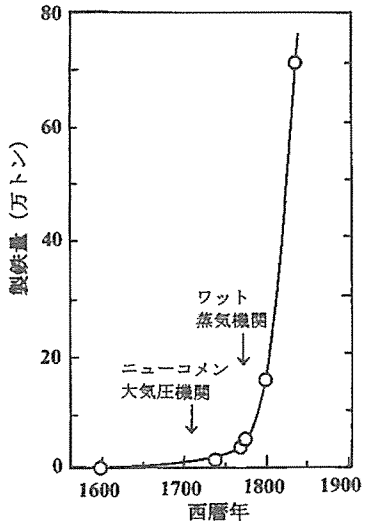


図5　産業革命期イギリスの製鉄量

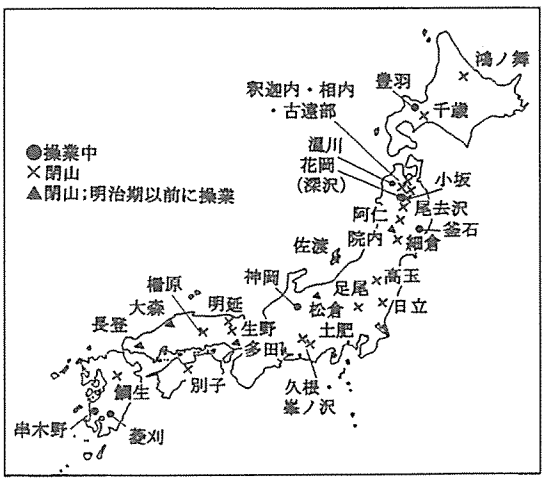


図6　日本の主な鉱山（1990年当時）

(けい肺) あるいは「ヨロケ」として記載されるようになる．帚木蓬生の小説『国銅』にも紹介されている．

文明開化と金属産業：明治政府の富国強兵政策の経済的・物質的基盤をつくったのは鉱工業の発展である．しかし鉱害・公害も規模を大きくなり，その典型的な事件が足尾銅山，別子銅山，小坂鉱山，日立鉱山で引き起こされた．特に足尾銅山の場合には，被害区域の広さ（群馬，茨城，栃木，埼玉の4県），農作物の被害だけでなく，健康障害や乳児死亡率を高めるという被害の深刻さが際だっていた．田中正造が国会で問題を指摘するとともに，議員を辞職して天皇に直訴するという行動を起こすが，ついに1906年に谷中村が廃村になるという悲劇的結末とも相まって，近代日本における公害問題の原点として知られるようになった．一方，都市部に建設された工場による公害も大きな問題となっていった．しかしその後，四日市の公害認定が行われ，倉敷や千葉，大阪・東淀川などでも工業コンビナートによる大気汚染は法令上も許されなくなっている．

4.4 人体内部への直接被害

直接生産に関わらない人が，あるいは直接生産物を消費することのない人が，鉱業活動によって排出される（さまざまな化学形態の）重金属によって，知らないあいだに人体を蝕まれて命を奪われるような事態がおこるようになってきた．その典型的な例がカドミウムと水銀による被害，イタイイタイ病・水俣病である．

カドミウムによる慢性中毒：カドミウムは充電可能な電池として各方面で利用されてきたニカド電池の必須元素であり，性能のよいメッキ材料として広範に利用されてきた．しかしそのような効能は近年になって理解されはじめたものである．神岡鉱業の工場排水はその横を流れている高原川に排出され，河川水は神通川に入って富山県の広大な農地に農業用水として供給される．河川水中のカドミウムは主として産米と飲料水を通じて住民の体内に蓄積されるようになった．1968年の厚生省の見解によると「イタイイタイ病の本態は，カドミウムの慢性中毒によりまず腎臓障害を生じ，次いで骨軟化症をきたし，これに妊娠，授乳，内分泌の変調，老化および栄養としてのカルシウム等の不足が原因となって，イタイイタイ病という疾患を形成したもの」となっている．現在は工場の無公害化を目標とするまでになっている．

メチル水銀による中毒：1953年ごろ熊本県の水俣湾に面した町で漁業を生業とする人たちの中に神経障害を伴う病気が発生した．当初はマンガンやセレンが疑われたが，最終的には新日本窒素の水俣工場からの排水中に含まれる水銀であることが判明した．工場では塩化ビニルや酢酸を製造していたが，アセチレンからアセトアルデヒドを製造する工程で触媒として使用していた硫酸水銀からメチル水銀が副生し，工場排水として水俣湾に放流されていた．この有機水銀は魚介類に蓄積され，それを食した多数の人たちが神経を冒され，死亡していったのである．その後，新潟県の阿賀野川流域においても，昭和電工・鹿瀬工場におけるアセトアルデヒド合成プラントからの排水で水銀中毒被害が起こった．この事態に対して，原因を隠蔽しようとする水俣での動きが解決を遅らせ，第2の水俣病を発生させたと厳しい世の非難が寄せられた．

5. 生体における金属の役割

人体を構成する成分は，水を除くとほとんどがタンパク質をはじめとする有機高分子であるが，わずかに無機物質が存在する．そのわずかの無機物質の中でも量的には少ない微量元素としての金属が，さまざまな生体機能を発現するうえで重要な役割を果たしている．微量金属は金属タンパク質あるいは金属酵素という形で特定のアミノ酸と結合して体内で存在し，さまざまな化学反応を触媒し構造を維持する役割を担っている．生体中の金属元素のうち比較的多いのがアルカリ・アルカリ土類のCa, Na, K, Mgであり，その他の濃度は極めて微量である（表1参照）．

5.1 必須金属の役割

生体における金属の役割は，タンパク質などの構造安定化，イオン化・電荷移動，電子の授受を触媒するなど多彩である．

表1 生体内元素分布（成人体重1グラム当り）

元素	濃度 (mg/g)
O	650.0
C	180.0
H	100.0
N	30.0
Ca	15.0
P	10.0
S	2.5
K	2.0
Na	1.5
Cl	1.5
Mg	1.5
元素	**濃度 (μg/g)**
Fe	85.7
F	42.8
Si	28.5
Zn	28.5
Sr	4.6
Rb	4.6
Pb	1.7
Mn	1.4
Cu	1.1
元素	**濃度 (ng/g)**
Al	857
Cd	714
Sn	286
Ba	243
Hg	186
Se	171
I	157
Mo	143
Ni	143
B	143
Cr	29
As	29
Co	21
V	21

構造の安定性：生体分子が3次元構造を作るときに，金属がタンパク質など巨大分子に特異配位して高次構造を変える働きをする．金属イオンの配位数が大きい特性が生かされている．たとえばZn^{2+}イオンは遺伝子制御タンパク質などに存在して重要な働きをしているが，このタンパク質－RNA複合体には7～11個のZnイオンが含まれている．アミノ酸が配列しているらせん部分がZnに配位すると折り曲げられて指のような形になることから，Znフィンガーと呼ばれている．

電荷と情報伝達：細胞内のCa濃度は低く，細胞内外で著しい濃度差が生じている．この濃度差を維持するために，細胞は絶えずCaイオンを細胞外に排出している．何らかの刺激が与えられると，細胞内のCa濃度は急激に増加する．細胞内のカルシウムはCa結合タンパク質（たとえばカルモジュリン）に配位結合してEFハンドと言われる構造をとっている．あたかも手のひらにあるCa^{2+}を指が抱いた形に見えるからである．Ca^{2+}濃度が変わると構造が変わり，それで酵素活性をコントロールしているのである．

酸化還元反応：外部から得られたエネルギーを生物が利用できるものに変換する必要がある．その変換を触媒するのが酵素であって，金属を含んでいるものが多い．生体内での穏やかな条件（pH，温度）で容易に電子の授受を行うことができることが必要で，遷移金属元素はそのエネルギー構造からいって機能が発揮されやすいためFe, Cu, Mo, Co, Niなどの金属が活躍している．

5.2　金属の生体への影響

上述したように，金属イオンの特性が生体の機能を発揮するうえで重要であるが，たとえばカルモジュリンなどでも148個のアミノ酸にたった4個のCaが結合しているだけであって，一般に金属イオンの数はほんのわずかでよい．

重金属の必須性と有害性：食べ物からの必須微量元素の供給が低い場合には欠乏症に陥り，極端な場合には死に至ることになる．しかしたとえ必須元素であっても，ある閾値を越えると有害作用を示す．たとえばSeなどは，欠乏状態から過剰状態になる濃度範囲がきわめて狭いのが特徴である．生物は長い進化の過程で環境の有効成分を利用する機構を作り上げてきたが，その微妙なバランスは“自然の妙”としか言いようがない．

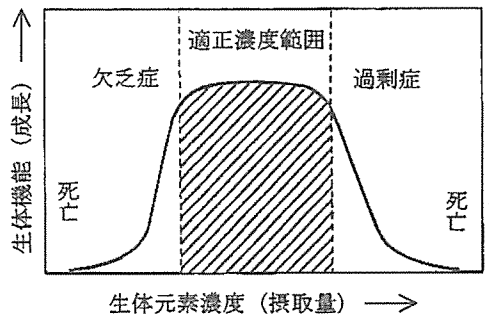


図7　生体機能と元素濃度との関係

金属元素の置換：金属イオンは，アミノ酸その他の有機化合物におけるCOO^-基の酸素イオン，NH_2基などの窒素原子，システインSH基のイオウ原子などと結合している．このようなシステイン残基に本来結合すべき金属イオンに代わって別の重金属が結合すれば，そのタンパク質なり酵素などの生理機能が阻害される．これが有害作用の主要な機構の一つである．またタンパク質や酵素が合成される過程で，正常な金属と間違って取り込まれてしまうこともある．たとえばCdは周期表でZnのすぐ下に位置し，化学的性質が似通っている．精子を製造するのに必要なDNAポリメラーゼがあり，その亜鉛酵素のZnがCdと置き換わると機能がなくなるのである．また生体中のAlがFeの結合タンパク質であるトランスフェリンと結合して，そのレセプターが多く存在する脳に侵入するといわれている．

構造の変化：一般に金属イオンはタンパク質のアミノ酸残基に結合し，するとタンパク質や酵素の構造が変化することがある．タンパク質・酵素は特定の構造をとっているときだけ活性であるため，それが変化すると活性が消失することが多い．特定の構造をとるということは，結合の手が特定の方向を向いているときで，そうでなければ結合することができなくなる．このようにして毒性が発現する場合もある．

5.3　どのようにして金属が生体内に入るか

重金属の侵入経路：細胞膜の主成分である脂質（炭化水素）はイオンと親和性がないので，重金属イオンの多くはそのままの形では細胞に侵入できない．しかし細胞膜にはイオンポンプやイオンチャンネルといわれる有用金属用の吸収機構が備わっている．ところが金属イオンは互いに類似点があり，生体はそれらを完全には識別できず，あやまって別の重金属を吸収してしまうことがある．また金属は径口，呼吸器系あるいは皮膚を通して吸収されるが，それぞれの侵入経路によって毒性が異なる．たとえば，金属水銀は径口的に投与された場合にはほとんど毒性が見られない．腸管からの吸収が非常に少ないためである．ところが金属水銀が蒸気として径気道的に吸収される場合には，その吸収率が50～100%と高く，毒性が現れやすいのである．

重金属の化学形：水俣病の悲劇によってわれわれはメチル水銀の恐ろしさを知っている．しかし同じ水銀化合物であっても，その化学形の相違によって物理的・化学的な性質が大きく異なる．たとえば，無機水銀は細胞膜

を通過しにくいが，有機水銀の $Hg(CH_3)_2$ や $HgCH_3^+$ になると，メチル基のために脂質との親和性が増して細胞膜を容易に通過できるようになる．このため有機水銀は特に毒性が強くなると考えられる．Pb の場合には，ガソリン添加物として用いられた四エチル鉛 $Pb(C_2H_5)_4$ が典型的な有機金属化合物で，細胞膜を容易に通過して特に脳細胞に集中する傾向がある．

5.4 生体の防御機構

生物は，一方では生体の構造と機能を維持するため重金属を積極的に利用しているが，他方ではその重金属による有害作用にもさらされている．生体は，その有害作用に対してどのような解決の仕方を採用しているのだろうか．

生理学的方法：まず，できるだけ細胞内に入ってこないようにしている．たとえば，魚類が重金属に汚染された水域に出会うとエラの表面への粘液の分泌が増え，金属をそこで抑えて体内に侵入するのを防ごうとするものだと考えられる．しかし細胞内に入ってしまったらどうするのか．まずその重金属をくみ出す手段がある．ある細菌には Cd^{2+} イオンに抵抗力のある変異株があって，カルシウムポンプと似たような機構で Cd^{2+} をくみ出している．重金属をあまり影響力の大きくない部位に移動させる手段もとっている．重金属はたとえば毛髪に濃縮されることが知られている．セントヘレナに流されたナポレオンが毒殺されたのではないかと言われるのは，遺体の頭髪を分析した結果，普通の人の何倍もの As が検出されたからである．

化合物生成による安定化：Hg や Cu などはイオウと結合しやすいので，S^{2-} とその類似物，あるいはシステインを含むタンパク質を製造して重金属と安定した結合をつくり，不用な作用を他に及ぼさないようにする．実際，システインを多く含む特殊なタンパク質であるメタロチオネイン（MT）が生物界に広く分布していて，Cd, Hg, Zn, Cu, Ag などの重金属が細胞に入ると MT の合成が誘起されて金属と結合する．MT は金属とチオール基（システイン残基）に富んだ低分子量のタンパク質である．Zn と Cd の場合には金属原子1個に4個のチオール基が配位し，テトラヘドラルな構造をとる．これらの金属に20個のチオール基が配位することによって合計7個の金属が結合し，2種類のクラスターを形成することになる（図8）．

拮抗作用：食物連鎖の頂点にあるアザラシに Hg が濃縮されていることが知られている．ところがアザラシは Hg の影響を受けているようには見えない．同様のことはマグロについてもいえる．実はこれらの体内では Hg 濃度も高いが同時に Se の濃度も高く，その比率は1対1で HgSe という不溶性の化合物を作っているらしい．Se^{2-} は S^{2-} よりもさらに強く Hg^{2+} と結合するので HgSe は非常に安定である．これは Hg と Se の拮抗作用といわれている．Mn と Fe の拮抗作用，Mo と Cu の拮抗作用もよく知られている．この機構（拮抗作用）はまさに「毒をもって毒を制する」という方法であろう．

以上述べてきたように，生物は長い進化の歴史の中で発達させたさまざまな生理学的・化学的な作用を利用して，有用金属の働きを促しつつその有害性をできる限り取り除き，生体活動の維持成長をはかっている．これはきわめて微妙なバランスの上に成り立っているので，急激な環境の変化が起こるとその機能を発揮できず，致命的な被害を受けることになる．

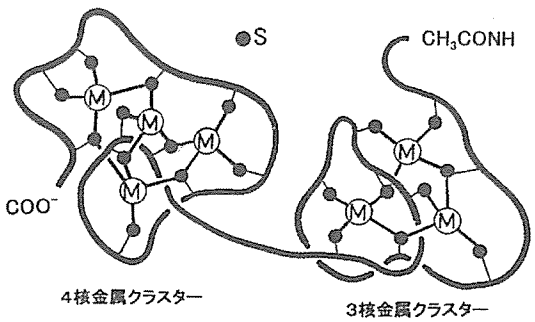


図8 メタロチオネインの構造

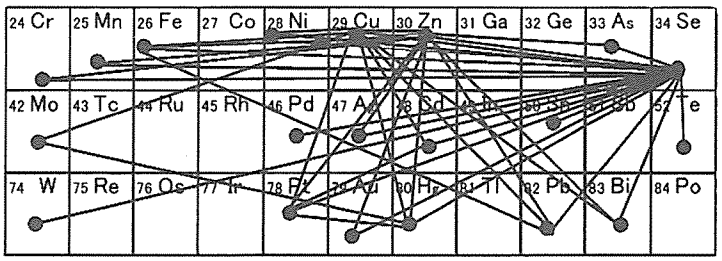


図9 拮抗作用の組合せ

6. 公害と環境問題

これまで，ややもするとモノを生産することばかりに目が向いていたが，実は生産過程で水や大気を通じて，周りの自然や人間自身の健康と生命に深刻な影響が出てくることが分かった．最近では，生産の規模が大きくなってきたこと，これまで人体があまり経験したことのない物質の登場もあって，その影響が広く深い範囲にわたり，かつ様々な影響が複合して複雑な様相を呈するようになった．いわゆる地球規模の環境汚染の問題が焦眉の課題となり，様々なレベルで国際的な監視体制をつくる必要性が高まっている．

6.1 ボーダーレス：有害物質の越境移動

都市がまだそれほど発展していなかった頃，廃棄物は発生源の近くで処分されていた．やがて都市が発達し，人口や機能の集積に伴って自分の区域内で処分することが困難になってきて，隣の市町村に，隣の府県に，隣の国に，といったように処分の容易な地域に処分場が移動していった．有害な廃棄物が何らの連絡や協議もなしに国境を越えて（たとえばヨーロッパからアフリカへ）運ばれるという事件が頻発するようになった．また公害処理の不十分な生産工場を規制の緩やかな国々へ（たとえば日本から東南アジアへ）移されることも多く，これは「公害の輸出」だとして批判される事態も広がっていった．

6.2 グローバリゼーション：地球は有限

公害問題では，地球レベルから見るとかなり局限された地域の環境汚染が問題になっていたと言えるであろう．しかしその間に，質的に新しい問題が生じてきた．たとえばフロン問題がある．フロン分子（クロロフルオロカーボン系化合物の総称）自体は人体に無害とされていたが，上空にあがって紫外線により分解され，生成した塩素ラジカルがオゾンを破壊するということである．つまりわれわれが制御できない所で地球の（大気）環境を変えてしまうという，新たなレベルの問題が生じてきたのである．このフロンは一部のハイテク産業で洗浄剤として使われているだけではなく，冷蔵庫やエアコン，スプレーなどの商品を通じて（多くの消費者・大衆の手によって）広範囲の地域に拡散してしまったのである．これまでのように汚染源が製造工程に限定されることはなく，また広い地域にもたらされたということだけではなく，地球レベルの規模で生体に被害が及ぶという問題もあらわになってきたということである．

6.3 人類の経済的・社会的活動

産業革命以後のわずかの間に生産と消費の活動が急激に拡大し，それを反映して廃棄物であるCO_2も同じように急速に増大していることが示されている．また他の温暖効果ガス（N_2O, CH_4等）の濃度もCO_2と同様の曲線を描いて急速な増大を見せている．これらの気体成分は可視光線に対しては透明であるが，赤外線を吸収・放出するので，地表面から宇宙に放出されている赤外線の大部分を吸収し，その一部をふたたび地上に向かって放出する．このような作用は地上の気温を高めるため，温室効果と呼ばれている．国際機関IPCCの第4次報告書が2007年5月に出され，人類の経済活動が自然環境に対して深刻な影響を及ぼしていることに強い警鐘が打ち出された．

図10に，人工的な汚染源のないと考えられるグリーンランドで，つもった雪氷中の鉛濃度の経年変化が示されている．金属元素が人跡未踏に近いグリーンランドで急増していることは驚くべきことであるが，北半球における近年の急激な増大は主として自動車の排ガスによるものと考えられる．大気の運動によって地球全体にあまねくまき散らされたということであろう．土壌中には，このように鉛だけではなく他の多くの重金属も蓄積しており，そこで生活している植物・動物・人間など生物への影響が心配されている．

かつて地球の環境を支配したのは物理・化学の現象であったが，その後生物学的な作用による影響が加わり，さらに近年に至って社会的・経済的な人間活動が大きく作用するようになってきたと言えるであろう．このような複雑な作用が地球レベルで働いているのが環境問題といわれるものであり，これからの解決すべき重要課題としてわれわれの前に立ちはだかっているのである．

このように地球レベルの環境汚染（破壊）が認識されてきたのであるが，それでは局地的な公害問題は過去の問題かというと，決してそうではない．結局のところ，地球規模の環境破壊を防ぐには生産者と消費者の所で有害物質の拡散を抑えることが必要である．陸地での汚染物質は河川などを通じて海洋沿岸部などに集まるであろ

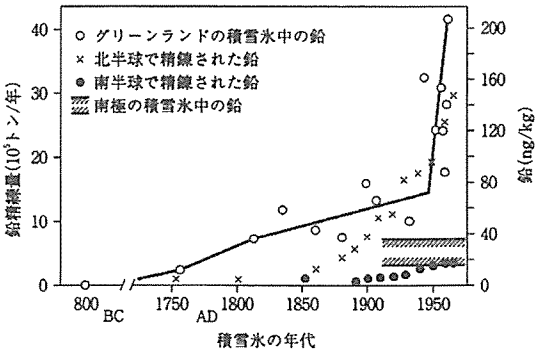


図10 グリーンランド雪氷中のPb濃度
（西村雅吉「環境化学」裳華房，p80）

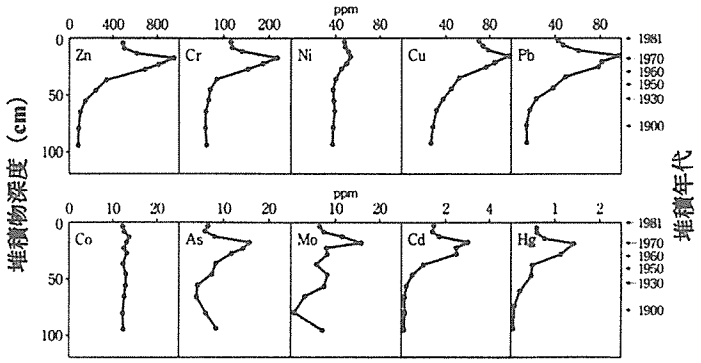


図 11 東京湾の堆積物―重金属濃度の経年変化
（松本英二，地球化学，Vol.17(1983),p27）

う．図11には東京湾における堆積物中の重金属の深度分布が示されている．重金属類は戦後の経済活動が活発化しはじめる1950年頃から増えはじめ，公害問題が激しくなって規制が行われるようになった70年頃をピークに，それ以降は減少しており，環境中への排出が徐々に減少している様子がわかる．行政的な規制が有効な例である．

おわりに―謙虚に生きる

2001年から始まったWMAP衛星による精密な温度ゆらぎの測定から，ダークマター（直接観察にかからないが，それがないと天体などの力学運動の説明がつかない）が22%，ダークエネルギー（宇宙項と考えられている）が74%，そして我々の直接観測にかかる物質が残りの4%であることが明らかにされたのである．すなわち，宇宙の全エネルギーのうちで，我々が科学の粋を集めて観測して直接つかめているのはたったの4%に過ぎないという冷厳な事実なのである．我々はほとんど何も知っていない，ということが分かったことは，逆に素晴らしいことであるかも知れない．身の程をわきまえて，すなわち謙虚な姿勢で，研究・生産・消費の活動を進めていくことが求められていると思う次第である．

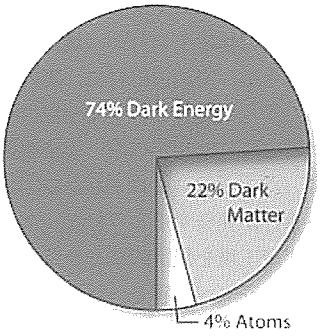


図 12 宇宙のエネルギー分布（NASA）

大会記念講演

資源循環型社会を支える素材産業の環境・リサイクル事業への取組み

浅　尾　晴　彦*

The Materials Industry's Contribution to the Recycle-oriented Society through the Environmental and Recycling Business

by Haruhiko ASAO

はじめに

近年，素材産業は各社過去最高益を更新し，経営的に元気を取り戻している．一見，資源高騰など一時的な時代の揺れ動きの中で，業績が回復しているように見る向きもあるが，一方では，社会ニーズを捉えて廃棄物処理の地道な技術開発を継続し，一つ一つを事業につなげてきたことが今日の業績につながっていることも間違いがないことである．

今後も，ますます複雑になる資源・廃棄物問題の中で，素材産業の貢献なくしては永続的な経済発展の実現は不可能であり，社会全体の中での素材産業への期待もこれまで以上のものとなっていると実感している．

本稿では，環境・リサイクル事業を取り巻く状況や三菱マテリアルの取り組みなどを紹介する中で，これからの素材産業が目指すひとつの方向性を示し，水曜会の発展，特に若い技術者，研究者の励みにつながれば幸いである．

資源循環型社会とトリレンマ

図1は資源循環型社会の実現に向けた当社の取組みを一例として示したものであるが，素材メーカーで製造された材料が，家電，自動車などの製品として使用され，その寿命を終えたところで回収されて，再び製錬所など素材産業に戻されて再生するというサイクルが，経済的な合理性をもって発展する世界，それが資源循環型社会の理想形と考えられる．当社は銅，セメント，アルミ，シリコン，原子力など，幅広いものづくりを行っているが銅，セメント，アルミの素材製造インフラを活用して廃棄物から原料・燃料の回収を行っているわけである．

図2[1]には資源循環型社会を取り巻く3つの要素の関連性を示した．ひとつは「経済成長」，もうひとつは「エネルギー・資源の需給安定」，3つ目は「環境保全」である．この3つの要素の調和が取れた部分，つまり交わりの部分が「資源循環型社会」ということができる．しかし，経済成長の維持のためには資源エネルギーを大量消費せざるを得ず，このエネルギーの大量消費が環境悪化を引き起こすというジレンマならぬトリレンマの関係にある．また，詳しくは後述するが，「経済成長」はBRICsに代表される大国の成長，「エネルギー・資源」は，資源の枯渇や資源ナショナリズムの問題から，調和を乱す方向にあると言うことができる．一方，「環境保

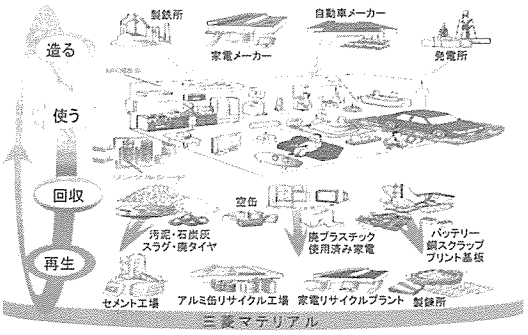


図1　資源循環型社会

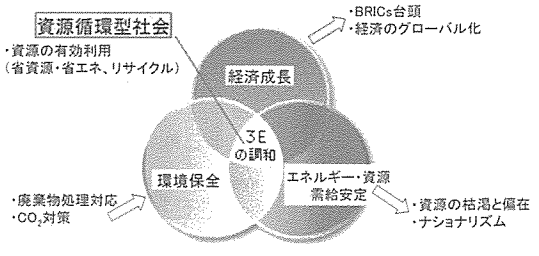


図2　資源循環型社会とトリレンマ

*三菱マテリアル株式会社

全」に関しては法規制や技術開発によって求心力を保とうとしているが，まだ十分な対策がなされているとは言えないであろう．

いずれにせよ，このような3つの要素に働く力を理解し，可能な限り調和を保つべく努めていくことが資源問題・廃棄物問題の解決につながるものと考えられる．

産業廃棄物処理の現状

産業廃棄物の発生量は，2004年で4.2億トン，そのうち43%は減量化されて，51%は再利用されており，残りの6%，2600万トンが最終処分されている[2]．これまでの官民あわせた努力によりここまで廃棄物処理が進んできたわけであるが最終処分場の残余年数は7.2年とされており，危機的な状況であることには変わりない．

このような状況になっている背景を耐久消費財の普及の推移から振り返ってみる．図3[3]に示したように戦後の高度成長時代には耐久家電製品が普及し豊かさの時代が始まり，1970～1980年代の安定成長期，バブル期には自動車，エアコンの普及とともに，大量生産，大量消費の時代が加速した．そのころ普及した商品が20年から30年経った今になって，廃棄物問題の主役となっているわけである．

その後1990年代は失われた10年ともいわれているが，携帯電話に代表されるデジタル家電の普及が始まった．これらのハイテク商品は商品寿命が短く，より一層廃棄物問題を大きくする可能性がある．また，多くのハイテク商品はレアメタルを多用しており，資源確保という意味でも問題を抱えている．

このような状況に対応して，2001年には家電リサイクル法，2005年には自動車リサイクル法などが制定され，社会全体として廃棄物問題に向き合わなくてはならない時代となっている．

資源問題の背景

図4[4]は，2017年までの銅の消費量予測を示したものであるが，欧州，米国の消費はほとんど横ばいであるのに対して，中国，ロシア，インドでは10年間で3倍近くに伸び，特に中国は2015年には年間800万トンを消費し，世界の消費量の3割を占めると予測されている．BRICsの人口は2000年には世界人口61億人の26%であ

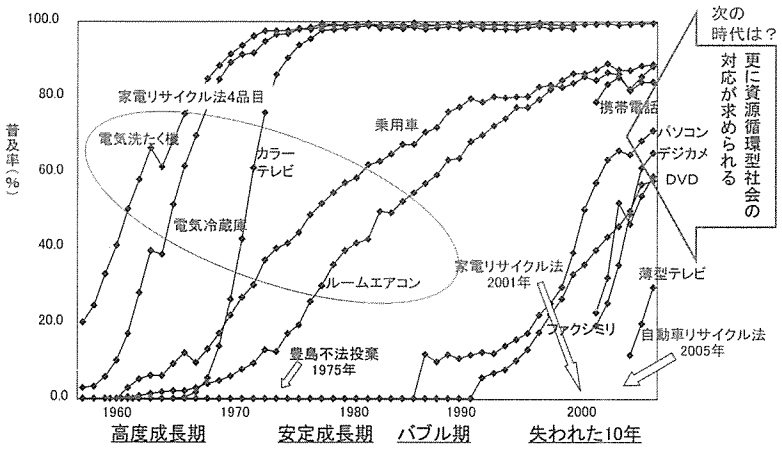


図3　耐久消費財の普及の推移

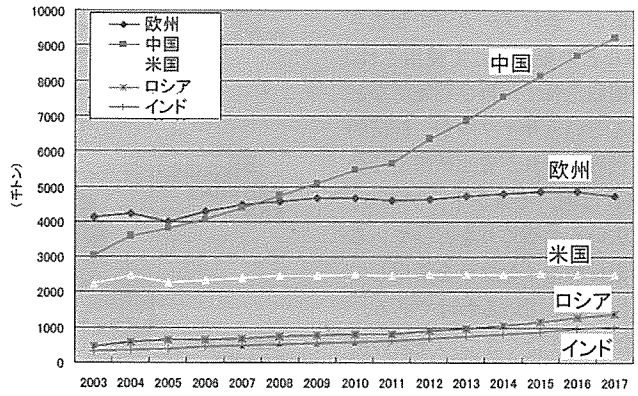


図4　世界各国の銅消費量の予測

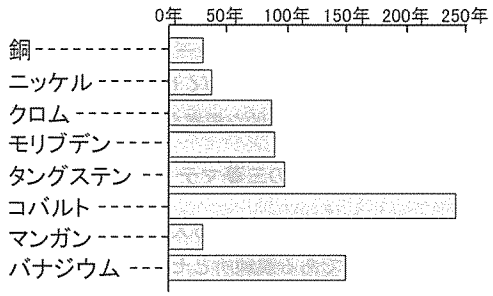


図5　主な金属元素の可採年数

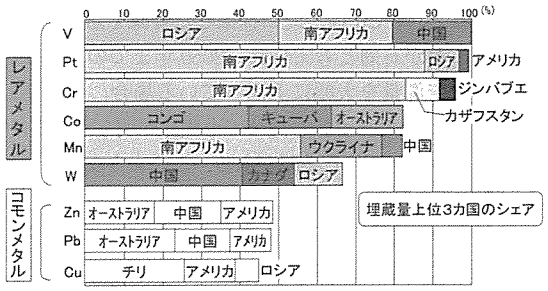


図6　主な金属元素の埋蔵量分布

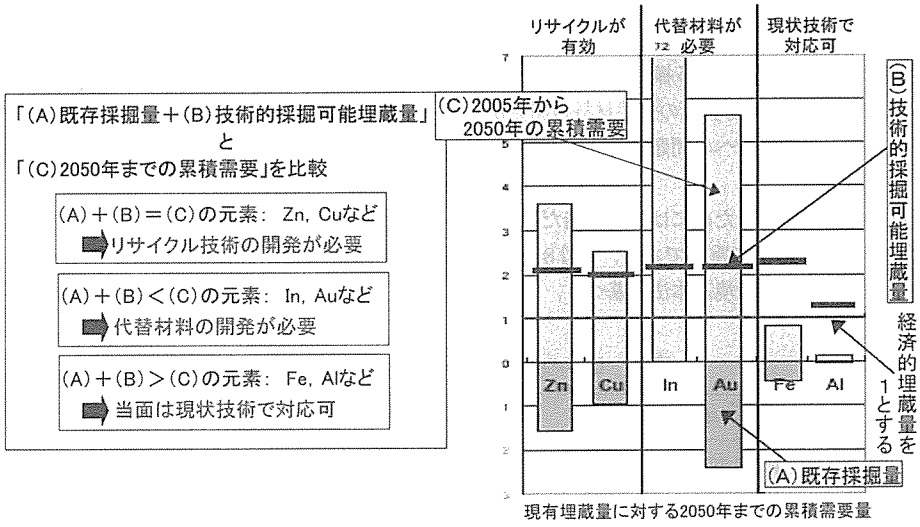


図7　金属元素の消費予測と埋蔵量

るが，2030年には世界人口82億人の40%を占めると予測されている．また，この間の中国，インドの実質経済成長率は6%前後と見られている．このようにBRICsを中心とした大国の大量消費が始まったことが資源問題の背景のひとつであることは間違いない．

一方，現在想定されている鉱石の可採年数を見ると，レアメタルだけでなく銅をはじめ重要な元素の多くが50年以内に枯渇すると予測されている．日本はエネルギーや金属資源の自給率が低く，ほとんど輸入に頼っている状況であるが，特に銅の可採年数は32年といわれており，先ほどの大量消費とあいまって，資源問題の緊急性を物語る数字のひとつである（図5[5]）．

図6[6]に代表的な金属元素の埋蔵量分布を示した．いわゆるハイテク製品の製造にはレアメタルが必須のものとなってきているが，この図からわかるようにレアメタルの多くは極端に偏在しており，利用価値が上がれば資源保有国は囲い込みを行うことになる．たとえば中国では既にレアメタルの輸出を制限しており，金属価格の高騰[7]などとあいまって日本のハイテク産業への悪影響が懸念される状況にまでなっている．このような中で，資源小国日本がどのように資源を確保し，経済成長を維持させていくかが問題である．

リサイクル事業と技術開発の推進

以上述べてきた資源問題，廃棄物問題に対処するためには，リサイクル事業を推進させることがひとつの解決策となる．非鉄金属資源確保に関して経済産業省の提言[8]の中でも，探鉱開発，代替材料開発，リサイクル推進，レアメタル備蓄などが対応策として挙げられている．これらの策を実現するために，鉱山・冶金技術はさまざまな貢献ができるものと考えられる．図7[9]は，物質材料機構が2050年までの金属資源の世界的な消費予測を行い，現在の埋蔵量との関係を明らかにした結果である．この図に示された採掘した量と技術的に採掘可能な埋蔵量を足し合わせたものが技術的に利用可能な資源の量ということになる．ひとつの考え方ではあるが，利用可能

な量と2050年までの需要がおおよそイコールの場合，たとえばZnやCuは，既に採掘した資源を回収して使用することが有効と考えられ，2050年までの需要が利用可能な資源量を大幅に上回っている場合，たとえばInやAuは，リサイクルを進めても限界が明らかであり，代替材料の開発を急ぐ必要がある．このような状況に対して表1[10]に示したように，日本の各メーカーは既に資源問題への対応を開始している．このような技術開発の積み重ねは資源問題に対する重要なアプローチであると同時に，産業としての国際的な競争力を高めるという意味でもいち早く取り組んでいくことが重要である．また，近年の原油高の局面においてもオイルショックが回避されている理由として，オイルショック当時の発電エネルギーは約4分の3を石油に依存していたが，現在は原子力，LNGなどエネルギー資源の多様化が進んだことが挙げられる[11]．この例は，鉱物資源の代替材料の開発が，先ほど説明した資源高騰などへの問題に対しても有効であることを物語っている．

資源循環型社会を実現するためには技術開発だけでなく，行政面での対応が非常に重要である．　図8[12]に示したように平成6年施行の環境基本法に基づき，5つの関連リサイクル法が施行され，廃棄物を適切に処理するための法律が整った．これらの法制は，製造業者，消費者，自治体などの役割，費用負担をルール化しているもので，回収，処理といういわゆるものづくりの静脈が，ひとつの産業として形成される社会的な根拠を作っている．

資源循環型社会への三菱マテリアルの取組み

当社の廃棄物処理事業における大きな特徴は廃棄物処理の2大インフラである製錬所とセメント工場を有する唯一の企業であることである．この特長を最大限に生かすことが当社に課せられた使命であるともいえる．

セメント工場関連のリサイクル事業

ごみの成分は平均すると地殻の成分に近いといわれており，粘土鉱物と石灰を混ぜて焼成して製造するセメントの成分とも類似している．そのためセメント製造工程では図9[13]に示したように工程全般にわたって，非常に多くの種類の廃棄物を原料，あるいは燃料として処理することが可能である．

特に多いのは原料として利用されるスラグ，石炭灰などであるが，セメント業界全体の廃棄物処理は2005年

表1　日本の各メーカーの資源問題への対応

使用量削減	トヨタ自動車	新型車の銅使用量を1割削減
	ホンダ	燃料電池車に使う電極用白金の使用量削減
	三菱マテリアル	プリント基板用工具のタングステン使用量を9割減
代替材料の利用	東ソー	液晶パネル向けインジウムを亜鉛で代替する技術開発
	JFE、日新製鋼など	ステンレスへのニッケル使用を減らし、クロム利用拡大
	三菱電機	エアコンの室外機の銅線をアルミニウムに変更
	NECグループ・日産自動車	環境対応車用の電池の電極をコバルトからマンガンに
リサイクル	昭和電工	ハードディスク製造でルテニウムのリサイクル品利用
	住友電工	名古屋大とタングステンなどリサイクル研究拠点設置

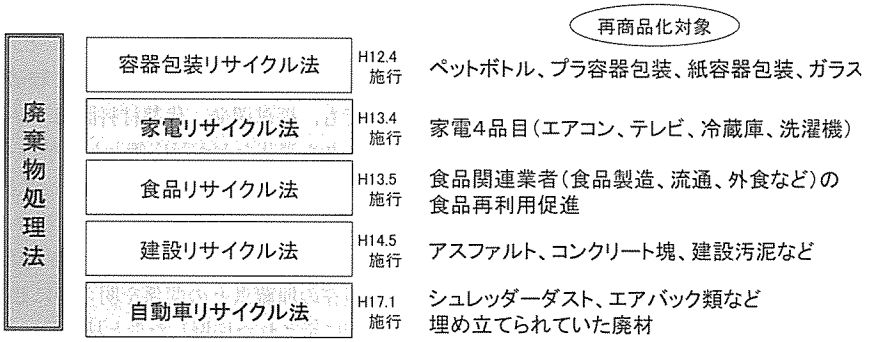


図8　5つの関連リサイクル法

で年間約3000万トンと発表されている[14]．これは産業廃棄物の総発生量4.2億トンの約7%にあたる．

図10[14]に示したように，セメント自体の生産量は年々減少する中で，廃棄物処理量は増加しており，現在はセメント1トンあたり400キロの廃棄物を処理している．

最終処分場の残余年数に換算すると，仮にセメント業界が廃棄物の受け入れを行わなかったとしたら，現在約7年といわれている残余年数が約4年に短くなると推算される．

また，最近都市ごみのひとつである下水汚泥をセメント工場で処理する技術が注目されている．この下水汚泥のセメントへの有効活用には三菱マテリアルの特許技術が各社で広く用いられている．通常の方式では下水汚泥を完全に乾燥させてからキルンに投入するが，当社の方式は80%程度の水分を含んだまま投入するため，処理コストを抑えることができる．

銅製錬所でのリサイクル事業

銅製錬設備を活用した廃棄物処理として注目されるのは自動車シュレッダーダストの処理である．自動車リサイクル法が2005年より始まったが，この大きな狙いは自動車解体の際に発生するシュレッダーダストと呼ばれる廃棄物のリサイクル推進である．自動車シュレッダーダストは車体重量の20%も発生し，これまでその多くが最終処分場に埋め立て処理されていた．

回収された廃車は，まず，エンジン，タイヤ，バッテリーなどが取りはずされ，その後プレスされシュレッダー処理業者が粉砕する．その際に，回収可能な金属類は回収されるが，約20%程度は回収できずに，シュレッダーダストと呼ばれる最終的な廃棄物が発生する．その構成物は樹脂，発泡ウレタンなどの可燃物が75%程度を占めており，熱量はトン当たり約4000キロカロリーある．また若干の有用金属も含まれており，これを有効活用し再資源化することが求められてきている．

自動車シュレッダーダストの処理方法としては，前述のように当初はほとんどが埋め立て処理されていた．しかし自動車リサイクル法の施行に伴って，再資源化が推進されており，図11に示したように2005年では総発生量50万トンのうち，約20万トンが埋め立て，残り30万トンが再資源化処理されている．自動車リサイクル法で定めた再資源化の目標は2005年30%，2010年50%で，前倒しに目標を達成していることになる．

再資源化されたシュレッダーダストのうち約40%に当たる約12万トンを，小名浜製錬所を中心として当社グループで処理している．小名浜製錬所は，業界に先立って自動車シュレッダーダストの焼却処理を進めてきた．これには小名浜製錬所が持つ国内唯一の反射炉の特長が最大限に生かされている．

反射炉は，その炉床面積および燃焼空間の大きさからシュレッダーダストの燃焼能力が大きく，図12に示したように，反射炉の天井からシュレッダーダストを投入し，1）発熱による燃料節約とボイラーによる排熱回収，2）メタルの回収，3）鉄分はカラミとして系外に取り出すという形で，経済的にも社会的にも貢献している．

シュレッダーダストの処理量は順調に増加してきたが，当初は困難の連続で，燃焼面からはバーナーの制御と配置，反射炉への投入位置，熱回収面からはボイラー

セメント業界全体

	種類	使用量(万t)
原料工程系 2,640万トン	石炭灰	719
	建設発生土	209
	鋳物砂	60
	スラグ	968
	汚泥スラッジ	253
	ボタ	28
	その他	403
焼成工程系 272万トン	廃油	22
	再生油	23
	廃プラスチック	30
	廃タイヤ	19
	その他	178
	その他	47
	合計	2,959万トン

図9　セメント業界で処理可能な廃棄物

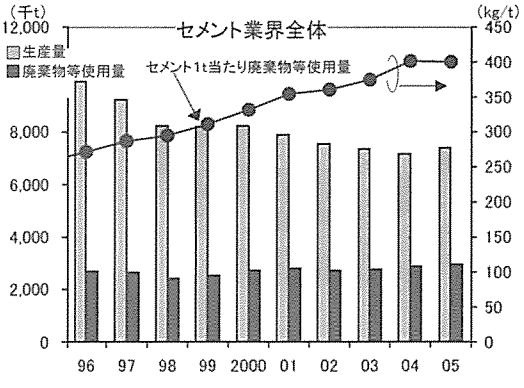


図10　セメント業界の廃棄物処理量の推移

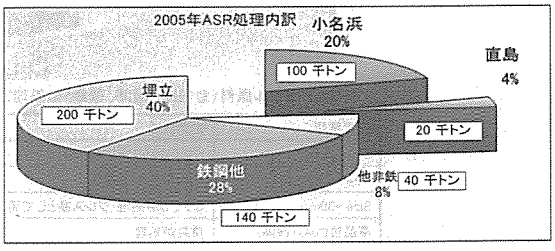


図11　自動車シュレッダーダストの処分内訳

水管の腐食，閉塞，銅製錬面からはスラグ制御といった技術課題をひとつひとつ克服した結果である．

中でも最大の問題点はシュレッダーダストに含まれる塩素他揮発元素がダストとして，ボイラーなどの熱交換パイプの表面に付着し，溶融塩腐食を起こす点である．この他に金属配管やレンガの損傷による操業トラブルを幾多となく繰り返してきたが，最近では極めて安定な処理が実現され自動車メーカーの信頼を得ている．

直島製錬所でのリサイクル事業

図13[15]に示したように直島製錬所では，従来から金銀滓，銅滓，故銅と呼ばれる有償リサイクル原料を粒径や品位によって最適な供給口より投入し，二次原料として使用してきた．処理量は年々増加し，2006年度は6万トンにまでなったが，小名浜製錬所の反射炉とは異なり，銅鉱石の酸化熱を利用したS炉ではシュレッダーダストを多量に直接処理することは難しく，ランス吹込みによって処理する廃棄物は限られたものであった．しかし，現在では直島エコタウンプランをきっかけに地元自治体との協力体制の下，大型の前処理施設を建設し，シュレッダーダストの受け入れなどを含めリサイクル事業を展開している．

直島エコタウンプランは，豊島の廃棄物問題とのかかわりが深い．豊島は瀬戸内海に浮かぶ島で，直島から3キロの地点にある．豊島には1975年ごろからシュレッダーダストなどの不法投棄が始まり最終的には60万トンが蓄積され，1990年に不法投棄の当事者である豊島総合観光開発に対して兵庫県警が強制捜査に入り，さらに1993年に豊島住民が香川県に公害調停を申請し，7年の年月を経て2000年6月に調停が成立した．その後，処理技術検討委員会が発足し，直島で不法投棄物の処理を計るという香川県と三菱マテリアルとの基本契約が

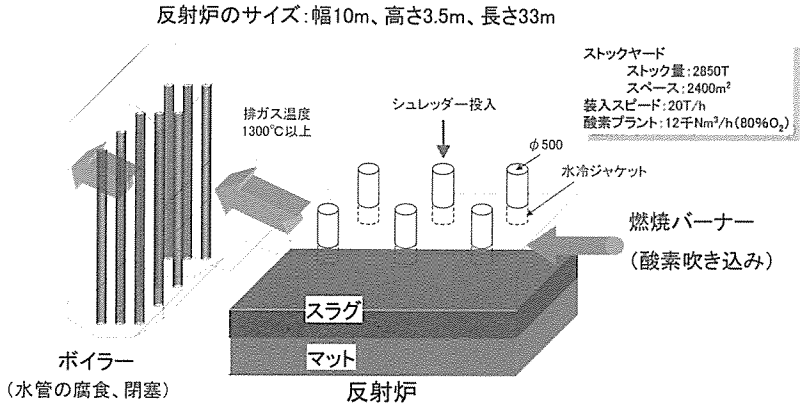
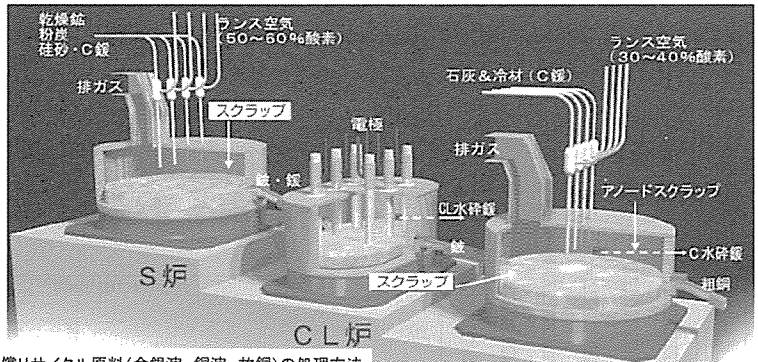


図12　小名浜製錬所でのシュレッダーダスト処理



有償リサイクル原料（金銀滓、銅滓、故銅）の処理方法

原料種類	処理方法
Size −6mm	S炉処理（ランス吹込み）
Size +6～80mm	S炉処理（天井装入口）
Size +80mm	S炉、C炉処理（プレス品として装入）
高品位Cu品（故銅）	精製炉処理

図13　直島製錬所でのリサイクル原料処理

2000年暮れに成立し，具体的な対応が開始されることとなった．

直島エコタウンプランはソフト事業とハード事業からなっており，香川県と直島町がエコツアーの誘致などのソフト事業を行い，ハード事業としては香川県が中間処理施設を，三菱マテリアルは金属回収前処理施設と飛灰再資源化施設を建設した（図14）．2003年9月から年間6万トン，10年間ですべての豊島からの廃棄物60万トンを処理する計画で，現在順調に取り進められている．

直島エコタウンハード事業

豊島の廃棄物はまず豊島のストックヤードから専用運搬船「太陽」で直島の中間処理施設に運搬され，中間処理施設で月5000トン溶融処理される．その溶融飛灰を直島製錬所の再資源化施設に運び，塩素を除去した後に銅製錬に投入する．その量は月に500トンである．再資源化施設では今回のエコタウン事業をきっかけに，豊島の不法投棄廃棄物だけではなく周辺自治体からの溶融飛灰も含め，月1300トンを受け入れている．さらに金属回収前処理施設ではシュレッダーダストなど月5000トンを溶融処理し，水砕スラグなどを銅製錬に送っている．なお，ここから発生する溶融飛灰も先ほどの再資源化施設で処理している．図15[15]は金属回収前処理施設のフローである．受け入れられたシュレッダーダストなどの廃棄物はホッパーよりキルンに投入され，1200度で溶融され，水砕スラグとメタルの混合物として銅製錬設備に運ばれる．このキルンの直径は5m，金属回収キルンとしては国内最大で処理量は一日200トンである．発生する排ガスは，二次燃焼室で900℃まで加熱，ボイラーで400℃まで冷却された後に，ダイオキシンの発生を防ぐために急冷塔で200℃まで急冷される．その後，バグフィルター前に消石灰，スクラバーで苛性ソーダによって

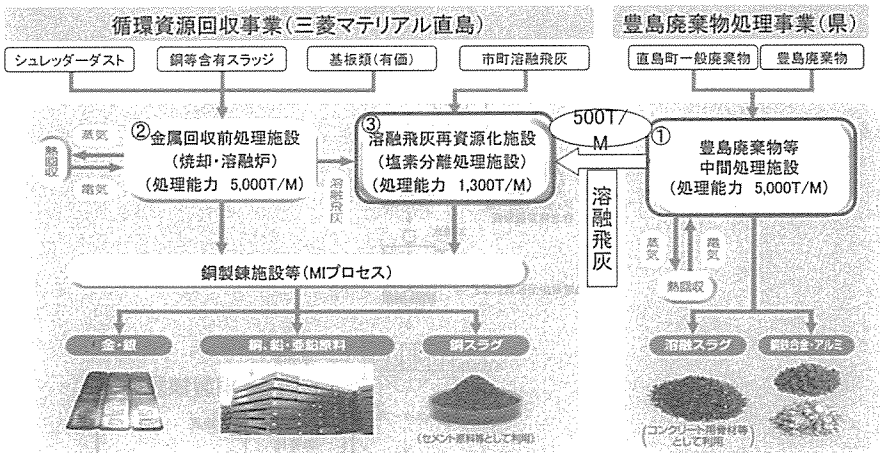
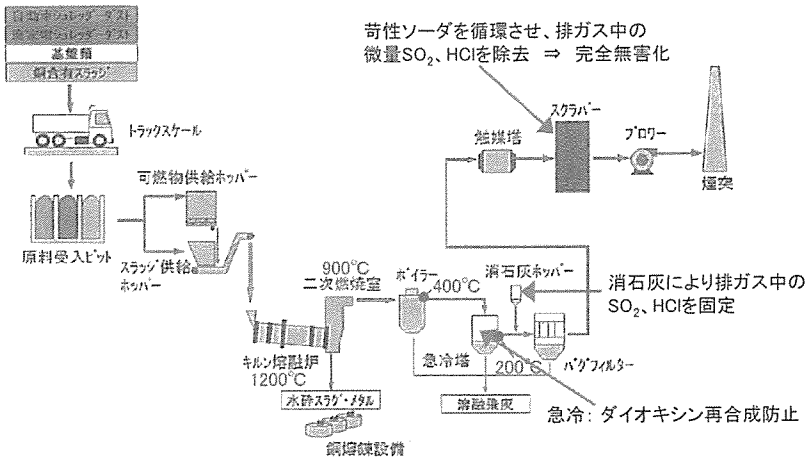


図14　直島エコタウンハード事業



（2004年7月より稼動）

図15　金属回収前処理施設フロー

SO_2 と HCl を固定して完全無害化して大気放出される．

図16[15]に溶融飛灰再資源化施設フローを示した．同施設では，受け入れた飛灰をスラリー化し，塩素とアルカリを溶出しフィルタープレスで分離する．脱塩素された飛灰は銅製錬設備で資源化され，分離された浸出液は同じく製錬所の排水処理施設で無害化され放流される．

家電リサイクルへの取組み

当社では家電メーカーと協力して家電リサイクル工場を運営している．図17に当社の家電リサイクルに関するフローを示した．消費者から回収業者を通じて集荷された廃家電は，家電リサイクルプラントにおいてそれぞれ適正な処分を行える部品レベルの状態に解体している．その後，鉄，銅，鉛，ガラスなどの有価物に分けられ原料として使用されている．このように当社では単に家電を解体するだけでなく，素材メーカーとしての専門性を生かし，製錬，セメントを用いた適切な処理を選択できる点が特徴となっている．

家電リサイクル法の対象となっている4品目，すなわちエアコン，テレビ，冷蔵庫，洗濯機の引き取り実績は年々増加しており，2005年は国内全体で約1200万台，過去5年間の累積リサイクル量は140万トンに達している．また，引き取り台数に加えてリサイクル率も向上しており，平成17年度は74%となった[16]．当社関連のリサイクル工場は現在5社6工場あり，2005年には年間200万台を処理している．これは全国の処理量の17%にあたり，工場がフル稼働した2006年には20%程度となる見込みである．また，家電リサイクルは家電メーカーが2つのグループに分けられているが，当社は製錬，セメントの両方のインフラを活用できることから，両方のグループに参画させていただいている．

前述のように当社では製錬所，セメント工場を活用した最終処分を必要としない廃棄物処理を特色としているが，図18に示したように家電リサイクルをはじめとする解体技術，分離技術を加えて，資源循環型社会に向けた総合的な廃棄物リサイクルシステムを構築すべく，ひと

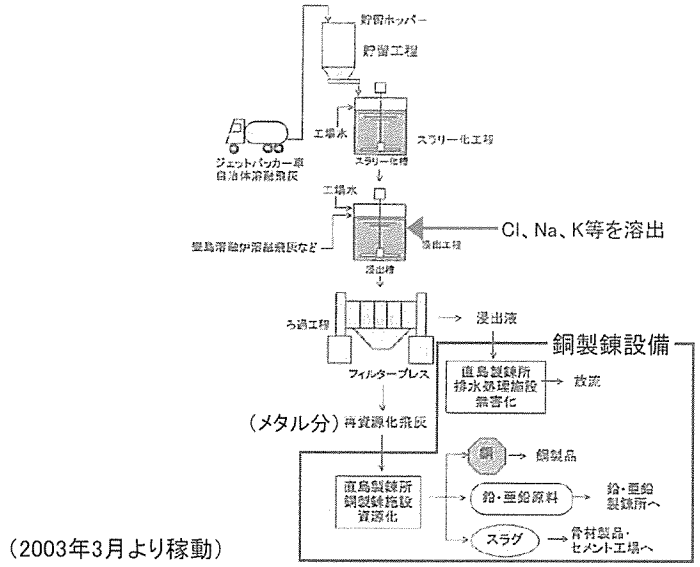


図16　溶融飛灰再資源化施設フロー

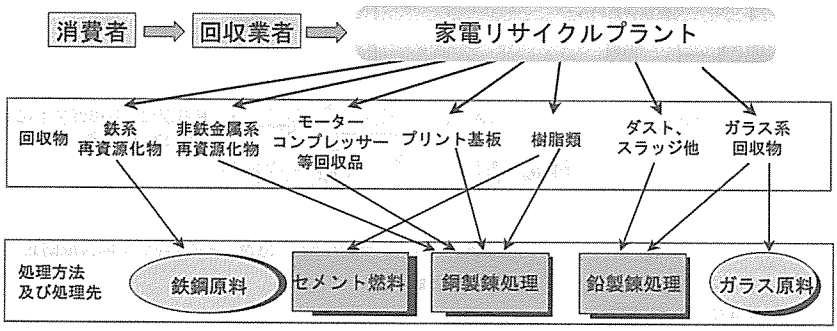


図17　家電リサイクルフロー

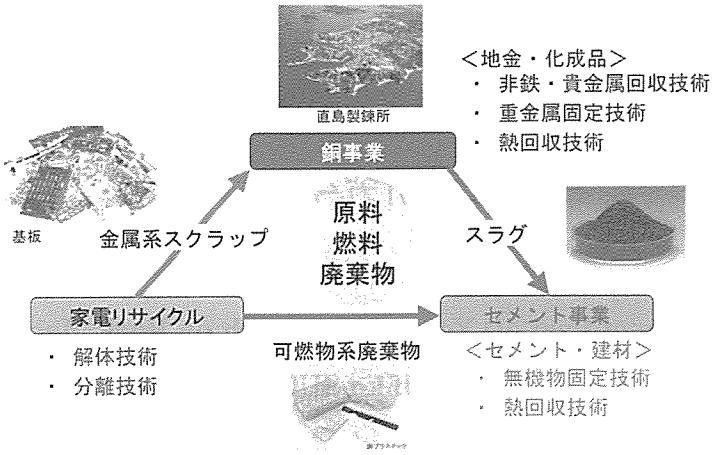


図18　総合的な廃棄物リサイクルシステム

つひとつの技術開発を積み上げている．

このように家電リサイクルが順調に普及している一方で，最近，廃家電の海外流出の問題も取り上げられている．家電の回収率は50～60%と推定され，残りは回収されずに，その多くが海外に流出していると推測されている．海外に流出した廃棄物は適正処理されず，汚染の原因となることが懸念されており，社会全体の問題として対策を立てていく必要がある．

おわりに

資源および廃棄物に関する問題は，今後の日本の発展に大きな影響をもたらすものである．本稿では非鉄材料メーカーの立場から見た現状と，三菱マテリアルとしての取り組みについて紹介したが，今後とも企業，業界を超えた取組み，行政との協調がますます重要となる．

また，課題解決に向けて，鉱山・冶金技術が果たすべき役割は大きく，基礎技術の充実，人材育成などに関しては大学の活躍を大いに期待するとともに，できうる限りの協力をさせて頂きたいと考える次第である．

参考文献

1) (財) エネルギー総合工学研究所ホームページを基に作成.
2) 「産業廃棄物の排出及び処理状況等（平成16年度実績)」環境省.
3) 独立行政法人経済産業研究所　宮川務「日本経済の成長ポテンシャル」(2006年3月6日）を基に作成.
4) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構「世界のベースメタル消費動向分析」(2006年10月12日）を基に作成.
5) 日本経済新聞（2007年4月11日付)，(財）エネルギー総合工学研究所HP，経済産業省東北経済産業局発表資料（2006年7月）を基に作成.
6) 独立行政法人経済産業研究所　社団法人資源・素材学会「主要鉱物資源の供給障害が日本経済に及ぼす影響に関する調査研究」(2002年3月）を基に作成.
7) 金属資源情報センター「金属資源レポート」(2006年7月).
8) 経済産業省「資源戦略研究会報告書」.
9) 独立行政法人物質・材料機構「2050年までに世界的な資源制約の壁」(2007年2月15日）を基に作成.
10) 「日本経済新聞」(2007年5月22日).
11) 資源エネルギー庁「原子力を巡る状況」(平成19年3月)，「原子力立国計画」(平成18年8月）を参照.
12) (財）家電製品協会「家電リサイクル年次報告書」(2005年度版）を基に作成.
13) (社）セメント協会ホームページを基に作成.
14) (社）セメント協会「セメント産業における地球温暖化対策の取組」(平成19年1月19日).
15) 「三菱マテリアル（株）直島製錬所のリサイクル事業について」(日本エネルギー学会2006年11月8日).
16) (財）家電製品協会「家電リサイクル年次報告書」(平成17年度版)

大会記念講演

岩の力学研究40年の回想

菅 原 勝 彦*

Memoirs of Past 40 Years of Research on Rock Mechanics

by Katsuhiko SUGAWARA

1. 緒 言

岩の力学研究40年というタイトルで，水曜会において特別講演する機会を得た．卒業生として，誠に光栄です．関係各位に深く謝意を表します．当日は，40分の時間を頂き，「岩の力学とは」，「なぜ，岩の力学をテーマにしたか」，「先達の教え」，「私の履歴」，「主な作品」，「教育に貢献したか，反省」など，個人的な回想を中心に講演させて頂いた．この回想を以下の小文にまとめる．

はじめに，筆者の履歴を示す．履歴は次の5期間に分けられる．すなわち，京大入学まで（1944～1963）の20年，熊大赴任まで（1964～1975）の12年，熊大における博士課程開設まで（1976～1986）の11年，大学院の部局化まで（1987～1998）の12年，そして大学院の重点化，大学の法人化から定年まで（1999～2009）の11年である．この間，1966年～2006年の40年，研究生活を送った．

2. 岩の力学とは

岩の力学は力の場における岩盤の応答に関する力学であり，研究領域は「力の場」，「岩盤」，「応答」及び「力学」に大別できる．「力の場」（境界条件）は，プレート・テクトニクスや重力，地熱などに基づく「自然の力（初期応力）」と，掘削相当外力，発破衝撃力，設備や基礎の荷重などの「人工の力」で構成され，空洞掘削などに伴い変化する．この領域では，岩盤に作用する応力（岩盤応力）の計測が最重要なテーマである．「岩盤」（地質条件）は不均質性・不連続性・異方性を有し，軟岩から硬岩まで多種・多様であり，岩盤の特性評価，その数値モデル化などが重要課題である．「応答」（現象）は掘削に伴う応力変化，応力集中，亀裂進展，音響放出（AE），ひずみの局所化，破断面形成，応力緩和，マクロな破壊などの要素現象の反映であり，これらの現象の機構解明が重要である．また，「応答」（計測）は時間依存型の相対変位，応力などとして観測され，その高精度化・多次元化などの計測技術的課題が山積している．「力学」は，試験に基づく解析と計測に基づく逆解析，並びにマクロな岩盤強度論に係わるミクロな破壊力学を含み，「力の場」と「応答」の予想計算法の開発・活用が普遍的なテーマである．岩の力学は，地下空間を拓く「掘削工学」，地質環境を究める「探査工学」などの工学，並びに地質学，地震学，地質水理学などの地球科学と不可分である．

20世紀の岩の力学は，資源開発，インフラ整備等の実際に活用され，社会的貢献を相応に果たしたと思う．資源開発では，鉱山設計，地層制御，山はね防止，残壁設計等に科学的根拠を提供し，インフラ整備等では，青函トンネルや関越トンネルなどの建設，スーパーカミオカンデのサイロ型空洞の建設，新高瀬川発電所などの揚水発電用空洞の建設（図1），串木野などでの石油地下貯蔵基地の建設等に貢献した．21世紀，筆者は，岩盤内の物質移動や化学反応の究明とともに，岩の力学が未来プロジェクト（例えば，放射性廃棄物地層処分，CO_2地下貯留，メタンハイドレート開発，地震予知など）に貢献することを期待している．

岩盤プロジェクトの殆どは地下を対象とする．したがって，ビルや橋梁のように完成物が一般の目に触れることが少ない．この点は岩の力学の魅力を減じている．そして，目に見えない複雑な地下環境は，研究が進まない原因にもなっている．しかしながら，未知なる自然が対象であり，岩盤プロジェクトの規模は非常に大きい．揚水発電用空洞の寸法は縦約 60 m，幅約 30 m，奥行き 120 m 以上であり，炭鉱における長壁式採炭パネルの寸

*熊本大学理事・副学長，大学院自然科学研究科教授

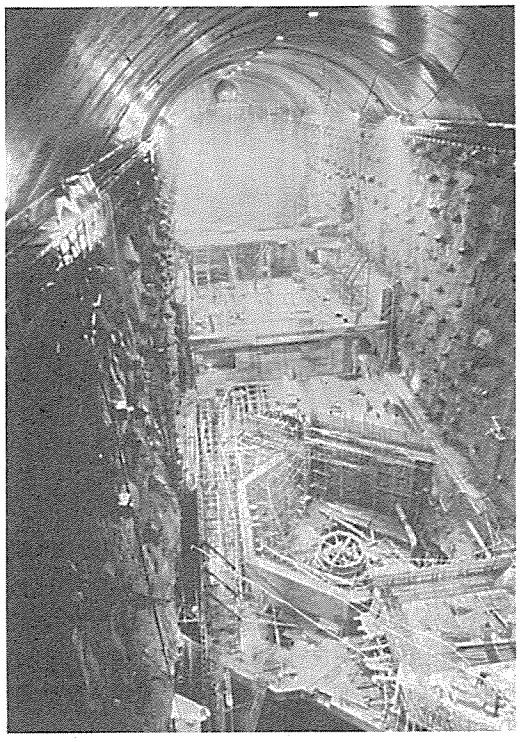


図1　建設中の新高瀬川発電所空洞

法が掘削高2m，壁面長200m，片盤長1,000m以上というケースも稀ではない．筆者にとって，この規模は大きな魅力であった．

岩盤プロジェクトは「分散型」と「集中型」に大別される．「分散型」とは，トンネルのように長大で，地域ごとに「岩盤」（地質条件）が異なり，「力の場」（境界条件）等の事前調査が困難なものである．一方，「集中型」とは，揚水発電用空洞のように比較的に狭いエリアを対象とするので，地質条件や境界条件の事前調査が可能なものである．資源開発は後者に分類できる．前者は，原因である「力の場」が未知で，「応答」のみが観察されるので，力学研究の対象として魅力に欠ける．後者は，「力の場」，「岩盤」及び「応答」の基本情報に基づく解析・逆解析・将来予測が可能な環境にある．この点に注目した筆者は，「集中型」の研究に取り組み，その成果を「分散型」に適用することが合理的であると考え，主に「集中型の岩盤プロジェクト」に参画し，これに貢献すべく研究を行った．

3．先達の教え

この小文を若い方が読まれることを期待して，参考になるかどうか，疑問であるが，つぎの一歩の決心に悩む筆者が頂いた「先達の教え」を少し紹介させて頂く．

筆者は東京都中野区の出身で60年安保に遭遇した世代である．高校時代，勉強よりデモに多くの時間を費やした．従兄弟の松井作治は，京大進学時に「学生運動にハマルな」と釘を刺した．叔父の竹内源三郎は，「何時か人の役にたて」と激励した．修士課程在学の筆者に，成瀬一郎先輩は炭鉱で「平常心で今に全力を」と激励した．友人の川田稔彦氏は就職で悩む筆者に「男なら運命を受け入れろ」と決心を促した．恩師の平松良雄教授は，博士学位論文の査読過程で「全方位で見よ」と諭した．また，恩師の岡行俊先生は，「破壊力学の研究は後にしろ」と研究戦略を教示された．鹿島建設では，「ベストな顧客サービス」の重要性を学んだ．そして，筆者が働いた青函トンネルの現場で，東大名誉教授の茂木清夫先生から「研究の普遍性と国際性」を教授され，「茂木式研究法」を学んだ．同西松裕一教授は「海外に同世代の友人を持て」と言われた．この他にも，多くの方々から貴重なご教示を頂いた．優柔不断な筆者の今日は，これらの教えに負っている．

茂木先生は，実験の重要性について，「高精度な実験を行って，その実験値がカーブを描きそうだと気づいたとき，想像のカーブとともに実験結果を論文報告してはいけない．実験数を増やしなさい．もしも，カーブが確かめられたら，さらに百回以上の実験をしなさい．この段階では，想像のカーブを描かずとも，整然と並んだ実験値が確かな法則性を明示するので，後の人が再実験する必要がない」と言われた．「研究の普遍性と国際性」については，少し違和感があったと記憶する．諸条件の下で最良の「ものづくり」を目指す技術者にとり，対象の地域性の解明と「ものづくり」の結果評価が最も重要であると思われたからである．

4．共同研究等の思い出

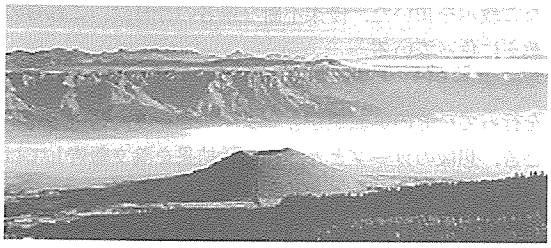
京大入学から熊大赴任までの12年，熊大における博士課程開設までの11年，大学院の部局化までの12年，その後の11年に分けて，履歴を辿りつつ，忘れ難い方々のお名前とともに，共同研究等の思い出を記す．

工学部資源工学科の一期生として京大に入学した筆者は，平松良雄教授と岡行俊助教授のご指導の下で，1968年卒業，引き続き，修士課程，博士課程に進学し，1972年単位修得退学した．研究室においては，木山英郎博士，日比野敏博士，水田義明博士，斉藤敏明博士，厨川道雄博士，棚橋由彦博士，亀岡美友博士，石田毅博士など多くの優秀で頼れる先輩・後輩に恵まれた．現在も平松研懇談会による交流等が続いている（図2参照）．

1972年から1976年まで，鹿島建設株式会社（鹿島建設技術研究所）に在籍し，1973年に平松良雄教授のご指導で「山はね現象に関する研究」をまとめ，京大から工学博士の学位を得た．この間に，新高瀬川地下発電所



図2 平松研懇談会の学生メンバー
（前列左から，水田，厨川，日比野，棚橋，後列左から，石田，木山，斉藤，筆者，亀岡，敬称略）



中央は阿蘇の米塚



熊大構内の五校記念館の正面

図3 熊本の自然，阿蘇の米塚と五校記念館

工事，青函トンネル建設竜飛等に携わり，御牧陽一博士，青木謙治博士等と共同した（図1参照）．

自然に恵まれた熊本大学（図3参照）には1976年に工学部助手として赴任し，1978年に同講師，1980年に同助教授，1987年に同教授となった．当時，大学院は修士課程だけの工学研究科であり，博士課程の開設が悲願であった．水田義明博士，江崎哲郎博士と共同して，西日本岩盤工学研究会を立ち上げシンポジウムを毎年開催する等，精力的に活動した．金子勝比古博士とは毎年海外出張し，英文誌「Mining Science & Technology」(1983～1991）の編集では，University of Nottingam (UK) の Dr. B.N. Whittaker, Dr. F.P. Hassani らと共同した．この間の共同研究としては，兼重修教授，岡村宏助教授との遠心載荷模型実験法の研究，斉藤敏明博士とのコア・ディスキングの研究，木村治博士との三池炭鉱の山はねに関する研究，金子勝比古博士との地圧と破壊音（AE）に関する研究などがあり，共同研究の成果は，岡村宏博士「緩傾斜炭層の採掘に伴う地表沈下に関する研究」（京大学位論文，1977），谷本親伯博士「Tunnelling in rock with rockbolts and shotcrete」（京大学位論文，1980），林田秀文博士「採炭に伴う地表沈下の制御に関する研究」（早大学位論文，1982），秋本昌胤博士「石灰石露天掘斜面の安定性に関する研究」（早大学位論文，1984），尾原祐三博士「不連続岩盤の力学挙動に関する基礎的研究」（名大学位論文，1986），村田博之博士「破砕・粉砕現象の力学的解析並びに破砕・粉砕機の開発に関する研究」（京大学位論文，1989）等に収録して頂くことができた．

熊大では，1987年に，工学部と理学部を母体として自然科学研究科（博士課程）が開設され，「大学院の部局化」が次の目標になった．つまり，専任教官をもつ大学院として同研究科を拡充することを目指した．その後の12年間に，1997年の工学部百周年，国際会議「Rock stress σ_2」の主催などで，多くの方々からご支援を頂いた．同会議では，米国の University of Wisconsin の Prof. B.C. Haimson, University of Oklahoma の Prof. J.C. Roegiers, 英国の Imperial College の Prof. J.A. Hudson, スウェーデンの Royal Institute of Technology の Prof. O. Stenphansson, フランスの Institut de Physique du Globe de Paris の Prof. F.H. Cornet, 韓国ソウル大学の Prof. Chung-In Lee, Prof. Hi-Keun Lee, オーストリアの Technical University of Vienna の Prof. H.P. Rossmanith らと共同した．当時の共同研究としては，尾原祐三博士との球面孔底ひずみ法や境界要素・特性曲線結合法（BEM-CM）の開発，金子勝比古博士との変位不連続法（DDM）の研究，中山智晴博士とのベ

ンチカット発破起砕成績の迅速評価に関する研究などが挙げられる．また，優秀な学生を指導する機会に恵まれ，青木俊朗博士「大空洞周辺岩盤の力学的挙動の解析と応力状態の調査に関する研究」（熊大学位論文，1991），柴拓海博士「鉱柱および岩盤の変形性評価法に関する研究」（熊大学位論文，1991），平田篤夫博士「トンネル掘進発破による地盤振動の予測法に関する研究」（熊大学位論文，1992），坂口清敏博士「円錐孔底ひずみ法による岩盤応力測定に関する研究」（熊大学位論文，1994），蛭子清二博士「鉄塔基礎用ロックアンカーの引抜き耐力に関する研究」（熊大学位論文，1995），竹原孝博士「高速水噴流の壊食作用に関する基礎的研究」（熊大学位論文，1996），大石朗博士「近畿地方における深部地熱資源の調査と評価に関する研究」（熊大学位論文，1996），黄醒春博士「岩盤内の初期応力状態の評価に関する研究」（熊大学位論文，1996），張鉉國博士「コンパクトオーバーコアリング法を用いた3次元岩盤応力の原位置測定に関する研究」（熊大学位論文，1996），野口義文博士「露天掘鉱山における長大残壁の安定性評価に関する基礎的研究」（熊大学位論文，1999）などの主査を務めた．

1998年，工学研究科との統合で「大学院の部局化」，すなわち，自然科学研究科（博士前期課程・博士後期課程）の整備を終え，1999年大学院教授を拝命した．

2000年～2003年評議員，2004年～2005年研究科長，2006年から理事・副学長として，大学の管理・経営に携わる機会を得た．また，2001年から2ヶ年，岩の力学連合会理事長として学会の改革・運営に携わった．この間に，多くの方々のご支援の下，2003年に国際会議「Rock stress σ_3」（Editor: 筆者，尾原祐三教授，佐藤晃博士），並びに「Geo-X 2003」（Editor: 大谷順教授，尾原祐三教授）が熊本で開催された（図4）．

研究面では，Dr. T.R. Reid とのX線CTを用いた岩石の透水試験法の研究（A summary of the activities of a visiting researcher at Kumamoto University, 2000），佐藤晃博士らとのX線CT法の応用研究，亀裂投影法による亀裂開口幅測定等の研究，尾原祐三教授との小型円錐孔底法（CCBO）の高度化などが挙げられる．また，博士課程の学生としては，Seong-Seung Kang 博士「Measurement and interpretation on stress history of a limestone deposit」（熊大学位論文，2000），椋木俊文博士「地盤工学におけるX線CT法の適用に関する研究」（熊大学位論文，2001），平川芳明博士「亀裂開口依存率による地下発電所空洞の安定性診断」（熊大学位論文，2003），中村直昭博士「石灰石露天掘鉱山における残壁の力学的挙動に関する研究」（熊大学位論文，2003），留学生の Hae-Sik Jeong 博士「Fundamental study on the mechanical behavior of rock under various surrounding environments」（熊大学位論文，2003），Lohrasb Faramarzi 博士「Evaluation of rock mass deformability by means of in situ loading tests」（熊大学位論文，2005），さらに，深堀大介博士「X線CTを用いた岩石水理試験法に関する基礎的研究」（熊大学位論文，2007），鈴木康正博士「地下空洞の長期安定性に関する基礎的研究」（熊大学位論文，2007）が記憶に新しい．

5. 研　究　紹　介

5.1　「力の場」：岩盤応力の高精度測定

応力場の高精度3次元測定の研究に軸足を置きつつ，筆者は，伝統ある熊大の静かな環境で研究する機会に恵まれた．絶対応力を求める応力解放法に関して，平面孔底法，球面孔底法，円錐孔底法というように，高感度の孔底形状を追求し，最終的に，尾原祐三教授と CCBO 法を開発した（Y. Obara & K. Sugawara: Updating the use of the CCBO cell in Japan: overcoring case studies, Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci. Geomech. Abstr., 40, 1189-1203, 2003）．本法は，Int. Society for Rock Mechanics の Suggested Method に採用されている．

CCBO 法の適用例として，神流川地下発電所工事に

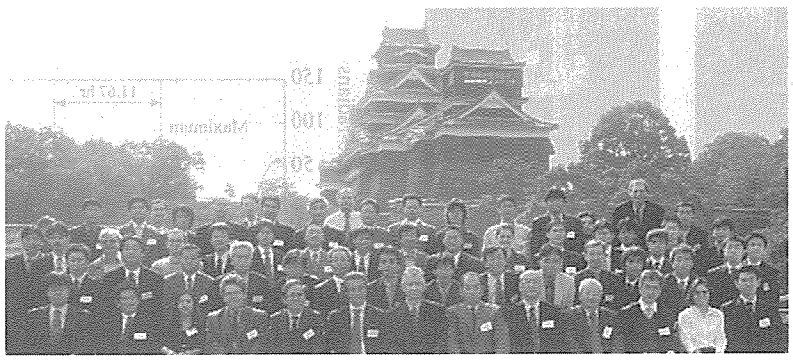


図4　国際会議「Geo-X 2003」の記念写真

おける応力測定を図5に示す．発電所空洞のベンチ掘削の中間段階（左）と最終段階（右）の比較である．図はそれぞれ空洞の横断面の半分を示し，数字は面内主応力（単位：MPa）である．壁面近傍の緩み域の応力から残留強度特性が，また，その外周部における応力集中から岩盤のピーク強度特性が推定できる．このように応力測定の応用範囲は広い．

新高瀬川地下発電所の工事に携わったご縁で，東京電力株式会社には，応力測定試験等で多大のご協力を継続して頂いた．また，玉原，今市，葛野川，蛇尾川，神流川等の揚水発電所工事における目覚しい技術革新（機械掘削法，情報化施工法等）を目撃した．とくに，工藤奎吾博士との交流で多くの知見を得ることができた．

なお，揚水発電用空洞のような長大地下空洞に関しては，現在，その長期安定性の検証が重要な課題である．

5.2　「応答」：高感度傾斜計による移動載荷試験

岩盤の「応答」に関する研究から，GPSと高感度傾斜計の活用について述べる．図6の左の写真は，日鉄鉱業株式会社の鳥形山鉱山に設置した7台のGPSの1つで，露天掘斜面の相対水平移動の監視に役立てている．しかしながら，鉱山開発が長期に及ぶので，GPSによって，筆者の活動中に有為なデータを蓄積することは難しいと考えた．そこで，リアルタイム・データを得るために，米国のピナクル社の高感度傾斜計（図6の右の写真）の活用に取り組んだ．

ナノ単位の高感度傾斜計を用いて行った移動載荷試験のレイアウトを図7に示す．この実験は，日鉄鉱業の協力で，金子勝比古教授，尾原祐三教授の指導の下，中村直昭博士らが実施したものである．ピット内の水平な地表上で稼動する重機（70トン）の影響を鉛直孔内に埋設した高感度傾斜計（図のB）でモニターする．重機の停止中には，地球潮汐による傾斜の年変化，月齢変化等に加え，毎日の干満に影響された周期的な初期傾斜曲線が求められる（図8）．このとき，遠隔地の地震や発破で地盤が揺れると，信号のジャンプと回復が記録される．また，初期傾斜曲線上の峰（満潮）と谷（干潮）の間に現れる線形な時間領域の中央を選んで，重機を前進・後退させると，これに応じた傾斜の増減が観測される（図9）．したがって，図9に例示したように初期傾斜曲線を内挿して，重機の荷重（移動荷重）に起因する傾斜を抽出することが可能になる．移動荷重に起因する傾斜を

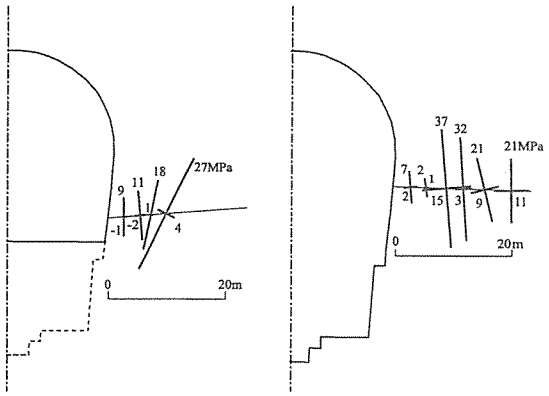
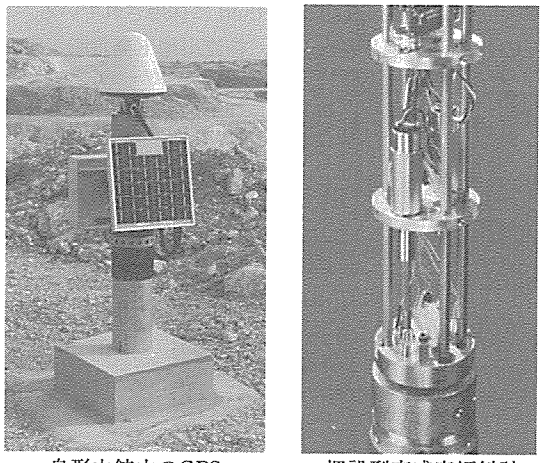


図5　CCBO法による神流川発電所空洞周りの応力測定



鳥形山鉱山のGPS　　埋設型高感度傾斜計

図6　鳥形山鉱山のGPSとピナクル社の高感度傾斜計

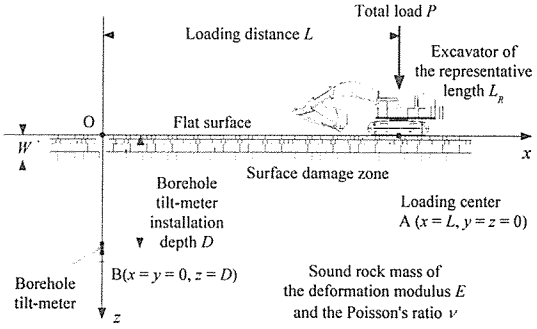


図7　高感度傾斜計を用いた移動載荷試験のレイアウト

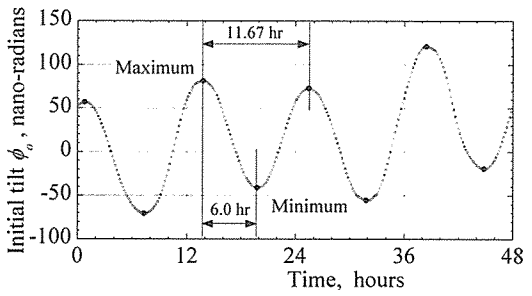


図8　満潮と干潮に対応する周期的な初期傾斜曲線

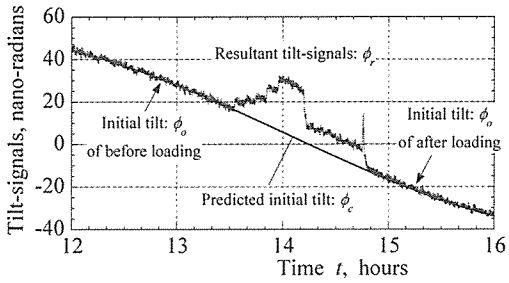


図9　初期傾斜曲線と移動荷重による傾斜の増減

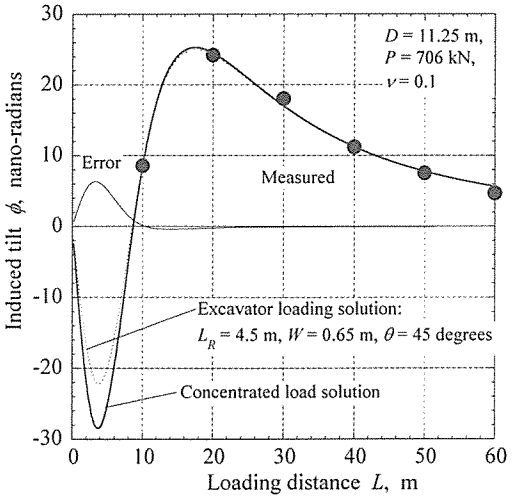


図10　移動荷重に起因する傾斜（ϕ）と距離（L）の関係

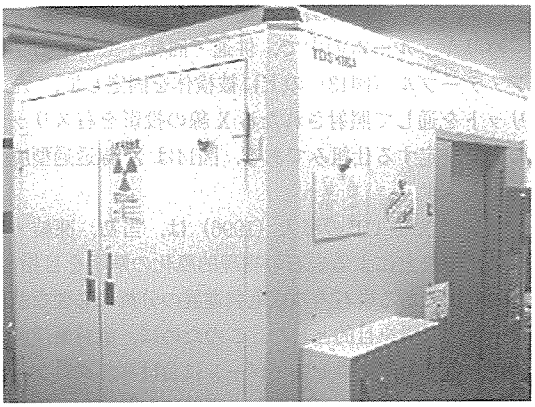


図11　産業用X線CTスキャナーのバリヤ・ルーム



図12　産業用X線CTスキャナーの解析装置

観測点と重機の水平離間距離の関数としてプロットすると，図10のようである．同図は，適切な力学モデルの適用により，岩盤マスの変形係数などが評価できることを示している（K. Sugawara, L. Faramarzi and N. Nakamura: Determination of Rock Mass Deformation Modulus by Means of Traveling Load Tests, Part II: Practice of Traveling Load Test in Open Pit, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., 43, 192-202, 2006）．

上記の実験によって，地球潮汐が高感度計測の限界を規定することが確認できた．言い換えると，リアルタイムで岩盤応答を求めるには，地球潮汐の予測とその影響の除去が不可欠である．また，計測系が高感度であると，僅かな外力で起きる遠隔地の微小な岩盤ひずみが測定できること，荷重点（入力）と観測点（出力）の間の岩盤の特性評価が可能であることなどの知見が得られた．

ところで，荷重点の変形から岩盤特性値を評価する既往の簡易試験（ジャッキ試験等）では，どの深さまでの岩盤特性が求められるか不確かであり，結果に寸法効果が認められる．日比野敏博士は試験のスケールが大きいほど得られる変形係数の値も大きいと報告しているから，試験結果は工学的なインデックスの域を出ていないと思われる．

このような従来法の限界を打破する上で，高感度計測による移動載荷試験法は有望であると考えられる．筆者は，将来，地下空間用の移動載荷試験法が開発され，21世紀の地下空間開発における事前試験法・事後検証法等として発展することを期待している．

5.3　熊大 Geo-X センターにおける基礎研究

熊大 Geo-X センターは，X線CTによる土木材料・環境材料等の非破壊実験場として，全国の研究者・技術者にご利用頂いている．X線CTは医療検査分野で広く知られた技術であり，周知のように，投影データの再構成による2次元画像の作成，並びに2次元画像の重ね合せによる3次元画像の作成に威力を発揮している．最近は，Micro Focus CT, Synchrotron Radiationというように，被検体の小型化が進み，高エネルギー化等により，分解能が飛躍的に向上したが，熊大 Geo-X センターは大型被検体を実験するため，東芝製の産業用X線CTスキャナーを装備した（図11，図12）．最近リニューアルを終えた同装置は，ボクセル・サイズ 74μm x 74μm

x 1 mm までの画像収録が可能である．

バリヤ・ルームの中で，併進・回転・上下するターン・テーブル（図13）の上に被検体を固定して，左スリットを通して照射されたるX線の投影を右スリットの奥で測定する仕組みである．図14はX線透過型圧力セルを示す．

産業用X線CTの導入（1996）は，当初，凍結・融解の反復などによる岩石の物理的風化の解明を目指し，その原因である岩石内の緩亀裂進展の分析に必要な基礎データの取得を目的とした．このために，亀裂画像の鮮鋭化，亀裂先端プロセス・ゾーンにおけるミクロン・オーダーの開口変形の測定などの課題に取り組み，乾燥画像と飽和画像を用いた亀裂抽出の画像間演算法，開口幅を測定する亀裂投影法等を考案した．1例として，差画像処理による亀裂抽出を図15bに示す．図15aの原画像と較べて明らかに，岩石に特有な密度不均質が消去されている．

その後，各種の非破壊試験に取り組み，必要な装置開発を行っている．図14の透水試験用圧力セルはその1つである．X線透過型圧力セル等の改良を重ね，ひずみの局所化プロセスを分析する封圧下圧縮試験，飽和岩石内の透水場を可視化するトレーサー透過試験，物理的濾過プロセスを分析する懸濁液濾過試験，砂岩への超臨界CO_2の影響をモニターする耐久性試験等を継続中である．

最近行った懸濁液濾過試験を図16に例示する．懸濁液に含まれる微粒子の濾過吸着（図16a）を調べる試みとして，飽和ポーラス・ストーン（図16b，間隙径50～100μm）の試験片（5cm x 5cm x 3cm）の側面をシールして，タンカルの懸濁液（図16c，平均粒子径1μm）を上面から流し込む．図16dは濾過後のタンカル粒子の透視画像である．

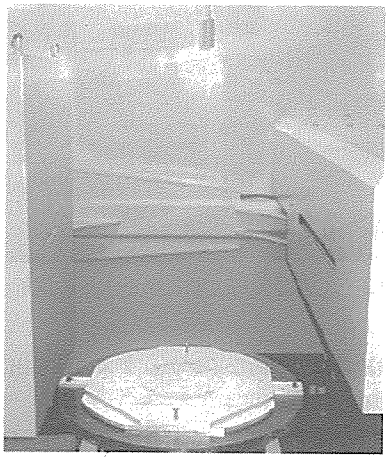


図13　バリヤ・ルーム内のターン・テーブル

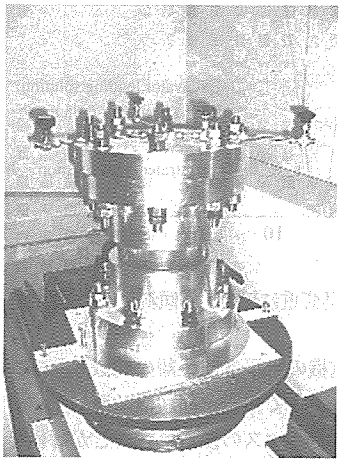
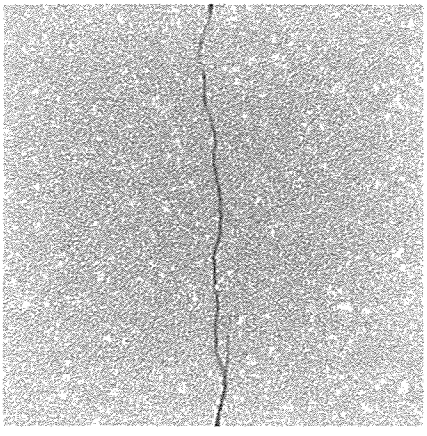
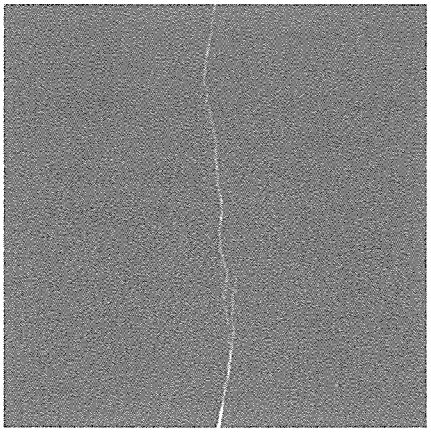


図14　ターン・テーブル上の透水試験用圧力セル

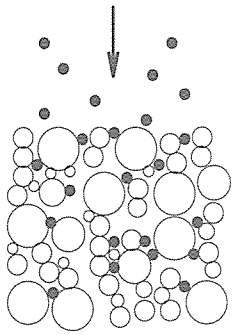


a：亀裂の原画像

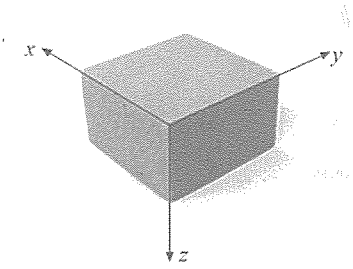


b：差画像

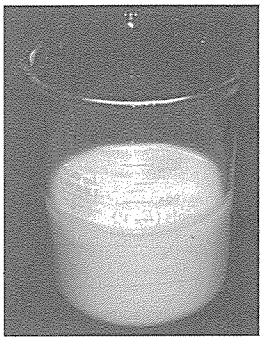
図15　差画像処理による亀裂の抽出例



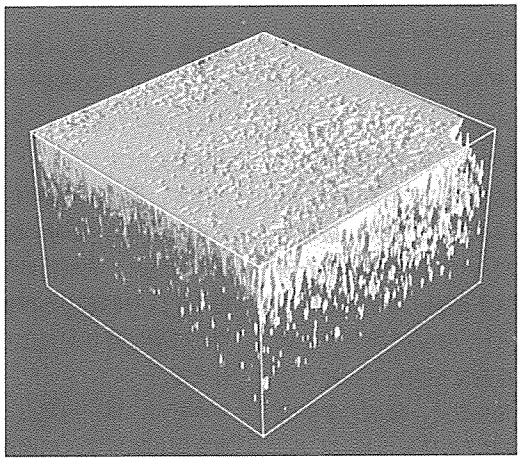
a：濾過吸着の模式図



b：ポーラス・ストーン

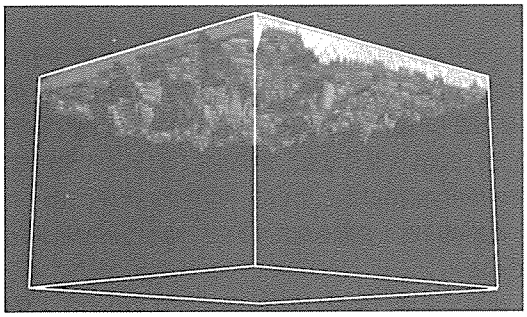


c：タンカル懸濁液

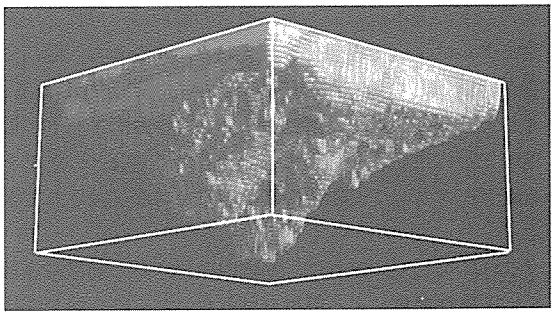


d：濾過後のタンカル立体画像（白：タンカル高濃度域）

図16　X線CTを用いた懸濁液濾過試験



a：上面付近に堆積しているタンカルの透視画像



b：純水の下向き流れで運ばれたタンカルの透視画像

図17　純水を用いたタンカルの輸送試験

つぎに，純水によるタンカル粒子の輸送試験を図17に例示する．図17aの透視画像は上部に堆積するタンカルを示し，図17bは純水の下向き間隙流れで運ばれたタンカルの透視画像である．中央部に選択的輸送が認められる．

懸濁液の岩石間隙内輸送は，液体中での微粒子の沈降，流入面での粒子の堆積，懸濁液の流入・移流，間隙内での濾過吸着，微粒子の蓄積，逆流による再吸着など，間隙径，粒子径等に依存する多様かつ複雑な要素現象で構成され，その解明は近未来岩盤プロジェクトに不可欠であると考えられる．X線CTを用いた輸送実験法の開発研究は緒についたばかりであるが，筆者は，有望であると考える．

5.4　相互干渉緩亀裂進展によるマクロ破壊の分析

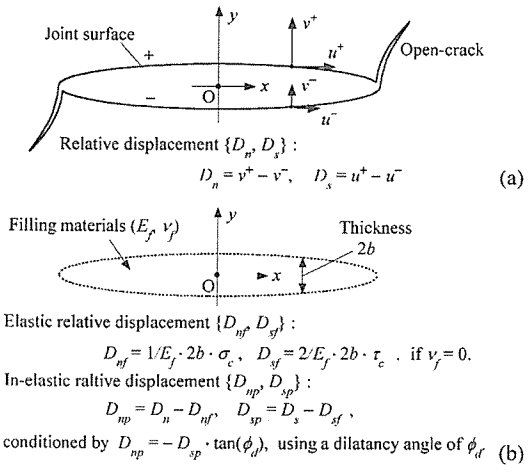


図18 圧縮性節理モデルの説明図

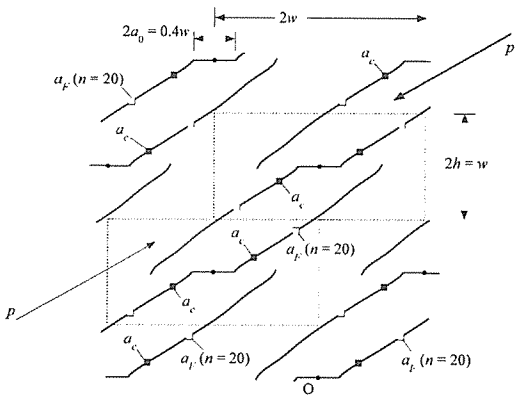


図19 1軸圧縮の負荷（p）によるモードⅠ亀裂進展（千鳥配置単一亀裂セットの均質化節理モデル）

恩師岡行俊先生の教示：「破壊力学の研究は後にしろ」に従い，残しておいた破壊力学の研究に定年が近づいたこの10年ほど挑んでいる．先生の教えは，当時，破壊力学に没頭する筆者に対する警告であり，趣旨は優れた研究成果を出すのが難しいからポストが固まるまで業績を挙げやすい研究を優先しなさいというものであったと解釈している．グリフィスなどの原論文を用いて夜遅くまで個人教授して下さった岡行俊先生こそ，破壊力学が頭から離れなかったと思う．「破壊力学の研究は後にしろ」は，先生がご自身に向かって発した言葉のように思える．

さて，岩盤のマクロな破壊の機構解明は，言を待たず，岩の力学の基本課題である．硬岩の節理は一般に非圧縮性モデルによって理想化されている．すなわち，開口するが，閉口しない有限の不連続面として理想化される．そして，開口変形モード，あるいは混合変形モードの節理の先端に生じるキンクのモードⅠの破壊などの解析を基礎データとして，岩盤の破壊プロセスが議論されてきた．

これに反して，筆者は，節理内のゴージの効果に注目し，圧縮性節理による解析を試みた．とくに，同じ性状の圧縮性節理が規則的に配置された均質化節理モデル（2次元）を組み立て，多数の節理の相互干渉場でのモードⅠの亀裂進展の高精密解析法：応力補償変位不連続法（SC-DDM）を開発した．これは任意の形状の圧縮性節理の全面滑り問題に適用できる．本解析は，相互干渉型亀裂進展に特有な耐力増大過程（Toughening process）から耐力減少過程（Softening process）への遷移の分析等を可能にしており，筆者は，ミクロの緩亀裂進展に基づくマクロな岩盤強度論の構築に有用な基礎資料を提供すると考えている．以下，モデルと解析を例示する．

まず，節理は充填物で満たされた扁平な開口であるとする（図18）．節理の変形はその上下面の間の変位不連続で表され，充填物は節理の内部応力に対応した変形を起こす．内部応力が摩擦基準を満たすとき，充填物と節理面の間に滑りが起こり，ダイレイタンシーが生じると考える．

つぎに，単一節理セットの千鳥配置の均質化節理モデルを図19に示す．同図がモードⅠの亀裂進展図であることに注意されたい．初期状態の節理（長さ：$2a_0$）は，その延長方向に $2w$ の間隔で，垂直な方向に $2h$ の間隔で整列しており，これらを含む無限媒質が解析の対象である．図19においては，斜め45度の方向に巨視的に一様な1軸圧縮の負荷（p）が作用している．節理の内部応力は全面滑り状態にあり，閉口モードの破壊ローカス（最大周方向応力基準と同等）に従って，圧縮性節理の先端に Kink（開口亀裂）が発生し，これが1軸圧縮負荷の作用方向に成長している．均質化の原理に従い，全ての節理は同じ変形を起こすので，亀裂進展形状も合同である．

成長する開口亀裂の先端のモードⅠの応力拡大係数（K_I）が臨界値（K_{IC}）になるために必要な巨視的負荷を臨界圧（p_c）と呼ぶ．臨界圧（p_c）は亀裂の成長とともに変化する．この関係は図20に小白丸を結ぶ曲線（臨界圧・亀裂進展長曲線）で例示するようである．同曲線の縦軸は臨界圧（p_c）と臨界引張強度（T）の比（p_c/T）であり，横軸は成長した開口亀裂の長さ（a）と圧縮性節理の半長（a_0）の比（a/a_0）である．亀裂と節理の全長は $2(a+a_0)$ である．臨界圧（p_c）は最大臨界圧（p_{cmax}）まで増大し，その後で減少に転じる．最大臨界圧（p_{cmax}）の亀裂進展長をピーク時亀裂進展長（a_c）と呼ぶ．例示

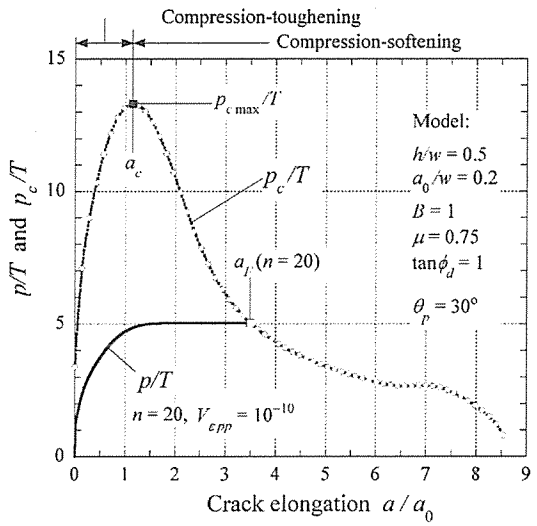


図20　1軸圧縮における臨界圧・亀裂進展長曲線と負荷応力・亀裂進展曲線の例示

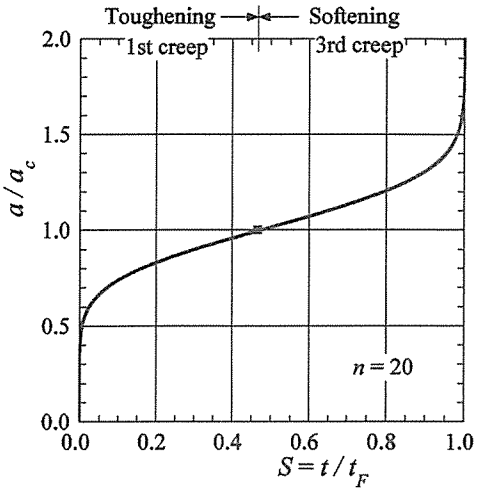


図21　1軸圧縮クリーク試験の解析例

したピーク時亀裂進展長（a_c）は節理の半長にほぼ等しい．Kink の発生からピークまでを耐力増大過程(Compression-toughening process)，ピーク後を耐力減少過程（Compression-softening process）と呼ぶ．ピークの出現は相互干渉型のモードⅠの亀裂進展に特有な現象であり，最大臨界圧（p_{cmax}）は急速負荷時のマクロな圧縮強度に対応し，その大きさは節理間隔等に依存する．

図20の太曲線は，負荷応力・亀裂進展曲線（$p/T-a/a_0$）である．この解析には純粋なモードⅠの緩亀裂進展に関する経験則（亀裂進展速度 $v=da/dt$ と応力拡大係数 K_I の関係 $v/vc=(K_I/K_{IC})^n$）を用いた．ただし，n 値＝20，負荷方向の巨視的な無次元ひずみ速度 $V_{epp}=10^{-10}$ の場合である．

負荷応力・亀裂進展曲線と臨界圧・亀裂進展長曲線との交点（図の白四角）において，応力拡大係数 K_I は臨界値（K_{IC}）に等しくなり，亀裂進展速度 $v=da/dt$ は臨界速度（v_C）に達する．したがって，この段階の負荷がマクロな圧縮破壊強度である．対応する亀裂長さを臨界亀裂進展長 a_F と呼ぶ．例示した臨界亀裂進展長は節理の半長（a_0）の約3.5倍である．この関係は図19に既に描かれている．

クリープ試験における亀裂進展長・時間曲線やひずみ・時間曲線の解析も可能である．1例として，圧縮クリープ試験における亀裂進展長・時間曲線の解析を図21に示す．横軸は寿命 t_F で無次元化された時間である．耐力増大過程（Toughening process）における亀裂進展速度の漸減が1次クリープの原因であり，耐力減少過程(Softening process) は3次クリープをもたらす亀裂進展速度の増加領域である．また，両者の中間に亀裂進展速度がほぼ一定な領域が存在し，2次クリープに対応していると考えられる．

以上の SC-DDM による緩亀裂進展の解析から得られるマクロな圧縮破壊強度と負荷速度の関係や，クリープ試験における負荷応力の大きさとクリープ寿命の関係は，従来の検討結果や実験結果と一致しており，SC-DDM 等による相互干渉亀裂進展解析は，今後，岩盤の長期強度の評価や岩盤構造物の長期安定性を検証する際に有用な基礎資料を提供すると考えられる．

6. 結　　言

まず，岩の力学に関する私見を示し，20世紀における社会的貢献等について述べた．つぎに，感謝を込めて先達の教えを回想し，共同研究等の思い出をまとめた．

つぎに，21世紀を展望するため，筆者の研究を紹介させて頂いた．そして，CCBO 等による応力測定が，「力の場」の決定に止まらず，岩盤強度の実測に道を拓くと論じた．また，移動載荷試験を例示して，新しい地平を拓く高感度計測を奨励するとともに，高感度リアルタイム計測では，地球潮汐の予測等が課題であると論じた．また，亀裂を介した諸現象の解明には，X 線 CT 等による基礎的研究が重要であると述べた．最後に，相互干渉型亀裂進展の数値解析，臨界圧・亀裂進展長曲線の解析，緩亀裂進展によるマクロな破壊の解析等の重要性と将来性について述べた．

筆者は，既存の長大地下空洞の長期安定性の検証など，岩の力学の基本問題の解決に更なる理論研究の充実・発展が不可欠であり，プロジェクトが停滞している今日こそ，基礎研究の展開・強化が肝要であると考えている．

談　話　室

マラウイの非金属鉱産物事情

横　山　芳　泰*

Consideration of Non-Metallic Minerals in Malawi

by Takehiro YOKOYAMA

1. はじめに

2006年3月末～11月末の8ヶ月間，JICA（国際協力機構）の短期シニア海外ボランティアとして南部アフリカの小国マラウイに滞在した．指導科目は「非金属鉱物資源」で，当国で産出される陶磁器用粘土や貴石・宝石用原石の生産・加工および流通等の現況を調査し，当国の産業の育成・発展に活用すべく提言・指導を行う，というものである．ここではその成果の一部を現地での生活状況も交えて紹介する．

2. マラウイの概況

マラウイは，北をタンザニア，北西部をザンビア，その他をモザンビークに囲まれた南緯15度あたりに位置する南北に細長い内陸国である．口の中で子供を育てるという珍しい魚「カワスズメ」が棲息するマラウイ湖が国土面積の1/4を占めていて（四国の1.5倍で最大深度706 m），ユネスコの世界自然遺産にも登録されている．国土面積は日本の1/3弱，人口は1/10弱．一人当りのGDPは605 US$（2003年現在）．時差は日本-7時間．1964年に独立するまでイギリスの保護領だった関係で公用語は英語（現地語はチチェワ語）で，宗教はプロテスタント系のキリスト教が主体である．世界最貧国の一つで，一日1 US$以下で生活せざるを得ない人が国民の50%以上と言われている．またHIV/エイズの感染率が高く（実質30～40%?），マラウイ国民の平均寿命は40才弱となっている．主要産業は農業で，紅茶・砂糖・タバコ等は重要な輸出品となっているが，資本は南ア他の外国企業に握られていて当国への見返りは思うほど無い，というのが実情である．

3. 配属先と要請の背景

マラウイ国政府はかねてより「貧困撲滅戦略」および「経済発展戦略」の一環として，天候に左右され易い農産物に加えて，当国で産出される各種鉱物資源（ウランやボーキサイト・宝石類等を含む）に付加価値をつけて輸出増進等により産業発展に役立てるべく，探鉱や採掘に特別のLicenceを与えたり，開発ローン等の資金援助を用意して投資者を募る等の努力をして来た（鉱業の当国経済への貢献度はGDPのわずか1%程度にしか過ぎない）．

今回の配属先は，Ministry of Industry, Science and Technology（産業科学技術省）管轄下のMalawi Industrial Reserch and Technology Development Centre（MIRTDC；マラウイ産業技術開発研究所）で，農産品加工機器の開発・販売等による農民の生計多様化に力を入れてきたが，他方これまで着手されていなかった当国の非金属鉱物資源の調査等を行い，可能性があれば将来的にこれらの資源を用いた産業を育成していきたい，という意向を持っている．今回のJICAの業務はこの要請を受けたものである．

赴任地は首都Lilongweの南360 kmほどの所にあるBlantyreという標高1,000 m余りの高原に位置する商業都市で，人口は50万人ほど．往時この地を探検したスコットランド人のリビングストン出生の村の名前にちなんで名づけられたということである．

4. 業務内容

今回の実務内容は滞在期間を考慮して，①当該鉱物資源の賦存状況を確認すること，②産出・加工・流通等の現況を調査し，さらに関連法制度の実態を把握すること，③現状の問題点を整理すること，の3点に絞って実施す

*現　JICA（国際協力機構）シニア海外ボランティア

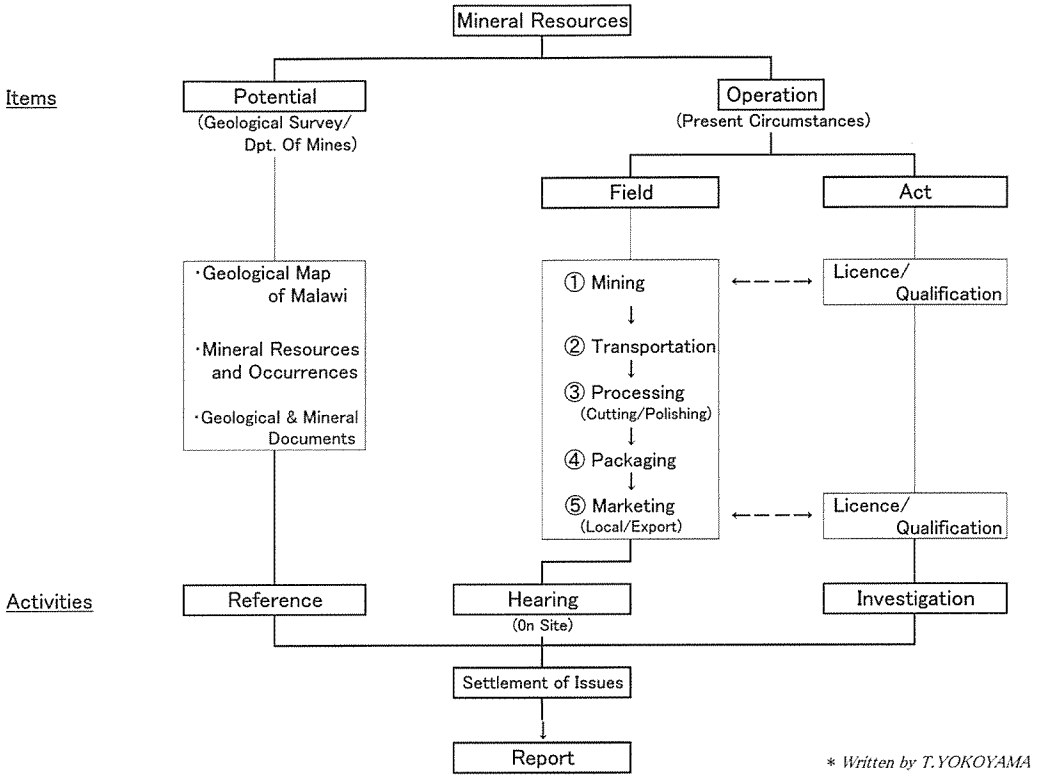


図 1　Flow Chart of Works

ることにした（図-1参照）．配属先の MIRTDC には地質や鉱産物に関する知識を持った人材は皆無だったので，現実には要請に対して当方の計画を提示して，Blantyre にある鉱山局出先の Regional Mining Office (South) に滞在する Mining Engineer を紹介してもらい，相談しながら実務を進めていった．

①に関して

Blantyre から北東方に 70 km ほど行った所に Zomba という旧首都があり，先ずここにある Geological Survey Department（地質調査所）の所長を訪ねて，当国で産出する鉱産物事情他のヒヤリングを行い，Mineral Resources and Occurrences 他の関連資料を入手した．またその後も地質技術者たちから探鉱状況等のヒヤリングをしたり，資料室で各地区の詳細な地質図（S＝1/100,000）と説明書等も入手した．さらに鉱山局から Mining Economic Report 他の当国鉱産物の動向に関する資料をも入手した．

②に関して

以上の資料を基にしてマラウイ全土の視察希望採掘場一覧を作成し，うち20数ヶ所の宝石類や装飾石関係の採掘現場およびリン鉱石・希土類・石灰岩・各種花崗岩・カオリナイト粘土等の賦存地区他を視察して，ヒヤリング他により産出状況（種類・量他）およびそれに伴う問題点等の実態を調査した（写真-1, 2参照）．また，5月に Blantyre で開催された International Trade Fair に出展していた当国の宝石加工業者や宝石の原石を取り扱うビジネスコンサルタントをその後頻繁に訪ねて，切削・研磨等の加工状況を視察したり，品質や流通事情の問題点等をヒヤリングして実態を把握することに努めた．

北部の宝石原石の集散地 Mzimba で開かれた宝石関連の Small-scale miners（零細採掘業者）と鉱山局本部担当者たちとの懇談会にも出席する機会があり，原石の売買方法を改善して欲しいとか，不法な密輸を取り締まるべきだ，等の業者側からの切実な訴えを目の当たりにした．また地質の知識を身につけたいという要望もあった．一方，探鉱・採掘・流通等に関する登録制等法制度の冊子を鉱山局から入手した．

③に関して

以上より収集した資料から各種問題点を整理して課題をまとめ，必要な対応策を包括的に提示した．

5. 調 査 結 果

調査結果より，当国には想像していた以上のほとんどの（ルビーやエメラルドを含む）貴石・宝石が賦存し採掘されていることを実感した．中でも青瑪瑙・ローズク

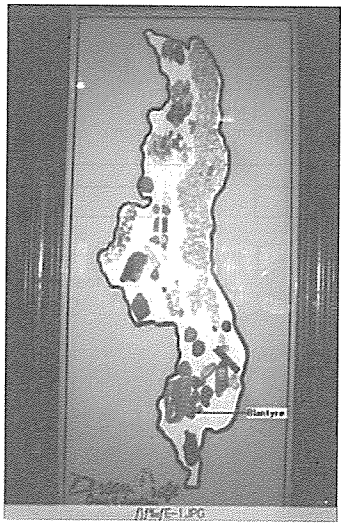


写真1 宝石地図模型

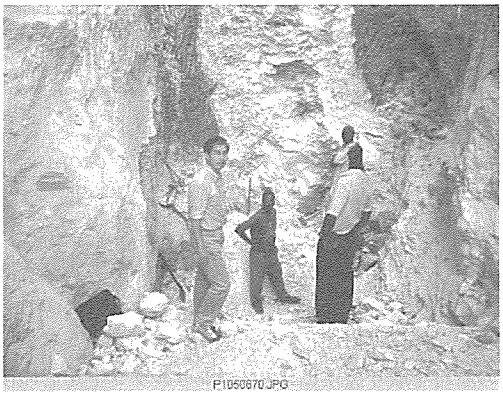


写真2 アクアマリンのペグマタイト鉱脈

ウォーツや煙水晶・アメシスト（紫水晶）・アクアマリン・ガーネット（ざくろ石）・トルマリン等の品質は定評がある．北部地区の Mzimba や南部地区の Blantyre にはそれぞれ組合があるが，ほとんどの採掘現場では作業員は粗末な小屋で居住し，ヘルメットやメガネ無しでのみやハンマー等を使って手掘りに頼っている（写真-3参照）．現場へのアクセス道も劣悪である．

また，これらの原石はほとんど国内で加工されることなくそのままザンビアや南アフリカ・英国・ドイツ・香港・インド・スリランカ・タイ等に輸出され，逆に研磨等のなされたルース（裸石）がモザンビークやタンザニア・スリランカ・ドイツ等から輸入されている現状で，マラウイの経済発展にはメリットが無い．一方ここのところ，宝石類や装飾石の産出量や輸出が減少気味という統計データもある．また，埋蔵量200万トン以上とも目されるリン鉱石の鉱脈がありながら，加工技術が無い，投資者が居ない等の理由で，Blantyre にある肥料工場

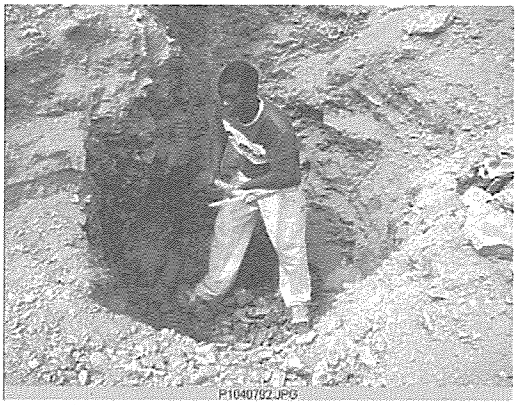


写真3 瑪瑙の採掘状況

では南アフリカからまるまる輸入した原料を使っているという現実がある．断熱材等に使われるひる石や希土類のモナズ石・装飾石のアマゾナイト等も，投資者が居ない，マーケットが無い等で採掘がストップしている現状である．

また，鉱産物の探鉱や採鉱・輸出入を含む販売・梱包等に際しては，それぞれ地質調査所や鉱山局等による Licence や Permit, Certificate が必要である．

具体的な問題点を整理すると次のようになる．

①採掘・加工に関して；
- ブル，トラック他の採掘，運搬機械や研磨機等の加工器具の不足
- 作業着や手袋，ヘルメット，ゴーグル等の危険防止用具の不足

②流通に関して；
- マーケットの不足（顧客の不足）
- 低販売価格
- 不法な取引き（密輸入等）

③技術および知識に関して；
- 付加価値をつけるための加工訓練技術等の不足
- 地質に関する知識の不足

④全体として；
資金の不足（投資者の不足）

6. 結論と対応策のまとめ

当国の非金属鉱物資源は大きな可能性を秘めていることが分かった．しかしながら，これらの当国経済発展への利用を考える前に改善すべき問題点も幾つかあることが判明した．その対応策（宝石類を中心とする）は次のようにまとめられる．

①マラウイ政府はこれらの産業従事者に対して計画的かつ継続的な資金援助を行う必要がある．

②鉱業関連の組合等を通して定期的なオープンマーケ

ットを開催すべきである（オークションの実施等）.

③政府は国際的にも通用するような付加価値を付け得る技術訓練施設を組織的に設置するべきである（原石加工訓練所の設立等）.

④特に零細採掘業者等に対して市場の流通状況や，宝石類と地質との関連等が理解できるような場を設ける必要がある（定期的な関連セミナーの開催，鉱物図鑑の編纂等）.

⑤Licence 等取得の簡素化や，密輸入等を防止するための法制度の見直しと遵守をはかる.

⑥さらに熟度を上げた系統だった鉱産物の賦存・採掘調査（種類・数量・品質）をする必要がある（マダガスカルやタンザニア・モザンビーク・ザンビア等周辺諸国の状況，それに東アフリカ大地溝帯の南端部に位置すること等を考え合わせると，現在まだ採掘されていない鉱産物-ダイヤモンド他-が存在する可能性もある）.

7. マラウイ雑感

採掘現場等への調査行に際しては 3,000 km を優に越える走行距離を費やしたが，やっかいなのは地方へ行くとダニやマラリアを媒介するハマダラ蚊に悩まされるので，JICA から支給された蚊帳と電気蚊取り器の携帯は欠かせない．それでもしばらくの間は身体中のアチコチが腫れてかゆくなる．一緒に行った MIRTDC の技術長に20数年前に北アフリカのリビアに行った事がある，と話したところ「これがアフリカだ．リビアはアフリカじゃない」と言っていたが……．メイン道路から山中へ入るとこれまた大変で，地道のでこぼこ道を上り下りしながら（時には四駆の車輪が空回りしてズリ落ちたりしながら）ひまわり畑や綿花畑を左右に見ながら，またサボテンの木々やバナナやパパイヤ等の木の繁茂する電気が来ていないような小さい村を幾つも通り抜けてやっとたどり着くという状況で，身体中が埃だらけになる．このような村ではほとんど車は通らないようで，我々が通り過ぎるたびに子供たちだけではなく大人も手を振ってくれる．皆裸足．頭に荷物を載せて山道を歩いている女性たちを荷台に乗せてあげたりすることもよくあった．それにしても彼女たちは水だけではなく，長さ 3 m ほどの木を数本束ねて頭に載せて真っ直ぐ前を見ながら運んだりしているが，一回当りいくらということで生活の糧にしているのであろう．皆逞しく働いている.

ある村では村人たちがなんと路端でジルコンやブルーコランダムを拾って生計していると言うので，見ていると崖下で瞬く間に両手一杯のジルコンを拾って来てくれた．降雨時に土の中から現れたのだろう．一日当り 1,000 クワチャ（≒1,000 円）ほどの収入になるとのことだった.

地質資料を入手するために Zomba の地質調査所を再度訪れた際には，現場へ近づくのは困難なのでということで，ダイヤモンドを含む岩石として知られる Kimberlite（ダイヤモンドを大量に算出する南アのキンバリー鉱山より命名）を展示棚から取り出してカッターで切り分けてくれた（残念ながらダイヤモンドは入ってなかったが）．この時には Kimberlite を包含する山を遠くから眺めるしかなかったが，当国には 4 ケ所 Kimberlite を産出する所があるということが分かっており，今後の調査が期待される．タイヤが途中で何回もパンクしたり，湿地にめり込んで村人たちに引っ張り上げてもらったりしたハプニングがあったりして，帰って来た時にはグッタリするが，あちこちで奇妙な枝振りをしたバオバブ林や雄大な山並みを見ると，ここに来てよかったな，といつも思ったものである（写真-4 参照）．モザンビークとの国境には3ケ所，ザンビアとの国境には１ケ所出会った.

当国の地質図を見ると何ケ所か温泉（Hot spring）がありそうだが，どんな所か…….

現場で採取した宝石の原石を含むサンプルを整理して鉱物標本箱を作って MIRTDC に残し，また当国在住の JOCV（青年海外協力隊）からは，マラウイ産出の鉱物図鑑の作成方を依頼されて，原稿を渡して来た．これには任国外旅行で訪れた際に，タンザニアのアルーシャで入手した今人気のタンザナイトと，ザンビアのビクトリアの滝でかけらを拾って来た基礎地盤を構成するカルー玄武岩も付録として載せている．簡単な地質や宝石類の出来方等の説明付きでカラー刷りなので（来年１月発行予定），将来は英語あるいは現地のチチェワ語に訳して，当国の一般の人たちへの案内書（ガイドブック），また子供たちの学校での教材にでもなれば……と考えている.

マラウイで生活をしていて一番の問題は何と言っても



写真4　バオバブ林

食事である．インド料理のカレー，中国料理の炒飯，中東料理のシシカバブ等どの店に入っても同じような味付けで，カレーの匂い無し，炒飯の味無し，シシカバブの香ばしさ無し，とナイナイづくしで，どれも脂っこくひつこくて食事に出かけるのが億劫になるほどである．当国の主食はメイズと呼ばれるとうもろこしの粉を油と水で練って肉まんのように蒸した「シマ」というもので，牛や豚や鶏肉のスープにつけて食べるのであるが，このシマ自体は全く味がなくたまには良いが，そう頻繁に食べられるものではない．日本は食事天国だと痛感した次第である．が，昼食の代わりに砂糖きびをかじっている地元の人たちも少なからず居るので贅沢を言っている場合ではない．

Blantyre で宿舎としていた所は，マラウイ観光協会（MIT）が運営している街中の観光専門学校の中にあるホテルで，ウィークデイにはいくつかある教室で授業が行なわれていた．8月の半ばにこのホテルの中庭で催された恒例の Mr. & Miss MIT Contest（対象は専門学校の学生）には夜晩くまで付き合い，この国の学生気質の一端を知ることが出来た．選ばれた Mr. および Miss は当方の予想した2人とピッタリで，女性は白い歯の笑顔を絶やさない候補，男性は背が高くて甘いマスクの候補で，我々と価値基準は変らないな，と感じた（写真-5参照）．専門学校の学生たちにはその後，日本および日本の文化について一時間余り講義をした（30人余りが参加）．パソコンで日本の風景写真や食事や音楽を紹介したり，また持参してきた京都観光協会作成の数枚の壁張り用ポスターを掲示して京都の紹介をしたりした．天皇の男子世襲制を説明した際には「それはおかしい」と言う意見もあった．翌朝出会った女子学生には「おはよう」と挨拶され，研修でフロントに立っていた学生には「はい」と返事をされたりして反応があり，思い切ってやった甲斐があった．

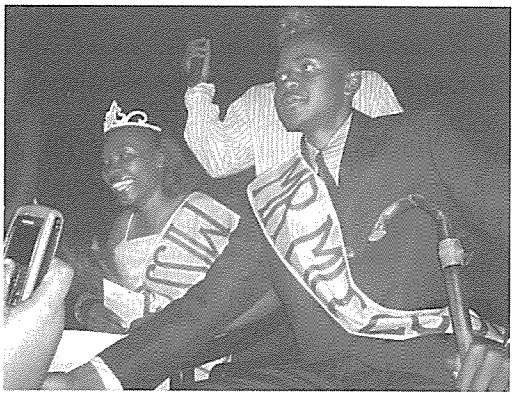


写真5 Mr. and Miss MIT in 2006

赴任直後は，黒光りのするブラックアフリカの真っ只中でどう受け入れられるのだろうかと不安だったが，思いのほか人懐っこく話し掛けてくれることが分かった．マラウイ国の観光キャッチフレーズは「The Warm Heart of Africa」ということで，皆礼儀正しく親切で，気軽に声を掛け合ってくれるので食事の憂鬱さが随分癒された．

何と言っても当国は雄大な大自然が豊富で治安も良いので，休みの日には気分転換を兼ねてカメラ片手に郊外を歩き回るのを楽しみにしていた．8月から10月にかけて咲き誇っていたタンザナイトの気品あふれる色にも似たジャカランダの花の鮮やかな紫色も忘れられない．

当プロジェクトは第一段階が終ったばかりで，ことに宝石類の取り引きについては文字どおりアンダーグラウンドの世界で踏み込むのが困難な部分もあると思われるが，機会があれば，これまで培ってきた当地での貴重な経験・知識と人脈を活かして，今後とも何らかの形で携わっていければ‥‥と思っている．

（2006年12月投稿）

談　話　室

松下幸之助論／その憂鬱な晩年

熱　田　善　男*

The Frustrations of Mr. Kounosuke Matsushita in His Later Years

by Yoshio ATSUTA

青春とは心の若さである．
信念と希望にあふれ，
勇気にみちて日に新たな活動を
つづけるかぎり，
青春は永遠にその人のものである．

これは幸之助の座右銘です．

幸之助はS36年66歳で会長就任．

実は，安保闘争の流れの中で，S35～38年，松下電器労組は，過激派（共産党系と社青同系）が中央執行委員会を独占し，実力行使に明け暮れる．

あげくの果てに，「松下幸之助の経営理念はまやかしだ，所得番付日本一は労働者からの搾取だ」と機関紙に書き，労使関係は不毛な時期だったのです．

そんな環境での会長就任だった．

従業員に，「福祉向上に役立ててほしい」と，私財3億円を寄贈．

それを元手に福祉会が設立され，育英貸付金や遺児育英給付金等の事業が開始，現在に至っている．

会長就任を機に社会活動に力点を移します．

11年間中断していたPHP研究を再開します．

PHPは，Peace and Happiness through Prosperityの略称．

繁栄によって平和と幸福を実現しょうという意味です．

S37年67歳，米「タイム」誌のカバーストーリーに取り上げられて，全世界に紹介される．

S38年，組合主義者が過激派から労組本部三役と執行委員すべてを奪回．幸之助は，新委員長に，「国破れて忠臣現わる」と喜んだ．

いよいよ本格的に社会活動に取り組む矢先，家電業界の不況時の過当競争を松下電器として乗り切るために，S39年，69歳のとき，とつぜん実務に戻ったのでした．

熱海のニュー・フジヤ・ホテルに，全国の販社と代理店の社長約170名を集め，3日間の集中討議の結果，根の深さを知る．これが，世にいう熱海会談なのです．

集中討議までは，会長の幸之助が指揮をとってもいいが，その後も病気で休職中の営業本部長の代理をするとして，直接に経営改革の実務を進めたのでした．

これは，臨時体制とは言え，娘婿で社長である松下正治をさておく異様なことですね．

しかし，さすが幸之助，わずか半年間で，この難局に道筋をつけました．

この年には，米「ライフ」誌が，大きく大きく「松下幸之助とその事業」を特集しました．

特集の中身では，①一流産業人，②高額所得者（所得番付第1位），③大思想家，④大出版人，⑤ベストセラー作家と，5つの顔を持つすごい人物で，世界史上には類例がないと，結論しました．

同じく，この年に，松下電器の本拠地である門真市の初の名誉市民となる．S8年38歳のとき，大阪府北河内郡門真村に本拠地を移してから31年目でした．

熱海会談後のこと．

労組は，高齢の会長にもしものことがあったら大変だ．今後は幸之助会長が大改革の第一線に立つことがないよ

*村上研OB（S34年卒），新日鉄OB
元・文京学院大学講師

うに，組織的経営に転換しなければならない．と労組の経営参加を，幸之助に打診し始めます．

時期早尚と考えたのでしょうか，「ワシは経営の神様や」と，労組の要望を，いなしつづけます．

S40年，70歳．京都国際会館理事長に就任．松下電器，週休2日制実施．勲二等旭日重光賞受賞．早稲田大学名誉法学博士を受ける．

関西財界セミナーで「ダム経営」論を発表．これは，一言でいえば，経営にダムを持って，不況に耐えられるような経営を目指そうとの思想を提言．全国各地を回り熱心に訴えます．松下電器の松下幸之助から，日本の松下幸之助なったのですね．

こんな時期，初めに紹介した，座右銘を自作したのです．

人はみな毎年歳をとる．それは自然の掟である．が，私は，精神的には何歳になろうとも青春時代と同じように日々に新たな気持ちを持ち続けることができるはずだと思う．精神面の若さだけは失いたくない．と，幸之助はいうのである．

まだまだ，やる気いっぱいですね．

S42年，72歳．松下電器の経営方針発表会で「5年後には欧州を抜く賃金に」と呼びかける．

S42年7月，公取委は松下電器のカラーテレビにヤミ再販の疑いをもち，撤回を勧告する．しかし，松下側はこれを拒否して審判に持ち込み，適正利潤説を展開してヤミ再販を否定します．参考人に呼ばれた流通革命の旗手ダイエー社長の中内功は松下の価格の支配を厳しく批判するのでした．

S43年，73歳．松下電器創業50周年式典．ブラジル文化功労勲章受賞．明治100年，霊山顕彰会の初代会長を引き受ける．これは京都の霊山に祀られている坂本龍馬ら明治維新の志士549柱の霊場が，戦後荒れ放題になっていたのを，復旧して祀つる会ですが，幸之助は「戦後は昭和維新」だと，会のためにおおいに尽力します．

S44年，74歳．日本の過密過疎の問題も積極的に取り上げます．松下電器は人口減少の著しい鹿児島県に工場を建設して話題になったが，全国の過疎地への工場展開を積極的に進めました．

これは，社内で幸之助の強い主導によるものでした．松下正治社長としては，嫌な気持ちだったでしょうね．

S45年75歳．勲一等瑞宝章受賞．「PHP」国際英文版創刊．

公取委での争．消費者の不買運動の高まり．

労組は経営側に非がある考えて会社に批判的でしたが，会社側からの情報がなく，正確な対応ができませんでした．「ワシは経営の神様や」とのたまう取締役会長の幸之助に対して，労組はとうとう，難局打開のために，建白書を上げてきました．S45年12月25日のことです．

建白書は，経営不振の原因は，消費者運動の影響ではなく，対応する経営基盤と総合力の弱さを露呈したものであるとして，強く経営改革を求めたものでした．

消費者団体の不買運動で，会社のイメージは落ち業績も悪化して，背に腹はかえられない状況に陥ってしまいました．

S46年年頭の経営方針発表会で，幸之助は「消費者運動は会社として反省するよい薬」と認めて，「これに感謝し，新規開業の気持ちで再出発する」と，変わり身の速いところをみせます．

公取委での争いは3年半の長丁場．S46年3月31日，松下電器が独禁法違反を認めて決着はかりました．

幸之助は創業以来の適正利潤説の旗じるしを下ろし白旗を上げたのは悔しかったにちがいありません．しかし，素直な心で，時代の要請を見抜いて変身したのでした．

これで不買運動も終結して，売り上げは一挙に回復したのでした．

これが，世に言う松下電器VSダイエーの戦争である．

S46年，76歳．飛鳥保存財団の初代理事長に就任．飛鳥を開発から守るために，当時の佐藤栄作首相に幸之助が直訴，この直訴がきっかけで設立された財団です．

慶応義塾大学名誉博士を受ける．

S47年，77歳．ベルギー国王から王冠勲章を受ける．

S48年，78歳．松下電器創業55年．会長を退き相談役に．会長には大番頭といわれた高橋荒太郎．社長は松下正治の留任．

しかし，幸之助は，その後の松下電器の経営について，「要望書」残し，新聞記者を集めて発表までしている．これに，社外重役の堀田庄三（住友銀行会長）は，「たいへん感銘した」と，エールを送ったと言われている．

豊臣秀吉が，自分の死後のことを心配して，3大老5

奉行に誓紙を出させてまでしたというが，この要望書は思い切りがいいはずの幸之助らしくない，未練がましいものだといえます．

しかも，幸之助自身は，「僕の口からいうと変ですが，僕が死んだあとには，この要望書も生きてきまっせ．いまはまだ影が薄いでしょうが，僕が死んだら，この書き付けはものをいうと思いまっせ」と未練たらたらでした．

娘婿である松下正治社長としては，義父の本心がそこまで俺を信じられないのかと，空虚な気持ちになったことでしょう．

S49年，79歳．飛鳥村名誉村民．

この年，労組は経営参加の必要性を機関決定します．熱海会談後に，幸之助に打診した10年ごしのテーマがやっと表にでたのです．

S50年，80歳．NHK放送文化賞受賞．同志社大学から名誉文化博士を受ける．国土庁顧問に就任．NHKテレビから「警世・松下幸之助氏と日本経済」を放送．神道体系編纂会初代会長．「人間を考える／新しい人間観の提唱・真の人間道を求めて」を出版．500ページを越えるもの．

6月1日．盛田昭夫，牛尾治朗，稲盛和夫，香山健一，浅利慶太が京都の松下幸之助の処（別邸・真々庵）に集まって，国民運動を起こす密議をした．自民党も命運は後僅かだし，野党に任せると危険だし，幸之助に国民運動の旗振をおおねがいして，新党（第二保守党）結成を期待する雰囲気だった．

幸之助は，国民の幸福のためには良い政治が必要だからだという思いを強く持っていました．さかのぼると，S27年，57歳，バリバリの社長時代に，財界，学会，言論界，の有力者に呼びかけ，「新政治経済研究会」を発足，政策提案をします．57歳～71歳，14年間頑張ったが，政治家は派閥抗争に明け暮れて，汚職や疑獄があとをたたず，国民の主権者意識もなかなか高まらない状態で，いうなら挫折して活動を終えたのです．そして「政経塾構想」を発表したのですが，周りから反対されて，その時は，断念したのでした．

幸之助は，6月1日の密議のその後に期待したのでしたが，参加者からの具体的な提案もなく，電話一つもなく，失望したのでした．

秋に松下幸之助と盛田昭夫の対談「憂論・日本はいまなにを考えなすべきか」を出版したのがせめてもの成果でした．

S51年81歳．戦後S21年に発足したPHP研究所30周年を迎える．「私の夢・日本の夢／21世紀の日本」を出版．

S52年，82歳．山下俊彦（取締役順位26番中25番）が抜擢され社長に．「山下とび」という新語でマスコミは騒いだ．会長高橋荒太郎は退任．社長松下正治は会長に．この山下新社長の抜擢は，幸之助相談役の主導で決定．社長の松下正治は，決定後に，聞かされた．S52年4月，頓挫したままの労組の経営参加を，山下体制の下で協議再開することになる．

S53年6月，労組の経営参加が実現．

S53年，83歳．松下電器創業60周年に「60年後のには更なる発展を」呼びかける．

無税国家構想提言しました．しかし，政界や経済界の反応はかんばしくなかった．

単独で記者会見をして，「政経塾」構想を，再び発表．71歳での前の発表から，83歳まで，13年間も心の中で発酵させてきたのでした．

このS53年の暮れ，恒例の，幸之助相談役と労組幹部との時局懇談会の席で，「幸之助のお孫さんの松下正幸氏が6月に松下物流社長に就任されたのは，巷では，天孫降臨だとの声もありますが，どうお考えですか」と労組本部の副委員長から質問されて，さすがの幸之助も返事に窮して，突然，「小便してくるわ」と，演壇をおりていった．5分ぐらい経って戻り，質問をした副委員長のところへきて，ニコッとして「ところで，君はどう思うんや．ほんまに評判悪いんか」と聞き返してこられたそうです．

微笑ましいエピソードですが，この頃までは，世襲という気持ちもあったのではないでしょうか．

S54年，84歳，松下政経塾設立．

この年，こんエピソードがあった．平田雅彦，この人はS42年日本ビクターに出向して，専務をやっていました．もともと経理の専門家，熱海会議のあとの松下電器の大改革に，若い経理マンとして参画，幸之助に認められた．・・・出向も12年，もう日本ビクターの人間になった方がいいと山下俊彦社長と相談して，松下を退職することにしました．

社内の手続きが完了して，退職のセレモニーの日．賞状と記念品を貰い，山下社長と記念写真まで撮った．退職金は計算が遅れていて後日ということであった．

ところが，終わって，日本ビクターに帰る．それから，1時間も経ったか，幸之助から電話．「君，辞めたらあ

かん」．鶴の一声で，この退職話は取りやめになった．

S55年，85歳．松下政経塾開塾．一期生23名が入塾．塾教育開始．

S56年，86歳．アメリカ行き．ニューヨーク，シカゴ，メキシコのティファナ．松下の現地工場の視察．これが機縁で工場がリニューされた．こんな事実は松下王国の経営硬直化の証ともいえる．

勲一等旭日大綬章を授章．

この頃になると，松下電器の現場では，ホワイトカラーに，過労死，若死，自殺，精神障害，など，が多発していた．また，甘い経営体質，硬直化した組織，面子にこだわる偉いさん．等々，やる気の若手を失望させていた．

S57年，87歳．「政経塾では間に合わんかも知れんな」と，幸之助は，側近で，PHP研究所の経営を任せている，江口克彦に言うようになった．

そして，江口克彦に命じて，幸之助新党の，設立趣意書，立党宣言，信条，綱領，組織図，党則，等々が，順次，できてくる．結成への準備がでてきた．

S58年，88歳．新党結成について前の密議（S50年6月1日）に出た牛尾治朗を東京の自宅に訪ねたのだった．「牛尾さんな，やっぱり新党しかありまへんで」と切り出す．しかし，冷淡な反応しか返ってこなかった．京都へ帰ると，息子のように付き合ってきた，ワコール会長の塚本幸一に声をかけるが消極的返事だった．

「新党をつくろうと，やったけど，作れんかったわ．それなりに成功している人は，松下さんのいうことは，その通りやと，いい返事する．けれど，いざとなったら，やらんほうがええと．失うものがある人は，怖くてようせんがな．明治維新は大名は一人もおらんわ．みんな下級武士で若いもんばっかりやった」

この頃，中曾根首相が，幸之助に参議院選に出馬要請．辞退する．

新党結成には頓挫したが，世界を考える京都座会を，幸之助を中心に有識者で，日本の混迷を解決するための政策提言機構を創設します．活動を始めます．

S59年，89歳．幸之助は，日本ビクターの平田専務を，松下電器の経理担当の副社長として呼び戻す．幸之助の指示は，「松下グループの連結決算のシステムを，白紙に戻して構築する」．そして，それに伴って，「グループ全体の経理マインドも，徹底的に変えよ」．その頃は，幸之助は，松下病院の一室で，暮らしていたが，病院のベッドの上で，経理システムの改革を，つよく考えていたのでした．

5年前に，平田さんの退職をとめたのは，この伏線だったのです．

これが示しているのは，松下電器には，幅広く経理を見る人が育っていなかったこと．そして，いつまでも幸之助が人事決めること．

決して，健全なことではない．

S60年，90歳．松下政経塾，一期生が卒塾．しかし，開塾後，5年で，目立った結果はでなかった．再び，新党結成に動き始める．しかし，体調が悪化して，挫折．

90歳からの出直し．「今まで一生懸命やったつもりやが，もういちど勉強しなおして，世の中の役にたちたいんや，そのために130歳まで後40年生きたいんや」と．

S61年，91歳．米国メリーランド大学から名誉法学博士をうける．

松下電器の山下俊彦社長が，予定の10年をまたずに，退任．谷井昭雄が社長になる．

このとき幸之助の孫，松下正幸が40歳で松下電器の取締役に就任．かねてから，むめの夫人は，「三洋電機は世襲が続くのに，松下電器電機は，何故，山下や谷井なのか」と不満を漏らしていた．しかし，一方では，幸之助は反対だった．

幸之助と，むめの夫人の対立に夫人に軍配が挙がったのだった．

幸之助は，不愉快だったでしょう．

蛇足ですが，三洋電機は，むめの夫人の弟の井植歳男が，終戦後，松下電器を離れて創業した会社．松下電器は，歳男，祐二郎，薫，の井植3兄弟が，義兄の松下幸之助を支えてやってきましたが，弟2人も三洋電機に移り，順次に社長をつとめ，次の世代も社長を継いできていたのです．

63年，93歳．松下国際財団設立．会長に就任．

H元年4月27日，昭和天皇の後を追うように，太いながい人生を終えてた巨星は，天に昇ったのでした．享年94．

追記．H2年，「人生談義」出版．これは92歳から94歳の亡くなる直前まで，語ったもの．PHP誌に連載さ

れたものを，単行本にしたもの．幸之助の絶筆です．

もう１人の創業者と言われてきた，むめの夫人は，H５年９月５日，99歳で逝去．

完

H 19年７月10日、原稿完成。

ご意見やご感想をいただければ、うれしいです。よろしくおねがいします。

連絡先：熱田善男／メール：y.atsuta@jcom.home.ne.jp
〒276-0032 八千代市八千代台東6-18-4
電話（携帯）090-8744-0890

参考文献は、前報「松下幸之助論／鳴かぬならそれもまたよしホトトギス」（水曜会誌第23巻第８号／平成17年10月発行）に、掲載していますので、省略します。

談　話　室

金属磁性体における幾何学の効果

中　村　裕　之*

Effects of Geometry in Metallic Magnets

by Hiroyuki NAKAMURA

1. 臆病な電子

1つの街があり，その中にたくさんの家がある．街では縦横に道路が通り，人は自由に行き来できる．住んでいる人々は外出好きだが，おおらかで周りの人の存在は全く気にならない．そんな人が外出すれば，誰かとすれ違っても足を止めずに目的地に向かうだろう．逆に他人の存在が気になれば，混雑を避けたり，回り道したりで，目的地に着くのは遅くなる．住んでいる人々がみな臆病で人と会うのを避けるなら，お互いに牽制しあって，家に引きこもってしまうかもしれない．

かつて講義で，自由電子モデルによる電子のフェルミ速度（フェルミエネルギーを持つ電子の速度）は10^8cm/s のオーダーであると習った．これは1000 km/s なので，光速の数十分の1にあたりかなり速い．しかし，金属中の伝導電子は常にこんなに速いわけではなく，様々な相互作用が原因となって速度が落ちる．相互作用が極端に強い場合はほとんど止まってしまうかもしれない．従って，実際の金属中の電子の速度は様々である．磁性を担うd電子やf電子は，原子サイトに局在することもあれば，結晶内を動き回ることもある．電子が原子サイトに局在する絶縁体の磁性は，初歩の固体物理の教科書にも出てくるように，ワイスの分子場理論やハイゼンベルグモデルに代表される局在モーメント描像で記述できる．一方，磁性電子が結晶内を自由に動き回っている場合は，磁性はエネルギーバンドのスピン分極として記述され，バンド構造を適正に評価できれば，少なくとも基底状態の性質をかなり正確に予言できる．しかし実際の物質中の電子は，この2つの場合のいずれかというわけではなく，中途半端に止まったり動いたりする状態，あるいはたくさんの障害物の中をのろのろと動いている状態にある．電子がまわりとの相互作用を感じて動きにくくなる現象は，相互作用を電子有効質量に繰り込むことで，電子が重くなったと表現することもできる．以上は，相互作用する多数の粒子の運動を如何に記述するか，という問題であり，古くから物性物理学の中心課題であるが，解き難い難問として，手を変え品を変え，研究対象としての存在価値を失うことがない．本稿では，その中の一典型である金属磁性体の基礎研究を，従来とはやや異なる視点から概観する．

絶縁体であれ金属であれ，その中の電子のふるまいは結晶構造すなわち幾何学的要因の制約を受ける．ここで，タイトルに含まれる「幾何学」の意味を説明する．通常の金属は特定の結晶構造を持ち，伝導電子は波として記述されるが，ここで重要なのは周期的構造としての幾何学であり，それはバンド構造のなかに織り込まれている．一方，電子が原子サイトに局在している絶縁体では，その物性，特に磁性，は短距離相互作用の統計モデルで説明されることが多く，局所的な原子配置，すなわち，局所的な幾何学が重要になる．

ところで，前述したように，実際の物質は，理想的なバンド金属や絶縁体であるとは限らない．特に，金属と絶縁体の境目にあるような物質，すなわち電子間のクーロン斥力が運動エネルギーに較べて無視できない金属，いわゆる強相関電子系では，周期的な構造と同時に局所的な構造も重要になると考えるのは自然である．すなわち，金属側からのアプローチとしてこの問題をとらえたとき，タイトル中の「幾何学」とは対立概念の局所的幾何学のことである．実際，明らかな金属磁性体でありながら，局在モーメント的説明がうまく機能する例も多い．一方で，金属に対してこのような局所的な幾何学の効果をどのようにとりこんでいくかは難しい問題でもある．

*京都大学大学院工学研究科　材料工学専攻　教授

特に，以下で述べるフラストレート系の場合，局在スピン系ですら未解決の問題が山積し，伝導系に応用するには勇気と新しい視点が必要である．

次節では「フラストレーション」を説明し，§3，4では，局所的幾何学としてのフラストレーションが重要な役割を演ずる金属磁性体の具体例を示す．

2. あちらを立てるとこちらが立たず

3軒の家が隣同士で互いに距離を同じくして建っている．1軒目には一人暮らしの男性が，2軒目には女性が住んでいる．さて，3軒目に人が住むことになったが，男性と女性どちらが無難だろうか？　1軒目も2軒目も男性が住んでいれば3軒目にも男性がやってくることで三角関係を防ぐことができる．しかし，男女が住んでいる場合は3軒目に男女どちらがやってきても，結局は三角関係の成立である．3人の間に争いが生じることは避けられず，皆が欲求不満を抱えることになる．欲求不満は人をイライラさせるが，世の中にはフラストレーションで，目を輝かせる人種もいる．電子は電荷をもつので，近づくとクーロン斥力が働くが，同時にスピン自由度も持つため，スピン配列に伴うエネルギーの損得も生じる．局在スピン系を念頭に考える．質的な変化をもたらす幾何学的因子には，結晶格子の次元性とフラストレーションがある．低次元磁性体は，スピン配列が平面的か直線的かといったものであり，素人にもそのイメージがとらえやすい．また，低次元系では問題が単純化されることもあり，起源が明快でかつ特徴的な現象も種々知られている．

一方，物理でフラストレーションと言えば，相互作用の競合のことを意味するが，本稿で話題にするのは，専ら幾何学的フラストレーションである．「幾何学的」という言葉は，サイトの位置，すなわち，特徴的な結晶構造によって，相互作用の競合が生じる場合を意味する．初心者向けに幾何学的フラストレーションを説明するのによく用いられるのは，正三角形上の反強磁性スピンである．いま，スピンが上向きか下向きの2方向しかとれないとき，すなわちイジングスピンであるとき，図1のように2つのサイトに，それぞれ上向きと下向きをおくと，3番目のサイトにどちら向きのスピンをおいても，片方とは反平行，もう片方とは平行になる．すなわち，安定なスピン構造をとれない．いいかえると基底状態に縮退が残る．すなわち，フラストレーションは基底状態の縮退といいかえることもできる．また，このことから，正三角形が幾何学的フラストレーションの基本単位であることもわかる．

このような不安定状態は三角形をつないだ場合も同様で，2次元平面を正三角形で埋めた三角格子やカゴメ格子が典型的な2次元フラストレート系としてよく知られている（図2）．ここで格子を作る際に，辺共有と頂点共有という2つのパターンがあり，一般に配位数の少ない頂点共有の方が基底状態の縮退度が大きく，フラストレーションの程度が高い．三角格子が辺共有で，カゴメ格子が頂点共有である．

当初，幾何学的フラストレーションは，三角格子に代表されるような2次元系での研究が中心であり，実験的にも層状化合物などでそのプロトタイプが探索された．しかし，現実の物質では理想的な2次元系を見つけるのは難しく，たとえば，多層構造を持つ物質では，面間の相互作用によって基底状態が決まり，自ずと限界が存在する．一方，一見複雑な3次元系に目を向けると，2次元系よりむしろ理想に近い物質を探索するのに適していることがわかる．その理由を説明する．一般に，3次元フラストレート系の基本単位は正四面体であり，そこに反強磁性スピンを並べることを考える．図3のように2つのスピンを反平行に並べると，他の2つのサイトのスピンの向きは決まらず，基底状態は定まらない．正確には4サイトのスピンのベクトル和がゼロという比較的緩い条件を満たせば，磁気的エネルギーは常に最低で，正四面体はそれ自身で多くの縮退数を持つ．三角形の場合はスピンの向き（自由度）を上下に限定したが，四面体ではその制約はない．

3次元でも四面体を並べて空間を埋めることができ，

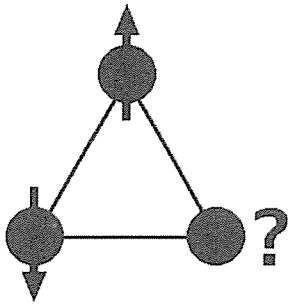


図1　正三角形上の反強磁性スピン

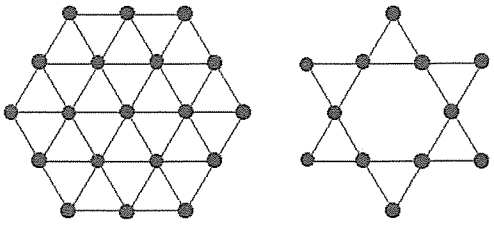


図2　三角格子とカゴメ格子

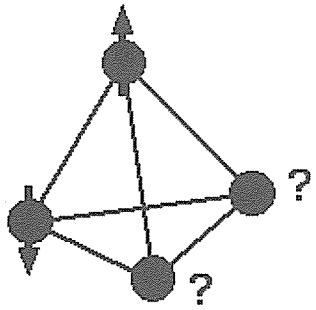


図3　正四面体上の反強磁性スピン

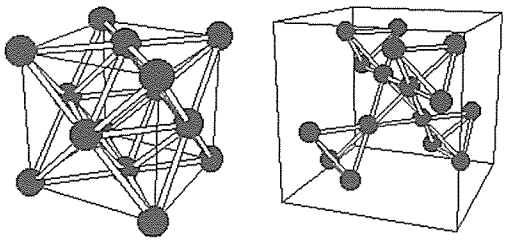


図4　fcc 格子とパイロクロア格子

その代表例が辺共有の fcc 格子と頂点共有のパイロクロア格子である（図4）．パイロクロア格子とは，パイロクロアと呼ばれる酸化物で見られる格子なので，習慣的にそう呼ばれるが，同種の構造はラーベス相やスピネル化合物でも見られる．このような構造を持つ物質が自然界には多数存在し，多くの研究がある．

余談であるが，上に示した四面体ベースの格子以外に，新たな観点の3次元フラストレート格子も存在する．すなわち，平面である正三角形でも，共有する頂点でねじりを導入することで，3次元空間を周期的に埋めることが可能である．

フラストレーションがあると何が起こるか？　一言で答えると「秩序化の抑制」である．自然界では温度低下と共に，熱揺らぎが収まり，何らかの秩序状態が安定化するが，フラストレーションはそれを抑制し，結果として，（量子）揺らぎの大きな状態が出現する．あるいは新奇な低エネルギー状態が実現する．ここではスピンのフラストレーションを議論しているので，秩序化とはスピンの長距離秩序のことであるが，フラストレーションの研究の過程から様々な概念や物理現象が発見された．古くはスピングラスや部分無秩序磁性（反強磁性と常磁性の共存）などであり，最近ではスピンアイスやカイラリティー自由度に起因する異常なども議論されている．

フラストレーションが高じると新たな逃げ道を模索するのは人間もスピン系も同じであるが，スピン系ではそれを新たな高みへと昇華させる．

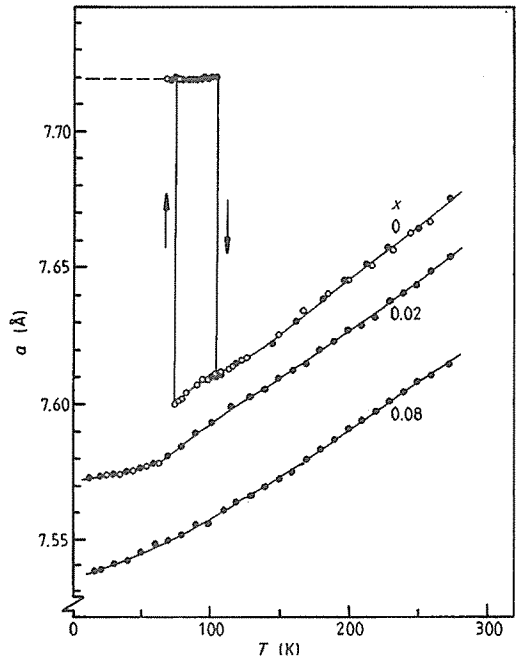


図5　Y(Sc)Mn_2系の熱膨張曲線　上から YMn_2，Sc 2%，Sc 8%

3. 何も起こらないことの重要性

イライラを感じてもストレスを小出しに発散できれば問題ない．それができないと，イライラを極限までため込むことになる．その状態はとても不安定で危険だ．何かの拍子に爆発すると，その影響ははかり知れない．

古い話から始める．著者が学生時代所属していた研究室では，金属間化合物の磁気体積効果，すなわちインバー効果の研究の一環として，様々なラーベス相化合物の研究が行われていた．その中でも特に YMn_2 で観測された異常な体積変化は注目される．図5に YMn_2 の熱膨張曲線を示す．100 K 付近で体積にして5%という巨大な変化が不連続に生じる．この転移は磁気転移を伴い，低温では反強磁性，高温では非磁性である．体積変化の原因は，インバーと同様，いわゆる磁気体積効果で，スピンの生成・消滅にある．

図6に YMn_2 の模式的な温度-圧力相図を示す．低温の磁気秩序状態は不安定で数 kbar 程度の小さな圧力で消失する．しかし，不安定である理由，あるいは大きく不連続な体積変化がなぜ起こるか，といった疑問は当初はあまり意識されなかった．この疑問は，言い換えると，本来磁気相関が大きいと考えられる領域（図6の Spin liquid とある部分）で一次転移の相境界の外側で，起こ

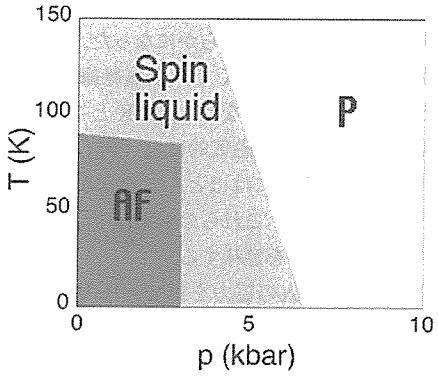


図6　YMn_2の圧力-温度相図の模式図　AFは反強磁性磁気秩序，Pは常磁性を表す

るべき磁気秩序が起こらず，何も起こらないのはなぜか？　あるいはこの磁気秩序が融けた状態はどんな状態なのか？　ということになる．

圧力下の実験の代替手段として，当時，置換系（化学的圧力効果）の実験が盛んに行われた．図5は，Yサイトを原子半径の小さいScでわずかに置換した系の研究で，Scで置換すると格子が縮むが，格子のわずかな収縮に伴って，低温の反強磁性状態が消え，高温状態が低温まで安定化する．すなわち何も起こらなくなる．このことは，決して異常な相転移が消えて正常な金属になったことを意味せず，むしろ高温の異常な状態が低温まで安定化されたと考える必要がある．その根拠は，たとえば熱膨張率のふるまい（図5の熱膨張曲線の傾き）である．YMn_2の熱膨張率は，他の類似の化合物に比べて1桁程度も大きい（すなわち，体積の温度変化がきわめて大きい）が，Sc置換系では，低温の状態が消失しても，高温域の熱膨張率は変化しない．

スピンのミクロな状態は中性子散乱実験で見ることができる．実際に$Y(Sc)Mn_2$の中性子散乱実験を行うと，おおよそ反強磁性相関に対応するところに，大きな常磁性磁気散乱すなわちスピン密度の揺らぎが観測され，磁気秩序はないものの低温でも大きなスピンが動的に揺らいでいることがわかる．エネルギー依存性を測定すると高エネルギー域まで磁気散乱が存在し，低温でも速いスピンの揺らぎのモードが存在する．

これは，スピンが完全に止まった磁気秩序状態，すなわちスピン固体でもなく，完全に自由な常磁性状態，スピン気体でもなく，スピンが液体的状態にあることを示唆する．なぜ，YMn_2でスピン液体が安定になるのか？　ラーベス相YMn_2のMnサイトはパイロクロア格子であり，最近接Mnスピン間の相関は反強磁性的である．結局，何も起こらないのはなぜか？　に対する答えは，フラストレーションがスピンの秩序化を抑制し，揺らぎの大きな状態すなわち，スピン液体が安定化されたからである．実は，YMn_2の磁気秩序状態は，フラストレーションが部分的に解消されることによって生じる．磁気秩序状態では結晶がわずかに正方晶にゆがむことで縮退がとけ，1次元的相関の強い特異な反強磁性磁気秩序が形成される．

YMn_2は3d電子バンドがフェルミ準位に位置する典型的な金属磁性体であるので，以上の結果は金属磁性体でもフラストレーションの効果が重要であることを示している．基礎研究の立場では，このスピン液体の性質や臨界領域でのゆらぎの大きな状態から出現するであろう様々な新現象に対して興味が持たれる．一方，応用の観点からは，フラストレーションが相境界で不連続で巨大な物理量の変化を生む要因になっていることを考慮すると，積極的なフラストレーションのコントロールが，機能性材料開発の指針になりうる．

何も起こらないということは，必ずしも何もないことではない，眠れる獅子のように大きなエネルギーを内に秘めているかもしれない．しかし，その両者を外側から区別するのは容易ではない．

4.　電子の三竦み

家々が整然と並んだ街にお互いに警戒心の強い人々が住んでいる．家は互いに道路でつながれていてお互いに行き来することが可能だが，外出して誰か見知らぬ人に出会うのは嫌なので，隣が空き家のときに限ってこっそりと移動するが，それ以外は家に引きこもっている．そんな街では，もし街の外から空き家に人が引っ越してきて，空き家がなくなれば，誰一人として外出できなくなる．家から一歩も出られないとなると，窓越しに常に顔を付き合わせる隣家の住人のことが気になりだす．男性は隣が女性であればうれしいし，女性もまた然りなので，男女が交互に並んだ状態で街に平和がおとずれる．ところが，ある街では，家の配置に問題があったため，全ての住人に欲求不満が生じた．この街の家の配置は図2のようである．

強相関電子とフラストレーションに関する研究例を紹介する．強相関エレクトロニクスの1つの典型例として，Mnペロブスカイトの CMR すなわち超巨大磁気抵抗効果がよく知られている．これは一言でいえば金属絶縁体転移の応用である．強相関電子系の金属絶縁体転移機構としては，モット転移がその典型である．電子間のクーロン斥力が強い場合を考える．電子の数が少ないと，電子は互いに干渉する機会が少ないので自由に動けて金属になる．一方，電子数がサイトの数とちょうど同じになるとクーロン斥力で電子が互いに避けあって，原子サイトに静止し，絶縁体（モット絶縁体）になる．モット転

移とは熱揺らぎやホールドープによって，電子の固体が融け出すことである．（ちなみに，純粋なモット転移のとき格子は対称性の低下を伴わないが，実際の物質では，電荷秩序や軌道秩序と呼ばれる格子の対称性の低下を伴う場合がほとんどで，純粋なモット転移というものが存在するかどうかは議論が分かれる．）図7に金属絶縁体転移を示す物質の相図を模式的に示す．多くの場合，絶縁体状態は反強磁性的な磁気秩序を持ち，金属状態は強磁性もしくは常磁性となる．CMRは相境界での伝導の不連続な変化を利用する．

ところで，電子はスピン自由度を持つので，もしスピン間に反強磁性相関があれば，格子サイトに1つずつ電子が止まった絶縁体状態では，反強磁性的な長距離磁気秩序ができる．ところが，もし格子に幾何学的フラストレーションがあると，絶縁体状態で安定な長距離磁気秩序をとることができず，金属絶縁体転移の様相が様変わりする可能性がある．すなわち，図7の相境界にフラストレーションの効果を作用させたとき，相境界でどのような現象が起こるか興味深い．このような観点から，10年ほど前に当時の研究室で研究の場として選択されたのが金属絶縁体転移を示す物質$BaVS_3$である．

$BaVS_3$の結晶構造（図8）は六方晶ペロブスカイトと呼ばれる構造で，バナジウムがc軸方向に1次元的な原子配列を持ち，そのバナジウム鎖が三角格子を組む．バナジウムの価数は+4価でd電子は1個，すなわちスピンは1/2である．鎖内が強磁性相関，鎖間が反強磁性相関なので，c軸鎖の間にフラストレーションが存在する．（多少補足すると，バナジウムは硫黄の八面体に囲まれほぼ立方対称の結晶場を感じるため，基底状態に軌道縮退が存在し，軌道の物理も絡んでいる．）

$BaVS_3$が70K付近で金属絶縁体転移を示すことは古くから知られていた．70K以下で絶縁体，70K以上で金属である．70K以上はスピンが揺らいだ常磁性状態である．一方，70K以下の磁性は，多くのグループの努力にもかかわらず最近まではっきりしなかったが，冷中性子を用いた中性子回折実験等で，長距離磁気秩序が存在することがようやく明らかになった．ただし，磁気秩序が現れる温度は30Kで，金属絶縁体転移温度の70Kとは一致しない．すなわち，30Kと70Kの間では，電荷は固まるものの，磁気的には「何も起こらない」．30Kの転移では比熱にはほとんど異常がなく，エントロピー変化は小さい．これらの結果は中間温度領域で謎の相が存在することを意味する．

その後，様々な人の協力を得て，$BaVS_3$に対して温度-圧力-磁場の相図が作られた．ここでは得られた結果を模式化した，磁場-温度相図を図9示す．この結果は，図7の相図にフラストレーションを加味することによって，その相境界に新たな相が現れたと解釈できる．中間相のスピンの状態は高温の常磁性領域と異なるはずなので，一種のスピン液体状態である可能性が高い．（$BaVS_3$では軌道縮退が存在し，軌道自由度も絡んでいると同時に，電荷も不安定であるため，実際はかなり複雑である．ここでは立ち入らない．）

謎の中間相は，電荷は固まっているがスピンは融けている状態である．この状態は，まだほとんど理解されていないが，この相の存在は自然の豊かさを示す1つの証左であり，さらに，フラストレーションが新奇相出現の要因となっている好例でもある．

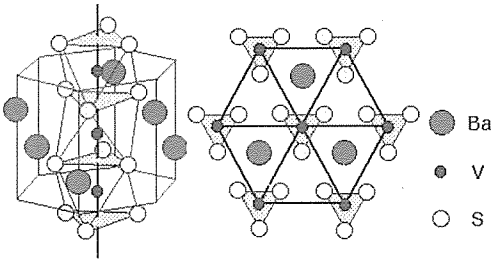


図8　$BaVS_3$の結晶構造

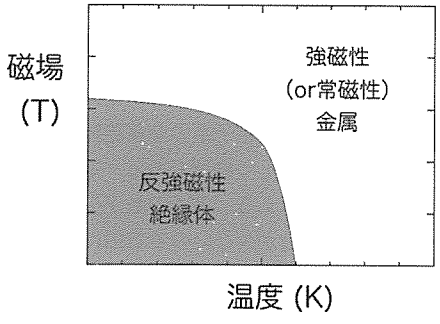


図7　金属絶縁体転移を示す物質の模式的相図

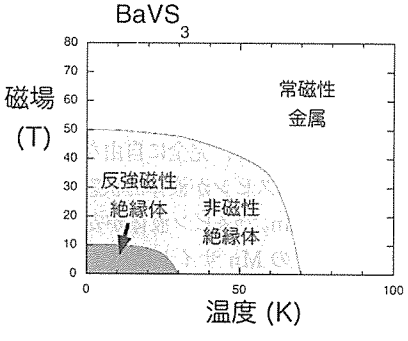


図9　$BaVS_3$の磁場-温度相図の模式図

5. 今後の展開・・・

電子は電荷を持つと同時にスピンも持つ．電荷に起因する電子間のクーロン斥力（電子相関）は，電子の運動に大きく影響する．一方，スピンに起因する磁気的エネルギーは，「配置」に強く依存する．上で述べたのは，両者の影響が拮抗する領域での話であり，著者が材料工学教室の助手であった時代に志賀正幸先生をはじめとする数多くの共同研究者・学生と考えたことのエッセンスである．この分野の研究は，理解されたというにはまだほど遠いが，少なくとも言えることは，金属磁性体でもフラストレーションは新奇な量子状態を安定化し，また異なる状態間の不連続で大きな変化を生む原因になるということである．また，物性の多様性に触れる機会でもあった．今後も新たな量子状態の探索を行っていければと思う．なお，本稿は非専門家向けに研究のあらすじを述べたものなので，学問的厳密性を「大幅に」犠牲にしていることを御容赦願いたい．

電子は電荷を持つと同時にスピンも持つ．臆病な電子に性別があるようなものである．欲求不満を抱えた臆病な男女の集団の末路はいかなるものかよくわからないが，とても興味のある話題である．

談　話　室

規則性シリカメソ多孔体の触媒化学への応用

山　本　　孝*

Application of Ordered Mesoporous Silica Materials to Catalysis

by Takashi YAMAMOTO

1. はじめに

わたしは平成18年10月1日付けで材料工学専攻プロセス設計学研究室（河合潤教授）の助手に着任し，教員制度の変更により平成19年4月1日付けで助教になりました．これまでの経歴は平成6年3月北海道大学理学部化学科卒業，平成8年3月同理学研究科化学専攻修士課程修了後，京都大学工学研究科分子工学専攻博士課程に進学し吉田郷弘教授のご指導の元，平成11年9月に学位を取得いたしました．その後，京都大学工学研究科分子工学専攻で日本学術振興会特別研究員，東京大学理学系研究科化学専攻にてさきがけ研究21研究員，東京工業大学資源化学研究所助手として固体触媒の構造と物性に関する研究を行ってまいりました．卒業研究では無機化学講座に所属してカルシウム-鉄複合酸化物の物性に関する研究を行いましたが，修士課程で触媒化学研究センターに進学以降は金属酸化物を中心とした固体触媒を扱う研究室に在籍しておりました．今回，研究対象として扱った材料の中で規則性シリカメソ多孔体に関し，研究背景及び結果をまとめます．

2. 規則性メソ多孔体

粒子に存在する微少な孔（細孔）はそのサイズにより分類され，IUPACでは直径2nm以下の細孔をマイクロ孔，2-50nmをメソ孔，それ以上のものをマクロ孔と定義している．細孔には1次粒子と2次粒子の空間が孔状になったもの，粒子自身に空洞をもつものがある．大部分の多孔質材料は前者であり，様々なサイズがあるが細孔径分布は幅広い．後者の例としては活性炭，架橋型粘土，キセロゲル，ゼオライトなどがある．このなかで多孔性アルミノケイ酸塩と定義されるゼオライトはシャープな細孔径分布を示すがその細孔は何れもマイクロ孔であり，メソ領域に均一な細孔を持つ物質は1990年代まで存在しなかった．ナノメートルオーダーの細孔はサイズが原子と巨大分子の領域の間にあり，自身の持つ特異な分離機能，量子サイズ効果を持つ金属微粒子の内部合成，反応場としての利用等の研究が進められている．また高い機能性，選択性を持つ触媒としても期待され，均一なナノサイズをもつ多孔体の合成は多方面から望まれていた．

均一なメソ孔を持つ多孔体は1990年，早稲田大学の研究グループにより層状シリケートであるカネマイトに界面活性剤（アルキルトリメチルアンモニウム塩）をインターカレーションさせることにより初めて合成された[1]．この物質は豊田中央研究所との共同研究により合成条件が改良され，シートが折れ曲がる生成機構モデルからFSM（folded sheets mesoporous materials）と命名されている[2]．細孔径は界面活性剤のアルキル鎖長により制御可能であり，1次元チャンネル状細孔はハニカム状に規則正しく配列し，表面積は1000 m^2/g を越える．XRDパターンでは六方構造に帰属される4本のピークが10°以下（2θ; Cu/Kα）に得られるが高角度側はハローのみであり，壁内部の構造はゼオライトとは異なり規則的な構造を持たない．優れた耐熱性を示し，1273 Kでも構造は保持される．

規則性メソ多孔体を利用した物性，応用および合成に関する研究は，1992年にMobil社がMCM-41（図1）の合成を発表[3]以降，爆発的に行われるようになった．MCM-41とFSM-16はほぼ同じ構造とみなすことができるが合成法が大きく異なる．層状粘土鉱物に界面活性剤をインターカレーションさせて合成するFSM-16に対し，MCM-41は界面活性剤の濃厚水溶液中にシリカあ

*京都大学大学院工学研究科　材料工学専攻　助教

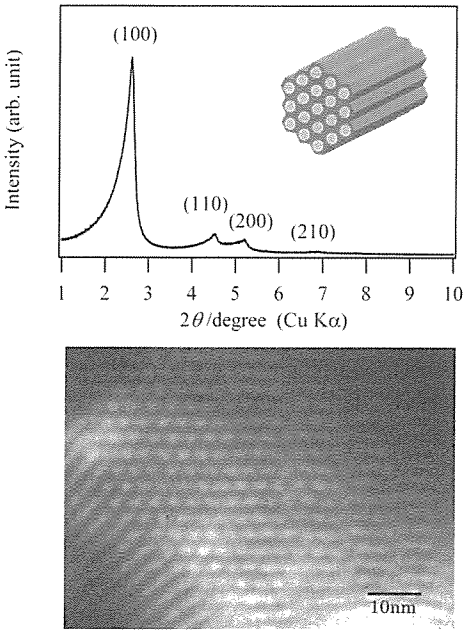


図1　シリカメソ多孔体 MCM-41 の XRD 回折図と電子顕微鏡写真

るいはシリカモノマーを分散，ゲル化し，オートクレーブ内で界面活性剤ミセルとシリカ成分を自己組織化させて合成する．細孔径は FSM-16 と同様，界面活性剤のアルキル鎖を変化させることにより変化し，メシチレンを添加することで 1.8-10 nm の範囲で制御可能である．細孔壁の構造に関して，固体 NMR，ラマンおよび赤外分光法により非晶質シリカと同じであろうとされているのみであり，分子動力学法による研究も行われているが，現在も詳細は明らかではない．

他のメソ多孔体として，シリカ系では型材としてブロック性コポリマーを用いた数十 nm 程度の大口径のものや骨格に遷移金属や有機基を導入したもの，シリカ以外ではチタン，ジルコニウム，タンタル酸化物やマグネシウム－タンタル複合酸化物などの規則性メソ多孔体が合成されている．規則的な細孔構造をもたないいわゆる虫食い穴状の物質として，シリコン，アルミニウム，タングステンなどの酸化物多孔体が合成されている．

3.　シリカメソ細孔内白金カルボニルクラスターの Ship-in-bottle 合成

触媒の形態は触媒と反応物との境界の有無により均一系，不均一系に区別される．金属錯体触媒を用いた均一系反応では一般的に全ての錯体が同じ活性サイト（触媒反応を促進する特定のサイト）を与える為，高い選択性と再現性を比較的穏和な条件下で示し，反応機構は分子レベルで解明されているものも多い．固体触媒は場合によっては数百度の高温での使用による活性向上が可能であり大型プロセスも多い．半面触媒表面は複雑であり，酸化数や局所構造などの相違による複数の活性サイト上で起こる副反応や逐次反応をいかに抑制するかが課題である．

分子，原子レベルで構造制御された活性中心を固体表面に設計する一手段として，多孔性材料の細孔内にゲストとして金属クラスター，金属錯体，無機化合物等を直接内部合成する Ship-in-bottle 合成法がある[4]．飾り物であるウィスキー瓶中の舟は瓶の入口から入れることは不可能であり，小さい部品を予め導入して内部で組み立てることにより作成する．この考えを化学合成に応用し，細孔内を擬似溶媒とした手法が Ship-in-bottle 合成である．合成可能なクラスターサイズは細孔径が上限であり，従って細孔径が拡大するとより大きなクラスターの合成が可能となる．

酸化，水素化および排ガス浄化触媒などに対して優れた触媒特性を示す白金のクラスターとして，三角形の $[Pt_3(CO)_3(\mu_2\text{-}CO)_3]$ ユニットが一次元に連なった二価アニオンであるプリズム型のカルボニルクラスターが知られている．研究を開始した 1994 年当時，既往のフォージャサイト型ゼオライト細孔内（1.3 nm）にはユニット数 3 および 4 のものが合成されていたが，それ以上のサイズのものは幾何学的な制限のために合成は不可能であった．またメソ多孔体の細孔を反応場とする錯体合成は行われていなかった．そこで豊田中央研究所より細孔径 2.8 nm の FSM-16 の提供を受け，白金カルボニルクラスターの細孔内合成を試みた[5]．これまでの研究例ではゼオライトにイオン交換により貴金属イオンを導入していた．FSM-16 は純粋のシリカであるためにこの方法は適用できないため，前駆体の導入には含浸法（金属塩と担体を溶媒に分散後，溶媒を蒸発除去して担持させる方法）を用いた．前駆体は種々検討した結果，H_2PtCl_6 以外からはクラスターは生成しなかった．図 2 には FSM-16 細孔内の H_2PtCl_6 が CO-H_2O 共存下 323 K で cis-$Pt(CO)_2Cl_2$，$Pt(CO)Cl_3$ を経てカルボニルクラスター $[Pt_3(CO)_6]_5^{2-}$ が生成する過程の IR スペクトルを示す．予想されるカウンターカチオンはプロトンであるために安定性は低く，合成ガスを排気するとプリズム型構造が崩壊しナノ粒子へと変化する．第四級アンモニウムカチオンなど適度なサイズのカウンターカチオンを予め細孔内に導入しておくとクラスターの熱安定性は向上した．いずれの場合でも 473 K 以上で排気すると CO が完全に脱離し，2 nm の均一なナノ粒子を細孔内に調製することができた．触媒反応については CO の表面被覆率に対する水性ガスシフト反応や 1,3-ブタジエンの選択的

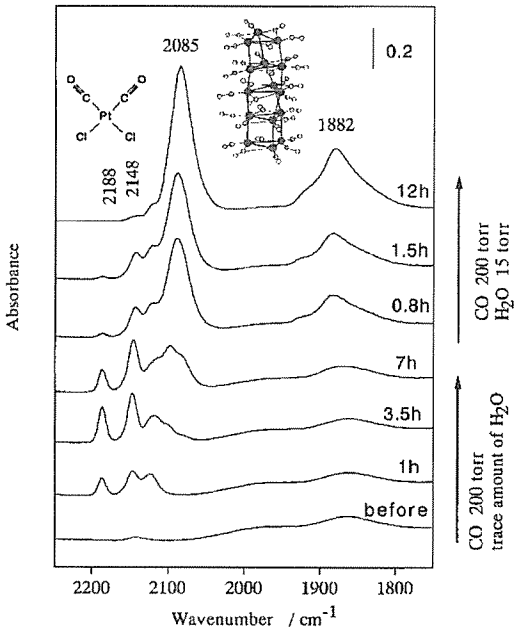


図2 白金カルボニルクラスター生成過程の FTIR スペクトル．試料：H_2PtCl_6/FSM-16

水素化反応への影響などを検討したのみであり，当時はこの触媒特有の反応活性は見出せていなかった．近年，FSM-16 細内白金ナノ粒子が燃料電池用の水素中微量 CO の選択的酸化反応の高活性かつ高選択的な触媒であることが北海道大学福岡教授により見出され，実用化を視野に捉えた研究が行われている[6]．

4. シリカメソ多孔体の固体酸性質

シリカが化学的に不活性であることは広く知られている．メソ多孔体の物性はシリカゲルと類似し，それ自身は化学的に不活性であると発見当初は認識されていた．それ故，メソポーラスシリカを新規触媒として用いるために骨格の Si を Al, Ti, V などの遷移金属で置換する，遷移金属および貴金属を担持（触媒表面に添加すること）する，あるいは有機金属錯体を表面水酸基と反応させて固定化させる試みが盛んに行われていた．

1996 年に博士課程へ進学した際，このシリカメソ多孔体の細孔内に塩基性酸化物のナノ粒子を合成して固体塩基触媒の基礎研究を行おうと計画した．固体酸性に関する基礎および応用研究は活発に行われているものの，固体塩基に関する基礎研究例は現在でも少ない．酸化物系ではアルカリ金属，アルカリ土類および希土類酸化物が典型的な塩基反応を促進することは周知の事実であるが，どの程度のドメインサイズから物性が発現するのかは未知であった．関連した研究として酸化鉄粒子を細孔

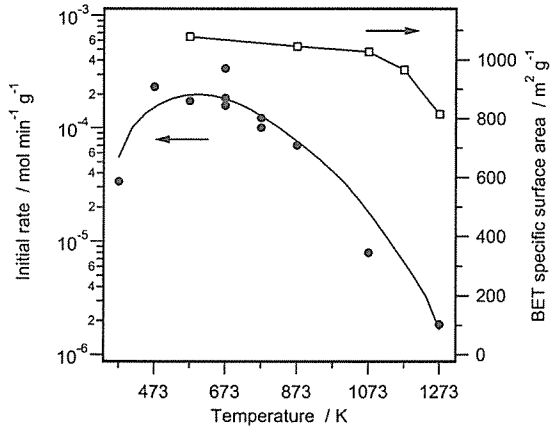


図3 FSM-16の1-ブテン異性化反応活性と表面積に対する前処理温度依存性．活性が二桁下がる1273Kでも高表面積を維持している．

内に合成して粒子径によりバンドギャップを制御した研究[7]があり，それを参考にした．まず細孔径 2.8 nm の FSM-16 を合成し，10重量%のイッテルビウム酸化物担持した触媒を調製した．この試料を用い典型的な酸塩基テスト反応である1-ブテン異性化反応を行ったところ 2-ブテンが生成した．このとき *cis/trans* 比は典型的な酸触媒反応の値（1.4 - 1.7）を示していた．予想に反して担持量を増やすと活性が減少し，逆に低担持量では高活性となった．さらに何も担持していない触媒が最も高い活性を示した．シリカ多孔体上のイッテルビウム種が新しい活性点を創生するのではなく，逆に被毒していたのである．FSM-16 の活性は前処理温度に対して山形の依存性を示し，673 K 付近で最高となったのち，1073 K 以上で急激に低下した（図 3）[8]．活性の前処理温度依存性は α-ピネン異性化反応でも同様であった．高温処理した試料を 353 K の水に浸漬すると活性は元に戻るが，1373 K 焼成により構造が崩壊した試料では水和処理後も不活性であった．高温処理に伴う活性低下は表面性質の変化によることは明らかである．赤外分光法および熱分析による検討の結果，メソシリカ多孔体表面にある二種類の孤立水酸基のうち，隣接するもの同士が弱く水素結合した孤立水酸基が Brønsted 酸点として作用することを結論した．また Brønsted 酸点以外にも Lewis 酸点が存在し，処理温度を高くするとその酸量は増加する．たとえば Lewis 酸に触媒されるメチルアミン合成反応は 1273 K 処理のものが最も高活性である[9]．いずれもヘキサゴナル構造を有していることが酸性質発現に重要なポイントである．

現在では他の研究者による追試や MCM-41 による別の触媒反応系の開発などにより，規則性シリカメソ多孔

体の酸触媒作用は認知されたと認識しているが，当時はシリカが化学的に不活性であることは触媒化学の常識であった．同時にアルミニウムや遷移金属イオンがシリカと混合すると固体酸性が発現することも周知の事実であったために当初は強い批判を受けた．用いたFSM-16にも微量のAlが不純物として含まれているものの，活性は不純物効果で予想される値を凌駕していた．原料，調製法，再現性を十分確認したうえで速報誌に投稿したが問題外であると立て続けに掲載を拒否され，学会で発表しても「基礎が欠落した失敗実験だろう」という反応が大半であった．活性種の推定，他の基質よる活性試験，他の触媒との比較，活性発現および不活性化のための必要条件を追加し，総合論文とすることで「発見」の二年後にようやく受理にこぎつけることができた[8]．

この規則性シリカメソ多孔体の表面物性がいわゆる非晶質シリカとなぜ異なるかに関して現在まで明確な知見は得られていない．一般的に非晶質シリカを1073 K以上で高温処理すると水酸基の脱離に伴うシロキサン結合の生成および粒子成長により表面積が数分の1に低下するが，メソポーラスシリカは同程度に水酸基が脱離するものの表面積低下は数%程度である．規則性メソシリカ多孔体のシロキセンブリッジは通常の非晶質シリカと比して歪みが大きいためにLewis酸性を帯び，隣接する水酸基のBrønsted酸性が誘起されているのではないかと考えている．

5. ニッケルイオン担持シリカメゾ多孔体によるエチレン転換反応

2002年12月に東京工業大学資源化学研究所岩本研究室に助手として採用され，シリカメソ多孔体MCM-41を中心としたナノ空間物質による気相触媒反応系の開発に従事させていただいた．私がメンバーに加わった時点は，ニッケルイオンを担持したMCM-41がエチレンの連続的な転換反応に活性を示し，573 Kでブテン，673 Kでプロピレンが生成する新規反応の発見[10]直後であった．石油化学産業はこれまでエチレンを中心として操業されてきたが，近年プロピレン誘導体の需要が急増していること，中東やアジアでエタンベースのエチレン製造の大型プラントが建設中であることから，日本ではプロピレンを原料とするプロセスへの転換が進められている．プロピレン増産のためエチレンとブテンのクロスメタセシスによる生産プラントが建設中であるが，単一の原料から直接生成するプロセスの開発が望まれていた．

触媒調製は職人技に通じるものがあり，たとえ最終的な組成が同じでも原料や手順が少しでも異なれば当然，同じ人が同様に実験しているはずでも活性を再現できないことは珍しいことではない．例外にもれず，エチレン転換反応の実験を引き継いだ学生が活性を再現できずに苦闘していた．たった一度のチャンピオンデータより，7割の活性でよいから再現性を重視する方針で調製法と反応装置を改良し，最終的に活性を3倍向上することができた（余談であるが先のFSM-16の固体酸性質に関する研究では不純物の影響を排除するため，試料調製時の水洗-ろ過操作を1試料につき6回行っていた．また1ヶ月間，毎日同じ試料の合成を繰り返した）．この触媒はMCM-41前駆体であるシリカ-界面活性剤ミセル-メソ構造体中の界面活性剤イオンをニッケルイオンと交換後に焼成して調製する（テンプレートイオン交換法）．一般的に金属イオン添加法は含浸法であり，担体（触媒の活性成分を載せる台）の原料まで注意を払っていない場合が多い．本反応はMCM-41がコロイダルシリカから合成され，ニッケルイオンをイオン交換法で導入しない限り高活性は得られない．文献を見る限りではMCM-41合成にはオルトケイ酸テトラエチルを用いる例が多い．オルトケイ酸テトラエチルその他2種類のシリカ源で合成した触媒の細孔特性，表面積およびニッケル担持量はほぼ同じであるにもかかわらず，エチレン転換反応は極めて低活性あるいは不活性であった．このときエチレン転換反応が高活性な触媒ほど生成ブテン異性体中のイソブテン比率が高い．ブテンの骨格異性化を促進しうる強い酸点が反応活性と関連していることと考えているが，不純物であるアルミニウム濃度（最大700 ppm）やシリカ源がどのように物性に影響するかは不明である．

触媒重量あたりの活性が最も高い触媒はニッケル含有量が5%程度のものである．ニッケルイオンの担持方法を変えて活性試験を行った結果が図4である．イオン交換法で調製した触媒が最も高活性であることがわかる[11]．この調製法の異なる試料のEXAFSスペクトルおよびフーリエ変換して得た動径構造関数を図5に示す[11]．イオン交換法で調製した触媒中のニッケル種は孤立高分散状態で存在していると予想していたが，動径構造関数に示すようニッケル－ニッケル＋シリコン対を持つドメインとして触媒表面上に存在していることが明らかとなった．活性を示す触媒のニッケル種は層状ニッケルケイ酸塩，含浸法では酸化ニッケルと類似した構造であることは明らかである．イオン交換直後の未焼成試料のEXAFSスペクトルも同一であった．ニッケル酸素八面体層がMCM-41のシリコン酸素四面体の層と積み重なった層状ケイ酸塩構造が，ニッケルイオン導入過程で形成していると考えられる．また昇温還元実験より，このニッケル種は酸化ニッケルよりもはるかに還元されにくいことが明らかとなった．その他の検討については省略するが，エチレン転換反応が効率よく促進されるために

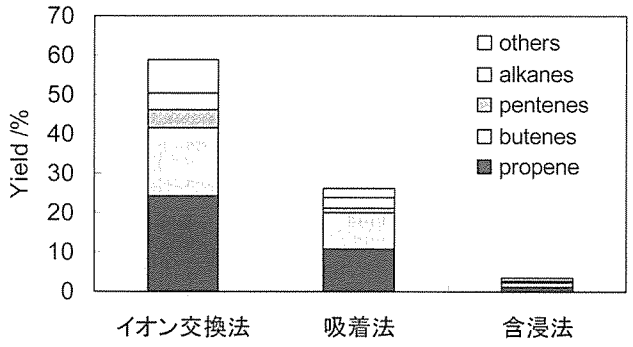


図4 調製法の異なるニッケルイオン担持 MCM-41 によるエチレン転換反応活性

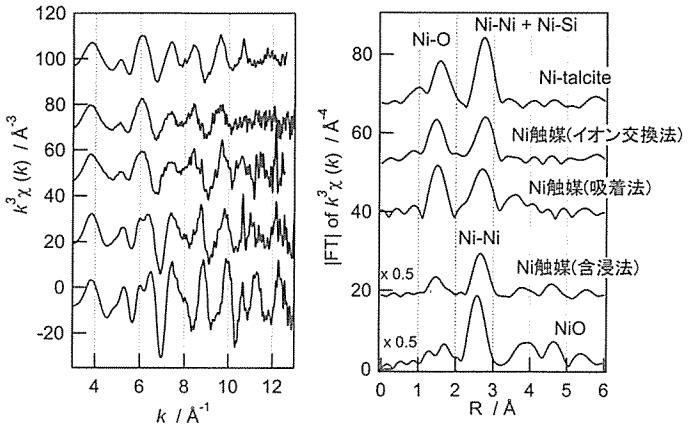


図5 調製法の異なるニッケルイオン担持 MCM-41 の EXAFS スペクトル．エチレン転換反応活性が高い触媒のニッケル種は層状ケイ酸塩（タルサイト）を形成している．

兼ね備える条件は①MCM-41 担体，②ニッケルイオン，③テンプレートイオン交換法に加えて，④コロイダルシリカ原料および⑤焼成温度 773 K であることが明らかとなった．②，④は活性発現の必須事項であるが，①および③は必須ではなかった．③項はエチレン転換反応に有効な層状ニッケルケイ酸塩構造を形成するための調製法である．エチレンは還元性ガスであり，NiO 粒子は反応温度 673 K では容易に金属まで還元されコーク析出が起こる．しかし MCM-41 上のニッケルケイ酸塩は難還元性であり（金属まで還元するには 1100 K 以上が必要），担体はエチレン活性化に有効であるとされる Ni^+ 種（EPR により存在は確認しているが未定量）の安定化に何らかの役割を果たしていると思われる．

6. 最 後 に

メソポーラスシリカ自身の触媒作用を初めて報告したのはおそらく 1996 年，Hartmann らによりニッケルイオンを担持した MCM-41 によるエチレン二量化反応のブランクとして MCM-41 でブテンの異性化を行っていたものであろう[12]．著者の発表以前に酸触媒活性を示している例は数例報告されてはいたが，いずれも他の触媒の参照試料として用いるのみであり，その活性や構造特有の物性であることには誰も着目していなかった．著者がこの研究を開始した当初はメソシリカ多孔体が促進可能な反応は一般的な弱い固体酸が促進する反応のみであろうと考えていた（ハメット指示薬を用いて見積もった FSM-16 の最高酸強度は 48% 硫酸相当[8]）．メソ多孔体関連の研究は 1998-2000 年を頂点として研究者数は減少していたが，近年は MCM-41 が 100% 硫酸に匹敵するフリーデルクラフツ型の反応に活性を示すこと，オレフィンのジオール化に対して特異な選択性を示すこと，ケトンのアセタール化反応活性に対する特異的な細孔径依存性が見出されたことなど，ナノ空間物質固有の機能が東京工業大学岩本教授により発見されつつあり[13]，規則性メソ多孔体自身がふたたび機能性物質として注目されているというところが現状である．著者自身も FSM-16

上での2-ブタノール分解反応に対して活性の細孔径依存性を確認しており（図6），シリカメソ多孔体の局所構造の歪みと物性に関する研究を行おうと考えている．

私は主に物性評価や活性種に関する分光学的研究を行ってきたことも一因として，プロセス設計学研究室に助教として採用していただいた．これまでは製品として完成された分光装置をそのまま利用するのみであった．分光装置/手法の開発はおろか，装置を製作したことはなく，現在は分光学に取り組む心構えや計測プロセスなど，学生以上にご指導いただいている日々である．常識という非常識にとらわれることなく，一所懸命精進いたしますのでご指導ご鞭撻の程，何卒よろしくお願い申し上げます．

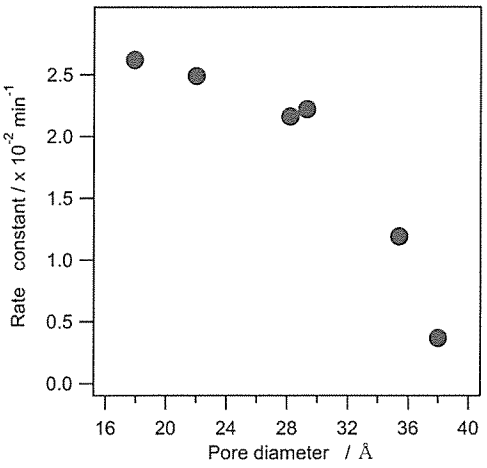


図6　FSM-16による2-ブタノール分解反応活性に対する細孔径依存性．同じ原料から合成した非晶質シリカは不活性．

参　考　文　献

1) T. Yanagisawa, T. Shimizu, K. Kuroda and C. Kato: Bull. Chem. Soc. Jpn 63, 988-992, (1990).
2) S. Inagaki, Y. Fukushima and K. Kuroda: J. Chem. Soc., Chem. Commun., 680-682, (1993).
3) C. T. Kresge, M. E. Leonowicz, W. J. Roth, J. C. Vartuli and J. S. Beck: Nature 359, 710-712, (1992).
4) M. Ichikawa: Adv. Catal. 38, 283-400, (1992).
5) T. Yamamoto, T. Shido, S. Inagaki, Y. Fukushima and M. Ichikawa: J. Am. Chem. Soc. 118, 5810-5811, (1996).
6) A. Fukuoka, J. Kimura, T. Oshio, Y. Sakamoto and M. Ichikawa: J. Am. Chem. Soc. in press.
7) T. Abe, Y. Tachibana, T. Uematsu and M. Iwamoto: J. Chem. Soc., Chem. Commun., 1617-1618, (1995).
8) T. Yamamoto, T. Tanaka, T. Funabiki and S. Yoshida: J. Phys. Chem. B 102, 5830-5839, (1998).
9) T. Yamamoto, T. Tanaka, S. Inagaki, T. Funabiki, S. Yoshida: J. Phys. Chem. B 103, 6450-6456, (1999).
10) M. Iwamoto and Y. Kosugi: J. Phys. Chem. C 111, 13-15, (2007).
11) K. Ikeda, Y. Kawamura, T. Yamamoto and M. Iwamoto: Catal. Commun. in press.
12) M. Hartmann, A. Poppl and L. Kevan: J. Phys. Chem. 100, 9906-9910, (1996).
13) 岩本正和：触媒　48, 21-26, (2006)

談　話　室

太陽電池用シリコンバルク多結晶の新しい成長方法

野　瀬　嘉太郎*

New Growth Method of Bulk Polycrystalline Silicon for Solar Cells

by Yoshitaro NOSE

1. はじめに

私は，平成19年3月付けで，材料工学専攻表面処理工学講座に助手として着任いたしました．これまでの経歴を述べますと，平成12年3月に京都大学大学院工学研究科材料工学専攻修士課程修了後，当時の指導教官であった小岩昌宏先生のご退官もありまして，大阪大学大学院工学研究科博士後期課程に進学しました．大阪大学では，修士課程のときからお世話になっておりました中嶋英雄先生のご指導のもと，「Diffusion in $L1_2$- and $L1_0$-ordered alloys in Fe-Pt system」という題目の研究で博士（工学）を得ました．この間は，金属間化合物あるいは規則合金における原子の拡散機構について研究を行いました．平成16年6月に東北大学金属材料研究所に助手として採用していただけることになり，天下に名だたる金研に就職するということで，不安一杯で仙台に着いたのを覚えております．金研では，学生時代とは全く異なり半導体の凝固・結晶成長の研究に従事しました．主に，太陽電池用のSiのバルクおよび薄膜結晶の成長の研究を行って参りました．学生時代は，固体中の原子の拡散という，まさに基礎中の基礎研究を行っておりましたが，助手になり太陽電池用材料の開発という応用的側面の強い研究にも従事し，いろいろと経験をさせていただきました．特に，大学の研究者だけでなく，国内外の企業の方とも接する機会や工場を見学する機会に恵まれたことは今後の研究生活に生かせるのではないかと思っております．

本稿では，上記の研究の中から，現在もプロジェクトが進行中であります太陽電池用Siバルク多結晶の新しい成長方法に関する研究についてご紹介させていただきます．

*京都大学大学院工学研究科　材料工学専攻　助教

2. 太陽電池用材料開発の現状

日本における太陽電池の研究開発は古く，「サンシャイン計画」は1974年に始まった．その後約30年の間に，科学技術の進歩はもちろん政府の積極的な太陽電池導入政策の助けもあり，我々の身の回りのところどころで太陽電池を見かけるようになった．図1に全世界における種類別太陽電池の生産量の推移を示す†．これを見るとわかるように，ここ数年で急激に生産量が伸びている．ここでは，2004年までしか示していないが，2005年は1660 MWと年40%近い伸びである．（この生産量の伸びは近年ドイツやアメリカが太陽電池の導入に積極的であるためではないかと考えられる．）特に，日本は世界一の太陽電池生産国であり，2004年では全世界のおよ

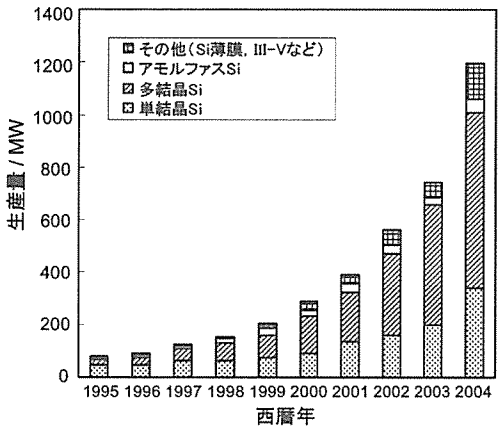


図1　種類別太陽電池の生産量

†太陽電池の生産量は相当する発電量で示すのが通例であるので，ここでもMW（メガワット）で示した．

そ半分は日本のメーカによるものである．また，種類別を見てみるといわゆる結晶系 Si 太陽電池（単結晶 Si と多結晶 Si）が全体の 90% 近くを占めており，残りはアモルファス Si や化合物半導体を用いたもの，最近では単結晶 Si とアモルファス Si を組み合わせたものもある．多結晶 Si 太陽電池は比較的簡便な方法で作製でき，しかも大量生産が可能であることからトップのシェアを占めている．このような背景から，太陽電池メーカは近年，非常に景気がよく，さらなる増産を検討しているようである．しかし，Si 基板を作製するのに用いられる高純度 Si 不足が懸念されており，筆者らが研究で使うような数 10 kg〜100 kg の高純度 Si だとなかなか手に入らないのが悩みの種である．以上のように太陽電池の生産量は急激に伸びているものの，それでも一般に普及しているとは言い難い．要因はいくつかあるが，やはり発電量あたりのコストがネックになっている．最も生産量の多い多結晶 Si 太陽電池では，市販されている太陽電池のエネルギー変換効率は 14〜15% 程度（セルベース）であり，我々が普段使っている電力の 2 倍以上のコストがかかる．そこで，世界中の研究者は Si 太陽電池のエネルギー変換効率の向上や Si に替わる新しい材料の開発に取り組み，コスト低減を図り，太陽電池普及のために奮闘している．

3．シリコンバルク多結晶の新しい成長方法 ー浮遊キャスト成長法ー

金研に着任した当初，与えられたテーマは「Si 融液からの液相エピタキシャル（Liquid Phase Epitaxy, LPE）成長による Si 薄膜結晶の成長」であった．これも太陽電池としての応用をにらんだものなのだが，通常の Si の LPE 成長は Ga や In など低温で Si と相分離をおこす元素を溶媒として，高温で Si を溶媒に溶解させたのち，溶媒を Si 基板上に移動させ，温度を下げて基板上に Si 薄膜を堆積させる方法が用いられる．しかし，この方法は成長させた結晶に溶媒が混入するなどの問題があった．そこで，ピュアな Si 融液から成長させたらどうか？という発想である．方法は，図 2 に示すような装置を用い，まず，坩堝に入れた Si を十分に融解させる．次に，それを融点（1414℃）直上まで冷却したところで，上部に保持していた Si 単結晶基板を融液の中に入れ，一定時間保持したのち引き上げる，いわゆる dipping 法である．この方法を用いた場合，単結晶基板上に Si 結晶がエピタキシャル成長することはわかっていたのだが，両者を分離することが難しく，成長させた結晶自体の電気的・光学的特性を評価することは困難であった．そこで筆者は，できるだけ厚く基板上に成長させることを提案した．そのために，一度融液の中に入れた単結晶基板を引き上げず，そのまま室温まで冷却することを行った．この方法をボスであった中嶋一雄先生と当時研究室にいた中国人のポスドクとディスカッションする中で，研究室ではバルク多結晶の研究もしていたこともあって，「これをバルク結晶の成長に応用したらどうか？」ということになった．（ちなみに，中嶋一雄先生は京大冶金学科，村上陽太郎先生の研究室のご出身である．筆者自身，4回生時は長村光造先生の研究室に所属しており，中嶋先生の後輩であるとも言える．また，ポスドクであった彼は，現在，某太陽電池用 Si 結晶メーカで仕事をしているが，筆者とはインターネットテレビ電話を使って今でもときどき議論を交わす仲である．）

現在，Si 多結晶太陽電池は，キャスト成長法により多結晶インゴットを作製し，そこから基板を切り出している．キャスト成長法とは，いわゆる鋳込みであるが，太陽電池業界では一方向凝固のことを指すようである．この成長法の問題点は，坩堝内面に塗られた離型剤からの不純物の拡散による汚染，石英坩堝に密着した結晶成長のため，坩堝との接触による残留歪みと，坩堝表面からの核形成による結晶粒の微細化である．そこで筆者らが提案した方法は，図 3 に示すように，融液の上部中心付近を局所的に抜熱することにより，核生成位置を限定し，坩堝と接触させないように成長させる方法である．抜熱する際は，上記のように結晶を用いてもよいし，冷却ガスを局所的に吹き付けてもよい．この方法では，1）気-液界面での核生成のため，坩堝底よりも核生成頻度が小さく，大きな結晶粒が得られる，2）凝固の最終段階まで結晶と坩堝が接触しないため，成長中における坩堝からの不純物拡散，接触による歪みが低減される，ことが期待される．また，今後の学会発表等のために，この成長方法の名前を考えることになったのだが，当初は，ある名前を付けていた．しかし，成長法を容易にイメージできる名前がよいということで，2 度の改名を経て，現在では，「浮遊キャスト成長法」に落ち着いた．これ

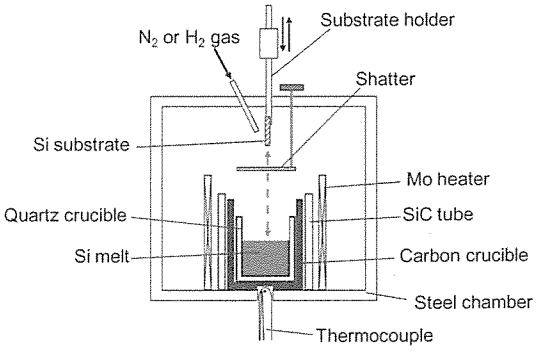


図 2　LPE 成長炉

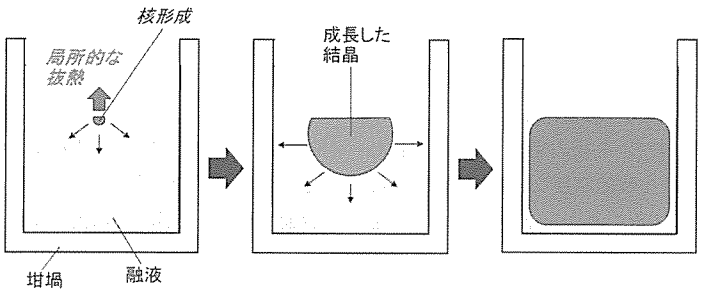


図3　浮遊キャスト成長法のイメージ

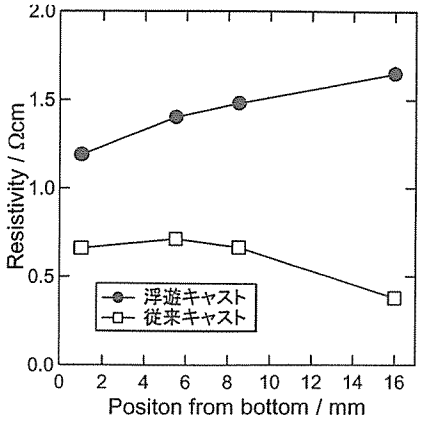


図4　抵抗率．横軸は坩堝底からの距離

は，成長時のSi結晶が融液に浮いており，ちょうど水に浮く氷に似ているからである．こうして，「浮遊キャスト成長法」を用いた太陽電池用Siバルク多結晶の成長の研究がスタートした．

4. 実験と結果

まず，「浮遊キャスト成長法」により期待した通りの結晶が得られるのか？，従来のキャスト成長法と比べて優位性があるのか？を実証しなければならない．そこで，「浮遊キャスト成長法」と従来のキャスト成長法で成長させた結晶の組織・物性を比較した．実験を始めた当初は，研究室にあった小さな縦型炉を用い，非常に小さい坩堝（ϕ23 mm）で行った．冷却速度は0.1℃/minに固定し，炉内で坩堝の位置を変えることにより，温度勾配の違いを利用して成長法（成長方向）を制御した．この実験で，「浮遊キャスト成長法」により成長させる場合はSi種結晶や冷却ガスなどを用いず，炉内の温度分布を制御することで，融液の表面中心付近から核形成を促した．成長後の結晶を成長方向と垂直に切断し，種々の評価を行った．図4に抵抗率の測定結果を示す．本研究では，高純度のSi原料を用い，Bなどのドーパントを意図的に混合して抵抗率を制御していないにもかかわらず，1Ωcm以下の値であった．これは坩堝壁に塗布してある離型剤に含まれるAlがドーパントとして混入していると考えられる．そこで，化学分析により結晶に含まれるAl濃度を測定したところ，数ppmのオーダーで混入していることがわかり，Alがドーパントであることを確認できた．両成長法で比較すると「浮遊キャスト成長法」の結晶の方が従来法の結晶よりも抵抗率が高いことがわかる．ここで，太陽電池特性に影響を与える不純物であるFeなどは，抵抗率と直接関連しないが，抵抗率，すなわちドーパントであるAlが取り込まれた量を見ることにより，Feなどの不純物が取り込まれた量を間接的に評価していることになる．従って，抵抗率が高い，ということはFeなどの不純物量が少ないと考えられる．このことから，当初の狙い通り「浮遊キャスト成長法」では成長中の不純物の混入が抑制されていることが示唆される．また，従来法では，結晶底部の方が上部に比べて抵抗率が高いが，「浮遊キャスト成長法」では結晶上部の方が抵抗率が高いことがわかった．これは，「浮遊キャスト成長法」では上部から下部に向かって結晶が成長し，下部に不純物が偏析することから，このような傾向を示すと考えられる．次に，これらの結晶をソポリエッチによりエッチングし，エッチピット密度を評価したところ，「浮遊キャスト成長法」の結晶の方が低い値であった．Siの凝固成長では，融液に比べ結晶の方が密度が小さいため，凝固時の残留歪みは結晶内の転位発生の大きな要因と考えられる．従って上記の結果は，「浮遊キャスト成長法」では核形成時に坩堝と接触しないために残留歪みが低減したためだと解釈できるが，結晶内の歪みに関しては今後もう少し詳細に調べる必要がある．さらに，SEM-EBSP法により結晶粒方位および結晶粒界について調べた．その結果，「浮遊キャスト成長法」により成長させた結晶の粒サイズは従来法のものより明らかに大きく，結晶粒方位は数種類しか見られないことがわかった．図5には粒界について解析を行った結果を示す．「浮遊キャスト成長法」の結晶の方が粒界密度が小さく（これは結晶粒サイズが大きいことと等価

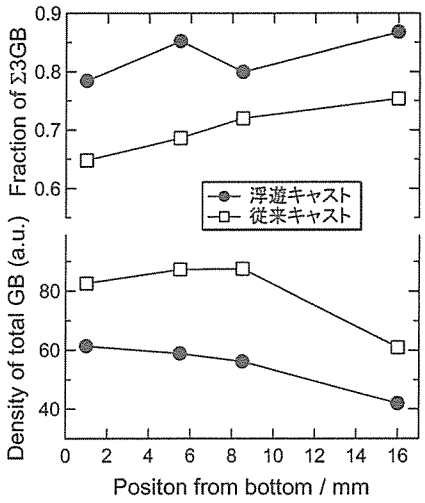


図5　粒界密度とΣ3粒界の割合

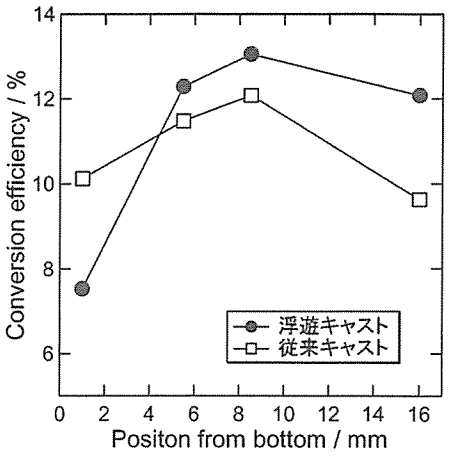


図6　変換効率

である），さらに，電気的に不活性（太陽電池特性に影響しない）とされているΣ3と呼ばれる結晶粒界の割合は高いことがわかった．すなわち，「浮遊キャスト成長法」の結晶では電気的に活性な粒界が非常に少ないことがわかる．以上のことから，「浮遊キャスト成長法」では従来法の問題点であった不純物濃度，残留歪み，結晶粒サイズ全てにおいて，改善されることがわかった．そこで，これらの結晶を用いて太陽電池を試作し，その特性評価を行った．図6に変換効率を示す．横軸は坩堝底からの位置である．その結果，坩堝底を除いて，「浮遊キャスト成長法」の結晶の太陽電池は，従来のものよりも変換効率が高いことが明らかとなり，「浮遊キャスト成長法」の優位性が実証された．さらに，従来のものは坩堝底と結晶上部で変換効率が低下するのに対し，「浮遊キャスト成長法」では結晶上部で変換効率が低下の割合が少ないことがわかった．これは，「浮遊キャスト成長法」では歩留まりの向上が期待されることを示唆している．

幸い以上のような成果が認められ，昨年より新エネルギー・産業技術開発機構（NEDO）から予算を頂けることになり，「浮遊キャスト成長法」専用の結晶成長炉を導入することができた．一度に数kgのインゴットを作製することが可能であり，上部から冷却ガスを吹き付けることも可能である．なんてことはない小さな発想から，ここまで展開するとは当初夢にも思わず，研究の面白さを改めて感じた．現在，この成長炉を用いた研究成果も出つつあるが，特許出願との関連もあるので，本稿では差し控えさせていただく．

5. おわりに

筆者は現在32歳ですが，京大→阪大→東北大→京大と5つの研究室を渡り歩いてきました．この短い期間でさまざまな経験ができたことは，自分にとって財産であり，今後の研究生活に生かせると思っております．近年，環境問題が叫ばれる中，太陽電池研究は重要な研究テーマの一つであり，本稿で述べた研究のみならず，Si以外の太陽電池材料に関する研究にも着手しようと思っております．京大で仕事ができる喜びを感じつつ，力の限り研究・教育に邁進していく所存ですので，今後ともご指導・ご鞭撻をよろしくお願いいたします．

参考文献

太陽電池生産量等のデータは，NEDOのホームページを参考にした．
http://www.nedo.go.jp/nedata/17fy/index.html

談　話　室

強相関電子系及びフラストレート磁性体の研究

田　畑　吉　計*

Study on Strongly Correlated Electron Systems and Frustrate Magnets

by Yoshikazu TABATA

1. はじめに

平成19年5月1日付けで材料工学専攻材料物理学分野（中村裕之教授）の助教に着任しました．これまでの経歴を簡単に紹介いたしますと，平成13年3月に大阪大学理学研究科物理学専攻で理学博士の学位を取得した後，同年4月から9月末まで理化学研究所播磨研究所で放射光利用連携研究員として，同年10月から大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻で助手として，研究生活を送ってきました．主な研究テーマは，“強相関電子系における量子相転移”や“フラストレート磁性体におけるエルゴード性の破れ”，です．本稿では，その内容を私のこれまでの研究生活を振り返りながら紹介したいと思います．

2. 重い電子系における非フェルミ液体現象 —大学院生時代

私は大学4年生のとき，大阪大学理学部の都福仁教授の研究室に配属され，以後6年間そこで研究生活を行いました．研究室に配属されて暫く，私は直接の指導教官であった助手の谷口さん（現阪大准教授）の指導のもと，希釈冷凍機を使った極低温下（<1K）での比熱測定装置の作製をしていました．卒業間際の3月に0.1 Kから2 Kの温度範囲で測定が可能になり，「重い電子系における非フェルミ液体現象の物理的起源の解明」というテーマで修士，博士時代は研究を行うことになりました．重い電子系における非フェルミ液体（NFL）現象は，私が大学院生として研究生活に入る少し前の1994年頃から世界的に注目され盛んに研究され始めたテーマです．以下でその簡単な解説をします．

*京都大学大学院工学研究科　材料工学専攻　助教

重い電子系は，その伝導電子の有効質量が自由電子の場合の100〜1000倍にも大きくなる物質群のことで，主にCeやU，Yb，Prなどを含む希土類金属間化合物で見つかっています[1]．伝導電子の有効質量が重くなる起源は，Ceなどの持つf電子間の強い電子相関の効果で，この様な強い電子相関がその性質を左右する物質のことを強相関電子系と呼びます[1]．重い電子系では，電子相関が強くバンド幅の狭い（局在的な）f電子と電子相関が弱くバンド幅の広い伝導電子（s, p, d電子）の2種類の電子が存在し（実際はそんな単純なものではありませんが，ここではそうモデル化しておきます），両者間の相互作用（cf相互作用）が物性を強く支配します．cf相互作用J_{cf}が強ければ，f電子と伝導電子は混成バンドを作り，相関の強い“重い”電子となります．その場合，基底状態は常磁性フェルミ液体です[2]．一方，J_{cf}が弱ければf電子は局在電子として振舞い，系は局在スピン系と看做す事が出来ます．もちろんその場合も十分低温（$T \ll J_{cf}$）では混成バンドは形成されますが，それよりもずっと高温でcf相互作用の2次摂動であるRKKY相互作用によって磁気秩序を形成します．従って，J_{cf}を圧力や元素置換などによって変化させると，絶対零度で磁気秩序からフェルミ液体へと量子相転移するわけです（図1 (a)）．

[1] 重い電子系の他，銅酸化物超伝導体や有機伝導体なども強相関電子系の一種です．

[2] フェルミ液体はL. D. Landauによって互いに相互作用するフェルミ粒子の基底状態として理論的に提唱されたもので，相互作用はフェルミ粒子の有効質量に繰り込まれ，物理量の振舞は（相互作用の無い）フェルミ気体と同じになります．液体^{3}Heや重い電子系はその典型例です．

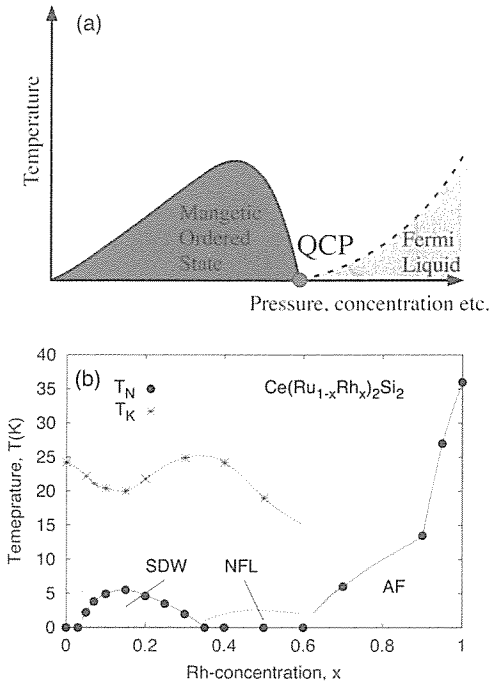


図1　(a) 重い電子系の概念的な相図．(b) $Ce(Ru_{1-x}Rh_x)_2Si_2$ 系の x-T 相図．3つのQCPが存在し，Rh中間濃度では広い範囲に渡ってNFLが観測される．

しかし，この，磁気転移しない重い電子系の基底状態はフェルミ液体である，という理解に反し，多くの常磁性の重い電子化合物でフェルミ液体から逸脱したNFL的振舞に関する報告が1990年頃からなされるようになりました[2]．NFL的振舞に関しては，表1にまとめておきます．NFLの起源については当時いろいろ取沙汰されましたが，基本的には (I) 量子相転移の臨界現象，(II) ランダムネスの効果，(III) 多チャンネル近藤効果，の3つの可能性が考えられました．(I)は上で述べた，磁気秩序-フェルミ液体量子相転移の起こる量子臨界点 (QCP) 近傍ではフェルミ液体としての一粒子励起よりも低エネルギーのスピンの集団励起が存在し，それが物性を支配するためNFLになる，というものです．(II) は元素置換などによってCe等の磁性イオンの周りの局所的な環境がランダムになり，その結果 J_{cf} に分布が生じ，一部の磁性サイトで絶対零度までスピン自由度が残り，そのゆらぎが系の低エネルギー励起を支配してNFLになる，というものです．また，このようなランダム系でQCP近傍に系をコントロールすると，ランダムに残ったスピン自由度が結合して巨大な磁気クラスターを形成し，そのゆらぎがNFLを引き起こすことも考えられます（量子グリフィス異常）．(III) は高対称な結晶構造を持ちf電子がスピン自由度のみならず軌道自由度も有している系では，f電子と伝導電子とのcf相互作用のチャンネルが2以上になり，基底状態がフェルミ液体にならずNFLになる，というものです[3]．NFL現象の多くが圧力印可や元素置換によってQCP近傍にコントロールされた物質で観測されており，多くの研究により現在では，純粋な物質では (I) の量子臨界現象が，元素置換系では (II) の特に量子グリフィス異常が，その物理的起源として有力と考えられています[4]．

表1　様々な物理量のフェルミ液体状態と非フェルミ液体状態での温度依存性．

	フェルミ液体	非フェルミ液体
比熱 $C(T)$	$\propto T$	$\propto -T\log T$ or $\propto T^{\alpha}$ $(\alpha<1)$
帯磁率 $\chi(T)$	const.	$\propto -\log T$ or $\propto T^{-\gamma}$ $(\gamma<1)$
電気抵抗 $\rho(T)$	$\propto T^2$	$\propto T^n$ $(n<2)$

私が研究を始めた頃（1996年）は，NFL現象に関する理解はまだ混沌としており，漠然と量子臨界現象やランダムネスとの関係が議論されていた状態でした．私は基底状態が常磁性フェルミ液体の典型的な重い電子化合物 $CeRu_2Si_2$ のRh置換系（$Ce(Ru_{1-x}Rh_x)_2Si_2$）を対象物質としてNFL現象の研究を行いました．この物質のRh濃度 x-温度 T の相図は図1 (b) に示した通りで，3つの異なるQCPがあり，特にRh中間濃度のQCPではRh置換によるランダムネスが量子臨界現象にどのような影響を調べる事が出来，NFL現象を研究する上で好都合な物質です．私は，前述の装置を用いた極低温比熱測定（図2 (a)），大学院博士課程時代に作製した装置による磁場中交流帯磁率測定（図2 (b)），さらにフランスのサックレー固体物理学研究所で行った磁場中電気抵抗測定[5]などにより，Rh中間濃度では量子グリフィス異常によるNFL現象が現れることを見いだしました．その一例として図2 (b) にはRh中間濃度の $Ce(Ru_{0.5}Rh_{0.5})_2Si_2$ と置換量の少ない典型的なNFL物質の $CeCu_{5.9}Au_{0.1}$ の交流帯磁率（の実部）の磁場依存性をプロットしてますが，$Ce(Ru_{0.5}Rh_{0.5})_2Si_2$ の方は低磁場（< 1kOe）で帯磁率は急激に下がっており，大きなモーメントを持った巨大磁気クラスターが存在することを良

[3] これは一部のU希釈系やCe希釈系のNFLの起源として提唱されましたが，その後の研究で実験と理論との食い違いが大きことから現実のNFL現象の起源としては（今のところ）不適切と考えられています．

[4] この違いはそれほどはっきりしたものではなく，純粋物質から高濃度置換系までで連続的に変化すると考えられますが，その変化に関する確たる研究はまだありません．

[5] 1998年9月から1999年3月までの半年間，留学生扱いでこの研究所で研究を行いました．

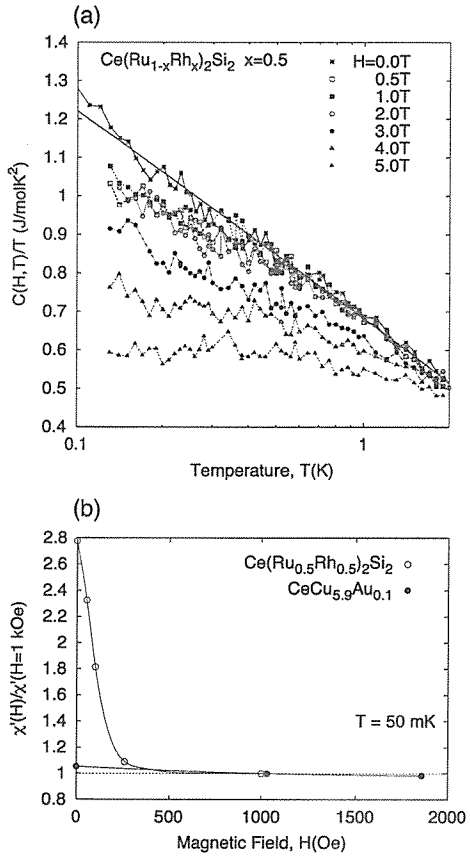


図2 $Ce(Ru_{0.5}Rh_{0.5})_2Si_2$の (a) 比熱（温度で割ったもの）の温度依存性，と (b) $T=50$mK での交流帯磁率の磁場依存性（比較のために$CeCu_{5.9}Au_{0.1}$のものも同時にプロットしてある）[3]．(a) では$H=0$T で$C/T\propto\log T$となっており，NFL的振舞が見える．

く示しています．これらの結果は博士論文にまとめるとともに，Phys. Rev. Lett 誌及び Phys. Rev. B 誌で発表しました[3]．

3. 重い電子系における2種類の量子臨界点 —阪大助手時代パート1

2001年の3月に学位を取った後，半年間のポスドク期間（@理研播磨研究所．西播磨の SPring-8 内にあります）を経て阪大理学研究科の河原崎教授の研究室の助手に採用されました．河原崎教授は都教授の後任（私が学生の時は都研の助教授でした）で，学生時代の研究室に出戻って来たことになります．阪大の助手になってからは中性子散乱実験を主な武器として，（大学院生時代から引き続き）重い電子系の量子相転移の研究を行うとともに，フラストレート磁性体に関する研究を始めました．まず，中性子を使った重い電子系の量子相転移の研究について紹介します[6]．

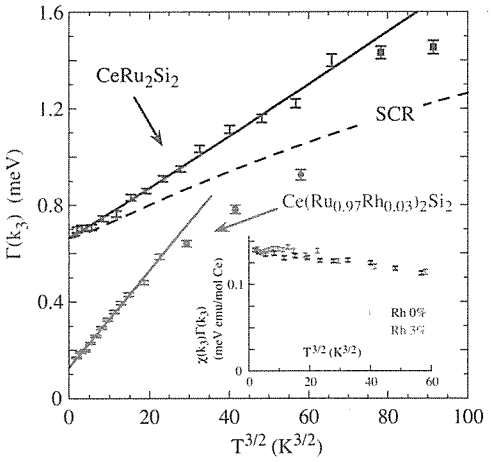


図3 $Ce(Ru_{1-x}Rh_x)_2Si_2$ $x=0$, 0.03 のスピンゆらぎの緩和率Γの温度依存性[7]．Γ vs. $T^{3/2}$でプロットしてある．

前節で紹介したように，重い電子系では磁気秩序の壊れる QCP 近傍で量子臨界現象による NFL 的振舞が現れます．しかし研究が進むうちに，この量子臨界現象に関する理解に関して大きな問題があることが分かってきました．初期の頃は重い電子系の量子臨界現象を記述する理論としては，d 電子系などと同じ遍歴電子磁性体の量子相転移の理論[5]が主流でした．これはフェルミ液体を出発点として遍歴電子のスピンゆらぎを取り入れて量子相転移を記述するもので（電子相関の弱い極限を出発点としており，弱相関理論と呼ばれる），常磁性領域でフェルミ液体となる重い電子系にも適用可能と考えられていました．しかし，多くの重い電子系の NFL 現象が必ずしもこの理論で旨く説明できないことが明らかになってきました．特に，$CeCu_{5.9}Au_{0.1}$の中性非弾性散乱実験で見つかった動的帯磁率の虚数成分 Im$\chi(Q,E)$ の E/T-scaling[4]は弱相関理論では説明不可能なものでした．そこで，新しく強相関極限の局在スピンの磁気秩序状態から cf 相互作用による量子ゆらぎを取り入れる強相関理論の研究が盛んに行われるようになり[6]，E/T-scaling を一応説明できるようになりました[7]．

[6] この節と次節の研究は共に首都大学東京の門脇広明氏との共同研究です．

[7] 個人的には，実験結果の E/T-scaling をこの強相関理論によって説明するのには問題がある，と考えています．なぜなら，実験では低次元（2次元に近い）のスピンゆらぎが観測されており，無限次元で正しい動的平均場近似を使っている強相関理論が適用可能かどうかに疑問が残るからです．

それでは，弱相関理論は現実の重い電子系の量子相転移を記述するのに全く無力なのか，というとそうではありません．一部の，重い電子の NFL 現象はこの理論でうまく説明できるからです．そもそも，強相関電子系の理論はほとんどある種の近似理論であり，厳密な理論は非常に限られた場合にしか得られていません．弱相関理論も強相関理論もそれぞれの極限から出発した近似理論で，どちらがより正しく現実の系を記述しているのか，あるいはそれぞれの理論で記述される 2 種類の QCP が存在するのか，といった疑問に対しては実験で確認しなければなりません．

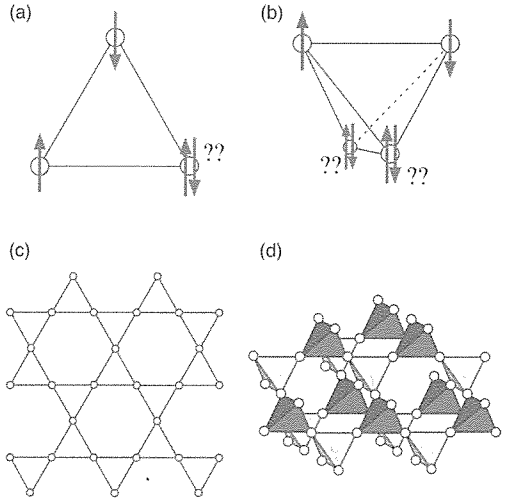


図 4　(a) 正三角形，(b) 正四面体上のスピン配置，及び正三角形，正四面体の頂点共有型ネットワークである (c) カゴメ格子と (d) パイクロア格子．

私は，前述の $Ce(Ru_{1-x}Rh_x)^2Si_2$ 系の Rh 低濃度 ($x \leq 0.05$) の研究によって，この系が弱相関理論によって記述される量子相転移を起こしている事を示しました[7]．弱相関理論によれば，QCP 近傍の $\mathrm{Im}\chi(Q, E)$ は $E/T^{3/2}$-scaling を示す，と考えられます．これを中性子非弾性散乱実験によるスピンゆらぎの緩和率 Γ の精密測定により確かめました．図 3 には Γ の温度依存性を示していますが，Γ は $T^{3/2}$ に比例しており，$E/T^{3/2}$-scaling を見事に示しています（E/T-scaling を示す $CeCu_{5.9}Au_{0.1}$ の場合，Γ は T に比例します）．この我々の $Ce(Ru_{1-x}Rh_x)_2Si_2$ の実験と A. Schröder 等による $CeCu_{5.9}Au_{0.1}$ の実験から，重い電子系には 2 種類の QCP が存在する，ということが言えそうです．しかし，両 QCP の出現条件などについては今のところ良く分かっていません．それを明らかにするのが今後の課題です．

4.　カゴメアイス状態のスピン相関
—阪大助手時代パート 2

次に，フラストレート磁性体に関する研究について紹介します．

まずフラストレート磁性体とは何か，ですが，図 4 をご覧下さい．この図 (a)，(b) の様な正三角形，正四面体の頂点にスピンがあり，スピン間の相互作用が反強磁性的な場合を考えます．このとき，図のように最低エネルギーのスピン配置に縮退があるため，スピン配置が一意に決まりません．この様な状態を，幾何学的フラストレーションが存在する，と言います．そして，この様な正三角形や正四面体をユニットとした格子，2 次元のカゴメ格子（図 4 (c)）や 3 次元のパイロクロア格子（図 4 (d)）を持つ磁性体のことを，フラストレート磁性体と呼び[8]，統計力学的に興味深い現象が多く現れ，昔から

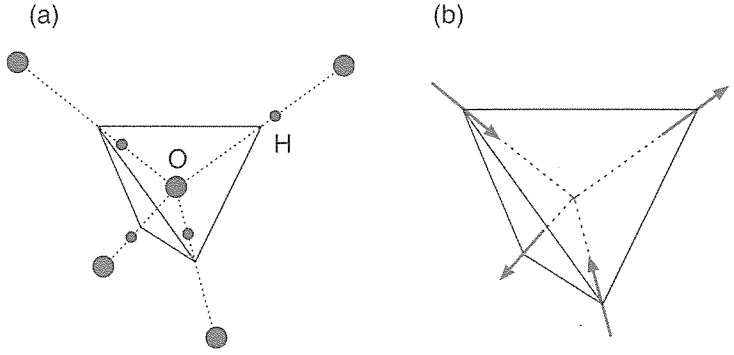


図 5　(a) 氷（Ih）中の水素原子の配置．酸素原子を重心とした正四面体を形成し，2-in 2-out 構造をとる．(b) スピンアイスの一正四面体のスピン配置．スピンの向きが 2-in 2-out 構造をとる．

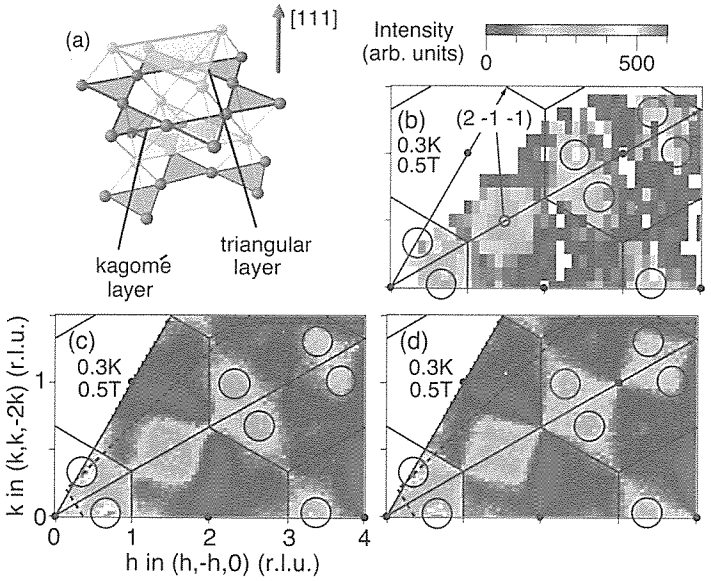


図6 (a) パイクロア格子を [111] 軸方向に沿って眺めた図．三角格子とカゴメ格子が積層しているのが分かる．逆格子空間中のカゴメ面に平行な面内のスピン相関（$T=0.3$ K, $H=0.5$T）．(b) 実験結果 (c) 双極子相互作用モデルでのシミュレーション結果 (d) 再隣接相互作用モデルでのシミュレーション結果．

盛んに研究されています[8].

この様なフラストレート磁性体の一つにスピンアイス系があります．スピンアイスの前に，氷の中のフラストレーションについて説明します．氷 (Ih) 中の水素 (H) 原子は，酸素 (O) 原子を中心として4面体配位をとりますが，(元は H_2O 分子なので) 図5 (a) の様にそのうちの2つは酸素原子に相対的に近く (2-in)，2つは遠く (2-out) に位置します（これを“ice-rule”と呼びます)．この 2-in 2-out 構造は一つ一つの正四面体では6つの縮退をもち，氷の中の水素原子の配置は一意に決まらずフラストレートしています．そのため，氷の結晶中の水素原子の配置には巨視的縮退が残り，非エルゴード的な凍結状態になります．この氷中の水素原子の位置と全く統計力学的に等価なモデルが，図4 (d) のパイロクロア格子上のスピンで実現されます．各正四面体ユニット上にその重心方向に容易軸を持ったイジングスピンがあり，その間の相互作用が強磁性的な場合，図5 (b) の様にスピンの向きが 2-in 2-out 構造を取ります．これを“スピンアイス”と呼び，10年ほど前に $Dy_2Ti_2O_7$ や $Ho_2Ti_2O_7$ で見つかりました[9]．スピンアイスは氷と全く同じ巨視的縮退を持つわけですが，氷と異なり，磁場をかけることによってその巨視的縮退を解き，氷では実現不可能な統計力学的状態もとることができるため，多くの物性研究者の注目を集めています．その内の一つが“カゴメアイス”です．パイロクロア格子をその [111] 軸方向から見ると，2次元三角格子と2次元カゴメ格子の積層格子になっているのですが（図6 (a))，磁場をその方向にかけると，もともと3次元的だった巨視的縮退が2次元カゴメ格子上に封じ込められ，2次元的な凍結状態になってしまいます．これをカゴメアイスと呼びます．しかし，現実のスピンアイス物質でこの2次元カゴメアイス状態が本当に実現するかどうかについては問題が残っていました．なぜなら，上記のカゴメアイスシナリオは強磁性相互作用が再隣接スピン間にのみ働く理論モデルに基づくものですが，現実のスピンアイス物質中の主たる相互作用は長距離まで届く双極子相互作用であるからです．

私は，スピンアイス物質 $Dy_2Ti_2O_7$ の中性子散乱実験によるスピン相関の詳細な観測とモンテカルロシミュレーションとを行い，このカゴメアイス状態が確かに実現することを実験的に示しました[10]．図6 (b) に中性子散乱実験によって得られた Dy_2Ti_2O7 のスピン相関 $S(q)$ の逆格子空間でのマップを，(c)，(d) にそれぞれ，(c) 双極子相互作用モデル，(d) 再隣接相互作用モデル，に基づくモンテカルロシミュレーションによる計算結果を示します．スピン相関の様子は (b)，(c)，(d) でほとん

[8] 日本の研究者による貢献も大きく，カゴメ格子の名前などにそれが現れています．

ど変わらず，（詳細な説明は省きますが）２次元カゴメアイス状態の特徴が良く現れています．このことから，双極子相互作用の下でもカゴメアイスが確かに実現していることが分かります．

5. これから —京大助教時代

最後に，京大に移って来てからの４ヶ月弱とこれからのことについて少し書いてみます．

私は学生時代からこれまでずっと理学系の研究室に所属していたので，工学研究科に着任して以来様々なカルチャーショックを受けています．とりわけ，７月にM2の人達の中間発表会があったのでですが，発表内容について口外しないこと，というような誓約書に署名をしなければならないのには驚きました．また，当研究科の学生の受けているカリキュラムというのは，当然私が受けたものとはかなり異なるので，私が全く知らないような内容の講義についての話を学生とすることもあり，新鮮です．

研究については，これまでのテーマを続けて行くのはもちろんですが，折角新しい環境に身を置く事になったのですから，新たな研究テーマにも手を出そうと考えています．まだ考えが完全には固まっていませんが，最近の物性物理では，多自由度の相互のカップリング(マルチフェロイック物質など)に関する研究が基礎物理的な興味とともに将来の応用も睨んで盛んに研究されるようになっており[11]，何か面白い研究の種はないか，と現在勉強中です[9]．京大助教時代がこの後何年続くのか分かりませんが，実りある研究生活をおくりたいと思っています．

参 考 文 献

1) 重い電子系一般に関しては，上田和夫，大貫惇睦，「重い電子系の物理」裳華房 物理学選書23.
2) 重い電子系の NFL 現象の review としては，G. R. Stewart, Rev. Mod. Phys. 73, 797 (2001).
3) Y. Tabata et al., Phys. Rev. Lett 86, 524-527 (2001)., Y. Tabata et al., Phys. Rev. B 70, 144415 (2004).
4) A. Schröder et al., Phys. Rev. Lett. 80, 5623 (1998)., A. Schröder et al., Nature (London) 407, 351 (2001).
5) A. J. Millis, Phys. Rev. B 48, 7183 (1993)., T. Moriya and T. Takimoto, J. Phys. Soc. Jpn. 64, 960 (1995).
6) P. Coleman et al., J. Phys.: Condens. Mater. 13, R723 (2001)., Q. Si et al., Nature (London) 413, 804 (2001).
7) H. Kadowaki, Y. Tabata et al., Phys. Rev. Lett. 96, 016401 (2006).
8) フラストレート磁性体に関して，長谷田泰一郎，目方守，「三角格子上の物理」共立出版 物理学最前線26.
9) M. J. Harris et al., Phys. Rev. Lett. 79, 2554 (1997)., A. P. Ramirez et al., Nature (London) 399, 333 (1999).
10) Y. Tabata et al., Phys. Rev. Lett., 97, 257205 (2006).
11) 最近の日本物理学会講演概要集などを見れば分かります．

[9] その関連で，現在スピン流と電流とのカップリングの問題に注目しています

談　話　室

X線CTを用いた岩石水理試験法に関する基礎的研究

深　堀　大　介*

Fundamenttal Study on Hydraulic Test Method of Rock by Means of X-ray CT

by Daisuke FUKAHORI

はじめに

本年4月に社会基盤工学専攻地殻工学講座地殻開発工学分野の助教として着任しました深堀と申します．菅原勝彦先生（昭和43年卒，熊本大学教授）のご指導のもと，本年3月に“X線CTを用いた岩石水理試験法に関する基礎的研究”という論文で博士（工学）の学位を取得いたしました．本稿では，これまでの研究成果の一部をご紹介させていただきます．

X線CT法

X線CT法はX線吸収率が物質の密度に比例することを利用し，被検体内部の密度構造を画像化する．このために，被検体に多数の方向からX線を照射し，被検体を通過する際のX線のエネルギー減衰から被検体内部の各点のX線吸収率を逆解析する．そのアルゴリズムは1917年にRadonによって示されたが，実用化にはコンピュータの発達が必要であった．X線吸収率が物質の密度に比例することから解かるように，X線CT法は被検体内部の密度構造の非破壊検査技術である．

X線CTを岩石力学への導入した先駆的な研究としては，Arthur[1]の論文が挙げられる．また，岩石および空隙体の透水に関しては，Cromwell[2]，Coles ら[3]，菅原ら[4]のなどの研究が挙げられる．

最近は，1996年に産業用X線CTスキャナー（TOSCANER 23200 mini）を導入した熊本大学が中心になって，X線CT法の岩石への適用に関する全国的な研究集会が定期的に開催され，その成果をベースとして，第1回International Geo-Xシンポジウムが2003年11月に熊本で開催された．また，第2回International Geo-Xシンポジウムは2006年10月にフランスのグルノーブルで開催された．これらの会議の論文集（X-ray CT for Geomaterials − Soils, Concrete, Rocks, edited by J. Otani & Y. Obara[5]，Advances in X-ray Tomography for Geomaterials, edited by J. Desrues, G. Viggiani and P. Besuelle[6]）には，X線CTの世界的普及を反映して，密度変化を伴う多様な事象に関する多数の研究論文が収録されている．

第1回目の会議の論文集には，砂，コンクリートおよび岩石にX線CTを適用した事例が数多く収録されている．とくに，亀裂の可視化について論じた論文の数が多い．たとえば，画像間差分による亀裂投影法の高精度化を提案したSatoらの研究，亀裂投影法による貫通亀裂幅の測定法を提案したYoshinoらの研究，模型のX線CT可視化実験により，長壁式採掘のピラーの破壊と開口亀裂の進展を分析したSellersらの研究，石炭試験片の1軸圧縮破壊の損傷構造分析にX線CTを適用したDaiらの研究，秋吉大理石の3次元X線CT画像により1軸圧縮降伏後の破断面形成を分析し，内部損傷の局所化と横ひずみの相関性を明らかにしたMurataらの研究，封圧試験における多孔質砂岩のひずみの局所化と破壊を可視化したBesuelleの研究，凍結融解試験で泥岩に発生する微小亀裂を可視化し，凍結融解のサイクルと亀裂開口量の関係を分析したRodriguez-Reyらの研究，マイクロフォーカスX線CTを用いて，花崗岩内の先在微小亀裂の封圧による閉口の可視化に挑戦したTakemuraらの研究，岩盤緊結工法のロックボルトやケーブルボルトを引き抜く際に，岩盤とボルトの間のモルタルに生じる曲面状亀裂を3次元的に分析し，ボルト形状の影響を明らかにしたItoらの研究などが挙げられる．このほか，透水現象に関するSugawaraらの研究，ガスハイドレイトに関するOkuiらの研究，岩石の風化

*京都大学大学院工学研究科　社会基盤工学専攻　助教

過程に関するKoikeらの研究などがある．これらの研究は，岩石力学におけるX線CTの有効性と将来性を明らかにしている．

第2回目の会議の論文集には，透水現象の可視化に関しては，筆者らのトレーサー法の提案，ベントナイトと石英の混合体の透水性に関するKawaragiらの研究，アスファルトの透水性を検討したKutay & Sydilekの研究，高温環境での透水可視化システムの開発について論じたOkabeらの研究，花崗岩の貫通飽和亀裂内でのトレーサーの分散を分析したSatoらの研究などが収録されている．

第1回と第2回のInternational Geo-Xシンポジウムを比較すると，医療用X線CTから産業用X線CTへ，さらにマイクロフォーカスX線CTへ，そして，現在は，シンクロトロンを利用するナノCTへと，研究の流れは微細構造分析に向かっていることが解かる．しかしながら，本研究の主題である岩石水理試験法に関しては，多くの課題が残されている．とくに，密度構造が変化しない飽和定常流の研究は数が少なく，X線CTによる飽和定常流の可視化技術は未だ確立されていない．

産業用X線CTスキャナー

本研究で用いた産業用X線CTスキャナーは，上述したように，医療用X線CTスキャナーに比べて，X線発生起電圧が大きく，200～400 kV程度である．したがって，土や岩石といった高密度の物質内部の密度構造を可視化することが可能である．

本研究で用いた産業用X線スキャナー（TOSCANER 20000RE，2006年にX線CTのシステムを更新）の写真を図1に示す．

X線発生起電圧は150 kV，200 kV，300 kVに可変であり，直径40 cm，高さ60 cmの被検体まで撮影が可能である．X線の幅（撮影する断層の厚さ）は0.3 mm，0.5 mm，1 mm，2 mm，3 mm，4 mmの6通りに可変であり，かつX線源と検出器は断層幅と同じピッチで上下方向の同時移動させつつ，連続的に断層撮影を行うことができる．また，出力されるCT画像の画素数は2048 x 2048，1024 x 1024，および512 x 512の3通りに選択できる．逆解析領域は直径15 cmと40 cmの2通りに指定することが可能であり，直径15 cmに設定した場合，画素の辺長は，画素数は2048 x 2048の場合に73.2 mm，画素数は1024 x 1024の場合に0.1465 mm，画素数は512 x 512の場合に0.293 mmである．1つの断層画像を再構成するために，ターンテーブルを110 cmのストロークで往復併進させ，かつ30度間隔で6回，回転させる．全体の撮影時間は撮影の回数で異なり，150秒，300秒，600秒の3通りである．

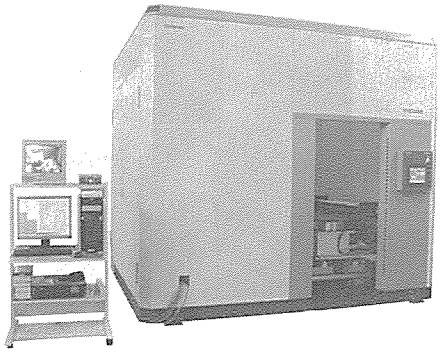


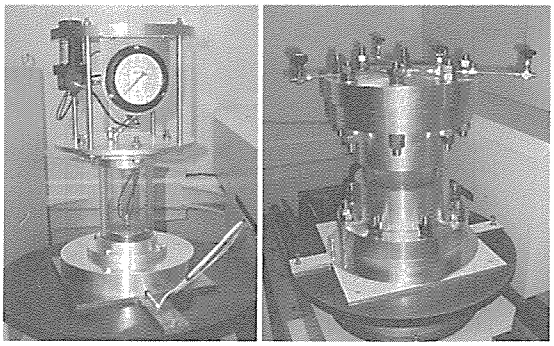
図1　産業用X線CTスキャナーの全景写真

水中加圧実験装置

水中加圧実験装置を図2に示す．(a) は最大圧力0.5 MPaの低圧用装置であり，(b) は最大圧力20 MPaの高圧用装置である．低圧用装置および高圧用装置の圧力容器は，アクリル樹脂製のシリンダー部と耐食アルミニウム製の耐圧フランジで構成されている．

圧力容器への加圧は，低圧用装置の場合はエアーコンプレッサーで行い，高圧用装置の場合は注水孔を介して，電動ポンプまたは手動ポンプで行う．圧力の測定・制御は導水孔を介して行われ，上部の圧力センサーの出力はデータロガーに入力される．なお，低圧用装置は温度制御機能を有するが，高圧用装置はその機能がないので，高圧の実験は全て室温（空調設備稼働）で行われる．

被検体（試験片）は，圧力容器の中央に設置され，水平断層撮影が行われる．試験片は，縦5 cm，横5 cm，厚さ3 cmの来待砂岩であり，その1つの端面（流入面）のみが開放されていて，他の面はエポキシ系樹脂で被覆されている．ただし，流入面と向かい合わせの端面（排出端）には，ポーラスストーンと排出用パイプを取り付け，間隙内の空気などを排出する仕組みである．



(a)　低圧用装置の構成　　(b)　高圧用装置の構成

図2　水中加圧実験装置

間隙率画像による間隙構造の分析

間隙率画像は，乾燥状態の画像 CT_d と飽和状態の画像 CT_S を用いて求めることができる．ただし，各ボクセルの間隙率 ϕ (%) は次式で与えられる．

$$\phi(\%) = 100 \cdot (CT_S - CT_d)/1000 \qquad (1)$$

9 x 9 ボクセルの平滑化による局所的間隙率を用いた間隙構造分析を図3に例示する．図3は間隙率 ϕ の2値化画像である．(a) の黒部は $\phi > 30\%$ の領域であり，図中のAとBの近傍に大きな間隙群（間隙直列面）が存在することを示唆している．また(b) の黒部は $\phi > 20\%$ の領域であり，試料全体に分布していることから平均間隙率は約20%であることを示している．(c) の黒部は $\phi < 10\%$ の領域であり，Cの周囲が高密度であること示している．このように間隙率 ϕ の2値化は間隙構造分析に不可欠である．

つぎに，巨視的な間隙構造分析について述べる．図4は51 x 51 ボクセルの間隙率 ϕ の3値化画像である．間隙率 $\phi > 21\%$ の領域を白で，$21\% > \phi > 19\%$ の領域を灰色で，$\phi < 19\%$ の領域を黒でそれぞれ示した．図3と比較して，当然に，巨視的な間隙率の変動幅は小さい．

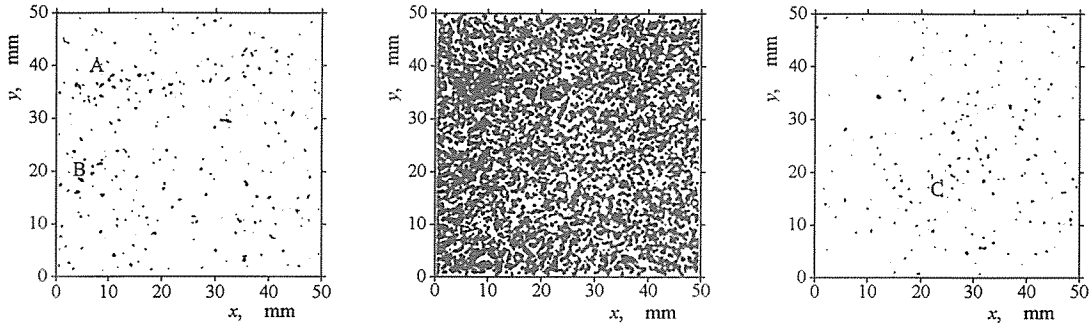
ところで，間隙内流速 u_{real} は間隙率 ϕ に反比例し，ダルシー流速 u に比例する．したがって，ダルシー流速を一様であると仮定すると，間隙率から間隙内流速の相対的予測が可能である．このように図4に例示した巨視的な間隙構造分析は間隙内流速の予測に有用である．

トレーサー法による飽和定常流の可視化・分析

X線CTによる飽和定常流の可視化·分析するためにトレーサーを用いた可視化試験を提案する．これは飽和岩石試料にトレーサーを注入し，その後一定の注入圧を加えて水で押し流していき，その経時変化をX線CTにより観察する方法である．

図5にトレーサー画像を例示した．白い部分はトレーサー領域であり，トレーサーが分散しつつ，右側（排出端）に向かって移動する様子を示している．

固有浸透率 k の巨視的な測定は，投影曲線を用いて，有効封圧 σ とトレーサーの粘度の効果を考慮して行われる．



(a)　間隙率 $\phi > 30\%$　(黒)　　(b)　間隙率 $\phi > 20\%$　(黒)　　(c)　間隙率 $\phi < 10\%$　(黒)

図3　9x9ボクセルの局所間隙率 ϕ の2値化画像

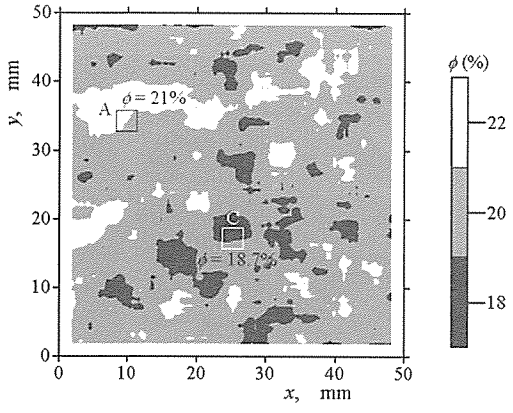


図4　51x51 ボクセルの間隙率 ϕ の3値化画像

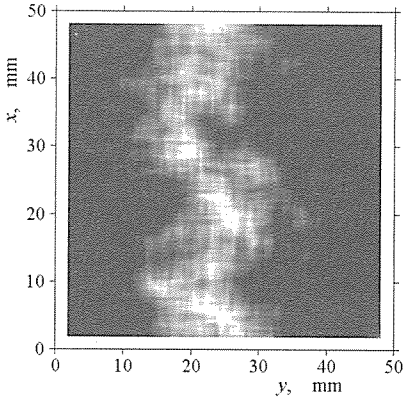


図5　トレーサー画像（p_a = 10MPa）

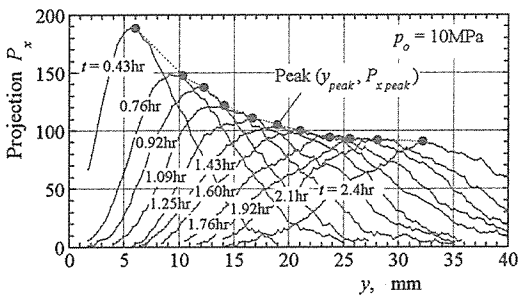


図6　トレーサー画像の投影曲線によるピーク点の抽出

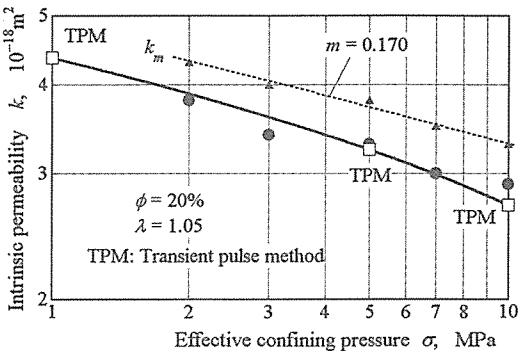


図7　固有浸透率と有効封圧の関係

まず，水圧 p_o のトレーサー試験から，有効封圧 $\sigma = p_o - p_{atm}$（p_{atm} は大気圧）の下での固有浸透率 k が次式で求められる．

$$k = \lambda \cdot k_m \cdot (1-m) \quad \text{at} \quad \sigma = p_o - p_{atm} \tag{2}$$

ここに，λ は無次元の粘度校正係数であり，$\lambda = 1.05$ である[7]．また，k_m は次式で与えられる測定値である．

$$k_m = u_{real} \cdot \mu \cdot \phi / 100 \cdot L_S / p_o \tag{3}$$

ここに，u_{real} は間隙内流速，μ は水の粘度，ϕ は間隙率，L_S は試験片長さ（50 mm）である．

また，式 (2) の m は岩石定数であって，測定値 k_m と有効封圧 σ の関係から求められる[7]．このために，トレーサー試験は水圧 p_o を変えて実施される．岩石定数 m を評価するための $k_m - \sigma$ 関係はつぎのようである．

$$k_m = k_{mo} \cdot (\sigma / \sigma_o)^{-m} \tag{4}$$

ここに，k_{mo} は基準の有効封圧 σ_o における k_m 値である．間隙内流速 u_{real} は，図 6 に示す投影曲線のピーク点（黒丸）の移動速度 u_{peak} から測定される[7]．

なお，水の粘度 μ は温度 25℃ の下で 0.89×10^{-3} Pa·s であり，完全飽和画像と乾燥画像の差画像により測定された来待砂岩の間隙率は $\phi = 20\%$ である．

さて，水圧 p_o を段階的に変化させたトレーサー試験で求められた k_m 値と有効封圧 σ の関係は図 7 のようである．式(3)を当てはめて $m = 0.170$ を得た．式 (2) による測定値 k は図 7 の大きい黒丸である．測定値 k はトランジェントパルス法の結果（白四角）と調和的である．このように X 線 CT トレーサー法が岩石の固有浸透率 k とその有効封圧依存性を定量的に評価する上で有効である．

おわりに

21世紀は光の時代と言われております．X 線もまた光の一つです．X 線 CT はその光を利用した技術であり，今後ますますこの技術を利用した研究が発展していくと考えられます．筆者も X 線 CT で学位を取得した一人として，このテーマの発展に貢献していきたいと思っています．また，現在，種々の X 線分析装置を用いた炭酸ガス地中貯留に関する研究に取り組んでいます．X 線 CT 以外は，勝手を知らず多少の戸惑いはありますが，学生と一緒に勉強させていただいております．最後になりましたが，今後ともご指導，ご鞭撻の程，よろしくお願い申し上げます．

参考文献

1) Radon, J.: Uber die Besimmung von Funtion durch ihre Intergralwerte langs gewisser Mannigfaltigkeiten, Berichte Schsische Akademie der Wissenschafen 69, pp. 262-267, (1917).
2) Arthur, J. R. E.: New techniques to measure new parameters, Proc. of Eoscoe Material Symp. on Stress-Strain Behavior of soils, Camvridge, pp. 340-346, (1971).
3) Coles, M. E., Muegge, E. L. and Sprunt, E. S.: Application of CAT scanning for oil and gas production research. IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol.38, pp. 510-346, (1991).
4) 菅原勝彦，佐藤晃，尾原祐三，柳迫将秀：X 線 CT による岩石の透水係数の測定，資源と素材，Vol. 115, No. 11, pp. 803-808, (1999).
5) Otani, J. & Y. Obara, Y.: X-ray CT for Geomaterials－Soils, Concrete, Rocks, A.A. Balkema Publishers, (2003).
6) Desrues, J., Viggiani, G. and Besuelle, P.: Advances in X-ray Tomography for Geomaterials, ISTE Ltd, (2006).
7) 深堀大介：X 線 CT を用いた岩石水理試験法に関する基礎的研究，熊本大学博士論文，(2007).

談　話　室

剛塑性体の最適設計

西　藤　　潤*

Optimal Strength Distribution of Rigid-Plastic Body

by Jun SAITO

はじめに

私は，平成19年4月に社会基盤工学専攻地殻講座ジオメカトロニクス分野（朝倉研）の助教に着任いたしました西藤（さいとう）と申します．この場を借りて，諸先輩方にご挨拶申し上げたいと存じます．今回は，水曜会誌に私の研究を紹介する機会を与えていただき，編集委員の方々には大変感謝しております．私は京都大学工学部地球工学科を卒業後，京都大学大学院工学研究科土木工学専攻修士課程を修了し，社会基盤工学専攻博士後期課程に進学いたしました．在学中は，一貫して田村武教授にご指導を賜わり，数学，物理，数値シミュレーションなどを中心に勉強をし，研究は主に「力学的な観点から見た最適設計」を対象にしてまいりました．最近では，最適設計の他に，メッシュフリー数値解析手法の開発や剛塑性解析法の開発などに興味を持って研究を進めています．本稿では，在学中に扱っていたテーマの1つである「剛塑性体の最適設計」[1]について紹介いたします．この研究の目的を一言でいいますと，「構造物が壊れないようにするためには，どの部分をどの程度の強度にすれば最適になるか？」ということです．

最適設計

最適設計とは「ある目的や制約に対して最適な設計を選択すること」と言えます．設計の目的や制約，対象などが数値化，あるいは関数化できれば，最適設計は数学の世界で言う最適化問題に置き換わります．最適化問題は多くの場合，計算機を用いて求解可能です．つまり，設計に含まれる要素を数値化，関数化によって定式化できれば，最適設計を計算機で行うことが可能になります．計算機によって最適設計を行うメリットは，「設計者を試行錯誤的な思考プロセスから解放すること」，「設計者によらず同じ設計が得られること」，「設計者が思い付かないような斬新な設計が得られる可能性があること」などがあげられます．計算機による最適設計（以下では，計算機による最適設計を単に最適設計と呼びます．）ですべての設計プロセスを実行することは現実的には難しいかもしれませんが，設計の強力な支援ツールになり得るのではないかと期待しています．最適設計を行う上で重要なことは，定式化をいかに適切に行うかに尽きます．適切な問題設定ができなければ，その問題を解いたところでその正解には意味はありません．ただ，設計に含まれる種々の用を定式化することは非常に困難です．例えば，構造物の設計では，安全性，機能性，経済性の他に景観，環境など様々な要素を考える必要がありますが，それら要素の関係性を明らかする，重要性の重み付けをするなど，難しい問題を解決する必要があります．このように，すべての要素を考慮した総合的な設計では，定式化が困難なものがたくさんありますが，具体的な物理量のみを扱うような力学的な視点からみた最適設計に限定すると，定式化は比較的容易になります．例えば，力の釣り合い式を満足し，かつ領域の容積が一定という制約条件のもとで全ひずみエネルギーを最小化する問題は，簡単に式で表すことができます．力学的な視点から見た最適設計は，数学，物理的に見ても大変おもしろく，線形弾性体を対象とした研究は広く行われています．

剛塑性体の最適設計

土木構造物は，コンクリートや地盤などの塑性材料をもとに作られるため，塑性を考慮した最適設計が重要となります．しかし，塑性を考慮した最適設計の研究はあまり多く見受けられません．おそらく感度解析（設計変

*京都大学大学院工学研究科　社会基盤工学専攻　助教

数に関する導関数）にかかる計算量が多いことが，その理由のひとつではないでしょうか．通常，最適設計の計算では，有限要素法などの数値解析法で境界値問題を解いて感度解析を行い，その感度解析の結果をニュートン法などの数値解法で最適化問題を解く，という作業を繰り返し行います．境界値問題が線形弾性体の問題のように一度の線形計算で解けるのであれば，全体の計算のフローは境界値問題の線形計算と最適化問題の線形計算を一度ずつ交互に反復して解くことになります．境界値問題が非線形問題であれば，一度の線形計算で解が得られないため，「境界値問題を反復計算で解いたあとに，最適化問題を解く」という作業を反復して行います．つまり，反復計算を反復して解くため計算量は膨大なものになります．私も剛塑性体を対象に最適設計の研究を始めたころ，この膨大な計算量に悩まされていました．しかし，そのころ同じ研究室の助手である小林俊一先生が開発された主双対内点法を利用した剛塑性解析の数値解法[2]がブレークスルーになりました．通常，数値解析などの教科書に取り上げられている剛塑性解析では，上界定理に基づいて定式化されますが，この主双対内点法を用いた剛塑性解析では，上界定理と下界定理の関係が最適化問題における主問題と双対問題の関係に相当することに着目して定式化を行っています．この主双対内点法を用いた剛塑性解析を利用して最適設計の定式化を行うと，なんと境界値問題と最適化問題を同時に解く定式化が可能となり，それぞれの問題を独立に解く必要が無くなります．詳細については説明しませんが，この同時に解けることが，「剛塑性体の最適設計」の研究の中でひとつの肝になっています[1]．

さて，力学的な視点から見た最適設計は大きく分けて，次の3つに分類されます[3]．1. 形状を変えずに物性を設計変数とする「サイズ最適設計」，2. 物性を変えず形状を設計変数とする「形状最適設計」，3. 物性を変えず位相を設計変数とする「位相最適設計」です．形状最適化と位相最適化の違いは，前者が領域の境界形状のみを設計変数としているのに対して，後者は設計領域の中で境界・連結・穴などの形状を最適化します．文献3) では，線形弾性体の位相最適化の問題をいくつか解いていますが，非常におもしろい結果が得られています．私は修士課程のときに剛塑性体に対する形状最適設計の研究を行い，博士後期課程でサイズ最適設計と位相最適設計の研究をしていました．本稿で紹介するのはサイズ最適設計です．構造物の設計では，機能的な制約や施工面での制約からあらかじめ形状が決定されることが少なくありません．形状があらかじめ決まっている構造物に対して安全率を高めるためには，構造物を構成する材料を変える方法が考えられます．このようなケースではサイズ最適化の設計の出番となります．剛塑性体にサイズ最適設計を適用すれば，問題は「どの部分をどの程度の強度にすればよいのか」ということになります．最適設計をするためには，どのような場合を最適とするのかについても決めておかなければなりません．ここでは，コストが最小になるときを最適と定義します．コストは設計変数となる材料強度の単調増加関数とします．つまり，ここで考える問題は「コストが最小になるような材料の強度分布をもとめること」と言うこともできます．

片持ちばりを例に

さて，ここまで「剛塑性体の最適設計」を言葉だけで説明してきましたが，具体的にどのような問題が解けるのか，どのようなことをしているのかについて片持ちばりの問題を例に説明します．例題として，「自由端に荷重をかけた片持ちばりに対して，壊れない範囲ではりの厚さをできるだけ薄くする問題」を考えます．はりが剛塑性体で軸力，せん断を無視できれば，はりの厚さの2乗は全塑性モーメントに比例します．そのため，全塑性モーメントを設計変数ととらえても構いません．ここでは，説明をする上で全塑性モーメントの方が都合がよいので，設計変数を全塑性モーメントとして話を進めます．なお，全塑性モーメントははりが耐え得る最大のモーメントのことです．軸力，せん断力を無視できれば，曲げモーメントが全塑性モーメントに達したときに破壊が生じます．コストは，はりの厚さをはり全体で積分した値，つまりはりの容積をコストとするのが妥当ですが，説明の都合上，全塑性モーメントをはり全体で積分した値とします．自由端には，鉛直下向きにある一定の荷重を加えます．

図1は問題のイメージ図です．図1の実線が示すように，自由端に荷重をかけると，はりに作用する曲げモーメントは自由端からの距離に比例します．はりが崩壊しないとき，全塑性モーメントは曲げモーメントを上回る

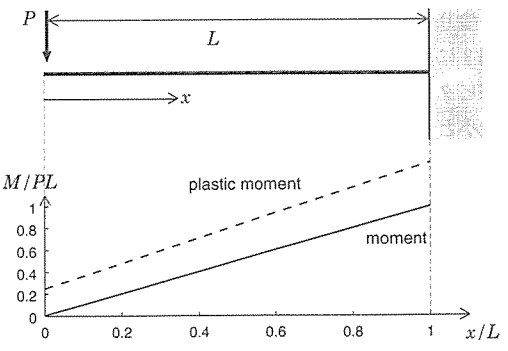


図1　問題設定とモーメント

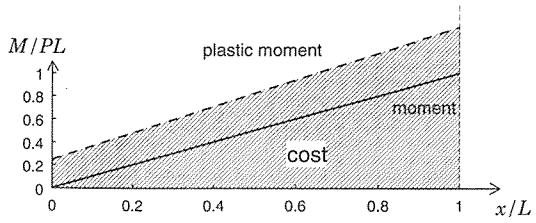


図2 全塑性モーメントとコスト

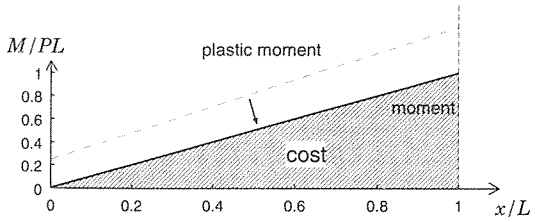


図3 最適な全塑性モーメント分布

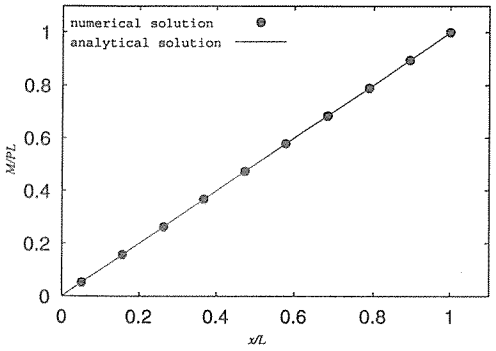


図4 数値解析結果と理論解の比較

ので，図1の破線のようになります．

コストは全塑性モーメントをはり全体で積分した値なので，図2の塗りつぶされた面積がコストに相当します．はりが壊れないようにコストを最小化するためには，全塑性モーメントが曲げモーメントの値を下回らないように，塗りつぶされた領域を小さくします．

図3に示すように，全塑性モーメントと曲げモーメントがピタリと重なるとき，コスト（塗りつぶされた領域）が最小となります．つまり，最適な全塑性モーメントの分布は曲げモーメントの分布と等しくなります．

この問題を数値解析によって解いた結果を図4に示します．黒丸が数値解析結果で実線が理論解を表しています．よく一致しています．

ここで，崩壊メカニズム（崩壊時の挙動）について考えてみます．最適な分布では全塑性モーメントと曲げモーメントが等しいので，崩壊時ははり全体で同時に崩壊

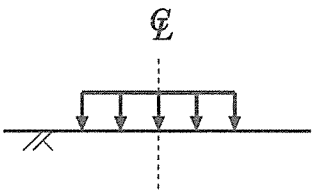


図5 地盤の支持力問題

することになります．一方で，最適な分布ではない場合，例えば全塑性モーメントがはり全体で一定である場合，固定端に最も大きな曲げモーメントが作用するため，はりは固定端で局所的に崩壊します．このように，一部が頑張るよりも，全体で頑張った方が最適であるという結果は直観的に納得いくものではないでしょうか．なお，ここで求めた最適設計の答えは，複数の破壊モードが同時におこるときを最適とする「同時破壊モード設計」と同じ結果となっています．

地盤の支持力

片持ちばりの例題は，「剛塑性体の最適設計」の説明には向いていますが，あまり現実的な問題ではありません．もう少し，現実問題に近い例題として，地盤の支持力における剛塑性体の最適設計を紹介したいと思います．ここでは，地盤が半無限領域の剛塑性体であると仮定して，地盤が支持しうる最大の分布荷重を考えます．このような問題は土質力学の教科書には必ず出てくる問題です．金属加工の本などでも出てくるのではないでしょうか．地盤が，内部摩擦角0，粘着力cで均質であれば，支持力は $(\pi+2)c$ となります．内部摩擦角0，粘着力cの地盤材料とは，強度cのvon Misesの降伏基準に従う材料に相当します．

さて，ここで，粘着力cで均質な地盤の上に，分布荷重が支持力の2倍の $2(\pi+2)c$ となる構造物を建てることを想定しましょう．何もしなければ地盤は構造物を支持できないので，粘着力を大きくするよう補強することを考えます．現実では，粘着力の増加は，セメント剤を注入することなどで可能です．ただし，セメント剤を注入すると，内部摩擦角や降伏基準などの物性が変化してしまいます．ここでは，簡単のため，粘着力だけ増加して他の物性が変化しないような理想的なセメント剤があると考えて下さい．最小化するべきコストは，粘着力の増加量を領域全体で積分した値とします．コストを無視して補強するのであれば，単純に領域全体の粘着力を2倍にすれと，2倍の支持力が得られます．しかし，当然のことながら，地盤全体の粘着力を2倍にすると，コストは膨大なものになりますし，そもそも現実的でありません．

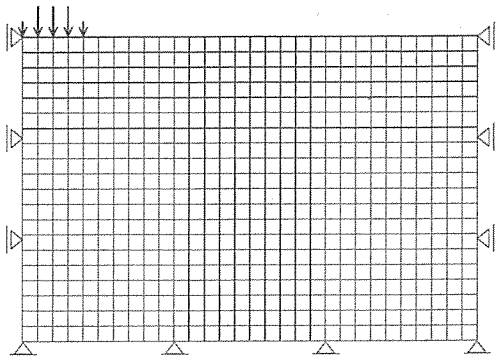


図6　解析に用いたメッシュ

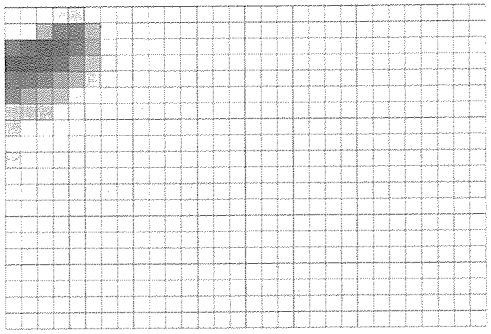


図7　最適な粘着力cの分布　(黒い部分が粘着力大，白い部分が未補強)

この問題を図6のように有限要素に離散化して解くと，図7で示す最適な粘着力の分布が得られます．色の濃いところほど，粘着力が大きい様子を表しています．色のついていない白い部分は未補強の領域です．最も濃いところで初期粘着力の5倍程度の大きさになりました．この図から，分布荷重が作用しているエリアの下を中心に補強すれば最適な粘着力の分布が得られることが分ります．

ここでも，崩壊メカニズムについて考察しておきましょう．図8は何も未補強の均質地盤における崩壊の様子を表しています．グレースケールの濃淡は相当塑性ひずみ速度の大きさを表しています．濃いところほど変形が大きく出ています．色のついた領域を包括するような曲線はいわゆるすべり線です．このすべり線上に働く摩擦力が地盤上に作用する荷重と釣り合っています．図9は，図7で示した最適な補強をしたときの地盤に対する崩壊メカニズムを表しています．未補強地盤の崩壊メカニズムを拡大したような図になっています．補強地盤のすべり面も似たような形をしていますが，補強地盤のすべり面の方が大きいため，その分摩擦力も大きく作用し，より大きな荷重を支持できることが分ります．

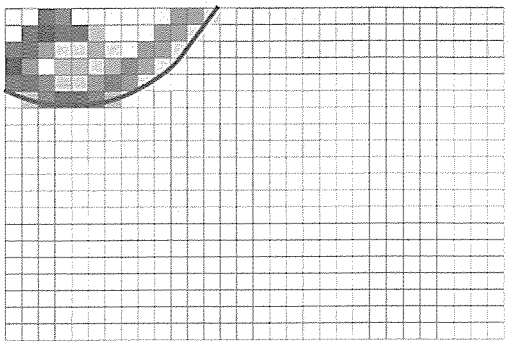


図8　未補強地盤における相当塑性ひずみ速度
(黒い部分が大，白い部分が小)

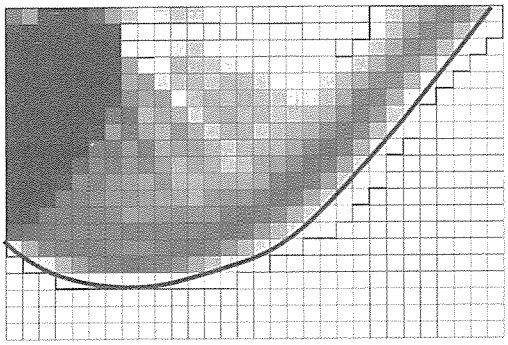


図9　最適化地盤における相当塑性ひずみ速度
(黒い部分が大，白い部分が小)

おわりに

本稿で紹介した研究は，机上で設定した問題を数学や物理の枠組で解いただけにすぎず，工学への実装できる段階にはまだ到達していません．今後は，一般的な理論にとどまらず，工学的に使える手法へと発展させていきたいと考えています．また，理論の研究のみならず，与えられた環境や資源をフルに活用し，私にとって新しいフィールドである実験や現場に挑戦していきたいと考えています．私の研究ならびに教育の活動が工学の発展の一助となるよう，精一杯仕事に邁進いたしますので，今後とも皆様の御指導，御鞭撻のほどよろしくお願い申し上げます．

参考文献

1) 西藤潤，田村武，小林俊一：土木学会論文集A, 62, 520-530, (2006).
2) S. Kobayashi: Soils and Foundations, 45, 17-27, (2005).
3) K. Suzuki and N. Kikuchi, Comp. Meth. Appl. Mech. Engng, 93, 291-318, (1991).

談　話　室

周波数変調方式原子間力顕微鏡を用いた単一分子スケールでの有機材料評価

一　井　　崇*

Molecular-scale Investigations of Organic Materials using FM-AFM

by Takashi ICHII

1. はじめに

私は，平成18年9月1日付で材料工学専攻機能構築学分野助手（平成19年4月1日付で助教に改称）に着任致しました．この度は伝統ある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．はじめに，簡単に自己紹介をさせていただきます．私は，京都大学大学院工学研究科電子工学専攻電子材料物性工学分野にて松重和美教授，山田啓文助教授（現准教授）のご指導のもと，周波数変調方式原子間力顕微鏡（Frequency Modulation Atomic Force Microscopy; FM-AFM）と呼ばれる手法を用いてさまざまな有機材料の構造や物性を単一分子スケールで評価するという研究をおこない，平成18年3月に博士（工学）の学位を取得いたしました．その後5ヶ月間，日本学術振興会特別研究員として同分野で研究をおこなった後，9月より杉村博之教授のもとで新たに助手として研究を進める機会を得ました．本稿では，これまでに私が行ってきた研究に関しまして，簡単にではございますが，抜粋して述べさせていただきたいと思います．

2. 周波数変調方式原子間力顕微鏡

AFMとは走査型プローブ顕微鏡（Scanning Probe Microscopy; SPM）の一種であり，同じくSPMの一種である走査型トンネル顕微鏡（Scanning Tunneling Microscopy; STM）と異なり，絶縁性材料の評価が可能であることから，導電性に乏しいものが多い有機材料の評価に適した手法である．先端に鋭い探針を有する片持ち梁（カンチレバー）と試料との間に働く相互作用力を検出することで探針-試料間距離制御を行い，表面形状の測定を行う．相互作用力の検出方法としては，カンチレバーを試料表面に接触させ，その変位を直接検出する手法（Contact-mode AFM）と，カンチレバーを共振周波数近傍で振動させ，その振動特性の変化を検出する手法（Dynamic-mode AFM）に大別される．原子・分子分解能観察を実現するためには探針先端の1原子と試料表面1原子との相互作用力を検出する必要があるが，Contact-mode AFMでは探針先端の1原子と試料表面1原子のみの接触状態を実現することが極めて困難であることから，原子・分子分解能観察には一般にDynamic-mode AFMが用いられる．さらに，Dynamic-mode AFMは，振幅変調方式（AM-AFM），位相変調方式（PM-AFM）そしてFM-AFMに分類される．このうち，FM-AFMは他の二つの手法と異なり，真空中においても走査速度を下げる必要がないことから，特に超高真空中における表面科学の分野において著しい成果を挙げてきた．

また，AFMは試料表面の構造評価のみならず，力学物性や電子物性の分布の評価にも用いられる．ここではその一例として，ケルビンプローブ原子間力顕微鏡（Kelvin probe Force Microscopy; KFM）について述べる．KFMとは，巨視的な試料表面電位測定に用いられる振動容量法（ケルビン法）とDynamic-mode AFMとを組み合わせることにより，微視的な表面電位分布測定を行う手法である．有機材料における表面電位測定は，分子固有の電気双極子や分子-基板界面における電荷移動（基板上に作成した分子薄膜の場合）など，有機分子のデバイス応用を考える上で重要な情報を与える．

以下にFM-AFMおよびKFMの原理について簡単に述べる．図1はFM-AFM/KFMの動作模式図である．FM-AFMでは，移相回路ならびに振幅制御回路からなる正帰還ループにより，カンチレバーを常に共振周波数

*京都大学大学院工学研究科　助教

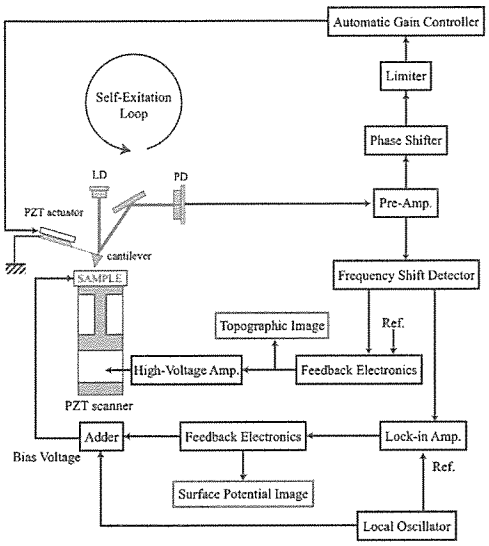


図1　FM-AFM および KFM のブロック図

で発振させる．圧電素子（アクチュエータ）によって励振されるカンチレバーの運動方程式は，減衰項が振動子の速度に比例すると仮定して，近似的に以下のように表される[1, 2]．

$$m\frac{\partial^2 \Delta z}{\partial t^2}+\frac{m\omega_0}{Q}\frac{\partial \Delta z}{\partial t}+m\omega_0^2\Delta z=F_{\mathrm{ext}} \qquad (1)$$

ただし，Δz はカンチレバーの振動による変位，ω_0 はカンチレバーの自由振動時の共振点の角周波数，Q はカンチレバー機械系の Q 値，m はカンチレバーの振動の換算質量，F_{ext} はカンチレバーを励振するための外力である．カンチレバーの振動が振幅 A の調和振動であるとし，その角周波数をωとすると，Δz は

$$\Delta z = A\cos(\omega t) \qquad (2)$$

で与えられる．一方，F_{ext} はカンチレバーの振動と同じ周波数で振幅と位相が異なるとして，

$$F_{\mathrm{ext}} = F_0\cos(\omega t-\phi) = kA_{\mathrm{b}}\cos(\omega t-\phi) \qquad (3)$$

と書ける．ただし F_0 は加振振幅，ϕは位相差，k はカンチレバーのばね定数，A_{b} は圧電素子の振動振幅である．この運動方程式を解くと，A とϕはそれぞれ以下のような式で得られる．

$$A = \frac{Q\omega_0^2 A_{\mathrm{b}}}{\sqrt{Q^2\left(\omega_0^2-\omega^2\right)^2+\omega_0^2\omega^2}} \qquad (4)$$

$$\phi = \arctan\left[\frac{-\omega/\omega_0}{Q\left(1-\omega^2/\omega_0^2\right)}\right] \qquad (5)$$

また，この時の共振周波数 f_0 は，

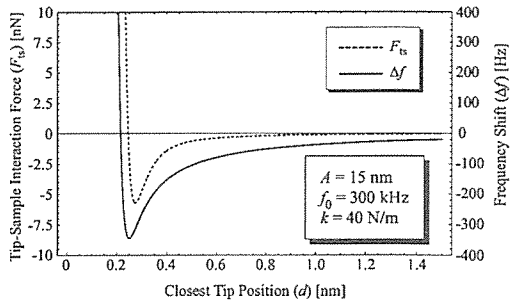


図2　探針 - 試料間相互作用力 F_{ts} と共振周波数シフト Δf の距離依存性

$$f_0 \equiv \frac{\omega_0}{2\pi}=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \qquad (6)$$

で与えられる．$\omega=\omega_0$ のときに振幅 A は最大であり，このとき $A \simeq QA_{\mathrm{b}}$，$\phi=-90^\circ$ となる．FM-AFM では，移相回路によって $\phi=-90^\circ$ となるように調節することで，共振周波数でカンチレバーを振動させる．

探針-試料間に外力 F_{ts} が働くときの運動方程式は

$$m\frac{\partial^2 \Delta z}{\partial t^2}+\frac{m\omega_0}{Q}\frac{\partial \Delta z}{\partial t}+m\omega_0^2\Delta z=F_{\mathrm{ext}}+F_{\mathrm{ts}} \qquad (7)$$

で表される．この運動方程式は厳密に解析的に解くことはできないが，カンチレバーの振動が同様に調和振動であると近似すれば，安定状態の解が得られる．上式に $\Delta z = A\cos(\omega t)$，$F_{\mathrm{ext}} = F_0\cos(\omega t-\phi) = -F_0\sin(\omega t)$ を代入し（$\phi=-90^\circ$），$\omega-\omega_0$ は十分小さいとして，両辺に $\cos(\omega t)$ をかけて積分する．すると，

$$\Delta f \equiv \frac{\omega-\omega_0}{2\pi} \simeq -\frac{f_0^2}{kA}\int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} F_{\mathrm{ts}}\cos(\omega t)dt \qquad (8)$$

が得られ，共振周波数が変化することがわかる．FM-AFM ではこの周波数シフト Δf が一定になるようにフィードバックすることによって探針-試料間距離を制御する．

探針-試料間相互作用力 F_{ts} は，探針先端の 1 原子と試料表面 1 原子との間のみに働く短距離力と，van der Waals 力や静電引力などの長距離力との総和で考えられる．F_{ts} を原子間のポテンシャルを Lennard-Jones ポテンシャルで仮定した短距離力と van der Waals 力のみの和として，F_{ts} および Δf の探針-試料間距離依存性について計算した結果を図 2 に示す．

この図より以下のことがわかる．まず，探針-試料間距離が比較的遠い場合，探針-試料間には引力（$F_{\mathrm{ts}}<0$）が働き，共振周波数が負にシフトする．一方，探針-試

料間距離が十分に近い場合は，交換斥力が支配的となるため $F_{ts} > 0$ となり，共振周波数も正にシフトする．正に周波数がシフトしている領域において観察をおこなうと探針先端が破壊されることが多いことから，一般的には負の周波数シフト領域で原子・分子分解能観察が行われる．原子・分子分解能を得るには，この負の周波数シフト領域において，探針-試料間相互作用力のうち近距離力が支配的となる位置まで探針を試料に近づけなければならない．ただし図2より分かるように，F_{ts} が最小になる位置と Δf が最小になる位置は必ずしも一致しておらず，負の周波数シフト領域においても探針先端には強い斥力が働いている場合があり，注意が必要である．

一方，KFM とは，探針-試料間に働く静電引力を検出し，そこから表面電位分布を測定する手法である．探針と試料との接触電位差を V_{CPD} とする．このとき，探針-試料間に変調電圧 $V_m = V_{DC} + V_{AC}\cos(\omega_m t)$ を印加すると，探針-試料間に働く静電引力 F_{ele} は，以下の式で与えられる．

$$F_{ele} = -\frac{1}{2}\frac{\partial C_{ts}}{\partial z}\left(V_m + V_{CPD}\right)^2 \qquad (9)$$

ここで，変調電圧が印加されていることから，F_{ele} の ω_m 成分 $(F_{ele})_m$ のみに着目すると，

$$\left(F_{ele}\right)_m = -\frac{\partial C_{ts}}{\partial z}\left(V_{DC} + V_{CPD}\right)V_{AC}\cos\left(\omega_m t\right) \qquad (10)$$

が得られる．試料に対して $V_{DC} + V_{CPD} = 0$ となるように V_{DC} を印加すると，探針と試料は同電位となり，$(F_{ele})_m = 0$ とすることができる．したがって，$(F_{ele})_m$ をロックインアンプを用いて検出し，これが0となるようにフィードバックをかけることによって $V_{CPD} = -V_{DC}$ が得られる．この $-V_{DC}$ を各点でマッピングすることにより，表面電位像が得られる．

角周波数 ω_m で変調された静電引力 $(F_{ele})_m$ の検出法は，静電引力をカンチレバーのたわみとして直接検出する AM-KFM と，共振周波数シフトの変化として検出する FM-KFM の2つが代表的である．通常，変調電圧の周波数は数 kHz 程度の非共振周波数に設定されることが多いが，非共振周波数での熱雑音はきわめて小さく，実際にはその他の測定系の雑音が支配的になることが多い．その場合，何らかの感度利得を用いなければ，KFM の感度は低下する．FM-KFM では，非共振周波数の静電引力の変調が共振周波数の変調に変換されることから，周波数感度利得が得られ，一般に同じ非共振周波数で変調された AM-KFM に比べて高い感度が得られる．AM-KFM についても，変調周波数をカンチレバーの高次の共振周波数に設定することで高感度化が可能である．しかし，高次の共振周波数の検出のためには広帯域の検出系を構築する必要があり，容易ではない．

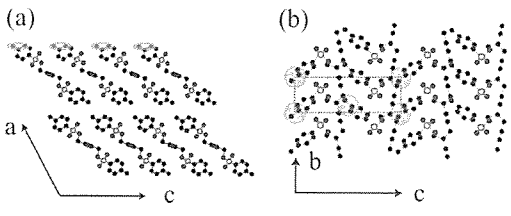


図3　poly-PTS 単結晶の結晶構造の模式図．(a) ab 面．(b) bc面．

3．ポリジアセチレン単結晶表面の分子分解能評価

ここでは一例として，FM-AFM/KFM を用いたポリジアセチレン単結晶の観察例を示す．FM-AFM は STM と異なり，観察対象の導電性を必要としないことから，導電性に乏しいものが多い高分子材料の観察にも適している．ポリジアセチレンは3次の非線形光学感受率 χ_3 が大きく，非線形光学素子として期待されており，その構造・物性の解析が進められている．本節では，ポリジアセチレンの1つである polymerized-hexadiyne-1,6bis(p-toluenesulfonate) 単結晶（以下 poly-PTS 単結晶）の bc 劈開面の観察結果について述べる．ポリジアセチレンは数 mm 程度の単結晶が得られる珍しい高分子材料であり，特に poly-PTS は 1 cm 以上の巨大な単結晶が得られ，また χ_3 の値も大きい．このような材料の分子レベルでの構造・物性評価がマクロスケールでの機能発現への理解につながりうると期待される．

図3(a)，(b) は poly-PTS 単結晶のそれぞれ ab 面および bc 面の模式図である．poly-PTS は単斜晶（空間群 $P2_1/c$）に属し，格子定数は a = 1.449 nm，b = 0.491 nm，c = 1.494 nm，β = 118.1° である[3]．b 軸方向にジアセチレン主鎖が伸びており，c 軸方向のジアセチレン主鎖の間隔は格子定数の半分の約 0.75 nm である．図3からわかるように，bc 面においては PTS 側鎖が表面に突き出していることから，FM-AFM で観察されるのは，図3(a) および (b) の灰色の楕円および円で示した部分であると考えられる．

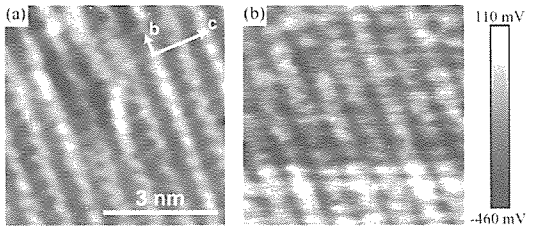
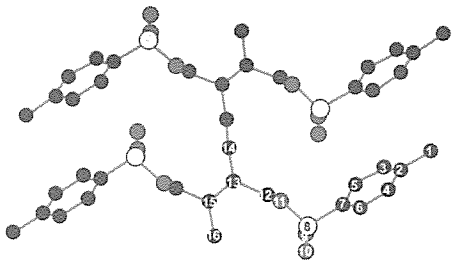


図4　(a) poly-PTS 単結晶 bc 面の表面形状像，6 nm × 6 nm，Δf = -100 Hz．(b) 図 (a) と同時に取得した表面電位像．



Atom number		1	2	3	4	5	6	7
Atom type		C	C	C	C	C	C	C
Electric charge		+0.046	+0.053	-0.022	-0.024	+0.049	+0.087	-0.191
8	9	10	11	12	13	14	15	16
S	O	O	O	C	C	C	C	C
+1.221	-0.538	-0.481	-0.522	+0.325	-0.028	-0.001	-0.012	+0.008

図5　PTS dimer の各原子上における Mulliken 電荷 (B3LYP/6-31G(d,p) レベルで計算).

図4は表面形状像および同時に取得した表面電位像である[3]. どちらの図においても分子スケールコントラストが得られていることが確認できる. 表面形状像において, b 軸方向に伸びるストライプ状の構造（間隔約 0.75mm）を確認することができ, さらに各ストライプ内において約 0.5 nm 間隔の輝点を確認することができる. この観察された構造は, 図3の模式図とよく一致している.

一方, 表面電位像においても, 分子スケールの表面電位コントラストが確認されたが, 本研究で用いたような高分子単結晶において, そのコントラストについての解釈はきわめて難しい. ポリジアセチレンは一般にドーピングによりジアセチレン主鎖方向（b 軸方向）に高い導電率を有するようになることが知られているが, 本研究で用いた poly-PTS はドープされておらず, 完全な絶縁体とみなすことができる. 絶縁体上における表面電位分布計測については, 分子スケールよりも十分大きな系 (nm - μm スケール）においても研究例は少なく, その表面電位像の解釈は確定していない. しかしながら, KFM という手法の特性上, 得られた表面電位像は試料の何らかの電子物性を反映していると考えて良い. そこでその起源を調べるため, PTS dimer について, Mulliken 電荷の計算を行った. 構造最適化は Gaussian 03 プログラムを用いた密度汎関数法によって行った. その計算結果を図5に示す. この計算結果に示すように, S 原子およびその周辺の3つの O 原子における電荷はそれぞれ約 +1.22, −0.53, −0.48, −0.52 となっており, この値は他のほとんどの原子の電荷量に比べて10 倍以上も大きい. つまり, PTS dimer において, 電荷のほとんどは SO_3 近傍に局在しており, ジアセチレン主鎖およびベンゼン環にはほとんど電荷が存在しないことがわかる. さらに, 同様の計算を PTS monomer についても行ったが, その結果は dimer のそれとほとんど違いがなかった. このことから, PTS の重合に伴う電子状態の変化はほとんどなく, poly-PTS においても同様の電荷の偏りが存在していると考えることができる. このような電荷の偏りは分子スケール表面電位コントラストの起源となりうる. 本研究結果は, KFM をこのような原子・分子レベルでの電荷の局在の検出に用いることのできる可能性を示唆している.

4. おわりに

私はこれまで, FM-AFM を使って何ができるのか, また, さらなる高感度化・高分解能化のためにはどのようなことをすればよいのかという点に着目しながら研究をおこなってきました. 今後は, これまで培ってきた AFM を中心とする分析技術を活用し, 新たな材料開発に取り組んでいくことができればと考えております.

材料工学専攻の助手に着任して, 本稿の執筆時点でまもなく1年が経過しようとしておりますが, まだまだ浅学非才の身であり, 先生方・諸先輩方のご指導・ご鞭撻をいただけましたら幸いにございます.

参考文献

1) F. J. Giessibl *Phys. Rev. B*, 56, 16010 (1997).
2) N. Sasaki *et. al. Appl. Phys. A*, 72, S39 (2001).
3) V. D. Kobelt *et. al., Acta. Cryst*, 232 (1974).
4) T. Ichii *et. al., Nanotechnology*, 16, S22 (2005).

談　話　室

酸化還元反応を利用する金属析出

八　木　俊　介*

Metal Deposition Via Oxidation-Reduction Reaction

by Shunsuke YAGI

1. はじめに

平成19年3月に材料工学専攻の博士課程を修了し，同年4月より同専攻に助教として赴任致しました．筆者はこれまで置換めっき法，無電解めっき法，電解めっき法といった，湿式のめっき法について精力的に研究して参りました．これらの方法の共通点は酸化還元反応を利用し，溶液中の金属イオンを金属として析出させることであります．湿式のめっき法は実験室レベルでも，工業的にも一般的に用いられている手法ですが，その背景には，比較的単純な装置でめっきを行うことができ，コスト，生産性などの面から大きなアドバンテージを持っていることや，表面改質処理そのものの重要性があります．めっきは古くから存在する技術ではありますが，現代においても新しいプロセスを開発する余地はまだまだあると感じております．本稿では，めっき技術全般について考えながら，湿式めっきの特徴を利用しためっき技術の研究の成果をいくつかご紹介したいと思います．

2. 様々なめっき技術

めっき技術の歴史は古く，天平17年（西暦745年）に聖武天皇の発願で製作が始められた，東大寺盧舎那仏坐像（とうだいじるしゃなぶつざぞう，通称「奈良の大仏」）を金めっきした話はあまりにも有名である．その方法は，粘土状にした金と水銀の合金（金アマルガム）を表面に塗布した後加熱処理し，水銀を揮発させて表面に金のみを残留させるというものであった．私が学部の4回生に進級し，研究室に配属されてすぐの頃，“めっき”という用語は“滅金（めっきん）”という言葉から生まれたれっきとした日本語であるから，“メッキ”とカタカナで書くのではなく，“めっき”とひらがなで表記するべきである，と教わったのを今でもよく覚えている．めっき法が日本に古くから根付いた歴史のある技術であることを強く実感した．

めっき法は“広義”には「材料の表面を覆う方法」と言うことができ，電解めっき，無電解めっきなどの湿式めっき法，PVD（Physical Vapor Deposition）や，CVD（Chemical Vapor Deposition）に代表される乾式めっき法がある．また，厳密にはめっきとは言えないかもしれないが，表面改質処理法として，イオン注入，ダイナミックミキシング，レーザー加熱，化成処理が存在する．これらの方法はそれぞれが他にはない優れた特徴を持っており，現在では多くの工業分野において適材適所で使用されている．

本稿では私が主に研究を進めてきた，酸化還元反応を利用する湿式めっき法について詳しく見ていくことにする．酸化還元反応を利用するめっき法は，外部電源を必要とするものと必要としないものに分類でき，外部電源を必要とするものを電解めっき法，必要としないものを無電解めっき法と呼ぶ．無電解めっき法は通常，還元剤となる化学種を浴中に溶解させ，浴中の金属イオンを還元析出させる方法である．また，金属のイオン化傾向の差を利用した置換めっき法も外部電源を必要としないので，無電解めっき法の一つであると言えよう．例えば，金属錫を銅(II)イオンを含む浴中に浸漬すると，錫が浴中に2価のイオンとして溶解し，かわりに金属銅が錫の表面に析出する．これらのめっき法は，大規模な装置や高温を必要としないので，プロセスのコストを低く抑えることができる．これに対し，例えば工業的に重要な鋼表面への溶融亜鉛めっきは，酸化還元反応を「利用しない」めっき法である．この方法では，450～470℃で亜鉛を溶融させ，その中に鋼板を浸漬し，溶融した亜鉛を

*京都大学大学院工学研究科　材料工学専攻　助教

鋼表面に付着させた後冷却することで鋼板表面を亜鉛でめっきする．素地鋼板と亜鉛被膜の間には拡散により鉄-亜鉛の合金層が形成され，優れた密着性を示す．先に例に挙げた大仏表面の金めっきも，酸化還元反応を利用しないめっきである．

3. 酸化還元反応を利用するめっき法

3.1 Ti(IV)/Ti(III) レドックス対を用いたNi無電解めっき

無電解めっきは，溶液の入り込む隙間さえあれば，金属などの活性な材料の表面にめっきを施すことができる．そのため，通常の電解めっきやスパッタリングなどの乾式法では難しい，複雑な形状を持つ物体の表面やアスペクト比の大きな微細溝表面に対しても均一にめっきすることができる．ここでは，Ti(IV)/Ti(III) レドックス対を用いたNi無電解めっき法について述べる前に，一般的なNi無電解めっきについて少々述べたい．

現在Ni無電解めっきの還元剤として，次亜りん酸ナトリウム，水素化ほう素ナトリウム，ジメチルアミンボラン（DMAB），ヒドラジンなどが用いられている．次亜りん酸ナトリウムを還元剤に用いた場合，Ni被膜中にPが共析する．Ni-P被膜はP含有量によってその強度，結晶構造，磁性が変化することが知られている[1]．P含有量が1～4%のNi被膜は，硬く耐アルカリ性に優れている．P含有量が7～9%のNi被膜は，仕上がりの外観がよい．P含有量が10～12%のNi被膜は非磁性安定性に優れているので，ハードディスクの下地めっきとして使用されている．同様に，水素化ほう素ナトリウムもしくはDMABを還元剤に用いた場合，Ni被膜中に数%のBが共析し，非晶質で高強度のNi被膜が得られる．ヒドラジンを用いた場合は，Ni被膜中に2%程度の窒素を含み，100 nmの厚さで14～22 Oeの保持力を持つ磁性薄膜となる．上記の例では，いずれも酸化還元反応により還元剤が分解し，その分解生成物がNi被膜中へ取り込まれている．Ni被膜中への不純物の混入は，上述のように被膜の強度，結晶構造，磁性などに影響を及ぼすが，これをうまく利用した製品が数多く生み出されてきた．一方で高純度のNiもしくはNi合金被膜が必要な場合もある．例えば，PやBといった元素はSi半導体のドーパントとして働くので，Si半導体デバイスの近くでPやBを含有する膜の使用はできるだけ避けるべきである．そこで高純度のNi被膜を得る方法の一つとして，チタンイオンのレドックス対Ti(IV)/Ti(III)を利用したNi無電解めっきに注目した．この方法では以下に示す反応でNiを還元析出させる．

$$2Ti^{3+} + Ni(II) + 4OH^- \rightarrow 2TiO^{2+} + Ni + 2H_2O$$

還元剤であるTi^{3+}イオンは反応によりTiO^{2+}に酸化されるが，チタンの価数が3価から4価に変化するだけで不純物の原因となる分解生成物が生じず，高純度のNi被膜が形成できる．浴中のニッケルイオンは，浴の安定化のために添加しているニトリロ三酢酸やくえん酸と錯体を形成しており，上式ではこれらとの錯体をまとめてNi(II)と表現している．錯化剤の種類やその濃度，そしてめっき浴のpHにより，形成される錯イオンの種類と濃度が変化し，結果として浴の安定性が大きく変化する．そのため，無電解めっきを行うにあたって，浴組成や浴pHの管理は非常に重要である．

この方法を用いてCuの微細配線パターン（Cu部以外はSiO_2）上へ1時間Niをめっきした．図1は，めっき前後の表面SEM像である．めっき後，NiがCuの配線部にのみめっきされ，Cuの配線部の幅が増加していることが分かる．このようなめっきの選択性は，無電解めっきの持つ重要な特徴である．Ni無電解めっきした後の銅配線部の断面TEM像を図2に示す．図中の矢印はNiとCuの界面を示している．Niめっき被膜の厚さはおよそ10 nmであることが分かる．このような，薄くて均一なめっきは電解めっきでは難しい．また，下地Cu結晶粒の面方位を保ちながら析出していることが分かるが，これはNiとCuの格子定数がそれぞれ，0.352 nm，0.362 nmと近いことに加え，結晶構造が両者とも面心立方構造であるため，NiがCu上でエピタキシャル成長しやすかったと推測される．

3.2 TiN上へのPd粒子の置換析出

置換めっきはイオン化傾向の差を利用して，金属を析出させる方法である．ここでは，Tiよりも貴な（酸化還元電位の正に大きな）金属であるPdをTiN上に析出させる方法について述べる．TiNは水溶液に浸漬しても溶解しないが，水溶液中にふっ化物イオンF^-を溶解させておくことで，TiN中のTiをTiF_6^{2-}の形で溶解させることができる．ふっ化水素とふっ化アンモニウムを溶解させた水溶液中における，PdとTiNの置換析出反応の反応式は以下のとおりである．

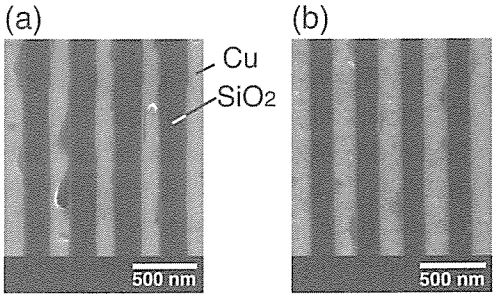


図1　Cu微細配線上へのNi無電解めっき．
(a) 無電解めっき前，(b) 無電解めっき後．

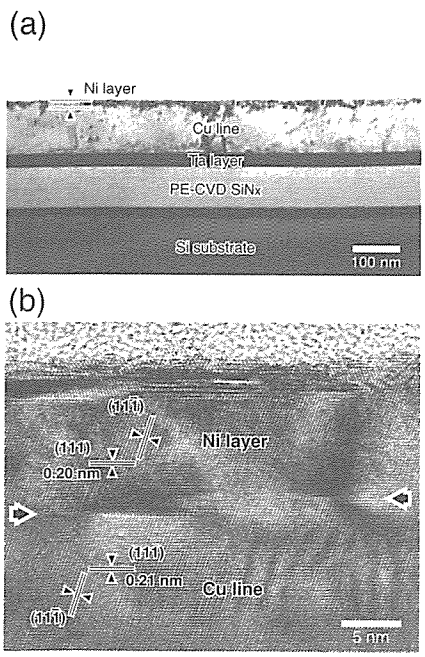


図2 Ni 無電解めっき後の Cu 微細配線部の断面 (a) 明視野 TEM 像と (b) 高分解 TEM 像.

$$pH < 3.0 \quad TiN + 6HF \rightarrow TiF_6^{2-} + NH_4^+ + 2H^+ + e$$
$$Pd^{2+} + 2e \rightarrow Pd$$
$$pH > 3.0 \quad TiN + 6F^- + 4H^+ \rightarrow TiF_6^{2-} + NH_4^+ + e$$
$$Pd^{2+} + 2e \rightarrow Pd$$

pH 3.0 を境に反応式が変わるのは，ふっ化水素 HF の酸解離定数 pK_a がおよそ 3.0 であり，反応に関与するふっ化物イオン化学種の状態が，pH 3.0 の前後で HF（pH < 3.0）から F^-（pH > 3.0）へと変化するからである．pH 2.4，4.0，5.2 の 3 種の浴を用い，浴温 25℃，50℃，70℃ の 3 条件において置換反応を行ったところ，すべての浴条件において Pd が置換析出した．これらの条件で 5 分間置換反応を行って得られた基板試料の表面 SEM 像を図 3 に示す．図中白く見える部分が析出した Pd 粒子であり，浴の pH，浴温によってその大きさおよび分散状態は変化していることが分かる．全体的に pH の高い浴ほど析出する Pd の粒径は小さく，浴温が高いほど均一かつ密に分散する傾向が見られ，浴温 70℃，pH 5.2 において最も小さな Pd 粒子が得られた．図 4 にその断面 TEM 像を示す．図より，粒径およそ 50 nm の Pd 析出物が TiN 上に析出していることが分かった．TiN は電気伝導度が低いので，そのままでは電解めっき法により表面に金属を析出させることはできないが，置換析出反応を用いれば，電気伝導度が低い材料の上にも，活性化処理をすることなく金属を析出させることができる．

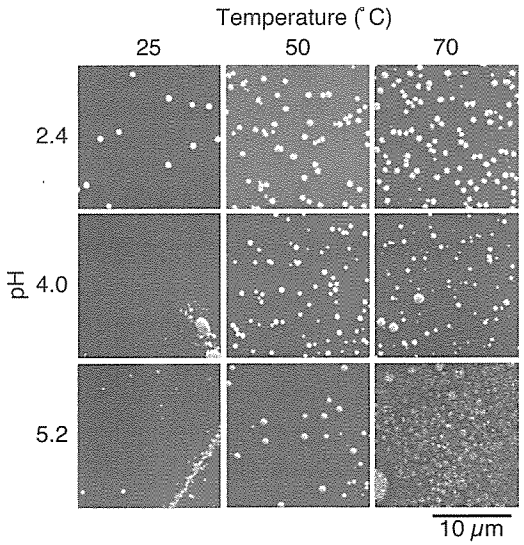


図3 置換反応後の基板表面 SEM 像.

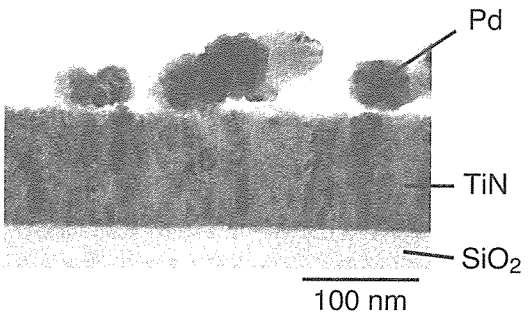


図4 浴温 70℃，pH 5.2 の浴で得られた Pd 粒子の断面 SEM 像.

3.3 双方向パルス電解めっき法を用いた鉄表面のクロム合金化

最後に電解めっき法について述べる．電解めっき法の利点は外部電源を用いて電極の電位や電流密度を自由に設定できる点である．生産速度が重要な工業的なめっきでは，電流密度を大きく設定し，めっき速度を向上させる努力が行われている．一方で電位を制御すると，その系で起こる電極反応をより厳密に考察することができる．ここでは，電解めっきの電位を自由に設定できる特徴を利用した双方向パルス電解めっき法について述べる．この方法では，金属基板自身を合金成分の供給源として利用する．例として，3 価クロム浴と鉄基板を用いた双方向パルス電解めっき時の電位の変化と，反応の模式図を図 5 に示す．この系では，3 価クロム浴中で鉄基板をアノード分極させ，基板のごく表面を溶解させた後，基板をカソード分極させることにより，浴中のクロム

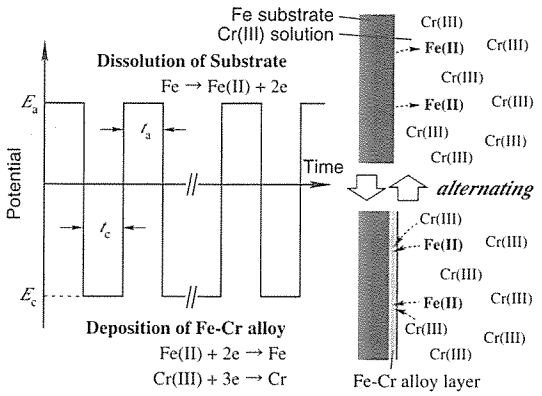


図5　双方向パルス電解めっき時の電位の変化と，対応する反応の模式図.

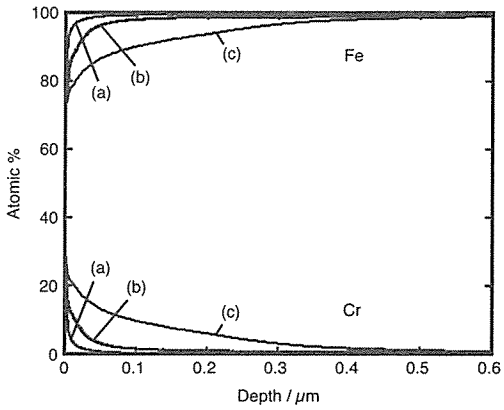


図6　双方向パルス電解めっきにより作製した被膜の深さ方向の組成分析結果．電解のパラメータ: アノード分極時間 t_a = (a) 0.25 s, (b) 0.50 s, (c) 1.00 s, カソード分極時間 t_c = 2.00 s, アノード分極電位 E_a = 0.0 V *vs.* SHE, カソード分極電位 E_c = −1.1 V *vs.* SHE.

(III) イオンと溶解させた鉄(II)イオンを鉄クロム合金の形で鉄基板上に共析させる．3価のクロムは6価のクロムよりも酸化力が小さく安定であるので，3価クロムめっき浴は6価クロムめっき浴の代替として期待されているが，3価クロムめっき浴から得られるクロムめっき被膜の密着性は悪く，成膜速度も小さい．双方向パルス電解めっき法を用いることにより，析出する被膜に対して①平滑な表面状態，②クラック発生の抑止，③密着性の改善などが期待できる．この方法で作製した被膜の深さ方向の組成分析結果を図6に示す．図に示すように鉄クロム合金被膜が鉄基板表面に形成されており，被膜の組成は深さ方向に傾斜していることが分かる．また，アノード分極時間を変化させることで，組成の傾斜の度合いや膜厚をある程度制御することができた．このような傾斜組成により，被膜と基板との密着性を改善し，クラックの発生も抑えられることが分かった．

双方向パルス電解めっき法を用いれば，通常の定電位電解めっき法では得ることのできない被膜を得ることができ，これまでにない新しいプロセスを確立できる可能性も秘めている．例えば，金属 Mo は Mo(VI) 単味浴から電析させることはできないが，Fe, Co, Ni などの鉄属遷移金属の共存下においては，それらと合金を形成し電析することが知られている．双方向パルス電解めっき法を Ni 基板と Mo(VI) 単味浴の系に用いれば，Mo(VI) 単味浴から金属 Mo を Ni-Mo 合金の形で析出させることができる．これは定電位電解めっき法では不可能なプロセスである．さらに双方向パルス電解めっき法のパラメータ，すなわち，アノードあるいはカソード分極させる電位と時間を変化させることで，一つの浴から多様な組成プロファイルを持つ被膜を形成することも可能であると考えられる．

お　わ　り　に

ご紹介させて頂いたように，これまで行ってきた研究の本質は，いずれも酸化還元反応を利用した金属の析出であったように思います．物質における表面の性質は，ものづくりの現場や，実際に製品を使用する環境において極めて重要であり，酸化還元反応を利用した金属析出による表面処理，すなわちめっき技術は欠かせません．めっき技術に関する議論・討論が活発な表面技術協会のホームページ（http://wwwsoc.nii.ac.jp/sfj/）には，「表面が変わればすべてが変わる」といったスローガンが掲げられています．多少言い過ぎの感はありますが，上述の理由から実はあながち間違ってはいないのでは，と感じております．

筆者は現在所属する研究室において，酸化還元反応を利用した金属ナノ粒子の作製とその応用に関する研究を精力的に進めております．今後も初心を忘れず，懸命に研究に取り組んでいく所存でございます．今後ともどうぞよろしくお願い致します．

参　考　文　献

1) 表面処理対策 Q&A 1000 編集委員会，表面処理対策 Q&A 1000，美巧社（1998）.

研究速報

工学研究科　社会基盤工学専攻

地殻工学講座 ジオフィジクス分野

漸近破線理論と有限差分法を用いた弾性波動のハイブリッドシミュレーション

波動伝播解析に有限差分法や破線理論が多用されている．波線理論は複雑な構造への適用が難しいのに対し，有限差分法は高精度であるが計算コストが高い．そこで，それぞれの長所を生かしたハイブリッドシミュレーションの開発を行った．波線理論には振幅を考慮する漸近波線理論を用いた．漸近波線理論による波動場は波線上でしか評価できないため，有限差分法との接合のために震源と観測点を結ぶ波線を見つけることが困難となる．本研究では paraxial ray 近似を用いてこれに対処した．海底下に複雑な構造を有するモデルを設定し，ハイブリッドシミュレーションを適用した結果，同等な計算品質に対し計算時間の改善が確認された．

MT 法による二次元不均質媒体における異方性領域検出に関する研究

電磁場応答に異方性を有する探査対象地域の MT 法による異方性検出を目指した．まず，フォワード計算により，TM モード内の異方性が見かけ比抵抗に及ぼす影響を調べ，構造によっては深度方向の比抵抗の影響が無視できないことを確認した．次に，ABIC 最小化法を用いた異方性インバージョンを開発した．開発したインバージョンアルゴリズムの妥当性を数値実験で確認し，実データへの適用を試みた．三陸沖の海洋 MT 法の記録へ適用した結果，等方性インバージョンと大きな差異は認められなかったが，残差が減少し，解析精度の向上が図られたと考えられる結果を得た．

断層運動による動的な海底地盤変動を考慮した3次元津波シミュレーション

これまでの津波シミュレーションでは，津波の初期波形が海底の静的な変動と等しいと仮定された長波長近似を用いて計算されることが多かった．しかし，2003 年の十勝沖地震では津波発生の瞬間に音響波が観測され，無視できない課題として認識された．そこで，本研究では津波シミュレーションの高精度化および初期警報システムへの展開を目的として，動的な海底地盤変形を考慮した津波シミュレーションの開発を行った．開発の結果，津波発生時の音響波の再現に成功した．さらに，震源直上の津波の波高が海底地盤変動の動きを反映した動的なものとなることが判明した．

海底地震計を用いた人工震源による地下構造解明に関する研究

近年，大陸棚調査の必要性から海底地震計（OBS）を使用した大規模な地震探査が行われている．そこで，OBS 記録から地殻構造を解析する処理法の高精度化を目指した．まず，解析者に依存しないトモグラフィックインバージョンの適用を図った．この際，堆積層の速度構造を初期モデルに組み込む必要があることがわかった．さらに，速度不連続面の再構築を適切に行うためには，反射法により得られる速度構造分布情報を組み入れると効果が高いことが示された．一連の処理手法により，精度の高い地殻速度構造分布とモホ面の速度不連続面を再構築することができた．

准教授　三ケ田　均
助　教　尾西　恭亮

工学研究科　社会基盤工学専攻

地殻工学講座
地質工学分野

超臨界 CO_2 によるケーシングセメントの物理特性変化に関する研究

大気への CO_2 排出量を効率的かつ直接的に削減するために，地中貯留が最も有効な対策と考えられている．地下貯留層に一度圧入された CO_2 が地表に漏洩することは安全面でも経済面でも大きな問題となることから，漏洩の可能性が低い地層に圧入することは当然である．しかし圧入された CO_2 によって，帽岩や坑井周辺物質が変質・劣化することによって，漏洩経路となる可能性が残る．そこで CO_2 による変質を最も受けやすいと考えられる坑井仕上げ材料のケーシングセメントに対して，地下条件を再現した長期被爆実験を行った．その結果，一般的な坑井仕上げ用セメント材料は地下貯留層において一時的に孔隙率・浸透率が上昇することが判明した．このことは，すでに掘削坑井が存在する地域，特に枯渇油ガス田などを対象に CO_2 地中貯留を行う際には，施工対策を行う必要があることを示している．

CO_2 地中モニタリングのための坑井間地震探査データの差解析

CO_2 地中貯留を安全に実施するためには，圧入された CO_2 を地下貯留層内で管理する必要があり，そのためには地下貯留層内での CO_2 の挙動を監視（モニタリング）する必要がある．そこで新潟県長岡市において実施された CO_2 地中貯留実証試験において取得された坑井間トモグラフィー探査データを使用して，繰り返し探査データの解析に有効な差解析手法を用いて，モニタリング技術の高精度化を検討した．解析の結果，通常の差解析では偽像が生じることが判明した．そこで「CO_2 圧入によって弾性波伝播速度は低下する」という制約条件を加えて再度解析を行った．その結果，偽像の少ない速度イメージングに成功し，地中圧入されたCO2が帽岩の下面に沿って移動していることが明らかになった．

海山沈み込みを伴う付加体形態のサイスミックシミュレーション

四国沖や紀伊半島沖などの海底に発達する付加体と呼ばれる地質体浅部には，メタンハイドレート資源の存在が知られている．メタンハイドレートの探鉱開発を進めるためには，まずその集積・濃集メカニズムを把握する必要がある．付加体中のメタンは地層流体とともに移動すると考えられることから，付加体において流体移動の経路となる断層をモデル化する必要がある．また，付加体は多数の海山沈み込みによる影響を強く受けていることが分かってきた．そこで，モデル実験を行って付加体形成における海山沈み込みの影響を調査するとともに，それが反射法地震探査によってどのような形態として認識されるのか，シミュレーションによるイメージングを行った．その結果，海山沈み込みの前後で別系統の断層系が形成されて流体移動経路も別になることや，このような特徴を地震探査イメージ上で把握するための形態的特徴が抽出された．

ランダム不均質媒質におけるコーダ波を利用した地震波干渉法

地下探査の手法の一つとして，最近地震波干渉法が注目されている．この方法を用いることによって，自然地震や地中雑音などの受動的観測記録から反射法記録を合成できるため，都市部や山間部での調査や連続観測による地下モニタリング調査を比較的安価かつ簡便に実施できる．本手法の実フィールドでの有効性を検討するため，地下地層をランダム不均質媒質とモデル化し，P 波の後に尾を引くコーダ波を含む数値シミュレーションを行った．その結果，単純な地質構造では歪みの少ないイメージング結果を得た．次に平成12年島根県西部地震の後に記録された余震観測記録を用いて地下イメージングを行った結果，同地域で取得された反射法地震探査断面図と同様の記録が得られた．

教　授　松岡　俊文
准教授　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

＜数値岩石モデルによる岩石の力学物性評価法に関する研究＞

岩石の弾性係数はテンソル量であるが，等方性や横等方性などの単純な異方性を除いて全てのテンソル成分を実験的に求めることは簡単でない．しかし，微視的に複数の相からなる非均質材料に対して均質化法を用いると，均質化された材料物性値として各相の分布特性によって生じる異方性を考慮した弾性係数を求めることができる．そこで，まず二点相関法によって空隙の分布が等方的な岩石モデルと異方的な岩石モデルを構築するとともに，等方的な岩石モデルに対して，空隙を異方的な鉱物と見なしてその含有量を変えた岩石モデルを複数構築した．次に，それらに対して均質化法を適用して弾性係数テンソルを求めることにより，岩石の弾性係数異方性に及ぼす鉱物や空隙の分布特性及び鉱物が示す異方性の影響について調べた．その結果，簡単な岩石モデルに均質化法を適用することで，岩石の弾性係数異方性の評価法として，均質化法が有効であることを確認した．また，二点相関法を用いて構築した岩石モデルに対する検討から，異方性鉱物の含有量が増えるにしたがって弾性係数の異方性はその鉱物の異方性に近づくことがわかった．さらに，異方性鉱物の方向がランダムであれば，鉱物の異方性が弾性係数異方性に及ぼす影響が減少することがわかった．

＜格子ボルツマンモデルを用いた貯留層岩石の流体流動特性評価に関する研究＞

原油・天然ガスの効率的な開発とその地下貯蔵ならびに温室効果ガスの地中隔離のためには，貯留層岩石内における流体の流動挙動を精度よく評価する必要がある．貯留層岩石内の流体流動現象は，油，ガス，水が貯留層岩の空隙内を流動する多相流動現象であり，この多相流動では，各相間の界面張力や岩石表面の濡れ性に加えて岩石の複雑な空隙形状が各相の飽和率や相対浸透率に影響を及ぼしている．特に，フラクチャー内部の多相流動挙動については，フラクチャー表面の濡れ性，流体の界面張力，フラクチャーの表面形状及び開口幅分布に大きく影響されるものと考えられるが，これらの影響について詳細に調査した例は見られない．

そこで本研究では，フラクチャー内の多相流動現象を実際に観察し理解するとともにシミュレーションにおける検証データを得ることを目的にフラクチャー内多相流動の可視化実験を行った．また，可視化実験に用いたフラクチャーに対してフラクチャー内の多相流動シミュレーションを行い，可視化実験との比較および多相流動挙動の検討を行った．その結果，フラクチャー内多相流動の可視化実験においては，複雑な表面形状を有するフラクチャー内の多相流動を実際に観察し多相流動挙動の定性的な把握を行うことができた．また，格子ボルツマン法による多相流動シミュレーションでは，まず本研究で用いたシミュレーション方法が，岩石の濡れ性を適切に表現したモデルであることを確認し，フラクチャーモデルを用いたシミュレーションでは，油，水各相の流動挙動や残留油飽和率において実験結果と比較的よく一致する結果を得た．

＜個別要素法による岩石の水圧破砕の破壊過程に関する研究＞

水圧破砕法の利用に際して，合理的な設計・評価を行うためには水圧破砕によって造成される人口亀裂の生成メカニズムを明らかにしておくことが重要である．Hubbert と Willis は，ボアホール周辺の岩盤が不透水性で，等方均質な弾性体であり，かつ，主応力の方向がボアホール軸と一致すると仮定した場合，亀裂は引張による破壊であり，最大主応力方向に形成されることを理論的に示した．しかし，野外での水圧破砕実験や室内実験で観測された AE のメカニズム解によると，ほとんどの AE が理論的に予測される引張型の亀裂ではなくせん断型の亀裂によって生じたことが示されており，水圧破砕による人口亀裂の生成メカニズムについては不明瞭な点が多く残されている．そこで，本研究では，個別要素法 に Fluid Flow Algorithm を導入することにより水圧破砕をシミュレートし，理論から導かれる破壊メカニズムと AE の観測データから求まるメカニズムとの違いについて検討を行った．その結果，シミュレーションでも亀裂の進展過程や進展速度において現実の水圧破砕実験で得られる結果とよく一致した結果が得られ，実験によって観測されたせん断型 AE が Hill のモデルに従って発生しているものと考えられることがわかった．また，破砕流体に粘性の大きい流体を用いると流体が流動しにくいため，流体が亀裂内部に浸入する際に大きな体積変化を伴う亀裂の開口が発生することがわかった．この場合，粘性の低い場合に比べてエネルギーの大きな AE が放出されることになる．AE の測定実験ではエネルギーの小さい AE が観測され難いこと，引張破壊のエネルギーはせん断破壊のエネルギーに比べて小さいことを考慮すると，粘性が小さい場合には引張亀裂の進展生成時に発生する AE はエネルギーが小さいため観測され難い．このため，せん断亀裂が卓越しているように見える．一方，粘性の大きい流体を用いた場合には比較的エネルギーの大きい引張型 AE が発生するため，せん断型 AE とともに引張型 AE も観測されるものと考察できた．

教　授　石田　毅
准教授　村田　澄彦
助　教　深堀　大介

工学研究科　社会基盤工学専攻

地殻工学講座
ジオメカトロニクス分野

低土被り山岳工法トンネルの耐震補強に関する検討

土被りが浅くかつ固結度の低い地山のトンネルにおいても，近年では山岳工法が採用されることが多くなってきている．しかし，その耐震性については十分な検討がなされておらず，地震時の影響を考慮した覆工設計法は未だ確立されていない．当研究室では，このような山岳工法トンネルの耐震補強のあり方について種々の検討を行っている．本年度は，耐震対策として提案されている緩衝材の効果について，FEM 解析にもとづいた検討を行った．その結果，覆工コンクリートと岩盤の間に挿入する緩衝材は，基本的に覆工コンクリートに作用する力を全体に分散させる効果をもつこと，弾性係数が小さいほどがその効果が大きいが，その厚さは弾性係数ほどには効果の大小に影響しないことを明らかにした．今後，さらに緩衝材の降伏後挙動も考慮に入れた解析を行って，その耐震補強効果についての評価を明確にしてきたいと考えている．

変状トンネル対策工の効果の三次元的評価

トンネル覆工の変状の進行を予測し，適切な対策工の選定とその効果の定量的な評価を可能とするものとして，本研究室では，変状の進行を周辺地山の強度劣化に伴う応力再配分の帰結として表現するモデルを提案している．このモデルでは，実測された内空変位などのデータにもとづいて，地山強度の経時変化を算定し，それを時間外挿してその後のトンネル変状の進行を予測するものである．本年度は，双設トンネルを例として，種々の対策工（ロックボルト工や裏込め注入工）が変状進行の抑制に対して，とくに3次元的に，どのような効果をもつか，数値解析にもとづいた検討を行った．その結果，たとえば裏込め注入工に関しては，一般にその施工区間を長くしたほうが，全体としての変状抑制効果は大きいものの，変状の進行が一部の区間にとくに顕著である場合には，その区間に対して集中的な対策を施したほうが，変状抑制の実効性が高くなることを明らかにした．

ガイド波を利用した埋設長尺部材の超音波検査

ロックボルトやグラウンドアンカーなど地盤中に埋設された長尺鋼材の劣化状況を，露出した片端から導入した超音波によって検査する方法について研究している．有限な断面形状を持つ長尺部材を伝播する超音波は，周波数と位相速度に一定の関係（速度分散特性）をもち，断面内の変位分布がそれぞれに異なる，いくつものモードからなるガイド波となるが，そのようなガイド波のモードと周波数をうまく選択することによって，波動の周囲媒体への散逸が少なく長距離検査が可能となる方法や，逆に周囲媒体の性状を判定できるような方法が実現できないか検討している．本年度は，石膏（固体），砂（粒状体），水（液体）を模擬対象として，埋設部材中を伝播する超音波がそれらの周囲媒体の存在によってどのような変化を受けるかについて実験的に検討した．その結果，水中における波動散逸が他に比べ極めて大きいこと，また，P 波速度付近の位相速度を持つ高次モードのガイド波に長距離検査実現の可能性があることが明らかとなった．

グラウンドアンカー用の静電容量型荷重計の開発

地すべり地や道路のり面などの斜面安定に広く利用されているグラウンドアンカーに関して，それらに導入されている緊張力を定期的にあるいは常時的に監視することが，対象斜面の安全を確保する上で極めて重要である．しかし，現時点では，長期使用に耐える適当な荷重計がないために，そのような監視システムの設置はほとんど実現していない．本研究室では，そのような監視システムで利用できる新しい荷重計として，アンカー定着部に介装するセンターホールロードセルを基本としながらも，より堅牢かつ薄型にでき，しかも長期使用にも耐えうるものとして，リングプレートと内挿プローブからなる静電容量型の荷重計を提案している．本年度は，その試作器を製作し，荷重計としての基本性能が実用に適うものであることを確認した．

レーザーによる超音波励起の基本的機構に関する検討

構造物壁面の剥離や亀裂などの劣化を検査するにおいては，大きな面状領域を短時間に一括して検査できるような手法の開発が望まれている．このような広域一括検査への展開を視座に，当研究室では，レーザー超音波を用いる手法について検討を行っている．本年度は，とくにパルスレーザー光のスポット照射によって励起される超音波の性状について，理論的ならびに実験的な検討を行った．その結果，レーザー光照射によって励起される超音波が，照射スポット径内のみの面的な膨張圧によって生じる波動であるとした理論解とよく整合することを示した．また，レーザー光照射によって励起され，対象材内部に広がっていく P 波や S 波に強い指向性があること，照射点の直下にはあまり強い超音波を生成できないこと，また，実体波に比べてかなり強い表面波が生成されることを明らかにした．

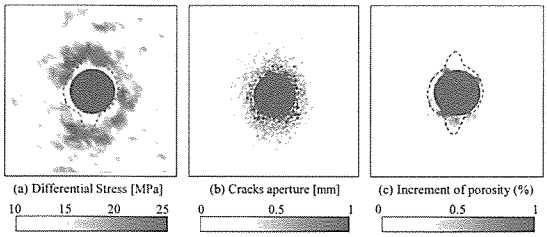
教　授　朝倉　俊弘
准教授　塚田　和彦
助　教　西藤　　潤

工学研究科　都市環境工学専攻

地殻環境工学講座

堆積軟岩における掘削影響領域の評価とAE挙動に関する研究

将来建設が予定されている高レベル放射性廃棄物（HLW）地層処分施設の設計・施工にあたっては，空洞の力学的安定性に加え，厳格な遮蔽性の確保が求められており，そのためには空洞周辺に形成される掘削影響領域（EDZ）を高精度に評価する必要がある．そこで，高地圧下において岩盤の応力変化や亀裂の発生・進展を鋭敏に検知できるAE計測と個別剛体要素法（DEM）による予測解析を併用した，応力評価に基づくEDZの予測・評価システムを提案し，結晶質岩においてその有効性を確認した．本研究においては，これまでに堆積軟岩の供試体に対する高剛性三軸圧縮試験のDEMシミュレーションを行うことでAEと応力変化および破壊現象の関連性を明らかにしてきたが，本年度は，幌延の新第三紀堆積軟岩の結合粒状体モデルを用いて，原位置で観察されたボアホールブレイクアウトの詳細なシミュレーションを実施し，解析手法の適用性を検証した．また，堆積軟岩の異方性と応力軸との関係に基づく破壊過程について検討した．さらに，掘削影響試験などでのAE計測計画の概念および必要な計測システムの概念を構築した．



粒状体DEMによるボアホールブレイクアウトの解析

高圧ガス貯蔵岩盤タンクの気密性能評価法に関する研究

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

本研究では，これまでに構築した岩盤-地下水-貯蔵ガスの相互影響を考慮した力学的・水理学的連成解析手法を開発し，高圧ガス貯蔵岩盤タンクにおける水封メカニズムの解明を行ってきたが．本年度は，タンクの気密性を判定するための解析手法に関する基礎的検討およびシミュレーションを行った．

地球統計学手法を用いた3次元水理地質モデルの構築法に関する研究

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

- ■MDSイメージングによる初期岩盤水理モデルの構築
- ■多変量統計解析による岩盤水理モデルの構築
- ■地球統計手法による岩盤水理モデルの構築

を行ってきた.本年度は，地球統計学的シミュレーションと3次元浸透流解析を組み合わせることで，建設プロジェクトの進行に伴って追加・統合される水理地質データから，サイトスケール及び構造物周辺の岩盤内の地下水挙動を高精度に評価することが可能な3次元水理地質モデルを構築した．さらに，本研究で用いた水理地質モデルの構築法を基に，地下構造物の建設プロジェクトにおける3次元水理地質モデルの構築システムを提案した．

岩盤の水理地質構造評価に基づく地下水制御システムの構築に関する研究

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

そこで本研究では，対象岩盤における水理地質構造の評価に基づき，必要な箇所に最適なグラウト注入を行う地下水制御システムの構築を研究の目的とし，現在建設中のLPG地下備蓄基地を対象として検討を行った．

教　授　青木　謙治
准教授　新苗　正和
助　教　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
資源エネルギーシステム学分野

ポーラスアルミニウムの機能特性

ポーラス金属材料は，構造材，衝撃吸収材，防音材，フィルタ，熱交換器等への応用が可能な新しい軽量素材として注目を集めている．既存のポーラス金属はミリメートルオーダーの不均一な孔径を有するが，孔径の微細化・均一分布を実現すれば，特性の信頼性が向上し，ポーラス金属の用途拡大につながる．本研究室ではマイクロメートルオーダーの孔径を持つポーラス金属の創製および特性評価を行っている．ところで，これまでポーラス金属の力学特性についての研究は多くなされてきたが，機能特性に関する研究は不十分である．そこでマイクロポーラスアルミニウムの機能特性について調べた．ここでは吸音特性を調査した結果を示す．

スペーサー法により気孔率，セル孔径，試料厚さが異なるポーラスアルミニウムを作製し，2マイクロホン法を用いて垂直入射吸音率の測定（500-6400 Hz）を行った．その結果，吸音率はセル孔径の最も小さい 212-300 μm で最大となったが，セル孔径と吸音率は明確な相関関係をもたなかった．そこで，連結孔径を考慮に入れた吸音モデルを用いて吸音率を計算すると，計算結果と実験結果が一致した．これからセル孔径だけでなく，連結孔径が吸音特性に大きく影響を及ぼしていることがわかった．

ナノ結晶 Ni の変形破壊挙動に対する空孔の影響

結晶粒径が約 10 nm 以下のナノ結晶金属は，結晶粒径が小さくなるとともに強度が低下する逆 Hall-Petch の関係を示すことが知られている．このような現象は，粒界すべり等の粒界変形に起因していると考えられる．一般に粒界特性は粒界中に存在する空孔に影響を受けることから，ナノ結晶金属の変形特性は空孔に影響されることが示唆される．そこで本研究では，空孔量が異なる2つのナノ結晶 Ni-W を作製しそれらの引張特性を調べるとともに，空孔量を変化させた2つのナノ結晶 Ni セルを用いた分子動力学（MD）シミュレーションを行い，空孔がナノ結晶金属の変形破壊挙動に与える影響について考察を行った．

引張試験の結果，空孔量の多い試料では空孔量が少ないものに比べ降伏応力，破断応力ともに小さくなった．また，クリープシミュレーション試験によって，空孔量の多いセルの方が最小クリープ率（ひずみ速度）は大きく，また破断までの時間は短いことが分かった．さらに，圧縮シミュレーションにより，変形は粒界で起こることが確認された．以上のことから，空孔が存在することにより，ナノ結晶金属は変形しやすく，かつ破壊しやすくなることが分かった．

メタンハイドレート膜のインヒビター水溶液中における成長挙動の研究

天然ガス等のパイプラインにおいてメタンハイドレートが生成し，パイプラインを詰まらせる事件が問題となっている．また，海底からのメタンハイドレート回収にあたっては一度分解したメタンハイドレートが再生成することも避けなければならない．これらの解決策としてメタンハイドレートの平衡条件を低温・高圧にシフトさせるインヒビターによりハイドレートの生成を抑制する方法が考えられている．そこで，本研究では光学顕微鏡および高圧セルを用いて純水，塩化ナトリウム溶液，メタノール溶液中におけるメタンハイドレート膜の成長挙動を観察し，結晶形や成長速度について考察を行った．

その結果，メタンハイドレート膜の成長形は温度・圧力条件によって異なっており，平衡条件に近い温度圧力条件下でメタンハイドレート膜は多角形状を呈することが分かった．さらに，塩化ナトリウム溶液を用いた場合，メタンハイドレート膜の成長中にハイドレートが分解する現象が観察された．これは局所的な塩化ナトリウムの濃度上昇に伴い，メタンの溶解度が減少したためであると推測された．また，成長速度の解析から水に溶解しているメタンの拡散がメタンハイドレート膜成長の律速過程であると推測された．塩化ナトリウム溶液，メタノール溶液でも律速過程は同じであると考えられた．

岩石の破壊にともない発達するマイクロクラックの解析

近年，放射性廃棄物の地層処理処分をはじめ様々な目的で地下空間の利用が考えられ，岩石の破壊機構や透水性の解明は重要な課題となっている．しかしながら，岩石の破壊や透水性に関わりの大きいマイクロクラックの分布や成長の過程は未知の部分が多い．そこで本研究では，花崗岩試料を用いて破壊に至るまでの特徴的ないくつかの段階まで一軸圧縮試験を行い，試料中に存在するマイクロクラックの分布状況を，画像処理手法を適用して定量的に解析した．

その結果，全体のクラック量は破断の直前までほとんど変化がなく，破断後に急激に増加することがわかった．マイクロクラックの進展状況をより詳細に検討するために，領域ごと，鉱物ごとのクラック分布を解析したところ，長石粒子内では破断前の段階ではクラック量の変化はみられなかった．一方，石英粒子内では破断前の段階でクラック量の増加がおこる領域が確認された．したがって，鉱物ごとにクラックの進展状況が異なることがわかった．今後，圧縮試験に加え，温度履歴試験，疲労試験等を行い，様々な条件下におけるマイクロクラックの進展過程について解析を進める予定である．

教　授　馬渕　　守
准教授　楠田　　啓
助　教　陳　　友晴

エネルギー科学研究科　エネルギー応用科学専攻

資源エネルギー学講座
資源エネルギープロセス学分野

固体平板に衝突するカーテン状水膜噴流の三次元数値解析

カーテン状液体噴流と固体との衝突は，カーテンコーティングやカーテン冷却などで利用されている．これまで，その流れ構造は実験および数値解析により研究されているが，結果の解釈は2次元理論に基づいて議論されている．しかし，実際の流れ構造は3次元であり，その知見はほとんどない．本研究では滑らかな固体面に衝突する自由表面水膜流れを実験および三次元数値解析によって検討した．実験では自由表面水膜噴流の形状を写真撮影および触針法を用いて調べた．一方数値解析では，重力，粘性，表面張力の効果を考慮した，三次元直交座標系の非圧縮性粘性流体の Navier-Stokes 方程式系を有限差分法で離散化し，計算した．また，自由表面の変化を追跡するため VOF（Volume-of-Fluid）法を導入した．解析結果は実験結果と良好に一致し，解析の妥当性を示した．数値解析により，流れの3次元性は表面張力が作用する時間が長い条件，すなわち落下液膜端部の流速が小さい，もしくはスロットノズルと固体面の距離が大きい場合では，流れの3次元性が顕著になり，流れに垂直な方向の速度成分が現われ，自由表面が波打つことが明らかになった．（大野大介，現：川崎重工業（株））

3次元有限要素法による高張力鋼板の穴広げ成形性解析

これまでの一連の研究で，板材の成形限界予測を有限要素シミュレーションと延性破壊条件式との組み合わせによって行う方法を提案してきた．最近の研究では，いくつかの代表的な延性破壊条件式について，それらの式から導き出される限界ひずみと，Marciniak 法を用いた二軸張出し試験から得られる種々のひずみ比での限界ひずみの実測値を比較した．その結果，高張力鋼板には Cockcroft らの式が最も実験結果と一致することを見出し，深絞りや張出しの基本的な三次元プレス成形での成形限界予測に適用してきた．穴広げに代表される伸びフランジ成形は，もう一つの基本的な成形様式であるが，破断場所が切断による予加工の影響を受ける材料端部である点が他の成形と異なる．本研究では，延性破壊条件式を有限要素シミュレーションソフト LS-DYNA ver. 970 と組み合わせて，円錐ポンチおよび平頭ポンチを用いた鋼板の穴広げ成形限界予測を試みた．切削穴の場合のみならず，予加工の影響のある打抜き穴の場合にも，予ひずみによる加工硬化と損傷を考慮することにより，穴広げ率の予測が可能となることがわかった．

（小澤慶祐，現：ダイハツ工業（株））

対向液圧成形における圧力媒体の流出特性

対向液圧成形は雌型に代わり液圧を用いるプレス加工法の一種である．液圧を用いない従来の加工法に比べて高い成形性が得られることから，自動車業界をはじめとするさまざまな分野での応用が期待されている．成形中に圧力媒体がダイ-ブランクホルダ間から流出する現象は，成形中の材料流入を促進させることから成形性を左右する重要な現象である．しかし流出の諸特性は十分明らかではない．本研究では対向液圧角筒絞り成形を対象として圧力媒体流出特性について実験的に検討した．実験では電動ポンプ加圧方式による角筒絞り成形金型を独自に設計製作した．ダイ面上の各部にダイ下面に向けて貫通させた直径 2 mm の穴を設け，ダイ下面側に圧力センサを取り付けることで，角筒絞り成形中のダイ面上の圧力変化を調査した．その結果，圧力媒体の流出が始まると同時にダイ面上に圧力が作用し始め，その後成形の進行に応じて圧力値は大きく変化することがわかった．また圧力値はダイ面上の部位によって大きく異なることが明らかとなった．以上より，圧力媒体流出現象の成形性へ与える影響は成形の進行および部位によって大きく異なることが示唆された．

（栗栖　憲，現：JFE スチール（株））

高温固体面に衝突する液滴の変形および伝熱特性の数値解析

スプレー冷却の冷却特性を理論的に予測することは学術的かつ工業的に有意義である．そのためには高温固体面近傍の冷却媒体の流動と伝熱現象の詳細な解明が必要である．スプレー流量が小さい場合，液滴粒子が高温固体面に離散的に衝突するので，少数の液滴が固体面に衝突するときの伝熱量を求め，それを理論拡張することで冷却特性を予測できる可能性がある．本研究では，複数の液滴粒子が固体平面に次々と衝突するときの流体力学・伝熱学的挙動を数値解析と実験で解明し，微視的な観点から冷却のメカニズムを研究した．流れの支配方程式系は2次元軸対称座標系の非定常，非圧縮性粘性流体 Navier-Stokes 方程式，エネルギー方程式，連続の式から構成され，重力，粘性，表面張力，液体と固体表面の濡れ性（接触角），熱伝導，固体と流体との熱移動，物性値の温度依存性を考慮した．自由表面の時間変化を追跡するため VOF（Volume-of-Fluid）法を導入した．固体面温度が液体の沸騰点より低い場合は固液界面で温度の連続性を，十分高い場合は固液間の薄い蒸気膜の形成を仮定して熱移動のモデリングを行った．予測値は実験データと良好な一致を示した．

（南川友樹，現：シャープ（株））

教　授　宅田　裕彦
准教授　藤本　　仁
助　教　浜　　孝之

エネルギー科学研究科　エネルギー応用科学専攻

資源エネルギー学講座
宇宙資源エネルギー学分野

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

非平衡エネルギー変換貯蔵プロセシング（地上実験）

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

宇宙空間での非平衡電気化学プロセシング

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

気泡と微粒子の衝突に関する数値的研究とその応用

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について流体力学的な理論解析を行っている．得られた知見は，目下，微小重力あるいは強磁場などの特殊環境下の電気分解における気泡の発生とその挙動解析へと展開している．

光触媒反応を利用した環境浄化技術に関する基礎研究

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

リサイクル設計要素技術

省資源・省エネルギー型の環境調和型リサイクルプロセルの一つとして当研究室では浮遊選鉱法（浮選法）を重要な固相分離の要素技術と位置付け，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，有機系浮遊懸濁物質（SS）の分離回収・除去，メッキ排水中の金属系 SS 除去などの研究・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．

教　授　福中　康博
助　教　日下　英史

工学研究科　材料工学専攻

材料設計工学講座

金属ガラスの構造安定性とその機械特性

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

液相還元法による金属ナノ粒子の製造とその応用

液相還元法を用いた，銅・銀・錫・ニッケルなどの金属ナノ粒子製造の研究を行っており，特に，金属ナノ粒子のサイズ制御や，凝集の抑制，表面酸化を防止する技術の開発に注力している．これらの研究成果に基づき，企業と共同で銅および銀ナノ粒子製品の研究開発も進めている．さらに，金属ナノ粒子を高密度で分散させた微細配線用インクの開発や，金属ナノ粒子を有機系材料中に高分散させたハイブリッド材料の開発およびその物性についての研究も開始しており，今後も様々な応用の試行に取り組んでいきたいと考えている．

リチウムイオン電池用負極材料における応力ひずみの影響

リチウムイオン電池の充放電過程における，負極材料の膨張・収縮に伴うひずみにより，負極材料の組織が破壊され電池のサイクル特性を劣化させることが知られている．我々は，このひずみの効果を低減しサイクル特性を改善するために，リチウムイオン電池用負極材料として，金属ナノ粒子や金属ナノ多層膜などを用いて，サイクル特性と材料組織の関係についての研究を行っている．現在，特に錫ナノ粒子を高密度に安定に分散させた材料の製造や，錫多層膜製造などに取り組んでいる．

ナノスケール微細組織を持つ鉄基磁性薄膜の組織制御

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

鉛フリー低融点はんだ合金の設計とその組織制御

鉛フリーの低融点はんだ合金材料として，錫合金，亜鉛合金に注目し，これらの安定性や添加元素の効果について研究を進めている．特に現在，未だ代替材料が見出されていない 300℃ 近傍に融点を持つ，鉛フリーのはんだ合金材料の研究開発を企業と共同で進めている．ここでは，はんだ合金の耐環境性に加え，銅基板界面での化合物形成による界面強度や割れの問題を解決することが主要な課題である．

軽量高強度マグネシウム合金の組織とその機械特性

マグネシウム合金の金属組織とその機械特性について研究を行っている．特に焼鈍温度や焼鈍時間によるマグネシウム合金組織の変化について調べるとともに，その機械特性の変化についても系統的に調べている．マグネシウム合金の高温での組織安定性と機械特性の関係について明らかにし，マグネシウム合金の高温での使用の可能性について考察を行っている．

コヒーレント X 線回折による物質内部構造の可視化

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

教　授　松原英一郎
准教授　市坪　　哲
助　教　八木　俊介

工学研究科　材料工学専攻

材料プロセス工学講座 表面処理工学分野

双方向パルス電解法を用いた Ni-Mo 合金皮膜形成

双方向パルス電解法は，母材となる基板を溶解させ，その後溶解させた母材金属イオンと浴中の金属イオンを共析させるプロセスである．印加電圧や電位印加時間などの単純なパラメータ操作により，電極近傍の金属イオン濃度を制御でき，複数の浴を用意せずとも様々な組成の合金皮膜を形成できる可能性がある．本研究では，Mo (VI) 単味浴を用いて，Ni 基板表面に Ni-Mo 合金皮膜の形成を試みている．本研究においては，まず，ニッケルが安定に溶解する条件を確立した．この結果に基づき，双方向パルス電解法により Ni-Mo 合金皮膜の形成に成功した．現在は，より緻密で平滑な皮膜が得られる条件を探査している．

チタンめっきの実現に向けた基礎研究

チタンは海水中などで半永久的な抜群の耐食性を示すが，水溶液ではめっきすることができない．そこで本研究では，室温溶融塩を使って，これまで誰も成し遂げたことのないチタンめっきに挑戦している．チタンめっきを実現するためには，めっきにおける電極の挙動を詳細に調べる必要がある．これまでにチタン電極と水素・プロトンに関連した反応やチタンのアノード溶解条件を明らかにした．現在，カソード分極挙動の解明を目指した研究を行っている．

チタン酸化物からチタン合金への水素還元

高純度のチタンを得る際に，酸化チタンを水素で直接チタンに還元することは熱力学的に不可能であり，複雑なプロセスを経なければならない．そこで本研究では，還元反応における構成物の化学ポテンシャルを操作することにより，酸化チタンの水素還元に挑戦している．例えば，生成物をチタンではなくチタン合金にすることで生成チタンの化学ポテンシャルを下げることができ，チタン酸化物からチタン合金へ水素還元できる可能性がある．また，ホットワイヤー法により生成された水素原子を用いることで，水素の化学ポテンシャルを上げることができ，還元力の向上が期待される．この方法では，現行のチタン製造プロセスにおいて，エネルギー消費の大きい塩化行程，真空蒸留工程を省くことが可能である．実際に，酸化チタンから水素還元によって白金-チタン合金が得られることを確認しており，現在，ニッケル-チタン合金について研究を進めている．

プロトン導電性固体酸化物に関する研究

固体電解質を用いたタイプの燃料電池は，小型化，高集積化が容易であり，その将来性が有望視されている．なかでも，固体酸化物燃料電池は，高温動作型でありコジェネレーションに適するが，その動作温度は 700～1000℃ 程度であり，安価な燃料電池システムの構築の観点からはいっそうの動作温度の低下が望まれる．本研究では，プロトン導電性固体酸化物電解質を用いることによりこの動作温度を 500℃ 程度に下げることを目的とし，最適ドーパントの探査，伝導度の最適化および粒界抵抗の改善について研究を行っている．その結果，従来のドーパントである Y をドープした $BaZrO_3$ よりも，本研究で取り組んでいる Sc をドープした $BaZrO_3$ の方が粒成長が起こりやすく，電気抵抗の主因である結晶粒界の密度を低減できることを見出した．しかし，全体の電気伝導度は Y をドープしたものの方が高かった．そこで，Y と Sc を混合ドープすることを着想し，ドーパント濃度の最適化を行い，混合ドープにより電気伝導度が向上することを実証した．

固体酸型電解質を用いた燃料電池に関する研究

CsH_2PO_4 に代表される固体酸の一部は，高温相で極めて高いプロトン伝導度を示す超プロトン伝導相となる．この変態点は，約 230℃ であり，いわゆる中温型燃料電池として期待される温度範囲である．しかし，CsH_2PO_4 は高温相における脱水分解反応が問題となっている．そこで本研究では，分解反応の詳細を調べた．その結果，高温では脱水により CsH_2PO_4 は液相となることを明らかにした．これに基づき，温度および水の分圧に対する CsH_2PO_4 固相の安定性を調べ，固体電解質として安定に動作する領域を明らかにした．さらに，燃料電池として用いる際の電極触媒に関しても研究を進めている．これまで固体酸型燃料電池の電極触媒性能を評価する手法は確立されていなかった．そこで本研究では，微小電極を導入することで酸化と還元の過電圧を分離して測定することに成功し，これにより電極触媒性能の評価が可能となった．この手法を用いて Pt, Pt-Pd 合金および Pt-Ni 合金に関して評価を行ったところ，酸素極においては Pt-Ni 合金触媒を用いた電極が最も過電圧が小さく，触媒として優れていることを明らかにした．

シリコン太陽電池の高効率化に向けた基礎研究

太陽電池は，クリーンな代替エネルギーとして注目されており，昨今その生産量は急激に増えている．なかでも，シリコン結晶を用いた太陽電池は現在の主流であるが，太陽電池を世の中に広く普及させるためには，そのエネルギー変換効率の向上が必要不可欠である．そこで本研究では，シリコンインゴットの新しい成長法を提案し，不純物の低減，結晶の組織制御を目指した研究を行っている．これまでに，新しい成長法で作製したシリコン結晶は，従来に比べて結晶粒が大きく，不純物や欠陥の濃度が小さく，太陽電池の変換効率も高いことを明らかにした．また，シリコンをベースにした新たな太陽電池構造の作製プロセスの研究にも取り組んでいる．

教　授　粟倉　泰弘
准教授　宇田　哲也
助　教　野瀬嘉太郎

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

【ハンディーサイズの微量元素分析装置】

全反射蛍光 X 線分析法は通常の蛍光 X 線分析法と同様に多元素同時分析，空気中で分析可能という利点をもち，平坦面をもつ固体試料表面および試料保持基板上に滴下乾燥した微小量の溶液残渣の分析に有効な高感度微量元素分析法であり，半導体表面の汚染分析や環境分析等に応用されている．本研究では 1W 空冷式 X 線管，X 線検出器と，当研究室で設計した X 線導波路を組み合わせ，A4 用紙サイズ，5kg のハンディー全反射蛍光 X 線分析装置を開発した．本装置はクロムにおいて 1ng，ppb レベルの検出下限を達成している．一般に蛍光 X 線分析および全反射蛍光 X 線分析において，検出下限を下げるために高出力の X 線源が用いられる．本装置では低出力 X 線管を全反射蛍光 X 線分析法に用いることにより，ハンディーサイズであるにもかかわらず数 10W～数 kW の X 線管を用いた検出下限が ppm レベルの従来蛍光 X 線分析装置よりも微量な元素の検出を可能にした．本装置は，土壌，食品等の迅速な現場分析や，試料のスクリーニングを目的とした大型無機分析装置の要素部品として用いることができると考えられる．

【新しい分析法（EXEFS）による局所構造解析法】

X 線吸収微細構造（XAFS）法は元素の化学状態（価数，電子状態）や目的元素の周りの局所構造（配位数，原子間距離）を分析する方法であり，機能性材料や触媒などに応用されている．河合により開発された広域 X 線発光微細構造（EXEFS）法はラジエーティブ・オージェ効果という発光 X 線スペクトルの中の多体効果を応用して XAFS スペクトルと等価なスペクトルを測定する方法であり，実際に既知の化合物について XAFS スペクトルと EXEFS スペクトルが一致していることを示してきた．また，EXEFS 法はシンクロトロン放射光を用いずに実験室にある波長分散型蛍光 X 線分析装置や電子プローブマイクロアナライザー（EPMA）等を用いて測定を行うことができる方法であり，元素の化学状態やその周囲の局所構造を簡易に分析することが可能である．本研究では固体触媒中 5-20％含まれるアルミニウムの EXEFS スペクトルを，蛍光 X 線分析装置を用いて15- 数10分で測定することができた．今後，未知試料中のアルミニウムおよびその他の元素に対し，化学状態および局所構造解析手法としての EXEFS 法の可能性を検討していく予定である．

【高分解能蛍光 X 線分光装置を用いた元素の電子状態の分析】

高いエネルギー分解能をもつ X 線分光器を用いて試料の蛍光 X 線スペクトルを測定することにより，対象元素の電子状態，結合性などの分析が可能である．3d 遷移金属化合物絶縁体はその電子構造から「モット・ハバード型」と「電荷移動型」の 2 つに分類される．高温超伝導銅酸化物は電荷移動型に分類され，この電子構造がその異常な伝導現象を担っているとされている．また過去の研究により前期 3d 遷移金属化合物はモット・ハバード型，後期 3d 遷移金属化合物は電荷移動型に分類されることが分かっている．本研究では周期表上で 3d 遷移金属の中間に位置する Mn 化合物を対象とし，高分解能蛍光 X 線分光装置を用いて 2 価から 7 価までの様々な価数を持つ Mn 化合物の $K\beta$ スペクトルを測定した．その結果，Mn $K\beta_{13}$ 線のピーク位置のシフトの大きさ（ケミカルシフト）と価数は線形関係にあること，不対 3d 電子数に比例して線幅が広くなること，低価数ほど $K\beta'$ 線スペクトル強度が強くなることが見出された．以上より Mn 化合物は配位元素から金属への電荷移動が起こっていることが結論された．

【金属プラズモンの励起過程に関する基礎研究】

プラズモン励起過程として，(i) 内殻空孔と価電子の相互作用によりプラズモンを励起する「Intrinsic」と呼ばれる過程と，(ii) 固体中を伝播する電子の非弾性散乱による「Extrinsic」と呼ばれる 2 種類が知られている．また，(i) および (ii) が量子力学的に区別できないので両者の干渉が起こっているという考えもあった．しかし過程 (i) では高次ピークの線幅は広がらないのに対して過程 (ii) では高次ピークの線幅は広がるので，(i) と (ii) は区別可能であり干渉は起こらないはずである．本研究では高次ピークの形状の違いからスペクトルのモデルを計算し，既存の実験データと比較することで Intrinsic/Extrinsic の 2 種類のプラズモン励起過程について寄与の割合の解析を行った．その結果，Intrinsic/Extrinsic 過程の励起割合を見積もることができ，干渉は起こらないこと，入射電子エネルギーと Intrinsic な過程の励起割合に相関があることが結論された．

教　授　河合　　潤
助　教　山本　　孝
技術専門職員　林　　豊秀

工学研究科　材料工学専攻

材料プロセス工学講座
マイクロ材料学分野

窒化ガリウム用導電性窒化物バッファ層の開発

窒化ガリウム（GaN）半導体は，青色発光素子（LED）などに広く応用されている．しかし，安価なGaN基板が存在しないため，格子ミスフィットの大きいサファイアが基板として用いられている．その格子ミスフィット低減には，GaNとサファイア基板との間にバッファ（緩衝）層を挿入することが不可欠であり，現在最も信頼性の高いバッファ層は窒化アルミニウム（AlN）である．しかし，AlNおよびサファイア基板は絶縁体であるため，GaN青色LEDは複雑なデバイス構造を取らざるを得ない．デバイス構造を単純にし，発光効率を向上させるためには，導電性のバッファ層および基板の上にGaNを作製することがベストである．当研究室は導電性バッファ層の候補として窒化チタン（TiN）薄膜に着目し，実デバイスに適用可能なGaN薄膜の作製を目的として，TiNバッファ層の成膜プロセス最適化を行っている．

銅配線合金化による極薄拡散バリア材の自己形成

Si-ULSIデバイスの高性能・高集積化に伴い，Cu配線材の配線幅は100 nm以下に微細化している．しかし，100 nm以下の配線幅では，粒界散乱と，バリア層によるCu配線材の有効断面積の低下により，抵抗が著しく増加する．バリア層は，CuがSi基板中に拡散するのを防ぐ目的で，スパッタ法によりSi基板上に形成されている．スパッタ法による極薄バリア層を均一に成膜するのは困難であり，極薄バリア層形成の新規プロセス開発が望まれている．本研究では，過飽和Cu合金薄膜と薄膜の表皮効果を用いて極薄拡散バリア層を自己形成させるプロセスの開発を目指した．過飽和Cu合金薄膜を高温で熱処理することにより，合金薄膜中の固溶元素が薄膜表面および薄膜/基板界面に偏析し，合金中の固溶元素濃度は減少する．Cuに固溶させる元素は，低固溶・相分離型・低融点化元素であり，かつ従来のバリア材の研究から耐熱性に優れた元素が望まれる．我々は，Cu(Ti)合金薄膜を選択し，実際にTi-richな層（～10 nm厚）が薄膜表面および薄膜/基板界面に形成し，Cu(Ti)合金薄膜中のTi濃度を減少させ，合金薄膜の抵抗率を4 mW-cm以下にできることを実証した．本年度は，同プロセスをデバイスで使用される絶縁体膜SiO_2, SiN, SiCO, SiOC（低誘電率膜）などへ応用可能か検討した．その結果，Cu(Ti)合金膜は全ての絶縁膜と反応し，界面にTiリッチ層を形成していた．Tiリッチ層は，絶縁体膜構成元素によりTi酸化物，TiN，TiCなど異なる相を含んでいた．それら化合物に加えてTiシリサイドが共通に含まれていた．界面層の形成速度は絶縁体膜により異なり，特に“C”を含む場合には他と比較して顕著に遅いことが明らかとなった．また，“C”を含む場合にはプラズマダメージが他より顕著になり界面層の形成速度を更に遅くしていた．以上の事に注意して，このプロセスを実デバイスでの極薄バリア層自己形成に応用できると考える．

スパッタ法を用いた透明導電性膜の開発

我々が享受している高度情報社会では，携帯や液晶などの電子デバイスが必須である．その電子デバイスにはITO透明導電性膜などが必要不可欠である．しかしながら，ITOのInは枯渇が懸念される希少元素であり，ITO代替の新規透明導電性膜の開発が求められている．当研究室では，その一候補としてNbをドープしたTiO_2に着目し，スパッタ法にて透明導電性膜が得られるか検討した．

焼結体TiO_2ターゲットを用いてAl_2O_3, $SrTiO_3$基板上にNbドープ（約6at% Nb）TiO_2膜（膜厚：100 nm）を作製．Al_2O_3基板上ではルチル型TiO_2膜が，$SrTiO_3$基板上では基板温度300℃以上でアナターゼ型TiO_2膜がエピタキシャル成長．Al_2O_3基板上のルチル型TiO_2膜では約$10^{-1}\,\Omega$cmと高抵抗であったが，$SrTiO_3$基板上のアナターゼ型TiO_2膜では約$10^{-4}\,\Omega$cmと低抵抗膜が得られた．2つの膜でキャリア濃度に大きな差異はなく，移動度の差異により抵抗が異なることを明らかにした．抵抗の低減にはアナターゼ型TiO_2膜のエピタキシャル成長が重要であり，基板の選択が重要であることを明らかにした．

また，紫外光域でも透明性を有する透明導電性膜として，SnをドープしたGa_2O_3膜に着目し，透過率と抵抗率を評価した．紫外域から可視域への高範囲で高い透過率（90%以上：波長380 nm～）を実現したが，抵抗率は非晶質膜と結晶質膜でそれぞれ$2.3\times10^{3}\,\Omega$cmと$10^{5}\,\Omega$cmとNbをドープしたTiO_2と比較すると抵抗の低減は実現できなかった．

准教授　伊藤　和博
助　教　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

TiO_{2-x} 不定比化合物における shear 構造の第一原理計算

Ti-O 系には一般式 Ti_nO_{2n-1} ($n \geqq 4$) で表される一連の不定比化合物が存在する．これらはルチル構造を基本とした長周期構造を有し，shear 構造と呼ばれる．本研究では，shear 構造の熱力学的安定性とその原子配置を調べるため，第一原理計算とクラスター展開法を用いた系統的な評価を行った．その結果，最も安定な shear 面は n=4～10 の組成範囲で(121)，n=14～40 の組成範囲では（132）であることが予測され，n=4～10で（121）shear 面が，n=14～36 で（132）shear 面が確認されているという実験結果と一致した．また，(121) shear 構造の面間隔が不規則化した場合，形成エネルギーの変化は小さいことがわかった．これは，面間隔が不規則な shear 構造が基底状態である（121）shear 構造と共存することを示唆する結果である．

固体高分子形燃料電池における Pt 系合金電極への分子吸着の第一原理計算

固体高分子形燃料電池では，燃料極の Pt 表面に CO 分子が吸着することで H_2 分子の供給が阻害され，発電性能が劣化する CO 被毒が問題となっている．本研究では，表面近傍での弾性ひずみ場の形成，および合金元素の置換固溶が CO，H_2 分子双方の吸着に与える影響を第一原理計算により評価した．その結果，固体高分子形燃料電池の作動温度域である 370 K の時は CO 分子の濃度が 1 ppm と非常に低い状態でも，H 原子の被覆率が 0.04％となり，H 原子の Pt 表面への吸着が抑制されることがわかった．一方，6％圧縮した Pt 表面における CO 濃度が 10 ppm の時の H 原子の被覆率は，350 K においては 40％，420 K においては 90％以上となり，CO 被毒の抑制の可能性が示唆された．Ru または Mo を添加した合金表面においては，CO 分子と H_2 分子の吸着エネルギーの差が減少するサイトが表面に生成するという結果が得られた．

室温強磁性を示す Mn 添加 Ga_2O_3 薄膜の合成と評価

非磁性半導体への 3*d* 遷移金属元素等の添加により磁性を付与させた希薄磁性半導体は，スピントロニクスへの応用の観点から注目を集めている．本研究では，新規な希薄磁性半導体の系として Mn 添加 Ga_2O_3 をとりあげ，薄膜の合成からその構造・磁気特性評価と Mn の局所状態解析を行い，磁性と Mn の電子状態の関係を調べた．XRD および TEM による電子回折から，Mn 添加 Ga_2O_3 薄膜は，無添加の Ga_2O_3 で通常見られる単斜晶 β 相ではなく，スピネル構造を有する γ 相であることがわかった．また Mn-$L_{2,3}$ 端 XANES より，Mn 添加 Ga_2O_3 薄膜の Mn は主に＋2 価の状態で母相の 4 配位サイトに存在していることが示唆された．Mn 添加 Ga_2O_3 薄膜の *M-H* 曲線は室温においてもはっきりとしたヒステリシスを示し，強磁性体であることが確認された．

IV 価セリウムリン酸塩の合成と電気伝導性評価

II価カチオンを添加した III 価希土類オルトリン酸塩（$LnPO_4$）はプロトン伝導型の燃料電池における電解質材料として期待されている．また，$LnPO_4$ よりもカチオンに対するリンの比 P/Ln が高く，高縮合のポリリン酸塩 $Ln(PO_3)_3$ は，$LnPO_4$ よりも高いプロトン伝導性を有することが報告されており，リン比 P/Ln 増によるプロトン伝導性の向上の傾向が指摘されている．本研究では，III 価カチオンを添加した $Ce(PO_3)_4$ と CeP_2O_7 の合成，焼結と導電率測定を行ない，IV 価セリウムリン酸塩の電気特性を評価した．合成方法として水熱ホットプレス法を用いることで，これまでに報告されていない $Ce(PO_3)_4$，CeP_2O_7 の焼結体の作製に成功した．また，電気特性の解析の結果，$Ce(PO_3)_4$，CeP_2O_7 共にプロトン伝導性を示すことがわかった．

コバルト複合酸化物における $L_{2,3}$ 端 XANES の理論計算

3*d* 遷移金属元素（TM）の $L_{2,3}$ 端 X 線吸収端近傍微細構造（XANES）は，遷移金属イオンの価数，スピン状態，局所配位環境などについての情報を与える．しかし，従来その解釈は，指紋照合法や多数の経験的パラメータを用いた計算方法に頼っていた．このような中，当研究室では 4 成分相対論波動関数を用いた配置間相互作用法（CI 法）を開発し、第一原理に基づいた TM-$L_{2,3}$ 端 XANES の解析を進めてきた．本研究では，この手法における電子相関の取り扱いをより厳密に行うことで計算精度を高め，コバルト複合酸化物の $L_{2,3}$ 端 XANES の解析に適用した．一方で計算速度の向上及び大規模計算を目的として 2 成分相対論の CI 計算プログラムを新たに開発し，3*d* 遷移金属酸化物の $L_{2,3}$ 端 XANES に応用した．

教　授　田中　功
准教授　松永　克志
助　教　大場　史康

工学研究科　材料工学専攻

材料物性学講座
結晶物性工学分野

$Ru_{1-x}Re_xSi_y$ チムニーラダー相の結晶構造と熱電特性

高温用熱電変換材料として有望視されている Ru_2Si_3 には低温相と高温相が存在するが，そのうち高温相はチムニーラダー構造という特異な結晶構造を有するため，より優れた熱電特性を示すことが期待されている．本研究では，Re 置換による チムニーラダー相である Ru_2Si_3 高温相の低温安定化を試み，得られた $Ru_{1-x}Re_xSi_y$ チムニーラダー相の結晶構造と熱電特性について調べた．まず Ru の一部を Re 置換することにより $Ru_{1-x}Re_xSi_y$ チムニーラダー相が広い組成範囲（$0.14 \leqq x \leqq 0.76$）で低温安定化されることを確認した．詳細な結晶構造解析から求めたチムニーラダー相の組成は $Ru_{1-x}Re_xSi_{1.54+0.18x}$ と表され，一金属原子あたりの価電子数（VEC）がほぼ14となるように変化するが，詳細には Re 置換量に依存して VEC=14 を満たす組成から系統的にずれる傾向を示すことがわかった．また $Ru_{1-x}Re_xSi_y$ チムニーラダー相の熱電特性は，低 Re 組成では n 型，高 Re 組成では p 型の特性を示し，その傾向は VEC=14 組成からのずれの向き，大きさから予測されるキャリアの種類と濃度の変化傾向と対応することを明らかにした．

$L1_0$ 型 CoPt 単結晶の塑性変形

正方晶系 $L1_0$ 型構造を有する金属間化合物の塑性変形挙動は TiAl 合金を除いてほとんど明らかにされておらず，また単結晶を用いた詳細な研究は TiAl 合金以外にはまったく報告されていない．これは TiAl 以外のほとんどの $L1_0$ 型金属間化合物では高温相として FCC 不規則相が存在するため，3種類の方位の異なるバリアントからなるドメイン構造が形成されてしまい，単一バリアントからなる単結晶を得ることが困難であったためである．そこで本研究では $L1_0$ 型金属間化合物 CoPt について，圧縮応力場あるいは磁場を用いた単一バリアント単結晶の作製を試み，得られた単結晶を用いて CoPt の変形挙動について調べた．その結果，圧縮応力場および磁場のいずれを用いた場合にも単一ドメインからなる単結晶を得ることに成功した．得られた単結晶を用いて，さまざまな荷重軸方位について圧縮試験を行った結果，CoPt においても降伏応力が温度と共に上昇する異常強化現象が観察された．また CoPt では TiAl とは異なり <101> 超格子転位に対する CRSS が 1/2 <110> 普通転位に対するものより大きく，普通転位の方が活動しやすいことを明らかにした．

Ti_5Si_3 単結晶の塑性変形

ガスタービンエンジンやジェットエンジンの高効率化のためには，現在使用されている Ni 基合金よりも軽量で高温強度特性に優れた高温構造材料の開発が必要である．その候補として，M_5Si_3 の組成をもつ遷移金属シリサイドが注目されている．なかでも六方晶系 $D8_8$ 構造を有する Ti_5Si_3 は高融点（2130℃），低密度（4.32g/cm³）であることから有力な候補である．しかしその力学特性に関しては，あまり報告されておらず，ある限られた条件での $\{10\bar{1}2\}<10\bar{1}\bar{1}>$ 変形双晶の活動が報告されているのみである．そこでさまざまな荷重軸方位を有する Ti_5Si_3 単結晶を用いて 1200-1500℃ の温度範囲で圧縮試験を行い，その塑性変形挙動を調べた．光学顕微鏡，走査電子顕微鏡，透過電子顕微鏡による詳細な組織観察の結果，1300℃ 以上の温度域において，これまで報告されていなかった3種類の変形モード，$(1\bar{1}00)[0001]$ すべり，$(\bar{2}112)1/3[\bar{2}11\bar{3}]$ すべり，$(\bar{2}118)[\bar{8}44\bar{3}]$ 変形双晶（双晶要素 K_1：$(\bar{2}118)$，η_1：$[\bar{8}44\bar{3}]$，K_2：$(\bar{2}110)$，η_2：[0001]，せん断量 s=0.35）の活動を明らかにした．

気相凝集法による磁性ナノ粒子の作製

$L1_0$-FePt および $SmCo_5$ は非常に大きな磁気異方性を有するため，次世代の高密度磁気記録媒体材料として期待されており，これらのナノ粒子を用いたパターン媒体が研究されている．FePt は $L1_0$ 相のナノ粒子を直接作製することができず，ナノ粒子作製後の熱処理が必要なため，粒子の粗大化等の問題がある．また $SmCo_5$ はナノ粒子作製の主流である化学的方法では作製が難しく，ナノ粒子作製の報告はほとんどない．そこでこれらの材料を用いたパターン媒体作製法の確立を目的として，基板堆積前に粒子の熱処理ができる装置を備えた気相凝集装置を用いて，$L1_0$-FePt および $SmCo_5$ ナノ粒子作製を行った．その結果，FePt，$SmCo_5$ ともにナノ粒子作製に成功した．ナノ粒子の成長過程は一次粒子の形成と一次粒子の凝集による二次粒子の形成に分けられるが，一次粒子はスパッタ電力，Ar 流量，Ar 圧力などの作製条件の影響を受け，粒径，粒径分布，粒子密度などが大きく変化し，二次粒子の形態は，一次粒子の密度にのみ依存することが分かった．これらの作製条件を制御することにより，粒径および粒径分布幅の低減が可能であることを見出した．

教　授　乾　　晴行
准教授　田中　克志
助　教　岸田　恭輔

工学研究科　材料工学専攻

材料物性学講座 構造物性学分野

平成16年度から3年間にわたり実施した基盤研究 (A)「X 線非弾性散乱による超臨界アルカリ金属流体の原子分子ダイナミクスの解明」がこの3月で終了した．現在，今年度新たに採択された基盤研究 (A)「低密度アルカリ金属流体のコンプトン散乱測定－電子ガス不安定挙動の解明－」を遂行中である．実験は，第三世代大型放射光施設 SPring-8（兵庫県，西播磨）のビームラインにおいて実施している．このように低密度アルカリ金属流体の研究が新たな展開を見せており，それらの研究の現状を紹介する．

アルカリ金属はいわゆる電子ガスモデル（一様な正電荷を背景としてクーロン相互作用する電子集団）が成り立つ典型的な金属元素である．しかしながら低密度化に伴い相互作用の影響が支配的となり，もはや互いに自由という描像は失われる．多体電子理論は，相互作用がもたらす重要な物性の一つとして，低密度電子ガスにおける負の圧縮率を予測している．モデルは現実の物質における全圧縮率へのイオンの寄与を考慮していないが，物質系全体が相転移に至らずとも，何らかの形で電子系の不安定化傾向が顕在化する可能性がある．事実，総和則により，負の圧縮率は，電子ガスの誘電関数が負になることに相当し，その中では，同符合電荷間の相互作用は引力的となると予想される．電子系の負の誘電関数は，フォノンの周波数分散に異常を引き起こし，高温超伝導体における超伝導転移温度を大幅に引き上げる要因となり得ることが指摘されているなど[1]，その重要性が指摘されているが，その実在性も含め，未だ十分に解明されていない．

固体アルカリ金属の密度を大幅に低下させることは困難であるが，流体アルカリ金属では可能である．特にその超臨界状態を利用することにより，物質の密度を融点近くの液相から，希薄な気相領域まで連続的にかつ大幅に変化させることができ，低密度電子ガスの物理を現実のものとして取り扱うことを可能にする．

これまで，ルビジウムを対象とした X 線回折測定の実験結果よれば，流体密度の低密度化に伴い，平均のイオン間距離は膨張しているにもかかわらず，逆に最近接のイオン間距離は縮小するという系の不均質ミクロ構造を示唆する結果が得られている．このような構造変化が現れる密度領域は，電子ガス系で負の圧縮率への転移点として予測されている領域と極めてよく一致した．このことは，電子ガスの静的誘電関数が負となることにより，正電荷を帯びたイオン間に引力が作用し始めたことを強く示唆する．

アルカリ金属流体の局所構造変化（セシウム，カリウム）

ルビジウム以外の他のアルカリ金属についても同様な挙動が観測できるか否かは，極めて重要である．現在，カリウムについては実験技術開発途上であるが，セシウムについて測定を行うことに成功した．融点付近のセシウムの密度は，およそ 1.82 g cm^{-3} であるが，体積膨張による密度の低下に伴い，～1.3 g cm^{-3} から最近接原子間距離が低下し始め，かつ配位数の低下傾向が緩慢になるというルビジウムと定性的に同様の挙動を示した．また，X 線小角散乱の結果によれば，同様の密度領域から小角散乱強度の増大が観測された．この～1.3 g cm^{-3} の密度は，電子ガスモデルにおいて負の圧縮率の予測領域に対応する．このことは，観測された特異なミクロ構造変化が電子ガス系の不安定性起源であることを強く示すと同時に，負の誘電関数を有する電子ガスが実在することをより明確に示すものである．

X 線非弾性散乱によるアルカリ金属流体の動的構造

金属流体では，電子系の誘電応答の変化は遮蔽効果を通じてイオン系のダイナミクスに強く影響を与える．従って，電子ガス系の特徴を具備するアルカリ金属流体に対し，その低密度化に伴うイオンダイナミクス（動的構造）を明らかにすることは，負の誘電関数についての知見を得る上で有意義である．そこで，SPring-8 において流体ルビジウムの X 線非弾性散乱測定を行った．その結果によれば，低密度領域において，X 線非弾性散乱により得られた励起エネルギー vs. 散乱ベクトルの分散関係から見積もった音速，いわゆる動的音速と，これまで超音波測定により求められている断熱音速との間に，差が生じ始めることが明らかとなった．差が生じ始める密度は電子ガスにおける負の誘電関数の出現領域と定性的に一致している．このことは，スケールの違いによる動的応答の差が生じ始めたことを示し，流体ルビジウム中にミクロな構造不均質性が出現していることを強く支持する結果であり，静的構造変化の結果とも符合する．

アルカリ金属流体のコンプトン散乱測定－低密度電子ガスの電子状態の直接観測に向けて－

イオン系が電子系のプローブとなることは述べたが，直接に電子状態を観測することは有意義である．電子の運動量分布を与えるコンプトン散乱は，固体のフェルミ面を観測する有用な観測手段として古くから知られている．放射光を利用したコンプトン散乱実験の精度は，従来に比べて格段に向上し，強相関物質などの電子状態の研究に大きな威力を発揮している．そこで，アルカリ金属流体のコンプトン散乱測定を行うことにより，電子ガス系に固有の圧縮率が負となる領域で，コンプトンプロファイルが自由電子ガス系のものからどのようにずれを生ずるかを調べることは興味深い．現在，専用の高圧容器の設計に着手したところである．

[1] M. Tachiki, M. Machida and T. Egami, Phys. Rev. B, 67 (2003) 174506.

教　授　田村剛三郎
助　教　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

YBCO 高温超伝導薄膜の微細組織と臨界電流密度

YBCO 高温超伝導薄膜は 4～5° 以上の粒界において臨界電流密度 J_c が急速に低下することが知られており，高度に配向した線材の開発が求められている．そこで本研究では YBCO 薄膜を配向させる方法として知られている RABiTs 法および IBAD 法における配向機構や配向性が超伝導特性に与える影響について XRD，EBSD を用いて調べた．RABiTs 法では基板である Ni-Cr の個々の結晶粒上において，中間層である CeO_2 薄膜及び YSZ 薄膜と超伝導層である YBCO 薄膜がエピタキシャル成長することが分かった．一方 IBAD 法では，IBAD-GZO/Hastelloy 上の CeO_2 薄膜において CeO_2 薄膜が自己配向していき，膜厚増加に伴い CeO_2 薄膜の配向度が高まる様子が観察された．

また IBAD 法により配向性を制御した YBCO 薄膜において，配向組織と J_c の磁場依存性を評価した結果，面内配向度 $\Delta\phi$=24.1° の試料では 77 K の低磁場領域において Non-Ohmic Linear Linear Differential (NOLD) behavior が一部の磁場領域で観察され，$\Delta\phi$=8.1° の試料では一部の温度磁場領域で粒界による Jc 低下が観察されたが，NOLD behavior は観察されなかった．これは前者の薄膜では 5° 以上の粒界が線材幅方向に繋がっているのに対し，後者の薄膜では隣接する結晶粒間の偏移角の大きな粒界を避けて電流が流れたためと考えられる．また，$\Delta\phi$=5.8° の試料では 77 K において単結晶基板上の YBCO 薄膜と比較して顕著な J_c 低下を示さず，粒界の影響が抑制されていることが分かった．

BZO ドープ YBCO 超伝導薄膜の超伝導特性

第二種超伝導体の臨界電流密度 J_c は量子化磁束とピンニングセンターの相互作用により決定されるため，有効なピンニングセンターを人工的に導入することで J_c 特性を向上させる研究が進められている．本研究では人工ピンニングセンターとして YBCO と反応性の低い $BaZrO_3$(BZO) に注目し，BZO が J_c 特性に与える影響を調べた．その結果，BZO は YBCO 薄膜の c 軸にそってロッド状に成長し，有効なピンニングセンターとして振る舞い，ドープされていない時よりも J_c 特性が大きく向上することが確認された．しかし，その一方で BZO のドープ量を増やすと，YBCO 薄膜の配向性の低下が観察されたため，最適なドープ量が存在することが分かった．

PLD 法による $Ca_3Co_4O_9$ 薄膜の作製と熱電性能の測定

$Ca_3Co_4O_9$ はすでに高温域での高い熱電性能を示すことが知られている p 型熱電変換材料であるが，その熱電性能の研究はバルクや単結晶のものが中心である．今回の研究では大量生産や複雑な形状の作製に向く薄膜を作製し，その熱電性能を評価した．サファイア (0001) 面を基板として用い，PLD を用いて薄膜を $Ca_3Co_4O_9$ 作製した．作製した $Ca_3Co_4O_9$ 薄膜は基板からエピタキシャル成長しており，作製条件を最適化することにより強度に配向した $Ca_3Co_4O_9$ 薄膜が得られた．10 K～300 K における熱電性能を測定したところ，単結晶に近い熱電性能を持つ事が分かった．

Mn 金属間化合物が分散した Al 合金の動的再結晶挙動

数十 nm の微細整合粒子を高密度に分散させた Al 合金に熱間押出し加工を施すと，整合粒子が粒界をピンニングすることにより粒界の移動度を著しく下げるため，長距離の粒界移動を伴う不連続動的再結晶が生じず，核生成を伴わない連続動的再結晶が生じることが分かっている．今回の研究では数十 nm の粒子よりもピンニング力が小さいと予想される 1 Mm 程度の Mn 金属間化合物を分散させた Al 合金に熱間押出し加工を施した際にどの様な動的再結晶挙動を示すかを高分解能 EBSD を用いて調べた．通常であれば 1 Mm 程度の粒子が分散している合金を加工すると，分散粒子周囲に大きな方位差を持つ Deformation Zone が形成され，そこを核とした不連続動的再結晶が生じる．しかしながら，今回の合金では不連続動的再結晶は観察されず，分散粒子を同士をつなぐように亜粒界が形成され，その粒界傾角が加工ともに連続的に増加するという連続動的再結晶現象が観察された．1 Mm 程度の分散粒子であっても，その分散密度が高い場合には周囲に Deformation Zone が形成されない場合があることが明らかとなった．

三元金属間化合物を用いた耐熱アルミニウム合金の開発

自動車エンジン用部品の軽量化のために 250℃ で高強度を示すアルミニウム合金の開発が求められている．耐熱アルミニウム合金の開発は母相中に熱的安定性の高い二元金属間化合物を分散させることによって行われることが多い．しかしながら，多元金属間化合物の中には二元金属間化合物よりも優れた性質をもつものが存在すると考えられ，これを分散させることにより優れた耐熱アルミニウム合金の開発が可能であると考えられる．今回の研究では Al-Mn-Cu, Al-Mn-Ni 三元金属間化合物を粉末冶金法を用いて母相中に微細分散させることにより耐熱アルミニウム合金の開発を試みた．その結果，数百 nm 程度の金属間化合物を分散させることが可能となり，250℃ において 275 MPa の引張り強度を示す Al-Mn-Ni 合金を開発することが出来た．また，この合金は自動車エンジン部品として重要な高い熱伝導性と鍛造性を併せ持つ事が分かった．

准教授　松本　　要
助　教　足立　大樹

工学研究科　材料工学専攻

材料機能学講座 材質制御学分野

本研究室では，鉄鋼・チタン合金等の構造材料の組織制御に関する基礎研究として相変態・析出・再結晶の組織学的研究を行うとともに，これらと密接に関係する形状記憶や超弾性効果，超塑性などの機構解明や機械的性質の向上についても研究している．2006 年度は以下のテーマについて研究した．

1. 鉄合金のマルテンサイトの形態および内部組織に関する研究

鉄系 α' マルテンサイト（bcc または bct 構造）は生成温度域が高温のものから，ラス，バタフライ，レンズ，薄板状と様々な形態のマルテンサイトが存在する．マルテンサイトの形態は機械的性質と関係があるため，マルテンサイトの形態を支配する因子を明らかにすることは重要である．本研究では形態を支配する因子として Ms 点，正方晶性（c/a），マルテンサイトの変態時体積変化（ΔV/V）に注目し，これらの因子がマルテンサイトの形態に及ぼす影響を系統的に調べた．Ms 点（77 K ～825 ℃），c/a（1～1.08），ΔV/V（－0.4～3.5％）を系統的に変化させるため，種々の Fe-Ni 合金および Fe-Ni-Co 合金に浸炭処理を施した．浸炭を施すことにより C 濃度勾配が生じるため，1 つの試料内でラス，バタフライ，レンズ，薄板状と 4 つの形態のマルテンサイトが生成する．C を含まない Fe-Ni 合金や Fe-Ni-Co 合金では 77 K の低温でも薄板状マルテンサイトは生成しないが，C 濃度が増加するにつれて薄板状マルテンサイトの生成温度域は上昇する．また Fe-Ni-Co-C 合金では Fe-Ni-C 合金と比較して，レンズマルテンサイトや薄板状マルテンサイトの生成温度域が 100 K 程度上昇しており，薄板状マルテンサイトがこのような高温で生成したのは本研究が初めてである.このことより薄板状マルテンサイトの生成には高い c/a が必要であることが明らかになった．また ΔV/V が減少するにつれて，レンズマルテンサイトや薄板状マルテンサイトの生成温度域が上昇することが明らかになった．TEM により種々の Ms 点，c/a，ΔV/V を持つレンズマルテンサイトや薄板状マルテンサイトの内部微視組織を観察した.その結果レンズマルテンサイトのミドリブや薄板状マルテンサイトの双晶幅は，Ms 点によらずほぼ一定であるが，c/a（1～1.03）の増加および ΔV/V（0.1～3.0％）の減少によつて双晶幅（2.0～8.5 nm）は狭くなることが明らかになった．このように c/a や ΔV/V によりマルテンサイトの形態や内部微視組織が変化したのは，c/a の増加や ΔV/V 減少により双晶境界エネルギーが低下するためと考えられる．この双晶境界エネルギーの低下に起因して双晶応力が低下することで，内部微視組織に双晶を多く含むレンズマルテンサイトや薄板状マルテンサイトの生成温度域が上昇するものと考えられる．

2. 鉄鋼のプラズマ窒化組織に関する研究

ステンレス鋼（Fe-高 Cr 合金，Fe-高 Cr-高 Ni 合金）は耐食性に優れ，工業的に広く用いられているが，表面硬度が低いため，耐磨耗性や耐疲労性が問題になることも多い．窒化は，これらの問題を解決する有効な表面硬化処理の一つである．当研究室では以前，フェライト（α）系 Fe-高 Cr 合金を 843 K で窒化すると，ラメラ状 CrN を含む新たな α 粒が生成することを報告し，窒化物が析出する際の歪に誘起されて α 粒の再結晶が起こり，新たな α 粒が生成するという析出誘起再結晶モデルを提唱している．一方，α 系 Fe-高 Cr 合金の窒化挙動におよぼす初期組織の影響やマルテンサイト系およびオーステナイト（γ）系ステンレス鋼の窒化挙動に関する理解は十分ではない．本研究では，種々の Fe-高 Cr 合金をプラズマ窒化し，窒化による母相方位の変化や窒化物の析出挙動に注目して窒化挙動を調べた．

初めに，初期組織が窒化挙動におよぼす影響を明らかにする目的で，ラスマルテンサイト (M) 組織や冷間加工 α (CR-α) 組織を有する Fe-10Cr(-0.2C) 合金および Fe-18Cr 合金を 843 K で窒化した．その結果，Fe-10Cr(M) 材および Fe-18Cr(CR-α) 材の窒化では，窒化領域にラメラ状 CrN を含む新たな α 粒が生成し，元の α 粒と Σ 9 の対応格子関係（$<110>_\alpha$ 周り 39°回転）を持つことが分かった．これらの新たな α 粒の成長はそれぞれラスマルテンサイト組織中の大角粒界および加工によって導入された方位差が 5°程度以上の境界にて停止し，これらの境界から別の α 粒が新たに生成することが明らかになった．一方，Fe-10Cr-0.2C(M) 材の窒化では，新たな α 粒の生成はなく，一部の CrN が Cr 炭化物から遷移して生成するため，元の α 粒内に粗大な塊状および微細な板状の CrN が分散して析出することがわかった．

次に，オーステナイト(γ)の安定性の異なる Fe-20Cr-10Ni 合金と Fe-20Cr-35Ni 合金の 2 つの合金を用いて γ 系ステンレス鋼の窒化組織を調べた．その結果いずれの γ 系ステンレス合金においても，特定の窒化条件で，ラメラ状 CrN を含む新たな γ 粒が生成することが明らかになった．更に，Fe-20Cr-10Ni 合金では窒化領域でのみ α 粒の生成も見られた．母相および窒化物の詳細な組織解析により，これらの γ 系ステンレス鋼の窒化においても α 系 Fe-高 Cr 合金の窒化と同様に，Cr 窒化物による γ の析出誘起再結晶によって新たな γ 粒が生成すると結論付けた．

教　授　牧　正志

工学研究科　材料工学専攻

材料機能学講座
機能構築学分野

シリコン直接結合型有機単分子膜の化学的耐久性

有機分子と半導体との融合による新しい電子機能の創成を目指し，水素終端化シリコン表面での有機分子の化学反応を利用した，自己集積化単分子膜（Self-Assembled Monolayer, SAM）の形成および有機分子－半導体接合界面物性に関する研究を行なっている．有機分子－シリコン複合体の電子材料としての応用を考える上では，シリコン微細加工プロセスとの適合性があることが望ましく，シリコン上に被覆したSAMの化学的耐久性に関する知見が重要となる．そこで，シリコンとの接合様式の異なる2種類の単分子膜について，その化学耐久性を調べた．アルケン分子と水素終端化シリコン表面が反応してSi-C結合を形成する反応（反応式1）により，1-hexadecene から hexadecyl-SAM（HD-SAM）を，アルコール分子とSi-O-C 結合を形成する反応（反応式2）により1-hexadecanol から，hexadecyloxy-SAM（HDO-SAM）を，それぞれ熱励起反応によって形成しシリコン基板表面に接合した．

$$\equiv Si\text{-}H + H_2C{=}CH\text{-}R \rightarrow \equiv SiCH_2\text{-}CH_2R + H2 \quad (1)$$

$$\equiv Si\text{-}H + HO\text{-}R \rightarrow \equiv SiOR + H_2 \quad (2)$$

図1は，300 mM Na_2CO_3（溶媒／メタノール：超純水＝2:5，pH=11.8）溶液に，各試料を浸漬し，その表面状態を水滴接触角測定と AFM 形状観察によって評価した結果を示す．HD-SAM では，接触角の変化はほとんど見られず，AFM 形状像を見ても，ステップ&テラス構造が維持されている．これに対し，HDO-SAM では，単分子膜が次第に剥離していくことが，接触角および形状像からわかる．SAM が剥離した領域では，基板のシリコンがエッチングされるため，その深さが，膜厚より深くなっている．Si-C 結合と比べて，Si-O-C 結合がアルカリ溶液に弱いことがわかった．逆に，HD-SAM は，基板 Si のエッチングをブロックできるほど，密に詰まっていると言える．この HD-SAM は，フッ酸に対しても優れた耐久性を示した．

高分子材料表面の光化学活性化接合

透明エンジニアリングプラスチックであるシクロオレフィンポリマー（COP）は，光学部品や生化学分析用マイクロ流路チップの構成材料として使われている．COP マイクロ流路デバイスを組み立てるためには，COP 部材同士の接合技術が重要である．通常は，熱融着するか接着剤によって接合する．マイクロ流路の微細化・精度が高まるにつれ，加熱や余分な接着剤のはみ出しによる流路の変形が無視できなくなり，接着剤フリーの低温接合技術の開発が求められるようになった．

そこで，波長 172 nm の真空紫外光（Vacuum Ultra-Violet, VUV）を，酸素雰囲気下で COP 表面に照射する光表面活性化による接着効果増強の可能性について検討した．COP 表面に VUV 光を照射すると，酸素分子の VUV 励起により原子状酸素が発生し，それにより COP 表面が酸化される．その結果，COP 表面は親水化し，その水滴接触角はほぼ 0° となる．この親水化 COP 面同士を密着させ，90℃～100℃ に加熱すると，接着剤を全く使わなくても接合できることがわかった．用いた COP のガラス転移点は約 140℃ であり，熱変形はほとんど無いと考えて良い．X 線光電子分光（X-ray photoelectron spectroscopy, XPS）により，VUV 照射表面の化学分析を行なったところ，表面に大量の酸素原子が，-OH, -COOH 等の極性官能基として導入されていることがわかった．COP の光化学活性化接着の機構についてはまだ解明が不十分であるが，この親水性官能基同士の化学反応がなんらかの役割を果たしているものと考えている．

教　授　杉村　博之
准教授　邑瀬　邦明
助　教　一井　　崇

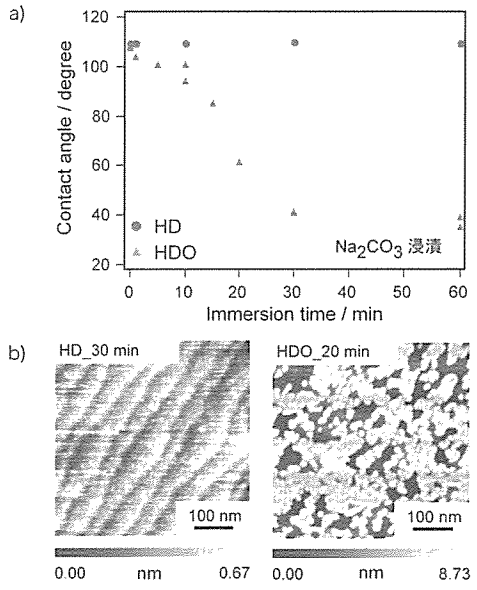


図1　HD-SAM 被覆 Si および HDO-SAM 被覆 Si の化学耐久性．a) 各浸漬時間後の水滴接触角　b) アルカリエッチング処理後の AFM 像

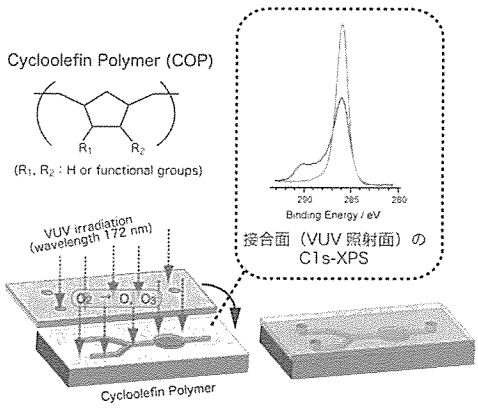


図2　COP の光活性化接着

エネルギー科学研究科　エネルギー社会・環境科学専攻

社会エネルギー科学講座
エネルギー社会工学分野

昨年度、二名の博士課程の学生が博士学位を取得して卒業した。そこで、本稿ではこれら二名の研究について紹介することにする。

Kisor Kumar Sahu君の研究は球の不規則充填における自由空間と液相中のマイクロバブルの挙動について研究した。

前者については、金属ガラスから砂の堆積まで無秩序充填構造は新素材の原子構造から自然物までさまざまなところでみられ、その構造を記述することは大変重要であるが、一般に認められた方法は存在していない。多くの研究では物体の位置に注目して構造を解析しようと試みられていたが、本研究では自由空間に対象を絞り、同一サイズ球の無秩序充填構造における空隙について整理を行った。

後者については、超音波による過飽和溶液からの気泡の発生について炭酸飲料（ビール）を試料に用いて実験を行った。過飽和でない状態において、超音波振動を当て、減圧し過飽和状態にしたとき（缶を開けたたき）、気泡の発生によりほとんどの液体があふれ出る。そこで残った液体の量を測定することにより、気泡発生量を見積もった。その結果、超音波を止めてすぐに缶を開けたときは超音波にさらされている時間に関係なくほぼ一定の気泡発生量であること、缶を開けるまでにおいた時間とともにその値は減少し沈静化し、超音波にさらされている時間が長いほど早く沈静化することを明らかにしている。次に、一度超音波にさらして時間を置いた後、再び超音波にさらして缶をあけたところ、最初の超音波処理が二度目の超音波処理後の気泡発生量に影響を及ぼすことを明らかにした(図1参照)。また、その影響は数分から数十分という比較的長い時間まで影響を及ぼし、ある場合にはもう一度超音波振動を与えて開缶しても噴かないことを明らかにした。この結果について、核形成に必要な大きさよりも小さなマイクロバブル(エンブリオ)の存在を仮定し、説明を試みた。これらは液体の構造、とりわけ自由体積の分布と密接に関係していることを示唆している。

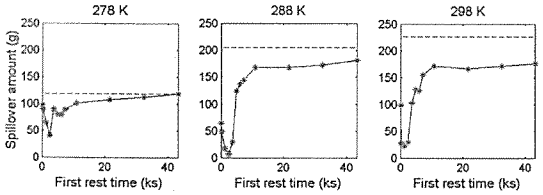


図1　90秒間超音波を缶ビールに与えた後、有る一定時間(First rest time)静置し、再び5秒間超音波を与え1秒後に開缶したときの噴出量。点線は前もって超音波を与えなかったときの値を示す。超音波を当てた後、十分後程度おいたビールは非常に安定であることが分かる。

関連論文
Sahu, Kisor K., Hazama Y. and Ishihara, K. N.: "Gushing in canned beer: The effect of ultrasonic vibration", J Colloid and Interface Science 302 (2006), pp.356-362.

早渕百合子さんの研究は、エネルギー・環境教育の実践に基づき、教育が環境行動に与える影響や波及効果について研究したものである。

本研究は、早渕さんが考案したエネルギー・環境教育の授業を高等学校、中学校において「総合的な学習の時間」に17校33クラスにおいて外部講師として実践、授業実施前後で行ったアンケート調査結果に基づいて、授業がいかに生徒の環境行動に影響を及ぼしたかを分析した。
主な成果の一つは、廃棄物関係の授業を行った後、省エネルギー行動が促進されるという授業内容に直接関連しない環境行動への波及が観察されたことである。また、環境やエネルギー問題への興味を持つようになることから、一度の授業の波及効果について半定量的に見積もった。

また、買い物時のレジ袋削減に関する行動はなかなか改善されない。そこでこの行動について詳細に分析を行い、従来から提唱されている社会心理モデルにより環境保全行動を実証的に説明できることを示した。表1に結果の一例を示すが、レジ袋削減には、レジ袋に代わる袋を準備し、持参し、レジで袋を断るという少なくとも三つの行動が行われなければならない。さらに、中高生を対象にし、レジ袋削減を含むエネルギー・環境教育を実践した結果、教育は個人規範に最も影響を与え、個人規範と主観的規範のみが行動意図に影響を与えることを示し、授業により大きな行動改善が見られなかった理由を明らかにした。

中学校の生徒を対象にレジ袋の環境負荷を具体的な数値で示すことを取り入れたエネルギー・環境教育の授業を行い、単なる情報を数値で提示するだけでなく実験などの体験を授業に組み込んだエネルギー・環境教育が効果的であることを明らかにした。

また、一般人の環境行動についても調査を行い、率先して行われている行動がエネルギー・環境問題解決にとって必ずしも最も有効な行動でないことを見出し、社会教育においても責任と効果に関わる情報を分かりやすく提供することが重要であることを指摘した。

これらの研究成果については科研費の補助を得てナカニシヤ出版から刊行される予定である。

表1　レジ袋が問題であることを知っているがもらってしまう理由

正当化戦略	内容	回答率
注意変更戦略	ごみ袋などに二次利用し有効に使うので、無駄にしていない	38%
低コスト戦略	買物袋を持ち歩くのが面倒である	32%
主観的合理性戦略	周囲の人がしていないので恥ずかしい	8%

教　授　石原　慶一
准教授　奥村　英之
助　教　山末　英嗣

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
プロセス熱化学分野

（ポリエチレン＋木材）混合物のガス化とチャーの燃焼速度

1. 緒言

高炉羽口から吹き込まれた有機系廃棄物は，GasとCharに熱分解し，Charは燃焼すると考えられる．しかし未燃Charが高炉内に蓄積すると通気性悪化につながるため，有機系廃棄物の有効利用にはチャーの発生量と燃焼速度の知見が必要である．本研究では，（ポリエチレン＋木材）混合物を高温に急速加熱してガス化し，Gas及びCharの生成割合や組成，結晶性を調べた．また生成したCharの燃焼速度を測定したので報告する．

2. 実験方法

2.1 混合物のガス化　木材を粉砕・乾燥後，可塑剤を含まないポリエチレン粉末と混合しペレット状に成形した．混合物中の木材割合を 0, 25, 50, 75, 100wt% と変化させた．試料は全量 6 g，高周波炉で一定温度 1673 K に保持した MgO るつぼ中へ投下した．生成ガスはガスバッグ中に回収し，ガスクロマトグラフィーによって H_2, CO, CO_2, CH_4 濃度を分析した．るつぼ内に残存した固体炭素を Char，その他の装置内に付着した炭素を Tar とした．また Char の XRD データより，Char 中のアモルファス炭素のモル分率 X_{am} を求めた．

2.2 チャーの燃焼速度　ガス化で得られた Char を，80％N_2 + 20％O_2 雰囲気中（流量 500 mL/min）で燃焼し，発生ガス中の CO, CO_2 濃度を測定した．一定温度で，時間に対して一定値となった CO, CO_2 濃度より，見かけの反応速度 ρ を次式で求めた．

$$\rho \equiv dm_C/dt \,/\, \{m^\circ - \int (dm_C/dt)dt\}$$

m°：初期試料重量（g），dm_C/dt：単位時間当たりの燃焼速度（g/sec）

3. 実験結果・考察

Figure 1 に Gas, Char, Tar の生成量と試料中の木材濃度の関係を示す．Tar の重量は，$W(Tar) = W(Sample) - W(Gas) - W(Char)$ より計算で求めた．木材の添加割合が増えるほど，Gas 量は増加，Char 量は減少した．また Gas，固体炭素（Char + Tar）の生成割合は熱力学平衡計算値と良く一致した．Figure 2 に生成ガス組成と木材濃度の関係を示す．木材が増えるほど，CO は増加，H_2 は減少し，熱力学平衡計算値と良く一致した．Figure 3 に温度 600 K での見かけの燃焼速度 ρ の常用対数と X_{am} の関係を示す．PCI 炭，グラファイトの燃焼速度も示した．X_{am} が増えるほど，見かけの燃焼速度は大きくなった．ポリエチレン Char の燃焼速度は PCI 炭や木材 Char に比べ小さいが，ポリエチレンに木材を加えると X_{am} が増加，燃焼速度も増加した．木材の添加量が 75％では PCI 炭とほとんど同じ燃焼速度となった．

教　授　岩瀬　正則
准教授　藤原　弘康
助　教　長谷川将克

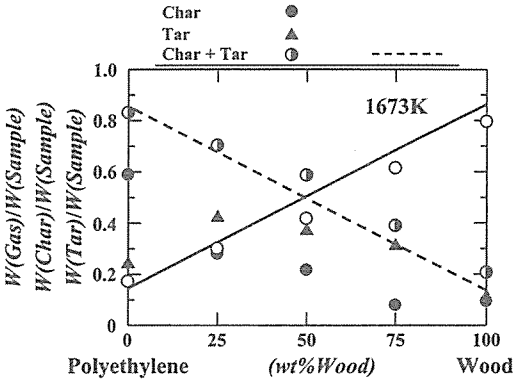


Fig. 1　Gas, Char, Tarの生成割合と混合物中の木材濃度との関係

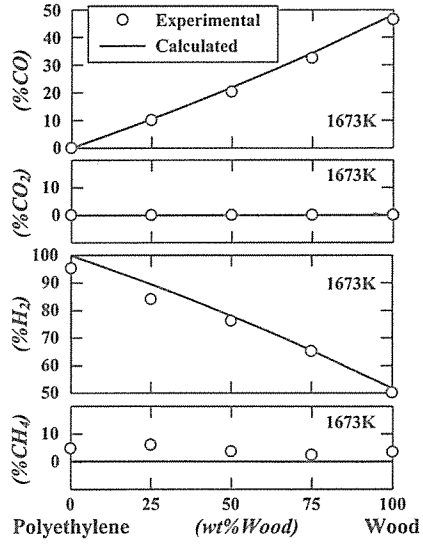


Fig. 2　生成ガス組成と混合物中の木材濃度との関係

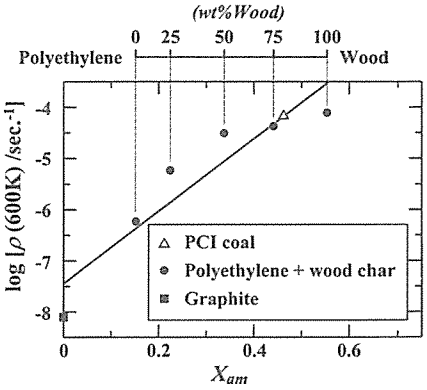


Fig. 3　見かけの燃焼速度とアモルファス炭素のモル分率との関係

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

平成18年3月に冨井洋一教授が停年退職し，平成18年8月より，現スタッフで研究活動を始めたばかりである．分野名の「高温」にはとらわれず，幅広く材料プロセッシングに関する研究を進めている．

研究速報として，最新の修士論文の概略とともに新たに取り組んでいるテーマを紹介する．

$(Zn_xCu_{2-x})V_2O_7$ の熱電特性と相変態（外島光太郎）

層状構造酸化物 $(Zn_xCu_{2-x})V_2O_7$ の相変態と熱電特性を調査した．従来報告されていた高温相 β-$Cu_2V_2O_7$ は 833 K 以下で安定であった．また，従来低温相と報告されていた α-$Cu_2V_2O_7$ は 853 K から 953 K で安定であった．さらに，973 K 以上では詳細が不明であった γ-$Cu_2V_2O_7$ が存在することを確認した．β-$Cu_2V_2O_7$ と α-$Zn_2V_2O_7$ は $x \geqq 0.25$ では低温固溶体 $(Zn_xCu_{2-x})V_2O_7$ を形成するが，本研究ではこれが全率で固溶することを発見した．また，γ-$Cu_2V_2O_7$ と β-$Zn_2V_2O_7$ が高温固溶体 $(Zn_xCu_{2-x})V_2O_7$ を形成することを再確認した．

$(Zn_xCu_{2-x})V_2O_7$ のゼーベック係数，電気抵抗率，熱伝導率を測定した．$(Zn_xCu_{2-x})V_2O_7$ はn型の電熱特性を示し，室温での熱伝導率を温度に依存しない定数として無次元性能指数を算出すると，823 K，x=0.2 の組成で最も高く，$ZT=2.48\times10^{-4}$ であった．

溶融塩化カルシウム電解による $TiCl_4$ の還元（内藤　豪是）

本研究では，新しい金属チタンの製造方法を提案した．これは，$CaCl_2$ の溶融塩電解により生成される Ca により $TiCl_4$ を還元し金属チタンを得る方法であり，従来次世代型チタン製造プロセスとして研究されてきた OS 法を応用したものである．本法は，Kroll 法の $TiCl_4$ 製造工程を積極的に採用し，これによって得られる高純度 $TiCl_4$ を原料として，不純物の少ない粉末状金属チタンを連続的に製造することを目的とした方法である．

本研究では，この提案を実験により粉末状金属チタンを製造することを確認すると共に，そのために必要な制約条件を実験より求めることを目的とした．

電気分解に先立ち，あらかじめ Ca を溶解させた $CaCl_2$ で $TiCl_4$ を還元する実験を行った．その結果，浴中の Ca 濃度が 2 mol% 以上であるときに，金属チタンのみを得ることに成功した．

電解実験時には，発生させる Ca の量と使用する $TiCl_4$ の量との関係や生成物の価数から，Ca と Cl_2 ガスとの副反応により，浴内の Ca 濃度が不均一となっていたことが示唆された．このため，金属チタン以外に還元途中と考えられる生成物も得られた．また，これら還元途中の生成物は低級酸化物の形態をとっており，本研究ではその生成経路についても考察した．

以上，本提案の製造方法実現にはカソード周辺の Ca 濃度を高く保つ必要があり，かつ $CaCl_2$ の逆反応を極力防ぐことが必要である．

ダイレクトメタノール型燃料電池の触媒の開発

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

新しい機能性表面処理法および機能性薄膜作製法の研究

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

金属-シリコン系の熱力学関数の測定およびシリコン化合物の合成

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

教　授　平藤　哲司
助　教　植田　幸富

エネルギー科学研究科　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

－固体エネルギー機能材料を調べる－

当分野では，おもにレーザー等を用いた固体機能材料の解析を行っている．多種多様な機能を持ったエネルギー機能固体酸化物，光機能ガラスを対象とした光学物性の探求を主目的としている．

光誘起相変化現象による記憶材料への応用の行われている非晶質カルコゲナイドのうち，ゲルマニウム硫化物ガラスにおける非常に特異な光誘起現象，レーザー光照射による，新たな発光疲労-回復競合現象を見出し，これが光誘起による励起状態での安定/準安定構造の欠陥構造のスイッチと熱励起による基底状態での逆方向のスイッチの競合であると主張してきたが，その正当性を示すため，発光強度の温度依存性の予測とその検証を行った．発光強度の時間依存性を完全に記述する現象論的な式を，上記のメカニズムを忠実に記述した動力学的な式から導出することに成功し，その結果，現象論的式の係数の温度依存性が得られた．実験による検証として，Arイオンレーザー照射による発光強度の時間依存性を10 Kから 230 K まで試料温度を変えて測定し，1）50 K以上での予測式の正当性を，2）より低温では疲労・回復両側への振幅の上昇を，3）70 K 以下では新たな弱い時間依存発光過程を，それぞれ見出した．

光/エネルギー機能材料の光学物性のテーマとしては，時効によるイットリア安定化ジルコニアの導電率低下に伴う局在電子構造からの発光変化に関する研究を継続中である．固体酸化物型燃料電池（SOFC）は高温作動による電力変換効率の高い燃料電池であり，イットリア安定化ジルコニア（YSZ）は SOFC の高い動作温度での熱力学・化学的安定性などのきびしい諸条件を満たすもっとも代表的な固体電解質材料であるが，時効によるイオン伝導度の低下という問題を抱えている．時効に伴う空孔複合構造の大きな変化を，He-Cd レーザーを用いたフォトルミネッセンス測定によるバンドギャップ内準位からの発光の時効に伴う局所構造変化によって解析した．時効による導電率低下を示さない Sc_2O_3 または In_2O_3 を添加した YSZ への同手法の応用を継続中であり，PL 励起（PLE）スペクトルの測定系を準備中である．

固体高分子型燃料電池触媒，新規中高温型プロトン伝導体の開発に関する共同研究も昨年度いっぱいまで修了院生のテーマとして行った．

電気化学的手法により作成された薄膜の光学特性の評価として，10 μm/h の速度で溶融塩中での一様な成膜に成功した，新たな光利用環境半導体として期待される金属珪化物であるマグネシウム珪化物の光吸収特性を中心に成果を上げている．

助　教　蜂谷　　寛

国際融合創造センター

エレクトロニクス分野

STMによる材料表面の原子レベル評価

(1) GaAs（110）表面下のドーパントのLBH（local Barrier Height）測定による検出

昨年度に引き続き，LBH測定による半導体表面直下のドーパント検出の研究を進めている．LBH測定の結果は最も粗い近似では表面ポテンシャルと結びつけることができるから，この手法によってドーパント原子の持つ電荷に関する情報を得ることができる．しかしながら，実際の測定時には電圧の加わった探針が試料近傍に存在するので，半導体表面近傍にバンドベンディングが生じ，これがLBHの値に大きな影響を与えると予想される．本年度はLBHのバイアス電圧依存性を詳細に測定することで，LBH測定によってドーパントの電荷を検出するための基礎データを得た．測定の結果，ドーパントの作る静電ポテンシャルはLBHのバイアス依存性のシフトとして現れることが明らかになった．つまりLBHのバイアス依存性の測定を行うことで，表面ポテンシャルの変化を検出することが可能であると考えられる．STMを用いたLBH測定はSTMと同等の空間分解能が期待できるため応用の面からも意味のある結果であると考えている．

(2) 液体窒素温度下での硫黄吸着Au（111）表面のSTM観察

硫黄—金の結合はSAM（Self-Assembled Monolayer）の形成時の鍵となる結合であり，分子-金属間のリンクにもよく使用される結合である．このようなことから硫黄吸着Au（111）表面に関してもすでに幾つかの研究が報告されている．しかしながら，硫黄の初期吸着過程における原子分解能のSTM像は報告されていない．これはこれまで実験が行われてきた室温では硫黄がmobileであるからであると考えられる．このことから本研究では液体窒素温度で硫黄のAu（111）表面への初期吸着過程のSTMによる観察を試みた．観察の結果，単独で吸着した硫黄原子のほかに幾つかの種類のクラスターが見出された．前出のLBH測定によるこれらのクラスター近傍でのポテンシャル計測の結果からは,これらのクラスターが硫黄原子および金原子から成り立っていることが予想される．硫黄吸着の無い清浄表面に現れる再配列構造には理想的な1x1表面と比べて過剰に金原子が含まれており，この構造が硫黄吸着に伴って消失する際，金原子が表面に放出される．クラスターはこの放出された金原子と吸着した硫黄によって形成されたものと考えている．また，液体窒素温度下では多くの場合，吸着硫黄原子は固定された吸着子としてイメージされるが，時に表面上で吸着硫黄原子がmobileとなる場合があることも併せて明らかになった．

原子・分子サイズ接点の研究

(1) Si原子サイズ接点のコンダクタンス

半導体の原子サイズ接点に関する研究は非常に数が少なく，コンダクタンスの実験データも殆んど得られていない．我々の研究室では化学研磨によりSi探針を作製し，これをSi清浄表面に接触させてから引き離す方法を用いて，室温・超高真空中でSiの原子サイズ接点の形成とコンダクタンス測定を行った．接点の引き離しに伴ってコンダクタンスは$(1-10^{-6})G_0$の広い範囲に亘って変化し（G_0はコンダクタンスの量子化単位），コンダクタンスプラトーも観測されるが，ヒストグラムにはピーク構造は現われない．またコンダクタンスの接点引き離し距離に対する依存性は局在伝導の式とよく一致しており，形成されたSi原子サイズ接点はdisorderedになっていると考えられる．

(2) 原子サイズ金属接点の電流誘起破断

高バイアス下で接点を開くと，接点サイズの縮小に伴って電流密度が増加し，ある時点で接点が破断してしまう．前年度に行ったZn接点の研究に続き，2006年度は更に低融点のSnについて電流誘起破断の実験を行った．これまで実験を行った金属とは異なり，Sn接点の破断コンダクタンスの分布は2つのピークを示し，それらのバイアス依存性も他の金属とは異なっている．低バイアスでも$40\,G_0$付近で破断する接点が多く，Sn原子サイズ接点が$40\,G_0$付近で不安定になる可能性が示唆されている．

(3) BDT単分子の$I-V$特性

MCBJを利用してAu電極間に1-4ベンゼンジチオール（BDT）単分子を架橋し，特定のコンダクタンス状態に保持したまま電圧を掃引して$I-V$特性の測定を行った．BDTの$I-V$特性については従来様々な結果が報告されているが，今回はばらつきの少ない特性が得られ，特に$0.01\,G_0$状態の特性は他のグループによる間接測定の結果とよく一致している．各コンダクタンス状態の$I-V$曲線は相似の形状を示し，3次関数でよく表される．特に$I-V$曲線は原点で有限の傾きを示し，gapは観測されない．これらの点について，従来の結果や理論との比較検討が必要である．

(4) BDT単分子の高バイアス破断

上記の実験において電圧を高い値まで掃引し，Au/BDT/Au接合の高バイアス破断特性を調べた．観測される特性はかなり多様であるが，多くの場合ある電圧でコンダクタンスが急激に増加する．この閾値電圧は～1.5Vを平均とした広い分布を示し，分布は測定環境や初期接点状態に余り依存していない．我々は閾値電圧でBDTが壊れているのではなく，おそらくAu電極が不安定化しているのではないかと推定している．

教　授　酒井　　明
准教授　黒川　　修

国際融合創造センター

材料デザイン分野

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

(1) Bi2223 超伝導複合テープの熱残留ひずみ測定およびその集積過程

Bi2223 系超伝導複合材中の超伝導電流輸送を担う Bi2223 フィラメントの熱残留ひずみは臨界電流の耐ひずみ特性を決定する因子の一つであり，その集積過程の解明が待たれている．本研究では，SPring-8 での X 線回折実験による室温での残留ひずみ測定結果と弾塑性力学を組み合わせて，熱履歴に伴う残留ひずみ変化の解明とモデル化を試みた．高温では構成材である安定化銀のクリープ挙動により，残留応力は解放されること，室温と 77 K の間で熱サイクルがかかる場合は，銀の弾・塑性変形により，Bi2223 の残留ひずみにヒステレシスが生じること，Bi2223 の固有破壊ひずみと残留ひずみの差で臨界電流の耐ひずみ特性が決定されること，本研究で提案したモデルで臨界電流と引張および曲げ負荷ひずみの関係を定量化できることなどを明らかにした．

(2) 融液成長アルミナ/YAG 共晶複合材料の 1700－2000 K での強度及び破壊靱性

融液から成長させたアルミナ/YAG 共晶複合材料は次代のタービン材料として期待がかかっている．本年度は 1773－1973 K の超高温域における変形挙動の変形温度・変形速度依存性の定量化を目指し，高温変形構成式と有限要素法を用いてモデル化した．これにより，降伏現象の位置依存性，構成相内での応力・ひずみ速度分布，各相の局所的形態に起因する応力およびひずみ速度の再配分などが明らかになった．

(3) 金属へのコーティング層の破壊・剥落

金属に硬質層をコーティングした複合金属は，自動車，建築，工具など多彩な分野で使用されている．この材料では，コーティング層の破壊・剥落は機能の消失につながるため，メカニズムの解明とその抑制方法の開発が要請されている．本年度は自動車鋼板として用いられている溶融亜鉛めっき鋼板について，コーティング層のクラック間隔分布はコーティング層厚さ，基材鋼種，負荷ひずみ量によらず，統一的に定量化できることを示すと共に，界面剥離プロセスのモデル化に成功した．

(4) 微細繊維の破壊靱性評価

直径が数ミクロンの炭素，炭化珪素などの繊維は構造用複合材料の強化材として広く用いられているが，繊維そのものの破壊靱性はよくわかってはいない．非晶質繊維についてはミラー半径を用いた経験式を用いて靱性値評価が行われてきたが，結晶質繊維ではこの手法は適用できない．本研究では，非晶質・結晶質を問わず適用できる評価法の開発に取り組んでいる．現在，繊維に FIB（集積イオンビーム）を用いて，繊維に人工ノッチを導入し，有限要素法解析と組み合わせて，繊維の破壊靱性を評価する方法を開発中である．現在までに，この手法により，結晶性炭化珪素繊維の破壊靱性を初めて評価することに成功している．今後はこの手法の精緻化と多彩な繊維への応用から，繊維の破壊靱性のデータベース化に取り組みたい．

(5) Zr 基金属ガラスのなかの構造と組成揺らぎの検討

これまでの SPring-8 を利用した ZrK 吸収端での異常小角散乱実験により，Zr 基 4 元金属ガラス中にクラスター的な不均一構造が存在することを見出した．弱い散乱であるため，その定量化には課題が残されていた．データの低バックグラウンド化のため，全真空条件での異常小角散乱実験を実現した．従来は空気あるいは窓材散乱に隠れて評価できなかったごく低角領域や中程度の散乱ベクトル領域（$q=4\,nm^{-1}$）での散乱強度の定量化が格段に進んだ．　ガラス状態でのクラスター的な揺らぎの内部にはわずかな組成の変動があり，その組成揺らぎの方向は結晶化によって認められる組成揺らぎの方向とは異なることが明らかとなった．　今後は定量的に低バックグラウンドで取得できるようになった小角散乱強度を種々の条件で調整された 4 元試料や，より単純な 3 元系へと適用を進め，4 元で見られた揺らぎが一般的なものであるかどうかを検証してゆく．

(6) 化合物半導体系ナノドットの GI-SAXS による構造解析

Si 基板上の Ge ナノドットについてこれまでおこなってきた斜入射 X 線小角散乱法（GISAXS）の，III-V 族化合物半導体ナノドットの構造解析への適用を試みた．今回対象とした GaAs 基板上の InAs ナノドット/GaAs キャップ系の材料では，従来キャップ層のエピタキシャル成長後も明確なナノドットの発光や TEM 像が観察されるとされていた．しかし今回の測定により，GaAs 層のエピタキシャル成長後のナノドットの GISAXS パターンと，InAs ナノドット成長後，室温まで冷却後アモルファス As をキャップした場合の GISAXS パターンは明確に異なることが明らかとなり，エピタキシャル成長によるキャップ層成長中に明確なナノドットの形状変化が認められることが明らかとなった．今後，このような形状変化がどのような条件下でどの程度進行するのか，という観点からの評価を進めてゆく．

教　授　落合庄治郎
准教授　奥田　浩司

会 報

追 悼

特別名誉会員 向井 滋 先生



向井 滋先生の御略歴

昭和12年3月 京都帝国大学工学部採鉱冶金学科卒業
昭和12年4月 古河合名会社入社
昭和15年4月 久留米高等工業学校教授
昭和25年4月 九州大学生産科学研究所助教授
昭和31年4月 京都大学工学部教授（鉱山学科選鉱学講座担当）
昭和38年4月 同上（資源工学科資源精製学講座担当）
昭和52年3月 定年退官、京都大学名誉教授
昭和52年4月 （株）神戸製鋼所中央研究所 顧問（昭和59年まで）
昭和62年5月 勲2等瑞宝章受賞

向井先生を偲んで

若　松　貴　英

特別名誉会員向井滋先生は，平成18年5月27日逝去されました．享年92歳，謹んで哀悼の意を表します．

向井先生は昭和31年に京都大学教授に就任され，当時の工学部鉱山学科における選鉱学講座を担任されました．その頃筆者は大学院修士課程の学生であり，先生の選鉱学特論の授業は K. L. Sutherland & L. W. Wark 著の“Principle of Flotation”を輪読し討議しながら浮選の基礎を学ぶものでした．先生の大学院レベルの教育・研究に対する持論は英文の文献を読み，研究論文は可能な限り英文で発表することに置かれていた．昭和38年には，鉱山学科が改組され資源工学科となり従来の選鉱学講座は資源精製学講座と呼称され，その内容は選鉱・選炭学を含めた粉体工学や環境保全学に関連する広範な学問分野に及びました．実施した研究については，①浮選剤と鉱物界面の反応機構，酸化鉱物に対する捕収方法の開発を中心とした浮遊選鉱に関する研究，②静電分離における諸因子の解析および石炭の粘結成分の分離回収を可能にした静電選鉱に関する研究，③粉砕および微粒鉄鉱石のペレタイジングに関する研究，および④産業廃水処理に関する研究，が行われました．得られた成果は内外の学会，国際会議において発表され高く評価されております．教育面においては，先生は選鉱学，鉱物粉体工学，資源精製化学熱力学などの講義を担当され，また特別研究・実験などを通じて学生に対し懇切に指導をされました．その他，学内では東南アジヤ研究センターの評議員として長らく務められ，当センターの発展に寄与されました．

学会活動としては，先生は日本鉱業会（現資源・素材学会）における評議員，理事，関西支部長を歴任され，同学会における水質汚濁調査特別委員会，非硫化鉱物の選鉱研究委員会，酸化銅鉱の浮選研究委員会，難処理非硫化鉱の浮選研究委員会など各種研究委員会の委員長あるいは委員を務められました．また，選鉱技術に関連する大学，研究所，企業などの研究者，技術者を中心とした浮選研究会（現環境資源工学会）が昭和23年に設立し，向井先生は昭和45年に会長に就任され，その後平成4年までの21年間会長として会の発展に尽力されました．この期間に，これまで選鉱工場の現場で開催していた年2回の例会を主として都市部において開催し，会誌年4回の発行を確立しております．さらに鉱業界の衰退に伴う研究会の活動内容も選鉱技術を含めた分離工学を基礎にし，粉体工学，資源リサイクル，エネルギー関連技術さらに環境保全をも含めた諸問題を考える研究会とし，昭和59年6月に研究会の名称を資源処理技術研究会と変更しました．この事はその後この研究会が資源処理学会（平成5年6月）さらに環境資源工学会（平成15年6月）として発展する基礎となっております．

社会活動としては，文部省学術審議会専門委員，通商産業省近畿地方鉱山保安協議会委員，日本選炭協議会委員などを務め，それらの運営に尽力されました．

先生はスポーツを大変好まれており，万能でした．資源・金属系3学科対抗の球技大会では，先生は野球，テニス，バレーボールなどに出場され活躍されていました．また毎年5月ごろ開催していた3学科主催，水曜会後援の新入生歓迎比叡山登山にもよく出席されていたことが思い出されます．甲子園の高等学校野球についても熱烈なファンの1人で筆者もよくテレビ観戦に誘われました．これは選手たちが郷里の代表として一戦一戦力を出し切り戦う姿に感動と魅力を感じておられたのでしょう．さらに，研究，学問，スポーツなどを肴に研究室学生や同僚らと共に酒を飲み交わすこともお好きでした．酔うほどに最後は歌を唄うことになり，先生の必ず唄う歌には「琵琶湖周航の歌」，「逍遥の歌」および「若鷲の歌」でした．

向井先生は，卒業生に送る言葉としてしばしば「Honesty is the best policy」を掲げておられました．現在の世相を考えるとき，この言葉の意味が如何に重要であるかが思いしらされます．

心より先生のご冥福をお祈りいたします．

追　悼

特別名誉会員　足立正雄　先生



足立正雄先生の御略歴

昭和17年9月　京都帝国大学冶金学科卒業
昭和17年9月　中央航空研究所研究員
昭和18年1月　海軍技術中尉
昭和19年5月　海軍技術大尉
昭和22年6月　京都帝国大学助教授
昭和32年10月　科学技術研究所非鉄金属研究室長
昭和37年12月　京都大学教授
昭和57年4月　京都大学停年退官 京都大学名誉教授
昭和58年月　岡山職業訓練大学校　校長
昭和61年3月 停年退職
平成4年11月　勲二等瑞宝章

追悼の辞

遠藤孝雄

私は修士と博士課程の5年間，その後助手として奉職した2年間，草創期の足立研で先生の指導を受けた．1964から1971年のことである．当時の研究設備は貧弱で，実験設備をつくるのにも，データの解析をするのにも大変な時間が必要であった．しかし，そのような時代だからこそ，時の流れがゆるやかで，研究室においても，研究室以外においても先生と一緒にいる時間に恵まれた．足立先生は，いわゆる下戸であったが，頻繁に行っていたコンパにもおつきあい下さり，春秋にハイキングをしていた時期もあった．また，正月には大勢で押し掛けてマージャンにうち興じ，奥様や二人のお嬢さんのお世話になった．いずれも懐かしく，かつ楽しい想い出である．

足立研の主要な課題は，高温クリープや高温変形機構の解明であった．この課題は，世界的に見ても新しくて興味深いものであった．とりわけ，金属のマトリックスに分散した微小な第2相が高温強度に及ぼす機構の解明はホットな話題であった．私はマトリックスの変形に関心があり，その研究に多くの時間を割いた．私が，足立先生から直接の指導を受けたのは，上記の7年に過ぎないが，横浜国立大学に赴任して退職するまでの間，公私にわたりお世話になることが多く，感謝に堪えない．

私が最後にお会いしたのは，材料学会の高温強度部門委員会の席上で，平成13年の7月6日のことである．私は講演を依頼されていたので，Ω法の研究成果を発表するために登壇し，そこで先生のお姿を見付けた．講演のあと，日頃のご無沙汰を詫びて，「このような研究会にはいつも参加なさるのですか」と聞いた．すると，「今でも研究会の案内がくるので興味があるときには出てくるのだが，今日は君の講演があるからきた」と話された．先生の研究室を離れて30余年の時が過ぎているのに、弟子のことを気に掛けてくださっているので驚きかつ恐縮した．私は、簡単な近況報告をし，「私もまもなく退官しますが、退官後は京都に住むことにしていますので、頻繁にお邪魔したい」と申し出た．当時，先生は大変お元気そうに見えたし，ずいぶん若々しいとさえ感じた．昨年の暮れに先生のお宅をお訪ねしたら，入院しておられ，お会いすることができなかった．それでも，遠からずお会いできると思っていたので，訃報に接したときは，信じられなかった．いまは信じられなかった現実を受け入れて，先生のご冥福を祈っている次第である．

(昭和44年博士修了，横浜国立大学名誉教授)

足立先生を偲ぶ

上瀬忠興

私が足立研究室に在籍したのは、昭和30年代の末であり、早いもので、それからもう40年余りの年月が経ってしまった。

先生が金属材料技術研究所から、京都大学に着任され、「足立研究室」が誕生した年という幸運にめぐりあわせて、足立研第1期生として、お世話になることになった。発足時は足立、圓城両先生と学生3名の小世帯であり、家族的雰囲気のなかで、焼鈍炉、クリープ試験機などの実験設備、測定設備を自分たちで製作していた。私は、山登りと音楽にも熱中していて、硬軟取りまぜ、大変楽しい時代を送らせていただいたことに、ずっと感謝している。

2年目からは、外部から大学院に加わった者と、新しく足立研に入ってきた多数の後輩とで、人数も一挙に増え、報告会、輪読会など、研究室としての活動も固まっていった。そんな中で、足立先生は、各人にタイムリーな研究ﾃｰﾏを与え、それを笑みを絶やさずに、適切なアドバイスでご指導くださった。クリープ試験は連続測定しなければならないが、まだ自記式のものがなく、試料の伸びをダイヤルゲージで直接読んでいたため、我々は研究室を長時間離れることができず、泊り込んで測定したのも、学生時代のなつかしい思い出である。

研究室メンバーで一泊旅行するのが恒例になり、北陸や山陰に出かけた写真が残っている。

このように、研究室は足立先生の人柄そのままの温かい雰囲気に包まれていて、ここで修士課程を含めて3年間を過ごさせて、いただいたことが、現在までの会社生活の送り方のﾍﾞｰｽになっている。業績低迷、環境変化に合わせるための希望退職実施など、多くの難問に悩まされながらも、今日までどうにかやってこられたのも、足立研究室時代に築いていただいた、バックボーンのおかげであるといつも感謝している。

足立先生のご冥福をお祈りします。

(昭和41年修士卒，星工業株式会社)

足立先生を偲んで

高田　潤

足立先生がご逝去されて早くも1年数ヶ月が過ぎましたが、私の心の中では、私が足立研究室で過ごした頃の先生のお姿が今も鮮やかに生きております。先生からは研究面は勿論ですが、人生観など精神面でも数多くのことをお教え頂き、現在の私の基盤となっております。今回の追悼集の企画にあたり、先生および足立研究室での

生活を思い出すことにより感謝の意を表したいと思います。

私が足立研究室に配属されたのは、昭和44年4月でした。この研究室を選んだ理由は、先生のご専門である金属組織学に興味を持ったことと、3年生の時に先生の講義を受講し、そのお人柄に惹かれたことからです。講義では、長年の蓄積と最新のトピックスが詰め込まれたノートをお持ちになり、きれいな字で几帳面に黒板に文章や図をお書きになっていたことを思い出します。重要な点は丁寧にそして淡々とご説明いただいたことが印象的でした。

当時、研究室には足立先生を筆頭に、助教授には圓城先生（故人）、助手に片岡先生（故人）と遠藤先生がおられ、金属の高温変形や再結晶など多様な研究を展開されていました。研究室の雰囲気は、私が期待していた通り足立先生のお人柄が滲み出た非常に暖かく家庭的なものでした。

私が選んだ卒業研究のテーマは、「銀合金の内部酸化と低温変形」でした。特殊な内部酸化法を利用すれば、耐熱合金として有用な微粒子分散強化型合金が簡単に作製できることに注目した研究でした。この粒子分散強化型合金の変形に関しては、足立先生が嘗て米国留学されたときに研究されたテーマの発展研究であると説明を受け、一層深く興味を持ったことを思い出します。

この時期は学生運動が最も激しい頃で、学内も何かと騒然として落ち着きがない状況でしたが、足立先生は「平常心が重要である」とのお考えで、泰然として、以前と同様の着実な研究活動を続けられていました。私も先輩方の指導を受けながら、何度も徹夜を経験し研究を進め、充実した日々を過ごしました。

この4年生での研究テーマは、その後私が大学院修士課程と博士課程の研究テーマへと展開しました。更に約25年経った最近でも、微粒子分散によるMo合金の結晶粒成長制御の新しい観点から、私の研究室のテーマの一つとして研究を開始し、興味ある成果が得られ、現在も続けております。このように足立先生は研究の面で高い先見性をお持ちでありました。この点でも、私の研究の原点は足立研究室の研究にあり、先生お蔭であると感謝するばかりです。

足立先生は学生を大変大事にされ、いつも暖かく静かに見守って下さっておりました。時々ふらりと学生の居る部屋に入ってこられ、研究のことばかりでなく、世間話をされ、学生とのコミュニケーションをとることに努力されていたように思います。そんな気さくな先生ですから、学生たちは自然と自分の恋愛の相談もしていたように覚えています。今思いますと、このような教授は一般には珍しいことがわかります。このような学生との関係の中で、先生は「人間的なつながりや配慮がとても重要である」ことを、私たちにお教えくださったのだと思います。

また、毎年学生をご自宅に呼んでくださり、お話やその当時流行っていましたマージャンを一緒にした後、奥様お手製のお料理を頂戴するのが恒例となっておりました。私たち学生はこの恒例の行事（？）を大変楽しみにしていたものです。特に、その頃一般に貧しかった学生にとって先生のお宅でのお食事はいつにもないご馳走でした。

足立先生は、私が博士課程を修了後助手となってからは、学生のテーマなどほとんど私たちにお任せいただきました。研究テーマやその進め方について先生にご相談に上がると、いつも大局的な観点からの適切な助言を下さり、研究目的や展開に広がりと奥深さをご指導いただきました。しかし基本的には、私達若手研究者の自主性を尊重され、私たちの成長を手助けする教育方針であったと考えます。この若手研究者の教育方針については、ごく最近文部科学省が示しました「第3次科学技術基本法案」など数々の人材育成計画でもその重要性が指摘されています。足立先生は、既に30年前からこういった若手研究者の育成教育を実践されていたことになり、先生の教育者としての偉大さに今改めて敬服するものです。

私は現在大学で教員をしておりますが、研究と教育についての方針は、足立先生のそれを基礎としております。先生のご方針は、約40年経った今も受け継いで生きております。今の私があるのは足立先生との出会いが原点です。また、私の以前からの目標の1つは、足立先生の教育に如何に近づくかでありますが、まだまだ先生の足元にも及ばないことを日々実感しております。

最後に、私たちの修士課程修了式の折お話下さった漢詩をご紹介し、足立先生のご冥福を心よりお祈りして筆を置きます。

「年年歳歳花相似たり、歳歳年年人同じからず」（劉希夷）

合掌

(昭和45年卒，岡山大学大学院)

足立正雄先生の思い出

菊池潮美

月日の過ぎるのは速いもので足立正雄先生が平成18年3月24日に逝去されて、はや1年半以上が経過しました。先生には昭和42年学部4回生における卒業研究の指導から始まって大学院の博士課程までの学生時代、またその後の助手、助教授時代と昭和57年の停年退官まで15年の長きにわたってご指導を賜りました。最も長く先生にご指導していただいた一人だと思います。

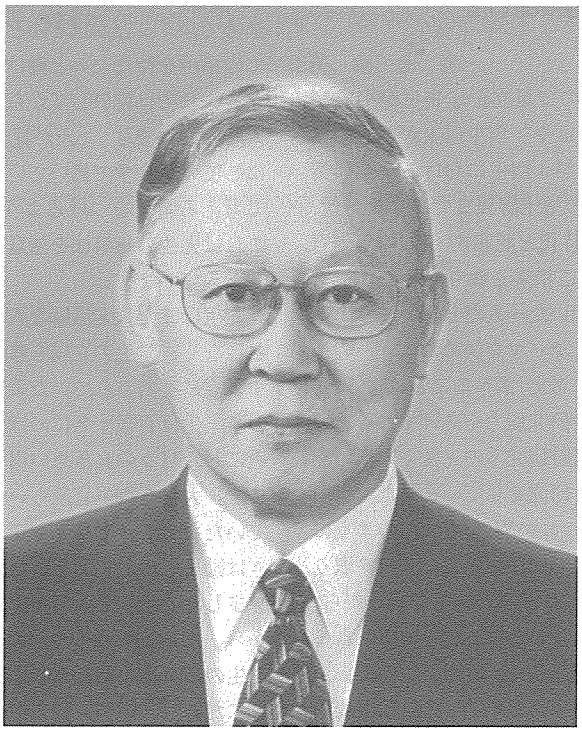
先生の学生への指導は研究テーマを決めれば、そのテーマについて学生が自主的に考え、調べることによって、自らの知識を増やし、個々の研究能力をあげてゆくという指導法でした。そこで、当時研究室の先輩や同期の学生さん達は自由に伸び伸びと研究をしていました。自由だからといって実験をサボるわけでもなく、今のようにコンピュータの発達した時代ではないので、データ取りのために徹夜で実験をしたり、研究室の椅子で寝ながら、サンプリングの時間を待ったりしたことが思い出されます。学生時代から教員時代を通じて、研究について細かいことはほとんど言われなかったので、一見放任主義のように見られますが、先生と同じ立場になった、今から考えますとなかなか良く考えられた指導方法と思います。現在の大学はややもすると学生に教員側から研究について細かい指示を与え、教員の研究業績になるような実験をさせる傾向が強く、学生が自主的に考えて研究を進めてゆくことがほとんどないように思われます。すべての指示を待たないと動けない学生にも問題がありますが、これでは就職してからどうなるのだろうといつも考えてしまいます。「人が育つ大学」をキャッチフレーズにしている大学で働いているものにとって、学生が自分で考える習慣をつけるよう指導しているつもりですが、これは先生の指導法を無意識に受け継いでいるのだろうと考えています。

先生はまた大変温厚な人柄でほとんど学生をしかることはなく、学生の立場を尊重し、それぞれの個性を伸ばすように努力されていたように感じました。足立研究室の卒業生は百数十名にのぼりますが、学生時代研究室で過ごした日々の良き思い出を持っておられることと存じます。大学を御退官後もいつも卒業生のことを気にかけていただいて、勤務先が変わったり、昇進したりしたときは励ましのお電話をいただいたり、大変喜んでいただきました。私にとって先生は精神的な支えでありましたから、ご逝去の報を受けたときは大きな悲しみでした。先生のご冥福をお祈りしますとともに、先生に受けたご恩にたいし、いつも胸の中に感謝の気持ちを持って生きてゆきたいと思います。

合掌

(昭和43年卒，滋賀県立大学)

京都大学工学研究科教授　牧　正志先生は定年退職されました.



牧　正志先生の御略歴

牧　正志先生は昭和41年3月京都大学工学部金属加工学科をご卒業，昭和43年3月同大学院工学研究科修士課程を修了，昭和44年9月同大学院工学研究科博士課程を退学後，京都大学工学部に助手として勤務されました．その後，昭和48年 9月に京都大学工学博士の学位を取得され，昭和49年6月～昭和51年4月の間文部省在外研究員として米国イリノイ大学での研究を経て，昭和51年11月より同大学工学部助教授を務められました．そして，昭和63年1月より京都大学工学部金属加工学科特殊鋼学講座の教授となられ，平成6年4月からの大学院重点化にともない，材料工学専攻材質制御学分野の教授を担当されてきました．平成19年3月をもって京都大学を定年退職され，同年4月より京都大学名誉教授になられると同時に，新日本製鐵株式会社顧問に就任されました．

先生は40年余に渡って鉄鋼材料およびチタン合金の組織制御の基礎となる相変態・析出，回復・再結晶・粒成長，熱間および冷間変形組織に関して，組織学的，結晶学的観点からの研究を行われ，多くの重要な基礎的知見を得られました．これらを基に，加工熱処理（TRIP，オースフォーム，制御圧延等）による組織制御の原理と手法，強度－延靭性，超塑性，形状記憶・超弾性等の諸特性の向上に関する基礎的指針を与えられました．また日本鉄鋼協会，日本金属学会，日本熱処理協会の理事，各種の委員長，部会長を務められ，平成13～15年に日本熱処理協会副会長，平成14～16年には日本鉄鋼協会会長として各学会の発展にご尽力されました．この間に，日本金属学会，日本鉄鋼協会での7度の論文賞，英国The Institute of Materials の論文賞（Vanadium Award），日本鉄鋼協会学会賞（西山賞），日本金属学会本多記念講演，村上記念賞，谷川・ハリス賞，日本熱処理協会林賞など，数多くの賞を受賞されております．このように先生は，鉄鋼材料およびチタン合金の基礎から応用に渡る幅広い分野の研究と教育に多大な貢献をされるとともに，国内外を問わず多くの優秀な人材を育成されました．先生のご指導，ご貢献に感謝致しますと共に，今後の先生の益々のご健勝，ご活躍をお祈り申し上げます．

（古原　忠）

牧正志先生のご退職に寄せて
－出会い，教え，そしてこれから－

津　崎　兼　彰

出会い：牧正志先生に初めてお会いしたのは昭和51年（1976年）5月の始めであった．私は4回生で研究室に配属されたばかり．先生が神戸で開催される第一回マルテンサイト変態国際会議（ICOMAT）に参加発表

されるために，文部省在外研究員の任期終了を早めて帰国されたときだった．それ以来30年にわたってお世話になるとは，また先生のご退職に寄せて水曜会誌に駄文をさらすことになるなど，当時思いもしなかった．

最初の印象は「シャープ＆クール」である．研究室のM2の先輩から4月時点で「頼りになる兄貴みたいな人やで」と聞いていたのだが，聞くと見るとは大違い．何せ自己紹介の後すぐに国際会議のリハーサル（もちろん英語）であり，4回生の学生にはショックが大きかった．ついていけるやろか，というわけである．私が3回生の時，先生は米国イリノイ大学におられたために学生実験で教えていただく機会はなかった．当時，田村今男先生の熱い講義に魅かれて研究室を選択した私は，米国帰りの牧先生のクールさに戸惑ったのであった．しかし，それも全くの杞憂．大学院入試が終わって卒業研究が始まると，先生の熱い熱い指導を受けることになったのである．

教え（1976年4回生）：懐かしい第一回 ICOMAT の論文集を見ると（4年ほど前の金属学会講演大会時に購入した新古本），議長は清水謙一先生で，西山善次先生が記念講演，そして Cohen 先生，Kurdjumov 先生，Christian 先生，Wayman 先生とそうそうたる顔ぶれが参加発表されている．牧先生もイリノイでの仕事を Wayman 先生との共著で2件発表された．TEM 観察を中心にしたマルテンサイトの微視組織に関するもので，その TEM 組織写真の美しさは会議でも評判だったと今でも諸先輩から伺うことがある．これが「組織写真は美しくなければならない」という先生の教えの根源だと勝手に思っている．

私の研究課題は炭素鋼のラスマルテンサイト組織に関するもので熱処理－研磨腐食－光顕観察の繰り返しだったが，「スクラップブック3冊を越える写真を撮らないと使える写真にならない」というわけで研磨室と暗室にいる時間が長かった．「写真には上下がある」．これも印象ある当時の先生の教えである．図1は，私が4回生時代の最後の方にとった写真である．この写真を上下逆にすると何となくすわりが悪いのがわかるだろうか．牧先生はそこまでこだわられた．「牧さん（当時は先生をさん付で呼んでいた），こんな写真がとれました」（津﨑）．「エー写真が撮れたなぁ，しかし写真には上下というものがあるのがわかるか」と，先生はいろいろと向きを変えて写真のすわりをチェックされていた．

「牧さんに～しかられて～～今日も写真を焼く私」（当時はやった学生達のぼやき節）．私は時間のかかる地味な研究が苦にならないが，そのもとは4回生・修士時代の経験にあると思っている．何事も初めが肝心，である．

教え（1985年助手1年目）：昭和60年（1985年）4月，私は MIT でのポスドクを終えて幸運にも京大特殊鋼学講座の助手の職につくことができた．赴任に関する手許の書類ファイルの中に牧先生直筆の手紙がある．帰国直前の2月13日に頂いた手紙に，「とりわけ最近は，先生はもちろんのこと，私も梅本君も極めて多忙です．私も今年になってすでに3回も徹夜仕事になりました．貴兄が赴任しても，丁度田村先生の退官2年前になり，ますます忙しくなることは目に見えています．その点の覚悟だけはしていて下さい」と書かれている．「志の高い研究者たれ」は先生がよく口にされる言葉だが，それに最初に接したのはこのころである．「えーか，忙しいのはしゃーない，研究者を続ける限り絶対ひまにはならん．しかし，忙しさに負けて質を落としたら本末転倒や．志の高い研究者たれ」というわけである．そのための覚悟を赴任前に教えていただいたと思っている．

「学生に鉄鋼材料の本当の面白さを伝えないかん，学生実験はその大切な機会や」というわけで，3回生の学生実験に手抜きは許されなかった．鋼の熱処理についての実験課題で，ジョミニー試験，冷却速度を変えた熱処理，焼き戻し処理，硬さ測定，光学顕微鏡観察とスケッチという構成であった．針金を使って，焼き入れままでは曲げるとポキッと割れるが，空冷したり焼き戻すと割れずに変形するというデモンストレーションが好評だった．覚えておられる諸兄もあろう．牧先生と梅本先生の工夫である．私もお二人の背中を見ながら学生実験の手伝いをさせていただいた．のちになって「津﨑さんの学生実験での印象が研究室を選んだ理由の一つです」と学生さんに言われた時は本当にうれしかった．

「苦労すればむくわれるもんや，なー津﨑，よかったな」と肩をたたかれたのを覚えている．

教え（1996年京大最後の年）：平成8年（1996年）暮れ，助手での6年間，助教授としての6年間を終えて，私は長年お世話になった京大に別れを告げようとしていた．97年4月から開始された超鉄鋼研究プロジェクトにグループリーダーとして参画するために科学技術庁金属材料技術研究所（当時）に転任することが決まっていたのである．「人の話を聞くのが大切やで」．日本が不景



図1　Fe-0.2%C合金ラスマルテンサイト組織．光学顕微鏡写真．腐食液：2%ナイタール．

気の真っただ中で，鉄鋼材料研究への強い逆風が吹く時期に，職場を変えようとしていた私への先生の教えであった．その後の10年間，年を経るごとにこの教えの大切さが身にしみるようになっている．私は，研究のみならず諸事に際して，ついつい自分から話しだす，しゃべりすぎるという性癖を持っている．牧先生はそこのところを十分承知されていたのだと思う．「指導者リーダーは話を聞くのが仕事」という教えだが，私はこの教えを未だにまっとうできていない．牧先生，不出来な教え子で申し訳ございません．

書架に京大を去る際に研究室からいただいた色紙がある．牧先生はこう書かれている．「現在の研究室があるのは，ひとえに津崎君のお陰です．心より感謝しています．有難うございました．（中略）田村魂を受け継ぐものとして，共に協力しながら頑張りましょう」．ありがたかった，感激した，先生と一緒に仕事ができてよかったと思った．このように先生は感謝の気持ちを伝えるのがとてもお上手である．相手のことを日ごろから思いやっておられるからだと思う．

「君がいれてくれるコーヒーが一番おいしいんや．○○君」．先生が良く学生にかける言葉であった．思いやりの気持ちは日頃の行いから，と思う次第である．

そしてこれから（2007年）：牧正志先生は2007年3月京都大学を退職された．退職されるにあたって研究室をきれいにされたのは皆さんご存じのとおりである．それは極めて計画的かつ完璧で，ここにも牧イズムがあった．よく，続けるのは難しいといわれるが，止めることも続けることと同じように，いやそれ以上に難しいと思う．研究室がなくなったことを寂しいと嘆くOBに対して牧先生は言われる，「研究室はなくなっても，田村-牧の研究DNAは世界中に広がっている」と．

鉄鋼材料研究の分野で，牧正志先生は大切な方である．多くの学生と研究者が先生から力をいただいた．この力の源としての先生のポテンシャルは涸れることがないと信じている．しかし心配なこともある．ご退職なさっても，新日鐵顧問の本務に加えて，数々の依頼講演，国際会議の議長，学協会の会長などと，先生の激務は変わりそうにないからである．心配ついでに先生に是非お願いしたい，「もう徹夜だけはやめて下さい」と．その実現には田村-牧の研究DNAをもった諸先輩と後輩の方々の協力が必要である．各位に水曜会OBとしてのご協力をお願いする次第である．

「温泉はええな，生き返るな」．先生のこの言葉をなるべく多く聞きたいと願う．

牧先生が米国から帰られて最初についた4回生の学生，牧研究室の最初の助手，最初の助教授ということで，本稿の執筆を古原先生に依頼され受けた．失礼な表現が多々あると思う．お許しを頂きたい．

（（独）物質・材料研究機構　新構造材料センター）

牧正志先生のご退職に寄せて

高木周作

私は牧研究室6期生で，現在JFEスチールの研究所に勤務しております．4回生で牧研配属となって以来17年間鉄の研究に関わってきました．私が鉄の研究に興味を持ったのは，言うまでもなく牧先生とその授業に魅せられたからです．

私は，大学入学時は金属系学科に志望どおり入学したものの，「鉄鋼材料」を意識したことは全くありませんでした．金属系学科を志望した理由は，当時超伝導材料の研究が盛んで，テレビや新聞でも報道されており，材料によって世の中が大きく変わるというイメージをもったからです．

ところが，3回生で牧先生の授業を受けてから，鉄鋼材料というものを初めて意識し，牧先生の下で鉄の研究をしてみたいと思うようになりました．牧研での私の研究は鉄ではなくチタンの組織制御に関するものでしたが，私と同じように牧先生や鉄の研究に惹かれた先輩や仲間といっしょに楽しく充実した研究室生活を送ることができました．ゼミや学会発表のリハーサル等は，昼過ぎから時には夜9時過ぎまでかかることもあり，長く，厳しいものでした．しかし今となっては，あんなに熱心に教育，指導をしていただいたのは，人生でもほとんどない，貴重な経験であったと思います．

また，牧先生は研究における厳しさとは裏腹に，研究以外の場では，大変温厚で，楽しい方でした．研究室旅行は夏には釣りができるところへ，冬はスキーへ行きました．先生は，夜は決まってマージャン（私はほとんどやりませんでしたが）をされており，悔しい思いをした学生も多かったのではと思います．

私は就職後も牧先生と学会の講演大会や国際会議でよくお会いし，ご指導いただきました．会社内では，先生に教わった鉄の組織制御に関する知識が大変役に立っているのは言うまでもありませんが，それに加えて研究の進め方，実験の仕方の基礎が身についていると感じることが多く，大変ありがたく思いました．また，国内外の大学を訪問したり，国際会議でいろんな方と話をする時に，牧研究室出身というと親しげに話し掛けていただいたり，大変よくしてくださります．社会に出てから，牧先生にご指導いただいた恩恵をいろんなところで身にしみて感じていますし，学生時代にはわからなかった牧先生のすばらしさを感じることが年々増えています．

さて，私は学会では先生によくお会いしていましたが，大学へは入社後ほとんど訪問する機会が無く，10年ほどご無沙汰の状態でした．ところが，数年前よりリクルート活動で大学に伺うことが多くなりました．あるとき，牧先生に，「鉄鋼業に京大材料系の学生の皆さんがあまり

就職してくれないが，どうしたらよいでしょうか」と相談したことがありました．そのとき牧先生は，「お前は今の材料工学専攻の先生の名前や研究内容を皆言えるか？」と問われました．お恥ずかしながら，卒業時から情報がほとんど更新されておらず，半分ほどしかわかりませんでした．すると，牧先生に「お前が大学の現状や学生の研究内容も知らないのに，学生に何か訴えられるのか？」と叱責されました．また，「昔は材料系の多くの学生は，大学での研究内容によらず鉄鋼業に就職した．昔と今は何が違うのかよく考えてみろ!!」とも言われました．

牧先生の問いかけは，私に鉄鋼業とはどのような業種なのかについて考えるきっかけを与えてくれました．鉄鋼業は鉄鋼材料の精錬や組織制御の知識以外にも材料系で学ぶ多くの材料に関連する知識や情報をフル活用して製品を作っている業種である，と私は思い至りました．そして，鉄鋼業は材料工学の勉強で得たものを最も生かせる業種の一つだが，学生の皆さんに伝えきれていないのだと気付きました．学生の皆さんには，このような鉄鋼業の魅力を理解してもらえるように心がけるようになり，その結果かどうかわかりませんが，近年では相応の人数の方に就職先として選んでもらえるようになりました．さらには，私自身も鉄鋼材料の研究者である以前に，material scientist であると考えるようになり，材料工学の種々の分野に対して興味を持つようになりました．牧先生の問いかけによって，研究者としての視野が拡がったと感じています．今後，企業側の人間として，材料工学研究と素材産業の発展に少しでも貢献できるようにがんばっていくことが，牧先生への最大の恩返しだと思っています．

牧先生，これまでご指導ありがとうございました．そして，今後もさらにご指導，ご鞭撻のほどよろしくお願いいたします．

最後に，私は家族ともども先生のみならず奥様にもいろいろとお世話になりました．この場をお借りしまして，厚く御礼申し上げます．牧先生と奥様におかれましては，これからもますますお元気で，第二の人生を末永く楽しまれますようお祈り申し上げます．

（JFE スチール（株））

牧先生のご退職に寄せて

宮　本　吾　郎

牧先生に初めてお会いしたのは，私が研究室に配属される2年前，学部2回生の時に居酒屋でアルバイトとして働いていた時でした．四月頃，大学前にあったその店はサークルや研究室の新歓コンパで賑わっていましたが，ある日ひときわ大騒ぎして部屋をかなり汚して帰った研究室があり，その後片付けをしている時のこと．“迷惑掛けてすまんなぁ”と，帰り際にその研究室の教授と思しき方から声を掛けられ，少し話しているうちにその方が材料の教授である事を知りました．その時には名前も存じ上げませんでしたが，後から考えてみるとこれが牧先生に初めてお会いした時でした．こんな激しい飲み会をする研究室には行きたくないとその時は内心思っておりましたが，その後3回生で受けた牧先生の授業の面白さに惹かれ，また金属材料の研究に興味があったこともあり，牧研究室を希望し配属されることになりました．

配属される以前は牧研は厳しいという噂を良く聞きましたが，いざ研究室生活が始まってみると，良く学び良く遊ぶという雰囲気で充実していて，忙しい中先生もお時間を割いて学生と共に麻雀卓を囲んだことも良くありました．夏のバーベキューやお正月の新年会では先生の御自宅にお招き頂き，卒業生，在学生混じって，奥様の手料理を頂いたりお酒を飲んだりしながら，皆で麻雀やゲーム大会をして日が暮れるまで遊び，まるで夏休みやお正月の親戚の集まりのように和気藹々とした雰囲気があったのも先生の人を引き付ける人柄があればこそだと思います．また，韓国で行われた国際学会では，空き時間に学生が四輪バギーに乗って遊んでいるのを見て，先生が乗りたいと言われ，学生と一緒に河原を走り回り，他の研究者や学生から“あの牧先生がバギーに乗っている“と注目を集めておられたこともあるように，先生は好奇心が旺盛で学生と一緒に遊ぶことが本当に好きでした．

このように研究以外の面では，豪快で時に無邪気な先生も研究のディスカッションでは非常に厳しく，なぜそのような結果になったのか，本質的な点を深く突っ込んで質問され，表面的な理解しかしていない私などは，厳しく叱責されて自分の理解の浅さを恥じることが多々ありました．先生は，“鉄の気持ちになって考えるんや“と口にされることがたびたびありましたが，学部，修士の間は，”鉄の気持ち”と言われても良く分かりませんでした．今でも“鉄の気持ち”の理解は先生の足元にも及びませんが，自分の教えている学生に説明する時に“鉄の気持ち”というフレーズを思わず口にしてしまうほど，先生の口癖は染み付いてしまいました．私も，先生と同じく教育者・研究者としての道を辿らせて頂く事になりましたが，現象の裏側にある本質まで突き詰めて解明することを心がけ，いつの日か“鉄の気持ち”が分かるように努力して参ります．

先生との思い出をとりとめもなく記してきましたが，研究室に配属されてからのこの8年間を思い出すにつれ，大学で一生の師と仰ぐことのできる先生に出会えた幸運をかみ締め，ここまでご指導して頂いたご恩に心より感謝しております．最後になりましたが，先生のご健康，ご活躍をお祈り申し上げると共に，今後も引き続きご指導・ご鞭撻を頂きたいと願っております．

（東北大学金属材料研究所）

京都大学エネルギー科学研究科教授　冨井洋一先生は定年退職されました.



冨井洋一先生の御略歴

冨井洋一先生は，昭和18年9月滋賀県にお生まれになり，昭和37年3月滋賀県立膳所高校卒，同年4月に京都大学工学部金属加工学科に入学されました．昭和41年3月に同学科をご卒業後，同年4月に工学研究科修士課程金属加工学専攻，昭和43年4月に同博士課程にご進学の後，昭和46年3月に単位取得退学，4月京都大学助手（工学部・金属加工学教室・溶接工学講座）にご着任になりました．その後，昭和60年3月に「純鉄における降伏前駆現象」により京都大学工学博士を取得され，平成元年5月講師（工学部・冶金学教室）にご昇任，平成2年度より1年半ノルウェー工科大学（NTH）物理化学科・客員研究員，平成8年4月大学院改組に伴い大学院工学研究科材料工学専攻に配置換の後，平成8年10月大学院エネルギー科学研究科助教授にご昇任になり，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に所属されました．平成18年2月には大学院エネルギー科学研究科教授にご昇任，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をご担当され，平成19年3月に定年退職をお迎えになりました．現在，大阪大学客員教授（接合科学研究所）．先生のご研究は，転位と点欠陥のダイナミクスにはじまり，軽金属溶接ほかの溶接工学，マイクロキャラクタリゼーションを中心とした機器分析学，プラズマによる新規物質合成，燃料電池固体電解質および触媒，鉛ビスマス系酸化物高温超伝導体，および材料科学史の研究・教育と，非常に多岐にわたり，（社）軽金属溶接構造協会施工法委員会委員長，同協会アルミニウム溶接検定委員会副委員長，（財）生産開発科学研究所評議員などとしてご活躍，京都府知事表彰，軽金属溶接構造協会論文賞などを受賞されております．また，文部科学省科学研究費補助金，特定領域研究「江戸のモノづくり」（平成13年度～平成17年度）などにおいて数々の国際・国内シンポジウムを主催されました．

冨井先生，お世話になりました！

岩　瀬　正　則

冨井洋一先生は、昭和41年3月京都大学工学部金属加工学科をご卒業後、修士，博士課程を経て，昭和46年4月京都大学助手に任官された．以来，平成19年3月31日に退職されるまで，36年間にわたり，旧金属系教室（現：エネルギー応用科学教室）の教育・研究に尽力してこられた．学部，大学院の9年間を含めると，45年間にわたって金属系教室に在籍されたことになる．ご退

官にあたり，「先生，長い間，本当にご苦労様でした」と心から申し上げたい．かく言う筆者と冨井先生とは，筆者が学部4回生として鉄冶金研究室に配属されたとき，たまたま隣の研究室（旧高村研）に冨井先生がおられたことから始まった長〜い付き合いである．

冨井先生で誰もが思い出すのは，何と言っても，アノ『お声』だろう．「冨井先生に『ちょっと来い』とやられると飛び上がります」という学生・卒業生もすくなくはないはずだ．ドスが効いているというか，なんと言うか.....（と言っても聞いたことのない方にはおわかりになるまいが....）

もっともお若いときの冨井先生は，いまよりはもう少し可愛い（？）お声だったように思う．冨井先生のdeep voiceが始まったのは，25年くらい前だろうか？低音度がさらに増して今のような ultra deep voice になられたのは，数年前のような気もする．

しかし，実像としての冨井先生は，非常に心根のやさしい方である．『冨井先生に卒業論文（修士論文）を書いてもらいました』という卒業生も5人や10人ではあるまい．『冨井先生に足を向けては寝られません』という卒業生もかなりの数にのぼるはずである．

こういう冨井先生は，多くの学生や教職員に愛された．『面倒見のいい先生』，『イチバン人気のある先生』であり，『金属系でもっとも有名な先生』だったとも思う．

冨井先生は，酒席などでは巧みなジョークとアイロニーを交えて，博物学者かとも思えるほどの該博な知識を披露され，座談の名手とも謳われた．動物，植物，鉱物，天文，その他なんでもOK...　水曜会の歴史についても冨井先生の右に出る人はいまい．

冨井先生は，実験技術に関してもまさに名人芸．もっとも各種の評価機器に関する先生の博学ぶりについてご存知でも，冨井先生がガラス細工の名人であることまで知っている方は少ないだろう．筆者は，修士1回生のころ，冨井先生が作られたガラス細工を見て，あまりの巧さにびっくり仰天したことがある．

こういう冨井先生の博学ぶりが，実を結んだのが，冨井先生の最近の新分野＝実験科学技術史である．実験科学技術史とは，その名のとおり史学の一分野と言ってもよい．そもそも史学イコール文献史学ともいうように，従来から史学は文献史料を最重要視してきた．ところが，近世の科学技術史は，文献だけでは如何ともし難い部分がある．これを補完するのが実験科学技術史である．わかりやすいところでは，江戸時代に作られた『万年時計』の再現実験がある．実験の一部始終はNHKテレビで紹介されたし，万年時計は愛知万博に展示されたから，ご存知も方も多いだろう．

研究を愛し，学生をこよなく愛された冨井先生だが，いっぽうでは先生が極端に嫌悪されたものが一つある．学内の公務員体質，役人根性がそれである．民間企業に就職された会員の方々は，あまりご存知ないかも知れないが，現状の大学には，「休まず，遅れず，働かず」の役人根性の教員や，「研究をせザル，教育をせザル，論文を書かザル」の「三猿教員」が蔓延していることも厳然たる事実である．冨井先生は，こういう公務員体質，役人根性に毒された人間を極端に嫌悪された．

「いかなる場合も教官として最善を尽せ」，「教員の本分を尽くせ」，「論文を書け」，「研究費が少ないというのは，研究を放棄する理由にはならん」と，後輩を諭し叱咤激励されたし，場合によっては先輩にも諫言されたように思う．熱烈な「冨井先生ファン」が存在する理由はジツはこういうところにもあるようだ．

長年の大学人生の中では，冨井先生もまま挫折を経験されたと思う．しかし先生は，持ち前の明るさと『英知』で，逆境を跳ね返してこられた．冨井先生とは，いかなる逆境にもめげず，いつも休みなく努力を続けてこられた方である．「めげない，くじけない，努力を惜しまない，真面目で，いつも全力投球」．実は，こういうところに冨井先生の真骨頂があると思う．

冨井先生，お世話になりました．これからもお元気で！

（京都大学大学院エネルギー科学研究科）

冨井先生ご退職に寄せて

堀　山　英　明

1975年春に，金属加工学科溶接工学研究室（水野研）で冨井先生とお会いして，早や32年の月日が流れました．同研究室では先生の懇切なご指導を賜り，三年間の充実した研究生活を過ごさせていただきました．また，社会人となってから今日にいたるまで公私ともにお世話になっております．ここでは，青息吐息で修士課程を修了する間に，心に残った先生のお言葉を紹介させていただきます．

「データはあるのか？」水野研ではアルミ溶接部ブローホールの発生機構をテーマとしておりました．実験結果について先生にご相談申し上げると，その都度「データは採ったのか？」「データで考えろ！」と口癖のように返されました．当時の水素ガス分析装置は手製のガラス細工で，測定にはおそろしく時間がかかりました．ひたすらデータ採取を続けた経験とデータ主義に徹するという教えは，私の人生にとって大きな財産になりました．

「メカニズムはどうなっている？」研究室ではガス分析に明け暮れておりましたが，同時に先生からはメカニズムを追求することの大切さを教えて頂きました．測定

データの考察の際には，メカニズム・メカニズムと呪文のように発声されます．研究とはメカニズムの追求なのだと自然と体得いたしました．その後，工場管理を担当することになりましたが，現場のロスを削減するためにはロス発生のメカニズムを追求しなければなりません．工場管理者として人並みに職責を果たせたのは，「メカニズム・メカニズム」呪文のおかげと感謝いたしております．

「人生はロマンと情熱！」先生からは哲学的なご教示も頂きました．ある時，辻褄の合わないデータに頭を悩ましていると，突然に「人生とは何か？」とのご下問がありました．人生は真実ですとか，愛ですとか，革命ですとか，二人で珍問答が続くのですが，締め括りに先生は「俺はロマンと情熱やと思う」と少年のようにおっしゃいました．そうして冨井先生は，ロマンと情熱のもとに研究者としての道を極められました．

「アンコウ鍋を食わしてやる！」当時，先生は助手をされており，お子様方もご年少だったのですが，学生達の食生活にまでを気を配っていただきました．ある日，研究室の学生達を呼び集めて，ご自宅でアンコウ鍋を振舞われることを計画され，入念な準備をされました．アンコウのあごにフックをかけて体をつるして，柔らかい魚体をさばく「つるし切り」という調理法です．先生の見事な包丁さばきは，一生の思い出となっています．

ご退職に当たり，長きに渡るご厚情に改めて感謝申し上げますとともに，新たなご出発をお祝い申し上げます．趣味も特技も豊富な先生のことですから，ますますお元気で，ますますご活躍されることと信じております．今後とも色々とお世話になりますが，引き続きご指導ご鞭撻のほど，よろしくお願い申し上げます．

（三宝伸銅工業株式会社）

冨井洋一先生のご退職に寄せて

雨 澤 浩 史

冨井先生のご退職にあたり，水曜会会員ではない私に，このような記事を書く機会を与えて頂いたことを非常にありがたく思います．私が冨井先生に初めてお会いしたのは，私が学部四回生の時ですので，今から17年前のことになります．冨井先生にご指導頂いてまず感じたのは，本当に学生思いの先生だということでした．研究相談に伺うと，どんなにお忙しそうにしておられても，必ず時間を割いて下さりました．今でも忘れられないのは，私が博士論文のための実験に用いる固体イオン伝導体の電気化学特性評価装置についてご相談に伺った時のことで，「正確なデータは，精緻な装置と細心の注意を払った実験を通して初めて得られるのだから，どうせ作るのであれば世界にないような精緻な装置を作れ」と仰られ，夜を徹して実験装置の設計にお付き合い下さりました．その時に製作した装置は今でも私の手元で活躍中です．学生をご自宅に呼んで下さることも多く，ご自分で仕入れてこられた鮫鰊の鍋や御留学されていたノルウェーの郷土料理グラーブラクス（サーモンのマリネの一種）など，ご自慢のお料理を振舞って頂いたのもとても良い思い出です．

また若輩だった私は，その気安さから，先生に筋違いの質問やお願いをしに押し掛けたことも度々ありました．そのような時でも先生は口では「面倒なことを言ってきよって」と仰りながらも，その実，面倒臭がらずに，豊富なご人脈からいつも適切な方をご紹介下さりました．先生が留学されていたノルウェー工科大学物理化学科には，その後，私も留学する栄に浴しました．その際も，先方の多くの先生方はもちろん，技官の方，学生に至るまで，皆が冨井先生のことをよく記憶しており，「あの Yoichi の教え子なら」ということで随分と便宜を図ってもらい，大変助かったものでした．

冨井先生には研究に対する姿勢についても多くを教わりました．「すぐに成果の出るような目先の研究ではなく，地に足をつけた研究をすべきである」，「研究のための研究になってしまわないよう，自分の研究がどのように実用化に繋がり得るかをイメージする工学的センスを忘れてはならない」，「研究成果はコンスタントにアウトプットしていかなければいけない」，等々，とかく上滑り的な研究に陥りがちな私を叱咤激励し続けて下さりました．実際に自分が学生を指導する立場になった今，少しでも先生に近づけるよう努力していかなければと痛感しております．

このように冨井先生に頂いた思い出の一部を書き記してきましたものの，実は私，学生時代に在籍しておりました京大の原子核工学科・専攻，その後助手を務めました京大の人間・環境学研究科，そして現職と，公式には一度も先生と同じ所属になったことはありません．それにも関わらず，長年に渡る懇切丁寧なご指導・ご鞭撻を賜りましたこと，本当に感謝の言葉もありません．先生におかれましては，ご退職後も多方面でご活躍され続けられることと思いますが，これからも折にふれ，厳しく叱咤激励頂ければと存じます．先生のますますのご健勝を心よりお祈り申し上げます．

（東北大学大学院環境科学研究科）

冨井先生のご退職に寄せて

蜂 谷 寛

「寒月が来るのかい」と主人は不審な顔をする．（略）

「物理学の演説なんか僕にゃ分らん」と主人は少々迷亭の専断を憤ったものの如くにいう．「ところがその問題がマグネ付けられたノッズルについてなどという乾燥無味なものじゃないんだ．首縊りの力学という脱俗超凡な演題なのだから傾聴する価値があるさ」「君は首を縊り損くなった男だから傾聴するが好いが僕なんざあ……」

（夏目漱石「吾輩は猫である」pp. 94-95：岩波文庫）

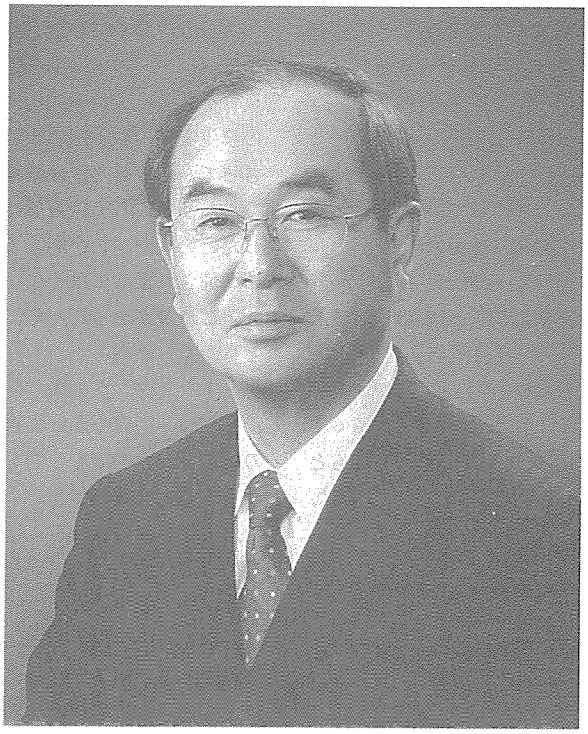
この「寒月」は寺田寅彦をモデルにしていると言われ，上の一節は実在のホウトンの論文（Haughton S: "On hanging, considered from a mechanical and physiological point of view" Philos. Mag. vol. 31: pp. 23-34 (1866)）を漱石に紹介した逸話（寺田寅彦「夏目漱石先生の追憶」（「寺田寅彦随筆集　第三巻」岩波文庫））に基づいているとのこと．話題はその寅彦にはじまり，はるか遠くまで進み，けっきょく様々なお話を伺っているうちにもともと暮れかけていた日も沈み夜も更ける，というのは，冨井先生のお部屋を訪れた多くの方が経験されていることではないでしょうか．一方向に回る石（「ケルトの石」または「ラトルバック」）の話，京大の創生期または三高時代の物理教室の教授の写真の話，など，あげればきりがないくらい多岐にわたるお話とそのおはなしをされる - ただし，夜や週末になってもひっきりなしにお電話がかかってきて対応をされている合間を縫って - その独特の調子とお声が，修士に入り立ての頃に別の研究室の学生としてながら初めてお会いしてからずっと，とにもかくにもつよく印象に残っています．寺田寅彦の「専門分野」が世に知られた随筆・俳句から自然科学，その自然科学のうちでも結晶構造解析，シュリーレン法，地震予知から金平糖の角，ひび割れの形にまでわたることを楽しそうに教えてくださる先生ご自身のお話の話題もまた，次から次へと途切れることはありません．

その先生と，とくに密に関わるようになったのが，当時先生の所属されていた基礎専攻・量子エネルギープロセス分野の助手にわたしが着任し，さらにしばらく後に，半分（いや，本当は半分以上）わたしへの金属材料学の教育を込めて，長年大切に作り上げてこられた材料強度の学生実験のお手伝いができるよう取りはからってくださってからでした．最終講義でご自身の研究を振り返って，最初のころ実験装置はすべて手作りで凝りすぎであったというお話しがありましたが，先生ご自身の入念なご準備されようにはその頃でも非常に凝った手作りの部分（ご自身がおっしゃるような凝り「すぎ」かどうかはともかく）があったかも知れませんが，私やティーチング・アシスタントの大学院生のみなさんが準備するにあたっては，手間をかけて自作をした方がよい部分，多少の費用をかけてでも手間を省いた方が賢明な部分の両方があることを体験できるように気を配ってくださいました．大学院生のみなさんは，必ずしも金属工学・材料工学の学部教育を受けていないことがしばしばで，私自身も学部教育は物理系（理学）だったためトミイ先生の「再教育」が必要だったのですが，修了後に材料科学の知識が非常に重要となるほとんどの大学院生のみなさんにとって，学生実験の学部学生さん達の実習時間とその何倍もの時間をかけている準備のための時間が，非常に得難い金属工学・材料工学の実習を中心とした「集中コース」として，機能していたのだと，つくづく思い返されます．

先生のこれからの益々のご健勝をお祈りするのはもちろんですが，これからの私たち自身が教えをすこしでも活かすことによって，ご恩返しができればと願っております．

（京都大学大学院エネルギー科学研究科）

京都大学工学研究科教授　芦田　譲先生は定年退職されました．



芦田　譲先生の御略歴

芦田譲先生は，平成十九年三月三十一日をもちまして定年退職されました．先生は，昭和四十二年三月京都大学理学部地球物理学科をご卒業になり，同年四月に石油資源開発株式会社に入社されました．その後，昭和六十一年四月には「反射法地震探査技術の高精度化に関する研究」で東京大学工学博士の学位を授与されておられます．同年九月に京都大学工学部講師にご任官となり，昭和六十三年四月に京都大学工学部助教授に昇任，平成八年十一月京都大学大学院工学研究科教授に昇任されて資源工学専攻資源開発講座を担当されました．その後，平成九年六月担任換により同専攻探査計測システム工学講座物理探査工学分野をご担当となられ，その後の専攻改組によって平成十五年四月からは社会基盤工学専攻地殻開発工学講座ジオフィジックス分野を担当として，退職まで至っておられます．

この間学内においては，学生の教育と研究者の指導にあたられ，多くの人材を育成されました．学外においては，（社）物理探査学会会長，日本学術会議第十九期会員，日本学術会議第二十期連携会員，経済産業省国内基礎調査実施検討委員会委員長，経済産業省二酸化炭素炭層固定化技術開発推進委員会委員長等，その他（社）資源・素材学会理事，（社）物理探査学会理事，石油技術協会理事，（社）日本工学アカデミー理事，（財）協和協会理事，エネルギー・資源学会理事，岩の力学連合会理事，もったいない学会副会長，水曜会会長，（社）物理探査学会斜面等健全性検討研究委員会委員長，（社）物理探査学会大陸棚画定研究委員会委員長，地中熱利用促進協会顧問，（財）深田地質研究所理事等の要職に就かれ，関連分野の学術行政に尽力されました．海外においても，多くの国際会議に我が国を代表として出席されただけでなく，平成九年から毎年，物理探査の最近の進歩に関する国際シンポジウムを主宰しておられます．先生はこれまでにわたり物理探査技術に関して多くの業績を挙げておられますが，その主なものは，反射法地震探査の高精度化に関する研究，物理探査技術の土木・岩盤分野への適用に関する研究，石油・天然ガスの供給ピークに関する研究などです．

以上の如く，先生は四十年にわたる地殻工学，物理探査工学などの資源工学の専門分野において，斯学の進歩に大きく貢献されました．現在，自ら設立されたNPO法人「環境・エネルギー・農林業ネットワーク」の理事長として，社会貢献に継続してご尽力されています．

（真田　佳典・三ケ田　均）

思い起こせば

鶴　　哲　郎

思い起こせば今から20年以上も昔のことである．芦田先生に初めてお目に掛かったのは，就職活動のために上京した時であった．当時の私は，といっても今も大して成長していないが，石油を当てる夢を見ながら東京の石油開発関連会社を何社か訪問していた．その時，面談をして戴いた一人が芦田先生であった．確かに，先生には昔から節目節目で大変お世話になってきた．しかし，初対面で言われた言葉は今でも忘れられないくらい心外なものだった．純粋に物探をやりたいと言って会社訪問している当時の私に対し，将来の恩師の第一声は「君は，掘削屋に向いている」であった．その日の面談で覚えているのは，このことだけであり，おそらく面談は短時間で終わったに違いない（笑）．

しかし，不思議なことに，私の学位論文は「掘削時のビット振動を利用する地震探査法」であり，確かに，掘削という技術に非常に興味を持ったのである．初めてお目に掛かってから，15年後に芦田先生の偉大さを身近に感じることになった．学位論文執筆中は，科学的に考えるプロセスが重要だと再三再四具体的に教えていただき，経験と勘を崇拝していた当時の私が科学や理論的考察というものに少しずつ興味を持てるようになってきた．その後，曲がりなりにも何本か気に入った論文を書けたのは，この時の先生のご指導のおかげである．

芦田先生に限らず，私はお世話になった先生に褒められた記憶がほとんどない．その程度の人間であることは間違いないが，幸運なことに，励まして戴いた記憶はとても多い．そもそも，学位を戴いたことやその後に執筆できた論文も，苦しいときに元気を取り戻させてくれる貴重な足跡であり，芦田先生から戴いた掛け替えのないプレゼントである．これからも，多くの人々に変わらぬご教示を与えて戴く事を願って止まない．

（コスモエネルギー開発，昭和56年卒，
昭和58年修，平成10年博（論））

回想・芦田先生

渡　辺　俊　樹

芦田先生が京大に来られたのは私が修士一回生のときでした．考えてみると，現在自分がそのときの芦田先生と同じ年齢になっており，時の流れの速さをあらためて認識させられます．以来二〇年の長きにわたり，ひとかたならぬお世話になりました．

実質的に私が芦田先生の京大での一期生にあたると言えます．初年度の大学院の反射法の講義では，一回の講義でその日配布した分厚い手書きプリントを終えることはまずなく，しかも毎回次へ進むという特急講義でした．ついていくのは大変でしたが，「自転車操業や」とおっしゃって土日に月曜の講義プリントを準備されていた先生の熱意にはあらためて頭が下がります．手書きならではのミスを直したりとプリントを熟読していくうちに，反射法のデータ処理の面白さを学びました．このときの反射法の講義は現在でも血肉となっています．

研究者になってからは，芦田先生が反射法の大家ですから，私はそれ以外のことをすることに決め，自分の興味のおもむくままに研究することを許していただきました．後に芦田先生がよく説かれた言葉の一つに「鑿・鉋でなくて大工になれ」というのがあります．芦田先生は我々に手本を示すかのように名大工（研究プロジェクトのリーダー）から大工の棟梁（国の科学研究政策への積極的関与）へと上っていかれました．一方，私は大工はおろか，鑿・鉋の性能を極めることもせず，鑿や鉋や電動鋸の構造やそれで木が削れる仕組みを調べているように思います．

芦田先生の人間的魅力については指導された学生皆が身をもって感じているでしょうから，あらためてここで述べるまでもないでしょう．私は，直属の上司としての芦田先生から，人と人との信頼関係の築き方，研究に限らず物事を進めるためのグループの作り方を学ばせていただきました．余目，別府，北京，成都などいろいろとご一緒させていただいたことも楽しい思い出です．

先生におかれましては，今後も精力的に活動をお続けになると伺っており，益々のご活躍をお祈り申し上げるとともに，今後ともよろしくご指導ご鞭撻をお願い致します．

（名古屋大学大学院環境学研究科附属地震火山・
防災研究センター，昭和61年卒，昭和63年修）

芦田先生の御退官にあたって

木　口　　努

芦田先生が京都大学工学部に御任官になられたとき，私は探査工学研究室の四回生の学生でした．従って，芦田先生の授業を最初に受けた学生の一人になります．反射法地震探査の講義では，各テーマについて，基礎理論から適用例や計算プログラムまでを含む詳細な講義資料を新たに用意していただき，しばしば講義時間を超過して熱く授業をしていただきました，時には，先生が直接手がけられた石油開発の成功例をまじえていただき，興味深く聴講できました．先生が手書きされた厚いこの講義資料は，現在も，反射法の基本原理などを再確認するときに使わせていただいています．

芦田先生は，学生の控室にもよく来られて，気軽に話をすることができました．学業に熱心であったとは決して言えない私たち同期の学生の程度に似合った話題にも付き合っていただきました．先生がときどき披露されただじゃれのいくつかは今も覚えています．

私が学生の頃は，資源工学科の６つの講座が対抗する早朝野球大会を御所のグランドで行っていました．探査工学研究室チームの成績はなかなか良く，芦田先生も何度が参加されたと思います．カーブも交えた快刀乱麻を断つピッチングで活躍されたことを記憶しています．

学生時代に先生からお聞きした話で，今でも１つが心に残っています．それは先生が学位論文を書かれたときの話です．先生が，ある２つのサイスミックトレースを取り上げ，両者が似ていると記述するために，どうして似ていると言えるのかを定量的に説明し詳細な議論を行ったというエピソードでした．論文で１つの結論を導くためには，他人を納得させる明快な説明が不可欠であるという教えとして私は受け取り，後年になって自分が論文を書くときには，この先生の話を思い出しています．

私が学生だった頃の回想はとりとめもなく長くなります．今後とも芦田先生の益々のご活躍とご健勝をお祈りしています．

（産業技術総合研究所，昭和62年卒，平成元年修）

良師と益友の芦田先生

常　旭

昭和六十一年十一月（1986年11月），私は中国から京都大学大学院工学研究科資源工学の探査工学研究室に留学して来ました．当時，私の指導教官は佐々宏一教授で，同じ研究室の助教授は芦田譲先生でした．昭和六十二年から平成四年までの五年間，佐々先生のほか，芦田先生のご指導も沢山受けました．十五年も過ぎましたが，ときどき先生の姿と言葉を思い出し，すべての事は新鮮で懐かしいです．

その一，私の修士と博士論文の研究内容は芦田先生から直接ご指導頂きました．最初は，芦田先生はご自分で作られた反射地震波モデリングと地震記録表示の２つのプログラムのリストを私に与えました．そのときの私には，そのプログラムは非常に読み難くて，なかなか進められませんでした．その上，芦田先生は毎日“どうですか？”と聞いて，厳しい先生の様子を見せられました．日本語に困ったそのときの私は，頭が水に入ったようでした．でも，その後，私はプログラムを作ることができ，研究の考え方があれば，プログラムを作って目的を実現することが楽しみになりました．芦田先生が私に読ませてくれた２つのプログラムは本当にすばらしいもので，一生忘れられないプログラムでした．

その二，ある日，私のバイクが学校の中で突然なくなりました．とても好きなバイクで，私の大事な生活の足でした．警察に報告しましたが，心が落ち込んでとても悲しいことでした．バイクが見つかったときには，汚れてエンジンもありませんでした．大変困っていたときに，芦田先生からバイクの修理代を出して頂き，奥さんから自家製のケーキも頂きました．困ったときに助けて頂いて，心に暖かくて，一生忘れられない美味しいケーキでした．

芦田先生は日本と中国の友好を進められ，特に，中国の海上での石油開発で業績を上げられました．芦田先生のお子さんたちの名前にまで中国の地名が入っていますし，先生もいくつかの中国語を話せます．芦田先生は中国人の友達が多いです．中国の友達は日本に行くと，先生の家に泊まることもよくあります．平成十六年（2004年），私は学術会議に参加のため日本へ行くとき，芦田先生の家で泊まりまして，明るい奥さんからご馳走をふるまって頂きました．今回，仕事のため，芦田先生の退職記念パーティーに参加できなくて残念でした．

芦田先生は私の“良師益友”と呼ばせて戴きたいと思います．

（中国科学院，平成元年修，平成４年博）

芦田先生の想い出

横田俊之

芦田先生の想い出について書かせていただこうと筆をとり，研究室時代の先生のお姿を改めて思い出そうとしてみると，過ぎ去った平成に入ってからの月日の流れを意識しないわけには行きません．忘却の彼方に去ってしまった（芦田先生のご指導のおかげで，研究室出身以来曲がりなりにも研究を生業とさせていただき，あまつさえ先生の退職間際のお忙しい時期に学位を頂いた私がそれではいけませんね・・・），多くの想い出を紡いで拙文をまとめさせていただくことにします．

1．先生との出会いの頃

芦田先生が，大学に赴任されてきたころ，私は丁度専門課程に上がる頃で，同級生の間では，どの研究室に配属を希望するかが皆の関心事でした．おりしも，資源事務室の掲示板（吉田の校舎は既に懐かしくなってしまいましたね．寂しい．）を覗き込んでいた，私と廣澤安泰君（H 元，H3 修，計測講座出身）に，『資源の学生か？どこの講座に行くんや?良かったら，話を聞きに部屋に来んか？』とお声をかけ下さったのが，芦田先生でした．お部屋では，ご自身が手がけられた中国渤海湾の油田開発のお話を中心に興味深くお話下さるとともに，

昨今の世界のエネルギー事情，今後の日本のエネルギー戦略などなど，物理探査の分野には，今後活躍の場がたくさんあることを熱心にご説明下さいました．その日以降，私の迷いは完全になくなり，同学年35人中12人もが探査講座を希望するという過剰人気の事態になっても，探査講座への配属希望を貫く事となりました．

2. 研究室時代

芦田先生のお話に惹かれて，探査講座への配属を希望した私でしたが，卒業研究のテーマ決定を前にして，芦田先生にはまた一つ驚かされることになります．それは，授業とテキストの充実です．教養部での退屈な授業や何十年も更新されていないであろう旧態依然としたテキストに飽き飽きとしていた私は，先生の実践的な授業内容に非常に魅力を感じました．毎回の授業後には，『与えられた波形の周波数特性を求めよ』，『ゼロフェイズのバンドパスフィルタを設計し，波形に適用せよ』，『デコンボリューションフィルタにより波形を整理せよ』等の実習課題が出され，毎回四苦八苦したものです．今の学生さんたちは，MATLAB などを用いて簡単にできる課題かもしれませんが，当時は，FORTRAN プログラムを自ら書いて計算するしかなく，しかも，PC で FORTRAN のソースコードをコンパイルできる環境でもなかったため，同学年14人（？）もいた探査講座の学生たちは大型計算機センターの TSS に接続できるモデム（音響カップラーでしたか?）を奪い合うこととなったものです．しかし，そのとき身につけた技は，就職してから大変役立ったことはいうまでもありません．

卒業研究と修士論文の研究では，ともに芦田先生に直接ご指導いただきました．いつも，『早く持って来い』とお尻をたたいていただき，何とか完成させる事ができましたが，行き詰る事も一度や二度ではありませんでした．その度，先生にはプログラムのバグ取りから入力パラメータのチェックに至るまで，懇切丁寧にご指導をしていただきました．駄目な事が多かった私ですが，努力を認めていただいた日には，先生は皆に内緒で飲みに連れて行ってくれるとうご褒美も決してお忘れではありませんでした（既に時効ですよね）．そのように，熱心で人情味あふれるご指導のおかげで，今日の私があるのだと，大いに感謝しております．

お堅い話ばかり書いてきましたが，芦田先生のお人柄を知る上では，それは半面に過ぎません．多くの人が，たくさんのエピソードを書いて下さっていると思いますので，重複するかもしれませんが，私もいくつかの楽しい想い出を書かせていただきます．第一に思い出されるのは，資源野球の事です．当時は，各講座対抗の野球大会が盛んに行われており，早朝から御所内の野球場まで出かけていき皆で汗を流したものです（朝寝坊や二日酔いの人間も多く，嫌々ながら参加する者が多かったのですが，プレーが始まると皆必死で，いつも大変に白熱していました）．スポーツのお好きな芦田先生にも参加していただけるよう，最終戦を土曜の早朝に組むよう（当時は週休二日制ではなかった!!）幹事に交渉に行ったものです．芦田先生は，必ずピッチャーをされ，キャッチャーのサインには従わないというプレー振り・・・でしたが，緩急をつけたコントロールの良いピッチングでいつも好投されていました．思い起こしますに，手術後で体調もさほどおよろしくない時期だったはずですが，ピッチャーゴロをさばく時の機敏なフィールディングはそれを全く感じさせないものでした．

また，先生は積極的に学生たちとの触れ合いをなさるお方でした．学生たちの部屋に，立ち寄られ，さまざまなお言葉（おやぢギャグともいう）を残していかれる事もしばしばでした．研究に疲れた学生たちにとっては疲れを癒す（増す？）ひと時であったと思います．数多くのお言葉は『謹言』として辻 政志 先輩（S62，H 元修）がまとめておられたと思いますが，散逸してしまったのでしょうか?残念です．卒論や修論の締切り間際になると，『あんたカチカチ山やで』と嬉しそうに学生に声をかけられていた先生のお姿が目に浮かびます（芦田先生の下で長らく助手をしていた S 君（H7，H9 修）によると，ぶんぶく茶釜だったそうですが私の記憶ではカチカチ山です．バージョンアップしたのでしょうか？）．それは，芦田先生一流のはっぱのかけ方だったのでしょうが，純真な学生にしてみるとそれはかなりの精神的な重圧であり，大いに鍛えられた苦い記憶として心に残っています．

3. 研究室を離れてからの先生との交流

研究室時代には，立ち居振る舞いから箸の持ち方まで，細やかなご指導をいただきましたが，私が研究室を離れてからはなかなかお会いする機会も少なくなり，たまにお会いしても，先生は他の多くの方々といろいろなお話にお忙しく，学会の懇親会の場などで『学位論文は何ページまで進んだ？』という毎度の問いかけ以外には，ゆっくりとお話させていただく機会もありませんでした．その様な中でも，学会で発表するたびに，発表内容に関する短く的確なコメントを欠かさず頂き，研究の方向性決定に大いに参考にさせていただいたものです．

そのような関係が一転したのは，芦田先生が物理探査学会の副会長になられた頃でした．当時会長をされていた，故 大矢 暁氏と芦田先生は，物理探査学会の国際化推進に力を入れておられ，欧州の EAGE や豪州の ASEG との協定が矢継ぎ早に結ばれておりました．私は当時国際委員の末席に加えていただいたばかりでしたが，2001 年の ASEG ブリスベーン大会に参加させてい

ただき，協定調印の華やいだ雰囲気に身を置く事ができ，嬉しく思ったものです．

2003年のASEGアデレード大会では，日豪韓三国共同で学会誌を作成しようという前代未聞の事業の立ち上げ会議が行われ，最後には芦田先生の鶴の一声でこの事業が開始されることとなりました．芦田先生には国内の準備段階から常に強力なサポートをいただいたおかげで，この出版物は無事に発刊され，その後毎年一回ずつの発行を続け2007年2月号でついに4回目の発行となります．このアデレードでは，ワイナリーで有名なバロッサバレーへのドライブ，世界各国からの30名以上のゲストを招いた芦田先生主催の（！！！）Farewellパーティーなど楽しいイベントが盛りだくさんでした．

2004年のASEGシドニー大会も最初から最後まで楽しい想い出で一杯です．朝ホテルに到着すると，偶然にもロビーで芦田先生と関西大学・楠見先生のご家族がシドニーの町へお出かけになるのと出くわし，チェックインもせぬまま，ご一緒させていただきました．シドニー湾クルーズには家族割引があることを聞かれた芦田先生は，私を楠見先生の息子だと主張され，家族割をゲットしようと試みられましたが，係員のオーストラリア娘もそこまで甘くなく，あえなく失敗いたしました．芦田先生の茶目っ気たっぷりなお人柄を良く表すエピソードだと思います（私が髭をそっていなかったのが敗因って本当ですか？）．また私は，三晩とも同じ高級中華料理店で食事をさせていただきました（これも芦田先生の茶目っ気たっぷりのご配慮のおかげです）．ラストサプライズは，閉会式で私のベストポスター発表賞が発表されたことでした，芦田先生もわが事のように喜んでくださり，本当に感激いたしました．

それ以外にも，デンバー，ソウル，バンコク等で楽しい日々，那覇での針の筵のような一晩をご一緒させていただきましたが，全てを紹介しているときりがないので，それらにつきましては割愛させていただきます．

4. そして未来へ

芦田先生の面倒見の良いお人柄については，拙文でも触れましたし，他の多くの方々も書かれることでしょう．最近，芦田組の親分と自称されておられますが，先生のその面倒見の良いお人柄や，肝の据わった会議での交渉ぶりなどから，周囲も納得ずくのことだと思います．そして，芦田親分に代わる人物が当分現れないであろうことも，衆目の一致するところでしょう．

芦田先生におかれましては，この度京都大学の教授職を辞される事となりましたが，我々にとっては，何者にも変えがたい存在である事は今後とも変わる事はありません．お体には十分お気をつけ下さり，今後とも我々後進に対して厳しく，優しい，ご指導ご鞭撻のほどよろしくお願いいたします．先生のますますのご活躍を祈念いたしまして，筆を置かせて頂くことにいたします．

（産業技術総合研究所，平成元年卒，
平成3年修，平成19年博）

芦田先生の言葉と姿勢

中 内 啓 雅

私が1993年に大阪ガスに就職してから，水平ボーリング手法を用いたガス配管敷設方法である非開削推進工法について委託研究をお願いし，快くお受けいただきました．本研究は，小口径の水平ボーリングマシンのドリル先端に超小型の地中レーダを用いて推進中リアルタイムで前方探査を行うものでした．得られた地中レーダ情報は解読が大変難しく，自動的な反射信号情報解析ソフトが望まれていました．このソフト開発に先生にご協力いただき，その成果は1998年より始まったインテリジェント非開削（1998～2003経済産業省より日本ガス協会が受託した国家プロジェクト）にも大きな波及効果をもたらしました．その他の国家プロジェクトの外部評価委員として任命され，その評価結果は日本全国の都市ガス事業者の技術開発の活性化につながっていると確信しています．

その頃に学会での発表をようやく数こなせるようになってきたこともあり，「学会での発表で研究の成果を示すことが先生への恩返しと思ってがんばっています．」と何かの会食時に先生へお伝えしたことがありました．ところが先生から逆に「本当の恩返しは学位をとること！」との言葉があり，以降の私の姿勢が一転し，学位申請のきっかけとなりました．学位取得までの道のりは決して平坦なものではありませんでしたが，お忙しいにも関らず私の相談に乗って下さり，数多くのディスカッションにてコミュニケーションをとる姿勢を貫いて頂きゴールへと導いて下さいました．

思い起こせば1995年の梅雨時期に大阪市内でフィールド実験が計画されたことがありました．当日は大雨である上に風も強く最悪の天候だったと記憶しております．徒歩で40分程度かかったと思いますが，先生はデータ取得のために研究室の学生10名を引き連れ，重い測定器を手に持ち，びしょぬれになりながらテストフィールドへおいで下さり熱心に実験を指示されていた姿が目に焼きついていると同時に，研究への姿勢に感銘を受けました．

スポーツの思い出としては，私が学生時代であった1990年にさかのぼり，講座対抗の軟式野球が挙げられます．朝早くの試合にしり込みする学生が多い中，先生は進んでピッチャーをされており，当時からの先生のス

ポーツへの姿勢も鮮明に記憶しています．文武両道の点も是非見習いたいと思います．

その他，プライベートな点（進学・就職・結婚式・・・）でも書きつくせないほどお世話になった場面がありますがこのあたりで筆を置かせて戴きます．

（大阪ガス株式会社，平成3年卒，
平成5年修，平成18年博）

君らはどこに井戸を掘る

真　田　佳　典

私が資源工学科に入学後，入学ガイダンスやいろいろな講義で他の先生方と同様に芦田先生をお見かけしていましたが，やはり印象的なのは探査工学演習（講義名は確かではありません）の時です．先生が反射法探査の断面を見せながら，君らならどこに井戸を掘る？とたずねられました．まだ，反射法について少し講義で聞きかじったばかりで石油探査について全く知識のない我々学生の一人が，当てずっぽうにここですと言うと，「あー，あんた1億円損したな」，とニコニコとおっしゃられ，我々学生一同はきょとんとしていました．その後，石油がどのようにできるのか，どのような構造を貯まるのか，石油の探査や開発には多大な費用がかかることなど説明され，納得すると同時に実際の探査というものに非常に興味を持ちました．その後，私は研究室配属で探査工学研究室を希望し，卒業研究，修士論文，博士課程と長い間，面倒を見ていただくことになりました．その間，多くの原稿や発表資料を見ていただきましたが，論理の組み立て，語句の訂正，図表の見やすさなど，大局から細部に至るまで，研究者の礎となる多くのことを学びました．

私は博士課程修了後にはシュルンベルジェ社に入社にしましたが，お声をかけていただく幸運に恵まれ，今度は研究室の助手として働くことになりました．先生は学生に対して，研究だけでなく生活態度や就職活動など社会で重要なことの多くのことをご指導されていました．また，学外でも精力的に活動されていました．よく話されていたお話に，「水を出すには水源地から造る必要がある」，「木をみて森をみないでは駄目である」，「パイを独り占めするのではなくパイを大きくする」というお言葉がありましたが，自分のことや目先のことだけを考えるのではなく，物理探査やこの業界全体を長い目で見てよりよくしたいという意気込みに協調され，先生と共に仕事を進められてきた方も多いと思います．私もこれらの機会に，社会人として，また学術に携わる者として，多くのことを教えていただきました．

このように，芦田先生のパワフルなリーダーシップとお人柄に，私をはじめ多くの人たちがいつも引き寄せられて，先生の周りにはいつも明るい笑顔が満ちておりました．退職後，NPOでご活動されると伺っておりますが，今後も益々ご健勝でご活躍されることをお祈り申し上げております．

（（独）海洋研究開発機構，平成7年卒，
平成9年修，平成12年博）

芦田先生

林　　樹　海

京大では大変お世話になりました．中国には「吃水不忘挖井人」（掘るという意味）ということわざがあります．意味は「水を飲むとき，井戸を掘る人を忘れません．」です．先生に学問を習っただけでなく，人生の先生としてもいろいろ教えていただけました．ですから先生のおかげでいまのわたしがいます．先生のご恩は一生忘れません．

中国で退職になったらまた第二の人生が始まるという説がありますから，先生が更に素晴らしい人生を歩まれるように心からお祈りします．

（中国地質大学，H16 博）

芦田先生の思い出

白　石　和　也

学部二回生むけ授業「地下調査法」が芦田先生と出逢い，私がその後物理探査学を学ぶきっかけとなりました．膨大な量のOHPと殴り書きされた（ように見える）板書でとても強いインパクトを受けたのを覚えています．その後，4回生で研究室配属されてから卒論＋修論＋博論と6年もの長きにわたり研究指導をして頂きました．研究室でのゼミ発表の際には，私が頑固者で他の学生のように素直でなかったために芦田先生と意見を戦わせることも多々ありました．また，私が博士課程に進学する際に研究室を移籍した後も機会ある毎にご助言を頂きました．これまで厳しいお言葉を幾度となく頂いてきましたが，それらは芦田先生がお持ちの深い人情から出た言葉であることが今は身にしみてわかります．近年は，学外での活動がお忙しく，多くの分野にお持ちの人脈を活かしさらにそれを広げながら，現代社会をより良くしようとご尽力されておられました．大学がそれぞれの研究成果を携えて社会に対してどう働きかけていくべきであるのか，これからの新しい大学教授像を示してくださったと私は感じております．今後も，まだまだ現役で多方面において活躍されることと思います．これから社会で活躍していくこととなる若い人材に対してこれか

らも厳しいお言葉を頂ければ幸いと存じます．

（石油資源開発（株），平成14卒，
平成16修，平成19博）

芦田先生の学生に対する指導

加　藤　政　史

私が芦田研に配属されて，今年で6年目になります．学生としてご指導頂いた期間は先輩方を含めて一・二の長さではないでしょうか．学生の能力や志向は年度によって千差万別であり，一貫した指導が困難なことと思います．私は学生という視点から考えて，芦田先生の良い所は，出遅れている学生を優先的に指導することにあると思います．芦田先生本人が掲げていることではないですが，私はこの理念に感銘を受けます．大学生ともなればやるべきことはわかっている，と思われがちですが，出遅れている生徒にやるべきことは見えていません．事実私がそうでしたから．4年生の卒論発表会の練習をゼミで行ったが，5人中やり直しを命じられたのは私だけでした．今思えばわかることかもしれませんが，少なくとも当時の自分には何が悪いか分かっていませんでした．しかし，それが学生の本質だと思います．結局，芦田研には人情がある．私は，大学の研究室でこのような指導を受けることができたことが意外でした．これは博士課程に進みたいと思った理由の一つです．だから，いつか私が芦田先生のように偉くなった時，「私が大学に入って，研究室配属後一番出遅れたときに芦田先生は，自分一人のために指導して下さったんだ」と自慢したいと思います．

（京都大学大学院工学研究科博士課程3年，
平成15年卒，平成17年修）

芦田先生と私

前　島　裕　一

平成17年4月，私がジオフィジクス研究室に配属後，既に2年が経過しました．学部在学中の講義では，芦田先生は驚くべき速度の板書の合間に自信に満ちた発言を繰り返されておりました．そのため，少し近寄り難い先生だと私は勝手に思い込んでいました．いざ研究室に配属され，直接お話をさせて戴くと，先生は大変面倒見が良くそして気さくな方であることがわかり，自分の人を見る目の無さを痛感したことを覚えています．私は研究を直接見ていただく機会にはあまり恵まれませんでしたが，ゼミの質疑応答では数々のご指摘を頂くことができました．言いたいことは何なのか，それをどう説明していくかについて考えさせられることばかりでした．

偶然，学生の私が先生をお送りする立場になりました．突然学生部屋に入ってこられては雑談を始める先生にお目にかかる機会が失われるのは大変寂しいことです．これからは先生が作り上げられたジオフィジクス研究室の良いところを，力不足ではありますが受け継いでいきたいと思っています．

（京都大学大学院工学研究科修士2回生，平成18年卒）

芦田組！

武　川　順　一

私が芦田先生に初めてお目にかかったのは，私が関西大学の修士一回生のときでした．その時，私はトンネル切羽前方探査に関する研究を行っておりました．楠見先生に連れられてお会いた芦田先生の第一印象は，「とても怖そう」な先生でした．しかし，博士課程に入り先生の下で研究を進めていくうちに，「怖そう」という印象は多少残るものの，とてもアットホームで親しみ易い先生であるという印象に変わっていきました．就職に関しましても，芦田先生にはとても親身になって相談に乗っていただきました．私が企業の面接で失敗し夏前になっても就職先が決まっていないときも，すぐに次の場所を紹介して頂きました．もちろん，私以外の学生に関しても同様に，我がことのように親身になって相談に乗っておられるお姿をよく拝見致しました．「芦田組」という言葉を先生はよくお使いになられますが，先生の誰に対しても親身になってご相談下さる親分肌に触れておりますと，その言葉の意味がよくわかるような気が致します．

今回，私は芦田先生の教師生活最後の年に博士課程を修了するという，非常に大きな幸運を得ることができました．私の教育における最後の恩師が芦田先生であったことを一生の誇りにしていきたいと思っております．また，その名に恥じないように，先生の御教えを忘れずこれからも頑張っていきたいと思っております．

（財団法人　地域地盤環境研究所，平成19年博）

芦田先生ご退職に寄せて

佐　伯　龍　男

私が芦田先生とお話をさせていただくようになったのは，先生の周囲におられた方々とのご縁がきっかけです．私が初めて芦田先生にお会いしたのは，十数年前の三月のことです．理学研究科の修士課程に在籍していた私は，すでに修士論文も提出し，四月から石油公団に就職することになっていました．京都を離れるということもあって，残りの日々を過ごす中で，弓道部の同期であった渡

辺俊樹氏の研究室に遊びに行った際に，芦田先生が部屋に入ってこられたので紹介していただきました．就職のことをお話しすると，そうか，がんばりなさい，と声をかけていただいたことが印象に残っています．

その後，しばらくはご縁のない状態が続いていたのですが，六～七年たって，石油公団の先輩であった鶴さんの後を引き継いで物理探査学会の会誌編集委員となったことから，その当時編集委員長であった芦田先生のお手伝いをさせていただく機会に恵まれました．月一回程度ではありましたが，編集委員長としての芦田先生の指導力と行動力，かつ，細やかな心配りと目配りには圧倒される思いで，その後も，ワンデーセミナーの講師のひとりとして京都にお呼びいただいたり，あるいは，仕事や研究のことでもいろいろと相談にのっていただいたりと，大変お世話になってまいりました．

私自身は，直接の教え子ではないという遠慮も多少あったのですが，先生とお話していると，そのようなことは些細なことと思えるほど，終始ざっくばらんに接していただき，学位論文の指導まで引き受けていただきました．

以前，ちょっとした雑談の折，ご多忙にもかかわらず，私の論文の指導にまで時間を割いていただくことにお礼を申し上げた際にも，あたりまえのことをやっとるだけやないか，とこともなげにおっしゃられ，どれだけ忙しくとも，後進の研究者・技術者を育てることは，自分の使命だといった意味のことをお話になり，まことに頭の下がる思いでした．

先生の闊達なお人柄は，皆さんご存知のことで，私がことさらご紹介するまでもないと思いますが，石油業界に在職する私が，芦田先生の魅力をあげるとすれば，研究面だけではなく，実際の石油天然ガスフィールドでの実績も残されていることです．技術というものが実際の現場で役立つということを，目に見える形にすることは，きわめて重要なことです．現在は，三次元探査技術などの進歩によって，我々のような後進の者でも，技術力をアピールし，かつ貢献できる状況が形づくられてきておりますが，その先達が芦田先生であると思います．

先生の情熱と信念は，今後もずっと，我々を導いてくれるものと信じてやみません．

（独立行政法人　石油天然ガス・金属鉱物資源機構，平成19年博）

芦田先生の思い出

尾　西　恭　亮

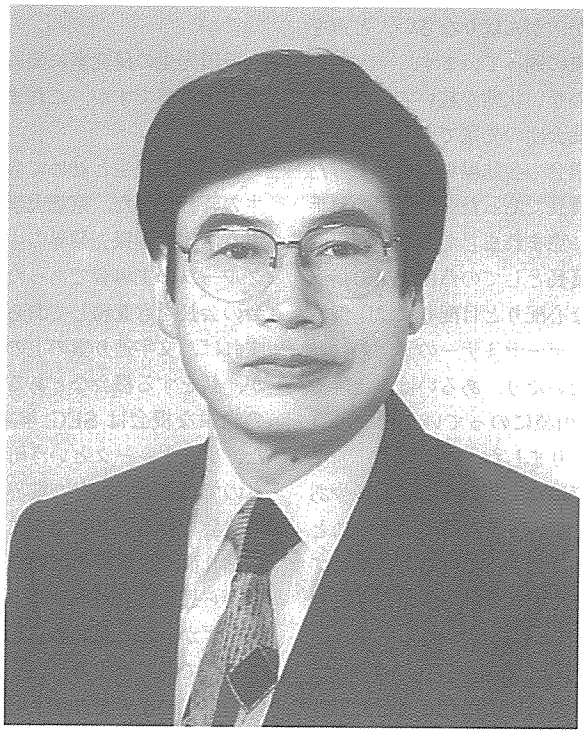
芦田先生の研究室に配置転換となったのはご退職わずか１ヶ月前ですが，これまでの感謝の意を込め，筆をとります．

私が芦田先生と初めて会話を持てたのは，他大学の学生の時分でした．京都大学はしも押されもせぬ高い実力を有する物理探査業界の中心に居する大学で，その研究グループの主導者であった芦田先生は当時，物理探査学会の会長をも兼務しておられました．他大学の学生からすれば，文字通り雲の上の存在．とてもではありませんが，話をする機会などあるはずはないものでした．突然の光栄な機会は SEG 年次大会で得ることになりました．ソルトレークという町に集まった日本人の数は多いものではなく，高名な業界の方々と食事を共にする多数の機会を得ることができました．芦田先生にはポスターの貼り直しや発表の問題点の指摘など，人となりを知る今から思えば合点がいくものの，当時は分不相応の恩恵にあずかったと思い恐縮したものです．他人小人に対しても素で熱く接するのが先生の人望のひとつだと思います．門下のまとまりがよいのもうなずけます．

もうひとつ．とある先生の退官記念会の際に芦田先生に直球で注意を受けたことを鮮明に覚えています．当時も学生で，いろいろ小間使い役をしていたのですが，忙しさのあまり歯で割り箸を割ったのです．しつけに分類されるべき行動に対し，指導教官からさえ注意を受けたことはないのに，と書くのも奇妙なものですが，とにかく，品格欠く行動に遠慮無く注意を受けたことに対し深い感動を覚えたものです．社会人となり，叱られるべき対象は一般的な品行だけでは済まないことを痛感しております．今後は NPO を立ち上げ，幅広く活動されると聞いております．悪ガキを叱る人情深いかみなりおやじが物探町内から少し遠ざかるのは残念でありますが，さらなるご活躍をお祈りいたします．これまで本当にお疲れ様でした．今後も未熟な我々を叱り飛ばし，物探業界の発展のためにぜひともご指導ください．

（京都大学大学院工学研究科ジオフィジクス分野助教）

京都大学工学研究科教授　村上正紀先生は定年退職されました．



村上正紀先生の御略歴

村上正紀先生は，昭和41年3月京都大学工学部冶金学科を卒業後，京都大学大学院工学研究科修士課程冶金学専攻を経て，同46年3月京都大学大学院工学研究科博士課程冶金学専攻を単位修得退学されました．同年7月には京都大学より工学博士の学位を授与されました．同年6月に米国カリフォルニア大学工学部研究員に採用され，同50年2月米国ＩＢＭワトソン中央研究所研究員になり，同58年12月に米国ＩＢＭワトソン中央研究所薄膜材料部門マネージャーに昇任されました．平成2年8月に京都大学工学部教授に採用され，溶接講座を担当されました．その後大学院重点化に伴い，同8年4月に京都大学大学院工学研究科材料工学専攻材料プロセス工学講座を担当されました．平成19年3月に定年退職され，同年4月に京都大学名誉教授になられています．また，同年4月から立命館副総長としてご活躍されています．

先生はこれまで30数年間にわたり，数々のナノ金属薄膜材料の異常現象の発見をなされ，これらの現象の機構解明と共に実用材料への展開にも従事され，多くの業績を挙げでこられました．その主なものは，「超微細結晶薄膜材の超弾性現象の発見と高強度機能材料開発」，「逆原子拡散現象の発見と低接触抵抗電極材開発」，「粗大結晶粒成長機構解明および表皮膜自己形成現象の発見と高伝導銅配線材料開発」等です．これらの研究成果を250編の学術論文として発表され，これらの功績に対して，ＩＢＭ創造賞，ＩＢＭ発明功績賞，ＩＢＭ開発賞，W.ホフマン国際記念賞，ジェフリース賞，日本金属学会功績賞，増本量賞，谷川・ハリス賞，日本金属学会功労賞，および文部科学大臣表彰科学技術賞等が授与されています．

以上の如く村上正紀先生は30数年間にわたり薄膜材料の基礎分野の開拓に大きく貢献され，それらの基礎研究を半導体デバイス用の電子材料開発に応用展開されてきました．特にコンタクト工学の新領域への展開においては指導的役割を果たしてこられました．

さらに，学外においても，日本金属学会の会長を始めとする多くの学協会の要職，日本学術会議，文部科学省，経済産業省での数々の委員会の委員長，財団法人の常任理事，評議員を歴任され，日本の材料研究･開発指針構築の政策面でも多大な貢献をされてこられました．

（伊藤　和博）

村上正紀先生有難うございました

小　出　康　夫

村上正紀先生に初めてお会いしたのは，私がまだ名古屋大学助手であったころの平成4年春の応用物理学会講演会時とその後に誘って頂いた中華料理屋での懇談の時でした．当時先生はIBMワトソン研究所から京大に戻ってこられ，半導体デバイスの電極材料開発研究を中心とした新しい研究室を立ち上げている最中であったと思います．16年間ワトソン研で世界的に活躍してこられた先生を前に，半導体の結晶成長や金属／半導体界面の研究への熱意やポリシーを熱く生意気に語らされてしまったことを思い出します．後で振り返りますと，この時から人事面接が既に始まっていたのだと思います．これをきっかけに平成5年4月より村上研究室の助教授として赴任し，平成14年4月までの9年間をご一緒に研究させて頂きました．

私の出身が電子工学科で材料工学の専門ではないにも関わらず，自分にない学問的背景を持つ人を敢えて研究室スタッフとして迎えたいとの先生の言葉を印象的に思い出します．先生は電子工学の専門家ではないとよく仰っていましたが，半導体／金属界面の物理化学には深い憧憬をお持ちで，私自身も色々なことを教えられました．更に状態図や拡散現象の基本概念と薄膜への応用展開を深く教えて頂きました．先生の研究手法は一貫して，半導体デバイスの性能や信頼性を材料工学的な視点で見るという点で，当時の電気屋を中心とする半導体研究分野に新しい新風を吹き込んだものと思われます．先生と一緒に研究させて頂いた9年間で，私の研究姿勢も大きな影響を受けたと思います．現在でも，結晶成長とデバイス開発を進める上でも，常に材料学的な目で特性を見る重要性を忘れないように努めています．

村上正紀先生，ご退官後も立命館副総長として学園運営に携わり，更には我が国の科学技術政策のご意見番として更なるご活躍を心より期待致しております．

（物質・材料研究機構グループリーダー）

村上先生の今後のますますのご活躍を！

奥　　健　夫

村上先生に採用していただいたのは，村上先生が京都大学に来られて，まだ二年も経っていない頃でした．当時は村上先生が大槻先生とともに，新しい研究室を作り上げておられた創世期でした．京都にお伺いしたときには，村上先生や大槻先生のご自宅に泊めていただき本当にお世話になりました．ありがとうございます．

村上先生は，アメリカで長く過ごしておられたので，考えかたが非常にロジカルで大変気持ちよく，また細やかな気配りも行き届いていて，日常生活から研究生活まで何から何までお世話になりました．特に研究面でのロジカルな考え方をたたきこんでいただいたことは，本当にありがたいことであると深く感謝しております．

村上先生からは新しいテーマをいただき，それを立ち上げるようにとのご指導をいただきました．正直，なかなか目覚ましい成果もでず，学生さんともども苦しい時期が続きましたが，続けていると何とかなるものです．村上研でのこのときの新規研究立ち上げの経験は，何物にも代えがたいもので，現在でも新しいテーマにも抵抗なく立ち向かえる大きな原動力となっております．もちろん当時は，そんなことはわかるはずもありませんでしたが，目覚ましい成果がでなくても村上先生に粘り強くご指導いただいて，学生さんともども成長できたと思います．

ジーンズでさっそうとお若い姿で，アメリカ仕込みの英語とパフォーマンスでスタッフや学生をぐいぐい引っ張り，ゴルフはプロ級，ジョークは超一流と，とにかく大学人らしくない雰囲気で，そのような研究室で過ごさせていただいたことは，非常に貴重な体験でした．村上先生の最終講義でも，大いに笑わせていただきながらも，研究だけにとどまらない懐の広さや内容の深さに改めて感服した次第でした．

いまや，村上研で鍛えていただいたこと，村上先生に教えていただいた様々なことを，学生に教える立場になっております．当時よりもむしろ，時間が経つに従って，村上研究室に在籍させていただいことの幸運がじわじわとわかるようになってきた今日この頃です．

村上先生は現在でも心身ともに非常にお若いので，新天地でのご活躍のご様子をお伺いできることをとても楽しみにいたしておりますとともに，今後のますますのご健勝をお祈り申し上げます．

（滋賀県立大学　教授）

村上正紀先生の退官によせて

内　堀　千　尋

学生が研究室配属を希望する四月にはまだ村上先生はご赴任の前で，新しい教授の情報が何も無い不人気な研究室であったため，留年生だった私は，いわば残り物を引く形で当時の溶接研に配属となりました．院試も終わって程無く，研究室の立ち上げのため古い装置の廃棄と掃除が始まり，村上先生もジーパン姿で学生達に混じって汗を流されていました．ある時は新任教授を訪問に来られた企業の方が，学生と間違って村上先生の所在を尋

ね，「先生は忙しくて部屋にいらっしゃいません」と先生自らがお答えになったこともありました．やがて真空装置を初めとする実験装置が米国のIBMの研究所から届き，米国より装置の使い方を教えに技術者がきてくれたために，研究環境が急速に立ち上がっていきました．企業の中でこのように装置や人を動かすことがどれ程難しいことかを考えると，先生がIBMでいかに辣腕を振るっていらしたかが伺えます．

学生生活の間には，せっかく長年米国で過ごしてこられた先生の元にいるのだからと我々も希望し，英語の指導にも力を入れていただきました．当時の我々の英語は，Lavatory(便所)はどこだという問いにLaboratory(実験室)はここだと答え，猫舌を説明するのに「私はCat(猫)tongue(舌)を持っている」というレベルで，毎月の月報や論文を添削指導する先生のご負担はさぞ大変だったことと思います．時々は朱が入らずに戻ってくることもあり，英語が上達したかと喜んでいると，これは「直しようがない」という意味であることが分かり，がっかりしたものです．もっとも，朱が入ったときには原形をとどめていないことも多くありました．現在は米国で仕事をしていますが，曲がりなりにも英語を使って仕事ができているのも先生のご指導のお陰と感謝しております．また，先生の人脈を頼って，IBMワトソン研究所，AT&Tベル研という半導体研究のメッカと呼べる場所を大学院生5人で訪問したことも思い出されます．当時NHKで放送していた「電子立国日本の自叙伝」の中で紹介されていた場所を実際に目にした時の感動は刺激的で，貴重な体験でした．

私はその後，博士課程を経て，一度は社会に出るという不文律のもと，企業研究者の道を選びました．大学を離れて10年以上経ちますが，なかなか独り立ちは難しく，テキサス大学への留学や米国での研究に際しては先生のお手を依然として煩わせています．というより，米国で仕事をする限り最終的には先生の人脈につながることが分かり，お釈迦様の手のひらで踊る孫悟空の気分になるといった方が正しいかもしれません．京都大学を離れ，大所高所からのご指導をされるように聞きました．くれぐれもお体はご自愛いただきたいところですが，特に科学技術分野で世界の中での日本のプレゼンスを高めるため，先生の今後のご手腕を存分に発揮されることをご期待いたします．

(米国富士通研究所)

村上正紀先生のご退官に寄せて

守 山 実 希

時の経つのは本当に早いもので，村上先生に初めてお会いしてから十年が経とうとしています．助手として村上研究室に在籍した六年の間には，研究のイロハを叩き込んで頂いただけでなく，他の研究室ではなかなかできないような貴重な経験をさせて頂きました．これらは自分にとって掛け替えのない貴重な財産になっています．その後，民間企業に勤めるようになり，半導体デバイス開発の現場で悪戦苦闘しながらもなんとか無事に過ごす事ができているのも，村上先生にご指導頂いたおかげです．本稿では，先生への感謝の意を込めて，私の手元に残っている助手時代の研究ノートや先生に頂いた資料の中でも，特に印象的な一つのメモに関するエピソードをご紹介させて頂きたいと思います．

そのメモは私が村上研の助手に着任して半年ほど経った1998年12月に，私の研究テーマの進め方について始めて本格的に先生と議論した時に書いたものです．簡単なポンチ絵に「自己形成バリア材」という名称が書き込まれたこのメモが，なぜ私の印象に残っているのかをお話する前に，研究の背景を簡単に述べたいと思います．私が先生から頂いた最初の研究テーマは「Siデバイス用Cu配線に対する拡散バリア材の開発」でした．Siデバイスの微細化に伴う配線抵抗の増加および信頼性低下を解決するためには，それまで配線材に使われていたアルミニウム（Al）を銅（Cu）に変更する必要があります．しかし，デバイスを正常に動作させるためにはSi基板へのCu原子の拡散をほぼ完全に抑制する技術を確立しなければならず，“二十世紀中のCu配線実用化は不可能”とさえ言われていました．村上先生は，Cu配線実用化の鍵を握る拡散バリア材の開発に早くから着目され，材料学的な観点からCuの拡散防止に有望な材料の探索を行うことにより，実用化に必要なバリア性を十分に満足するわずか8 nm厚の窒化タンタル（TaN）バリア材の開発に成功しました（この成果は1995年3月30日の日刊工業新聞にも大きく取り上げられました）．村上研の成果発表から2年以上経った1997年の秋には世界初のCu配線実用化が米IBMによって発表され，現在に至るまで多くの企業でCu配線への移行が進められています．TaNバリア材はIBMをはじめとする主要半導体メーカーのCu配線プロセスに採用されており，Cu配線実用化のkey materialとなっています．

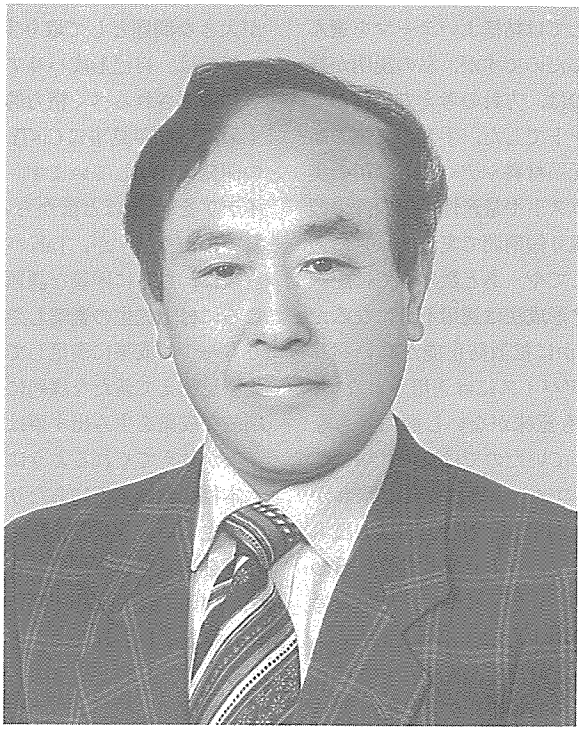
私が村上研の助手に着任したのはIBMの発表直後の1998年6月のことです．最初は村上先生の講演資料やレビュー記事の執筆を通じて技術背景を学んでいました．半年ほど経ったところで先生から，そろそろ自分で研究テーマを考えるように言われて迎えたのが，前述のメモをとった12月の打ち合わせでした．当時のバリア材の研究動向はTaNよりもさらに高い耐熱性をもつ新規のバリア材料の探索が中心でしたし，材料探索のための実

験手法が研究室に確立されていましたので，研究テーマには3元系合金や新たな高融点材料を使ったバリア材の開発を選びました．自分としては結構よいテーマを選んだつもりで打ち合わせに臨んだのですが，私の説明が終わって先生がおっしゃったのは，方針の考え方自体がなってないというようなコメントでした．手元のメモの断片をつなぎ合わせると「3元系材料やデバイス適用の実績が全くない材料は，製造コストや量産性・信頼性の観点から，余程のことがない限り短期間で実デバイスに適用される可能性は低い．ましてや，あと数年たてば配線微細化が進んで既存のバリア形成法は適用不可になるだろう．つまりTaNよりも遥かに拡散防止能が高いバリア材を見つけても，結局実デバイスには適用されない．使われないものを開発しても意味がないし面白くもない．周囲と同じことをまねしていたのでは良い仕事はできない．」というようことをコメントされたことがわかります．なるほどと感心しながらも，当時の私は知識も経験も不足していましたので，コストとか量産性と言われても…と思う気持ちもありました．しかし，冷静に考えると単に経験や知識の量が増えただけで村上先生のようなアイデアが自分に出せるとは全く思えず，そもそも研究に対する姿勢と見据えている視野の広さが全く違うのだということに気付きました．この日の経験は，私の研究に対する考え方そのものを大きく変えるきっかけとなりました．そして，「この分野の次の課題は，既存のバリア形成法に限界が訪れた後の全く新しいバリア形成法の開発だ．例えば…」と言って話されたのが，先の「自己形成バリア」のアイデアだったのです．これはバリア層と配線を別々に成膜する従来のプロセスとは全く異なり，Cu合金配線材と周囲の絶縁体との界面反応を利用して，極めて薄いバリア層を均一な厚さで形成させるという概念でした．せっかく教えて頂いたのですが，当時の技術レベルからするとあまりにも突拍子もないアイデアに感じられ，小心者の私にはとてもこれを研究テーマに選ぶことはできませんでした．その後，先生の予測通りに実デバイスではTa系のバリア材が使用され続け，その一方で更なる微細化に伴うバリア形成法の限界が大きな問題として取り上げられるようになりました．近年では，自己形成バリアは次世代の超微細配線プロセスに適用されるべく精力的な研究が進められており，村上研でも昨年見事にCu-Ti合金を用いた自己形成バリアの開発に成功しています．先生がこのような先進的なアイデアを10年ほど前から考えておられたことにはただ驚くばかりですが，TaNバリアという大きな成果を得た直後に，さらに困難な課題への挑戦を志しておられたところに村上先生の素晴しさがあるのだと思います．何よりも一つの成果に満足して歩みを止める事を嫌い，常に先を見据えて新たな課題に挑戦していく姿勢なしに，独創的な成果を生み出す事はできないということを，このメモが教えてくれるように思えてなりません．

本稿を執筆するにあたり，助手時代の研究ノートや村上先生との議論を書き留めたメモ類に久しぶりにゆっくり目を通してみました．資料を読んでいると様々なテーマについて幾度となく熱い議論をさせて頂いたことが懐かしく思い出されます．議論と言っても，ほとんどはまともに答える事ができず，先生の話を聞いている時間の方が圧倒的に長かったのですが，時には徹夜で先生への反論を準備して「今度こそは」と議論に臨んだものです（結局，最後まで先生を論破する事はできませんでしたが）．私にとって，先生との議論ほど楽しく有意義なものはありませんでした．これらの議論を通じて先生からは，数々の貴重な研究テーマやアイデアを与えて頂きました．それらの多くは成果として結実させることができずに私自身が大学を去ることになってしまい，自分の力不足を痛感しております．まさに不肖の弟子ではありますが，今後の人生を通して未熟な私なりに「村上イズム」を周囲の人間に伝え，自らも実践していくことで先生への恩返しができればと思っております．

（豊田合成株式会社）

京都大学工学研究科助教授　田邊晃生先生は定年退職されました.



田邊晃生先生の御略歴

田邊晃生先生は，昭和41年3月京都大学工学部冶金学科を卒業後，京都大学工学研究科修士課程冶金学専攻を経て，同46年3月京都大学工学研究科博士課程冶金学専攻を単位取得の上，退学された．同年4月京都大学工学部助手に採用され，平成14年4月に京都大学工学研究科助教授に昇進し，同19年3月に定年退職された．なお，昭和51年3月に“Solvent Extraction of Nitric Acid and Thorium Nitrate by Tributyl Phosphate”の論文により，京都大学より工学博士の学位を授与された．

この間，永年にわたって京都大学の学生の教育と研究の指導にあたり，多くの人材を育成された．またさまざまな国際会議で招待講演や Keynote Lecture を行うとともに，共同研究など国際的な交流を深められるとともに，学会幹事，大会実行委員を務めるなど，学術活動の隆盛にも貢献された．

研究面では，まず液々溶媒系での金属イオンの分離精製に関する基礎研究で，高濃度領域での熱力学的平衡関係の解明に取り組まれ，活量を用いた厳密な取り扱いで抽出化学種の重合度も算出できる新しい方法を開発された．次いで，正反対の速度論的な方向に取り組まれ，非鉄金属製錬のプロセス設計の基礎となる研究を進められた．これと関連して，平衡と非平衡についての認識論的な考察によって「戸坂潤賞」を受賞された．さらに，機能面・環境面から社会的な要請のある水素吸蔵合金，希土類系強磁性材料，無鉛合金等の開発についても基礎研究を進められた．これらの研究においては，分子軌道計算で得られた電子状態から反応プロセスの解明を進められた．これら結合論をベースにした材料学の再構築の試みに対して，ABI から Scientific Achievement Award が与えられた．

また先生は，公害・環境問題にも積極的に取り組まれ，基礎研究はもとより，鉱業企業の無公害化プロジェクトにも協力されている．これらの研究を基礎に，「環境物理化学」，「環境プロセス設計学」の講義を通して，環境教育が行われてきた．

田辺先生退官によせて
『自ら考えることを重んじる人』

伊藤紘一

近藤良夫先生が MIT から戻られて冶金反応操作というゼミを開かれて3年目に，田辺先生を含む同期の私たち6名がこの新進気鋭のゼミに加えられました．

近藤先生の優しく美しい奥様と可愛い少女であられたお嬢様と一緒に北山にハイキングしたり，ゼミの後輩・粟倉先生の実家のある日本海に面した網野で，海水浴を兼ねた

合宿をしたりしました．何とこの合宿では，アインシュタインの相対性原理を勉強することもあったのです．

伝統のある京都大学冶金学科においては“珍しく”ヌーベルバーグの香りがするゼミであり，遊びだけではなく冶金学においても平衡論から一歩進んで，反応速度論というカイネティックスを導入した化学工学的アプローチが教えられました．

そのような雰囲気の中で，田辺先生はひときわ『特性のある男』でありました．どちらかと言うと他のゼミ仲間は物分りの良い所謂グッドガイ・タイプでしたが，田辺先生は『われ思う故にわれ有り』というタイプでした．皆が西に向かって走ろうとすると，彼は，チョット待て果たして西が正しいのか？東ではどうなのだ，と考えるのです．

しかも彼の研究テーマは“液々抽出”という当時は最先端の化学であり，常識に毒された一般人には難しいものでした．田辺先生のスタンスは，単に科学固有の問題を解くというのでなく，その科学が社会や人間にとってどのような意味と影響をもたらすのかを常に念頭に描くというものでした．

したがって彼はよく，あちこちで論争を巻き起こしたり，“少し変わった人”という偏見に晒されたりしました．しかし，そのおかげで退官近くには，奥の深い洞察に満ちた総合科学的学問の面白さをビビッドに解説し，若き研究者たちを魅了してやまない名物先生になりました．

このような田辺先生を私たちゼミの同期は誇りに思います．これからも益々ゴーイング・マイ・ウエイで歩まれますことを期待しております．

田辺先生のご退官に寄せて

西　内　滋　典

田辺先生に初めてお会いしたのは1973年です．私は三回生で先生は若き助手でした．当時は時代背景もあり，自主的な若手研究者の全国的な交流がありました．金属系でも「金属夏の学校」が開催されていました．田辺先生が中心となりその世話役をされておられました．「金属夏の学校」では他大学の先生の講義を聴くことができ，京大の講義とは切り口が違い，目新しく楽しいものでした．夕食の後も，講師の先生を囲み,車座で討論会がありました．私は「用語」を隣の先輩に解説してもらいながら討論に耳を傾けました．この討論は若手研究者を中心に夜遅くまで続き，既成の金属学を乗り越え，再構築するぞ！という夢と意志が漲っていました．私は新人ながらもその場に居合わせ，その胎動を感じることができました．

私は幸いにも，大学を卒業してからも，「金属」「鋳造」「分析」に関わる仕事に就くことになりました．その中で，ゆっくり自分なりに自然の法則について考えてみたくなり，エネルギーやエントロピーや温度について自分なりの解釈を試みておりました．ちょうどその時，田辺先生が山本先生と共著で「エネルギー・エントロピー・温度」を出版されました．読んでみて，それまでの自己解釈とは格段に違う質の高さに驚き，「学問」の深さと可能性に感動しました．またそのころは量子色力学が科学雑誌を賑わしていましたので，興味を持っていましたところ，「素粒子から宇宙まで」と展開されていましたので，一冊の本で二つが分かる，一石二鳥を経験し，ありがたいと思いました．それから，数年後，自分の頭とは，どのように動いているのだろうと疑問を持ち考えていました．この時も，タイミングよく「科学と認識構造」を出版され，1）階層性　2）歴史性　3）抽象性という3つの側面から認識を理解する方法を教わりました．さらに，それから，数年後，腐食現象や磨耗現象を中心に材料について考えていましたところ，またタイミングよく「新しい材料科学」を出版されました．量子力学に基づき，1）結合　2）構造　3）物性　4）反応から材料を理解することを教わりました．

1995年ころから先生は分子軌道計算に基づく静的安定性と動的安定性の実証実験に取り組まれ，私どもの京都市産業技術研究所に来られ，Cu-Y系合金を作成され，高温硬さを測定されていました．この頃から，直接的にご指導をいただけるようになりました．ちょうどその頃，産声を上げたばかりの「ステンレス球状炭化物鋳鉄」を世に出すため，1999年に「球相材料研究会」を設立しました．会には，広範囲の研究者，技術者，関係者が集まり，学術的基礎から，実用化，環境，社会的側面に至る総合研究を進めることができました．この会でも先生は研究担当幹事の要職を務められ，実用化と学術の両面の研究を牽引されました．成果をまとめ，「京都発新材料の開発，球状炭化物材料」出版することになりました．この時も，自らの執筆とともに編集を担当され，筆が進まない現場技術者に励ましと助言を与え，全体を調和のある構成に造り上げられ出版に至りました．

先生は環境にも深く関わられ，「イタイイタイ病」の原因である神岡鉱山排水の清浄化技術に取り組まれ，その結果，鉱山排水は現在では世界のトップレベルの清浄度になりました．現在も河川水の微量重金属の定量法について，私どもと共同で研究を進めておられます．その他「地球環境」や「生体と金属」についても研究を進められておられます．

先生のお話中に「バウンダリー」という言葉があります．二つの世界がぶつかるところに，それぞれの世界の本質が矛盾として顕在化し，調和する，という意味だと思います．先生は長年，精錬反応を研究されてこられたのでバウンダリーというものを身近に感じられておられたのだと思います．そう言えば，ステンレス球状炭化物鋳鉄の根源も材料と使用環境とのバウンダリーの問題ですし，環境・公害の課題も人間の営みと地球とのバウンダリーに在ります．

この夏も先生とご一緒し中国西部の新疆ウイグルを訪れる予定です．砂漠とオアシスの土地で，40以上の民

族が共存しています．この地も東西文化のバウンダリーです．歌と踊りの民と呼ばれるウイグルの人々とふれあい，「バウンダリー」を楽しみたいと思います．

田邊晃生先生のご退官に寄せて

務中達也

「君がまったく研究しなくても，田邊先生は実験しろと言ったり怒ったりはしないと思う．それでも卒業くらいできるだろう．でも，もし少しでもやる気があるのなら，必死で先生に食らいつけ．きっと先生は君の期待に応えて下さるはずだ．」

私が田邊先生に初めてお会いしたのは当時の朝木研に配属された時でした．4回生が卒論のテーマを選ぶ際に，元々磁石の不思議さに興味があったこともあり「CaH_2 を用いた還元拡散法による $Fe_{17}Nd_2$ の生成」を選んだところ，その担当教官が田邊先生でした．よく見ると先生が他に担当される学生は M2 の廣瀬先輩だけで B4 は私一人．ものすごくありがたい環境だと思いました．しかしながら当時の私は勉学より音楽活動に精を出している始末で，長髪に一部金髪という容貌で授業もろくに出ていませんでした．冒頭の話は卒論テーマを選んだ際に先輩から言われた言葉です．私は先生と1対1で指導を受けられる機会が多いことが本当に嬉しかったのですが，周囲からはそう見えるはずがありません．恐らく先生ご自身もそうお思いになられていたでしょう．先輩もそんな私を見かねてのお言葉だったと思います．でもこのご忠告のおかげで私は早々と「食らいつく」方を選ぶことができました．

それまで経験してきた「勉強」とは様々な意味で違う「研究」に触れることが楽しくて，何でも手当たり次第に先生に質問しました．相当迷惑だったのではないかと思いますが，先生はいつも丁寧に，そして簡潔に答えて下さいました．ディスカッションの際も，先生のお考えを押し付けることは一切なく，私のとんでもない意見をやさしい笑顔で聞いて下さいました．それまで鉄粉をネオジムと反応させた後に，その破断面から $Fe_{17}Nd_2$ の生成量を見積もっていましたが，鉄粉の代わりに径の揃った短い鉄線を使えば，破断面が円形になる部分があり生成量を正確に測定できるはずだ，と言ったところ，「面白いやん，それやろう！」と認めて下さった時は本当に嬉しかった事を覚えております．

先生は今で言う「癒し系」でした．特に技官の方々と仲がよく，私の卒論はその方々のご協力のおかげで何とか形になりました．1989 年のいわゆる最終出勤日でしょうか，「おう，若いの，お前もこいや！」と技官の方に声をかけていただき，年越しそばをご馳走になりました．そこには，すでにお酒を召された田邊先生がおられて「彼が務中君といってヘビメタなんやー」と皆様に紹介してくださいました．田邊先生の顔が広すぎて多くの方に紹介されたため，もっと食べたかったのに，という思いがあったからでしょうか，年越しそばはすごく美味しかった記憶があり，おかげで今でも我先に食べ始める習慣がついてしまいました．

私だけがそう思っていたのかも知れませんが，先生にはひとつ変わった口癖がありました．実験結果が芳しくない（と私が思っている）時に，その口癖がでました．そう言われた後に，今まで私が予想だにしなかった切り口で，そのデータが示す可能性を語られるのです．いつものように廣瀬先輩と3人でディスカッションしている時だったと思うのですが，その「まてよー」が出ました．その後に，「この辺りにまだ知られていない金属間化合物があるんちゃうか！」．私は，すでに Fe-Nd 状態図が本に載っているのに，そんな事は考えもしませんでした．その事を告げると，先生は「ここに君達の取ったデータがあるやないか．ええか，今までに僕らが知っていることなんて，ほんのわずかなことなんや．今日はじめて新しいことが判ったかもしれないんやで．」優秀な先輩は理解されているようでしたが，鈍い私は全然ついていけず呆然としていました．ただ，その日の先生は失礼ながら子供のようにはしゃいでおられて，その後も何度も「まてよー」を連発されて，色々な確認実験方法を考えておられたことを覚えております．その金属間化合物は数年後に海外のグループがその存在を示す論文を発表したと聞いております．私のデータ不足と能力不足により，先生にご迷惑をかけてしまったこと，今でも心の底から申し訳なく思っております．ちなみに，「まてよー」という言葉が出ずに，単に私の実験結果が芳しくないだけの日が多かったのは言うまでもありません．

田邊先生，ご退官，誠におめでとうございます．長い間本当にお疲れ様でした．きっと今も，何かご自身の興味のある事柄に対して深く追求されている日々を過ごされていることだと思います．私は不勉強がたたり大学院には進めず，残念ながらたった1年間しか田邊先生のご指導を受けることができませんでした．しかし，その際に得た「研究に対する憧れ」は会社に入っても途絶えることなく，昨年には学位を取得することができました．もしかしたら，田邊先生に対する憧れであったのかもしれません．何とかして仲間に入りたかったのだと思います．これが苦しい時期を乗り越える力になりました．本当に感謝している次第です．現在，私は金属学とは離れたライフサイエンス系の研究をしており，今日も実験をしています．よくあることですが，また一見バラバラのデータが得られました．こんな時，私は実験手順などを一通り確認した後，もう一度目を閉じてから，そのデータを見つめます．心の中で「まてよー」とつぶやきながら．

（株式会社島津製作所，平成2年卒）

平成19年度水曜会大会

●日　時　平成19年6月9日（土曜）11：00－16：00
●会　場　工学部6号館および京大会館

平成19年度水曜会大会は，6月9日（土）に開催された．本年度においては，午前は，主に水曜会会長の冨井洋一教授の御尽力によって工学部6号館内に完成された「水曜会教育資料展示室（6号館166号室）」の公開のため，各研究室紹介のポスター展示もそれにあわせ6号館167号室にて行なわれ，午後から京大会館にて懇親会，総会，特別講演会が開催された．当日は，大雨となり天候には恵まれなかったにもかかわらず，教育資料展示室およびポスター展示室にはおよそ30名以上の方が見学された．懇親会には55名程が参加され，総会・特別講演会には昨年度なみの約80名の参加者があった．

水曜会教育資料展示室は，採鉱冶金学科時代からの変遷を一望できる歴史的空間であり，転炉のミニチュアや日本刀などの興味深い物品や資料の展示があった．約1時間の展示および研究室紹介の後，場所を京大会館へ移し，101号室において懇親会が開催された．懇親会は，石田毅教授の司会のもと，まず村上陽太郎名誉教授の乾杯の挨拶で始まり，次いで特別講演会で御講演された浅尾晴彦氏（三菱マテリアル株式会社取締役副社長）および菅原勝彦氏（熊本大学副学長）の両氏による挨拶のお言葉を賜った．会は立食形式で和洋折衷料理を楽しみつつ，和やかな雰囲気のうちに終了した．その後，雨天であったため，京大会館館内において記念撮影を行なった．撮影は吉田神社前の中尾写真場にお願いした．

場所を210号室に移し，総会は新任された中村裕之教授の司会で進められ，まず冨井洋一会長から平成19年度の事業報告ならびに人事異動などの近況報告がなされた．次いで田中功会計幹事から会計報告および宅田裕彦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，次期役員推挙により，新会長に粟倉泰弘教授，新副会長に青木謙治教授が選出された．粟倉新会長から水曜会の今後の運営やあり方などを交えた就任の挨拶と抱負が述べられた．その後，特別講演が開催され，本年度は以下の2件の講演が行なわれた．

「資源循環型社会を支える素材産業の環境・リサイクル事業への取り組み」
三菱マテリアル株式会社　取締役副社長　浅尾　晴彦　氏

「岩の力学研究40年」
国立大学法人熊本大学理事　熊本大学副学長　菅原　勝彦　氏

特別講演の内容は「大会記念講演」として本誌に寄稿いただいているので，詳細はそちらを参照されたい．いずれの講演も説得力のあるもので，参加者は熱心に傾聴した．平成19年度水曜会は本2件の講演が終了した後，午後4時に散会した．

平成18年度水曜会会計報告

平成19年３月31日現在

収　　入		支　　出	
前年度繰越金	8,645,536円	会誌印刷代（製版・郵送料込）	
会　　費	3,338,000	23巻９号	1,702,968円
会誌広告掲載料（製版代込）		水曜会大会経費（18年６月10日）	1,282,461
23巻９号	432,350	水曜大会写真焼き増し代	0
会誌論文別刷代	0	名簿発行費	3,227,910
名簿広告掲載料	552,350	名簿二重払い返金	3,500
名　簿　売　上	1,879,500	編集委員会経費	84,261
会　誌　売　上	5,130	会誌原稿料	145,000
水曜会大会懇親会費	295,000	新入生歓迎行事援助	8,000
水曜会大会写真申込金	0	通　信　費	79,230
預金利息並びに貸金庫解約料	8,287	事務人件費	647,380
		文具・コピー代等	54,804
		その他経費(京大同窓会設立総会出席他)	41,010
		展示室改装経費他	1,534,155
収　入　合　計	15,156,153円	小　　計	8,810,679円
		次年度への繰越金	6,345,474円
上記の通り会計中間報告致します。		内訳　銀行普通預金	1,558,182
平成19年６月９日		銀行定期預金	4,500,000
会計幹事　田　中　　功		郵便振替預金	67,027
以上の通り相違ございません。		手持現金	220,265
会計監事　宅　田　裕　彦		支　出　合　計	15,156,153円

水曜会誌の企画と投稿のお願い

水曜会誌編集委員会

本委員会では，会員の皆様の近況や展望など幅広い内容記事を紹介する『談話室』を設け,投稿を募っております．『談話室』は，会員各位の意見・情報交換の場としてご利用頂くことを目的としたもので，投稿規定の分類では『各種記事』に相当します．

具体的には，

○第一線で活躍中の会員の幅広い展望・随想
○各企業の研究所の紹介（特殊機器や意外な研究内容など）
○研究についてのトピックス（形式は問わない）
○国際会議や海外出張の紹介・こぼれ話
○種々の分野でご活躍の会員の特異な体験記事
○新教官の自己紹介や抱負など
○水曜会の活動における歴史的こぼれ話

などを企画しております．掲載分には薄謝を進呈いたします．奮ってご投稿下さい．また，他に取り上げるべき企画などご意見がありましたら編集委員会までお知らせ下さい．さらに，投稿規定に従い，論文･講座･総説などにつきましても投稿を随時受け付けております．

次号の発刊に向け，常時，会員の皆様からの投稿をお待ち致しておりますので，奮ってご応募くださるようお願い致します．投稿を予定されて今回，間に合わ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．

会　員　通　信　欄

平成19年度水曜会大会への返信はがきには，会員の方々から多くのお言葉や近況報告を頂きました．ここにその一部を掲載致します．なお，文章を損なわない程度に表現を変えた部分もあることをお断りいたします．

高嶋　　宏（採冶，昭15）何かと生きのびて満91歳となりましたが水曜会の発祥以来の変化発展の著しい中で，恰も綿々として発生した遺伝子が私たちの細胞に伝わっているごとく「水曜会精神」が生きている感じを持っております．同時の卒業生が数少ないので淋しい限りです．益々の発展を祈ります．

大内　英信（採冶，昭16・3）老衰療養中です．

成瀬　一郎（採冶，昭16・3）近頃年のせいか，車椅子の世話になって無為徒食の日々です．医師は血液検査では異常はないとの診断です．

古賀五百里（採冶，昭16・12）身体の老化現象がひどく思うように動けない現状です．

村上陽太郎（冶金，昭17）4月7日に満90歳になりました．毎朝の速歩のウオーキング，執筆も出来て，心身共に元気です．

盛　　利貞（冶金，昭17）大腿骨骨折以来入院中のため出席することが出来ません．何卒皆々様によろしくお伝えくださいますようお願い申し上げます．

成瀬　光芳（冶金，昭17）老人ホーム入所予定です．

北村　洋二（冶金，昭18）大分体力が衰えましたが，何とか小康を保っております．未だ本が読めるだけ幸せを感じております．

久芳　正義（冶金，昭18）元気に過しております，失礼お許し下さい．

小山　昌重（冶金，昭18）ご盛会をお祈りします．

齋藤　　康（冶金，昭18）医療法人兼誠会，尼崎介護老人保健施設ブルーベリーさんでお世話になっています．利用者の一人一人に介護が親切です．楽しい催し会が度々ありますので主人も身体は不自由ですが意識があり，自我が穏やかになりお陰様で円満になりました．毎日有難く感謝致しています．息子夫婦の協力で老後を救われ恵まれて居ります．（家内）

寺前　　章（冶金，昭18）80歳を越すと体力の衰えが目に見えて自覚するようになりました，日々歩くことに精を出しております．

三宅　敏夫（冶金，昭18）歳相応の元気さを維持しています．学士会や旧制高校OBなどの俳句会に参加して頭の体操をしています．

百瀬　寛人（鉱山，昭19）老化のため足が悪くなり外出が出来なくなりました．

菅沼　常生（冶金，昭19）公立（兵庫県）32年私学25年の勤務，今も現役として勤めています．

田中　　安（冶金，昭19）大会の盛会を祈り上げます．

荒川　武二（冶金，昭20）ご盛会を祈ります．少々体調を崩し，参上致し兼ねますが，齢相応乍ら未だ好奇心は衰えておりません．名古屋は活気に満ちております．

山本　剛男（冶金，昭20）昨年春勤務をやめ毎日が休日になっています．年の割には特別の病気もなしに元気に過しています．

佐伯　博蔵（鉱山，昭21）年令相応には元気にしております．油絵，旅行等も楽しみ，時々資源エネルギー等の会合に出ています．

末吉　敏彦（鉱山，昭21）年なりの生活をしております．

池田　　保（冶金，昭21）お陰様で相変わらず元気にしております．近藤良夫先生のモチベーション研究会に月1回ですが参加しております．その他一部企業のQCに行っております．テニスも相変わらず続けています．同窓生が減っていくのが残念です．

水田　喜博（冶金，昭21）盛会をお祈りします．愚妻病気の為，介護しておりますので遠出は控えております．悪しからず

和邇　　博（鉱山，昭22）すっかりデジカメ時代となり「どんどん写してどんどん消せる時代」の筈ですが，私は「悪い写真がどんどんたまる時代」となり選別に追われている昨今です．

田辺　精三（冶金，昭22）ボケ症状の侵攻に戦線恐々．認知症にだけはなるまいと懸命努力中，目標は毎日5千～1万歩の大股歩行．

寺井　士郎（冶金，昭22）卒業後60年を過ぎると，流石に欠ける人も多く，淋しい思いですが，毎年10人位の集まり，まずまず元気にしております．

三谷　文夫（鉱山，昭23）出来るだけ若い人と付き合うように心がけています．そのせいかいつも10歳くらい若く見られています．

岡田　　明（冶金，昭23）昭和23年冶金卒の同窓会

（金友会）は毎年引き続いて開催され，盛大で楽しいですが，段々減少していくのが残念です．しかし．同窓会の案内では，全員から返事があるので感謝しています．

谷口　利廣（冶金，昭23）相変わらす，週3日ディハウスでお年寄りを相手にパソコン指導をしています．NPO法人「きずな」総会のため欠席します．

平尾　　茂（冶金，昭23）昨年11月80才にて会社を退きました．社員とその家族が路頭に迷うことのないようにと会社の全てと私的な預貯金を全部渡し退職金もなく帰ってまいりました．頭では理解しておりますが淋しかったのでしょう．4月17日脳梗塞にて現在も入院中です．左足が不自由ですが話しも出来ますし，昨日7日よりリハビリ中でございます．皆様によろしく．

小田　正三（鉱山，昭24）近年　腰痛，膝痛等にて体力低下してきましたが，長男が継いで呉れた局部焼鈍工事業をボチボチ応援して居ります．

鹿取　精一（冶金，昭24）元気で老々ボランティアに精出しています．

鷹取　正六（冶金，昭24）会社勤務より退いて3年目，81歳になりました．これから先のことは判りませんが，現状，仕事のストレスより開放されて元気にしています．学校時代や勤務時代の想い出や旧友との付き合いは，心に潤いを与え，さらにそれが健康への助けになっていると感じています．

青木　信美（冶金，昭24）3月27日は千葉工大での鉄鋼協会総会で牧正志教授の栄誉ある学会賞（西山賞）ご受賞，記念講演を聞かせていただき嬉しく誇りに思いました．お祝い申し上げると共に更なるご活躍を期待申し上げます．

太田　　毅（冶金，昭25）日々平凡な生活です．

冨岡　敬之（冶金，昭25）一応元気で過しております．

福薗　致雄（冶金，昭25）病気療養して居ります．

森本　　徹（冶金，昭25）この年でまだ週2回往復3時間かけて会社へ出勤，今年は思いもよらす皇居にて黄綬褒章をいただき，昨年は文部科学大臣の科学技術賞をいただき運命の強さに驚いています．家内の自立神経の治療と仕事で忙しい毎日です．

小川　昌平（鉱山，昭26）北炭在職（1951～1963）中は加藤高尚氏（昭16卒）と一緒でした．私は京工繊大に移りましたが，同氏は退職後も地上から未採掘炭層のCH_3ガス採取の研究をされ，前号水曜会誌に載った論文が遺稿になりました．

鴛海　眞樹（鉱山，昭26）毎年海外旅行を楽しんでいます．今年は近まわり韓国，台湾の予定です．盛会を祈念します．

木村　　治（鉱山，昭26）身体各部が経年劣化して，旅行が大変ですが今回に限って重い腰を上げたいと思います．それというのも，石炭深部採掘時の山はね問題について，大層ご援助頂いた菅原先生のご講演があるのですから．

二宮　　脩（鉱山，昭26）水曜会創立百周年記念式典とその2年後の卒業50周年同窓会に出席して後ご無沙汰しております．体調を整えて参上したいのですが如何なりますか…．皆様のご健勝をお祈りします．

荒川　次郎（冶金，昭26）毎日，健康第一に考え楽しく元気に生活して居ります．

木下　幸三（冶金，昭26）元気です．

田中　誠一（冶金，昭26）昨年末転居しました．何とか元気に過しております，チェロの修行は5年目を迎えました．

田辺　定男（冶金，昭26）化学療法による治療を続けていますがまあまあ元気です．

森　　嘉紀（冶金，昭26）84歳となりました．まずまずの健康体で人生を楽しんでいます．（地元の老人会の世話をしています）

大西　　格（鉱山，昭27）ゴルフを楽しみながら元気に過しております．

杉本　和夫（鉱山，昭27）身体不自由で残念ですが欠席させて戴きます．

松岡　秀夫（鉱山，昭27）「八十路来てなほ夢多し朝ざくら」のんびりと書や俳句で余生を楽しんでおります．リタイヤーして15年．水曜会大会にも出席していませんがご盛会を祈ります．

小柳　順吾（鉱山，昭28）80歳　達者です．

笹栗　弘喬（鉱山，昭28）昨年暮れに脳梗塞を患い病院で5ヶ月の闘病．退院後も社会復帰に努力中です．

倉知　三夫（冶金，昭28）お陰様でそれなりに元気で毎日を過しております．18歳まで大日本帝国憲法の許で，「天皇陛下万歳」の戦死への道を歩み，広島・長崎の原爆で終戦，復員，20歳から60年非戦・平和・基本的人権の日本国憲法の許で「健康にして文化的な人生」を歩んでいることに感謝いたしております．

松浦　菊男（冶金，昭28）4月23日，東京代々木倶楽部における二八会（昭28年冶金学科卒）に出席し交誼を深めました．

松村　嘉高（冶金，昭28）日本剪画協会に加入し，毎月創作活動に時間をつぶしてしています．

江崎　　澣（冶金，昭29）年相応に元気にしています．当日は別のスケジュールを入れており参加できません．ご盛会を祈念しています．

久野　安夫（冶金，昭29）数年来自宅療養中です．足腰不自由で外出がままなりません．

田中　　功（冶金，昭29）健康維持のためwalkingにつとめています．昨秋冶金29年「にくまれ会」を行いま

した折，粟倉先生に現況説明をいただきました．また，同姓同名の田中教授にもエレベーターでお会いできたことも忘れられません．

松岡　英夫（冶金，昭29）クラス会（にくまれ会）を京都でもった昨年11月冶金学科の昭和30年代の組織，最近の編成など解りやすく説明を受けた．新時代に相応して「材料工学」にも先進している雰囲気を感じた．

三浦　　精（冶金，昭29）昨年11月より熊本から向日市の旧居へ帰りました．熊本には10年居住しました．今後は京都に落付くことになります．

山之内種彦（冶金，昭29）学生時代の夏1ヶ月間実習二回，今頃になって，その後の仕事に役立っていたのだなあと感じています．

井上　瑞城（鉱山，昭30）元気で過しております．

清滝昌三郎（鉱山，昭30）実質的に現役を退き晴耕雨読のハッピーリタイヤメントに入っています．健康のためにゴルフ，詩吟等に励んでいます．

米津栄次郎（鉱山，昭31）①日経BP社，大阪府池田市の広報活動　②社交ダンス，現代書，ピアノ　～後期高齢者の仲間入り～

江藤　隆義（冶金，昭31）退職後地区老人会・NPO等の仕事をしておりましたが，後期高齢期を迎え，これらからも引退し晴耕雨読の生活への移行を考えています．

吹田　俊一（冶金，昭31）加齢により方々が痛んできていますが，何とか日常生活に支障なく，時々在京の同期の友人と会食等楽しんで居ります．皆様によろしく．

長澤　元夫（冶金，昭31）お陰様で元気にしております．昨年，卒業50年で大学を訪れ先生方に大変お世話様に相成り有難く厚く御礼を申し上げます．

野村　悦二（冶金，昭31）冶金学が消えて久しい．しかし鉄，銅，鉛，亜鉛，ニッケル等は空前の好況である．どのような技術屋が製造に携わっているのだろうかと不思議．意外と簡単な製造法だったのか．または先輩が誰にでも作れるように超標準化したのだろうか．元気に過しています．

田村　敬二（冶金，昭32）世田谷卓球連盟の理事として又外国特許の翻訳に従事しています．

本間　良治（冶金，昭33）平成18年末に㈱推研の代表取締役を退き会長になりました．好きな設計仕事だけをしています．

梶川　脩二（冶金，昭33）リタイヤして8年，何とか健康で日々を元気に過していたます．水曜会の同級生とは年1回の旅行（2泊3日）を楽しんで旧交を温めています．

里見　祥明（冶金，昭33）お陰様で元気に過しております．日常ゆっくり旅に出られないことが唯一の課題です．ご盛会を祈念致します．

田中　孝一（冶金，昭33）現役引退も一昔のことになりましたが，年相応に元気で過しています．

松本　善文（冶金，昭33）元気です．同期の仲間も恙なく嬉しいことです．今年は北陸で同窓会をします．

尾竹　嘉三（鉱山，昭34）剣神社宮司として元気に奉仕しています．

児玉　幸夫（鉱山，昭34）毎年　年金の出る度に久留米の風水神社へ2,000円ずつ祖先への霊，旧友の霊に供養しています．宮崎の墓はどうなるかわかりません．

熱田　善男（冶金，昭34）74歳になりました．朝起きて今日も目が見え手が動く．生きているだけで丸儲けや．一言でいえば元気です．子供たち約70人に算数・数学を教えています．

南浦　基二（冶金，昭34）主にケミカルプラント建設事業に従事しておりますがそろそろリタイヤーが近付いてきました．

上村　哲夫（鉱山，昭35）東京地区中心に35年鉱山卒下記メンバーにて会食懇談しました．次回来年2月，成瀬，西田，久賀，梅原，柳沢，米田，伊藤，松下，上村

西田　米治（鉱山，昭35）この4月東京近住の同年同科同窓9人集う．酔うほどに50年前学部に進んだ頃を思い出し楽しいひと時を過ごした．4年前と比べ，健康についての話題が増える．来春再会を約して別れる．

柳沢　恒雄（鉱山，昭35）自工夫の左右対称化整体に努めたら20年来の腰痛が治り，スキーと果樹栽培に励んでいます．

山田　武弘（冶金，昭35）毎日，適度に会社の仕事をしながら，家庭内の便利屋（庭の剪定，家族のアッシー等）に勤しみ，ウオーキングで季節の移ろいを確認（田植え，畑の進捗状態をチェック…自分には何の関係もないのに）し，テレビで水戸黄門の印籠を見てスッキリし，時々病院で血圧のチェックをうける，…そんな毎日の私です．

笠原大四郎（鉱山，昭36）高齢のため社会活動を停止します．

杉村健太郎（鉱山，昭36）秋田職能短大，秋田看護大2度目の退職，運送会社他顧問中．水曜会誌に北東北の花の山々」この他「体力増強物語」…という肩のこらない記事投稿の用意があります．スキー，マラソンのマスターズ大会出場中

赤井　愼一（冶金，昭36）元気です．

石原　和雄（冶金，昭36）のんびり暮らしております．ご盛会をお祈りいたします．

新宮　秀夫（冶金，昭36）相変わらず元気で皆様にご迷惑かけています．

森定　祝雄（冶金，昭36）平成17年8月から（宗）金光教千葉教会で御用奉仕させて頂いております．大変元気

に日々ありがたく過させて頂いております．千葉県庁の近く，ホテルプラザ菜の花の隣です．一度お越し下さい．

山本　隆造（冶金，昭36）自治会，ボランティア，社協，神社，寺の仕事で忙しい毎日です．体の方は元気です．

井出　謙三（鉱山，昭37）去る4月中旬に開催された吉野山花見の会（鉱山の同期会）に参加して楽しい1泊2日の旅を味わいました．

白井　　勲（鉱山，昭37）細々ながらまだ仕事を続けています．

原田　省吾（鉱山，昭37）NPOで中小企業のお手伝いやシニア対象のパソコン教室を主宰したり近所のスポーツクラブで週2回程度水泳したりクラブの友達と一杯やったり結構楽しく過ごしております．

名和田　進（冶金，昭37）定年後5年かけて作成した「よく似た英語と日本語の慣用表現集」（文芸館）がようやく完成し，自費出版しました．

秦　　瑛（冶金，昭37）昨年6月盟友，真砂野暁君が逝去しました．氏は鉱山学科でして，小生とは教養部から同一のクラスでした．卒業後，商社に入られ資源開発分野を担当され，インドのゴア鉄鉱石の日本への供給を実施して，先年ゴア鉄鋼会社より表彰の栄誉を受けました．兄弟の杯を交わした仲でしたので残念です．ご冥福をお祈りしました．

梅津　善徳（鉱山，昭38）会社生活を離れて3年になりますが，それなりに忙しく元気にやっております．

田村　祥（鉱山，昭38）南山教会では堅信のステップに至り毎週ミサに通っております．MLB，プロ野球相変わらず大好きで毎日テレビ観戦です．

花崎　紘一（鉱山，昭38）大学は地方私学の悲哀に悩んでいますが，私自身はいまのところ結構楽しくやっています．福井へお越しの時はお立寄り下さい．

松尾　　亨（鉱山，昭39）2005.10定年退職しました．仕事はしていません．

木村　篤良（資源，昭40）皆様のご活躍お祈りしています．

武藤　昭男（資源，昭40）毎月台湾に1週間出稼ぎに行っています．職業は「国際医療コンサルタント」でフィリップスメディカルの顧問などしています．幸いに元気です．

中島　　恒（冶金，昭40）浅尾さんの講演がおもしろそうですが残念ながら出席できません．

和田　　俊（冶金，昭40）会社（神鋼溶接サービス㈱）を完全退職しました．

荒木　勝正（金属，昭40）元気にしています．

木畑　朝晴（金属，昭40）2～3日/週　上記会社へ行っています．元気にやっておりいます．

酒井　一夫（金属，昭40）失礼しますがよろしくお願いします．

伊藤　孝英（冶金，昭41）ギリシャに転勤しました．

森　　邦彦（冶金，昭41）本年で三菱樹脂㈱の監査役を退任し，会社生活を終わります．

白井　秀明（金属，昭41）医療器機，バイオ機器を扱っております．

稲田　善紀（資源，昭42）3月で愛媛大学を定年退官し，29年ぶりに神戸に帰って来ました．官庁や企業数件の顧問を頼まれておりますし，各種委員会委員をそのまま続けておりますので前より忙しくなりました．

加藤　雅典（冶金，昭42）昨年7月よりセカンドライフに入りました．余生を楽しむと共に，何らかの社会貢献をしたいと思っています．

榊原　弘樹（冶金，昭42）６４才，元気に現役を続けております．

速水　弘之（冶金，昭42）当日は，冶金・金属学科Ｓ４２年卒の「卒業４０周年同窓会」が同じ京大会館でほぼ同じ時間帯に開催されますので，残念ながら水曜会大会の方は一部講演を除き欠席させて頂きます．

山川　　洋（冶金，昭42）元気です．

岩坂　光富（金属，昭42）残念ながら別件で出席出来ません．元気に過しております．皆様によろしくお伝えください．

長谷川雄健（金属，昭42）サラリーマンを矢崎総業㈱で始めて２８年．通算１４年の単身赴任生活を終え，自宅から通勤生活．ソフトウェアエンジニアリング設立準備室を担当していますが，そろそろ退任の時期かと思います．週末はテニス，読書，妻との散策，折々訪れる孫たちの相手を楽しんでいます．

木村　隆義（冶金，昭43）非鉄価格高騰でそれなりの利益を甘受していますが世界的規模での資源戦争で今後の対応が大変です．

黒木　正純（冶金，昭43）空前絶後の造船ブームのお陰で新規注文をお断りする状況．さていつまで続くのか？

中川　正義（冶金，昭43）ISO審査と関連システム構築のコンサルを行っています．

世良　　孝（金属，昭43）４月の桜の咲く頃，室内土俵が完成し，土俵開きに参列しました．

浅井　達雄（冶金，昭44）技術経営研究科システム安全専攻の教授も兼ねることになり，技術経営論，情報セキュリティ管理論を担当，一部，ｅ-ラーニングで社会人学生に配信しています．

中野　勇男（冶金，昭44）定年後，１０ヶ月目，週４日勤務中です．名称：シニアスタッフ，半導体デバイス関連の開発センターです．設備投資のあまりかからないデバイスを目指しています．

丹羽　正男（冶金，昭44）昨年９月でサラリーマン生活を終えました．第二の人生を模索中です．

服部　成雄（冶金，昭44）昨年，日立製作所を退職し，現在EPRI（米国，電力研究所）の仕事をしています．

池内　建二（金属，昭44）お世話になりありがとうございます．久し振りに母校を訪問できることを楽しみにしております．

山田　範保（資源，昭46）４月から北電㈱旭川支店長として勤務しています．旭山動物園ばかりが有名ですが，近郊の温泉，雄大な景観，すばらしい水と日本酒などに恵まれた豊かな土地柄です．各支店長は四国より広い所管を持ち各社内で「日本の支店」と呼んでいます．

澤邊　一郎（資源，昭47）遠隔地勤務（宮城）のため欠席致します．講演される菅原先生には先生が博士課程の時にご指導頂いたので，講演を聞けなく誠に残念です．

出浦　　昇（資源，昭47）夫は現在台湾に赴任しております．（出浦内）

木村　和成（冶金，昭47）平成１９年４月㈱住友金属小倉より上記会社に転籍いたしました．現住所も上記に転居致しております．

内貴　治三（冶金，昭47）早期退職して，１年程休養していましたが，今年始めより調査会社の業務委託を請け負うことになり，毎日，都内を歩き回っています．

上田　依孝（金属，昭47）昨年一時期体調を崩しましたが一応現役復帰しました．まだまだ社会への貢献という自覚のもとに頑張っております．

朝日　　格（冶金，昭48）東京勤務も長くなり，自宅を浦安に移りました．

福井　康司（金属，昭48）アルミ箔，パウダーペーストの技術開発並びに経営企画，安全管理を担当しています．

柏井　善夫（資源，昭49）PE（プロフェッショナルエンジニア）の試験に合格し，オレゴン州に登録しました．２００７年１０月から日本でもPE試験が実施されます．

大寺　康雄（冶金，昭49）病気療養中です．仕事をしていないので一日中家に居ります．家では家族が銅器等の小売をしていますのでお近くにお寄りの節は，是非声を掛けて下さい．

服部　　寿（資源，昭50）人材紹介を最近の数年間しています．人手不足によって，機械・金属・金型などの求人が多くなってきております．

則竹　和光（資源，昭50）わが社がウラン資源探査をやめたのを皮切りに物理探査との縁がなくなりました．今は安全管理の仕事をしていますがこれまで学んできたこと，経験してきたことは役立っています．…というか安全の視点で思い直すことがあります．幌延は放射性廃棄物の地層処分を研究するため深度500mの３本の立杭を掘り，地下研究施設を設けます．現在２本の立杭（－40m，－50m）を更に掘り下げるところです．

朝倉　繁明（資源，昭51）定年退職し，郷里に戻りました．s.asakura@mx5.carvas.ne.jp

市川　俊夫（資源，昭51）昨年４月（平成18年）１日，クリニック（内科，心療内科）を開業致して居ります，自宅は以前のままです．

田中　秀昌（金属，昭51）ただ今ドイツ赴任中です．

永尾　卓己（金属，昭51）相変わらす製造所でモノヅクリ第一線の仕事をしています．

谷村　晶夫（金属，昭53）現在発電機メーカーのデンヨーで東日本エリアの営業責任者として，北海道から新潟，長野，静岡迄駆け回っております．昨今の原材料の値上がりで，厳しい市場環境もあり，苦しみながら頑張っております．

宮脇　新也（金属，昭53）４月から東京勤務となり背広とネクタイで仕事をしています．（技術屋にはやはり作業着が合いますね…）

竹士伊知郎（金属，昭54）微細粒鋼の研究・開発を始めて早，8年近くになりました．需要業界の皆様方に少しでも貢献できればと念じています．それにしても「鉄」や「鋼」の文字が研究室の名から消えてゆくのはさびしい限りです．

北村　公亮（資源，昭55）ISO9001の内部監査等を通じて社内品質マネジメントシステムの構築を担当しています．未だに手工業のスポーツ用品の品質を高めることはなかなか大変です．

道本　龍彦（金属，昭55）３月末に資源・素材学会の春季大会で研究発表を致しました．（高温素材の部）

森田　健一（金属，昭55）冨井先生教授御就任の由おめでとうございます．私は上記会社で世界初とか言う堺SC工場勤務して，環境を通じて社会貢献しているつもりです．金はありませんが元気です．

岡本　一郎（金属，昭56）欠席させていただきます，よろしくお願いします．

及川　初彦（金属，昭56）グローバル展開，海外メーカー台頭の中，日本の技術力を維持すべく頑張っております．

楠野　春彦（金属，昭57）昨年11月にベルギーから帰国して東京本社に勤務しております．

吉留　良史（資源，昭58）北海道で使用される天然ガスは，函館，長万部を除き全て勇払から送られます．苫小牧で丸5年を越えます．

佐藤　光司（金属，昭59）なかなか足を運ぶことが出来ず，申し訳なく思っております．

谷口　斉一（金属，昭60）４月から転勤になり，９月に転居する予定です．

山本　保（金属，昭60）ハードディスク　ヘッドの製造プロセス開発を担当しています．昨秋より長野に単身赴任中です．

木村　得彦（金属，昭61）会社からビジネススクールに通わせてもらったのですが，そこの校長先生は同じ年に同じ学科を卒業したHさんでした．アカウンティングやファイナンスの勉強はとっても新鮮でしたが，実践で使うとなるとまだまだのようです．テストなら点数が悪いだけですみますが，ビジネスの世界で失敗すれば，大勢が巻き添えですから．

田中　章夫（金属，昭61）体調に気を配りながら教材の執筆の仕事を続けております．

田畑　仁（金属，昭63）昨年12月より，関東住まいを始めました．

中島　俊明（金属，昭63）相変わらずです．

髙濱　義行（金属，平元）とりあえず，元気です．

中森　英行（金属，平元）福西鋳物㈱おかげ様をもちまして創業80周年を迎へました．5/1には創業80周年記念祝賀会をリーガロイヤルホテルにて催し，牧正志名誉教授に記念講演をしていただきました．

黒川八寿男（金属，平2）元気でがんばっています．最近は，京大本部構内でもまよってしまうぐらいすっかり様変わりしてしまいましたね．

森　信之（金属，平2）イレギュラーズの森です．返信が遅れて申し訳ありません．

佐野　徹（資源，平3）4月1日付でベトナムに勤務しております．

大西　良穂（金属，平3）転勤のため，ニューヨークに転居しました．

前野　充男（金属，平3）静岡県磐田市の田んぼ中でほそぼそと暮らしています．

坂本　章泰（資源，平5）8/1付でベルギーへ赴任します．

岡本　和孝（金属，平5）3年半のアメリカ駐在より帰任しました．

吉川　功（金属，平5）所属会社及び住所が変更になりました．ますますの御発展を願っております．

西　孝文（資源，平7）新しいイメージセンサーの開発に日夜明け暮れています．本年3/18に結婚しました．

奥　健夫（材料，平8）彦根に移り，自然にかこまれて仕事をしています．皆様の御多幸をお祈り申し上げます．

古米　正樹（材料，平8）光通信デバイスの営業技術をここ5年ほど担当させてもらっています．

高瀬　嗣郎（資源，平10）津波の防災業務を続けております．

安井　雅人（物理工，平10）返事が遅れて申し訳ありません．2007年問題等雇用問題の中で，各工場・プロセスの改善業務いわゆる「ものづくり」に日々努力しております．会の益々の発展をお祈りしております．

星河　浩介（物理工，平10）6月中旬に嫁が出産予定のため欠席とさせてください．和博先生の御活躍を楽しみにしています．

三宅　正男（物理工，平10）H19年4月より，アメリカに引越しました．

三船　耕平（物理工，平14）今年の3月25日に結婚しました．

辻　峰史（物理工，平15）現在は就職3年目に入り，原子炉の定期検査期間中は多忙な生活を送っている様子です．仕事の話をしました時に「いかに安全に高品質の電気を届けるかということしか考えていない」との返事があり，親として成長を頼もしく感じています．―本人美浜在のためご家族代筆―

額田慶一郎（物理工，平15）転職しました．今年2月よりTDK㈱に勤めております．

溝谷健太郎（物理工，平16）栃木の田舎で鉄と格闘しています．

名古　秀徳（物理工，平16）社会人2年目を迎え元気に働いています．

上山　哲幸（地球工，平17）本年度入庁しました．激務を楽しませていただいております．

吉國　征紀（地球工，平18）違う世界で日々頑張っております．

大野功太郎（物理工，平19）元気に研究しています．京都で作っていただいた基礎の上に“一花”目指して頑張っています．

田畑　俊行（物理工，平19）東京大学大学院マテリアル工学専攻鳥海・喜多研究室所属．

鷲見　芳紀（物理工，平19）水曜会大会のご案内をいただきありがとうございました．現在，研修中で当日は群馬県にいる予定です．

段野　勝（元教官）お陰様で毎日元気に過しています．

港　種雄（元教官）年末，腰と脚が痛み，歩くのに困っています．ご出席の皆様によろしくお伝えください．いつもお世話になって有難うございます．

森　英嗣（元教官）廃棄ガラスのリサイクルプロセスの研究を行い発表や特許を申請，許可されました．只今更に研究を続け論文も執筆中です．皆様とまたお会い出来る日を楽しみにしております．

平成19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		
岡野　豊	分散関係式を用いた3次元におけるPS波分離	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
越智公昭	津波発生時の音響波伝播に関する研究	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
國師　学	表面波探査における分散曲線の安定化に関する基礎的研究	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
坂田玄輝	水平ダイポール電場を用いた電磁探査法の研究	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
辻本すばる	レシーバー関数を用いた地下速度不連続面の推定	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
地質工学分野		
湊　翔平	地震波干渉法による坑井間反射波記録の合成とイメージング	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
山本勝也	マイクロ波リモートセンシングデータに含まれる地下構造情報の抽出	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
大島佑介	深部ホルスト構造によるスラスト帯の構造変形に関する研究	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
國枝　真	超臨界CO_2のケーシングセメントへの影響に関する実験	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
清水武志	傾斜計記録に含まれる除雪および降雨の影響の推定	京都大学経営管理大学院(修士課程進学)
地殻開発工学分野		
石田　基	AE測定を用いた遅効性静的破砕剤による脆性材料の破壊メカニズムの研究	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
岩間弘樹	残留油飽和率評価に適用可能な貯留岩の空隙形状評価指標の構築	東京大学大学院工学系研究科(修士課程進学)
長谷俊輔	格子ボルツマン法によるフラクチャー浸透率テンソル評価	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程)
ジオメカトロニクス分野		
梅田太一	レーザー超音波を用いたコンクリート内部欠陥検査に関する検討	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程)
中上晋志	山岳工法トンネルの耐震補強に関する検討	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
地殻環境工学講座		
礒井健太郎	岩盤空洞の気密性評価に対する個別要素法の適用	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
笠川謙人	岩盤の水理地質構造評価に基づくグラウト充填効果の検討	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
西垣広大	重金属汚染土壌浄化への錯形成反応の利用	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
林　達也	岩盤の3次元水理地質モデルの構築に対する地球統計学手法の適用	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)

氏名	研究論文題目	就職先
資源エネルギーシステム学分野		
加渡幹尚	Mg-0.2wt%Ce 合金の圧縮特性	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
木村洋芳	CO2ハイドレート膜の成長に及ぼすNaClの影響	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
小林正幸	繰り返し応力下における Westerly 花崗岩中のクラック観察	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
湯浅元仁	分子動力学法によるナノロッドAuの引張り特性評価	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
資源エネルギープロセス学分野		
奥洋介	高温固体面に衝突する液滴の変形挙動に関する実験的研究	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
辻川敬祐	3次元有限要素解析による高張力鋼板の穴広げ成形限界予測	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
出嶋真也	加熱固体平板に衝突する棒状水噴流の三次元数値解析	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
松嶋啓太	対向液圧成形における圧力媒体流出メカニズムの実験的検討	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
宇宙資源エネルギー学分野		
大野恵	水電解操作における強磁場及び重力場の影響	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
小澤敬祐	強磁場環境下の電気化学プロセッシングに関する基礎研究	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
苗村善人	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(修士課程進学)
森健史	エネルギー変換デバイスの局所電流密度分布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(修士課程進学)

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		
伊豆原渉	漸近破線理論と有限差分法を用いた弾性波動のハイブリッドシミュレーション	シュルンベルジェ(株)
岡本拓	MT法による二次元不均質媒体における異方性領域検出に関する研究	石油資源開発(株)
鈴木正憲	断層運動による動的な海底地盤変動を考慮した3次元津波シミュレーション	国際石油開発帝石ホールディングス(株)
西内卓也	ピークオイル説によるエネルギー供給の将来とリスク軽減策に関する研究	外務省
田中宏明	海底地震計を用いた人工震源による地下構造解明に関する研究	エムシー・エクスプロレーション(株)
地質工学分野		
上山哲幸	CO_2地中貯留モニタリングのための抗井地震探査データの差解析	気象庁
田中見枝子	ランダム不均質媒質におけるコーダ波を利用した地震波干渉法	カゴメ(株)
長村直樹	海山沈み込みを伴う付加体形態のサイスミックシュミュレーション	東京ガス(株)
田中大介	超臨界CO_2によるケーシングセメントの物理特性変化に関する実験	フジテック(株)

氏　　名	研　究　論　文　題　目	就　職　先
地殻開発工学分野		
清　水　浩　之	個別要素法による岩石の水圧破砕の破壊過程に関する研究	京都大学大学院工学研究科(博士後期課程進学)
杉　山　直　豊	超臨界炭酸ガスの浸透に伴うケーシングセメントの物理的特性変化に関する研究	名古屋鉄道(株)
豊　田　逸　平	透気試験による低拘束圧下の難透水性岩石の浸透率測定に関する研究	松下電器産業(株)
中　村　利　宗	均質化法を用いた岩石の弾性定数異方性に関する研究	石油資源開発(株)
ジオメカトロニクス分野		
嶋　本　敬　介	変状トンネル対策工の効果に関する三次元的評価法の研究	(財)鉄道総合技術研究所
波多野　浩　司	レーザー超音波の励起機構とその面状検査への適用に関する研究	新日本製鐵(株)
地殻環境工学講座		
黒　川　　進	堆積軟岩における掘削影響領域の形成機構とその挙動評価に関する研究	国際石油開発帝石ホールディングス(株)
佐　藤　健　一	岩盤の水理地質構造評価に基づく地下水制御システムの構築に関する研究	住友商事(株)
田　中　悟　史	高圧ガス貯蔵岩盤タンクの気密性能評価法に関する研究	東京電力(株)
西　谷　広　樹	地球統計学手法を用いた3次元水理地質モデルの構築法に関する研究	日本電気(株)
資源エネルギーシステム学分野		
栗　木　祐一郎	Analysis on microcrack development in granite subjected to the stress and thermal changes（応力及び温度変化により形成される花崗岩中のマイクロクラックの進展パターン解析）	ブラザー工業（株）
黒　村　哲　宗	Functional properties of porous aluminum produced by spacer method（スペーサー法により作製されたポーラスアルミニウムの機能特性）	三井金属鉱業(株)
平　岡　賢　二	Microscopic observation of methane hydrate film growth with or without inhibitors（純水およびインヒビター溶液中におけるメタンハイドレート膜の成長挙動）	三菱重工業(株)
松　元　　寛	Experimental and simulational investigation of vacancy effect on deformation and fracture behavior in nanocrystalline Ni（ナノ結晶Niの変形破壊挙動に対する空孔の影響についての実験及びシミュレーション）	東京電力(株)
資源エネルギープロセス学分野		
大　野　大　介	Three-dimensional analysis of a planar water jet impinging on a solid substrate	川崎重工業(株)
小　澤　慶　祐	3-D FEM analysis of formability of high-strength steel sheets in bore-expanding	ダイハツ工業(株)
栗　栖　　憲	Outflow characteristics of pressure medium in sheet hydroforming	JFEスチール(株)
南　川　友　樹	Numerical study of the collision dynamics and heat transfer of water droplets impinging on a hot solid	シャープ(株)
宇宙資源エネルギー学分野		
大　崎　博　史	Gravitational Effects on Electrochemical Processing of ZnO Nanowire Arrays	三菱重工業(株)
西　村　友　作	Fundamental Studies on Electrochemical Processing for Silicon Solar Power Generation System	京都大学大学院エネルギー科学研究科(博士後期課程進学)
横　井　　惇	Fundamental Study on Flotation of Starch	

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		
武川順一	エレメントフリーガラーキン法による岩石破壊試験の数値シミュレーションに関する研究	(財)地域地盤環境研究所
地質工学分野		
白石和也	特性曲線法弾性波動シュミュレーションと地震波干渉法による地下構造探査に関する研究	石油資源開発(株)
Jamhir Safani	Surface Wave Dispersion Modeling By Full-Wavefield Reflectivity and Inversion for Shallow Subsurface Imaging	University Sciences Malaysia
資源エネルギーシステム学分野		
袴田昌高	Fabrication and properties of microporous and nanoporous metals (マイクロポーラスおよびナノポーラス金属の創製と特性評価)	(独)産業技術総合研究所

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
ジオフィジクス分野				
武川順一	エレメントフリーガラーキン法による岩石破壊試験の数値シミュレーションに関する研究	芦田譲	平成19年3月23日	
地質工学分野				
白石和也	特性曲線法弾性波動シュミュレーションと地震波干渉法による地下構造探査に関する研究	松岡俊文	平成19年3月23日	
Jamhir Safani	Surface Wave Dispersion Modeling By Full-Wavefield Reflectivity and Inversion for Shallow Subsurface Imaging	松岡俊文	平成19年3月23日	
資源エネルギーシステム学分野				
袴田昌高	Fabrication and properties of microporous and nanoporous metals (マイクロポーラスおよびナノポーラス金属の創製と特性評価)	馬渕守	平成19年3月23日	

博士学位授与者 論文博士

氏名	研究論文題目	主査	取得年月日	備考
ジオフィジクス分野				
木口努	ハイドロフォンVSPによる透水性亀裂の検出及び特性評価の探査手法に関する研究	芦田譲	平成19年1月23日	京都大学大学院工学研究科資源工学専攻修士課程修了 平成元年3月
横田俊之	弾性波トモグラフィ解析の高精度化およびその適用に関する研究	芦田譲	平成19年1月23日	京都大学大学院工学研究科資源工学専攻修士課程修了 平成3年3月
佐伯龍男	地表付近の不均質性を考慮した反射法地震探査の高精度化に関する研究	芦田譲	平成18年3月23日	京都大学大学院理学研究科地球物理学専攻修士課程修了 昭和63年3月
田中荘一	重要構造物基盤としての泥質軟岩の工学的特性に関する実験的研究	芦田譲	平成19年3月23日	京都大学大学院工学研究科資源工学専攻修士課程修了 昭和45年3月

氏名	研究論文題目	主査	取得年月日	備考
地質工学分野				
高橋明久	油田開発最適化のためのオイルサンド貯蓄層キャラクタリゼーションに関する研究	松岡俊文	平成19年3月23日	
神田仁	列車走行時の沿線地盤振動に関する数値シュミュレーションの開発と防振対策への適用に関する研究	松岡俊文	平成19年9月25日	
ジオメカトロニクス分野				
榎本秀明	打撃応答分析に基づくトンネル覆工の健全度評価法に関する研究	朝倉俊弘	平成19年3月23日	熊本大学工学部土木工学科昭和52年3月卒業
地殻環境工学講座				
森岡宏之	AE計測を用いた大規模岩盤空洞の挙動評価及び情報化設計施工システムに関する研究	青木謙治	平成19年3月23日	京都大学大学院平成3年3月

旧金属系

学部卒業者

氏名	研究論文題目	就職先
材料設計工学分野		
大橋貴志	錫シリケートガラスを用いたリチウム電極材料の研究	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
梶並佳朋	溶液還元法によるニッケルナノ粒子製造の研究	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
神岡なつみ	マグネシウムスピネルの電気伝導特性の研究	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
平井浩介	ARB加工アルミニウムの音響的手法による転位構造の研究	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
張碩	$Zr_{50}Cu_{40}Al_{10}$金属ガラスの弾性と構造安定性の研究	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
田口裕健	鉛フリーSnZnはんだ合金の実用化の研究	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
表面処理工学分野		
上田佳典	塩基性水溶液を用いたCd1-xZnxTe半導体電析	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
大島弘樹	双方向パルス電解法による炭素鋼表面のFe-Cr合金化	東京大学大学院工学研究科(修士課程)
谷口元一	3価カチオンをドープした$BaZrO_3$のプロトン伝導度に及ぼすドーパントの影響	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
土本和明	チタンめっき用のイオン液体電解浴の調整	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
畑田直行	メタリン酸セシウムの電気伝導機構	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
細川晃平	Aurivillius型構造をもつ高速酸化物イオン電導体の合成と評価	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)

氏 名	研究論文題目	就職先
プロセス設計学分野		
菅 祥吾	焦電結晶による核融合反応	キヤノン（株）
衣川吾郎	スズ蛍光X線 Lα:Lβ 強度比の変化要因に関する研究	(株)小松製作所
南部文隆	バナジウム蛍光X線スペクトル形状変化に関する研究	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
畠山想	焦電結晶X線発生デバイスによる元素イメージング装置の開発	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
原田博規	連続X線スペクトルと黒体放射スペクトルの相関についての研究	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
横山卓史	高分解能蛍光X線分光器による Mn 化合物のケミカルシフトに関する研究	東京大学大学院工学系研究科(修士課程)
マイクロ材料学分野		
小濱和之	Cu(Ti) 合金薄膜を用いた自己組織化バリア層の形成に及ぼす基板絶縁膜の影響	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
佐藤大樹	TiN バッファ層上での n 型 GaN エピタクシャル成長に及ぼすドーパント元素添加量の影響	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
武田英久	スパッタ Ga_2O_3 薄膜材の微細構造及び電気・光学特性に及ぼす Sn 添加の影響	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
田中祐輔	GaN エピタクシャル成長に及ぼす TiN バッファ層の基板温度の効果	東京大学大学院工学系研究科(修士課程)
田畑俊行	スパッタ TiO_2 薄膜材の微細構造及び電気特性に及ぼすV族遷移元素添加の影響	東京大学大学院工学系研究科(修士課程)
量子材料学分野		
打田正輝	$ZnGa_2O_4$:Mn スピネルの磁性	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
後藤和宏	Mg2SnO4 スピネルにおける規則－不規則転移	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
中江保一	ハイドロキシアパタイトにおける格子間プロトン形成に関する第一原理計算	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
中島信也	BN ナノチューブおよびその修飾元素の電子状態	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
中根悠悟	電子状態計算に基づいた酸化物擬2元系状態図の系統的理解	日新製鋼（株）
結晶物性工学分野		
小庄孝志	リチウム二次電池負極用金属間化合物 Ni_3Sn_2 の微細構造と電気化学特性	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
小山達也	Ru_2Si_3 基シリサイドの結晶構造に及ぼす Mn 添加効果	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
鷲見芳紀	FePd － $L1_0$ 単結晶の塑性変形	大同特殊鋼（株）
松本竜司	Mg 水素化物の外部応力による脱水素反応の促進	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
王 晨	$L1_0$ 単結晶化合物の弾性率の温度依存性	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)

氏　名	研究論文題目	就職先
構造物性学分野		
磯　宏弥	液体イオウのX線小角散乱実験	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
岩田圭市	液体セシウムのX線小角散乱実験	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
広畑隆太	Pd-Cu-Ni-P金属ガラスにおけるβ緩和	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
吉野雄介	巨大磁歪Fe-Ga固溶体合金単結晶の力学損失	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
松田紘典	液体イオウのマイクロ秒領域における光黒化 - 光シャッターの可能性 -	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
材料物理学分野		
位高　渉	三元金属間化合物を用いた新規耐熱アルミニウム合金の開発	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
中西英貴	Al-Zn-Mg系合金中の$Al_3(Sc,Zr)$粒子が熱間押出中の動的再結晶に及ぼす影響	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
夜久智広	PLD法によるc軸配向$Ca_3Co_4O_9$薄膜の作製とその熱電特性	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
直江和明	金属基板上におけるYBCO超伝導薄膜及び酸化物中間層の微細組織と臨界電流密度	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
機能構築学分野		
伊藤　輝	イミダゾリウム型イオン液体を用いる電気化学的Cu-Sn合金形成	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
大野功太郎	反応性官能基をもつ有機分子の水素終端化シリコン表面への化学吸着	東京大学大学院工学研究科（修士課程）
衣笠貴博	アミノ終端化単分子膜への電気化学活性分子の接合	京都大学大学院エネルギー科学研究科（修士課程進学）
孫　慶蔚	Zr(IV)—カルボン酸系自己集積化多層膜の構造と安定性	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
南條信一郎	ヘキサデセンSAMのパターニングと金微細構造形成	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
畑中剛司	アミノシラン吸着高分子表面の熱安定性	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
エネルギー社会工学分野		
荒井佳代	炭化物による二酸化窒素の吸着分解	京都大学大学院エネルギー科学研究科（修士課程進学）
佐伯太翼	アルカリ水熱処理を施した酸化チタンの構造と光触媒能	北海道大学大学院文学研究科（修士課程）
佐々木暢也	機械的粉砕によるセルロースの分解	—
田中良平	RFスパッタリングを用いて作製したTiO_2薄膜とその光触媒能に関する研究	—
長谷川寛晃	酸化チタンの銅添加と熱処理による光触媒能の変化	京都大学大学院エネルギー科学研究科（修士課程進学）
平塚侑之	コンデンサースクラップからのタンタル回収	住友商事（株）
山本康弘	マグネシウムの窒素吸収に及ぼす混合粉砕の影響	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）

氏名	研究論文題目	就職先
材料プロセシング分野（現 プロセス熱化学分野）		
桶田昌嗣	溶融 CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO 系スラグへの塩素溶解度	京都大学大学院エネルギー科学研究科（修士課程進学）
片平圭貴	CaO-Nepheline 擬二元系状態図	京都大学大学院エネルギー科学研究科（修士課程進学）
川嶋悠右	鉄中への浸炭に及ぼす炭素源の結晶性の影響	京都大学大学院エネルギー科学研究科（修士課程進学）
佐々木太郎	Na_2O-Al_2O_3-SiO_2-Fe_xO 系スラグの熱力学	京都大学大学院エネルギー科学研究科（修士課程進学）
西野修司	CaO-CaF_2-Nepheline 系スラグのサルファイドキャパシティ	京都大学大学院エネルギー科学研究科（修士課程進学）
平岩佑介	水素-水蒸気ガス平衡法による極低酸素分圧の制御	京都大学大学院エネルギー科学研究科（修士課程進学）
高温プロセス分野		
木原功仁哉	炭素担持白金ルテニウム触媒合成法および触媒機能向上についての研究	東京大学大学院工学系研究科（修士課程）
駒村晃	高分解能透過型電子顕微鏡観察における超微粒子の計測評価方法に関する研究	京都大学大学院エネルギー科学研究科（修士課程進学）
佐久間俊行	プロトン伝導性リン酸塩のバルクおよび薄膜作製と特性評価	京都大学大学院修士課程エネルギー科学研究科（修士課程進学）
林泰之	高担持白金触媒合成条件とその機能についての研究	京都大学大学院修士課程エネルギー科学研究科（修士課程進学）
水田雄二	炭素担持白金触媒合成条件とその反応メカニズムについての研究	京都大学大学院修士課程エネルギー科学研究科（修士課程進学）
南部諒生	添加物使用による $CoSi$, $CoSi_2$, $NiSi$, $NiSi_2$ 製造方法	（株）東京放送
エレクトロニクス分野		
川久保亮	Sn 原子サイズ接点の高バイアスコンダクタンス	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
田中康弘	STM-BH 法による Si(001)2 × 1 表面直下のドーパントの観察	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
西尾哲	Au 単原子接点の交流インピーダンス	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
脇村登士紀	H_2O 吸着 Si(111)7 × 7 表面の STM-BH 観察	（株）インテック
材料デザイン分野		
窪島成隆	SiC/SiC 複合材の高圧水蒸気暴露劣化を抑制するための耐環境性コーティングの組織及び力学特性	京都大学工学研究科（修士課程進学）
中野聡志	GI-SAXS を用いた InAs ナノドットの構造解析	京都大学工学研究科（修士課程進学）
松林央	BSCCO 超伝導複合テープ材の臨界電流の耐曲げひずみ特性とその試料長さ依存性	京都大学工学研究科（修士課程進学）

修士課程修了者

氏　名	研究論文題目	就職先
材料設計工学分野		
東條　真	B_2O_3ガラスバッファー層を利用したFePtナノ粒子の結晶軸・配列制御	日本電気硝子（株）
宮城国朗	金属ガラスのミクロ構造と構造安定性	DOWAホールディングス(株)
宮崎明彦	金属スズコンポジット化による新しいリチウムイオン電池負極用材料の作製	東京ガス(株)
表面処理工学分野		
多田宏一郎	塩基性水溶液からの電析CdTeを用いた太陽電池の試作	(株)神戸製鋼所
谷ノ内勇樹	超プロトン伝導体CsH_2PO_4の脱水分解挙動	京都大学大学院工学研究科(博士後期課程進学)
中川英一	イオン液体中におけるチタンアノードの電気化学的挙動	住友金属鉱山(株)
プロセス設計学分野		
高山昭一	金属プラズモンの励起過程に関する基礎研究	新日本製鉄(株)
谷垣　武	電子制動放射と黒体放射	住友金属工業(株)
豊川良平	走査電子顕微鏡による酸化チタン光触媒の有機物分解反応に関する研究	(株)コベルコ科研
マイクロ材料学分野		
内田　悠	TiN金属バッファ層上におけるGaNエピタキシャル成長	新日本製鐵(株)
重歳恭寛	紫外域透明導電性Ga_2O_3薄膜材の開発	JFEスチール(株)
浜田良太	スパッタ法によるITO代替材料透明導電性TiO_2薄膜材の開発	松下電器産業(株)
量子材料学分野		
稲垣育亮	IV価セリウムリン酸塩の合成と電気伝導性評価	JFEスチール(株)
井上陽太郎	TiO_{2-x}不定比化合物におけるshear構造の第一原理計算	JFEスチール(株)
熊谷　悠	コバルト複合酸化物における$L_{2,3}$端XANESの理論計算	京都大学大学院工学研究科(博士後期課程進学)
斎藤陽平	固体高分子形燃料電池におけるPt系合金電極への分子吸着の第一原理計算	日産自動車(株)
林　博之	室温強磁性を示すMn添加Ga_2O_3薄膜の合成と評価	京都大学大学院工学研究科(博士後期課程進学)
結晶物性工学分野		
石田　央	$Ru_{1-x}Re_xSi_y$チムニーラダー相の結晶構造と熱電特性	トヨタ自動車(株)
井手浩充	$L1_0$型CoPt単結晶の塑性変形	(株)IHI
藤原公計	Ti_5Si_3単結晶の塑性変形	住友金属工業(株)
宮田麻衣	気相凝集法による磁性ナノ粒子の作製	JFEスチール(株)

氏 名	研 究 論 文 題 目	就 職 先
構造物性学分野		
多 田 裕 俊	液体ヒ素セレンの小角散乱実験	住友金属工業（株）
西 勝 大	規則構造結晶における拡散素過程の力学緩和による研究	モルガン・スタンレー証券(株)
向 本 修 平	流体ルビジウムの高分解能非弾性X線散乱実験	アイシン精機（株）
渡 邊 建	イリジウム基合金の物性と高温材料特性	トヨタ自動車（株）
材料物理学分野		
二 見 俊 介	金属基板上におけるYBCO超伝導薄膜及び酸化物中間層の微細組織と臨界電流密度	(株)三井住友銀行
森 本 芳 史	Mn金属間化合物が分散したP/M Al-Zn-Mg-Mn合金の再結晶挙動	トヨタ自動車(株)
材質制御学分野		
田 中 佑 允	Fe-高Cr合金のプラズマ窒化挙動	伊藤忠商事（株）
宍 戸 久 郎	鉄合金α'マルテンサイトの形態におよぼす正方晶性および変態時体積変化の影響	(株)神戸製鋼所
機能構築学分野		
浅 井 省 吾	有機酸—チタン(IV)系自己集積化多層膜	住友電気工業(株)
藤 井 章 輔	フェロセン系自己集積化混合単分子膜の形成挙動	(株)東芝
前 田 肇	シリコン直接結合型SAMの化学的耐久性	日産自動車(株)
宮 崎 孝 志	イオン液体中におけるフェロセニルチオール単分子膜の電気化学的挙動	モルガン・スタンレー証券(株)
エネルギー社会工学分野		
大 柳 友 洋	酸化銅微粒子の反応活性に関する研究	(株)日本総合研究所
志 智 一 義	リチウムの窒素吸収特性に関する研究	松下電器産業(株)
錦 織 歩	製鋼スラグを利用した二酸化炭素の固定	(株)神戸製鋼所
西 山 裕 一	炭化珪素の環境触媒能に関する研究	(株)IHI
森 哲 也	国内食糧輸送におけるCO_2排出削減の可能性について	アビームコンサルティング(株)
山 崎 健太郎	TiO_2の光触媒反応に対する磁場の影響	(株)キーエンス
材料プロセシング分野（現 プロセス熱化学分野）		
岩 崎 洋	溶融CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO-FeO系スラグ中への塩素の溶解度	JFEスチール(株)
笠 原 秀 平	CaO-Al_2O_3-CaF_2-Nepheline系スラグのサルファイドキャパシティ	住友金属工業(株)
川 崎 勇 輔	ポリエチレンによる鉄鉱石の還元	新日本製鐵(株)
田 中 裕 士	紙およびバイオマスによる酸化鉄と鉄鉱石の還元	(株)神戸製鋼所

氏名	研究論文題目	就職先
高温プロセス分野		
外島 光太郎	$(Zn_xCu_{2-x})V_2O_7$の熱電特性と相変態	(株)キーエンス
内藤 豪是	溶融塩化カルシウム電解による$TiCl_4$の還元	(株)神戸製鋼所
量子エネルギープロセス分野		
島田 佳浩	低温型燃料電池触媒の形状及び機能に及ぼす合成条件に関する研究	防衛省
中西 貴之	Photoinduced photoluminescence fatigue-recovery phenomena in Ge-S chalcogenide glass	京都大学大学院人間・環境学研究科（博士後期課程）
耒 順秋	SOFCカソード用ペロブスカイト型酸化物の構造解析と電極反応機構評価	三菱マテリアル（株）
エレクトロニクス分野		
岩成 朋紀	Si原子サイズ接点のコンダクタンス	(株)シマノ
寺前 裕美	BDT単分子の高電界電気伝導特性	(株)神戸製鋼所
宮脇 悠	電荷状態の異なるS－Au(111)表面吸着系でのSTM－BHイメージング	アジレント･テクノロジー(株)
材料デザイン分野		
大高 幹雄	GI-SAXSを用いたナノドットの形成過程、形態安定性の解析	古河スカイ（株）
藤本 真裕	Bi2223超伝導テープ材の局所不均一臨界電流分布と試料全体の臨界電流の相関	(株) リコー

博士後期課程修了者

氏名	研究論文題目	就職先
表面処理工学分野		
八木 俊介	Surface Modification Process for High-Purity Iron and Carbon Steel by Alternating Pulsed Electrolysis	京都大学大学院工学研究科(助教)
量子材料学分野		
東後 篤史	Point defects and lattice dynamics of tin oxides and lead oxides	アーヘン工科大学(PD)
池野 豪一	Relativistic many-electron calculations for L2,3 x-ray absorption spectra of 3d transition metal compounds	京都大学大学院工学研究科(PD)
世古 敦人	Phase stability and structure of oxides from first principles	京都大学次世代開拓研究ユニット(助教)
吉岡 聰	Structures and phase relations of ZnO-R_2O3 (R=Al, Ga, In) pseudobinary systemss	九州大学大学院工学研究院(助教)
量子材料学分野		
柴田 暁伸	鉄合金レンズマルテンサイトの内部微視組織よび結晶学に関する研究	東京工業大学精密工学研究所
エネルギー社会工学分野		
Kisor Kumar Sahu	REE SPACE IN RANDOM PACKING OF SPHERES AND BEHAVIOR OF MICROBUBBLES IN LIQUID（球の無秩序充填における自由空間と液体中のマイクロバルブの挙動）	Washington University
早渕 百合子	エネルギー・環境教育の実践と波及効果の評価	(独)国立環境研究所
材料デザイン分野		
森下 浩平	Microstructure and Mechanical Property of SiC Fiber, SiC/SiC Composite and Environmental Barrier Coating Exposed in Air at High Temperatures（高温大気暴露されたSiC繊維，SiC/SiC複合材料および耐環境コーティング層の組織および力学特性）	日本学術振興会特別研究員PD(京都大学)

博士学位授与者 課程博士

氏名	研究論文題目	主査	取得年月日	備考
表面処理工学分野				
八木俊介	Surface Modification Process for High-Purity Iron and Carbon Steel by Alternating Pulsed Electrolysis	粟倉泰弘	平成19年3月23日	
量子材料学分野				
東後篤史	Point defects and lattice dynamics of tin oxides and lead oxides	田中功	平成18年9月25日	
池野豪一	Relativistic many-electron calculations for $L_{2,3}$ x-ray absorption spectra of 3d transition metal compounds	田中功	平成19年3月23日	
世古敦人	Phase stability and structure of oxides from first principles	田中功	平成19年3月23日	
吉岡聰	Structures and phase relations of ZnO-R_2O_3(R=Al, Ga, In) pseudobinary systems	田中功	平成19年3月23日	
材質制御学分野				
柴田暁伸	鉄合金レンズマルテンサイトの内部微視組織および結晶学に関する研究	牧正志	平成19年3月23日	
エネルギー社会工学分野				
Kisor Kumar Sahu	REE SPACE IN RANDOM PACKING OF SPHERES AND BEHAVIOR OF MICROBUBBLES IN LIQUID（球の無秩序充填における自由空間と液体中のマイクロバルブの挙動）	石原慶一	平成18年9月25日	
早渕百合子	エネルギー・環境教育の実践と波及効果の評価	石原慶一	平成18年9月25日	
材料デザイン分野				
森下浩平	Microstructure and Mechanical Property of SiC Fiber, SiC/SiC Composite and Environmental Barrier Coating Exposed in Air at High Temperatures（高温大気暴露されたSiC繊維，SiC/SiC複合材料および耐環境コーティング層の組織および力学特性）	落合庄治郎	平成19年3月23日	

博士学位授与者 論文博士

氏名	研究論文題目	主査	取得年月日	備考
構造物性学分野				
松田和博	低密度流体ルビジウムの静的構造に関する研究	田村剛三郎	平成18年11月24日	京都大学大学院工学研究科材料工学専攻博士後期課程退学 平成15年6月
材質制御学分野				
藤原知哉	オースフォームドベイナイト型厚鋼板の強靱化に関する研究	牧正志	平成19年1月23日	
矢澤好弘	析出物制御によるフェライト系ステンレス鋼の加工性向上に関する研究	牧正志	平成19年1月23日	
材料プロセシング分野 **(現 プロセス熱化学分野)**				
長谷川将克	Thermodynamic Studies on Metallic and Oxide Solutions for Environmental-friendly Iron and Steelmaking	岩瀬正則	平成19年3月23日	京都大学大学院エネルギー科学研究科修士課程 平成11年9月修了

水曜会誌卒業年次幹事制について

水曜会では，下記のような付則にもとづき卒業年次幹事を委嘱しております．年次幹事には卒業の年次ごとに金属系，資源系より各１名の年次幹事を定め，各系同年次会員の連絡先の掌握や同年次会員を代表して水曜会運営へのご協力をお願いすることになります．年次幹事にご就任頂く会員の方々には，水曜会の活動をより充実したものとするため，何卒ご協力の程お願いいたします．

水曜会年次幹事に関する付則

（目　　的）

第１条　水曜会の円滑な運営のため年次幹事を定め，水曜会会長は次の任務を依頼する．

1. 同年次会員の連絡先の掌握，
2. 同年次会員を代表して水曜会運営への協力

（定　　員）

第２条　年次幹事を各卒業年次ごとに旧資源系（鉱山）１名，旧金属系（冶金）１名を定めるものとする．

（任　　期）

第３条　任期は２年とし，重任は妨げないものとする．

（委　　嘱）

第４条　年次幹事の選任は，同年次会員の推薦により会長が委嘱するものとする．

この付則は平成15年６月14日より施行する．

逝　去　会　員

平成18年12月２日	石井　千秋	昭22・冶
平成17年11月28日	丸岡　政彦	昭37・鉱
平成18年６月24日	真砂野　暁	昭37・鉱
平成18年１月27日	伊東　國男	昭11・採鉱
平成18年７月27日	西村　光彦	昭40・金
平成18年９月25日	池田　　博	昭31・冶
平成18年２月20日	長谷川静清	昭24・鉱
平成18年６月27日	伊吹　昭男	昭19・冶
平成18年11月５日	大川　知夫	昭14・採鉱
平成18年12月25日	福井　利安	昭38・冶
平成19年２月４日	森本　芳行	昭20・冶
平成19年１月21日	公荘　惟成	昭13・採鉱
平成19年４月15日	鍛　　美雄	昭36・鉱
？	安部　雅幸	平３・資源
平成19年１月31日	村中　啓人	昭29・冶
平成18年12月	小池　伸吉	昭26・冶
平成18年９月６日	今村　良司	昭14・採鉱
平成18年12月８日	上田　剛久	昭54・金
平成19年５月４日	川原　　勢	昭16・12採鉱
平成18年11月11日	深瀬　　徹	昭26・冶
平成19年２月13日	中村　　弘	昭21・鉱
平成18年９月20日	斎藤　敏夫	昭18・鉱
平成18年秋	内山　道良	元教官
平成19年８月11日	宮岡　秀夫	昭45・金

教　室　報　告

教員人事

＜旧資源系＞

平成19年１月31日	真田　佳典	辞職
平成19年３月31日	芦田　　譲	定年退職
平成19年４月１日	西藤　　潤	助教に採用
平成19年４月１日	深堀　大介	助教に採用
平成19年５月１日	MIRANDA, Caetano Rodrigues	助教に採用
平成19年５月16日	上田　　晃	准教授に採用
平成19年９月１日	辻　　健	助教に採用
平成19年10月16日	薛　　自求	講師に採用

＜旧金属系＞

平成19年３月１日	野瀬嘉太郎	助手に採用
平成19年３月31日	牧　　正志	定年退職
平成19年３月31日	村上　正紀	定年退職
平成19年３月31日	冨井　洋一	定年退職
平成19年３月31日	田邉　晃生	定年退職
平成19年３月31日	沼倉　　宏	辞職（転任）
平成19年３月31日	松本　　要	辞職（転任）
平成19年３月31日	桑原　彰秀	辞職
平成19年４月１日	中村　裕之	教授に採用
平成19年４月１日	岸田　恭輔	准教授に昇任
平成19年４月１日	八木　俊介	助教に採用
平成19年５月１日	田畑　吉計	助教に採用
平成19年８月１日	平藤　哲司	教授に採用

平成19年３月31日　までは旧来の名称で記載しました．
平成19年４月１日　教員組織の改正に伴う教授、准教授、助教という名称になりました．

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（65mm以内）または2段通し（140mm以内）のいずれかとなることを考慮されたい．原図は刷上り図面の少なくとも2倍に書かれたい．この際図面の縮尺を考慮して作図し，とくに図中の文字の大きさについては十分に注意を払われたい．また，原図の左下隅に著者名，論文名，図表番号などを必ず明記されたい．

(3) 単位は国際単位系（SI単位系）によることが望ましい．

(4) 参考のため文献を記す場合には本文の肩に1)．2)などを付し，論文末尾につぎの形式で書き加えること．

1) 大塚一雄，宮城　宏：日鉱誌，**87**，[1001]，521-525，(1971)

2) M.R. Taylor, R. S. Fidler and R. W. Smith: Metallurgical Trans., AIME. **2**, [7], 1793-1798, (1971)

［注］原稿用紙などは編集委員会までご請求下さい．

水曜会誌の原稿募集について

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

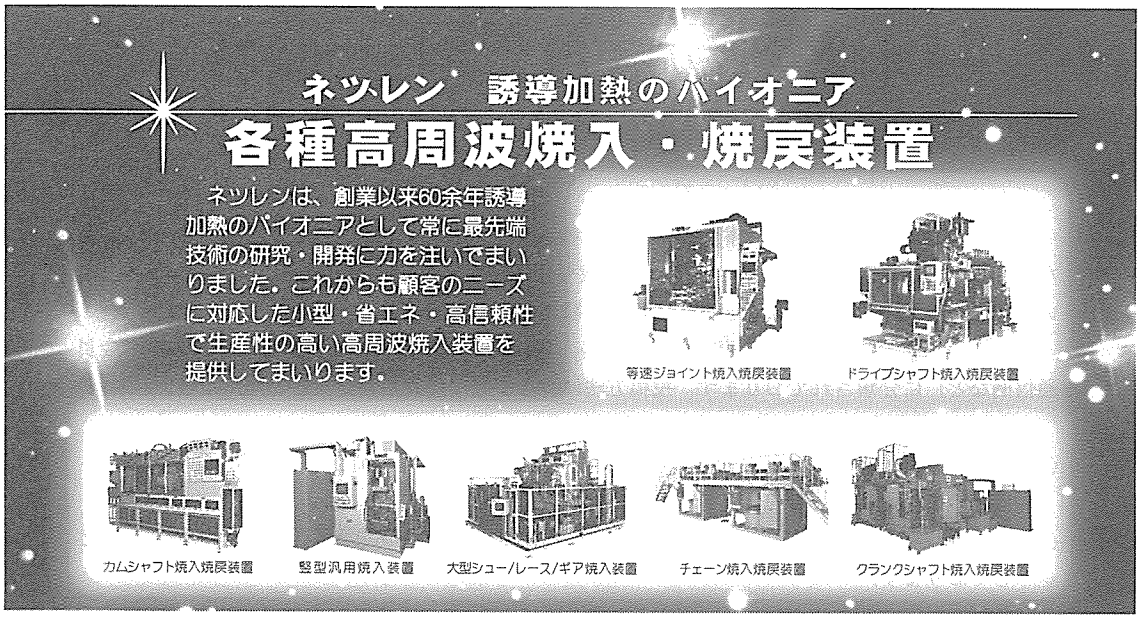
(7) 会員の声：会員の皆様の幅広い意見・提言を募集する「会員の声」を設けております．

(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．



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(代)	FAX.03-3449-3969
IH事業部営業部	・東部営業所	〒254-0013	神奈川県平塚市田村7-4-10	TEL.0463-55-1552	FAX.0463-55-4238
	・中部営業所	〒448-0006	愛知県刈谷市西境町広見97-2	TEL.0566-26-1415	FAX.0556-26-1114
	・西部営業所	〒555-0013	大阪市西淀川区千舟2-11-24	TEL.06-6471-5551	FAX.06-6474-6880
	・海外営業課	〒254-0013	神奈川県平塚市田村7-4-10	TEL.0463-55-1552	FAX.0463-55-4238

平成19年度水曜会誌編集委員

委員長 朝倉俊弘
幹事 邑瀬邦明(会誌) 伊藤和博(広告)
委員 福中康博 奥村英之 杉村博之 澁江和久
久保田耕平 平藤哲司 竹島康志 沼倉宏
松本要 中内啓雅 兼田心 酒井俊英
木戸俊朗 袴田昌高 萩野智行

平成19年10月25日 印刷 平成19年10月30日 発行
編集兼発行者 粟倉泰弘
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
京都大学工学部8号館内
電話(075)753-5930
振替口座 京都 01090-8-26568 水曜会
銀行口座 みずほ銀行出町支店 普通 1242526 水曜会

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。

創業以来70余年
私たちは合金生産技術の可能性を
追求しています。

非鉄
中間合金
りん銅、マンガン銅、けい素銅、
ボロン銅、鉄銅等

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

OG 株式会社大阪合金工業所
代表取締役会長　水田泰次

本社　〒910-3131　福井市白方町第45号5番地9　TEL（0776）85−1811㈹　FAX（0776）85−1313
東京　〒104-0031　東京都中央区京橋3丁目9番4号　TEL（03）3563−0301㈹　FAX（03）3563−0302

October 2007

CODEN : SUIYAA
Vol. XXIII, No. 10

Suiyōkwai-Shi

TRANSACTIONS OF THE MINING AND METALLURGICAL
ASSOCIATION
KYOTO

CONTENTS

Retirement Memorial Lectures

Attraction of Steels from the World of Microstructure ..... Tadashi MAKI 1115
The Current Status of Resources and Energy in Japan ..... Yuzuru ASHIDA 1125
Humans and the Nature in Terms of Metals ..... Teruo TANABE 1141

Memorial Lecture in the Annal Meeting of Suiyokwai

The Materials Industry's Contribution to the Recycle-oriented Society through the Environmental and Recycling Business ..... Haruhiko ASAO 1153
Memoirs of Past 40 Years of Research on Rock Mechanics ..... Katsuhiko SUGAWARA 1162

Forum

Consideration of Non-metallic Minerals in Malawi ..... Takehiro YOKOYAMA 1172
The Frustrations of Mr. Konosuke Matsusita in His Later Years ..... Yoshio ATSUTA 1177
Effects of Geometry in Metallic Magnets ..... Hiroyuki NAKAMURA 1182
Application of Ordered Mesoporous Silica Materials to Catalysis ..... Takashi YAMAMOTO 1188
New Growth Method of Bulk Polycrystalline Silicon for Solar Cells ..... Yoshitaro NOSE 1194
Study on Strongly Correlated Electron Systems and Frustrate Magnets ..... Yoshikazu TABATA 1198
Fundamental Study on Hydraulic Test Method of Rock by Means of X-ray CT ..... Daisuke FUKAHORI 1204
Optimal Strength Distribution of Rigid-Plastic Body ..... Jun SAITO 1208
Molecular-scale Investigations of Organic Materials using FM-AFM ..... Takashi ICHII 1212
Metal Deposition via Oxidation-reduction Reactions ..... Shunsuke YAGI 1216

Current Studies in Laboratories 1220

Suiyokwai Information 1244

Letters to Editor 1281

Kyoto University
Japan