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24巻　第1号

目　　次

退職記念講演
液体金属にロマンを求めて……田村剛三郎……　1
材料と共に歩んできた40年間……村上　正紀……　16

大会記念講演
石油開発：あらたなる挑戦……牧　武志……　29
材料工学専攻の自己点検評価……栗倉　泰弘……　39

談　話　室
蓄諸考……熱田　善男……　49
モノづくりと人づくり　秋田職能短大から……杉村健太郎……　53
有限量の資源とその探査の重要性……三ケ田　均……　55
地熱地域へCO_2固定貯留技術……上田　晃……　60
ぼかしてなんぼ！？
－走査型透過電子顕微鏡像からナノクラスターのサイズ分布を測定する－……岡本　範彦……　67
精密角度回転核磁気共鳴法による強相関電子物質の研究……和氣　剛……　72
地震探査を使って地球を解明する……辻　健……　77
第一原理計算に基づく多元合金の構造と相安定性の予測……弓削　是貴……　83

研究速報……　89

会　　報……　112

卒業者名簿……　146

平成20年10月30日発行

京　都　大　学

水　曜　会

もっとグローバルに。鉄ビジネスは、生まれ変わる。

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

お問い合わせは広報センター　Tel.03-3275-5021

あなたのための
最強になりたい。
新日鉄。



http://www.nsc.co.jp

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

挑戦・柔軟・誠実
JFE スチール

JFE



JFE スチールは、
常に世界最高の技術をもって
社会に貢献します。

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

創業以来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(代)　FAX（0776）85−1313
東京　〒104-0031　東京都中央区京橋3丁目9番4号　TEL（03）3563−0301(代)　FAX（03）3563−0302

SUMITOMO METALS

地球で生きる。
世界で活きる。

住友金属工業株式会社

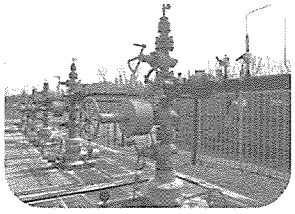
お問合せ先　人事労政部人事室　明治・若江

URL：http://www.sumitomometals.co.jp

本社／〒104-6111　東京都中央区晴海1-8-11
トリトンスクエア／オフィスタワーY

TEL：03-4416-6160　FAX：03-4416-6794

E-mail：recruit@sumitomometals.co.jp



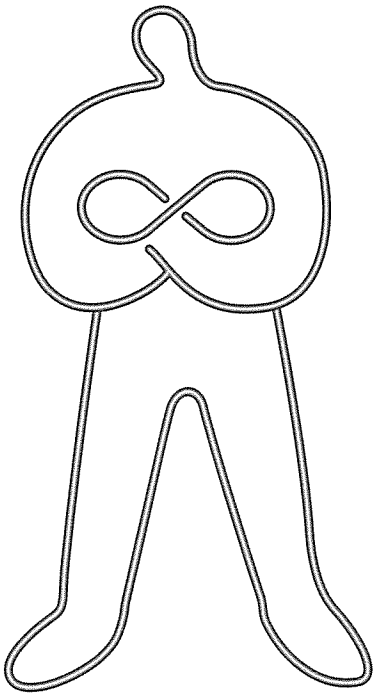
石油、天然ガスの採掘井に取り付けた地上の設備で、バルブを組み合わせた形から“クリスマスツリー”と呼ばれている

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/



メタルスタイリスト

METAL STYLIST

FUKUDA

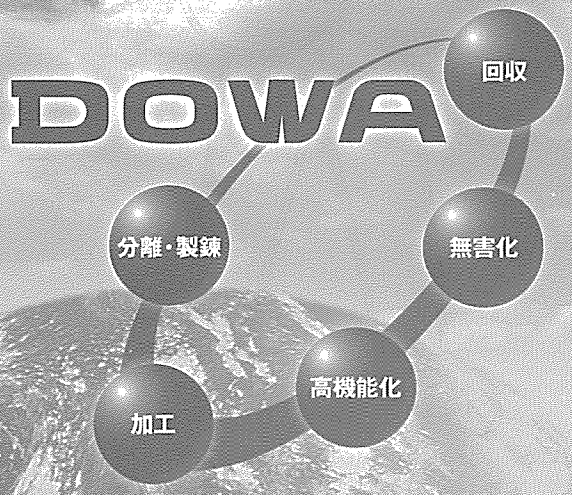
FUKUDA METAL FOIL & POWDER CO.,LTD.

福田金属箔粉工業株式会社

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

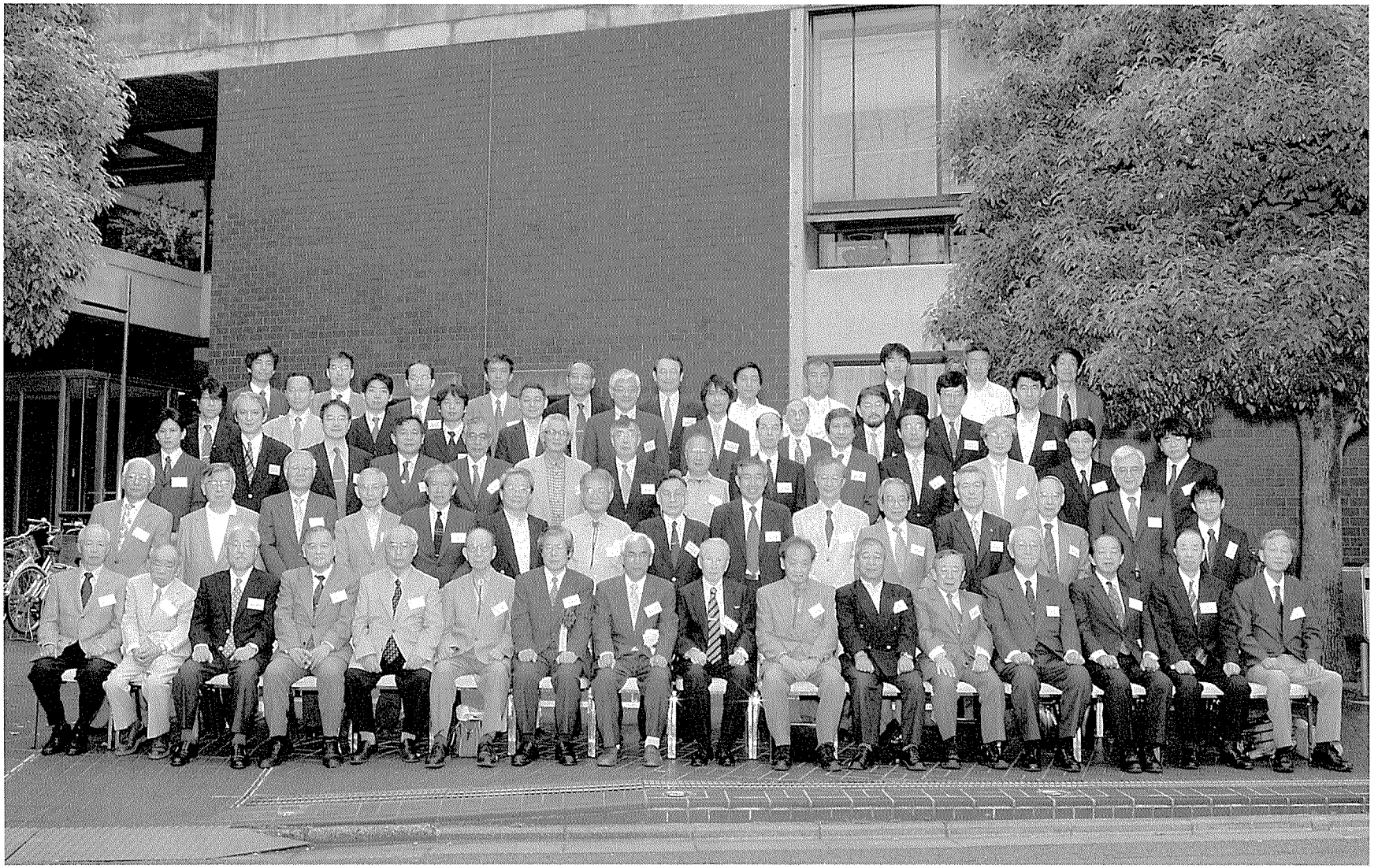
資源循環をテーマに、
産業と地球環境に貢献する。

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/



平成20年度　水曜会大会　記念写真（平成20年６月７日　京大会館にて）



平成20年度　水曜会大会　懇親会寄せ書

退職記念講演

液体金属にロマンを求めて

田村　剛三郎*

Forty Years in the Study of Liquid Metals

by Kozaburo TAMURA

私の最終講義のために，このようにたくさんの方々に来ていただき本当にありがとうございます．遠く九州や広島，東京から駆けつけていただいた方々，10年，20年ぶりの懐かしいお顔も拝見することができます．今日は，普段の講義と違った何か気の利いたお話ができればといろいろ思案いたしましたが，結局のところ，これまで40年間の研究生活を振り返るという，代わり映えのしない話になってしまいました．少し硬い話になりますが，しばらくの間ご辛抱願いたいと思います．今日は，このような内容でお話したいと思います．まずはじめに，湯川先生のこと，2番目に，私が研究生活を始めることになった京大理学部物理学教室でのこと，4回生の研究室配属から修士・博士課程を経て，博士号取得後の定職に就けなかった浪人（OD，オーバードクター）時代，さらに助手の期間を通じてお世話になった長谷田・遠藤研究室のこと，研究にまつわるエピソードをいくつかピックアップしてお話をしたいと思います．続きまして，広島大学へ移り，そこでスタートした超臨界金属流体の研究を紹介したいと思います．最後に，再び京都大学に移ってからのお話をしたいと思います．

1．ご退官前の湯川先生（3回生）

私が京大理学部に入学したのは1964年（昭和38年）4月です．ちょうど池田内閣の所得倍増計画や科学技術振興策が取られた頃で，よくできる高校生達は我も我もと工学部を目指しておりました．世界に冠たる技術立国，今日の日本の礎を築いたのは紛れもなく私と同世代の彼らであります．学生服の襟にTのマークをつけた工学部の学生たちは，引き締まった顔をして肩で風を切っておりました．今では様子がすっかり変わり果ててしまったようですが．そのような中で，私がなぜ理学部を選んだかと申しますと，湯川先生のことがあったからです．湯川先生がノーベル賞をもらわれて間もない頃，片田舎の小学生だった私はその伝記を読んで強い印象を受け，先生のようになりたいものだと思ったものです．のちに京大の物理学科に入り，同じような動機で物理を志したという同級生が少なからずいたので驚きましたが，これを世に湯川効果と呼びました．湯川先生の3回生向けの講義，物理学通論が基礎物理学研究所の講堂でありました．先生はいつも独り言のように，ニュートン自身も慣性質量の取り扱いには困っていたようですね，プリンキピアのその部分の記述はまことに歯切れが悪いとか，ローレンツ短縮を起こした超高速列車の前に溝があったらどうなりますかなどと問いかけ，私たちを煙にまかれました．真実はシンプルです，難しい数学なんか使いません，特殊相対性理論は中学生でも分かるルートしか使っていないでしょうと話されたこともあります．今から思えば，当時の素粒子論混迷の時代にあってそのような言葉を吐かれたのでしょう．私たち学生にはその辺りの事情を知る由もありませんでした．期末試験のときには，黒板に物理定数について述べよとだけ書いて出て行かれました．もちろん監督者はおりません．そのとき湯川先生は，万有引力定数が宇宙の進化と共に変化するという説に興味をもっておられたふしがあります．また，その頃に来日中のハイゼンベルクの講演が経済学部講堂であり，湯川先生が司会をされました．今から思えば，何も分からない我々学生にまで学問の香りが漂ってくるよき時代でありました．学問をするのが当然という安心感がありました．いまや大学は変貌し，経営能力が問われ，社会への説明責任が重視されるようになりました．大学の門が大きく開かれ，多くの有用なものが入ってきたかも知れませんが，それと入れ代わりに，失ってはならな

*京都大学名誉教授

いものまで流失してしまったようにも思えます．この現状をみて湯川先生はどのように言われるでしょうか．きっと，人間味がなくなったねと残念がられることでしょう．

2. 理学部の長谷田・遠藤研究室
（4回生～大学院～OD～助手）

湯川先生の講義が基礎物理学研究所であったのは，北部キャンパスの物理教室が改築工事中であったためで，ほうぼうに間借りをして講義を受けました．工学部土木教室のレンガ造りの薄暗い建物の中でX線回折実験をしたこと，土木教室の前にあった文学部図書室の窓ガラスをキャッチボールで割ったことなど今も鮮明に覚えております．

3回生が終わる頃，研究室配属のためのガイダンスが土木教室の一室でありました．ある日，東北大学金属材料研究所から移ってこられたばかりの若手助教授の話があるというので物見遊山のつもりで友人と出かけてゆきました．学生は3人しかおりませんでした．はじめに先生は，君たちフェルミ面を知っていますかと質問されました．他の二人ははいと答えましたが，私はといえば，恥ずかしながらその初歩的なことを全く知りませんでした．先生は，液体金属中の伝導電子の振る舞いについて最新の金属電子論をもとに熱を込めて話されました．ちょうどその頃の1960年代後半は，周期系の電子論が非周期系へと大きく転回した時期に相当し，英国のザイマンや後にノーベル賞を受賞したモットが液体金属の電子論を新たに展開し大活躍をしておりました．液体金属の国際会議が立ち上がったのもこの頃でした．先生の話の中身は充分には咀嚼できませんでしたが，そのときに受けた印象，新鮮な驚きを今でもはっきりと覚えております．この日のガイダンスをきっかけとして私は液体金属の分野へ進むことになったわけです．このときの先生が遠藤裕久先生であり，その後長く指導をしていただくことになりました．

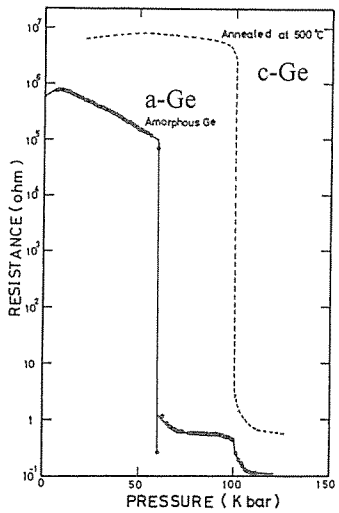
長谷田泰一郎先生は，若手の教授として金属材料研究所から遠藤先生と共に物理学教室に移ってこられました．低温物理とくに磁性がご専門で，遠藤先生の液体金属，どちらかといえば高温がご専門であることとは対極にありましたが，金属微粒子を一緒にやろうということでこちらに来られたと聞いております．その頃，東大の久保亮五先生が金属微粒子の理論を出され，その個数選択性や特異な電子状態に興味をもたれたようです．粘土鉱物であるゼオライトの空洞中に金属原子を詰め込んで微粒子を作ろうと長く試みておられました．私はその研究に加わりませんでしたので長谷田先生から直接のご指導は受けることはありませんでしたが，折に触れ科学者としての心構えを教えていただきました．4回生になってはじめての面談のときのことですが，長谷田先生は，君は何を不思議に思うかねと問われました．蛍の発光と炭酸同化作用ですと答えたように記憶しております．京大に入って間もない頃，改築前の旧中央図書館で，さて大学で何をしようかと考えたことがあります．そのとき思ったのが，蛍がどのようにして光を作り出せるのか，炭酸ガスと水に光が当たるだけでどうしてあのように葉や実ができるのかということでした．いまや私の専門分野はそれらと大きく違ったものになりましたが，40年を経てもなおこのようなテーマはホットであると思います．素朴な疑問や発想を長谷田先生はいつも大切にされました．また，実験を通して自然を見よと言われ，実験をとても重視されました．かつての金属材料研究所では学生が机に向かっていると椅子を蹴飛ばされ，そんなことは家でやれここでは一生懸命実験をしろと叱られたということです．京大の中にありながら長谷田・遠藤研究室の雰囲気は一味違ったものであり，ガラス細工や金属工作，木工，溶接の仕方を一生懸命身につけて皆実験を楽しみました．

長谷田先生は，鬼気迫る結果を出せとも言われました．鬼気迫るということがどのような感じか，先生は能を観ていてゾクッとする瞬間の感じであると仰言いましたが，博士課程の実験中にそれを一度だけ体験しました．アモルファス（非晶質）ゲルマニウムは圧力をかけてゆくと結晶と質的に違う半導体 - 金属転移を起こすのではないかと考え，その当時六本木にあった東大物性研の箕村茂先生のところへ出かけ超高圧実験をしていた頃の話です．蒸着でつくったアモルファスゲルマニウムの薄い膜は壊れやすく，電気抵抗を測定することができないまま2年が過ぎてしまいました．先生方は大いに心配され，研究テーマを変えたらどうかと言われるし，私自身，期待していることが本当に起こるのであろうかと大いに不安であり，窮地に立たされました．実験成功祈願のため研究所すぐ近くの乃木神社にお参りもしました．その兆しが現れたのは真夜中のことです．電気抵抗を記録するチャート紙の上をペンが走るのを眺めながら，手押しポンプを動かし圧力をかけていました．圧力が6万気圧ほどかかったところでペン先がピクッと動きました．薄い試料膜が壊れないように膜に垂直な方向の抵抗を測っていたので，変化があっても小さいであろうと考えてはおりましたが，それを見たとき，これがまさに期待していたシグナルであり電気的ノイズではないと直感しました．このときばかりはゾクッときました．翌朝，箕村先生にデータを見せてノイズではないことを説明しましたが，なかなか納得してもらえませんでした．しかし，その後すぐに薄膜に沿った方向の電気抵抗を測ることに成

功しました．すでに確信をもっていたことですが，まさにその通り，6万気圧のところで電気抵抗が6桁もジャンプし，アモルファスに特有の半導体 - 金属転移がはじめて見つかりました．図1は，1972年に東京で開かれた第2回液体金属国際会議で初めて発表したものです[1]．この結果にモット先生が大変興味をもたれ，このアモルファスゲルマニウムの半導体 - 金属転移の機構についての解釈を英国の学術誌フィロソフィカル・マガジンに載せております．その後，物性研の方たちが研究に加わってこられ，シリコンなど他のアモルファス半導体について詳しく研究がなされましたが，この転移がランダム系に特有の電子の局在性・非局在性に関わる現象であるかどうかは結局のところ決着がつかないまま時が流れてゆきました．ごく最近，第一原理分子動力学シミュレーションが行われ，これがアモルファス - アモルファス転移であるという話になっているようですが，このことが，アモルファス構造を保ったまま何か電子的な変化が起こったのか，あるいは，あるアモルファス構造から別のアモルファス構造への構造転移なのかよく分かりません．当初の関心事であった電子の局在性・非局在性の問題，いわゆるアンダーソン局在との関連性がどうなのか，その辺りの物理が結局のところはっきりしていないように思えてなりません．

アモルファスゲルマニウムやシリコンの半導体 - 金属転移の他に，代表的なガラス半導体として知られる As_2S_3 や As_2Se_3 などのアモルファスカルコゲナイドについても半導体 - 金属転移とそれに伴う構造変化について研究を行いました．この研究は，大学院の虫上雅人君や筒博君と一緒に行ったものですが，結晶とアモルファス状態の熱的安定性についての考え方に広がりをもたせるきっかけとなったものですので，ぜひ紹介させていただきたいと思います．今でこそアモルファス物質は市民権を得て様々な分野で応用されておりますが，私が大学院生の頃は，アモルファスは魔物であるといわれて邪魔者扱いを受けておりました．確かに周期的な原子配列を持つ結晶のように，一部分さえみれば全体のことが分かるという簡明さはないし，ランダムな原子配列をしているアモルファス物質には何となく判然としないところがあります．さらに，温度を上げれば結晶化するという危うさ（不安定さ，準安定性）がありますので，余り好まれなかったのだと思います．それでもアモルファスは面白いのであるという人たちは，結晶しかないという人達とは性格や好みが随分違っているのではないかと思います．物事に対する見方が比較的柔軟で，多角的な見方ができるのではないでしょうか．ちょっと脱線してしまいました．本題に戻り，図2をみていただきたいと思います．左側のグラフは，アモルファス As_2S_3 のX線回折パターンの圧力変化を示したものです[2]．横軸は回折角です．圧力を8万気圧かけていってもアモルファス特有のブロードなパターンは大きな変化をしませんが，低角側のFSDP（First Sharp Diffraction Peak）と書かれたピークは圧力をかけると次第に弱くなり，8万気圧では完全に消えてしまいます．液体やアモルファス物質に圧力をかけて構造実験をされた経験をお持ちの方はお分かりだと思いますが，圧力をかけると原子間距離が徐々に短縮しますから回折パターンは全体として高角側にシフトしてゆきます．もちろん10万気圧程度ではそれほど大きな変化は期待できません．私たちは，FSDPが消失することに大変驚きました．さらに驚いたことに，圧力を下げると再びFSDPがもとに戻りました（最下段）．ここで，FSDPが何を意味するかを説明する必要があります．アモルファス物質や液体の中には，しばしばFSDPが観測されます．これが中距離相関によるものであること，さらに中距離相関を引き起こすものはナノスケールの構造体（クラスター）であろうと考えられています．今のアモルファス As_2S_3 の場合には，Asからは3本，Sからは2本の手がでてそれらが共有結合のネットワークをつくっているわけですが，ネットワークはどこでも均質かというと，どうもそうではなく，内部の結合がきちっとしたクラスター（亀の甲型分子模型が提唱されています）とクラスター同士が比較的弱く結合した部分の不

Fig. 1



The resistance versus pressure curve for amorphous Ge.

図1　アモルファスゲルマニウム（a-Ge）の半導体 - 金属転移．結晶（c-Ge）に比べてはるかに低圧で起こり，電気抵抗の変化は極めてシャープである．

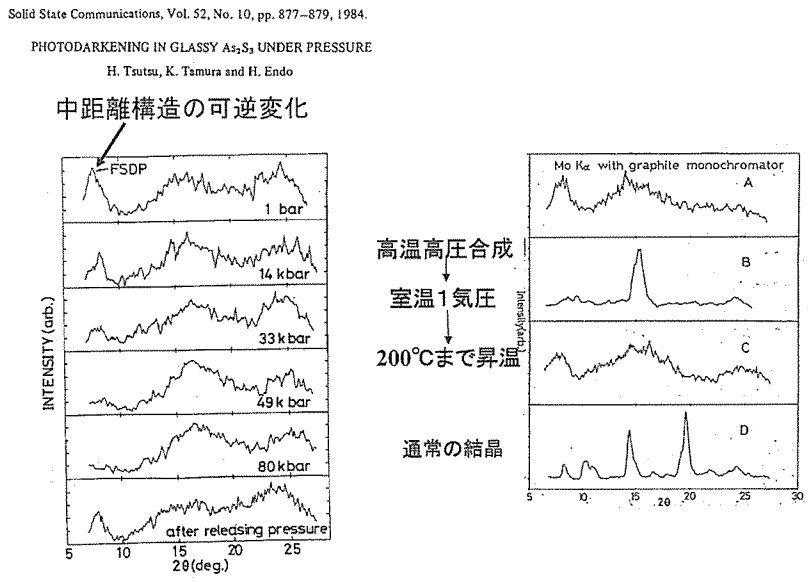


Fig. 6. X-ray diffraction patterns for g-As_2S_3 at various pressures.

図2 アモルファス As_2S_3 における中距離構造の可逆変化（左側の図）と高圧合成結晶の昇温によるアモルファス化（右側）.

均質構造が存在するようです．圧力と共にFSDPが消えてゆくのは，外部応力に対してはクラスター内部の結合とクラスター間の結合が均質化され，逆に減圧過程では内部エネルギーが不均質化という形で解放されるためであると考えられます．この変化は，結合パターンの均質 - 不均質（可逆）転移とでもいえるのではないでしょうか．次に，FSDPが消失したときのアモルファス As_2S_3 は半導体であるか金属かということは大変興味深い問題です．答えは金属です．しかし，いつどのように金属化するか，緩慢かシャープか，アンダーソン局在との関連性はどうかといった問題はいまだに明らかではありません．図2の右側のグラフは，アモルファス As_2S_3（図のA）を高温高圧下で結晶（金属）化させたものを室温に戻しかつ圧力を常圧まで抜いたものです（B）．この結晶は，最下段（D）に示す天然結晶（絶縁体）の構造とは異なり，高密度です．この天然結晶は，ロシアのヤクート産で，電総研の田中一宜さんからいただきました．さて，この2段目（B）の高圧合成の高密度結晶は大変面白い変化を示します．常圧の下で温度を200℃まで上げると強い吸熱反応を伴って3段目（C）のようなもとのアモルファス構造へ戻ります．この変化は融解ではありません．これを額面通りに捉えると，結晶をアニールしたらアモルファスになったということであり，アモルファス＝準安定，結晶＝安定という常識とは逆のことが起きたように見えるわけです．図3は，この辺りのことを理解するために描いたものです．多次元配位座標（あらゆる可能な原子配置を表す多次元の座標軸，代表軸としてx軸）ともうひとつの座標軸（y軸）として圧力をとると，系の自由エネルギー（z軸）はxとyの関数として定まります．右の図の上は，自由エネルギーをxy平面上の等高線として表したものです．1気圧の場合には，その下に示すように原子配置を変えながら自由エネルギーを計算してゆくと結晶配置のところに最小値（安定）が現れ，他にもいくつも極小（準安定）が現れるでしょう．ここで自由エネルギーと言っておりますが，これは絶対零度におけるイオンと価電子すべての相互作用を可能な原子配置について足し合わせたものという意味です．1気圧の場合には，系の準安定状態（アモルファス）は温度をあげるとバリアーを越えていつか最も安定な結晶になります．各圧力でのあらゆる可能な原子配置に対してエネルギーが分かりますと，それらを重ね合わせて上の図が得られるでしょう．一気圧のときにみた結晶（S：半導体）以外に高圧下での安定結晶（M：金属）に対応して等高線に明確な極小（谷底）が現れています．それ以外に浅い谷底が現れるでしょう．谷底を隔てる尾根もあります．ここで，一気圧で作製したアモルファス As_2S_3 に圧力をかけてゆきますと，原子配置を変えながら矢印のように高圧のアモルファス状態に至ります．圧力を取り去れば，同様な経路を経てもとのアモルファス状態に戻ると考えられます．もし高圧下で温度を上げれば，バリアーを超えて最も安定な高圧金属結晶相に至り，そこで温度を下げて圧力を常圧まで抜

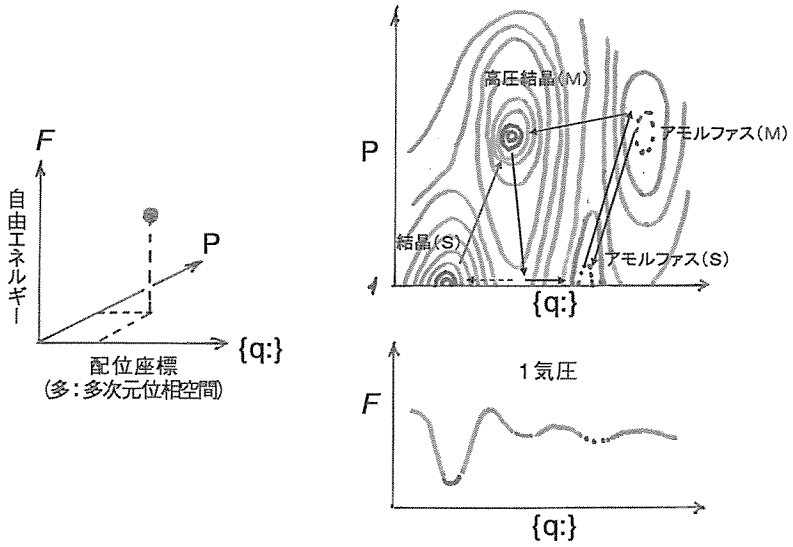


図3　結晶とアモルファスの熱的安定性についての説明

くと準安定の金属結晶となるでしょう．それは，図の左側の結晶，右側のアモルファス状態よりもエネルギー的に高い状態にあると考えられます．温度を上げたときどちらに行くかはバリアーの高さによるわけで，As_2S_3の場合には，たまたま右側へ移動したということのようです．実際，他のカルコゲナイド半導体であるアモルファス$GeSe_2$の場合には，同様のプロセスを経たにもかかわらず左の結晶相へ移ることが分かりました．すなわち，アモルファス$GeSe_2$の場合には，高圧合成し，常圧下に戻した準安定の金属結晶はアニールすると安定な結晶に変化します．この図を見ていると，皆さんは，様々なプロセスを思いつかれると思います．As_2S_3に戻って考えてみましょう．左下の結晶（S）から出発して高圧下の結晶（M）至り，先程のように圧力を抜き，その後アニールするとアモルファスになるに違いないと予想されると思います．私たちもそのように考え，実験をいたしました．結果は予想通りでした．このように，結晶やアモルファス物質の熱的安定性を統計力学の初歩に戻ってゆっくり考えてみることは，まんざら捨てたものではなく，意外と新しい展開があるように思います．新しい材料を作ろうとするときには，このような見方も役に立つのではないかと思います．ここで紹介いたしましたお話は今でも大変印象の深いものですが，十分に発展させることができなかったことが悔やまれます．後半のお話は論文になっておりません．

さて，長かったOD生活に終止符を打つべく，フンボルト財団招へい研究員としてドイツ・マールブルク大学のヘンゼル先生のところにお世話になることになりました．ヘンゼル先生は金属流体研究の先駆者として世界

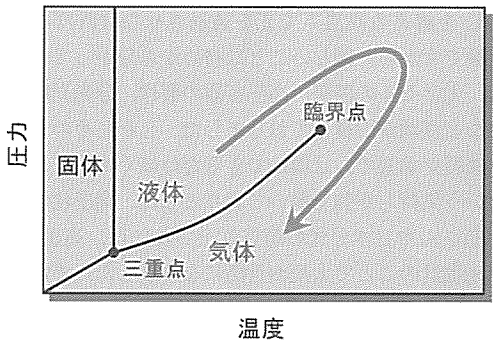


図4　超臨界流体の説明のための温度 - 圧力相図.

的に著名な先生であります．遠藤先生とは大変親密な間柄で，1972年の液体金属国際会議で来日された折に一度お目にかかったことがありました．ヘンゼル先生のところで，1980年から81年まで約2年間，超臨界流体イオウの光反射率の測定を行いました．これまで私は，どちらかというとアモルファス物質を中心に研究を行ってきましたので，超臨界流体を扱うのは初めての経験でした．ヘンゼル先生のところで高温高圧技術を学ぶことができたこと，とりわけ，ヨーロッパの学問的風土に直接触れることができたことは大変貴重な体験でありまして，私自身のその後の研究に決定的な役割を果たしたように思います．

3．楽しかった広島時代（助教授，教授）

1985年（昭和60年）4月に広島大学総合科学部へ助教授として赴任しました．この年が，私にとって超臨界金属流体研究の幕開けの年となりました．超臨界流体とは何でしょうか．ちょっと説明しましょう．図4に，固体，

液体および気体状態を区分する圧力 - 温度相図を示します．水を考えていただくとお分かりになりますように，1気圧では水は100℃で沸騰し蒸気になりますが，圧力を上げてゆきますと沸点は次第に上昇します．さらに圧力を上げると沸騰が起こらなくなり，臨界点が出現します．これを超えると，超臨界流体と呼ばれ，液体とも気体とも区別ができない特異な中間状態が出現します．ここで，矢印のように温度と圧力を変化させますと，沸騰を起こさせることなく，液体から気体まで密度を連続的にしかも大きく減少させることができます．金属流体の場合には，大変興味深いことですが，この過程で金属 - 非金属転移が起こります．広島大学では，新しく研究室を立ち上げるということでしたので，ドイツにいるときから考えていた流体セレンを取り上げ，まず光吸収係数の測定をすることにしました．流体セレンは，臨界点近くで半導体 - 金属転移を起こすことが電気伝導度の測定で分かっていたのですが，電子状態についてより詳しい情報を得たいと思ったからです．ガス圧縮による高圧と1500℃を越える高温下で光を透過させなければならない実験ですから，難しいことは初めから分かっておりました．光学セルの開発，高圧容器の製作，分光光度計の製作など課題が山積しておりました．しかしそのときには，無理を承知で，目標はできるだけ高く掲げておきたいという気持ちが強く働いておりました．高圧化学の山本忠弘さんや日本分光の菊谷哲三さんには，高圧容器，分光光度計のことで大変お世話になりました．また，総合科学部物理教室の先生方には言葉に尽くせないほどの暖かいご支援をいただきました．図5は，自作のサファイヤ製光学セルを内蔵した高圧容器を示します[3]．初めの頃は，サファイヤセルの具合が悪く，必ずといっていいほど実験途中に割れてしまいました．原因が分からず，材料が高価なこともあり，途方にくれたものです．私が広島大学に赴任してから半年後に細川伸也君が助手としてきてくれましたので，共に苦労を重ねながら，何とか流体セレンの光吸収係数測定を成功させることができました．この実験で自慢の種は，バンド間遷移の情報を与える高吸収領域での測定が可能な，数千オングストロームの厚さの液体試料用の極薄セルを自作したことです．図6は，当時大学院生であった坂口佳史君が2年もの歳月をかけて完成させた石英セルを示します[4]．2枚の円板の隙間にイオウが入っています．試料溜のイオウは黄色ですが，隙間のイオウは薄いため透明にみえます．このセルを用いると，液体を凍結させて欠陥のない理想的なガラス薄膜を得ることもできます．坂口君は，これを用いて液体イオウやセレン，さらにカルコゲナイドガラスの光誘起現象の研究を今も精力的に行い，優れた成果を挙げています[5]．

その頃，流体セレンの半導体 - 金属転移は，ミクロ構造が2配位から3配位構造へと変化することによって起きるという考え方がありました[6]．このことが本当かどうかを確かめるために，X線回折測定を超臨界領域まで行う計画を立てました．すでに中性子を用いた回折測定がドイツのグループによって行われていましたが，高圧容器の耐圧の関係で臨界圧力までには至っておりませんでした．そこで，図7のようなX線回折測定が可能な高圧容器とサファイヤ試料容器を考案しました．高張力鋼でできたシリンダーの側面に穴を開け，X線に透明な金属ベリリウムを窓として取り付けてある点が大きな特徴です．これによって，高圧に耐え，かつX線を内部に取り入れ取り出すことが可能になりました[7, 8]．もう

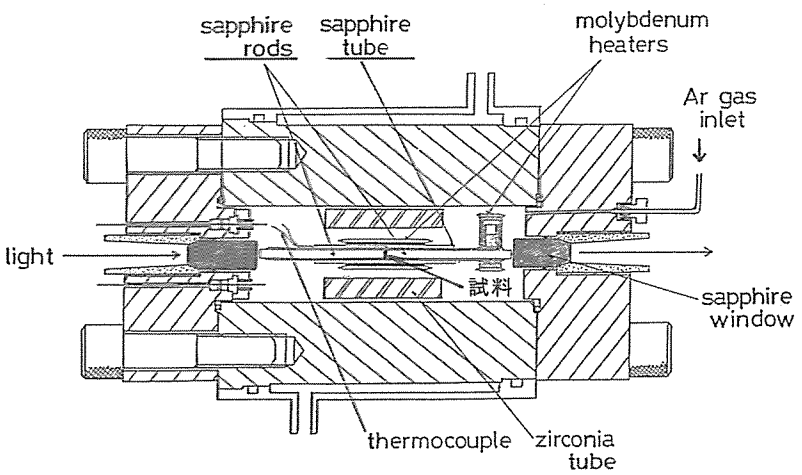


図5 流体セレンの光吸収係数測定のための高圧容器とサファイヤ試料容器．

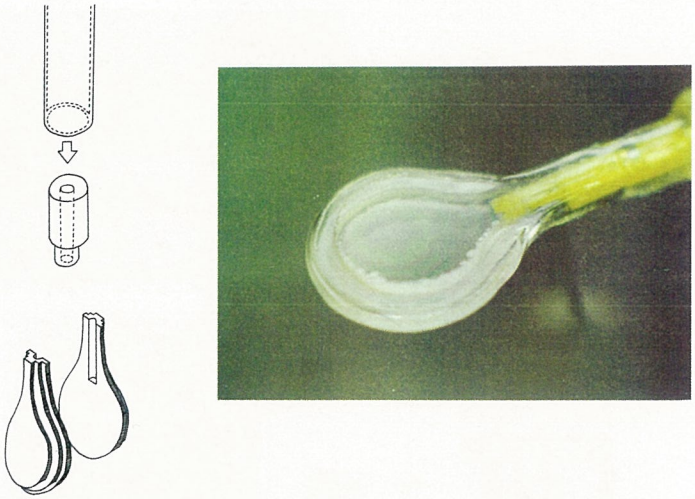


図６　石英光学セル．厚さサブミクロンの液体を容れることができ，高吸収領域での光吸収測定が可能．

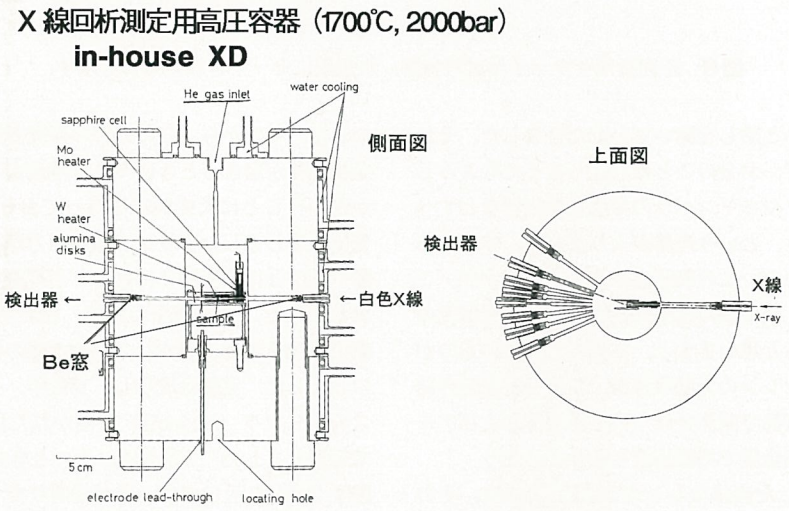


図７　X線回折測定用の内熱型高圧容器（ヘリウムガス圧縮）．側面と上面からみた断面図．シリンダーと上下のフランジからなり，中央にサファイヤ試料容器が置かれている．

ひとつ大事なのは，流体試料を高温高圧下で安定に保ち，かつX線を透過させることのできる試料容器をいかに作るかという問題ですが，図８のように，片端封じの２本のパイプをはめ合わせ，片端にできた隙間に試料を送り込むという方式を考え出しました．サファイヤ棒をダイヤモンド工具でくりぬき，研磨してそれぞれのパーツを作り，最後に特殊なセメントで接合して完成させました．このようなことが考え出せたのは，京大の長谷田・遠藤研時代に，旋盤を回して金属を削り，ガラス細工をした経験が役に立っております．実際に手を使って物を作ったことがアイデアの源泉になっていることは確かです．X線回折用の高圧容器を作るときには，今回も，高圧化学の山本さんのお世話になりました．特殊な構造でしたので，高圧化学の技術陣も大変苦労されたように聞いております．私自身も，正月返上で一生懸命図面を引きましたし，製作のお願いに本社のある埼玉まで何度か足を運びました．X線回折装置について，もうひとつお話しておきたいことがあります．その当時は，X線装置がなく，またそれを買うお金もありませんでした．とにかくメーカーにお願いしようと思いまして，リガクに連絡を取りました．京都のフランソワという喫茶店に，リガクの本多龍二さんと山本（現青木）正孝さんに来てい

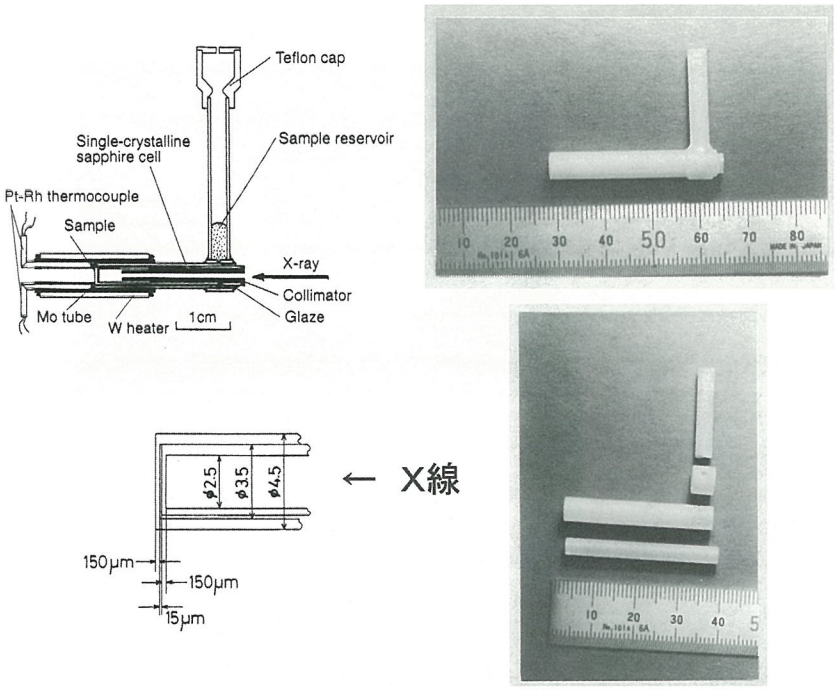


図8 X回折用サファイヤ試料容器．水銀用にセットされたものを示す．

ただき，じっくりと話しを聞いていただきました．それからしばらくして，お金のことは心配しなくてもよろしい，ゴニオメータやキャンベラの半導体検出器などすべてを揃えましょう，という連絡が入りました．本当にありがたいことでした．この喫茶店は今も健在ですが，ここでの出来事が，後に続く超臨界金属流体の構造研究のもとになっていると思いますと，本当に感慨深いものがあります．流体セレンの光吸収係数，X線回折測定の結果は，1989年に京都で開催された第7回液体およびアモルファス金属国際会議で招待講演となりました[7]．

私たちが開発した流体セレンのX線回折法は，そのまま流体水銀に適用できることに気がつきました．流体水銀の臨界圧力は非常に高く1673 barであるため，これまで流体水銀の構造研究は全く手付かずの状態でした．ご存知のように，水銀の密度は常温常圧で13.6 gcm^{-3}ですが，圧力をかけ沸騰を抑えながら温度を上げますと，体積は次第に膨張し，密度が低下します．さらに温度を上げてゆきますと，液体から気体に至るまで体積を連続的に膨張させることができ，密度を大幅に低下させることができます（図4参照）．この体積膨張に伴って，水銀は金属から絶縁体へと転移し，その性質が大きく変わります．転移が起きる密度はおよそ9 gcm^{-3}であり，臨界密度5.8 gcm^{-3}よりわずかに大きいところで起きることが分かっています．当時，水銀の金属－非金属転移は液体金属分野で大変ホットなテーマでした．ですから，この分野の研究者達は皆，金属－非金属転移が起きるときにミクロ構造がどのように変わるかということに大変興味を持っておりました．しかし，先ほど申しましたように，臨界圧力が高いため，それを調べることは技術的にほとんど不可能であると思われておりました．その様なわけで，私たちは2000 bar用の高圧容器を新たに製作し，流体水銀の構造を調べることにしました．実験は成功し，1991年，その結果をフランスのオーソワ（Aussois）で開かれた国際会議ではじめて発表しました[9]．図9は，そのときの流体水銀の構造因子S (k) を示します．まだ荒削りですが，初めて公表した大変懐かしいデータです．北大の中村義男先生やヘンゼル先生，カールスルーエ工科大学のフライラント教授など旧知の方々が出席しておりました．大きな反響がありまして，テキサス大学のトンプソン先生からは，自分は長く液体金属の研究を行ってきたが，ここ20年間で最も感銘を受けた研究であるとお褒めの言葉をいただきました．その後共同研究をすることになったリヨン大学のデュプイ先生にもそこで初めて会いました．

研究費ということではそれまで随分苦労をしてきましたが，その頃の広島大学総合科学部には物性理論の渡部三雄先生と長谷川正之先生がおられ，学問的な面はもちろんのこと研究費の面でも大いに助けていただきました．自分に配分されたお金であるとか，あるいは自分が勝ち取ったお金であるから自分のものという風に考えが

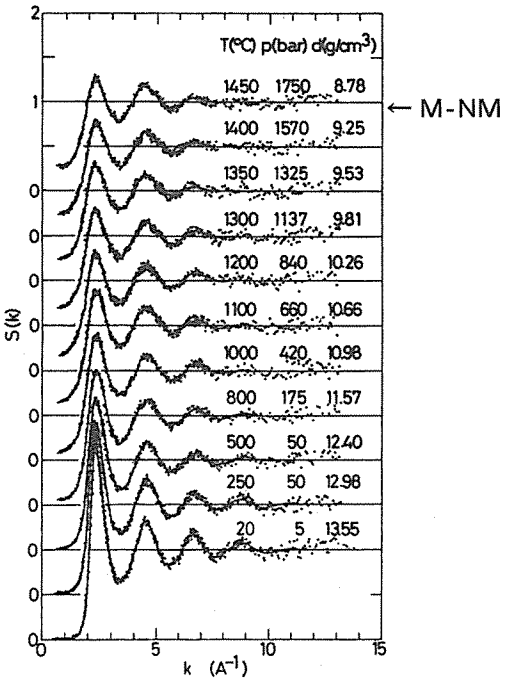


図9　流体水銀について初めてのX線回折測定結果．金属－非金属転移領域までの構造因子．

ちですが，先生方は，研究費はもともと国民のものであり個人のものではないから実験に必要ならば遠慮なく使ってくださいと仰言ってくださいました．それを当然のこととして実践されるのですから，本当に頭が下がります．自転車操業的にやりくりしながらでしたが，何とか研究成果が出てまいりますと，科研費や民間財団の助成金をもらえるようになってきました．例え小額であっても，採択されることは大変な喜びであり，とくに若手にとっては大きな励みになります．細川君などは飛び上がって喜んでくれ，すぐに近くの酒場で祝杯ということになりました．嬉しかったのは，超臨界金属流体の構造に関するテーマで東レ財団の助成金をもらったときです．これを契機にその後の研究が大きく進展しました．

長年にわたり広島大学の実験室で培ってきた実験技術と実績をもとに，「放射光を用いた超臨界金属流体の静的・動的構造の解明」というテーマで文科省科研費・特別推進研究を申請しましたところ，幸いにしてこれが採択され，平成11年から15年まで5ヵ年計画で推進することになりました．その頃，私達は，X線源として封入式のX線管球を用い，そこから出てくる白色X線を利用しておりました．ご存知のようにX線管球から出てくるX線は放射状に広がります．コリメーターを使ってビームを絞り込もうとするのですが，それも限度があります．広がったX線はどうしても試料以外の部分に当り，ノイズを発生してデータの質を落としてしまいます．その頃，世界各地に放射光施設が建設されつつありましたが，桁違いに強力で，かつレーザーのように優れた指向性をもつ放射光は，私たちの実験用のX線源として理想的なものでありました．ちょうど兵庫県西播磨に世界で第3基目となる大型放射光施設SPring-8の建設計画が進んでおりましたので，これを利用できればと考えました．また，私たちの実験には国の認可が必要な高圧ガスを使いますので，できるだけ早く，建設段階から施設側と打合せをしておく必要がありました．後からでは計画を進めること自体難しくなります．また，その頃世界にはフランス（ESRF）と米国（APS）に同じ規模の大型放射光施設が2基ありましたので，それらを利用する可能性もあったのですが，自分たちが開発したものは，自分たちの手で，自分たちの国で達成したいという気持ちが非常に強くありました．このようなことをおおっぴらに言うのはよくないことだと思いますが，この気持ちは，分かる人にはわかっていただけることだと思います．私たちの研究計画は，SPring-8の第1回特定（現長期）利用課題にも採択され，研究を大いに進めることができました．当時の所長上坪宏道先生，下村理先生，京都教育大の村田隆紀先生をはじめ，SPring-8のスタッフの方々には多大なご支援をいただきました．特別推進研究は，水銀やアルカリ金属，セレンなどの超臨界金属流体を対象とし，SPring-8の放射光を利用して，X線回折測定により短・中距離構造，X線小角散乱測定により密度ゆらぎのような長距離構造，X線非弾性散乱測定により原子分子の個別的・集団的運動を明らかにするというものでした．このプロジェクトには，広島大学でこれまで一緒にやってきました乾雅祝君（細川君栄転のあと入れ替わりに九州大学から助教授としてやってきました），物性理論・シミュレーションが専門の星野公三先生，下條冬樹さん（現熊本大），他にSPring-8の内海渉さん（JAERI），舟越賢一さん（JASRI）に研究協力者として加わっていただきスタート致しました．この研究計画はSPring-8のビームラインを横断的に利用することにより超臨界金属流体の静的・動的構造を総合的に調べ，整合性のある形で理解しようとする点に特徴があります．また，それぞれの実験に合わせて3種類の高圧容器が必要になりましたが，その製作には，神戸製鋼の仲井伯亨さんにお世話になりました．この研究は，面白いとか面白くないとか，役に立つとか立たないといった類のものではなく，今私たちがやらなければいけない研究であると考えておりました．恩師長谷田先生は，私が大学院生の頃，誰かがしなければならない大事なことをやりなさいと仰言いました．これを先生は一流の仕事と呼び，最先端の研究あるいは流行の仕事とは明確に区別をされま

した．酸化物高温超電導体が見つかって世界中が大騒ぎになり，誰も彼もがセラミックスを乳鉢ですりつぶしていたとき，私は手を染めませんでしたし，常温核融合のときにも関与しませんでした．他にすることがあったからというよりも，人も予算も潤沢であるというような恵まれた環境ではありませんでしたので，誰かがやれることを人より早くするやり方は避けざるを得ませんでした．私の場合，重要なテーマに的を絞り，全精力を投入するより他に術がなかったのです．ここに述べてきましたように，20年の間，私は超臨界金属流体の構造研究を行ってきました．水銀が膨張して金属から絶縁体に変わるとき，原子の並び方がどのように変わるか，またそれらの動きがどのようなものか，答えは目前にあるかに見えました．しかし，研究プロジェクトが文部科学省の特別推進研究に採択され，SPring-8 での実験が始まってからも，様々な問題が発生し，超臨界領域で満足なデータを得ることはなかなかできませんでした．実験がうまくゆかないときには，一緒に実験をしている若い人達に長谷田先生のことを話し，この研究を完成させることはわれわれの使命であると言って励ましました．自己を超えた研究，そのようなものが確かにあるように思います．

随分と脱線してしまいましたが，SPring-8 の実験で得た水銀の結果について紹介します．図10は，流体水銀の構造因子 S (k) を温度と圧力，さらに密度を変えながらプロットしたものです．密度が常温常圧下の 13.6 gcm^{-3} から金属 - 絶縁体転移の起きる 9 gcm^{-3}，臨界密度 5.8 gcm^{-3} を経由して高密度気体領域の 1.9 gcm^{-3} までの広い領域で S (k) が求まっておりまして，決定版ともいうべき重要な結果であると思います[10]．オーソワで初めて公表した図 9 の結果と比べていただきたいと思います．さて，この S (k) をフーリエ変換すると実空間での情報を与える二体分布関数が得られますが，そこから最近接原子間距離 r_1 や，ひとつの原子を取り囲む周辺原子の数，いわゆる配位数 N_A（あるいは N_B）が求まります．それらを密度に対してプロットしたのが右のグラフです．配位数を多い目に見積もった N_B は密度の減少と共に直線的に減少しております．このことは，密度の低下は基本的に配位数の減少によるものであり，水銀が体積膨張をするとき，ミクロにみるといわば不均質な膨張をすることを意味します．次に，配位数を少な目に見積もった N_A の方をみますと，金属 - 非金属転移の起きる 9 gcm^{-3} 付近から N_A の減少の仕方が緩やかになり，一方 r_1 の方は，それまでほぼ一定であったのが増加し始めます．すなわち，最近接原子間距離程度の短いスケールで原子の並び方を眺めますと，金属 - 非金属転移が起きるときにはミクロ構造に明瞭な変化が起きていることになります．従来，水銀の金属 - 非金属転移は，単に s バンドと p バンドの重なりが解ける，いわゆるウイルソンタイプであると考えられてきました．この場

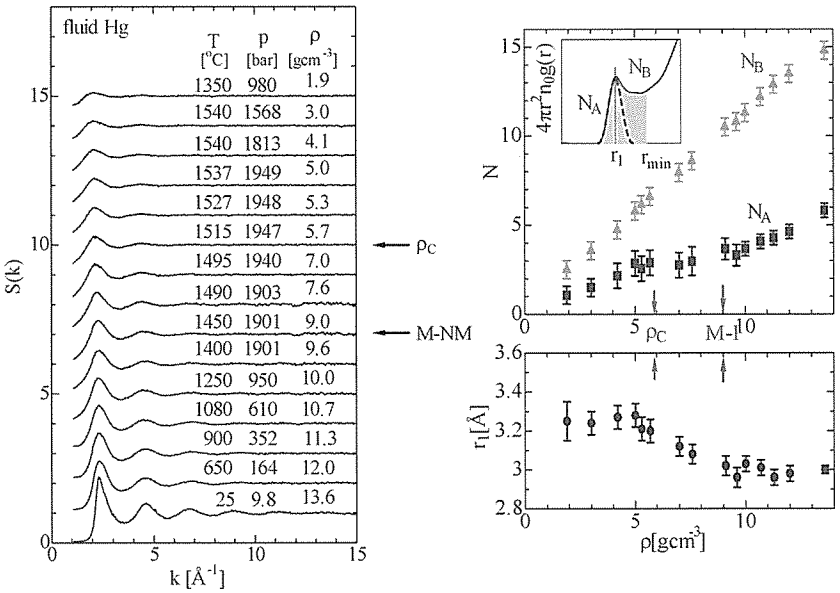


図10 SPring-8 の放射光を用いて得た構造因子（左側）と配位数（N_A, N_B）と最近接原子間距離（r_1）の密度変化（右側）．金属 - 非金属転移領域から臨界点を経て気体領域まで，広い密度範囲で構造因子が求まっている．

合は，そこで大きな構造変化が起きるとは考えられておりませんでした．しかし，捉えどころがないと思われている液体の中にも，明確な形で構造変化が起きていることがこの実験で初めて明らかになりました．図11は，X線小角散乱の結果です[11]．構造因子S(Q)をQのごく小さいところでプロットしたものです．ご存知のように，水や炭酸ガス等どのような種類の流体であっても，臨界点を超えるとその近くで臨界密度ゆらぎが生じます．水銀の場合，臨界密度5.8 gcm^{-3}のところに注目しますと，Qが小さくなるとS(Q)が大きく立ち上がっているのが分かります．これが臨界密度ゆらぎです．しかし，よくみますと，金属 - 非金属転移の起きる密度領域でも弱いながらもS(Q)が立ち上がり，密度ゆらぎが生じていることが分かります．詳しく解析した結果，これが臨界密度ゆらぎの裾ではなく，金属 - 非金属転移に特有のゆらぎであることが分かりました．ゆらぎの相関長，すなわち密な部分あるいは疎な部分の広がりが，約1ナノメートルであることも分かりました．短距離構造に変化が起き，また1ナノスケールの密度ゆらぎが発生する金属 - 非金属転移とは一体何でしょうか，どのような性質のものでしょうか．過去の文献をひも解きますと，1943年にロシアの著名な理論物理学者ランダウとゼルコビッチが流体水銀を取り上げ，金属 - 非金属転移が臨界点の液体側で起きること，さらにこの転移が体積や電気伝導度の不連続なとびを伴う一次相転移であることを予言しておりました[12]．このことに刺激され，実際に電気伝導度の測定が行われました．金属 - 非金属転移が液体側で起きることは予言通りでしたが，電気伝導度に不連続なとびは観測されませんでした．そのために，この転移が一次相転移であるとは誰も思わなくなりました．しかし，私たちの実験結果を詳細に解析しますと，やはりランダウが考えたように，これが一次相転移であると考えた方がよいのではないか，一次相転移がナノスケールの密度ゆらぎという形で現れたと捉えるのが正しいのではないかという結論に達しました．ランダウの言うことが正鵠を得ていたようです．図12は，X線非弾性散乱の結果です[13]．この実験のために石川大介君がSPring-8常駐の形で頑張ってくれました．左のグラフは金属 - 非金属転移領域での分散関係を表します．□印はX線非弾性測定から得られたもの，破線は超音波の音速測定の結果から期待される高波数高振動数領域での分散関係を表します．前者は，ナノメートル・ピコ秒というミクロな時間空間スケールでみた場合に集団運動がどのように見えるか，後者は，マクロな時間空間スケールでそれをみたときどのように見えるかを示しております．金属 - 非金属転移領域では，両者の間に大きな違いがあります．右の図は，

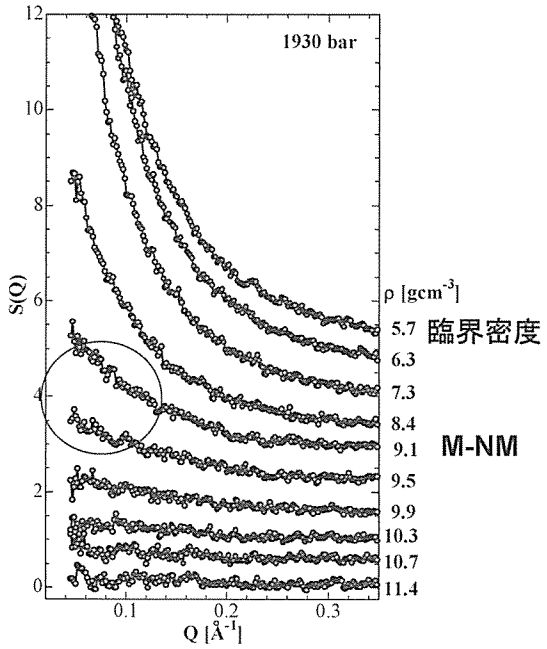


図11　X線小角散乱測定の結果．金属 - 非金属転移に特有のゆらぎを観測（○で囲った部分）．

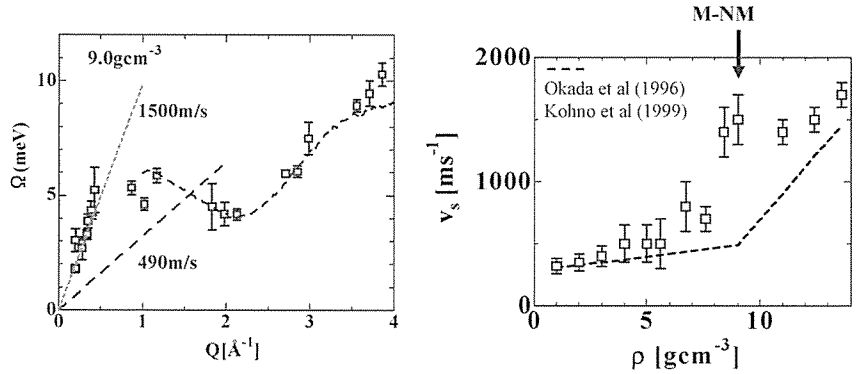


図12　X線非弾性散乱測定の結果．分散関係（左側）と音速の密度変化（右側）．

ミクロな音速とマクロな音速を密度に対してプロットしたものです．高密度の金属側と低密度の気体側では両者はほぼ同じですが，金属 - 非金属転移領域ではミクロな音速の方がマクロなものに比べて3倍も大きくなっております．もうお分かりだと思いますが，このような違いはこれまでお話してきましたような金属 - 非金属転移に伴うミクロ構造の変化およびナノスケールの密度ゆらぎに連動したものです．結局，金属 - 非金属転移領域では，約1ナノスケールの広がりをもつ密な金属領域と，同じサイズの疎な非金属領域が交互に現れては消え，消えてはまた現れるということをピコ秒程度の周期で繰り返していることが次第に分かってきました．このように，水銀について金属 - 非金属転移領域での静的・動的構造が整合性のある形で解明されたことは大変喜ばしいことだと思います．

4. ふたたび京都へ

2001年（平成13）年に，こちら（京都大学工学研究科材料工学専攻）に移ってまいりました．私の恩師が金研におられた関係で，前身が冶金学教室であったこちらの教室とは縁が深く，私も大学院生の頃たびたび出入りをしておりました．新宮秀夫先生が助手の頃，溶融金属の急冷装置を使わせてもらいによくお邪魔をいたしました．また，私自身も大学院（修士）を出たとき鉄鋼会社へ行こうかと考えたこともありますので，不思議なめぐり合わせに驚いております．冶金学教室はもともと金属研究の本家であったわけですが，今や対象が多様化し，金属だけでなくセラミックスや高分子材料まで幅が広がっております．金属から離れてゆく人も多いようですが，私自身は逆に金属にますますのめりこむようになっております．超臨界金属流体を研究しておりますと，伝導電子やイオンの振る舞いに思いがけないことが次々と現れ，汲めども尽きることがありません．京大でなすべき研究目標の一つは，特別推進研究・超臨界金属流体の構造研究の貫徹ということでした．水銀やセレンの研究は結構進みましたが，最後に掲げた流体アルカリ金属の研究は難航しました．試料容器の問題があったからです．アルカリ金属は反応性が強く，取り扱いが容易でないことは皆さんご存知でしょう．それが1500℃を越えるのですから難しさは想像がつくと思います．水銀のときに用いたサファイヤは反応のため使えません．モリブデンが高温でもアルカリ金属と反応しないことが分かっておりましたので，これを使うことを考えましたが，X線が透過する部分をいかにして薄くするかという，サファイヤのときと同じ問題が再度持ち上がりました．さらに，単結晶のモリブデンが材料として手に入るかという問題もありました．たまたま長村光造先生と話をしておりましたら，単結晶モリブデンはあります，大学院のとき指導した平岡裕さんが（現岡山理科大）がそれを作っておりますよ，というアドバイスをいただきました．早速，平岡先生にコンタクトをとりまして，富山県にあるアライドマテリアルという会社を教えていただきました．その会社の加藤昌宏さんには，モリブデン容器の製作で今も大変お世話になっております．加藤さんとは容器製作についての共著論文を書きました．話は前後しますが，ちょうどその頃，松田和博君（現助教）が大学院博士課程に入ってきましたので，早速アルカリ金属流体の構造研究をするように勧めました．彼は全く違った分野から移ってきたのですが，ひるむことなくモリブデン容器の開発に挑戦し，数々のアイデアを出しながらついにそれを成功させました[14]．図13は，X線回折用モリブデン容器を示します．構造はサファイヤ容器のときと同じですが，片端封じの部分は，数十ミクロンまで薄くした単結晶モリブデンを多結晶モリブデンの筒にロウ付けをしてあります．当初からアルカリ金属用の容器をいかに作るかという問題の難しさは重々認識し，いろいろと試みもしたのですが，ここに松田君という適材と材料工学教室という適所を得て初めて完成させることができました．大学院生諸君にも大いに活躍してもらいました．

流体ルビジウムの結果について紹介します．図14は，X線回折とX線小角散乱の測定から得たS(Q)を示します[15]．Qの大きいところはX線回折，Qの小さいところがX線小角散乱から得たデータです．S(Q)をフーリエ変換して得た二体分布関数から最近接原子間距離R_1と配位数N_1が求まりますが，それらを密度に対してプロットしたのが図15です．体積膨張しているわけですから，常識的には，原子間距離は広がるか少なくとも一定だろう，短縮することはないと考えるわけです．水銀の場合にはまさにそうでした．図15のR_1をみてお分かりのように，密度の低下と共に初めはほとんど変化しませんが，密度が約1.1 gcm^{-3}辺りから逆に短縮し始めるという予想外の変化が起こりました．おまけに，私たちのデータは，以前に他のところで行われた実験結果と大きく食い違っており，全く逆の結果でした．これは，私たちの実験が間違っているのであろうと長い間悩みました．しかし，何度も実験を繰り返し慎重にチェックした結果，私たちのデータが正しいという結論に至りました．星野先生と下條さんが第一原理分子動力学シミュレーションを行ってくれましたが，実験結果とほぼ同じようにR_1の短縮が認められました．それではなぜR_1が短縮するのか．流体ルビジウムは臨界点のところで金属 - 非金属転移を起こすことが知られておりましたし，また，そのあたりになると2原子分子が存在するという話もありましたので，そこまでゆくとR_1の短縮ということは考

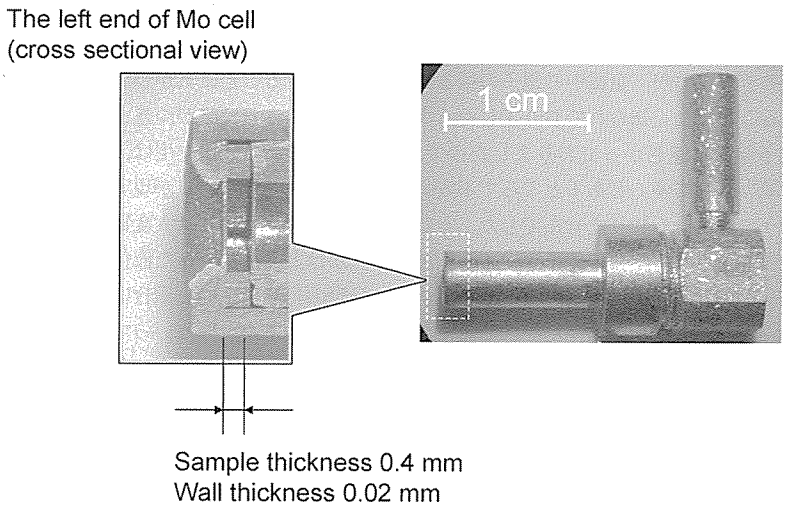
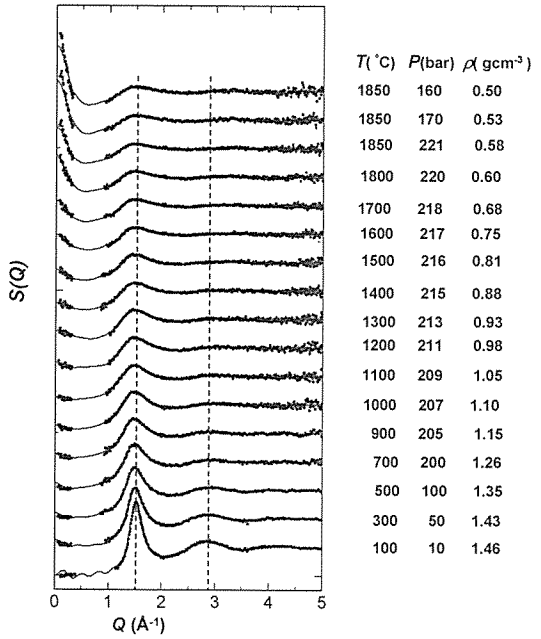


図13　モリブデン試料容器．拡大図のように，約 0.02 mm の単結晶モリブデン薄板に挟まれた厚さ 0.4 mm の隙間に流体ルビジウムが入り，その部分を X 線が透過する．



T(°C)	P(bar)	ρ(gcm⁻³)
1850	160	0.50
1850	170	0.53
1850	221	0.58
1800	220	0.60
1700	218	0.68
1600	217	0.75
1500	216	0.81
1400	215	0.88
1300	213	0.93
1200	211	0.98
1100	209	1.05
1000	207	1.10
900	205	1.15
700	200	1.26
500	100	1.35
300	50	1.43
100	10	1.46

図14　X 線回折および X 線小角散乱測定により得た流体ルビジウムの構造因子．

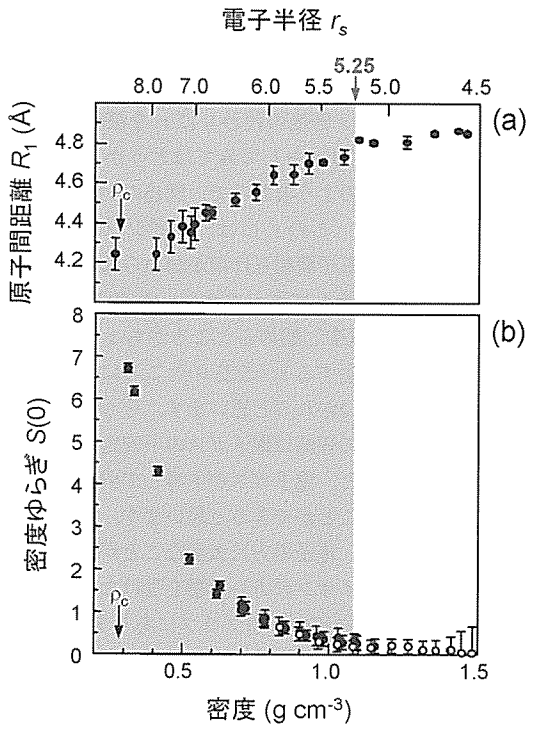


図15　流体ルビジウムの最近接原子間距離 R_1 と密度ゆらぎの大きさ S (0) の密度依存性．

えられますが，臨界点から遠く離れ，むしろ融点に近く高密度の金属状態で，なぜそれほど早くにイオン同士が近づき始めるのか，このことが全くの謎でした．そうこうしているうちに，松田君がいろいろと調べてくれまして，物性研の高田康民先生がアルカリ金属を低密度電子ガスとの関連で理論的に研究されているという情報を仕入れてきました．よく調べてみますと，多体電子論の帰結として，電子ガスの密度が低下するとあるところで不安定性が起きるということも分かってきました．私が大学院の頃，ジェリウムモデルをもとに展開された多体電

子論の初歩を勉強したことがあります．このモデルは，一様な固定正電荷の中に多数の電子を入れてその振る舞いを論じる素朴なモデルですが，金属中の電子の振る舞いを巧く説明できることがよく知られておりました．大学院以来，多体電子論から遠ざかっておりましたので，電子ガスの密度を減少させてゆくとあるところで不安定性が生じる等ということは全く知りませんでした．ところで，電子ガス密度の低下は，１個の電子が占める領域（球）の半径をボーア半径で割った，いわゆるウイグナー・ザイツ半径 r_s という無次元量の増大として表すことができますが，低密度電子ガスの不安定性というのは，電子密度が低下して r_s が 5.25 という値になりますと，圧縮率が大きな正の値から大きな負の値に転じ，また，誘電率が正から負に変化するという異常な事態を意味します．圧縮率が負であるということは，外力がなくても自ら収縮することを意味します．また，負の誘電率をもつ媒質中に同符号の試験電荷を置くと引力が働き，異符号の場合には斥力が働くという通常とは違った状況が発生します．ジェリウムモデルは理想化されたものですから，局在した正イオンを含む金属にはそのままでは当てはまらないかもしれません．しかし，イオンの密度を低下させるということは，同時に電子密度を低下させることですから，イオン密度の代わりに r_s を横軸にとって原子間距離 r_1 をプロットしてみてはどうかということになりました．そのようなわけで，図15の上の横軸に r_s をとってみました．この r_s には，ルビジウムイオンの分極効果のために電子間相互作用が弱められることを考慮し，若干の補正をしてあります[16]．すぐに皆さんは，原子間距離 R_1 が減少し始めるところがちょうど電子ガスの不安定性が発生する $r_s=5.25$ のところにほぼ一致していることに気がつかれると思います．そうです，謎であった原子間距離の短縮は電子ガスの不安定性によるもの，言い換えますと，電子ガスが主導して引き起こしたものであるということができると思います．イオンの身になって考えれば，電子の方に大変なことが起こっているわけですから，イオンの方も影響を受けないはずがありません．また，図15の下のグラフにありますように，X 線小角散乱測定から求めた密度ゆらぎの大きさ S (0) の値がやはり r_s が 5.25 の辺りから増大し始めております．このことは，電子ガスの不安定性によってイオンの方が影響を受け，ゆらぎが発生したと考えるのが自然でしょう．

流体アルカリ金属の構造研究は，特別推進研究の一環でしたから，とにかくきっちりとしたデータを取ることが大事と考えておりました．ところが予期せぬことが起こりまして，思いがけず強相関電子系との関わりをもつことになりました．金属流体の密度を低下させることは電子密度を低下させることですから，気をつけておれば，アルカリ金属流体が低密度電子系の理想的な研究の場を提供できることに気がついたはずです．しかし，この当たり前のことに気がつきませんでした．また，電子論の専門家である高田先生は，電子密度を連続的に低下させることのできる物質が現実にあるとは思われなかったそうで，今回のことに大変驚かれたようです．これまで接点がほとんどなかった液体金属の分野と強相関電子論の分野の自然発生的な融合は大変興味深いものであると思います．また，何といっても，低密度電子ガスの面白さは，フォノンを介しない超電導の可能性[17]や，フォノンを介する超電導であっても，負の誘電率をもつ電子ガスの存在がフォノンのモードを変調し超電導温度を大幅に増大させる可能性[18]にあります．室温超電導の実現には低密度電子ガスが必要不可欠であるという指摘もあります[19]．このように，高温の超臨界金属流体の研究が低温の超伝導に関係するのは大変面白いことであると思います．詳しくは申し上げられませんが，機会があれば，低密度電子ガスを低温で固体中に実現し，その超電導を是非とも調べてみたいと思います[20]．

よき師にめぐり合い学問の大切さを教わりました．私自身その一端を追体験することもできました．また，よき同僚，後輩たちと一緒に学問を楽しむことができました．安心して学問のできる環境が，これから先も長く日本の大学のなかに生き続けることを切に望みます．最後になりましたが，このような場をご用意いただきました専攻長の栗倉泰弘先生をはじめ，教室の皆様方に感謝いたします．

参 考 文 献

1) K. Tamura, J. Fukushima, H. Endo, S. Minomura, O. Shimomura and K. Asaumi, Proc. 2nd Int. Conf. on the properties of liquid metals, Tokyo, 1972, p295.
2) H. Tsutsu, K. Tamura and H. Endo, Solid States Commun., 52 (1984) 877.
3) K. Tamura and S. Hosokawa, Z. Phys. Chem. Neue Folge (I), 156 (1988) 241, S. Hosokawa and K. Tamura, J. Non-Cryst. Solids, 117/118 (1990) 489.
4) Y. Sakaguchi and K. Tamura, Rev. Sci. Instrum., 71 (2000) 498, Y. Sakaguchi and K. Tamura, J. Phys.: Condens. Matter, 10 (1998) 11429.
5) Y. Sakaguchi and K. Tamura, Eur. Phys. J. E, 22 (2007) 315, 坂口佳史 田村剛三郎，高分子論文集，64 (2007) 830.
6) B. Cabane and J. Friedel, J. Phys. (Paris), 32 (1971) 73.
7) K. Tamura , J. Non-Cryst. Solids, 117/118 (1990) 450.

8) K. Tamura, M. Inui and S. Hosokawa, Rev. Sci. Instrum., 70 (1999) 144.
9) K. Tamura and S. Hosokawa, J. Physique IV-Colloque C5, 1 (1991) 39.
10) M. Inui, X. Hong and K. Tamura, Phys. Rev. B, 68 (2003) 094108.
11) M. Inui, K. Matsuda, D. Ishikawa, K. Tamura and Y. Ohishi, Phys. Rev. Lett., 98 (2007) 185504.
12) L. Landau and G. Zeldovich, Acta. Phys. Chem. USSR, 18 (1943) 194.
13) D. Ishikawa, M. Inui, K. Matsuda, K. Tamura, S. Tsutsui and A.Q.R. Baron, Phys. Rev. Lett., 93 (2004) 097801.
14) K. Matsuda, K. Tamura and M. Katoh, Rev. Sci. Instrum., 75 (2004) 709.
15) K. Matsuda, K. Tamura and M. Inui, Phys. Rev. Lett., 98 (2007) 096401.
16) C.A. Kukkonen and J.W. Wilkins, Phys. Rev. B, 19 (1979) 4872.
17) Y. Takada, Phys. Rev. B, 39 (1989) 11575.
18) M. Tachiki, M. Machida and T. Egami, Phys. Rev. B, 67 (2003) 174506.
19) 立木昌，室温超電導の夢，超電導 Web 21，2006年5, 7, 9, 11月号，1-10頁.
20) 田村剛三郎，松田和博，未来材料，8 (2008) 50.

退職記念講演

材料と共に歩んできた40年間

村　上　正　紀*

No Regrets for Majoring Materials Science

by Masanori MURAKAMI

1. はじめに

昨年，定年退職記念講演を本誌に執筆する様に依頼を受けていたが，退職後の忙しさの為，締切日を忘れ，投稿できず，編集委員にご迷惑をお掛けした．にも拘らず，今年度も再度執筆依頼を受け，大変恐縮していると同時に，編集委員の引き継ぎの良さを実感している．

定年退職される教員の方は殆ど同じだと思うが，退職記念講演で何を演題にすべきかにもっとも頭を痛める．今までの研究成果のみであれば学会発表と全く同じとなり，興味をもって聞いて（読んで）くれる方は非常に限定される．しかも発表時にはすでに時代遅れになっている位の情報化の発達した今日である．記念講演時では化石かも．

では，普遍的な演題があるかといえば，その様な演題は小生には持ち合わせていない．平成19年9月での記念講演では，専門分野の話題を出来るだけ少なくして，40年間の材料研究の歩みでの苦労話を交えながら話を進めた．とは言え，研究成果についても紹介しなければ40年間で何も研究していなかったとの誤解を生む．代表的な研究成果についても紹介するが，この書で紹介する成果は，多くの方々との共同研究の成果である．貢献された名前をすべて記すべきではあるが，名前を列記するだけで紙面が一杯になり，思い切ってすべての方のお名前を省略させて頂く事をご了承頂きたい．

昨年の講演内容を文章にする価値があるかどうかは別にして，講演で強調したかった点は「材料分野を専攻した学生には自然現象に興味を持ち，材料を通して自然の神秘解明に挑戦して欲しい」との想いを一人でも多くの学生に伝える為に，「挑戦」を主題として一年遅れの記念講演の概要を書かせて頂く．

2. 材料分野選択の動機

我々学生の頃（1960年代）は「所得倍増計画」「日本列島改造論」等々の夢物語を旗印に景気回復が促進され，「東京オリンピック」を境にして，日本経済が大きく変革した時代であった．（多分，中国も北京オリンピック後には大きな経済変革が予想されるが，40年前の日本の発展と同じ道を辿るかどうかは不明瞭である）

当時では大都市のみならず地方都市まで道路，建築ラッシュであり，その基盤産業である「鉄鋼業」は，まさに「鉄は国家なり」で言い表された様に日本の繁栄の基盤を支えている様に思え，工学を目指す若者の冶金，金属工学学科への人気は今よりずっと高かった．高校生の頃，鉄鋼業が成長産業である事を新聞記事で読んだり，知人の説得力のある話に耳を傾け，少しは日本の産業の発展に貢献出来る事を期待して金属を主体とした冶金学科を目指した．

3. 博士課程は修了したが・・・

村上陽太郎先生の研究室で学部学生時代から6年間に及ぶ人情味あふれた御指導のお陰で，無事に博士課程を終了した．しかし，残念ながら希望する大学での教育・研究職は無い．当時でもすでに博士課程修了者に対しての門戸は狭く，「末は博士か大臣か？」と唄われた時代は過去形であり，博士の将来は非常に不安定な時代であった．我々の博士課程修了時（1970年代の初め）からオーバードクターという言葉が日常に聞かれる様になった時期かと思われる．「博士号は足の裏に付いた米粒」と呼ばれ「取っても食えぬ」時代の始まりである．現在では残念ながら我々の時代に比べ，日本の経済は大幅に成長したにも拘わらず，米粒の数は減少どころか，むしろ

*学校法人　立命館　副総長

桁違いに増加している．日本は余程，博士を必要としない国である事には間違いない．

当時のこの様な状況で日本での教育・研究職探しは時間の無駄であり，博士課程終了前から米国での職探しを始めなければならなかった．当時は未だ1ドル＝360円の時代であり，飛行機もホノルルで乗り換えねば本土にたどりつけず，学生の身分で米国に行く事すらが夢物語の時代であった．現在の学生は海外への渡航は殆ど旅行目的であるが，小生の院生時代の米国への渡航は職探しであった．しかし，この40日間の米国滞在が自分の人生を大きく転換させるきっかけになったと思う．

まだ学生の身分でありながら，カリフォルニア大学（ロスアンゼルス校），ニューヨーク大学，ノースウェスタン大学，カリフォルニア大学（バークレー校）で4大学の教授に直接面会を申し込んだ．皆様，快く面会の時間をとって頂き，面会時には懇切丁寧に研究内容の説明をして頂き，教授自ら研究室の案内を引き受けて頂いた．これらの4大学を訪問した第一印象は，米国の大学では講座制を採用していない為に，誰の助けもなく，年老いても自分一人で各教員が生き残りをかけて研究しておられる姿であり，日本では見られなかった光景を初めて目の当たりに見る事が出来た．しかも，米国は成果主義社会であり，教員は年齢に関係なく毎年，途切れる事なく研究結果を出さなければ教職生命を絶たれる事を聞かされた．真に「Paper or Death」と言い表された様に教職でも自然淘汰される国である事を学んだ．40年経った今頃，日本の国立大学でも講座制度が薄れ始め，各教員の個人の研究成果が評価される時代になったが，教職の生命は絶たれたという話は耳にしない．これが日本の風土に適合した評価制度かも．しかし，米国では成果を出せば必ず成果の対価が支払われる国であり，高い評価を受けた者には研究の自由，報酬，地位は準備されている事も聞かされた．研究者としては，まだまだ雛であった小生でも，この様な環境こそが世界に発信する研究成果を出せる場に思えた．米国から帰国後，成果主義の米国で生き残れるかどうか自分自身を試したいとの願望が渡米前よりも一層，強くなった．米国でどの様な条件でも良いから大学での研究職を得たい願望が叶い，米国での研究生活を送れる機会に恵まれた．米国での研究者としての挑戦の始まりである．

4．カリフォルニア大学での滑り出し

博士課程を修了し，公聴会，結婚とあわただしい2ヶ月を過ごし，どうにかすべて無難に終え，渡米する事が出来た．当時，米国の大学に職を見つける事が出来たきっかけは，助教授であった新宮秀夫先生にカリフォルニア大学（ロスアンゼルス校）のD. デフォンティン助教授を紹介していただいたお陰である．今でも感謝の念に耐えない．デフォンティン先生も新鋭の助教授であり，自分自身が成果を出さねば生き残れない不安定な立場である．デフォンティン先生はポスドクを雇う研究費にも乏しく，給与は始めから通常の75%との提示である．どの様な条件でも，研究する場を与えてくれれば良いとの一心であり，給与の交渉は出来る余裕すらなかったし，その給与でも十分生活は可能であった．すでに大成された有名教授の元で研究するより，駆け出しの助教授の元での研究の方が最も米国の教員としての生き方の厳しさを味わえるのではないかと思い，敢えてカリフォルニア大学を選択した．

米国の大学はプロジェクト主義である．NSF（日本の学術振興会のような財団）から支援されている「三元系の拡散機構の解明」プロジェクトでポストドクとして雇用されることになった．デフォンティン先生は，小生の給与を捻出するために，今まで研究室で働いていた学生の大半の雇用を中断した．学生は毎月減少し，ついに小生一人の孤独な研究生活の始まりである．この三元系の拡散の研究は，ダーケンが1943年に異常な原子の移動現象を見出して以来，理論は存在するが実証が無いとデフォンティン先生に言われ，実証実験の挑戦を受けて立った．

簡単に実験に挑んだが，やはり難題だらけである．まずデフォンティン先生は理論屋であり，実験の事は全く理解を示さない．特に，理論屋は一人で研究出来るが，実験は装置を設置するにも助けが必要であったり，徹夜の実験は交代が不可欠であり，学生でもよいから共同研究者が必要である事を理解させるのに相当な時間を費やした．やっと三回生を一日二時間の雇用条件で雇ってくれた．また，釘一本もない理論屋の研究室で実験装置を設置する事の苦しさも始めて味わった．研究室には研究費が殆ど無い．すべて手製での装置作りである．お陰で工作作業は日増しに特技になり，帰国しても工作場で働けるだけの技術は磨けたと思う．今回の実験には多重層薄膜形成が必要であり，その試料作製のため廃棄場から拾い集めた部品での真空蒸着装置の組み立て，イオンケージ，ヒーター等をすべて手作りの毎日であった．米国の大学は研究費が豊かと聞いていたが・・・．当時はベル研究所で開発されたMBE蒸着装置は，雑誌では見た事はあるが，その様な装置の購入は夢物語であり，手製のイオンゲージのみ頼りにしてオングストン単位で100層以上の薄膜を手動で制御せねばならなかった．且つ，拡散機構の解明には，多重層薄膜試料から回折されるX線のブラックピーク近傍に表れるサテライト強度の経時変化追跡が必要である．高強度X線回折装置が必要だが，新しいX線装置の購入予算は全くない．古い既存

のX線回折装置の回折強度を桁違いに増加させるため最小経費でのグラファイトモノクロメーター作製も手作りである．

1年かけてようやく真空蒸着装置が完成した．勿論，拡散ポンプを用いた（今ではどこの研究室でもお目にかかれない）旧式の真空蒸着装置であるが，本当にうれしかった．図1には多重層薄膜作製装置が完成した時の喜びを表わす記念（？）写真を示す．図2にはイオンゲージのみで各層の膜厚を±約0.2 nmに制御出来る多重薄膜装着装置の概念図を示す．電気回路については何も知らなかったが，学生と共に手製で組み立てたイオンゲージだけで三元素の蒸着速度が同時に制御が出来る蒸着装置である．苦労の甲斐があり，2年間かけてどうにか三元系拡散機構が解明でき，それぞれの原子の動きは自由エネルギー曲面及び易動度曲面の最大曲率方向に移動する事が解明された[1]．

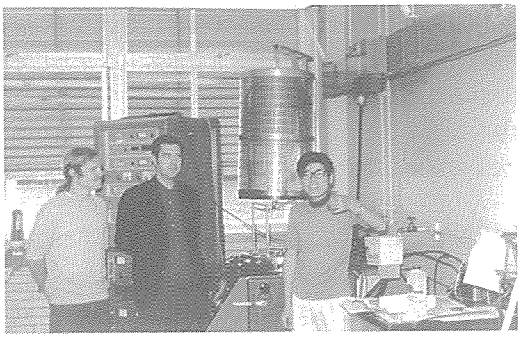


図1 多重層薄膜材料作製のための真空蒸着装置が完成した記念写真．左からJ. Fodor（学生），D. deFontaine，著者

勿論，解明できねばプロジェクトは中断され，小生の給料も無しになる．その為，解明できるまでは年中無休状態である．2年間かけて解明できた翌週に初めて一週間の休暇をとり，ロスアンゼルスからアリゾナまで車で家内と一周旅行をした．その時の旅行が一番気分良く出来た旅行である．しかし，今から考えると，カリフォルニア大学での貧乏研究室の経験がその後の研究への取り組み方に最も役に立ったと思われる．米国での第一段階での挑戦はまずまずの滑り出しである．

5. ベトナム戦争終結の煽り

カリフォルニア大学での生活は，研究成果が出るまでの2年間は最悪な環境だと思っていたが，成果が出た後は，理論と実験が非常によく一致した論文も書け，NSFからのプロジェクトもさらに3年間延長され，給与も増額した．以前に話を聞いた米国での成果主義の垣間を見る事が出来た．人間とは不思議なもので，今まで最悪の環境だと思っていた研究室が最も居心地の良い空間になり，最も落ち着いて物が考えられる非常に快適な場所に変貌した．観光にも行く余裕も出来た．安月給であったが，カリフォルニア近傍のみならず，カナディアンロッ

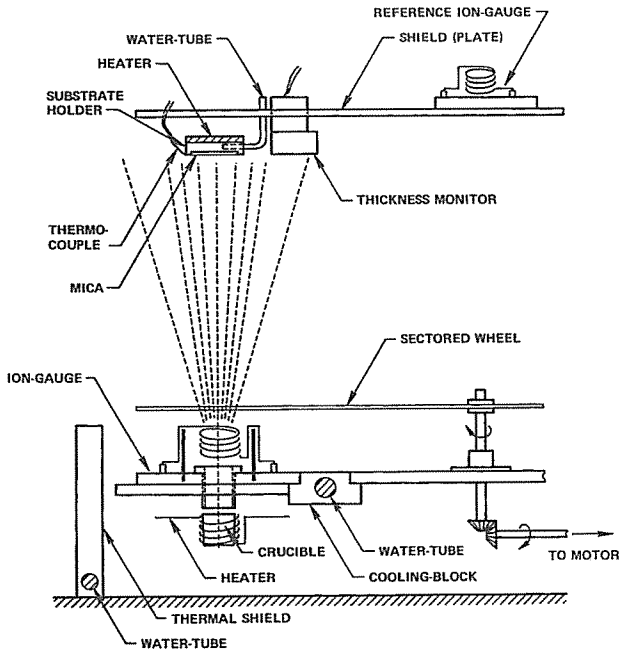


図2 多重薄膜材料作製に開発されたイオンゲージによる（各層の）膜厚制御法の原理図

キーまで足が延ばせた．十分楽しめる場所であった．やはり，我々の物の見方は100%仕事の成否に影響されている事も改めて感じた．

しかし，1974年にベトナム戦争が終結し，国内の経済状況は急激に変化し，不景気になった．さらにベトナムからの若者の兵士の帰国に影響されたか否かは知らないが，アメリカの若者の失業率が急激に高くなり，我々のような外国人の就職口は非常に困難になった．小生のJ-1ビザは米国滞在3年間の有効期間しかない．このカリフォルニア大学で働き続けるには労働局より労働許可証の収得が必要であり，この許可証をとるには永住権の獲得が必要である．しかし，永住権を獲得するには労働許可証を持っていなければならず，全く矛盾に満ちた移民法と戦わねばならない．カリフォルニア大学からは，永住権獲得の支援は得られない事が判明し，国の産業に強い影響を与える巨大企業の支援なしには永住権獲得は不可能であった．とは言うものの，当時の不況下で，この様な大企業での職探しは非常に困難である．

ニューヨーク州の郊外にヨークタウンという日本の軽井沢に似た町にIBMワトソン研究所があり，今年度は，たまたまこの研究所で国際真空会議が開催されることを知った．早速，IBMに電話を掛け「学会発表に行くから是非面接してくれ」と人事部との交渉を始めた．3年弱しか米国に滞在しなかったが，すでにアメリカ流に自分の売込みが始まっていた．IBM研究所では空席があっても公募しない制度であり，勿論，空きポストがあるかどうかは全く不明瞭な状況での売り込みである．

6. IBM T. J. ワトソン研究所への憧れ

IBM研究所で開催された国際真空会議では面接も兼ねているため，出発前から終始緊張の連続であった．何せ，デフォンティン先生は小生の国内学会へ行く予算ですら持ち合わせていない貧乏教授であり，ロスアンゼルスからニューヨークの飛行機代すらない．勿論，米国での学会発表は初めてである．IBMが旅費援助を快く承諾してくれたお陰で，初めて学会発表は実現した．

IBMでの就職機会を見逃せば日本への帰国は余儀なくされる．しかし，日本での就職活動は全く始めておらず，真に背水の陣でのインタビュー始まりである．学会発表の方には余り神経を使わずに，当日の自分の発表は何とか無事に終える事が出来，その後の2日間の他人の発表も落ち着いて聞けた．この学会で初めてデバイス性能と薄膜材料の機能の関連の話を聞いた．今まで学んだ構造材料とは異なり，機能材料の特性が向上できれば短期間で高性能デバイスへの実用が可能となり，開発した材料が社会の高度化に直接貢献出来る事を学んだ．材料屋として自分の開発した材料がコンピューター企業でどれだけ貢献できるか短期間で見極める事が可能である．今まで基礎研究のみに興味があったが，実用材料に挑戦したい気持ちが高揚してきた．学会が終わりに近づくにつれて，当時コンピュータ市場を独占していたIBMへの就職希望が非常に強くなり，「是非，IBMへ」との決意で，学会終了後の翌日からの入社試験に臨んだ．当初の永住権獲得のための就職は，コンピューターメーカーでの材料屋としての挑戦の場としての就職へと変貌した面接となった．

英語も未熟な自分には，2日間にわたる面接試験は苦痛の連続であった．まず，コンピューター知識は全くなく，専門用語が日本語で言われても理解できないのに，英語なら尚更理解できない．何とか6人個別のマネージャーの面接（1人45～60分間の面接）を終え，ニューヨークからカリフォルニアに戻る機上の人となった時は，本当に疲労困憊の状態であった．

3ヶ月後に100倍近い倍率の難関を突破して，運良く採用通知を受けた時の喜びは京都大学入試合格通知を受けた時より嬉しかった事を覚えている．この様な感激に勝る感激をその後受けた事がないのは年と共に感性が薄れた所為でもあるが，やはり博士になって4年後にやっと安定な職場に着け，マズローの第二段階の生活安定欲が満たされた為でもある．

7. ジョセフソンプロジェクトでの挑戦

IBMで小生が取り組むテーマは入社前にすでに決定していた．当然の事ながら，企業の研究所はプロジェクト研究が主体であり，プロジェクトが先に企画され，そのプロジェクトに必要な人材を補充していくやり方である．

1970年代には大型コンピューターを形成しているSi半導体素子に代わる素子として，Si半導体より100倍速いと予測された超伝導コンピューター素子が注目され，IBMでは大規模なプロジェクトが編成されていた．世界で始めて超伝導現象を利用して超高速コンピューター素子[2]を作製しようとするものである．このプロジェクトは発明者の名にちなんでジョセフソンプロジェクトと呼ばれていたが，最も多い時は160人がこのプロジェクトに参画していた．

この様な高速コンピューターの開発の表向きは，1年先の天気予報の実現のためと説明されていたが，実際には軍事からの要請であった．当時は米ソ間の冷戦時代であり，ソ連から打ち離された大陸間弾道弾をアメリカ大陸に届くまでに，正確に飛行軌道を計算し，対ミサイル攻撃で打ち落とし，海中に沈めねばならなかった．当時のコンピューターの速度ではミサイルの軌道の正確な計算が不可能であり，少なくとも10倍の演算速度が可能な

コンピューター開発が不可欠であった．（余談だが，1991年にアメリカを中心とする多国籍軍がイラクに対して空爆攻撃を開始した際，空中でミサイルが打ち落とされるのを，実際とは思えないノンフィクションの映画を見ている様に茶の間のテレビで御覧になった方が多いと思う．この様な対ミサイル研究はすでに20数年前に始まり，有事に備えていた米国の準備の良さを初めて実感した．）

このコンピューター素子は液体ヘリウムで超伝導特性を示す薄膜材料で形成されている．図3に示す様に，当時は電極材にはPb合金が主に用いられていた．この合金は電気特性には優れている（スイッチング速度が速い）が，信頼性に乏しい．最も大きな課題はPb合金電極材に冷却時に熱収縮が生じる．基板には熱収縮の小さいSiが用いられたため，Si基板に密着している（熱収縮の大きな）Pb合金薄膜には冷却時に（引っ張り）熱歪が導入され薄膜表面に変形が生じる．その結果，Pb合金膜上に形成されている5nm厚の絶縁膜が下部の薄膜電極の形状変形により破壊し，上部と下部の電極が短絡し，ジョセフソン素子は機能しなくなる事であった．

8. 自然淘汰の環境での研究の始まり

このPb合金薄膜ジョセフソン素子の信頼性について，小生がこのプロジェクトに参画する前に，すでに8年間にわたり多くのIBMの研究員が取り組み，Pb合金膜の冷却時の形状変化を抑制する事に努力したが解決していない．この課題が解決できなければ政府からの研究費の援助は打ち切られ，IBMでのプロジェクトは二年後には消滅する．この緊急課題の解決法を見出す事が小生一人の責任課題となった．永住権まで獲得して頂いたので，重大な責任を果たさねばならない．

当時でもIBMの研究は（大学の研究とは異なり），非常に明確な数値目標を設定されていた．（どの様な手法を用いてでも）如何に短時間でその目標値を達成するかによって研究員の業績は評価され，給与に反映される．評価と報酬は一対一の相関関係があり，与えられた期間内に研究成果が出なければ，また職探しを始めなければならない．真に自然淘汰環境下での研究の始まりであったが，米国での厳しさを実際に体験できる良い機会に恵まれたと思う．カリフォルニア大学とは全く異なり，研究費，実験装置，コンピューター等の研究環境は100%整備されている．初めて米国での研究費の豊かさを味わえた．まさに地獄から天国へ駆け登った気持ちであった．しかし，天国であるのは研究設備だけである．解決出来るかどうかは100%研究員の責任である．研究装置は100%完備している環境下での研究の失敗は「no excuse」であり，精神的な負担は非常に大きい．しかも，目標値達成までに与えられた期間はたった2年間である．

焦らず，薄膜材料の熱歪による変形の基礎に戻った．

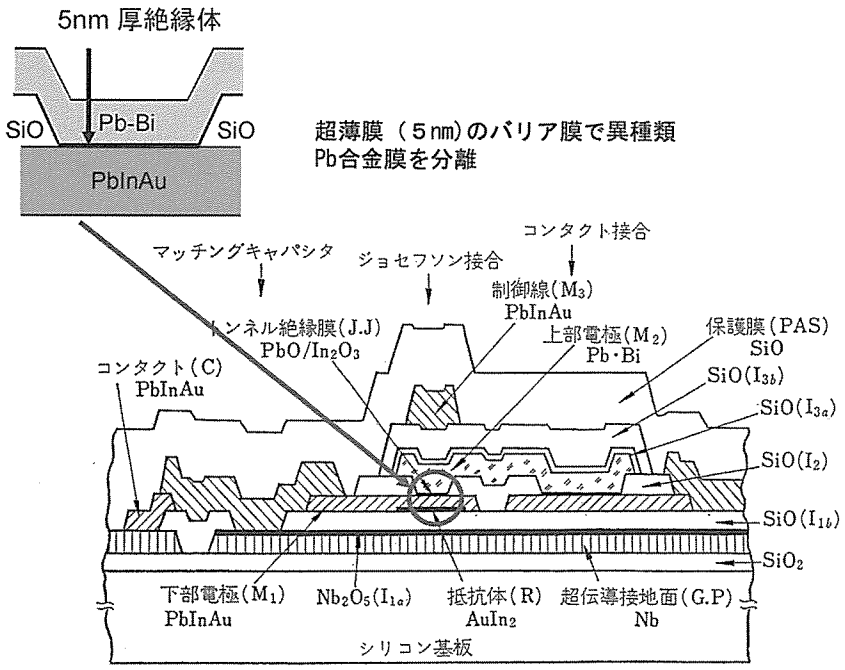


図3 超伝導コンピューター作成に用いられたPb合金ジョセフソン素子の断面図

実際のデバイスには平面歪が導入され，従来の歪（一軸方向歪）の導入による形状変化とは全く異なった形状変化が理論的に予測された．この理論で予測された変形を実証するため，実験は液体ヘリウムで0.01%の精度での歪変化を測定せねばならない．初めて液体ヘリウム温度でのin-situ X線回折測定実験を試み，薄膜内での歪測定を行った．一旦，測定を開始すると測定は延々と続き，帰宅する時間がなくなる．薄膜材料の正確な温度測定，X線装置自体の熱収縮の影響等，精密な歪測定には一年以上の歳月を要した．且つ，今まで経験した事がない極低温での転位の挙動の透過電子顕微鏡によるin-situ観察に挑戦し，ほんの少しの歪で転位がどんどん導入される像（図4）には感動した[3]．

X線回折，TEM，SEMの分析で冷却時に薄膜表面の変形を，今，流行の“ナノスケール”で測定し，それ以下の測定不可能な超微細な変形は弾性論を用いて理論的に推測する事にした[4]．今まで薄膜の拡散機構についてはカリフォルニア大学で学んだが，薄膜の強度については全く初めての領域である．この分野で素人である事に割り切って，カリフォルニア大学で身につけたすべて自由エネルギーの大小で拡散現象を説明する手法を強化機構解明に応用し，歪エネルギーの大小によって弾性的に変形するか塑性的に変形するかを，決定する事が出来る「Strain Energy Criterion Model」が提唱できた[5]．このモデルは実測と良く一致し，今までの説明出来なかった薄膜の強化機構の殆どが説明出来，今でも幅広くこのモデルが普及している．やっと変形機構が解明できた時には，材料の開発には、やはり、基礎に戻る事が重要である事が再認識させられた．

薄膜材料の液体ヘリウムへの冷却時での変形機構の解明により0.2μm以下の結晶粒を有するPb合金薄膜を形成すれば変形は最小限に抑制出来る事が実証でき，デバイスの寿命も4000倍増加した[6]．この成果でジョセフソンプロジェクトの2年間での中断は逃れた．勿論，研究成果は高い評価を受け，給与にも大いに反映し，2年間の苦労は一瞬にして報われた．

それも束の間であり，プロジェクト延長後もPb合金薄膜材の変形を完無にする研究を続けたが，本質的に多結晶のPb膜表面は，弾性率異方性のため，図5に示す如く，わずかな表面の変形（1.4 nm）が生じ，信頼性はある程度までしか増加しない事を突き止めた．コンピューターは最低20年間の信頼性が必要であり，例え1.4 nmの変形でも，繰り返し変形によりコンピューター素子はショートする事を証明し，プロジェクトは終止符を打たねばならなかった．

1983年プロジェクト終了後，研究所での我々の情況は一変した．米国では，成果は明確に白黒がつけられ，日本の様に灰色の部分がない事も経験した．このジョセフソンプロジェクト終了と共に160名の研究員・技術者は解散させられ，責任者はIBMを去ることになった．米国での責任体制は明確であり，（日本には馴染まない）個人責任が問われる事を実感した．小生も当然降格は覚悟していた為，今まで取らなかった休暇をまとめて取り，フランス，イタリア，スイスを順に回りIBMへ戻ってきた．勿論，帰国後すぐさま当時の所長であるJ. Armstrongからの呼び出しである．どこの部署に行かされるか非常に不安な気持ちで面会したが，所長は「超伝導コンピューターが実現しなかったのは残念である．しかし，材料の限界を見極める事によりコンピューターの寿命の限界を決定した事に感謝する」と言い，小生は

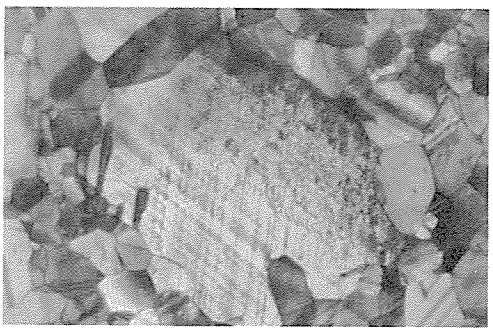


図4　室温から液体窒素温度に冷却時に，Si基板に蒸着されたPb薄膜材料内に導入された転位の透過電子鏡写真

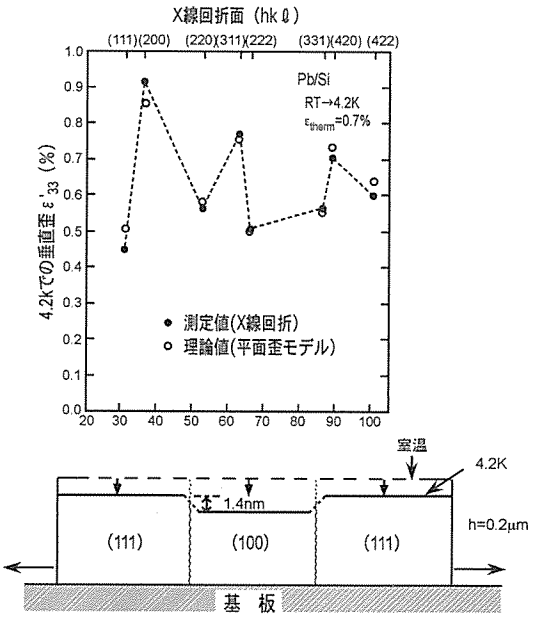


図5　室温から液体ヘリウム温度に冷却時にSi基板に蒸着されたPb薄膜材の歪測定と表面の凹凸の断面図

GaAs 半導体プロジェクトのマネージャーに昇格した．やっと材料屋がコンピューター企業で市民権を得たとの印象である．

9．化合物半導体デバイスでの材料開発

日本・欧州では Si 半導体に置き換わる高速コンピューター素子（トランジスター）を GaAs 化合物半導体で作製しようとするプロジェクトが拡大しつつあった．IBM も超伝導素子で対抗したが（前述した様に）成功せず，化合物半導体でのトランジスター開発に遅れての参入である．

GaAs 化合物半導体の電子の易動度自体は Si 半導体に比べ速いが，外部の金属配線から電気が GaAs 半導体内部に容易に流れず，電子が半導体内に注入されないという大きな課題がある．この為，GaAs トランジスターも実現が遅々として進まなかった．金属配線から半導体へ電気を流れ易くする為に金属から半導体への電気輸送機構を解明し，実用デバイスに適用出来る技術を開発せねばならない．何故，金属から半導体に電流が流れにくいかについては，2，3のモデルが提唱されている．簡単に言えば，金属からの電子は半導体内部に流れる場合，金属と半導体接触界面にはエネルギー障壁（一般的にショットキー障壁と呼ばれている）があり（図6），この障壁を如何に電子または正孔が乗り越えるかで，電流の流れる難易度が決定される．

GaAs 半導体プロジェクト内で新しい研究グループの責任をもたされたが，やはり，研究目標と期間は明確である．使命は「3年以内に GaAs 化合物半導体に電気を従来より一桁流れ易くし，400℃，2時間の耐熱性を有するオーミック・コンタクト材料の開発をせよ」である．材料屋にとってコンタクト材は，馴染みない言葉かもしれないが，金属配線と化合物半導体の界面に薄膜材を付着させて電流を流れ易くする材料のことである．今まで半導体の研究には全く関わった事がない．専門用語すら理解出来ない．しかも IBM が世界に先駆けてすでに15年間開発してきたコンタクト材より優れたコンタクト材の開発が使命である．与えられた期間は3年であり，またまた3年間の新たな挑戦の始まりである．

一般に，コンタクト材は GaAs 半導体に薄い金属膜を真空蒸着で付着させた後，高温焼鈍で金属と半導体を反応させて形成させる（図7）．従って，コンタクト材形成プロセスには図8に示す如く，要素技術の無限大の組み合わせがあり，この組み合わせの中から最適解を選択し，高性能コンタクト材を形成せねばならない．当時は“ガンダイオード”で有名な J. ガンが予期せずに発見した AuNiGe コンタクト材が用いられていた．このコンタクト材より優れた材料の開発に多くの人が挑んだが，当時，コンタクト材開発指針がない為，試行錯誤での開発がなされた．新しいコンタクト材開発には，図8に示した如く，プロセスの組み合わせが無限大にあり，開発期間が予測出来ない．従来は電気屋さんが試行錯誤でこの手法では何年もかかって開発してきたが，高性能なコ

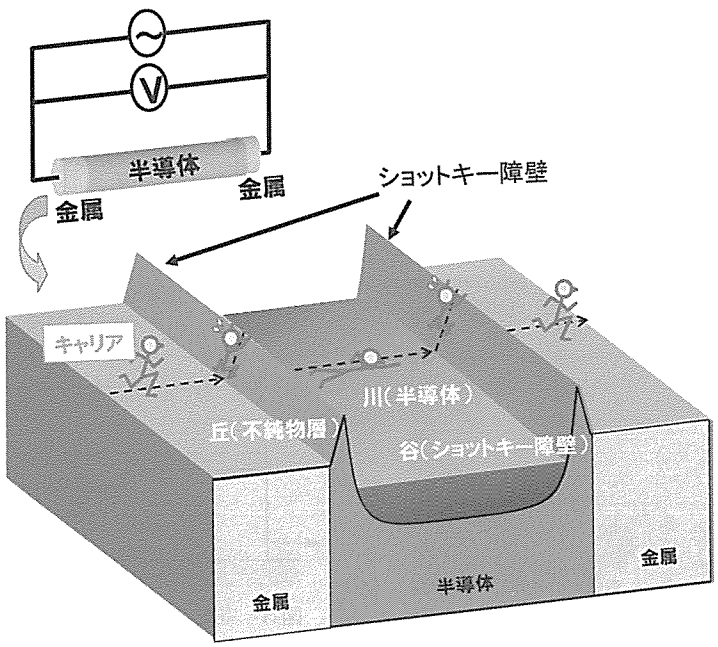


図6　金属から半導体内部にキャリアが流れるイメージ図（トライアスロン　モデル）

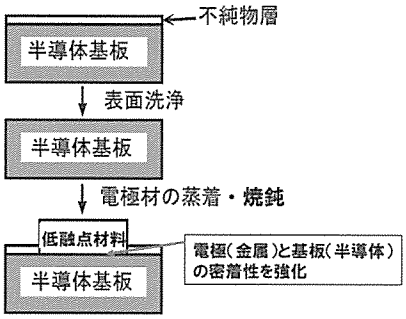


図7　半導体基板上にオーミック・コンタクト材作製のプロセス

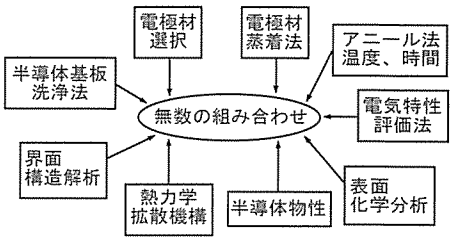


図8　コンタクト材作製に不可欠な要素技術

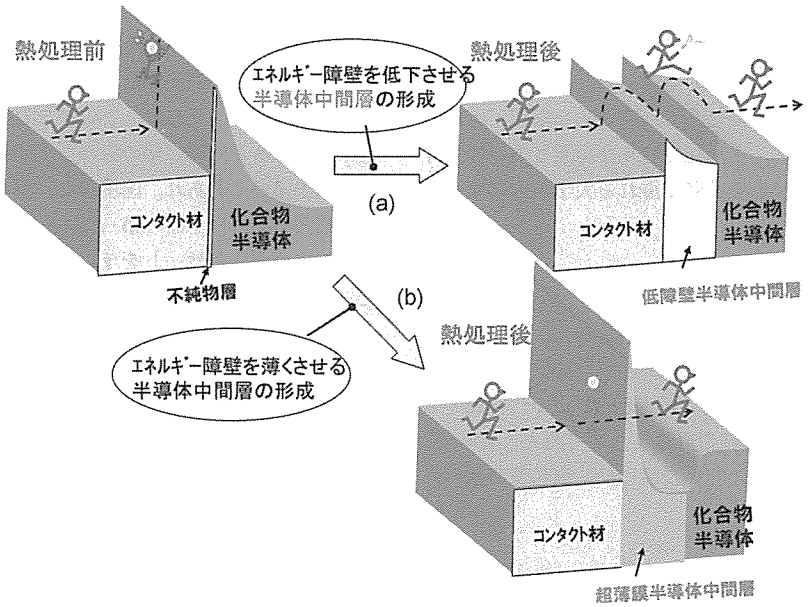


図9　半導体中間層の形成によりキャリアが金属と半導体界面を流れ易くなったイメージ図

ンタクト材は開発できていない．このプロジェクトに参画した当時（1983年）にはIBMですら，15年前にガンが偶然発見したコンタクト材より，優れたコンタクト材は開発されず，ほぼ諦めた状態であった．当初，コンタクト材開発の困難さを全く知らずに安引き受けをしたが，コンタクト材開発の困難さを知れば知る程，この課題に挑戦した事を後悔し始めたが，すでに手遅れである．

使命を引き受けた以上は，材料屋の本領を発揮せねばならない．今回の課題解決はジョセフソンプロジェクトと同じ様に，焦らず1～2年間は腰を落ち着ける事にした．材料開発とは言え，やはり基礎に戻り，高性能の「コンタクト材形成の開発指針の構築」を第一段階での目標として開発に取り組んだ．地味にミクロな構造解析が不可欠である．金属と半導体の接触界面での電気特性を高分解透過電子顕微鏡を用いて観察された組織構造との関係を結びつける研究を2年間程続け，やっと金属と半導体接触界面に電気の流れ易い構造が存在する事を突き止めた[7]．

図9に示す如く，金属配線から化合物半導体に電流を流れ易くするには，半導体表面に付着させたコンタクト材は，高温アニールで半導体と反応して，「母体の半導体とは異なる半導体中間層」を形成せねばならない事を明らかにした．この半導体中間層は金属と半導体界面に存在する障壁を低下させるか，キャリア密度を増加させた非常に薄い層でなければならない事を明らかにした．このモデルは「半導体中間層形成モデル」と名づけた．現在も，コンタクト材の開発指針として現在も定着して

いる．このモデルを用いて最も耐熱性の高い低抵抗のNiInW コンタクト材（図10）を開発し，高温でも安定な GaAs トランジスター試作デバイスが実現した[8]．IBM で開発したこの NiInW コンタクト材の熱安定性は20年経た今日でも最も優れているコンタクト材である．このコンタクト材開発研究でも学んだ事は，材料の特性は自然の摂理に基づいて決定されたものであり，材料開発には基礎に戻り，摂理を解明するのが近道であるという事である．

化合物半導体には通信分野のみならず，発光素子，センサー，パワーデバイス等，色々な応用がある．しかし，化合物半導体自体の電気特性は優れているが，これらの化合物半導体の共通した課題は外部から半導体内部に電流が流れにくい事である．この半導体中間層形成モデルを開発指針として様々な化合物半導体への適用を試みたかったが，IBMでは実用化の見通しの立っていないデバイスの研究開発は不可能である．普遍的な原理・原則を探求する使命を持ち，実用化は様々な企業との連携で可能であり，さらに優秀な若者で溢れる大学への職探しを始めた．

10. 20年ぶりに京都大学へ

大学卒業以来，20年間の米国生活を終え，1990年に母校に戻る栄誉を得た．京都大学での第一印象は，建物・実験設備など多くのものが卒業時そのままで，有難い事に，20年間の空白を一日で取り戻してくれた．IBM 研究所でマネージャーをしていた時には，高品質の試料作製，高精度の測定，超微細構造観察のため最新実験設備を研究室に取り入れる事に時間を費やしていた．材料研究に関しては世界の最先端を自負する我が材料工学教室の先輩達の「世界での研究の流行を作り出すには，我々，研究者は研究設備で勝負しているのではなく，常に頭で勝負している」との主張を聞き、カリフォルニア大学でのデフォンティン先生の言葉を想い出した．

米国で知り合った多くの国内外の人々には京都大学での研究室作りに援助して頂き，今でも感謝の気持ちで一杯である．特に IBM 研究所から多大な援助を受けた．帰国直前には，京都大学での研究環境では研究続行が不可能である事を知り，GaAs 半導体プロジェクトで使用していた実験装置を送って戴いただけでなく，装置のセットアップにはテクニシャンまで派遣してくれた．しかも，しばらくはサンプルを作れないだろうと，1～2年間のサンプルまで帰国直前に夏休みを返上してテクニシャン達が作成してくれた．この様な IBM の心遣いには，感謝していると同時に懐の深さを実感させられ，友人には言葉の違いこそあれ，国境がない事を知らされた．

京都大学で，村上研の第一期生の学生には「自然淘汰環境下での研究とは…」をランチタイムによく話していた．学生の研究意欲を高揚させる為，「百聞は一見にしかず」で，IBM ワトソン研究所，ベル研究所，バークレー大学の見学を夏休みに行った．小生も米国でのやり残しの仕事が多くあり，学生と一緒のスケジュールでは旅行出来なかったが，IBM 研究所集合で修学旅行を実施することが出来た．図11は当時の5人の院生と IBM

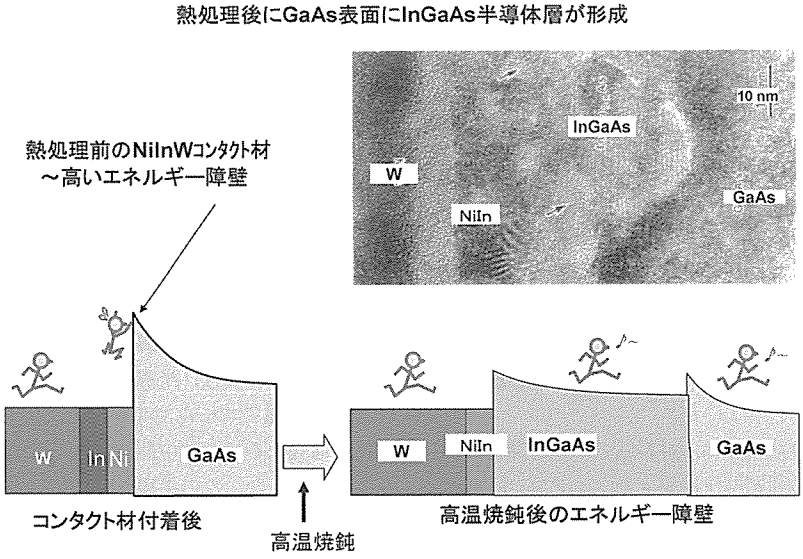


図10 半導体中間層モデルに基づき形成された NiInW コンタクト材の界面での断面透過電子顕微鏡写真

化合物半導体	応　用	開発されたオーミック・コンタクト材	特　許	論文
n型GaAs	トランジスター	NiGe,(Au),NiGe(Pd),NiGe(Pd),…… NiInW, InGaAsNiWN, WSi,……	12	52
p型InP	受光素子	PdZn,SbPdZn, ……	2	4
p型CdTe・	放射線検知器	In,InTe, ……	4	16
p型GaN	発光素子	CoAu,PdAu,Pt(O2),TaTi,……	7	20
p型 ZnSe	発光素子	AuCr,ZnTeNi,……	3	15
n型AlGaN	トランジスター	TiAlPd,TiAlPt, ……	1	0
p型SiC	パワーデバイス	CoAl,NiTiAl, ……	1	8
p型<D>	ディスプレイ	TiC, TaC, ……	0	11

図12　当研究室で開発された様々な化学物半導体デバイス用コンタクト材料および成果



図11　IBM T. J. ワトソン研究所前での当研究室一期生の修学旅行記念写真

研究所前での記念写真である．この旅行の目的は，小生の研究室の卒業生の中から一人でも海外に永住し，自然淘汰の研究環境に立ち向かい，挑戦してくれる学生を輩出したい強い希望があったが，残念ながら小生の京都大学在職中には実現できていない．

11．各々な化合物半導体デバイス用のコンタクト材の開発

先にも述べた様に，化合物半導体はSi半導体が持ち合わせていない色々な特性があり，高速トランジスターのみならず，発光素子，受光素子，放射線検知器，パワーデバイス等，多くのデバイスの実現の可能性を秘める．これらデバイスの実現には，材料学的な課題が多く，格子欠陥のない高品質の化合物半導体の成長法，キャリア密度の制御法，および低抵抗のオーミック・コンタクト材料の開発が不可欠である．

京都大学での研究・開発は産学連携を主体として進める事にした．産学連携を成功させる為にはお互いの役割を明確に分離し，責任を持つ事である．半導体基板成長およびキャリア密度の制御は共同研究しているは企業に委ね，大学での研究は企業から提供された高品質の基板上にコンタクト材形成を主目的とした．IBM時代に構築した半導体中間層形成モデルを開発指針として，種々の化合物半導体に適したオーミック・コンタクト材を開発する事にした．勿論，コンタクト材開発に特化した研究室は世界に類がなく，有難い事に多くの企業からの共同研究の申し込みがあり，研究費にはあまり不自由はなかった．学問的には半導体中間層モデルがどれくらいの広範囲に適応出来るかが楽しみであり，毎日の結果に一喜一憂であった．各デバイスに求められるコンタクト材の要求値（接触抵抗，表面平滑性，耐熱性等）も基板提供の際に連携企業から与えられ，この様な要求を満足するコンタクト材の開発の挑戦にスタッフ・学生らと共に挑む事が出来た．且つ，開発に必要な期間も企業から明示され，真に，産と学の密接な連携の始まりである．

多くのスタッフ，学生の協力のお陰で（開発不可能なコンタクト材もあったが）様々なコンタクト材が開発された．同時に，バルク材では見られない金属薄膜材と半導体界面での特異な拡散現象も観察[8]され，材料科学的にも興味ある結果が得られた．これらのすべての科学および工学的な成果は紙面制限上網羅できないが，開発されたコンタクト材だけをまとめて図12に示す．コンタクト材開発の研究で最も大きな収穫は学生が協同研究企業の方々と対等に意見交換をする機会が定期的にあり，学生の成果の表現力が日増しに強くなった事ではないかと思う．

当研究室で開発したコンタクト材料の中で，実用デバイスに用いられているものがあるが，半導体中間層形成モデルが適用できない化合物半導体もあり，今後，未知の化合物半導体の出現時に備え，金属・半導体界面の電

気輸送機構を完全に制御するには多元系の状態図，非平衡の界面反応機構，歪（応力）の影響，格子欠陥の制御法を系統的に基礎に戻り研究する必要がある．

12. Si 半導体デバイス用の低抵抗 Cu 配線材料の開発

コンピューター等に用いられる ULSI デバイスの主流はやはり Si 半導体である．Si 半導体の時代が終われば，次世代のコンピューター用の半導体材料は何かと問いかけられるが，やはり Si と言わざるを得ない位，Si 半導体はコンピューター素子には優れた材料であり，どの半導体材料より最も深く研究されていると思う．

コンピューター用の半導体デバイスは半導体材料の特性を向上させるより，むしろデバイスサイズを縮小する事により演算速度は向上してきた．この法則は一般にムーアの法則と呼ばれ，1965年から2005年まではこの法則からはずれる事なく，微細化により Si 半導体デバイスは高性能化してきている．しかし，デバイスも超微細になると金属配線と半導体が接触する面積が小さくなり，コンタクト抵抗が増大し，演算速度も遅くなる．コンタクト材料の開発も必要だが，Si 半導体でのコンタクト材料の開発は完成度が高く，大学が貢献できる研究段階は過ぎたと思える．Si 半導体デバイスでは，（化合物半導体デバイスと異なり），コンタクト材開発により，むしろ緊急の重要な課題は低抵抗の金属配線材の開発である．

現在の超高集積 Si デバイスでは演算速度はデバイスの心臓部であるトランジスター間での信号の伝達速度で制御される．トランジスターの大きさを示すゲート幅が1 μm 時代の1980年代とは異なり，今やゲート幅が50 nm 以下である．勿論，配線幅も同様に微細化され，信号が細くて長くなった配線材を伝達せねばならなく，この伝達時間（遅延時間と呼ばれる）で演算速度は決定される時代になったのである．言うまでもなく，将来，現在より Si 半導体デバイスがさらに微細化すると，配線の断面積もさらに細小化し，配線長さも極端に増長する．配線を電気が流れる際の電気抵抗は異常なまでに増大し，それに比例して信号遅延時間も長く遅くなり，微細化によるコンピューター性能向上の神話が崩壊する．従って，金属配線材料としては可能な限り比抵抗率の低い材料を用いなければならない．

1960年代より1990年代まで30年間に及んで使用されていた Al 合金配線材料が1997年に Cu 配線材料に置き換えられたのも，Cu 材料の方が Al 材料に比べ比抵抗率が40% 減少する為である．Cu 配線を Si 半導体デバイスに使用するとの新聞発表で Cu の地金の値段が急激に上昇した位の衝撃である．しかし，Cu 配線材料も100 nm 以下の線幅になると電気抵抗値は急激に増加する．これは Cu 材の比抵抗率より，電子が Cu 配線を移動する際に表面，界面，結晶粒界，不純物による散乱の影響が大きく，結果的に電気抵抗が増大するためである．デバイスは設計によりすでに長さ，断面積は固定されているため，低抵抗 Cu 配線材料の開発は，電気抵抗増大の原因である表面，界面による電子散乱は避けられない．超微細 Cu 配線材で制御できるのは，Cu 配線内の組織構造だけであり，如何に不純物や結晶粒界を消滅させるかが研究課題となる．

研究目標は準単結晶（巨大結晶）膜の作製である．しかし，Cu 膜にはボイドが多く存在し，ボイドによる電子散乱を最小限にするため，結晶粒内に存在するボイドの消滅が不可欠である．ボイド形成の主な要因は Cu 膜に存在する酸素である事をスタッフ，学生が突き止め，酸素の含有量を低減し，ボイドフリー Cu 配線材作製に成功した．主題である Cu 結晶粒の粗大化は，Cu 膜に歪を加えると結晶粒は容易に増大する事が明らかになった（図13）[10]．これは膜に歪が導入される事により，膜内の歪エネルギーが増大する．このエネルギーを緩和させるために結晶粒内に転位を導入すれば良いが，転位の両端は結晶粒界にピニングされ，小さな結晶粒には転位が容易に導入されない．転位を導入させ歪エネルギーを緩和させる為には結晶粒は増大しなければならず，結果的に歪により結晶粒成長を促進することを発見した．IBM 時代のジョセフソンプロジェクトで Pb 薄膜強化機構を解明するときに提唱した「Strain Energy Criterion Model」が薄膜の結晶粒成長機構にも当てはまる[11]．従来のモデルとは全く異なった薄膜の結晶粒成長モデルが適応出来る事が証明された事は，材料の多くの現象には共通項が多い事を再認識した．

結晶粒成長機構が解明できれば，後は如何に歪を薄膜内に均一に加えるかの技術開発である．単に硬い Si 基板と Cu 膜の密着性を強化しただけで，準単結晶に近い巨大結晶粒 Cu 薄膜材形成に成功し，最も低い抵抗値を有する Cu 膜材の作製に成功した．

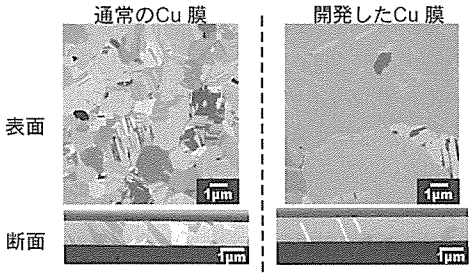


図13 歪導入法による Cu 薄膜材の結晶粒成長法

この他，Cu配線材の研究では，Cu配線は直接接触しているSi基板，SiO誘電膜，有機材料と容易に反応するためにナノスケールの薄い拡散防止膜が必要である．この研究についても長年関わり，TaN，TiN，WN等の窒化膜を数々開発してきた．人工的にこれらの窒化膜を形成するのではなく，相分離を利用しての拡散防止膜の形成に成功した．Ti等の元素をCuに添加し，Cu合金膜を作成して，高温焼鈍により，自然に誘電膜表面に窒化物を形成させる方法を開発した（図14）[12]．人間が手を切った時，自然にかさぶたが傷口を覆う様な表皮現象で窒化膜が形成できたのである．ここでは紙面の制限上，これ以上の詳細は省略する．

13. 最　後　に

大学院から数え，ほぼ40年間，主に機能材料の研究開発に取り組んできたが，材料開発を取り巻く環境は，この40年間で大きく変化した．20年程前までは，材料機能第一主義で材料開発の研究が進められ，材料の機能を向上させる為には添加される元素には殆ど選択の制限はなかった．現在は，どれだけ高い機能を発揮させる添加元素を発見しても，その元素が希少元素であれば将来，日本に元素が輸入されるかどうかが不透明であり，日本では実用化にはなりにくい．また，地球表面に多く存在すると言われている高いクラーク数の元素でも，産出国からの輸入が不可能であれば国内での製品化は危ぶまれる時代である．これは発展途上国に材料資源の埋蔵が偏在しているためである．

20世紀後半，わが国は，経済発展と共に，材料資源のみならず，エネルギー，食糧等，殆ど海外の輸入に依存してきた．その悪影響が21世紀当初から大きくクローズアップされ始め，人間が生存するのに最低限必要なエネルギー，食糧ですら物価高騰により輸入困難になりつつある．このような現状で，到底，21世紀の終焉の日本の姿は想像できない．材料資源は食糧の様に農地を開拓して増産し，自給率を将来的に倍増させる訳にはゆかない．金属資源創成説によると，地球誕生と同時に鉱床が形成された．我々は45億年前に形成された鉱床の恩恵を受け現在の高度社会を享受している．さらなる高度化が進めば，材料資源の需要は増大し，資源は最終的には枯渇する．枯渇した資源を新しく地球上に創成する事は不可能である．

しかし，日本には大きな「都市（金属）鉱床」がある．車をはじめとする日常用いている民製品の中に多量の材料資源が埋蔵されている．現在は製品の廃品は海外（特に中国）で高く売れるからとの単純な理由で，どんどん海外に流出しているが，50年先には今まで蓄積した日本の廃品鉱床も底をつく状態である．日本は鉱石から精錬により必要な元素を抽出する技術は世界一と誇示してもよい．しかし，廃品のような添加元素が不確定な複合材料から必要な元素を選別，抽出する技術はまだまだ未開発である．鉱石で熟得した精錬技術を「都市鉱床（廃品）」での精錬技術の革新に適応してほしいと思うが，残念ながら日本には精錬を教える研究室も殆どない．これは材料の地味な研究には競争的研究資金が削減されてきた結果である．

小生も京都大学定年を迎える間近の2006年8月に近畿経済産業省，京都高度研究所の御支援の基で，地球上の材料資源を自然に戻そうとする理念で「自然順応型ネオマテリアル研究会」を創成した．この研究会は主に中小企業が主役である．一番厄介な企画・運営は近経局，ASTEMにお任せしている．材料資源の減量技術，循環技術，および代替技術に対して，各企業が開発した技術をさらに発展させ，実用化させる事を主目的とした研究会である．現在は100社以上の企業が参画され毎年3～4回開催される研究会には150～200名の参加者がある．小生も材料の自然順応化に少しでもお役に立てばと思い，アドバイザーとして研究会に携わっている．

京都大学を退職後からお世話になっている立命館大学でも，もう少し視野を拡大して今年の4月に新機構を大学が一丸となって創設した．20世紀の急速な社会の高度

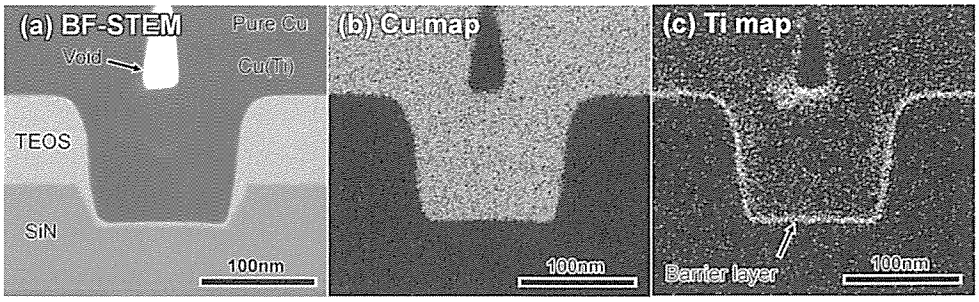


図14　HIPにより自己形成されたCu（Ti）膜の超薄膜Tiバリア層

化（成長）により破壊された地球の自然（地下資源，食糧，環境など）の均衡の回復は，21世紀の科学技術の重大責務である．本学は教育機関として，この課題に対して貢献すべき立場であると考え，日本の緊急課題に特化した取り組みを行う「立命館グローバル・イノベーション研究機構」の創設の旗振り役を任された．この研究機構は可能な限り，政府の重点課題に整合したエネルギー，材料資源，食糧，環境，安全安心，医療健康の6領域で研究拠点を形成した．学内ですべての費用を予算化し，組織的に取り組んでいる．特に「次世代を担う若手研究者の育成」を強化し，次世代社会への貢献を果たす目的である．

京都大学には約16年間しか在籍しなかったが，研究室のスタッフは総勢16名にものぼり，本当にお世話になった．今でも研究面だけでなく，将来の進路相談等に来られ，私的なお付き合いが続き，感謝している．学生には京大の伝統である「自学自習」をモットーとして教育していた為に，十分な教育が出来なかったにも関わらず，最終講義には立見席が出る位の多くのOB，現役の学生に来ていただき，感謝している．また，何度も定年祝いをして頂き，有り難く思っている．（また余談であるが，講演修了時に聴講して頂いたASTEMの市原達朗総括部長が「生まれ変わっても材料研究をするか？」との質問に対して「無論，材料研究を一生の伴侶としたことは，No Regrets」と答えたので表記の英文タイトルとした．）

最後に，在学中の学生には「成功から学ぶより，失敗から学ぶ方が大きい」ことを信じ，大学時代には失敗を恐れず与えたテーマ研究には，自然の神秘が潜んでる事を信じて，神秘解明に挑戦して頂きたいことを念願する．さらに最近は転職が多いが，必ず何のために転職するかを明確にして新領域に挑んで頂く事もお願いする．

参 考 文 献

1) M. Murakami, D. deFontaine, J. M. Sanches and J. Foder, "Diffusion in AgAuPd Thin Film Microcouples," Acta Met. 22 (1974) 709-719.
2) C. J. Kircher and M. Murakami, "Josephson Tunnel-Junction Electrode Materials," Science 208 (1980) 944-950.
3) M. Murakami, T. S. Kuan and I. A. Blech, "Mechanical Properties of Thin Films on Substrates," Treatise on Materials Science and Technology, Ed. H. Herman, 24 (1982) 162-210.
4) A. Segmuller and M. Murakami, "X-ray Diffraction Analysis of Strains and Stresses in Thin Films", Treatise on Materials Science and Technology, Eds. K. N. Tu and R. Rosenberg, 27 (1988) 143-200.
5) M. Murakami, " Strain Relaxation Mechanisms of Thin Deposit Films," CRC Critical Reviews in Solid State and Material Sciences, 11 (1984) 317-354.
6) M. Murakami, "Thermal Stability of Pb Alloy Films Used in Josephson Junction Electrode", in "Diffusion Phenomena in Thin Films and Microelectronic Materials", Ed. D. Gupta and P. S. Ho, Noyes Publication, New Jersey (1988) 499-543.
7) M. Murakami, "Development of Ohmic Contact Materials for GaAs Integrated Circuits", Materials Science Reports 5 (1990) 273-317.
8) M. Murakami, "Development of Refractory Ohmic Contact Materials for Gallium Arsenide Compound Semiconductors", Sci. Technol. Adv. Mater. 3 (2002) 1-27.
9) M. Murakami and Y. Koide, "Ohmic Contacts for Compound Semiconductors", Cri. Rev. Sol. Stat. Mater. Sci. 23 (1998) 1-60.
10) M. Moriyama, K. Matsunaga, T. Morita, S. Tsukimoto, and M. Murakami, "The Effect of Strain Distribution on Abnormal Grain Growth in Cu Thin Films", Mater. Trans. 45 (2004) 3033-3038.
11) M. Murakami, M. Moriyama, S. Tsukimoto, and K. Ito, "Grain growth mechanism of Cu thin films" Mater. Trans. vol.46, (2005) 1737-1740.
12) S. Tsukimoto, T. Kabe, K. Ito and M. Murakami, "Effect of annealing ambient on self-formation mechanism of diffusion barrier layers used in Cu (Ti) interconnects", J. Elect. Mater., 36 (2007) 258-265.

大会記念講演

石油開発：あらたなる挑戦

牧　　武　志*

Petroleum Development - A Challenge by the Newly Merged Japanese Oil Company

by Takeshi MAKI

1. はじめに

原油価格の高騰は1バレル，130～140ドルと常識では到底考えられないレベルにまで達しているが，これは投機資金の流入による影響が大きいものの，一方でいわゆるBRICsと呼ばれる中国，インドなどの新興国の急速な経済発展に伴う石油需要の大幅な伸びも与って大きいと考えられる．特に後者は先行きの供給不安も引き起こして，価格高騰に加えて，石油・天然ガスの資源確保の国際競争も激化させている．

産油国はこのような追風も受けて，資源ナショナリズムが台頭し外国石油会社の参入条件を一層厳しくしている．このような中，石油メジャーは合従連衡を繰り返し益々巨大化して競争力をさらに強化させており，また中国，インドなどは形振りかまわず資源確保に走っている．

国際石油開発㈱と帝国石油㈱は2006年4月に経営統合を果たし，競争力の強化を図り，この激化する国際競争に立ち向かい，メジャーズに伍して世界で戦える石油開発企業を目差すとの「あらたなる挑戦」をスタートさせた．

2. 3つの挑戦

具体的には次のようなテーマに重点的に取り組んでいくことを考えている．これが実現できれば，名実ともに世界で認められる第一級の石油開発企業となると考えられるが，これらのハードルは決して低くなく統合新会社にとって大きな挑戦となる．

(1) メジャーに次ぐ規模の国際的な石油開発企業（準メジャー）を目差す．

・経営統合による両社の強みを結集することで，10年後には80～100万バレル/日規模の生産量を目差す．

・これが実現できれば，エクソンモービル，シェル，BPなどのスーパーメジャーには及ばないものの，シェブロン，TOTAL，ENIなどのメジャーに次ぐ規模となり，言わば「準メジャー」と称することができる．

(2) 新しい分野への進出

・今後の探鉱・開発の対象として，在来型のものに加えて新しい分野として，「重質油」と「大水深」に積極的に取り組む．

・帝国石油㈱の国内天然ガス事業と国際石油開発㈱のオーストラリアなどの大型LNG開発プロジェクトとの結合により，天然ガスの上下流の一体化を図り，これにより相乗効果を引き出す，いわゆる「天然ガス・バリューチェーン」の構築に取り組む．この新しいビジネス・モデルは統合新会社の競争力の強化に大いにつながると考えられる．

・紙面の制約もあり，この項では重質油の開発について重点的に述べる．

(3) 新しい技術・コンセプトによるIOR[1]（回収率向上）

・地下にある石油・天然ガスを出来るだけ多く採取することは，石油開発会社の永遠の技術テーマであると共に，その大きな使命である．

・昨今の油価の高騰もあって，世界的にIORプロジェクトに注目が集まっており，当然ながら産油国も大きな関心をもっており，石油開発会社にとって新規参入の機会を拡げる有力なツールともなっている．メジャーズに倍して世界でこれらのプロジェクトに取り組んでいくには，統合新会社の技術力の向上と新技術の獲得が必須となる．

・名実ともに準メジャーとして世界で認められるには，これらIOR技術に限らず，石油開発技術全般

*国際石油開発帝石ホールディングス株式会社

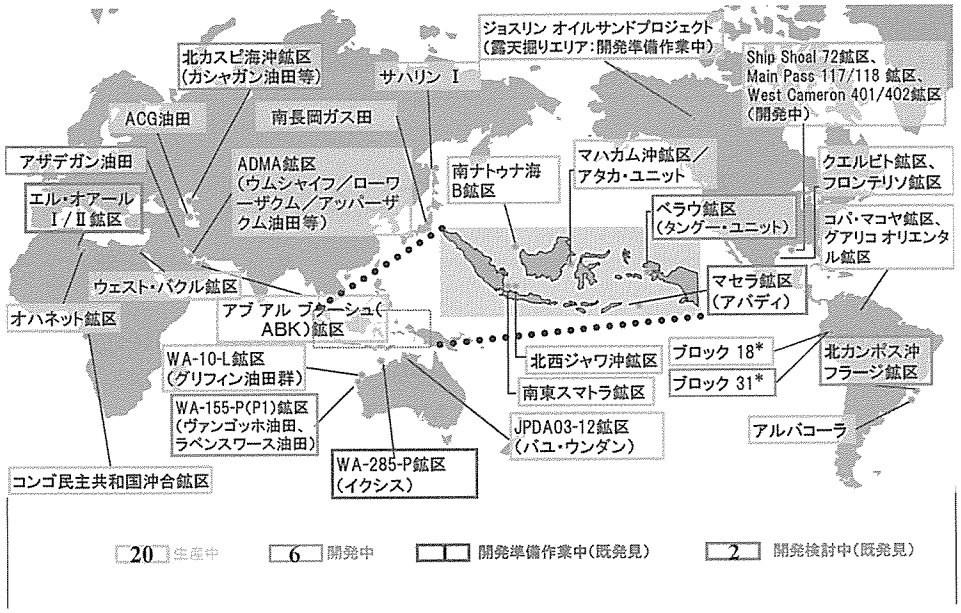


図1 主要な開発プロジェクト 計25カ国67プロジェクト

に渡って底上げが必須と考えている.

(a) MHF[2] (大規模水圧破砕法)

・新潟県にある当社の南長岡ガス田では，その北部にある生産性の低い火山岩貯留層に MHF を適用し，生産性を10倍以上高めることに成功し，その商業的な開発を可能にした.

・世界には多数の低生産性の油・ガス田が未開発のまま残されており，これらのノウハウも活用してその開発にトライしたい.

(b) 高度な掘削技術

・ERD[3] (大偏距掘削)，水平掘，マルチラテラル(1本の坑井から複数の水平掘を行う) などの高度な掘削技術を用いることで IOR を実現することが可能となる.

・福島県沖合にある当社の磐城沖ガス田では，ERD 技術によりプラットホーム南方約 4 km にあったガス層の開発に成功した．これは約14年前ではあったが，最近では 10 km を越える ERD も世界では珍しくなくなっている.

・水平掘の技術により，石油・天然ガスの産出層に沿って，時には 1000 m を超えるインターバルを掘削し，生産能力を向上させると同時に回収率を上げることは，今や油・ガス田開発では通常の手段となっている.

・今後，これらの最新の掘削技術に急いでキャッチ・アップしていく必要がある.

(c) CO_2-EOR[4] (回収率増大法) と CCS[5] (CO_2の地下貯留)

・CO_2 (炭酸ガス) を地下の油層に圧入し，地下で CO_2，油，水をミシブル (一相状態) にし，油水間の界面張力をなくし，残留した油を回収する技術は IOR の一種で CO_2-EOR と呼ばれ，世界で広く実施されてきている.

・一方で CO_2 排出量の増大による地球温暖化への影響が大きな関心を呼んでおり，洞爺湖サミットでは大規模 CCS の早急な検討の開始が合意された．この CCS と CO_2-EOR を結び付けることで，プロジェクトの経済性が向上し，CO_2-EOR プロジェクトの可能性が拡がってきている．我々も国内・外でこの種の IOR プロジェクトに積極的に取り組んでいく.

・やはり紙面の制限からこの項では CO_2-EOR について重点的に述べる.

3. 統合新会社の概要

(1) 主要プロジェクト

・図1に主要な開発プロジェクトの位置図を示すが，25ヵ国で67プロジェクトあり，全世界に広がっている．昨今の資源ナショナリズムに伴うカントリーリスクを考えると，このように多くの国と地域に

[1] Improved Oil & Gas Recovery
[2] Massive Hydraulic Fracturing
[3] Extended Reach Drilling
[4] Enhanced Oil Recovery
[5] Carbon Dioxide Capture & Storage
[6] Barrel Oil Equivalent

プロジェクトを分散させることが重要と考えている．

・この中でも特に重要なものは，南長岡ガス田，カシャガン油田（カザフスタン），ACG油田（アゼルバイジャン），ADMA鉱区（アブダビ），マハカム沖鉱区（インドネシア），イクシスガス田（オーストラリア），アバディガス田（インドネシア），ジョスリンオイルサンド（カナダ）などである．

・2008年度の探鉱計画として試探掘井30坑（うちオペレータとして10坑）を日本，北米，南米，インドネシア，オーストラリア，アフリカなどの多くの地域で予定している．

(2) 2008年3月期決算

・売上高1兆2029億円，経常利益6857億円，純利益1732億円

・平均日産量42.3万バレルBOE[6]/日（原油と天然ガスを合計したもので，天然ガスはエネルギー換算により原油に変換している．）

・確認可採埋蔵量16.5億BOE，推定埋蔵量27.2億BOE，合計43.7億BOE

・探鉱・開発投資計画として今後3年間で合計1兆2409億円を予定

(3) 長期生産見通し

・今後，カシャガン油田（ピーク生産量150万バレル/日予定），イクシスガス田（約34万BOE/日），アバディガス田などが2010年代中頃には生産開始となる予定で，2010年後半には既存プロジェクトの積み上げだけで約70万BOE/日となる見通しである．

4. 準メジャークラスへ

(1) その道筋

・図2に統合新会社が持続的成長を図り，準メジャークラスを目差す道筋を示している．統合により生まれた①オペレータ能力の強化，②国際的なプレゼンスの向上，③優れたポートフォリオ・バランスなどを拠に国際競争力の強化を図り，新分野への進出も含めて積極的な事業展開を実現する．

・カシャガン，イクシス，アバディなど大規模既発見油・ガス田の早期商業生産に加えて，天然ガス・バリューチェーンの構築による国内天然ガス事業の拡大，さらに新地域での探鉱，開発により2010年代後半に80～100万BOE/日の準メジャー規模の生産量を目差す．既存プロジェクトの積み上げだけで約70万BOE/日となる見込みなのでこの規模の生産量を達成すること自体は必ずしも高いハードルではないが，これを維持するには毎年約3億BOEの埋蔵量を追加する必要があり，これは決して容易なことではない．このためには技術力の向上も含めた総合力の強化が必須と考える．

(2) 主要プロジェクト

・図3にイクシスガス田の概要を示すが，現在開発計画の策定中で5～6年後に生産開始を目差している．LNG約800万トン/年，LPG約160万トン/年，軽質油約10万バレル/日の生産を予定しており，これらの合計を原油換算すると34万BOE/日となる．これは単一ガス田プロジェクトとしては，東南ア

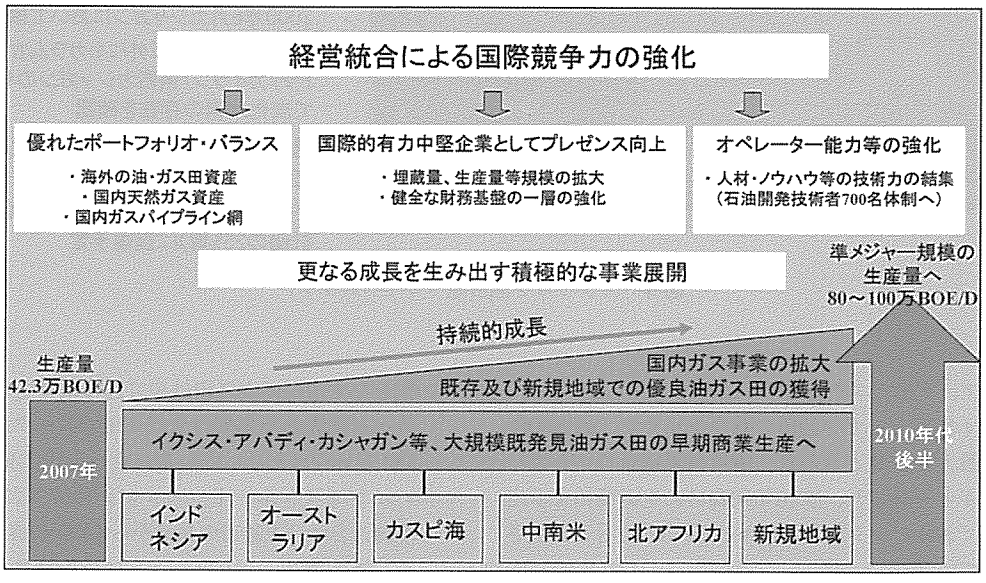
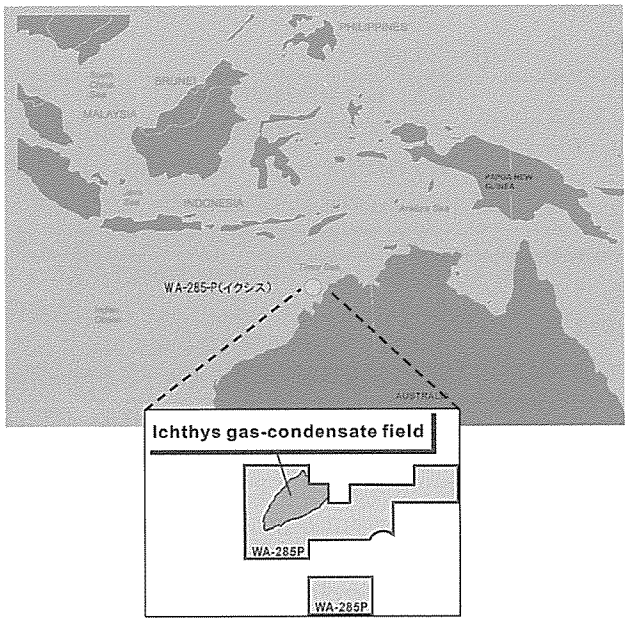
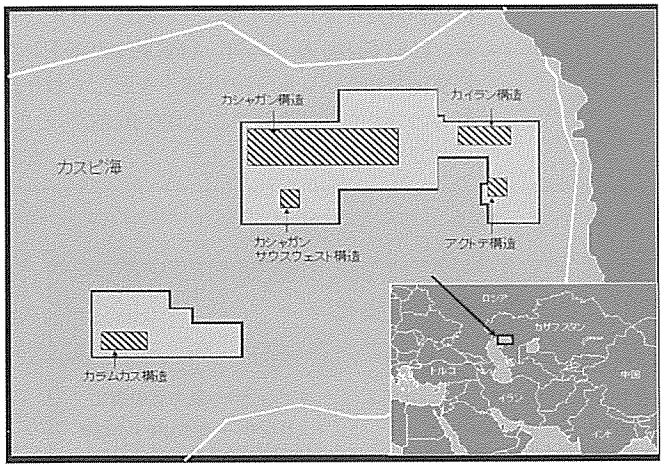


図2　統合会社の持続的成長



- 当社権益比率: 76.0%
- オペレーター: 当社
- 2000年より計7坑井を掘削し大規模天然ガス・コンデンセート田を確認
- 初期生産量
  - LNG 約800万トン/年 (≒20万BOE/D)
  - コンデンセート 約10万 B/D
  - LPG 約160万トン/年 (≒4万BOE/D)

図3 イクシス ガス・コンデンセート田（豪州）



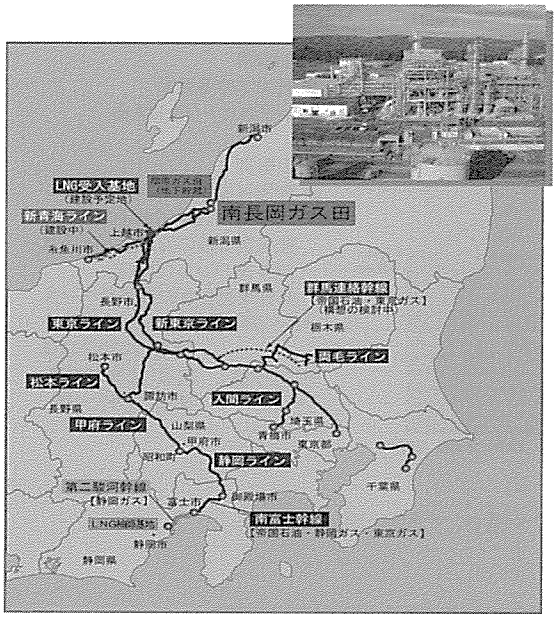
- 当社権益比率: 8.33%(オペレーター: ENI)
- 今年1月、カザフスタン政府と基本合意に到達
  - 開発操業体制を整備、強化
  - カザフ国営石油会社を除くパートナーがプロラタで権益を譲渡し、同社の参加比率を他のメジャーシェアホルダーレベルに引き 上げる(当社の権益比率は8.33%から7.56%へ)
- 2000年6月カシャガンにおいて原油発見
- カシャガン油田以外にもカラムカス/アクトテ/カイラン/南西カシャガンの4構造にて炭化水素の存在を確認
- 過去30年で最大の発見、累計生産量が130億バレルになると期待
- ピーク生産量は日量150万バレル(当初計画の25%増)に到達予定

図4 カシャガン油田他（カザフスタン）

ジア，オセアニア地域では最大級の規模となる．

・図4にカシャガン油田の概要を示すが，過去30年で最大の発見と言われ，総可採埋蔵量は130億バレルと見込まれ，2010年代初めに生産開始を予定しておりピーク生産量は150万バレル/日と計画されている．

・図5に国内天然ガス事業の概要を示すが，その中核をなす南長岡ガス田は総可採埋蔵量が300億m^3以上と国際的な規模の大ガス田でピーク生産量は520万m^3/日となっている．総延長約1,400 kmのパイプラインネットワークに国産ガスに加えて，静岡市および上越市の基地からLNGの導入を計画し，天然ガス・バリューチェーンを構築し事業規模の拡大を図る．



- 生産量
  - 天然ガス：約5.1百万m³/日（2008年1月平均）
  - 原油：約5,400バレル/日（2008年1月平均）
- 天然ガス販売量
  - 2007年度は前期比37%増の17億m³（帝石単体）
- 南長岡ガス田（1984年生産開始）
  - MHF技術により北部開発を促進
  - 2006年プラント処理能力増強
    （ガス田全体の処理能力：約520万m³）
- ガス拡販を目的としたパイプラインネットワークの拡充（総延長約1,400km）
  - 新青海ライン（約71km：約178億円：2009年完成予定）
  - 群馬連絡幹線構想（東京ガス㈱との共同検討）
- LNGの導入（2010年～）
  - 静岡ガス㈱のLNG気化ガスを導入
- LNG受入基地（上越市）の建設計画
  - 当社グループによるLNGバリューチェーン構築
- 発電事業：約5.5万kw

図5　国内天然ガス事業

5. ピーク・オイル論

(1) ピーク・オイル論

・世界の原油の確認総可採埋蔵量は約2兆バレルで，既に約1兆バレル生産しているので，残り，即ち確認可採埋蔵量は約1兆バレルとなり「ババート理論」からは現在がその生産のピークに当り，今後，生産量は急速に減退していく．これが言わゆる「ピーク・オイル論」で近年盛んに宣伝されている．そうだとすると「これから準メジャーを目差す」というのはいかにも時機を逸しているのではないかとの疑問を呈することになるが，このピーク・オイル論は我々石油開発技術者の実感とは懸け離れている．

(2) プラトー論

・図6にピーク・オイル論とプラトー論の比較を示している．ピーク・オイル論では現在の約80百万バレル/日をピークに今後，生産量は急速に減退するとしているが，プラトー論では更に生産量が伸びて120～130百万バレル/日でピークに達し，その後も上昇・下降を繰り返しながら生産量はゆるやかに減退するというものである．

・プラトー論では在来型の原油の総可採埋蔵量は，埋蔵量の成長により約0.5兆バレル，更に今後の新規発見で約0.4兆バレルそれぞれ追加され，約2.9兆バレルと見込んでいる．

・埋蔵量の成長とは，油田の生産の進展に伴い埋蔵量が段階的に増加していくという現象で，データの蓄積と技術の進歩によりもたらされるもので，多くの油田で見られる極めて一般的なことである．

・米国テキサス州のパーミアン堆積盆は，1930年代から開発が始まった熟成の進んだ古いフィールドであるが，1964年の評価では総可採埋蔵量が190～275億バレルで，2007年の評価では500億バレル以上と倍増しており，この増加の大部分は既存油田の埋蔵量の成長によってもたらされたものである．新潟県にある当社の南阿賀油田でも，開発当初約160万klと評価されていた総可採埋蔵量が約40年後の現在では約280万klと約1.8倍に増えている．

・最近のメキシコ湾，ブラジル沖，西アフリカ沖などの大水深域での相次ぐ大油田の発見，さらには北極海などでの今後の新規開発も考えると0.4兆バレルの新規発見量はむしろ慎重な予測と言える．

・オイルサンドなどの非在来型石油資源を約0.7兆バレルと見込んでいるが，このポテンシャルについては次の重質油の項で述べる．最近の油価の高騰により，プロジェクトの経済性が著しく向上しカナダなどではオイルサンド開発ブームが起こっている．

(3) まとめ

・化石燃料が有限であるのは論を待たないが，しかし実際の可採埋蔵量を決定するのは市場メカニズムである．図7に縦軸を開発コスト，横軸を可採

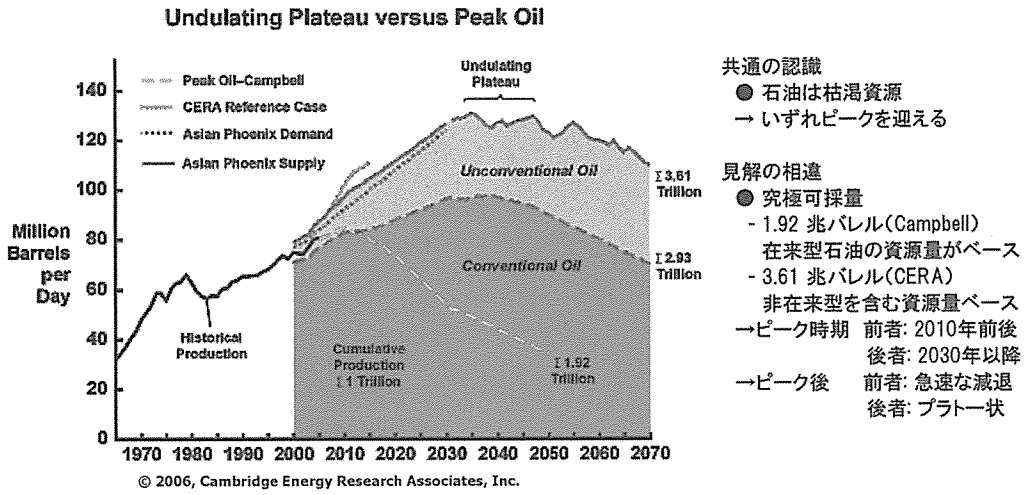
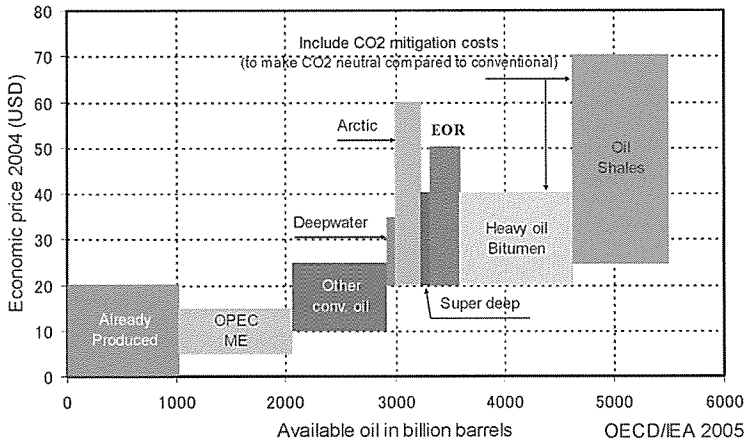


図6 ピーク・オイル論 vs. プラトー論



- 既生産量は約1兆バレル、在来型原油の期待残存可採資源量(未発見含む)は約2兆バレル。
- 在来型原油の追加ポテンシャルは、深海・極地で約3000億バレル、EORは約3000億バレル。
- 非在来型原油は、重質油・ビチューメン約1兆バレル、オイルシェール約8000億バレル。

図7 原油価格と資源量（OECD/IEA 2005）

埋蔵量とするOECD/IEA2005の報告を示すが，油価が開発コストに見合うだけ上昇すれば，EORも，重質油も，更にはオイル・シェールも商業的な開発が可能となり，可採埋蔵量に加わることになる．図-7にはそのポテンシャルも示されているが，最近の資機材，サービスの高騰から縦軸のスケール自体は見直される必要がある．

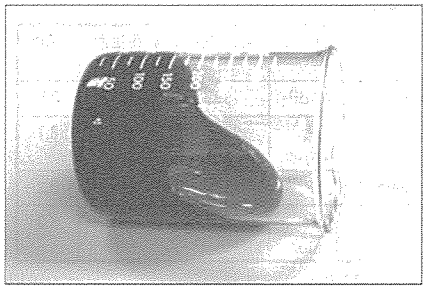
・現在のような油価の高騰が今後も続くとは考えられないが，一方で新興国などの経済発展を考えると引き続き堅調な石油需要が続くものと思われ，油価が再び20～30ドル/バレルの低いレベルに戻ることも考え難い．従ってプラトー論に近いシナリオで今後推移するものと考えられる．

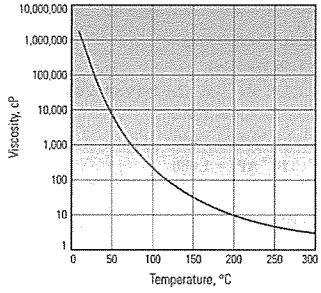
6. 重 質 油

(1) 重質油の資源量

・図8に重質油の総資源量（原始鉱量）を示すが，全世界で約6.4兆バレルでこのうちの約10%が回収されるだけでプラトー論で見込む0.7兆バレル近い可採埋蔵量となる．

・中南米で2.7兆バレルと全体の42%を占めており，またこの地域の重質油はオリノコ・タールを始め





重質油、超重質油・ビチューメンの
地域別総資源量(単位:億バレル)

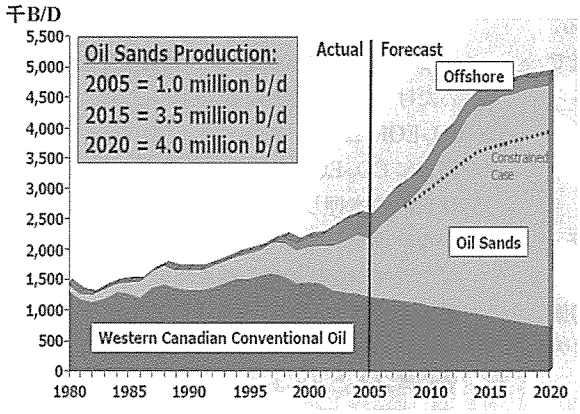
地域	重質油	超重質油・ビチューメン	合計
北米	1,022	14,446	15,468
中・南米	14,927	11,780	26,707
旧ソ連	2,632	14,384	17,016
中東・北アフリカ	2,943	0	2,943
その他	1,576	186	1,762
合計	23,099	40,796	63,895

出所)石鉱連資源評価スタディ2007年

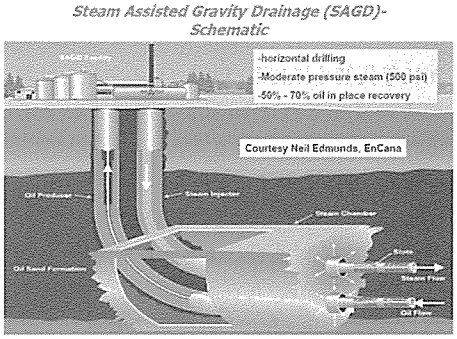
	API度	粘度(CP)	
重質油	10～20	300～10,000	
超重質油	＜10	＜10,000	オリオコタール
ビチューメン	＜10	＞10,000	カナダオイルサンド

10API度＝比重1.0

図8　重質油の資源量



▼生産量　【2005年実績】【2020年予測】
・合計　99万B/D　400万B/D
・露天掘り　55万B/D　227万B/D
・地下採取法　44万B/D　172万B/D
▼可採鉱量
・1740億バレル(2002年カナダ政府発表)



問題点と今後の課題
①マーケット確保
②労働力不足・資機材高騰
③天然ガス価格高騰
④パイプライン輸送能力不足
⑤環境問題(CO2排出, 水使用等)
⑥天然ガス不使用の技術開発

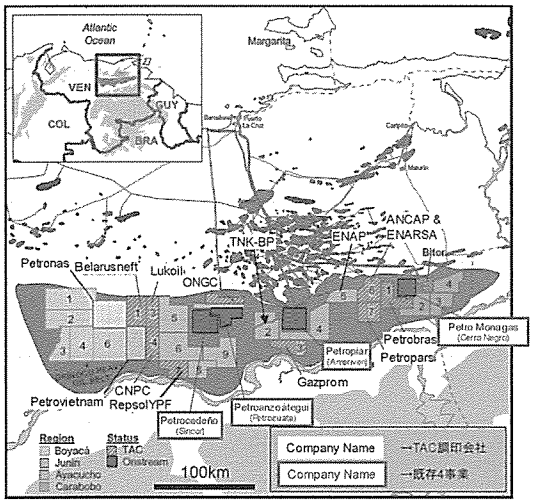
図9　オイルサンド（カナダ）開発概況

粘性がそれほど高くなく，いわゆるコールド・プロダクション（油層にスチームなどの熱源の注入が不要な方法）で生産可能なものが多く，開発が比較的容易である．ベネズエラ，コロンビア，ペルー，エクアドルなどに広く分布し，開発はまだ初期段階にあり，当社もこの地域に以前から注目して，参入機会を求めてきている．

(2) カナダ・オイルサンド

・図9にカナダでのオイルサンド開発状況を示す．最近の油価の高騰で開発が急速に進み2005年の約100万バレル/日から2020年には400万バレル/日に達すると予想されている．露天掘りにより大幅な増産が見込まれているが，一方で技術開発によりSAGD法なるスチーム攻法も有効であると確認され，地下採取での増産も期待されている．

・オイルサンドが商業的に開発可能となり，カナダの確認可採埋蔵量は49億バレルから約1800億バレルにと一挙に増加し，サウジアラビア（確認可採



既存4事業

プロジェクト	石油会社	開発開始	計画生産量(万B/D)	°API
Cerro Negro	EM, BP	1999	12	8.5
Ameriven	CP, Chevron	2001	20	8.7
Petrozuata	CP	1998	12	9.3
Sincor	Total, Statoil	2000	20	8.3

CP : ConocoPhillips

Heavy Oil Belt = 54,000 km2
原始鉱量 = 1.36 兆バレル
可採鉱量 = 2,720 億バレル (by PDVSA, 2002年11月)
原油比重 8 °API = 1.014
9 °API = 1.007
10 °API = 1.000

図10 オリノコ重質油ベルト 開発計画

埋蔵量は約2640億バレルで全世界の約 1/4) に次いで世界第 2 位となった.

・当社はアルバータ州の TOTAL 社のジョスリンプロジェクトに昨年参加（権益比率 10%）している. 同プロジェクトでは露天掘りによる大規模開発で2010年代初めに10万バレル/日の生産を計画, さらにその後23万バレル/日までの拡大を予定している.

(3) ベネズエラ・オリノコタール

・図10にオリナコ重質油の開発状況を示している. 同国の国営石油会社によると総資源量（原始鉱量）は 1.36 兆バレル, 可採埋蔵量はその 20% の2720億バレルとしている. これだけでサウジアラビアの埋蔵量を凌ぐ膨大なものとなっている.

・メジャー系の石油会社の主導で 4 つのプロジェクトが進んでいたが, チャベス大統領の国有化政策で先行き不透明な部分も出てきている. 同国の国営石油会社は図10に見られるように他の多くの国の国営石油会社などと対象地域を定めて共同開発の基本合意を取り決めている. 当社も参入機会を模索している.

7. CO_2-EOR と CCS（CO_2 地下貯留）の組み合わせ

(1) 回収率

・図11に原油回収率と油田の規模をプロットしたものを示しているが大きな油田では概ね 30～40% である. 在来型の原油の総可採埋蔵量を約 3 兆バレルとすると, 未回収で地下に残ってしまう原油は 5 兆バレル以上と見積もられる.

・仮りに回収率を倍近い 70% にまで上げることが出来ると EOR だけで更に約 3 兆バレルの可採埋蔵量が増加することになる. 技術者の多くはこれを夢物語とは考えていない. 図 7 の OECD/IEA2005 にある EOR で約3000億バレルは回収率を約 4% 上げるだけで達成可能となる.

(2) CO_2-EOR と CCS

・図12に CO_2-EOR の適用例を示す. 水攻法, あるいは自然の水押しの後で, 水の中に取り残された動かない油を（全体の約 50% 以上）, CO_2 を圧入してミシブルな状態にし油水間の界面張力をなくし, 動くようにさせ回収率を上げる方法で, 数多くの油田で適用されている. 国内の油田でも試験的に実施されたことがある.

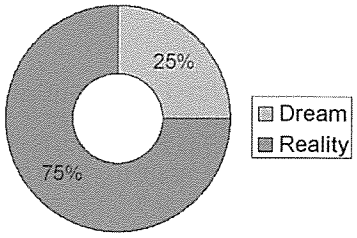
・図13に Weyburn プロジェクトを示す. 米国のノースダコタの石炭ガス化炉から排出された CO_2 をカナダのアルバータ州の Weyburn 油田までパイプライン（約 330 km）で輸送し, CO_2-EOR と CCS を一体的に実施している. 2005年までに既に 700 万トンの CO_2 を圧入し, 今後 100 万トン/年, 総量2600万トンが地下に貯蔵される予定である. またこれにより原油生産量は約18千バレル/日の増加を見込んでいる.

・国内でも当社の南長岡ガス田で生産中の天然ガスから分離された CO_2 を, 約 60 km 離れたやはり当社の南阿賀油田に輸送し, CO_2-EOR と CCS を一体で実施するスタディを開始した.

・洞爺湖サミットの合意により先進各国が CCS に真剣に取り組むようになれば, CO_2-EOR プロジェクトは CO_2 調達コストが下がってその経済性が大い

「70% - Possible or Not ? Do you believe ?」
SPE Forum (2007年9月)

- Is 70% oil recovery dream or reality ?
- 300油田について「油田サイズ vs. 油回収率」解析を行ったところ、最頻度帯は回収率30～40%
- 70%達成の実例
  - 北海の砂岩層
  - 連続性及び浸透率が良好
  - 残油飽和率が低い(Sor=10%)



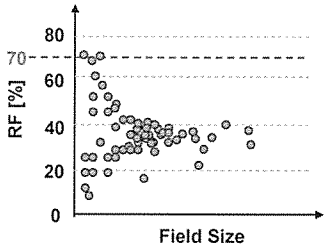
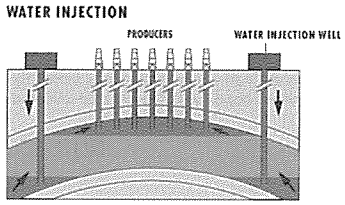


図11　IOR / EOR：原油回収率

- CO_2 を圧入
- 特定の圧力以上で CO_2 と油の混合物が一相状態(ミシブル)に。
- 油水間の界面張力がなくなり、残留した油を回収できる。



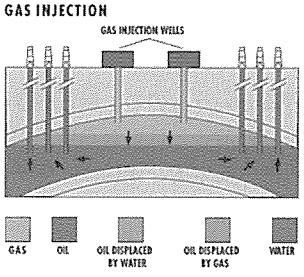


図12　CO_2 ミシブル増油法

に向上するので，数多くの新しいプロジェクトが生まれることが予想される．我々も国内でのスタディも活用し，積極的に機会をつくり出していきたい．

8. 結　　び

- 経済産業省は平成18年5月に「新・国家エネルギー戦略」を発表しているが，その中で2030年を目処に石油依存率を現行約50%を40%に下げるこ

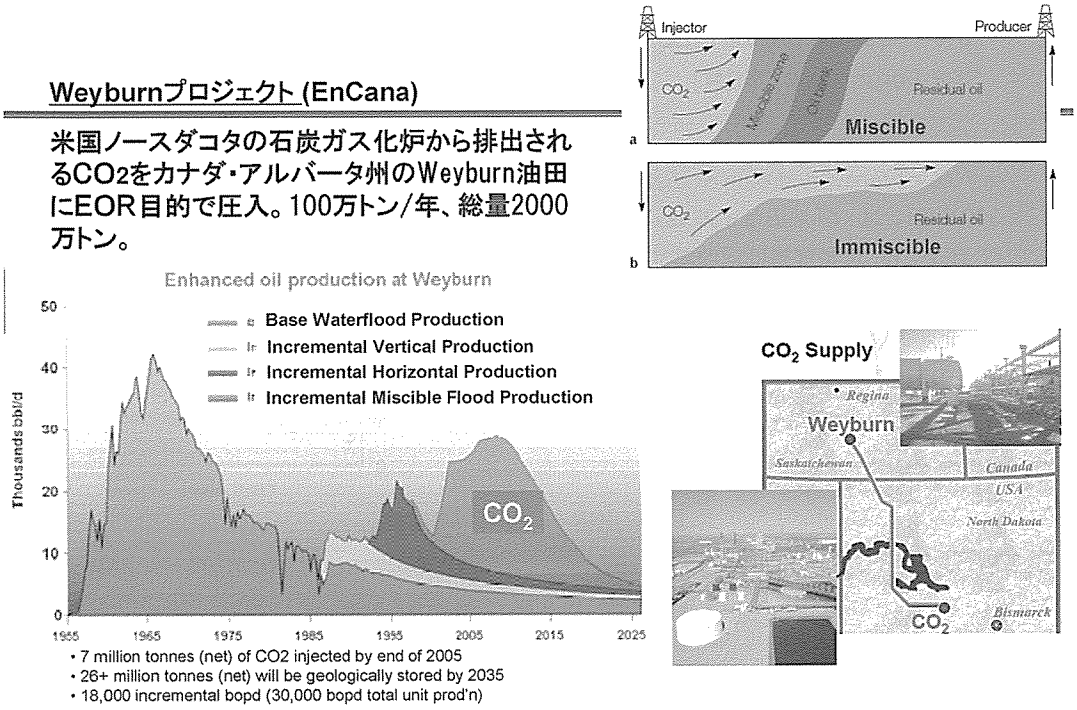


図13 CO_2地中貯留＋EOR事例

と，また石油の安定確保を図るため自主開発原油比率を現行約15%を40%に上げることを目標として定めている．

・石油依存率を下げるというものの，引き続き石油が基幹エネルギーであることは変わらず，国のインフラを支える石油の安定的な確保は，現下の石油を巡る世界情勢を考えると，以前にも増してその重要性が高まっていると考えられる．

・自主開発原油の目標40%は約160万バレル/日に相当するが，これは高い目標ではあるものの達成困難とは考えていない．統合新会社は2010年代後半に80～100万BOE/日の生産を目差すが，その半分程度が石油とすると，この目標の3割程度を占めることとなり，国家のエネルギー・セキュリティに少なからず貢献できることとなる．

大会記念講演

材料工学専攻の自己点検評価

粟　倉　泰　弘*

The Present State of Affairs in the Department of Material Science and Engineering

by Yasuhiro AWAKURA

1. はじめに

2002年に我が国の学校教育法が改正され，各教育研究機関は自己点検と評価が義務づけられることになった．すなわち，この法律には以下の文言が明記されている；「大学は，その教育研究水準の向上に資するため，当該大学の教育および研究，組織ならびに設備の状況について自ら点検および評価を行い，その結果を公表するものとする．さらに大学は，自己評価等に加え，当該大学の教育研究等の総合的な状況について，7年ごとに認証機関による認証評価を受けるものとする．この認証評価は，大学の求めにより大学評価基準に従って行うものとする」．ここで言う認証機関とは大学評価・学位授与機構のことであり，第一回目の認証評価は平成20年度に行われる．

一般には上記の7年の期間を中期目標期間と呼んでおり，期間のはじめに目標を提出し，最後に自己点検を行い評価を受ける．評価の結果は次期の目標に反映させる．この流れの一環として昨年（平成19年度），工学部では各学科，工学研究科では，各専攻あるいは専攻群が自己点検評価を行った．この報告文では材料工学専攻の自己点検評価の結果の内容をかいつまんで述べ，水曜会会員諸氏に教室の現状をお伝えしたいと思う．お断りしておきたいのは，自己点検の為の統計的データーは平成19年4月現在のものであることと，この原稿の執筆が平成20年8月現在であるため，文章と図表に若干の相違があると思われるが，ご容赦願いたい．

2. 材料工学専攻の沿革

図1に材料工学専攻の沿革を示した．明治31年に創設された採鉱冶金学科は，我が国の近代化と戦後の復興と発展のため基幹産業を支える人的資源の供給と研究業績で貢献してきた．この間，幾多の組織換えを経て，平成6年に冶金学科と金属加工学科の大部分は大学院工学研究科材料工学専攻に繰り込まれた．いわゆる大学院重点化に基づく改組である．すなわち教員は全て大学院専任になり，学部は兼担として教育の責任を負うことになった．このとき大学院エネルギー科学研究科が発足し，旧冶金学・金属加工学教室および旧資源工学教室の講座の一部がそちらへ移った．その後，工学研究科からは情報学研究科，地球環境学堂が分離し新しい研究科として発足している．従って，現在工学研究科所属の専攻の数は17である．時を同じくして工学部の改組も行なわれ，各学科は6つの大学科；地球工学科，建築学科，電気電子工学科，情報学科，工業化学科，物理工学科に統合された．この内，物理工学科は昔の冶金学科，金属加工学科，機械工学科，機械物理工学科，精密工学科，原子核工学科，航空工学科が統合したものである．

この改組以後，材料工学専攻は先進技術を支える材料，環境調和を重視した材料の開拓・開発をとおして我が国の産業界への貢献をめざしている．

この間，冶金・金属加工学教室と機械系教室の協力で発足した工学部所属のメゾ材料センターは，改組後工学研究科へ配置換えになり，発足後10年を経て，全学組織の国際融合・創造センターへ昇格した．しかし，平成19年度に旧メゾ材料センターに所属していた教員は工学研究科に復帰，平成20年4月1日より材料工学専攻へ配置換えになった．従って，現在の材料工学専攻は教授12名の組織である．

3. 材料工学専攻の教育研究の理念

専攻の使命は，地球の資源や物質を活用して，人間社

*京都大学大学院工学研究科　材料工学専攻

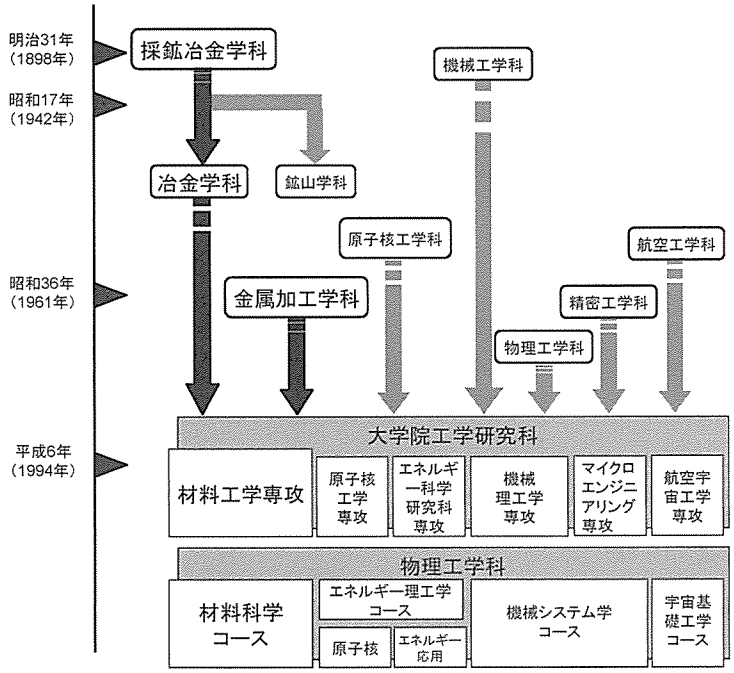


図1 材料工学専攻の沿革

会の発展に貢献することである．具体的には物質に関する自然科学の体系的知識をもとに，新しい材料の開発・設計・製造プロセスを研究・発展させるとともに，次世代の人材を育成することである．

そのためのアドミッション・ポリシーと教育方針は，充分な基礎学力を備え，幅広い視野と明確な目的意識を備えた学生を受入れること．さらに，ミクロからマクロな視点に立脚した，材料科学の体系的知識をもとに，新しい材料を開発する戦略的思考を持った高度専門技術者と先端的研究者の育成を目指している．基礎の重視である．

例をあげると，少人数教育として専門分野のゼミ・輪講形式の科目を開設している．問題の発見とその解決に不可欠な総合的思考能力の育成をめざして On the research training を行っている．さらに最近は材料関連の産業界からの講師による，材料工学スクールを開設し，学生の目的意識の向上と専門分野への関心を図っている．

4. 材料工学専攻の講座および研究分野

図2に平成19年度の専攻の講座と所属する研究分野を示した．各分野には基本的に教授，准教授，助教が各一名所属する．准教授および助教は平成19年4月1日からの正式名称で，それぞれ旧名称の助教授，助手がこれにあたる．英語名称もそれぞれ Associate professor および Assistant professor である．新しい組織は一講座一研究分野からなる専任講座と一講座三研究分野からなる基幹講座から構成されており．材料工学専攻には一専任講座と三基幹講座がある．

各講座・分野では研究室独自の運営方針で教育研究活動を行っているが，講座・分野をまたがった共同研究も活発に行われている．研究内容を学問分野と手法，対象材料，対象現象に分けてキーワードで示すと次の通りである．

(1) 学問分野および手法

統計力学，結晶学，材料電気化学，熱力学，X線分析化学，環境計測化学・物質情報工学，量子論，無機化学，有機化学，X線回折法，熱分析，分光分析法，電子状態計測，化学状態マイクロビーム・アナリシス，電子分光法，コンピュータ・シミュレーション，走査型プローブ顕微鏡，走査トンネル顕微鏡，ナノスケール電子顕微鏡法，放射光，中性子散乱，核磁気共鳴

(2) 対象材料

バルク材・薄膜，鉄基磁性薄膜，ナノ金属粒子，アモルファス金属，微粒子分散ガラス電極，鉛フリーはんだ合金，燃料電池用プロトン伝導型固体電解質，化合物半導体薄膜，環境微粒子，機能性セラミックス，エキゾチック化合物，金属間化合物群，結晶格子欠陥，超臨界流体，液体半導体，液体金属，軽量・高強度材料，鉄鋼材料，チタン合金，金属磁性体，鉄系形状記憶合金，超塑

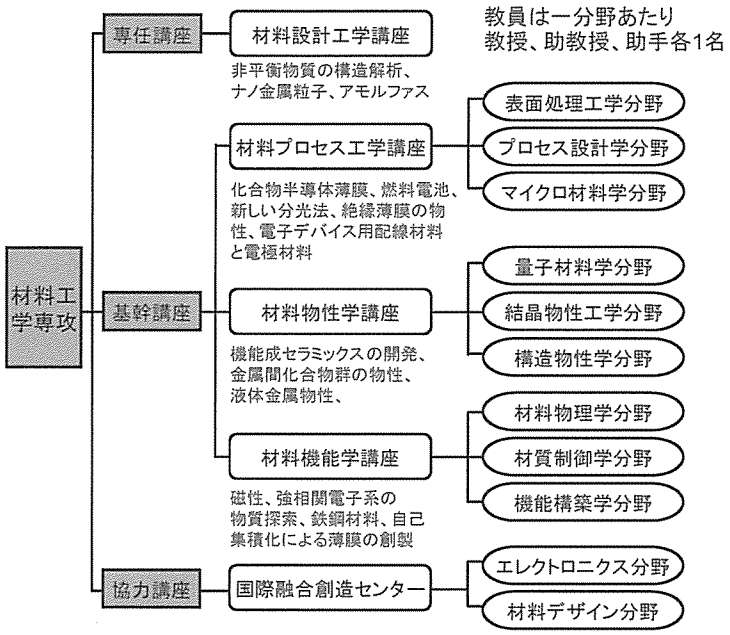


図2　材料工学専攻の講座と研究分野

性合金，先進複合材料，超電導多芯材料，半導体デバイス用配線材料，化合物半導体デバイス用電極材料，自然順応型イオン液体，原子・分子サイズの接点，非平衡多相材料，リチウム電池用材料，水素吸蔵材料，熱電材料，

(3) 対象現象

非平衡物質の構造，ガラス転移，結晶化，規則－不規則相転移，組織制御，磁気特性，溶液反応，材料表面の改質，超耐食性処理，金属リファイニングプロセス，エネルギー・環境問題，半導体デバイス技術，金属・半導体および絶縁体の薄膜，異種材料界面，量子材料設計法，格子欠陥と力学特性，結晶成長と物性，レーザー誘起半導体－金属転移，熱力学特性，磁性，量子現象，強相関電子系，磁性体のフラストレーション，微細組織制御，相変態，強加工，再結晶，自己集積化，接合界面，表面の機能化，分子操作，光化学プロセス，トンネル障壁，材料の複合化，メゾメカニクス，ナノ・メゾ事象，動的特性

5.　材料工学専攻の管理・運営

材料工学専攻における大学の教育・研究は専攻独自の方針のもとに准教授以上の全教員が参加する教室会議を最高議決機関として運営されている．教室会議を主催する専攻長は専任講座および基幹講座の専任教授から選ばれ，任期は1年である．教室会議は毎月1回開催され，専攻の重要事項である，学生の単位認定，研究室配属，論文博士の世話専攻の受け入れ，教員の外国出張，各種外部資金の受入れ，専攻予算・決算，人事関係等について報告および審議がなされている．特に，教員人事に関しては教授，准教授，および助教を含む選考分野決定のための発議委員会と，その後の選考委員会で公募を含むさまざまな方法で選考・慎重審議された内容が，さらに教室会議で報告・審議される．学生の進路・就職については専任教授から選ばれた就職担当教授が学生の指導にあたっている．専攻内には教務委員，広報委員，ネットワーク管理委員，環境・安全・衛生委員，図書委員などの専門の委員を設け専攻長と協力して分担業務を行っている．さらに，技術職員を中心とする材料工学教育研究支援室を設け，専攻の教育インフラの充実と合理的な研究技術を支援する体制を図っている．また，工学研究科や工学部物理工学科に，それぞれ代議員やコース長を初めとする各種委員も選出している．

6.　教員の構成

先にも述べたように材料工学専攻は専任講座である材料設計工学講座と基幹講座である材料プロセス工学講座，材料物性学講座および材料機能学講座からなる．さらに本学国際融合・創造センターに所属するエレクトロニクス分野と材料デザイン分野が学内協力分野として参画し，綿密な連携のもと専攻の教育研究を行っている．

(1) 講座・分野

大学院の教育上の組織としての材料工学専攻は図2に

示した講座と分野から成る．表1は各講座・分野の平成19年5月現在の担当教員を示したものである．材料工学専攻の専任講座，基幹講座および協力分野の教員数の合計は，平成19年5月現在で表2に示す通りである．その内，協力分野の教員数はカッコ内に示している．

(2) 教員のプロフィール

専攻在職教員（平成19年5月現在）の学位，卒業大学・修了大学院を表3と表4に示す．平成14年度～18年度の5年間に，教授5名，助教授2名の停年退職，助教授5名の他大学への教授としての異動があった．それに伴い，3名の教授の昇任・着任，8名の助教授の昇任・着任，12名の助手（助教）の採用があった．現在の教員の中で専攻出身者（京大工冶金・金属・材料）の教授・准教授・助教のほとんどは他大学，他研究機関での職務経験を有している．

現教員が着任以前において有した本学以外の職務経験の一覧を表5に示す．現教員の7割弱が国内外での職務経験を持っており，多方面からの人材が集結していることがわかる．

(3) 教員の採用

材料工学専攻での平成14年度～18年度の過去5年間の教員採用方法は表6に示すように主として公募である．教授人事に際しては本専攻専任の教授3名，准教授2名，助教2名からなる発議委員会が編成され，教授選考を行う専門分野を審議する．その結果は教室会議で承認され，引き続いて教授5名からなる選考委員会が編成される．准教授および助教人事に際しては，それぞれ教授3名，准教授2名および教授3名，准教授2名，助教2名からなる選考委員会が編成される．公募においては応募の中から慎重に書類選考をおこない，若干名の候補者にプレゼンテーションを含む面接を行う．このようなさまざまな方法で選考・慎重審議された選考結果は教室会議に答申され承認を受ける．その結果は専攻長会議あるいは工学研究科工学教授会に付議される．

7. 教育の成果

本専攻の学部における教育目的は講義，学生実験・演習を通して固体物理学，固体科学，量子力学，統計物理学，熱力学，物理化学，材料科学などの自然科学の基礎知識を体系的に修得させることであり．大学院における教育研究の目的は，体系的基礎知識をさらに発展させるとともに，On the research training を通して，材料の多様な性質と，その構造に依存した物性発現機構を解明するとともに，新しい材料の設計開発とその製造プロセ

表1 講座・分野・担当教員一覧（平成19年5月現在）

	講座	分野	教授	准教授	助教
専任	材料設計学	材料設計学	松原英一郎	市坪 哲	八木俊介
基幹	材料プロセス工学	表面処理工学	粟倉泰弘	宇田哲也	野瀬嘉太郎
		プロセス設計学	河合 潤		山本 孝
		マイクロ材料学		伊藤和博	着本 享
	材料物性学	量子材料学	田中 功	松永克志	大場史康
		結晶物性学	乾 晴行	田中克志 岸田恭輔	
		構造物性学	田村剛三郎		松田和博
	材料機能学	材料物理学	中村裕之		足立大樹 田畑吉計
		材質制御学			
		機能構築学	杉村博之	邑瀬邦明	一井 崇
協力	国際融合・創造センター	エレクトロニクス	酒井 明	黒川 修	
		材料デザイン	落合庄次郎	奥田浩司	

表2 専攻教員の定員および現員（単位：人，平成19年5月現在）

	現員（センター*）	定員（センター*）
教授	8 (2)	10 (2)
准教授	7 (2)	10 (2)
助教	9 (0)	12 (0)

* 国際融合創造センター

表3 現教員の博士学位（単位：人，カッコ内は国際融合・創造センター）

職階	京都大学		大阪大学		東京大学		東北大学		名古屋大学	
	工学	理学	工学	理学	工学	理学	工学	理学	工学	理学
教授	2 (1)	1	3		1	(1)				
准教授	4 (2)		2				1			
助教	7			1					1	

* 教授1名は米国ノースウェスタン大学 PhD

表4　現教員の卒業大学および終了大学院(単位：人，カッコ内は国際融合・創造センター)

職　階	卒業大学		修了大学院	
	京都大学	他大学	京都大学	他大学
教　授	5 (1)	東京大学 1 (1) 大阪大学 1 東京工業大学 1	5 (1)	東京大学 1 (1) 大阪大学 1 東京工業大学 1
准教授	5 (2)	大阪大学 2	5 (2)	大阪大学 2
助　教	6	北海道大学 1 名古屋大学 1 大阪大学 1	6	北海道大学 1 名古屋大学 1 大阪大学 1

表5　他大学，産業界での職務経験を持つ現教員数(平成19年4月現在)

職　階	教員数	内　容
教　授	7	東北大学、東京大学、大阪大学、広島大学、兵庫県立大学、名古屋大学、新日本製鐵、理化学研究所、ニコン、トロント大学、ノースウエスタン大学、ペンシルベニア大学
准教授	6	大阪大学、東北大学、カリホルニア工科大学、ペンシルベニア大学、東京大学、香川大学、(独) 物質・材料研究機構、イリノイ大学
助　教	4	東北大学、名古屋大学、NEC、東京大学、ケースウエスタンリザーブ大学、マックスプランク金属研究所、東京工業大学

表6　専攻の現教員の採用方法

職　階	教員数	公　募	公募以外の方法
教　授	8	8	1
准教授	7	7	なし
助　教	8	5	3

スを研究・発展させる人材を育成することである．この目的を達成するため，大学院生の受入れ方針は座学による知識の蓄積だけでなく，他者との交流による能力の自己開発の可能性を秘めた若い学生に門戸を開くことである．

物理工学科では1回生終了後，学生は学科の各コースに分属される．従って，材料工学専攻は物理工学科連絡会の合意によるカリキュラムに従い，物理工学科の材料科学コースの学生に対する学部教育を行っている．

新年度開始時期に材料科学コース2，3回生の学生に学部教育オリエンテーションを行い，カリキュラム体系の説明，卒業および特別研究着手のための必要条件を明示している．また，3回生の学生には学生実験に係わる安全上の諸注意を含むオリエンテーション，単位取得状況や学生生活一般に係わるグループ懇談会を行っている．4回生の学生には研究室紹介や研究室見学会を行い，学生の配属に関する情報提供を行った後，4回生の特別研究のための研究室配属を行っている．研究室配属後はほぼ日常的に教員による教育・生活上の指導を行っている．学部卒業後直ちに就職する学生は稀であるが，専攻の就職担当教教授による助言と就職先の斡旋が行われる．学年末の1月には学部4回生の特別研究の中間発表会を専攻で行い，教員から適切な激励と助言を与え，その完成への指導を行っている．

大学院教育研究については，新年度開始時期に修士課程1，2回生および博士後期課程1回生に対してカリキュラム構成の説明を含むオリエンテーション，特に修士2回生には就職および進学に係わるオリエンテーションを行っている．8月には大学院修士課程および博士後期課程への入学選抜を行っている．特に，修士課程の入学選抜試験の内容は専攻のウェブサイトに掲載するとともに，アグネ社発行の雑誌「金属」に学生の模範解答とともに公表している．大学院修士課程2回生には夏休み前に修士論文研究のポスター形式の中間発表会を課し，教授，准教授，助教からなる審査員による指導を行っている．2月には修士課程2回生の学位論文審査と公聴会を開催している．博士後期課程の学生に対しては適宜，学位論文の審査と公聴会を行っており，ほぼ3年間で博士(工学) の学位を取得している．

学問の高度化と多様化に対応するため，体系的なカリキュラムを編成するとともに，先端的な内容を含む講義だけでなく少人数教育を目指し専攻の各講座・専門分野で実施されるゼミ・輪講形式を取り入れた科目を実施している．研究指導においては特に問題の発見とその解決に不可欠な総合的思考能力を育成している．さらに，国内および国外の学会での発表を通して，ディスカッション能力やプレゼンテーション能力の涵養を図るとともに，企業などで活躍している社会人の実体験に基づく講義，すなわち関連材料産業界からの講師による材料工学スクールを有効に活用し，目的意識の涵養や専門分野への関心の動機づけを図っている．また，大学院学生には産業界の専門家を非常勤講師に招いた新素材特論をカリキュラムとして開設しているほか，国内外から世界トップレベルの講師を招いた特別講義を随時開講している．

このような自主性，実験実習を重視した教育研究活動の成果は学生の研究活動に現れて，学術誌への論文の発表，国内外の学会での発表が活発に行われている．

学生自身によってなされた研究活動の集計結果を示す．国内学会への発表件数を表7に，国際会議での発表件数を表8に示す．大学院学生の国内学会発表件数は平成14年度～18年度の5年間の総件数が461件，年平均92件とほぼ定常的であるが，収容学生数が修士課程および博士後期課程を合わせて約90名であることを考えると，年間一人1件程度の発表を行っている．一方，上記5年

表7 学生の国内学会発表件数

	平成14年度	平成15年度	平成16年度	平成17年度	平成18年度
発表件数	93	88	87	86	107

表8 学生の国際学会発表件数

	平成14年度	平成15年度	平成16年度	平成17年度	平成18年度
発表件数	21	25	36	36	57

間の大学院生の国際会議での発表総件数は178件，年平均36件であった．博士後期課程の在籍学生数が20名程度であることを考えると，博士の学生が年1回は国際会議で発表していることになる．特に，国際学会での発表件数が年々増加していることがわかる．これは21世紀COE活動によって学生の国際活動が向上したためと考えられる．

特に，平成15年度（2003年度）より平成18年度（2006年度）まで本専攻と韓国KAISTの材料工学系を中心として開催した統合材料シンポジウム（Joint Symposium on Materials Science and Engineering for 21st Century）は，双方の博士後期課程の大学院生が中心となって50名～70名規模の学生自身による，学生のための国際シンポジウムであり，学生の国際性を涵養するのに大きな役割を果たした．この学生シンポジウムは年々参加大学が増え，平成20年度は韓国のKAIST，GIST，POSTECH，台湾の国立清華大学，東北大学を含む6大学の参加学生数100名を若干越える規模に成長している．

大学院終了後の進路・就職について述べると，本専攻の学生は我が国の大学，国立研究所等の教育研究機関だけでなく材料に関する様々な会社，例えば鉄鋼，非鉄金属，重工業，自動車，電気，電力，精密機械等の分野で十分活躍している．本専攻修了者のうち，社会で研究・開発業務に携わっている割合は，40歳未満で62%，また全修了者の内23%が博士号取得者と，いずれも高い数字である．大学および公的研究機関の研究従事者の数の割合も全体の15%である．さらに，日本学術振興会の特別研究員（PD，DC，海外特別研究員）の人数も過去5年間で9名と高い採択率を誇っている．

過去30年間の本専攻修了者へのアンケート調査を平成13年（2001年）12月に行った結果，本専攻修了者は，他大学の同一分野の大学院修了者に比べて，基礎学力と論理構成力に優れており，特に研究部門に向いているとの自己分析を行っていることがわかった．また同時に行った就職先の会社の人事部長へのアンケート調査の結果も同様な傾向を示した．

8. 専攻の研究活動

本専攻は世界の材料科学分野においてこれまで指導的役割を担ってきた．ISI社の平成6年（1994年）の調査において，Material Science and Metallurgy部門の本専攻から出版された論文数はわが国第1位，世界で5位にランクされた．また，同社のデータベースWeb of Scienceをもとに調査した結果，本専攻は平成8年（1996年）～平成13年（2001年）の6年間に合計500報の原著論文を出版している．同じデータベースによる最近の過去5年間である平成14年（2002年）～平成18年（2006年）の原著論文合計は643報に増加しており，なお高い水準を保っている．

平成14年度に開始された我が国の，いわゆる21世紀COEに選ばれ，プログラム名称「学域統合による新材料科学の研究教育拠点」の下に，工学研究科の物質エネルギー化学専攻，材料化学専攻，高分子化学専攻とともに平成18年度まで活動を行った．さらに，平成19年度に開始されたグローバルCOEにも選ばれ，本専攻はプログラム名「物質科学の新基盤構築と次世代教育国際拠点」（略称:統合物質科学）の下に，工学研究科の化学系6専攻；材料化学専攻，物質エネルギー化学専攻，分子工学専攻，高分子化学専攻，合成・生物化学専攻，化学工学専攻，理学研究科1専攻；化学専攻および化学研究所とともに活動中である．

図3に国内および海外の学術専門誌（ピアレビュー付き）に掲載された年度毎の原著論文総数を示す．過去5年間の論文総数は，年平均100件以上の水準を保っている．参考のため平成13年以前の論文数の推移も合わせ示した．材料工学専攻は，工学研究科の旧冶金学専攻と旧金属加工学専攻を母体として平成6年度（1994年度）の大学院重点化に伴う改組により新たに設立された．改組以前は，我が国の基幹産業である鉄鋼業に代表される素材製造とその機能発現を目的とする加工を強く意識した教育・研究体制をとっていた．しかし，改組時点で産業構造の変革と社会のニーズに対応した柔軟な構造改革を行い，教育・研究の対象を半導体，セラミックス，金属間化合物などさまざまな分野に広げた．同時に教員人事にあたっては本専攻修了者以外に広く人材を求めた．その結果，教室外卒業の教員の割合は平均40%を超えている．また，改組に伴い教員数は減少したにもかかわら

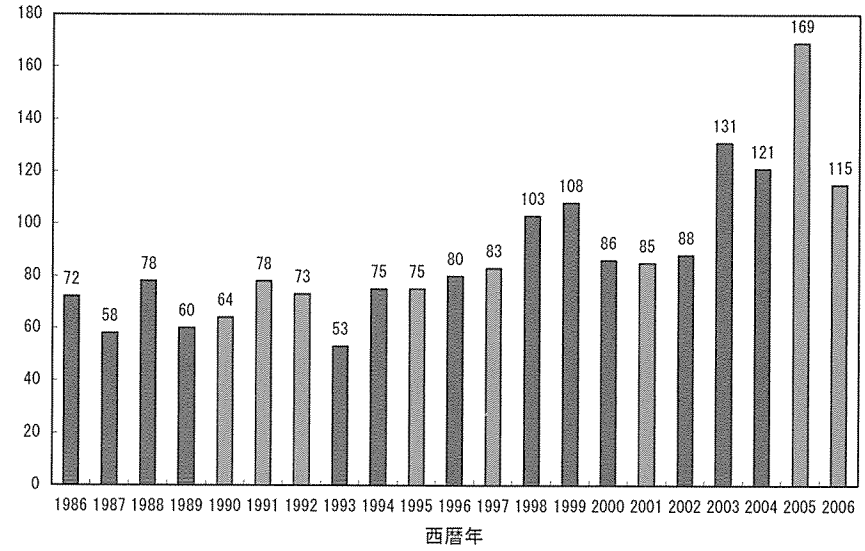


図3　原著論文総数の年度別推移

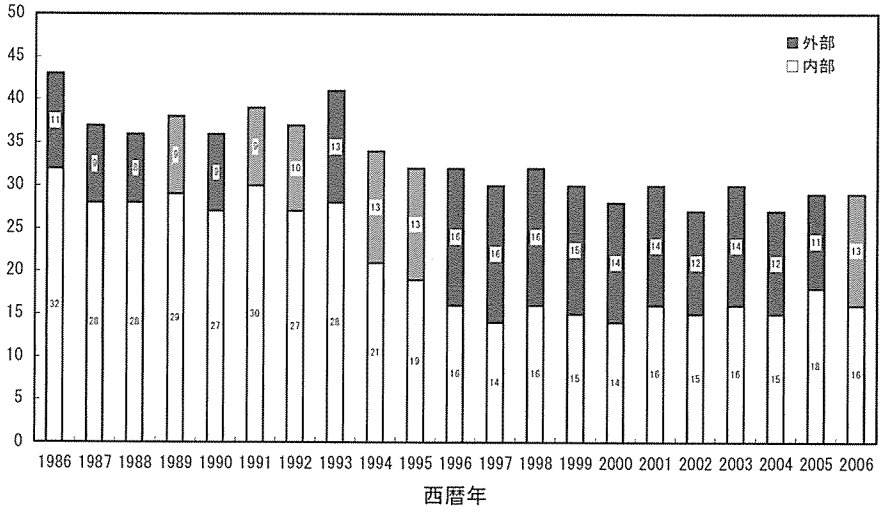


図4　教員総数の年度別推

ず，論文数は年々増加の傾向にあり，それぞれ新しい分野でリーダーシップを発揮している．図4には教員総数の推移を出身内外別で示した．

9．専攻の教育・研究環境

工学研究科物理系校舎および工学部総合校舎の講義室，演習室および学生実験室，物理系図書室等の設備を使用して教育研究活動を行っている．運営交付金は年々減少しているが，平成14年度～18年度の5年間の本専攻の競争的外部資金であるCOE，科学研究費補助金，共同研究費，受託研究費，奨学寄付金の総額は9億8652万円である．科学研究費補助金，受託研究，共同研究，奨学寄付金等の外部資金の獲得に努力し学生の教育研究のための予算は一定額確保している．さらに，現在，当専攻では快適なネットワーク環境が受容可能な負担内で提供されており，電子メールやウェブ等のインターネットと専攻内に限った情報共有に利用されるイントラネットの両面において多岐にわたって利用されており，教育研究に欠かせない手段となっている．

現在，材料工学専攻には7名の技術職員が所属しており，研究および学生実験などの教育の支援を行っている．専攻に教育研究支援室を設け，委員長（教授），副委員長（准教授），技術専門職員からなる教育研究支援委員会で専攻全体の実験装置の共同利用のための情報提供

や，専攻の環境・安全・衛生に関する視察活動を実施している．毎月2研究分野を視察し，環境・安全・衛生に関する点検と注意の喚起を行い，その結果は教室会議に報告される．

10. 専攻の予算

常勤の教職員の人件費を除いた，研究費に相当する専攻の予算全体の年度別推移について，過去5年間の状況を表9に示す．予算総額はほぼ一定の水準を保ちつつ，増加傾向にある．

次に年度別予算の内訳を校費（文部科学省からの運営交付金）と科学研究費補助金等の外部獲得資金に分けて，それぞれ表10および表11に示す．校費は年々減少傾向にあるが，競争的資金は逆に年々増加傾向にある．その結果，学生の学会本部あるいは支部主催の研究会への出席や教育研究成果の学会発表に対する支援は十分である．材料工学専攻の科学研究費補助金の内訳および採択件数を年度別に表12に示す．科学研究費補助金の獲得額は年々増加の傾向にある．

11. 国際貢献と社会貢献

材料工学専攻への外国人の訪問，外国人訪問者による

表9 過去5年間の予算総額の推移

年度	平成14年度 (千円)	平成15年度 (千円)	平成16年度 (千円)	平成17年度 (千円)	平成18年度 (千円)
予算総額	236,130	228,008	245,529	262,426	307,708

表10 過去5年間の公費の推移

年度	平成14年度 (千円)	平成15年度 (千円)	平成16年度 (千円)	平成17年度 (千円)	平成18年度 (千円)
校費	71,559	62,672	60,813	52,593	45,643

表11 過去5年間の競争的資金の推移

	平成13年度		平成14年度		平成15年度		平成16年度		平成17年度	
項目	件数	金額 (千円)	件数	金額 (千円)	件数	金額 (千円)	件数	金額 (千円)	件数	金額 (千円)
COE	1	25,000	1	22,250	1	21,750	1	20,000	1	18,427
科学研究費補助金	9	95,800	14	108,942	8	89,000	15	96,600	13	136,270
受託研究	4	6,660	4	5,984	4	16,922	6	29,728	9	74,068
共同研究	4	5,940	3	7,460	8	34,862	6	29,325	4	10,350
奨学寄附金	33	31,171	27	20,700	26	22,185	48	34,180	27	22,950
合計		164,571		165,336		184,719		209,833		262,065

表12 過去5年間の科学研究費補助金の内訳および採択件数

	平成14年度		平成15年度		平成16年度		平成17年度		平成18年度	
項目	件数	金額 (千円)	件数	金額 (千円)	件数	金額 (千円)	件数	金額 (千円)	件数	金額 (千円)
特定領域	0	0	0	0	1	5,800	1	7,100	2	9,370
基盤 A	1	24,900	1	32,200	1	28,200	1	37,400	2	77,000
基盤 B	4	58,800	2	28,500	3	45,700	1	15,700	2	29,300
基盤 C	0	0	0	0	0	0	3	10,700	0	0
萌芽	3	7,100	1	3,100	1	3,700	2	6,700	1	3,500
若手	1	3,000	5	34,842	1	3,700	4	13,500	4	12,900
特別研究員奨励費	1	2,000	5	10,300	1	1,900	3	5,500	2	4,300
合計		139,571		143,086		162,969		189,833		243,638

特別講演会が常時開催されている．国内外で開催される国際会議への教員の参加は盛んであり，国際会議の組織委員長，実行委員長を務める教員も数多く，国際交流は盛んである．特に過去5年間博士後期課程の学生を中心に，韓国理工系大学の博士課程の学生との，学生自身による企画・実行の下に開催した国際シンポジウムは両国の若い世代の国際交流と学生の意欲向上に大きな貢献をした．

専攻は我が国の材料分野を支える研究者および高等技術者を輩出してきたことは言うまでもない．それに加え，市民講座，公開講座，オープンキャンパス，出前講義，高校生や小学生の専攻訪問を通して社会貢献している．また，中小企業を中心とする地場産業推進にたいしても貢献している．さらに，専攻の教員は金属学会，鉄鋼協会，資源・素材学会，軽金属学会，表面技術協会，応用物理学会等の国内学会の会長，副会長，理事，評議員並びにこれら学協会の関西支部の支部長，副支部長，理事，評議員を歴任しこの面での社会貢献も顕著である．

12. 専攻の課題と中期・長期計画

材料工学専攻は歴史的な流れから理解できるように，かつては我が国の近代化のための，また戦後においては我が国の復興と発展のための基幹産業を支える人的資源の供給および研究業績で貢献してきた．近年においては先進技術を支える材料および環境調和を重要視した材料の開拓・開発をめざし，講座および研究分野の転身を図るとともに他学部・他大学との人事交流を行い専攻の組織・運営の改善に着手してきた．その結果，研究機関および研究者養成機関としての役割も果たしてきたが，幾つかの解決すべき課題もある．

(1) 材料工学専攻の課題

研究面では研究テーマの選定や研究の推進にあたって，社会のニーズに応えるような戦略性や社会性の観点がいまだ十分とは言えない現状である．すなわち，定期的な内部評価および外部評価，世界のトップレベルの大学との共同研究，あるいは学会，シンポジウムの企画・開催等について考慮すべきであろう．

一方，教育面においては，学部学生の勉学への動機付けに課題がある．物理工学科材料科学コースの学生は充分な素質を持っているが，それを引き出して自学自習を開始させる為には，学生の将来の展望へと目を開かせる工夫が重要である．工場見学・工場実習等が無くなった現状では，学生が自分の居場所を確認できなくなっている現状を認識すべきであろう．一方，大学院においては本専攻の博士後期課程への進学者数が定員を充足していない現状がある．その第一の要因は，修士課程修了者が社会から高く評価され，求人ニーズが高かったことが挙げられる．しかし，過去5年間にわたって専攻として博士後期課程への進学者を増やすための努力を行い，その成果は徐々に現れつつある．5年前に行った本専攻修了者および会社の人事担当者へのアンケートの結果，本専攻修了者は研究者として高い潜在能力を持っているものの，コミュニケーションやプレゼンテーション能力については，他と比較して特に優れているわけではないことが指摘された．現時点でもこの点が完全に克服されたわけではない．わが国の産業振興に先導的な役割をもつ先進的研究者の養成のためには，今後これらの点を配慮した教育プログラムを構築すべきであろう．

(2) 材料工学専攻の中期ならびに長期計画

材料工学専攻は，旧金属系2専攻を母体として平成6年度（1994年度）の大学院重点化に伴う改組により新たに設立された．改組以前は，わが国の基幹産業である鉄鋼業に代表される素材製造とその機能発現を目的とする加工を強く意識した教育・研究体制を取っていた．しかし改組時点で産業構造の変革と社会のニーズに対応した柔軟な構造改革を行い，教育・研究の対象を半導体，セラミックス，金属間化合物など様々な分野に拡げた．同時に教員人事にあたっては本専攻修了者以外に広く人材を求めた．その結果，改組にともない教員数の減少にもかかわらず，その後出版原著論文数は年々増加の傾向にあり，それぞれ新しい分野でリーダーシップを発揮している．

しかし，本専攻はこの現状に満足することなく，わが国の科学技術重点施策を考慮に入れて，さらなる改革を目指している．目指す方向を示すキーワードは以下の3つである：

- 従来の材料機能のバリアを超越し，わが国のエネルギー問題と国民生活の安全を支えるスーパーマテリアル，
- 地球環境に配慮したエコプロセスによるエコマテリアルの創製・開発
- ライフサイエンス，情報科学技術をハード面で支えるナノスケールマテリアルサイエンスの構築．

これらの課題を達成するための先導的研究者を養成すると同時に，戦略的な研究拠点を形成する核となることが，本専攻の使命と認識できる．

中期的には，上に述べた本専攻の課題を達成するための現在の努力を持続する予定である．長期的には，本専攻の内部評価だけでなく積極的な外部評価の導入，国の内外の研究者との共同研究，学会・シンポジウムの企画・開催を図りたい．一方，人事面において現在一部導入している教員公募を全面的に取り入れ他大学・産業界との人事交流をさらに徹底するとともに，戦略的研究をになう教員への任期制の導入，若手教員すなわち助教層

の研究面における自立を促すとともに，専攻の自己点検・評価の定常化，大講座制における准教授の独立を含む新しいシステムの導入を目指したい．

学部教育においては，既存の産業分野の基礎となる科目を習得させるとともに，先進技術を支え，また環境調和を重視した材料の開発研究に必要な科目の配置をめざしたカリキュラムの改善を行う．

一方，大学院教育では先端材料に関する専門教育と他大学・産業界の講師によるセミナーの充実を行うとともに，高い潜在能力を有する修士課程の学生の多くを博士後期課程へ進学するよう指導するとともに，主体的に研究を行うポスドクの人数を格段に増大させることが肝要である．設備面においては，より局所的な材料の分析・評価の可能な設備の配置，専攻内の教員・学生間のコンピューターによる情報・共有システムの構築をめざしたい．

さらに材料科学分野全体を展望したときに，本専攻単独では十分な教育・研究体制を発揮できていない分野の存在が認識できる．すなわち，材料化学分野，高分子分野および電子物性分野である．幸い，本研究科にはこれらの諸分野に対して高度な教育・研究を行っている専攻があり，21世紀に向かって持続的に社会への貢献を継続するためには，これらの諸専攻との有機的な連携が不可欠である．平成14年度（2002年）度秋に採択された21世紀 COE プログラム「学域統合による新しい材料科学研究・教育拠点形成」において材料工学専攻は，5年間，工学研究科の物質エネルギー科学専攻，材料化学専攻および高分子化学専攻と連携を実現させ，特に大学院修士課程と博士後期課程の学生の教育・研究面で一定の成果を挙げた．平成18年からはグロバル COE に参加し，教職員・学生一丸となり更なる発展を目指している．

談　話　室

蕃藷考

熱　田　　善　男*

The Bansho Kou : The Notes On the Sweet Potato

by Yoshio ATSUTA

孫たちが，八千代市から，引っ越して幕張へ移ったのは，H14年だった．

それまでは，私が住む八千代市の，京成の大和田駅前のマンションだった．だから，これこそスープの冷えない距離だったのですが，幕張となると近いとは言え，車30分の距離にありました．

そして，幕張小の春の運動会がおこなわれました．幕張小は，京成幕張駅の少し北，線路に沿ってありました．

運動会の昼の休憩時間に，気分を変えるために外へ出ました．ちょっと歩いただけで，京成幕張駅へ出ました．JR幕張駅にくらべて，ほんとうに小さい駅ですね．駅前と云っても路地のような狭い道で，お店が2～3軒あるだけです．その狭い道の角に写真屋さんがある．そのもう一方は道路工事中です．工事中の道路に沿って写真屋の隣の小スペースの，その奥に「昆陽先生甘藷試作地」という記念碑があったのです．扉が閉まっているので中へは入れなかったが，扉のわきに説明文があったので，幕張と薩摩芋が，たいへん深い関係にあるということがわかったのです．

説明文には，およそ次のようなことが書いてあった．「昆陽先生は，享保の大飢饉の翌年，江戸小石川の薬草園で甘藷を栽培し，その収穫の一部を幕張で栽培して多くの甘藷を得て，それをもとに甘藷が千葉一円にに普及しました．そのおかげで，この地では天明・天保の飢饉も甘藷でしのぎました．そこで，弘化三年には昆陽先生の徳をしのんで神社をたて，大正八年には有志が試作地に顕彰碑を立てました」

昆陽とは青木昆陽のこと．薩摩芋の普及に功績のあった人です．

高校生のころ本で読んだか社会科で習ったか，名前だけは知っていました．そこで，あわてて，調べました．インターネットでも，それから地元の花見川区役所へも適当な資料がないか聞きに行きました．

青木昆陽は江戸時代中期に活躍しました．江戸日本橋の魚問屋の息子でしたが，学問が好きで，京都で儒学を伊藤東涯に学びました．江戸へ帰ってからも貧乏にも耐えて，わき目もふらず，勉強をしていました．親孝行で礼儀正しく，近所の人々の評判がたいへんよく，南町奉行の大岡越前守の耳に入ったのです．越前守は，この男は使えるのではないかと呼び出します．そして「何か世の中の役に立つ事を提案せよ」と言います．

昆陽は，それまでの勉強をもとに更に書物を調べて，「蕃藷考」をまとめて提案しました．蕃藷とは外国産の藷の意味で，サツマイモの栽培方法についてもくわしく解説したのでした．当時，干ばつやイナゴの被害が原因で飢饉がよく起こりました．飢饉にはお米が採れないので餓死者がでて大変だったので，干ばつやイナゴの被害に強く，荒地でも，やせ地でも，栽培できるサツマイモを植えて餓死者がでないようにしなければならないと，この提案で訴えたのでした．これを読んだ越前守は，大切な提案だと，将軍に報告しました．

その時の将軍は，徳川吉宗，TVでおなじみの暴れん坊将軍で，決断のはやい方でした．吉宗はすぐに昆陽を幕臣にとりたてます．その直後，1732年に，江戸の三大飢饉の一つ，享保の大飢饉が起こり，餓死者1万2千人という大きな被害を出しました．この大飢饉の後，幕府は青木昆陽にサツマイモの栽培を進めさせようとする．

*村上研OB，元・文京学院大

しかし，当時の有名な学者である新井白石を中心に「サツマイモには毒がある」と反対し幕府内に激しい論争が巻き起こる．しかし吉宗の決断でサツマイモ試作のプロジェクトが始まる．その試作地の一つに幕張があったのです．幕張は海岸に近く砂地なのでやせた土地の代表として選ばれたのです．ほかに，小石川の養生所に隣接した薬草園の中，それと九十九里でした．

大飢饉から3年後の11月，昆陽は試行錯誤の末，サツマイモ栽培に成功しましたが，とくに幕張は成績がよかったのでした．

その試作地が京成線幕張駅前なのである．

これを機にサツマイモは全国に広がり，人々を飢えから救う役割を果したのでした．

「サツマイモ」とは，漢字では「薩摩芋」と書きます．鹿児島県のことを昔は薩摩の国と言いました．「サツマイモ」という名前は，薩摩の国から日本全国に広まったことを表しています．では，薩摩の国では何と呼ぶかといえば，「リュウキュウイモ」で，琉球とは，沖縄の昔の呼び名で，琉球から薩摩へ伝わったからです．

沖縄では「カライモ」と呼びます．唐とは中国にあった国家名で，ここでは中国から伝わったということです．中国では甘藷といい，英語ではスイートポテトといいます．原産地はアメリカ大陸のメキシコ高原で，ここからアメリカ大陸に広がっていました．コロンブスがアメリカ大陸を発見して，ヨーロッパに持ちかえったものではタバコが有名ですが，スイートポテトもその一つです．

1500年ころです．これが世界各国を経て伝わってきたのです．

日本では，薩摩の国に最初に伝わったのは1600年ごろといわれていますが，薩摩の国では持ち出し禁止にしたので，なかなか本土へは伝わりませんでした．

それでも，何人かの人が，サツマイモに目をつけて，薩摩の国から持ち出しをトライしました．種芋を木仏の体内を削って，その中に隠して持ち出したとか，いろいろエピソードが残っています．

サツマイモを本土に持ち出して，飢えから人々を救った人は，「甘藷翁」とか「いも代官」とか呼ばれて，今でも功績をたたえて各地に名前が残っています．

例えば，井戸平左衛門，1671年江戸に生まれました．60歳になった1731年，石見国の代官に任命されました．平左衛門は1732年，旅の僧侶から「薩摩ではサツマイモをつくり，飢饉に備えているので，餓死者もない」と聞き，幕府の許可を得て，種いも取り寄せ，近隣の百姓たちに分け与え栽培させました．しかし，栽培法をよく知らないので，種芋をほとんどくさらせてしまい，失敗におわりました．そんなとき，享保の大飢饉が起こり，石見地方でも多くの餓死者がでました．見かねて年貢米の蔵を開いて農民に与え，新たに年貢米の徴収を差し止めて，農民の救済をしました．幕府は代官職を解き謹慎を命じましたが彼は自害しました．

しかし，彼が導入した甘藷は松浦屋与兵衛という農民の努力によって栽培に成功し，それが石見を中心に近隣の村々へ広がっていきました．後に，人々は平左衛門を追慕して，中国地方一帯に供養碑や顕彰碑がたち，その数は数百にもなったといいます．

対馬の陶山純翁もそのような一人でした．経験豊かな農民の原田三郎右衛門と組になり薩摩の国から，甘藷を求めて，普及に努めました．山城の国の島利兵衛も，同じでした．硫黄島に島流しになったのですが，島で甘藷を知り，栽培法を身につけ，1716年罪が許されて帰るとき，ひそかに甘藷を持ちだします．持ちだした甘藷の栽培に成功し，それが広まっていきました．1713年の下見吉十郎，瀬戸内大三島の人．

もっと古いところでは，1615年の鼎山和尚，和歌山の人．1692年の江島為信，愛媛の人．

なども，文献に載っています．

こんなことで青木昆陽のころは，サツマイモは，本土にもかなり伝わっていましたが，あまり，いきわたってはいませんでした．

昆陽は，日本国を飢饉から救うために，一生懸命に全国に広めたので，「芋神さま」として敬われるようになりました．

幕張での成功がきっかけで，千葉では，幕張を中心に薩摩芋の栽培が大いに行われました．そして薩摩芋を原料にして，いも飴やでんぷんの生産も盛んだったと記録に残っている．

サツマイモは，いまでは主食ではなく嗜好品になっていますが，昔は飢饉のときの非常食で大切な主食でした．

次頁表は，平成13年全国の薩摩芋の生産高です．

このように，千葉県は第3位です．そして，この上位3つの県で全体の約80%を生産しているのです．

余談ですが，幕張小の校章はサツマイモの葉っぱです

鹿児島県	392,500 トン	36.9%
茨城県	191,500 トン	18.0%
千葉県	142,200 トン	13.4%
宮崎県	57,500 トン	5.4%
熊本県	33,900 トン	3.2%
徳島県	29,700 トン	2.8%
静岡県	25,200 トン	2.4%
長崎県	16,500 トン	1.6%
愛知県	13,700 トン	1.3%
愛媛県	11,000 トン	1.0%
その他計	149,300 トン	14.0%
全国合計	1,063,000 トン	100.0%

が，芋代官で有名な青木昆陽に因んでいるのでした．聞くところによると，幕張中もそうだといいます．イモ小，イモ中ですね．

ちょつと芋には無関係ですが，この場をかりて孫自慢をさせてください．

その年も，イモ小の運動会がありました．H15年です．運動神経が鈍くて足がのろかったので，自分の運動会，運動会というと，よい印象は記憶にありません．娘2人に恵まれましたが，運動会では活躍しなかったので，嬉しいことはなかったのです．

それが，孫3人，全員リレー選手に選ばれて，上は5年，中は3年，それに下は1年，3人揃ってです．上は前傾姿勢で全力疾走，中はピッチ走法で，新米の1年生は背も低くまだ幼く選手に選ばれたと聞いても信じられなかったのですが，きれいなフォームの見事な走りを見せてくれました．周りからは3人とも選手だってと，羨ましがられ，鼻高々でした．70歳になってはじめて本当にうれしい運動会でした．

その年の夏でした．私がやっている実力算数教室（算数に特化した学習塾）では前からお芋ほりをしようとちかば（近場）を探していたのですが，見つかりませんでした．ここは千葉ですから遠くまでいけば観光農園でお芋ほりをさせてくれるところもありますが，ちかば（近場）には，なかなか情報もなく，アキラメかけていたのです．

そんな時，家内が「幕張本郷の駅の近くに電車から見えた」と，言いだしたので，車で駅の周りをグルグル回り，やっと畑をみつけたのですが，あまりにも広く，お芋畑がどこかわからずに，途方に暮れかかったのですが，遠くで農作業をしている方が一人見えたのでそこまで行きました．そこで，そこまで行って，その方に，家内が「お芋ほりをさせていただけるところを，探しているのですが，……」と聞いてくれ，その方も親切に教えてくださいました．多分のついた，あまり正確な情報ではなかったのですが，その情報を頼りに，あちこちたずねて，やっとお畑をやっておられる方のお宅へいきつきました．この農家は，知り合いにだけ，お芋畑を開放しておられて，別に看板もなく，チラシも配らず良心的で，1人分5株，350円，本当に安くしていただきました．

次の年も，そこで，やらせてもらいました．全部で，48人分のお芋を準備してもらっていたので，同伴のお母さんやお父さん，それに小さい弟や妹も，全部いれると70人ぐらい集まりました．集合場所のところは，路が狭くて70人にもなると，満員電車とまではいかないが相当な混雑でしたね．

そこから歩いて10分ぐらい，すぐ到着して，さっそくお芋ほりをはじめました．「大きいぞ」「すごいスゴイ」と，みな歓声をあげながら，楽しいタノシイお芋ほりでした．ほり終わったあと，大物賞の審査．自分のほったお芋のなかで1番大きいのを持てきてもらい，重さを計りました．ワイワイと，楽しいタノシイ，騒動でした．

この芋ほり，その次の年も，やりました．でも，本当は年中行事にはなりませんでした．3年やってうち切りでした．残念なのですが，参加者が年々すくなくなり，結局やめました．

芋ほりで体験したのは，幕張は土質が砂地でしたね．そして，農家の小父さんにきくと，夏どんなに暑くても，水はやらなくていいと，いうことでした．地下水位が高くて水なしでも芋の栽培に適しているのですね．

さて試作地に接して，昆陽神社があるはずのでしたが，そこは道路計画地になっていました．資料によると，昔は，「昆陽先生甘薯試作地」は，たぶん今よりは広くて，昆陽神社に接してあったはずですが，その肝心の昆陽神社がみつかりません．いろいろ，探してみると，昆陽神社のご神体は，近くの神社に預けてあるようでした．

H16年の7月には，長い間，懸案だった道路も完成して，地下道ができました．そして，地下道の上に工事が始まり，昆陽神社も完成して，どこかへ預けられていた，ご神体も請け出して，お祀りしましたようでした．月に1回の骨董市も，第3日曜日におこなって，もとの姿を取り戻したようですね．

千葉とは別に，関東で有名な，川越のサツマイモ，九

里よりうまい十三里．ここは，どうして，いもで成功したのですか．

いまの所沢市に，吉田家という庄屋がありました．ここは，新開地で赤土でしかも地下水位が低く，干ばつには特別によわいから，何とかしたい，と思っていた．そんなとき，千葉の成功の話が耳にはいった．砂地でもできる．それなら赤土でもいいのではないだろうか．息子を千葉へやった．息子は父の意向を受けて行った．千葉で，芋作りと芋の貯蔵法を一生懸命学んできた．そして，親子で工夫に工夫を重ねて，試行錯誤して，ようやく栽培に成功したのだった．

芋の加工については所沢から，川越に移り力を発揮しました．川越は小江戸といわれた所，さすが，つぎつぎと，客に合わせた新製品を作り上げ，いつの間にか，川越の芋製品の名をあげてきました．

いまでは，川越が芋製品で名をあげて１人勝ちのようですが，千葉はでんぷんやいも飴では，やはり伝統ですか，大いにやっています．

ご意見やご感想があれば，うれしいです．
よろしくお願いします．

熱田善男／〒262-0001・千葉市花見川区横戸町1-71
メール：y.atsuta@water.ocn.ne.jp
電　話：047-411-9594

談　話　室

モノづくりと人づくり

杉村　健太郎*

Product Development is as same as "People" Development

by Kentaro SUGIMURA

H12年に会社人間からいきなり，秋田職能短大の電子技術科で教育に携わることになった．どのように教育するのか戸惑いがあったが，校長先生や電子技術科の先生の適切なアドバイスをいただいたことでなんとか授業ができた．いまでも感謝と満足感で一杯だ．

若い学生達と勉強したりスキーを教えたりして過ごした3年6ヶ月は本当に楽しかった．一時ではあったが心身ともに充実した期間を過ごさせてもらえた．

学生達に電気数学，電磁気学等を教えるかたわら社会人に安全工学，パソコン3級資格取得教育等も担当させていただいた．

校長先生や他の先生方との話し合いのなかで，この大学の基本理念は「もの作り」ではないかといつも感じていた．

知識をたくさん持つことから，よい「知恵」が生まれる

そのため，学生達には理論を極めることを教えるよりも実践を重視することに腐心した．社会に出てからどのように社会人として成長するかと言う「考え方」を教えることに重点をおいた．

学生達には，社会にでたら「知識」を求められるのではなく，「知恵」を出すことを求められる，と説いた．では「知恵」をどうやって生み出すのか．簡単にはでてこないもの．たくさんの「知識」とそれらを適切にくみあわせることで「知恵」がでてくる．授業では，「知識」を身につけさせるよう色々な工夫を凝らした．高邁な電気理論を身につけるよりも，「知恵」を出せる良いリーダーになるよう仕向けた．社会では未経験の物事に対しても，判断力や決断力を問われる．この力はたくさんの「知識」から醸しだされる「知恵」から生まれる．

もの作りはでは数字の直感を養うことが大切

現場作業では事務所のような環境ではない．暗い，寒い，暑い･･･その中で仕事を進めるときには細かい計算はできないことが多い．とっさの判断で自分と部下の安全と成果を確保しなければならない．

実社会で大間違いや，一桁違う間違いをせずに，しかも瞬間的な解答を示さなければならない．2倍ぐらいの誤りなら許されるが，一桁つまり10倍の間違いはダメなことが多い．

現代は「ナノ」の世界だ，つまり10のマイナス9乗を扱うことが多い．では10のマイナス6乗，9乗とは小数点以下に0がいくつ付くのか．社会に出たらここの卒業生はこのことを教える人になる．10のマイナス2乗を思いおこして0を2個並べ三つ目に1をつける．001と書き最初の0の次に小数点を打ち0.01．10のマイナス6乗は0を6個並べ一つ目の0の次に小数点を付け，次に六つ目の0の次に1をつけ，0.000001とする．0を1個間違うと10倍の間違いになる．

もの作りの直感その2は，SI基本七単位のうちの三つと電気単位

SI単位系のうち，もの作りで特に重要なのは，長さ(m)，質量（kg)，時間（sec）と電気の単位系に関しての直感だ．生活の中ではいつもこれらの基本単位を元にした感覚で物事をみていなければならない．

テストや授業では，いつも社会で通用する「直感」を養うような問題を作るように工夫をこらした．その中で危機感すら感じた例をいくつかあげてみる．

[長さ：1]

遠くに見える山までの距離と高さ，たとえば大学の窓からくっきり見える森吉山を例にとる．距離200km，高さ5000m････などの答えが「平然」と返ってくる．富士山より高い山が日本にはまだあったのか･･･と絶句

*元秋田職能短大非常勤講師

してしまう．
正解は 30 km と 1,454 m なのだが．

[長さ：2]

短大の近くにある，JR 花輪線で荒屋新町から安比高原に向けて，長さ約 10 km で平均勾配約1000分の15で登る区間がある．最高点では比高差何 m 登るか･･･の問題でも 1.5 m，15 m，1500 m と言う解答もたくさん返ってくる．計算にとらわれてしまうから間違いに気づかないのだ．花輪線が標高 630 m～1300 mにある，安比スキー場の上を越えて行くことになる･･･．正解は 150 m だ．これでは実社会で物を作るには危い．

[質量]

セメント 300 kg で，水セメント比 55% のコンクリートを作る．水の量はいくらか･･･のテストに対し，水は 165 トンとか 16 kg と言う解答がたくさん出てくる．正解は 165 kg だ．これはおかしいぞと言う「直感」がまったくない．これ等の誤りを正し，物性の基本感覚を大事にしていないと誤った物を作ってしまう．

積載重量 6 トンのトラックに 1.58 kg/m の丸鋼，600 kg/立方 m の型枠，40 kg/袋のセメント，それぞれどれ位積めるかという問題．これ等の積載物の計算に気を取られ，トラックの積載量を越える解答がたくさん返ってくる．

[電気]

大学の合計照明電力はいくらか，のような問題には各部屋にある40 w 蛍光灯の数×40 w から推定計算をしてみればよい，と言うような実務計算を電子技術科の学生にたくさんさせた．

[コスト計算]

構造物の製造コストがまったく分からなければ，一桁違いの誤りを犯さないために重量で計算する．例えば，1 kg 当りについて市場価格は，米は約 270 円，地上波テレビは約1000円，自動車は約1500円，パソコンは約15000円･･･等を頭にいれておけばよい．これらの金額にそれぞれの機器の重量を掛ければおよその金額を算出できる．未経験の機器・装置のコストについて一桁違いの誤りを犯さずに見当をつけることができる．

これらの「直感」の例を，折りにふれて具体的に説明すると，学生達はいつも目を輝かせてくれた．教師として楽しく，嬉しい瞬間だ．

もの作りの基本とも言える「フール・プルーフ」

筆者が「社会人かけ出し」の頃アメリカから「輸入」されたフールプルーフという考え方．少し古いがこの考え方は現在でももの作りの安全基準になっている．使う機器について知識のない人が使っても，安全を損なわずに使える機能を備えるべきということ．

ペーパー・シュレッダーなどはどんな使い方をしても使う人に危険が及ばないようにせねばならない．幼児のように危険経験のないユーザーに危害が及ばないような機器装置を作ることが大切ということだ．

もの作りは「10年一技」

人が技術を習得するとき「10年一技」と言う．もの作りも同じこと．このことをしばしば学生達に説いた．学生たちが10年後どんな「技」をみせてくれるか．また彼らが立派なリーダーとなり，社会に貢献している姿を想像している．彼らが活躍することで，地球環境がよくなり，かつ高齢化社会を支えてくれることを期待したい．



秋田県大館市下代野在住
Tel:0186-48-4490
昭和36年（1961年）
鉱山学科卒　杉村 健太郎

談　話　室

有限量の資源とその探査の重要性

三　ケ　田　　均*

Finite Earth Resources and the Importance of Geoexploration

by Hitoshi MIKADA

はじめに

1798年に Thomas Robert Malthus（以下マルサスと略称）は人口論を著し，人口の自然増が時間とともに増加する等比級数で示せることを示した．同時に食料生産の伸びが耕地面積に比例した等差数列として示すことができるとし，時間とともに食料が不足することを議論した（マルサス，1973）．このマルサスの人口論を数学的に明確化したのは Pierre Francois Verhulst（以下ベルハーストと略称）であった（Deffeyes, 2001）．ベルハーストは人口を時間の関数とし，その自然増加が指数関数となる場合，および人口に上限が存在するという条件を付加した場合の双方について説明可能な微分方程式を提唱した．そして，この微分方程式の解は，人口は時間に対し指数関数的に増加するものの，この上限に向かって漸近的に一定値に収束するロジスティック関数となることを見出した．現在では，このベルハーストのモデルが，「マルサスの人口論」として認識されている．

ベルハーストの人口上限は，地球に存在し得る，あるいは地球の許容できる人間の数という視点で，実は地球上の有限資源量のアナロジーとして考えることができる．Michael King Hubbert（以下ハバートと略称）は，この「マルサスの人口論」を石油資源に適用した．彼は「マルサスの人口論」を表す微分方程式の人口を延資源生産量に置き換え，その解を議論した．その結果，地球上の資源量が有限であるため，人類社会の発展とともに指数関数的に増加する資源消費量（資源生産量；延資源生産量の一階微分関数）が抑制され，総資源量の50%生産後に資源生産量が減少に転ずることが予想された（本田，2005）．

*京都大学大学院工学研究科　教授

人口増加には，医学の進歩や政治経済による人為的な影響も含まれるため，その妥当性についての議論が繰り返されていると言われる．資源消費が人口増加と同様に指数関数的に伸びるとするモデルには，その妥当性についての議論が尽きない．しかしながら，米国本土48州の1970年頃の石油生産量ピークが，ハバートが1950年代に予測した通りに訪れた（Deffeyes, 2001）ことで，その妥当性を是とする人も多い．定性的には，総資源量に上限があること，および石油生産量が指数関数的に伸びることが説明できれば，ハバート曲線は近似的に妥当であると考えられる．本論では，このハバート曲線から予測される将来の資源減耗の可能性，現在議論されているCO_2対策との協調指向，米国で実施されたシミュレーションによる対応策，そしてその中で物理探査による対応の可能性について論じることとする．

ハバート曲線について

既に芦田（2007）により簡単な説明がなされているハバート曲線は，「マルサスの人口論」に用いられたベルハーストの微分方程式から容易に導かれる．先ず，対象とする資源に対し Q をその資源の延総生産量（時間の関数），Q_0 を総可採資源量（定数）とすると，次の微分方程式が成り立つ．

$$\frac{dQ}{dt} = a\left(1-\frac{Q}{Q_0}\right)Q \qquad (1)$$

左辺の Q の時間増加率は，右辺の Q 自身と比例定数項からなる極めて理解し易い式となっている．この比例定数項 $a(1-(Q/Q_0))$ は，Q の値が Q_0 の値に近付くに従い，零に漸近する．ここで，$Q_0 \to \infty$ なる可採資源量無尽蔵の仮定を導入すると，Q の値は指数関数的に単

調に増加する．しかしながら，可採資源量が有限である場合，$Q|_{t\to\infty}=0$ なる初期条件でこの微分方程式を解いて，次の解を得る．

$$Q=\frac{Q_0}{1+\exp\{-a(t-t_0)\}} \tag{2}$$

但しここで，t_0 は $Q(t_0)=(1/2)Q_0$ 与える時間である．この関数は，いわゆるロジスティック関数の一つである．「マルサスの人口論」では，Q および Q_0 がそれぞれ総人口および地球上に許容される最大人口に相当する．関数そのものは，未知数である a という時定数及び総資源量 Q_0 が含まれる極めて理解し易い構造となっており，本報ではベルハースト曲線と仮称することとする．

ハバート曲線は，以上の延総生産量での議論ではなく，この解の一階導関数を用いて，ある時間単位（例えば毎年）の生産量 P を議論する曲線となる．この曲線は

$$P=\frac{d}{dt}Q=\frac{aQ_0\exp\{-a(t-t_0)\}}{\left[1+\exp\{-a(t-t_0)\}\right]^2} \tag{3}$$

となる．生産量 P はやはり時間の関数となり，$t=t_0$ で最大値を有することがわかる．この t_0 が，いわゆるハバート・ピーク，石油ピークなどと呼ばれる時間となることがわかる．図１に以上のベルハースト曲線およびハバート曲線の例をあげる（図１）．

次に，西内（2007）を参照し，生産量と資源の残余可採資源量の関係を議論する．資源の残余可採資源量を上述の式から求めると，次の式となる．

$$R=Q_0-Q=\frac{Q_0\exp\{-a(t-t_0)\}}{1+\exp\{-a(t-t_0)\}} \tag{4}$$

一般的に資源量評価で用いられる可採年数に変わる指標として可採時間 T は，次の式で予測される．

$$T=\frac{R}{P}=\frac{1}{a(1+\exp\{-a(t-t_0)\})} \tag{5}$$

ここで，$t\gg t_0$ なる条件を付加すると，可採時間 T は正の実数である一定値に漸近し零にはならない．残余可採埋蔵量 R の減少とともに生産量 P の減少が生ずるためであると解釈できる．

$$\lim_{(t-t_0)\to\infty} T=\frac{1}{a} \tag{6}$$

従って，このロジスティック関数のモデルが妥当であれば，対象としている資源は枯渇することはなく，単に減耗し続ける．

一連のハバート曲線から推定される生産量ピークおよびこの曲線の一般性に関する研究もなされている．ハバートは，更に生産量 P と発見埋蔵量双方を説明する定式化を行なっており（Hubbert, 1981），以上の式を更に一般化している．こうした式を用い，米国本土48州およびその大陸棚における可採原油量が1500～2000億バレル（約240～320億kl）と仮定し，その石油生産量が1970～1972年にピークを迎えることを予測した（Hubbert, 1956）．更に，世界の可採原油量を約２兆バレル（約3200億kl）とすると，その生産量のピークが1995年頃に到来し得るという計算結果も発表している（Hubbert, 1981）．ハバートは工業用金属資源についても言及し，資源が，無尽蔵資源，再生可能資源，消耗資源に分類できることや，人類の持続的発展性についても議論している（Hubbert, 1981）．

この定式化が，石油資源に適用されて然るべきかどうかという議論も続けられている．またハバート曲線に関し，いくつかのハバート曲線を組み合わせた複合ハバート曲線モデルや，生産量のピークに関する非対称性を盛り込む非対称ハバート曲線モデルなども考えられている．図２には，20世紀以降減耗状態にあると考えられる資源である，鯨油・鯨骨の生産量（Badri and Yaxley, 2005）を示す（図２）．図１に示されたハバート曲線が，生産量の推移を適切に再現していることが読み取れる．

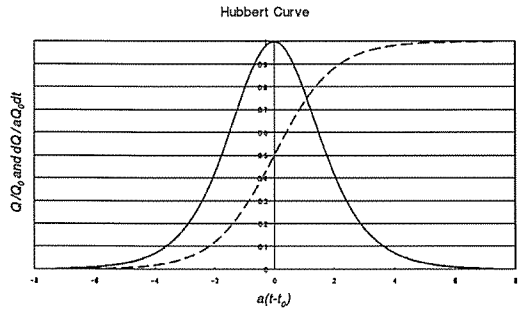


図１ ベルハースト曲線（破線）とハバート曲線（実線）．双方とも最大値が１となるよう正規化してある．

有限量資源への物理探査の役割

米国エネルギー省は，国家のリスク管理の一環として，石油ピークが訪れた場合の対策に関するレポートを取りまとめた（Hirsch, et al., 2005；以下ハーシュ報告と略記する）．前提となるシナリオは，ある一日に１億バレル（現在は約8500万バレル）の石油生産量でピークを訪れ，その後年2%の割合で生産量が減少するにも拘らず，

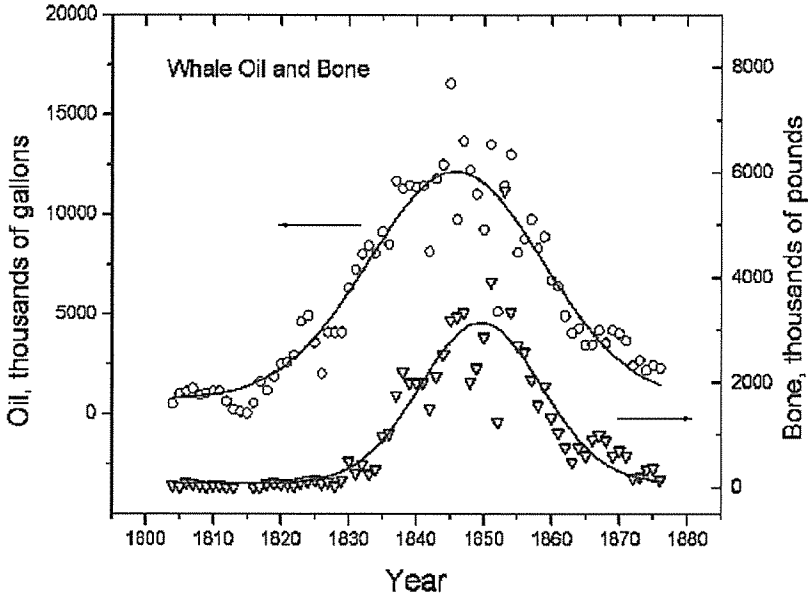


図2　既に減耗した資源である鯨油・鯨骨の生産量推移．ハバート曲線のフィッティングは良い近似を与えている（Badri and Yaxley, 2005）．

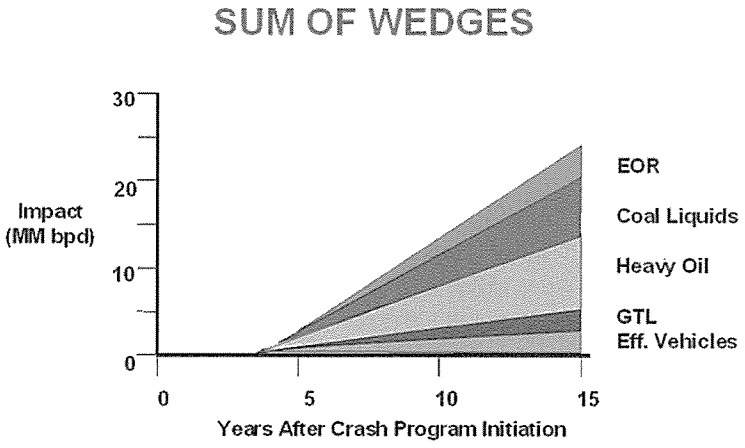


図3　ハーシュ報告にあるリスク回避策発動後の「くさび型」成長モデル．技術開発に4年程度の時間を必要とした後，それぞれの回避策が徐々に効果を上げ，その効果が石油生産量に換算できるとする（Hirsh, et al., 2005）．

石油需要が年2%で伸び続ける場合である．現状の技術および技術発展にある程度の時間が必要であると仮定し，どのような対応策が可能であるかをまとめている．調査の結果，対応策として：(1) 自動車の燃費向上，(2) 地下からの石油資源回収率の向上，(3) 重質油やオイルサンドなど非在来型と呼ばれる炭化水素資源の開発，(4) 石炭の液化，(5) 天然ガスの液化，が有効とされた．こうした対応策が約15年程度の時間をかけると，それぞれ日産200, 300, 800, 200, 200万バレル生産量相当のくさび型成長を遂げると計算している（図3）．仮定が多いため一概には結論づけられないが，ある国の一日当たり石油消費量が600万バレルとすると，リスク回避策発動後10年で，石油資源回収率向上でその半量を，自動車の燃費向上で約3分の1を賄えることとなる．ハーシュ報告では，生産量が徐々に減少し始める石油ピークというリスクを回避するためには，少なくとも石油ピークの生

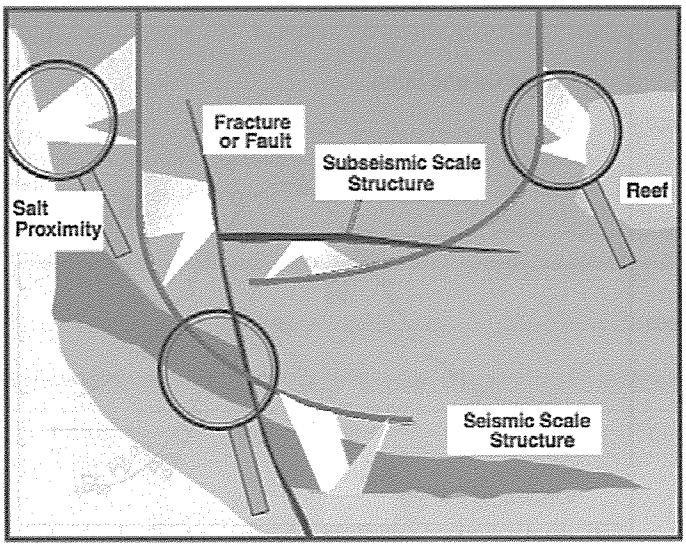


図4 近年の物理探査で対象となる微細な地下構造．岩塩ドーム，地下の断層で区切られた地層や薄層，珊瑚礁などの小規模な構造な資源探査の対象となっている（三ケ田，2008）．

じる20年前からリスクマネージメントの基本である早期対策協議を開始することが肝要であることも強調されている．また正確な推定には，現在その精度が不明である産油国公表の数値精度向上が必要であること，また対応策が政府レベルで検討される必要性，そして資源減耗のインパクトが開発途上国により深刻となることに言及している．

さて，物理探査の目的とする地下可視化という点に着目すると，石油資源に関するハーシュ報告に指摘された5つの対応策の中で，(2) 地下からの石油資源回収率の向上，(3) 重質油やオイルサンドなど非在来型と呼ばれる炭化水素資源の開発，が特に貢献を大きく期待できる箇所に相当することが明らかである．他にも地下に胚胎される資源の開発に果たせる役割は大きい．弾性波反射法などによる探査による構造把握に加え，検層による地下資源や胚胎する地層の性質取得を組み合わせ，可能な限り地下の資源の胚胎状況を把握する．更に資源の生産と同時に，その回収に必要な地下の状態変化を捕え，資源回収効率向上に寄与するといった役割である．それでは，いったいどのような研究・教育の展開が必要なのであろうか．

先ず，空間スケールの重要性が挙げられる．近年注目の集まっているメタンハイドレート資源や探査対象となる油層など，これまで以上に空間的に限られた広がりの中に小規模に存在し（図4），探査の解像力の増加が期待されている分野である．これまで以上に複雑な構造を呈する地下構造推定には，三次元探査と呼ばれる方法が必要不可欠である．次に，孔隙率分布，流体分布などの岩石物理学的パラメータの地下構造内部における精度の高い推定が挙げられる．こうした岩石物理学的パラメータは，例えば生産などによる地下の状態変化とともに変化するため，こうした時間変化を捕える探査（タイムラプス探査あるいは四次元探査と呼ばれる）を実施する必要もある．更に，こうした時間変化する地下構造を高解像度で把握するためには，これまで以上に精度の高い探査手法適用を可能にするハードウェアの開発が必須となると考えられる．以上をまとめると，探査の高解像度化，岩石物理学パラメータ推定の高精度化，探査の四次元化，探査機器の開発が今後の物理探査の方向を決めると言っても過言ではないだろう．決して派手さはないが地道なこうした技術開発が，石油ピークというリスクを回避するためにハーシュ報告で将来技術開発が必要と指摘された分野の研究に寄与することは言うまでもない．

ま と め

ハバート曲線は，マルサスの人口論同様，その妥当性についての議論が尽きない．しかしながら，その数学は単純明快であり，その曲線を用いることで定性的な議論が可能である．石油等が化石資源であり，その量が有限であることを仮定すれば，いずれ生産量がピークを迎え，資源の減耗が始まることは決して否定することのできない事実であり，現代社会の抱えるリスクに他ならない．ハーシュ報告で指摘された通り，リスク回避のためには，事前に体勢を整え迎撃することが重要である．有限量し

か存在しない地下資源を考えた場合，物理探査により地下を可能な限り高精度に可視化し，計画的に資源生産の効率を高める必要性は言を待たない．例えば現代社会が強く依存する石油等の炭化水素資源に関しては，資源回収率を向上させる技術開発や非在来型資源の開発に物理探査が大きく貢献する可能性が高い．物理探査に関わる人間は，地下の高精度可視化技術の発展に今後とも努めて行く必要があるだけでなく，その技術が現代社会の持続的発展に直接貢献する可能性を忘れてはならない．

引　用　文　献

芦田譲（2007）：日本国内の資源・エネルギーを取り巻く状況，水曜會誌，23 (10)，1125-1140.

Badri, U., and L. Yaxley (2005): How general is the Hubbert curve? The case of fisheries, Proc. Proc. IV Intern. Workshop on Oil and Gas Depletion, 66-67.

Deffeyes, K. S. (2001): Hubbert's Peak: The impending world oil shortage, Priceton University Press, New Jersey, 208pp.

Hirsch, R. L., R. H. Bezdek and R. M. Wendling (2005): Peaking of World Oil Production: Impacts, Mitigation, and Risk Management, U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory, February 2005, 91pp.

Hubbert, M. K. (1956): Nuclear energy and fossil fuels, American Petroleum Institute, Dallas, Drilling and Production, 7-25.

Hubbert, M. K. (1981): The world's evolving energy system, Am. J. Phys., 49 (11), 1007-1029.

本田博巳（2005）：石油生産ピークは今年中に来るのか？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.

マルサス（永井義雄訳）（1973）：人口論，中央公論新社，東京，242 pp.

三ケ田均（2008）：近年の物理探査の技術動向－時空間スケールの重要性－，石油技術協会誌，73 (1), 20-27.

西内卓也（2007）：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，平成18年度京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻修士論文，40 pp.

談　話　室

地熱地域へCO_2固定貯留技術

上　田　　晃*

CO_2 Sequestration into Hydrothermal System

by Akira UEDA

1. はじめに

昨年5月に着任しました上田です，よろしくお願いします．私の専門は同位体地球化学で，研究対象は，地球温暖化防止策の1つである CO_2 地下貯留，特に高温地域での CO_2 固定化研究（ジオリアクター）と，深部地下水の起源及び挙動解析です．研究手法は，CO_2 貯留に関しては，地熱地域の岩石—CO_2 反応現象を観察しながら，室内試験や現場試験を行い，CO_2 の地下での地化学的挙動を検討しています．深部地下水の挙動解析については，水素・酸素安定同位体を中心に，様々な水質を示す地下水や温泉水の起源の解明や，その挙動を解析するものです．特に，岩石とどのように反応して水質が変化しているか，あるいは，滞留時間や移動方法などと併せて，今後どのような水質変化を示すかを検討しています．今日は，ジオリアクターについて御紹介します．

2. CO_2 地下固定化貯留技術（ジオリアクター）

地球温暖化の原因である CO_2 の削減方法の1つとして，二酸化炭素（CO_2）の地中貯留が世界的に実施あるいは検討されています．ここで，貯留の対象となる地層は，背斜構造を有した堆積岩地域の石油や天然ガスを採掘した後に注入するか，あるいは帽岩（キャップロック）と呼ばれる不透水層を有する厚い砂岩層への注入が行われており，これらの貯留方法を帯水層貯留と呼びます．注入された CO_2 は，一部は水に溶解し，さらにその一部は鉱物（方解石など）として固定化されるものの，大部分はそのままの形で長期間存在することになります．

私の研究は，帯水層に貯留された CO_2 の化学的挙動を解析すると共に，地温が高い地域へ CO_2 を注入して，方解石などの炭酸塩鉱物として安定に固定化するための条件を検討することです．これは，地熱地域に存在する岩石の鉱物学及び同位体化学的研究から，炭酸に富む水が高温下で岩石と反応すると方解石が沈殿することをもとにしています．実際に，私が研究した秋田県澄川地熱地域では，斜長石が CO_2 を含む水と100℃以上で反応して，方解石と粘土鉱物が形成されている（キャップロックが形成されている）ことが判明しています．このことから，工場や発電所からの排ガスから CO_2 を分離回収して超臨界 CO_2 として注入するか，あるいは排ガスを水に溶解して地下へ注入することにより，CO_2 を方解石などの炭酸塩鉱物として固定化できる可能性が高いことを示します．すなわち，地下の熱エネルギーと岩石との反応（Ca や Mg の溶脱現象）を利用して，CO_2 を鉱物（炭酸塩鉱物；$CaCO_3$, $MgCO_3$, $FeCO_3$ など）へ固定化しようとするもので，このようなエンジニアリングシステムを“ジオリアクター（Georeactor）”と呼んでいます．

ジオリアクターの基本概念図を図1に示します．地温の高い地域へ，超臨界 CO_2 あるいは，水に溶解した CO_2 を注入し，これが周囲の岩石との反応により，岩石から Ca や Mg が溶脱し，中和作用が起こると共に，炭酸イオンと反応して，方解石（$CaCO_3$）等の炭酸塩鉱物を沈殿させるものです．この場合，対象としている地域のキャップロック（泥岩層や粘土層）の透水性が十分に低くなくても，ジオリアクターによる方解石の沈殿に起因する目詰まりにより，キャップロックとしての機能を発生させることができると期待されます．

CO_2 流体を高温地域へ注入した場合に，どのような反応が起こるかについては，詳細は不明であるため，まず室内試験で検討を行いました．本研究では，後述する秋

*京都大学工学研究科社会基盤工学専攻
エネルギー資源開発工学（JAPEX）講座　准教授

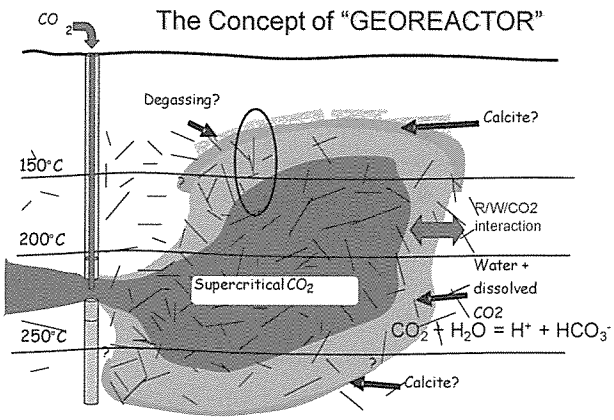


図1　ジオリアクター概念図

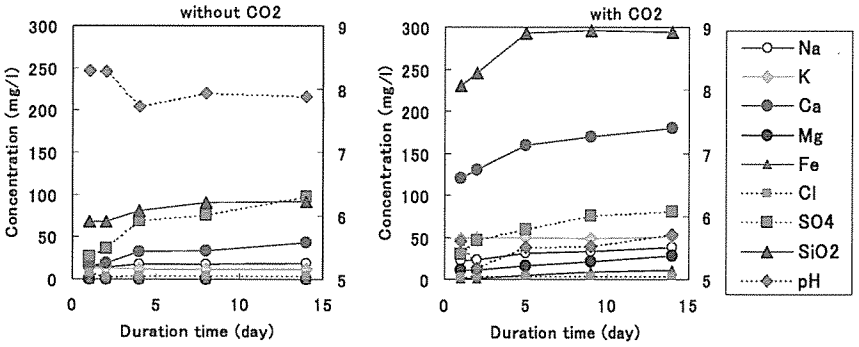


図2　ラブラドライトーCO_2反応結果（バッチ式）

田県湯沢市にある高温試験場での現場試験と対比させるため，現地ボーリングのコアから得られた花崗閃緑岩（OGC-2孔，深度1100 m）や岩石の主要鉱物である斜長石を粉砕・整粒して試験に供しました．反応に用いた容器は，テフロン製高温高圧反応容器で（内容積100 ml），SUS製保護管で覆われています．これに，岩石粒と蒸留水を任意の割合で入れ，脱気後にCO_2ガスを任意の圧力で注入します．この容器を回転電気炉内で，1 rpmの回転速度でテフロン内部を撹拌しました．反応後，急冷して水試料は，主要化学分析に，固体試料はXRDによる鉱物同定や，SEM-EDXにより表面化学分析を行いました．

図2は，ラブラトライトと呼ばれる斜長石との反応結果を示しています．CO_2水との反応結果から，Ca濃度はCO_2ガスの有無により大きく挙動が異なり，CO_2添加したものは，急激に増加していることが分かります．また，CO_2注入圧による大きな違いは認められませんでした．図2の化学分析結果をもとに，化学平衡論によって各鉱物の過飽和度を求めて，反応系での鉱物の沈殿の有無を検討しました（図3）．過飽和度は，次式で示されます．

過飽和度 (SI; Saturation Index) = Log(Q/K) ･･･式 (1)

ここで，Qは，溶液の化学分析値から計算された活動度積（$(Ca^{2+}) \times (CO_3^{2-})$），Kは溶解度積（$(Ca^{2+}) \times (CO_3^{2-})$）です．SI>0で過飽和（沈殿する可能性高い），SI=0で平衡状態，SI<0で不飽和（溶解）であることを示します．

室内試験の結果，研究対象としている炭酸塩鉱物については，CO_2添加試料では，斜長石などの鉱物が溶解し，方解石が2日目以降に過飽和になることが分かります（図3）．室内試験では，CO_2を添加していない試料についても同様の比較試験を行っていますが，CO_2添加試料と比較して，反応後の溶液の方解石過飽和度は高くなります．これは溶液のpHが中性～アルカリ性になっており，方解石の過飽和度はpHが高いほど，増加することを反映していると思われます．本実験で，CO_2と反応した試料中には方解石が沈殿している可能性は高いものの，SEM-EDX分析では確認できていません．一方，地球上の岩石の主要鉱物である斜長石（雄勝の岩石にも含まれる）に着目して，CO_2水と灰長石（anorthite）と反

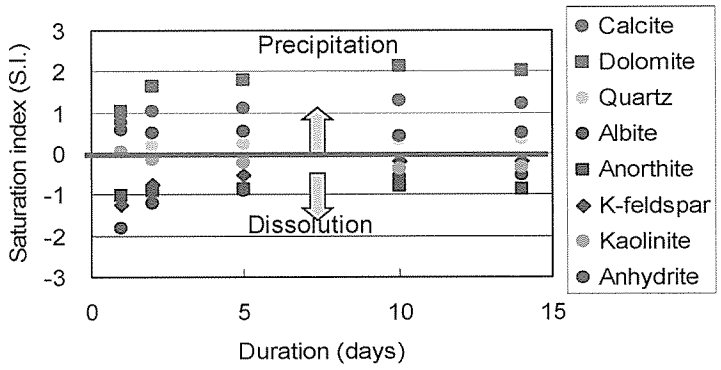


図3　ラブラトライトー CO_2 反応溶液中の各種鉱物の過飽和度

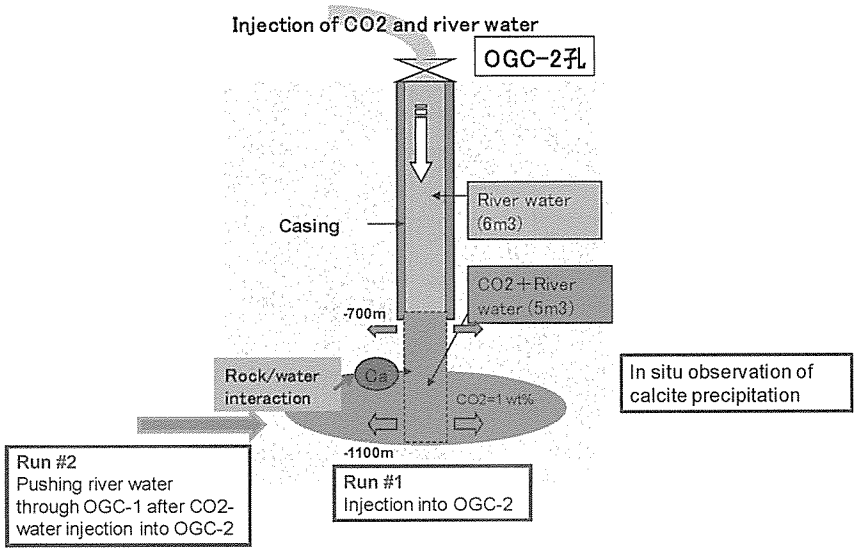


図4　雄勝実験場での CO_2 注入試験

応させた実験では，CO_2 を添加した条件では方解石は確認されました．一方，CO_2 無添加の試料では，反応後の溶液中の方解石に対する過飽和度が高いにも関わらず検出されませんでした．このことは，過飽和度は，先述のように pH に大きく依存していることを示し，単に pH が高くて方解石に対する過飽和度が高くても，溶液中の CO_2 や Ca の絶対量が少ない条件では，沈殿は微量であると予測されます．このことは，CO_2 の鉱物固定を考察する上では重要な因子になります．そこで，過飽和度だけではなく，濃度を考慮した新しいパラメータを検討中です．

室内試験結果からは，短期間に溶液は方解石に対して過飽和になることが予想されます．室内試験では，反応条件を単純化して行っており，実際の高温地域へ貯留を行うためには，複雑な系である現場での評価試験が必要である．そこで，原位置評価試験を，秋田県湯沢市にある（財）電力中央研究所所有の雄勝試験場で行いました．この試験場には，孔井は3本掘削されているが，そのうちの OGC-2 孔を中心に試験を行った．OGC-2 孔は，深度 1100 m で，深度 700 m までケーシングが挿入され，それ以深は裸孔である（図4）．この試験場は，電力中央研究所が長年にわたって，熱抽出試験を行っており，水圧破砕により人工的に深度 700 m と 1100 m 付近に断裂が形成されています．

本研究では，平成15年と16年に NEDO 先導研究として，平成18～20年に RITE プログラム研究の一環として原位置試験が実施されています．試験方法は，OGC-2 孔に，河川水（硫酸酸性のため，NaOH で中和）あるいは中性湧水とドライアイスを同時に注入し，一定の CO_2 濃度の水を連続的に注入しました（図4）．これを戻り水方式と呼んでいます．注入量は，約 15 m^3 であり，OGC-2 孔内の体積（約 9 m^3）より多い量を入れていま

す．すなわち，CO_2水は，岩石中（レザーバ内）にも多量に注入されています．その後，一定時間毎に温度検層を行うと共に，水試料サンプラー（クスター；内容積は，約500ml）で深度850～950mの水試料を採取しました．

雄勝での原位置試験で得られた結果のうち，NEDO先導研究の結果を図5に示します．この結果から，CO_2注入後1日後に急激にCa濃度が上昇し，1日後に減少しました．また，CO_2濃度の違いでは，CO_2濃度が高い程，Ca溶脱量が増加しています（3wt%CO^2濃度水では，Caは最大100mg/Lまで上昇）．このことは，CO_2を注入することにより，短期間に岩石からCaが溶脱していることを示し，室内試験結果と整合した結果となりました．OGC-2孔では，孔内流動あるいはレザーバからのOGC-2孔への流体の流入が発生しており，短期間に注入したCO_2水が，もともと存在した地熱流体に置換されることも判明しています．平成16年までの原位置試験では，地下で方解石が沈殿したかどうかの議論を行うことはできませんでした．

平成18年の試験では，OGC-1孔とOGC-2孔を用いた循環試験を実施しています．OGC-1孔からCO_2水（濃度0.21 wt%CO_2）をトレーサと一緒に加圧注入し，100m程度離れたOGC-2孔から流出させて，CO_2濃度の減少を検討しました．これは，トレーサ濃度と比較することにより，注入されたCO_2のどれだけの部分が地下へ固定されるかを検討するものです．試験は，10月14日から16日間実施し，pH調整した河川水をOGC-1孔から380L/分で加圧注入し（積算注入量は，6,803m^3），OGC-2孔からは40L/分の湧出がありました（積算湧出量は，723m^3）．OGC-2孔の孔口温度は，最大で127℃まで達しました．OGC-2孔からの流体中にトレーサは，CO_2水注入後36時間後に検出され，72時間後にピークを示しました．この結果から，地熱流体による希釈率は，1/1000～6/10万と試算されています．このことは，注入したCO_2濃度が0.21 wt%（2,100mg/L）であったため，OGC-2ではバックグランド値（200～600mg/L）との有意の差を見つけることが出来ない結果となりました．この試験期間中には，OGC-2孔の孔口元で，方解石結晶成長試験を実施しましたが，得られた流体が地表では方解石に対して不飽和であったにもかかわらず，方解石の結晶成長が観測されました．このことは，孔井口元から結晶成長容器へ導入した流体が一部気液分離を起こしたために，局所的にpHが増加して，方解石に過飽和になったと推測されました．

以上の結果を受けて，平成19年の原位置試験では，CO_2注入後に方解石が沈殿するかどうかを現地で確認するために，OGC-2孔内の深度850～950mで結晶成長試験を世界に先駆けて行いました．試験は，NEDO先導研究時と同様に，OGC-2孔を用いて，戻り水方式により試験を行いました．試験方法は，ドライアイスとpH調整した河川水を注入し，一定期間毎に孔井水をクスターで採水し，化学分析を行った後に，結晶成長ゾンデで結晶成長試験を実施しました．戻り水方式の試験は，2回実施され，1回目はOGC-2孔のみを用いて行われ，2回目はCO_2水注入後2日目から，OGC-1孔から河川水を注入する試験を行いました．これは，OGC-2孔の岩盤内に注入されたCO_2水を孔井内へ戻すために，OGC-1からの注水で押すことを目的としたものです．

CO_2水注入と同時に，本試験でもいくつかのトレーサを同時に添加しています．そのトレーサ濃度の分析結果から，2つの試験とも，CO_2水注入後5日間程度で，OGC-2孔内の流体は，地熱流体に置換されることが判明しています．試験2では，OGC-1孔からの注水の効果により，トレーサ濃度の減少率が，試験1に対してやや遅くなる傾向が認められました．試験2での採取された流体中のCa濃度は，CO_2水注入後1日目に急激に増加

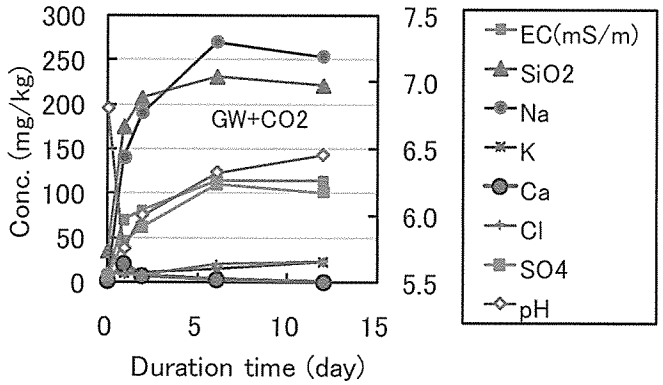


図5　OGC-2孔水の水質変化（CO_2濃度＝1 wt%）

し，2日目以降に減少しました．得られた主要化学分析結果にもとづいた化学平衡論による過飽和度解析では，流体は，注入直後は方解石に対して不飽和であるが，1日以降は平衡に近いことが判明しました．この際，CO_2 濃度（流体のイオンバランスから計算されたもの）は，時間と共に減少しているが（図6），トレーサ濃度と比較すると，2/3程度まで濃度が減少していることが分かります（図7）．このことは，注入された CO_2 の一部が方解石などとして沈殿した可能性が高いことを示唆します．

試験期間中に，CO_2 水が岩石と反応して，方解石に過飽和になり，方解石が沈殿するかどうかを判断するため，人工的に成長丘を形成した方解石結晶と深度850～950m付近の流体とを，高温高圧下で反応させました．このために，新たに専用の結晶ゾンデを設計・製作しました（図8）．この装置は，全長2m程度で，内部には3個の結晶ホルダーと水試料採取器が装備されています．結晶ホルダーは，方解石結晶の一部を金ニードルで押しつけて，OGC-2孔内の流体に接触する部分と接触しない部分を作成しています（図9）．このことにより，方解石が流体と反応して，溶解するか，あるいは沈殿するかを判定できます．判定方法は，金ニードルで被覆された結晶面を基準面として，それに対して流体と反応した結晶面が溶解しているか，成長しているかを，位相シフト干渉計を用いて，ナノレベルで判定するもので，垂直分解能は，1nmです（図10）．方解石は，溶解速度や沈殿速度が他鉱物より早いため，OGC-2孔でゾンデの上げおろしの際に流体と接触していると，そこでも反応が起こってしまいます．これでは，どの深度での溶解／沈殿反応を検討しているかが分からなくなります．そこで，結晶ゾンデ内には，深度に対応したHeガスが加圧注入されており，目的の深度でラプチャーデスクが破裂するように設計されています（図8）．その深度の流体がゾンデ内に流れ込み，そこで初めて方解石と接触して

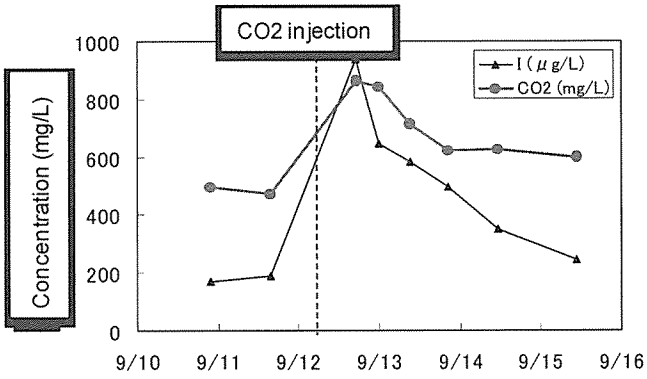


図6 OGC-2孔への CO_2 水注入後の流体中のトレーサ・CO_2 濃度変化

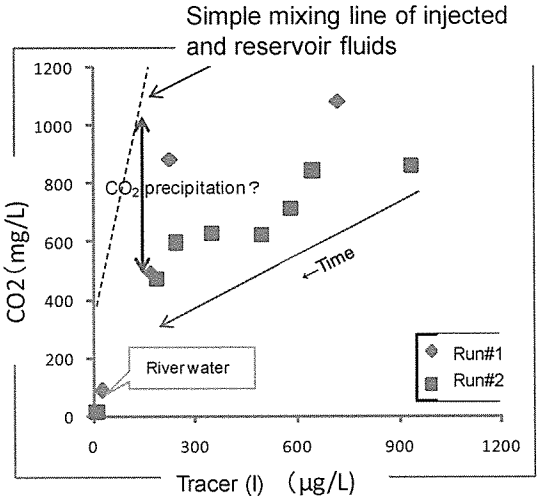


図7 OGC-2孔へ注入された CO_2 水の濃度変化

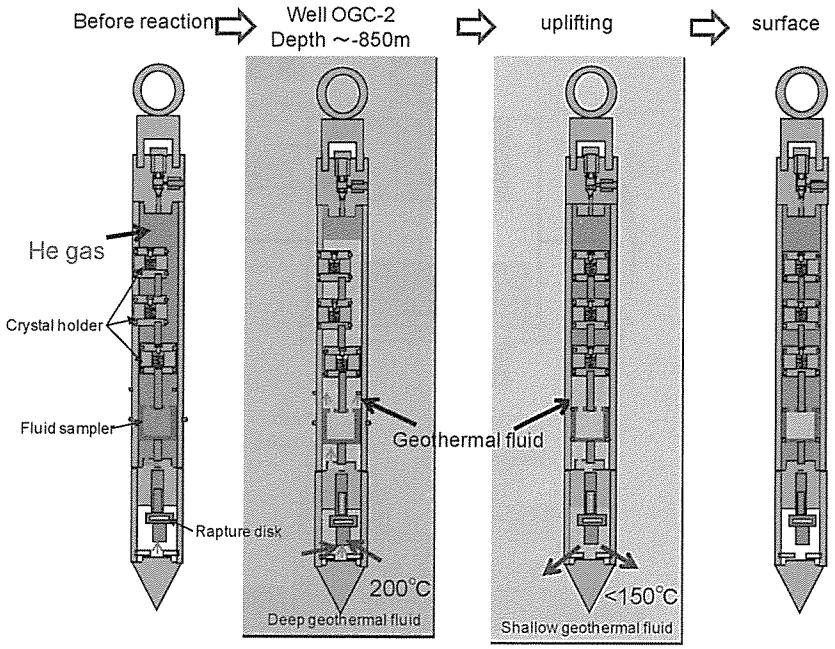


図8　結晶成長ゾンデによる“in situ”分析

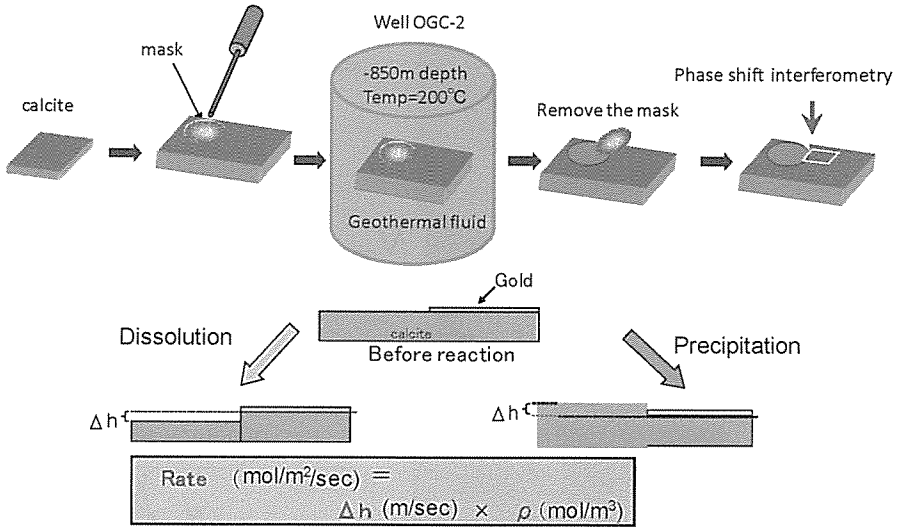


図9　鉱物の溶解／沈澱速度測定方法

反応が開始されます．流体が過飽和な状態であれば，方解石が結晶成長を行い，不飽和ならば溶解が進みます．結晶成長ゾンデは，1～3時間の間，目的深度で保持され，その後，30分程度で地上まで引き上げられます．その際には，ゾンデ内の圧力が周囲の流体の圧力より高いために，流体はゾンデ外へ排出されるしくみになっており，方解石種結晶は，反応を中止することになります．

結晶ゾンデによる解析では，CO_2注入後は，方解石は溶解しており，一日後以降は成長していることが示されました（図11）．この結果は，流体の化学平衡論からの予測結果と一致していることから，今回の試験では，OGC-2孔内の流体は，CO_2水注入後はpHが酸性になっており，岩石との反応によりCaが溶脱し，その後に地熱流体の混入による混合と岩石との反応によるpH上昇により，方解石が過飽和になって沈殿したと推測されます．これは，世界で初めて地下の高温条件下で方解石が，人工的に固定されたことを示しています．

平成20年度は，9月に雄勝実験場で同様の試験を行い

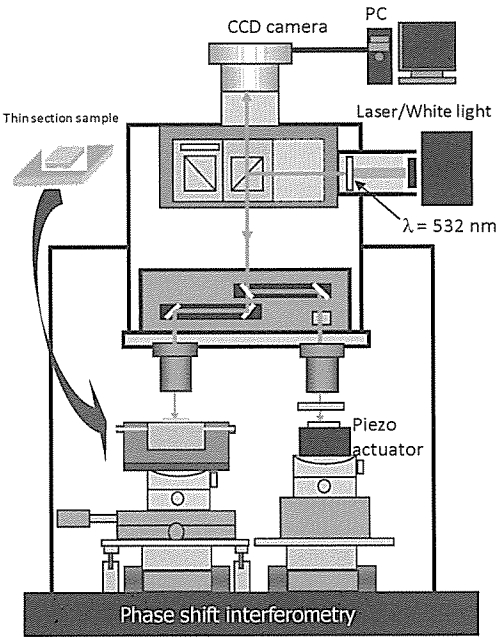


図 10 白色光／レーザー位相シフト干渉計概念図

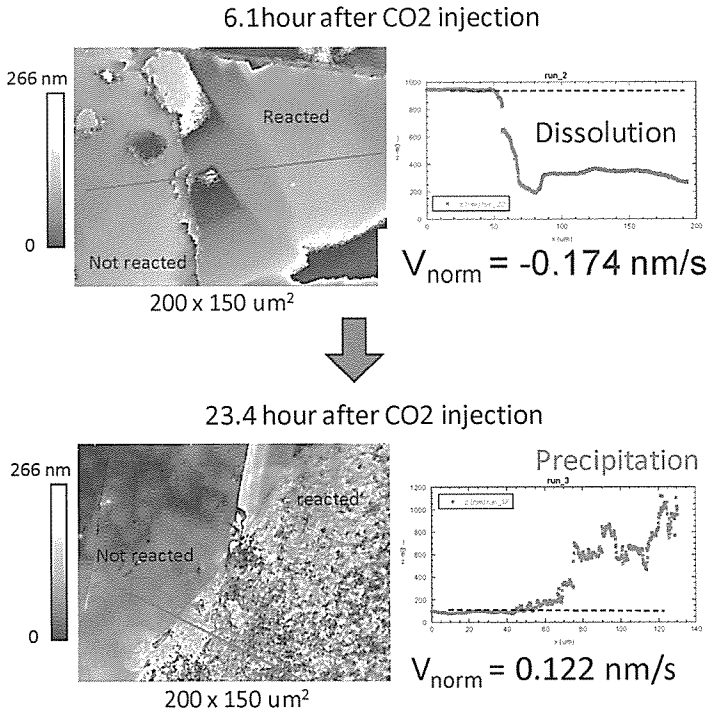


図 11 方解石の溶解／沈澱速度測定例（OGC-2 孔）

ました．その際に，現地で CO_2 濃度を測定することに注力した結果，CO_2 濃度が 2 日目から急激に減少していることが確認されています．同時に実施した結晶成長試験については，現在解析中です．

今後は，規模を拡大した現地試験の実施や，室内試験と反応予測（各種シミュレーション）により，どれくらいの規模の CO_2 が，どれくらいの速度でどこへ固定できるかを研究開発して行く予定です．

談　話　室

ぼかしてなんぼ！？

－走査型透過電子顕微鏡像からナノクラスターのサイズ分布を測定する－

岡　本　範　彦*

Nanocluster Size Measurement from Dark-field Scanning Transmission Electron Microscope Images

by Norihiko L. OKAMOTO

はじめに

私は，平成20年2月1日付けで，材料工学専攻結晶物性工学講座に助教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13年3月に京都大学工学部物理工学科を卒業後，京都大学大学院工学研究科材料工学専攻修士課程，博士後期過程へと進学し，乾晴行教授のご指導の下，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，日本学術振興会特別研究員として大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻に所属し，平成18年6月より平成19年11月までの間，米国カリフォルニア大学デイヴィス校に博士研究員として留学しておりました．卒業研究，修士課程では金属ボライド単結晶の力学特性について，博士後期課程では熱電変換クラスレート化合物の結晶構造と熱電変換特性の相関について研究を行ってきました．留学中は走査型透過電子顕微鏡を用いて，水素吸蔵化合物や赤外線検出半導体から海上浮遊微粒子やウィルスに至るまで，さまざまな物質を対象に研究を行いました．本稿では，研究留学生活と，その中で新しく開発しました「走査型透過電子顕微鏡によるナノクラスターサイズ精密分布測定法」について紹介したいと思います．材料工学的というよりは画像処理技術的な側面が強い内容になりますが，少し肩の力を抜いて簡潔に述べていきたいと思います．

UC Davis での研究生活

留学先の University of California, Davis（以下，UC Davis）は10校あるカリフォルニア大学の一つなのですが，Berkeley 本校や Los Angels 校に比べて知名度が低く，留学直前まで Davis 市がどこにあるかさえわからないままでした．しかし，ずいぶん後になってわかったことなのですが，UC Davis は日本人でも知る人ぞ知る大学だったのです．それは，カリフォルニア・ワインや Napa Valley の名を世界的に認知される程度にまで高めた第一人者である醸造家 Robert Mondavi と深い関わりのある大学であり，優れたワイン醸造学科（Department of Enology）がある大学なのです．斯く言う私はワインに造詣は深くありませんが，Napa Valley は Davis から車で1時間弱の距離にあり，UC Davis に留学した日本人は，程度に差はあれワイン好きになって日本に帰ってきているように思います．Davis 市は州都 Sacramento 市の西隣にあり，人口約5万人程度の小さな町です．人口の大半は大学関係者か高級住宅地の住人であるため非常に治安が良く，安心して留学生活を過ごせました．Davis の夏は暑く 43℃ 以上になることもありましたが，冬の短い期間を除いて雨が降ることはなく乾燥していたので，長年京都に住み続けていた私にとっては存外に過ごしやすい町でした．私は，キャンパスから自転車で10分ほどのところにある Carter International House という家で間借りをし，家主の Marilu Carter 女史やペルー，エチオピア，スペインなどから来た素晴らしい留学生達と生活を共にすることができたのは，私の資産ともなるべき貴重な経験でした．特に家主の Marilu は，都市開発の学術雑誌の編集者であり，絵描きであり，リベラルな政治活動家でもあるという方で，時には私の拙い論文を添削して下さったり，ホームパーティーやピアノリサイタルを催して下さったり，アメリカ社会の問題点について話し合ったりすることができ，今でも Davis での「母」とでも呼ぶべき存在です．Davis 校は，UC Berkeley 本校の農業分校として設置されたものですから，もともと農業・生物系分野が強い大学でした．カリフォルニア大学の各校には，動

*京都大学大学院工学研究科　材料工学専攻　助教

物をあしらったマスコットがあり，Davis 校の場合は元農業校らしく馬でした（ちなみに Berkeley 本校は“金色の熊”です）．夕方になると風向きが変わるせいか，私が出入りしていた建物から少し離れたところにある牛馬小屋から，香豊かな生温かい空気が漂ってくることもよくありました．Marilu Carter 女史によれば，UC Davis の設立当初は農業校として本校から侮蔑されていたようですが，総合大学化とともに医学·文学分野でも発展し，特にここ20年くらいの間に工学系の著名な研究者を大勢招くことによって，工学系教育·研究のレベルも急速に上がってきたということです．

ナノクラスターのサイズ測定時の問題点

私が所属しましたのは，イリノイ大学シカゴ校から UC Davis に転任されたばかりの Nigel Browning 教授の研究室でした．彼は，走査型透過電子顕微鏡（Scanning Transmission Electron Microscopy: STEM）研究の第一人者である Oak Ridge 国立研究所の Stephen Pennycook 博士の一番弟子であり，多岐にわたる物質について原子レベルでの構造解析·分析を行ってこられました．Browning 教授および彼の共同研究先からいろいろなテーマを頂きました（というより試料をポンッと渡されるだけの方が多かった）が，その中でも，本稿で述べます研究の端緒となった研究テーマは，イラン人の博士課程の学生 Shareghe と共に，酸化物に担持された金属触媒ナノクラスターの立体配置を原子レベルでトモグラフィー観察し，さらにナノクラスターと担持体の結合状態を電子エネルギー損失分光法（EELS）で調べるというものでした．結局，私自身はナノクラスターのトモグラフィーや EELS測定をする以前に，どうすればナノクラスターのサイズを定義·測定できるかということに問題を見出し，表題のようなテーマを進めることになりました．特に，金属ナノクラスターの触媒特性は，そのサイズや形状に強く依存することが知られており[1]，それらを精密に測定することは非常に重要です．それにも関わらず，電子顕微鏡を用いて 1 nm 以下のナノクラスターのサイズ分布を報告したものは全く見当たりませんでした．

クラスターが比較的大きく等方的な場合には，電子顕微鏡像中のクラスターのサイズの定義·測定はさほど難しい問題ではないのですが，たとえば図 1(a) のように非常に小さく異方的なナノクラスターの場合には，いろいろと考慮する必要があります．図 1(b)-(c) は 3 つの Os 原子が 3 角形状に結合した Os_3 クラスターを異なる方向から観察した場合の高角散乱暗視野（High-Angle Annular Dark Field: HAADF）STEM 像のシミュレーション像ですが，見る方向によって大きさや形状が変化すること，また像強度プロファイル(図 1(d))のどの位置をクラスターの両端と定義するかが問題となります．さらに，STEM 法では避けられないもう一つの大きな問題があります．HAADF-STEM 法では，図 2(a) に示すように，収束電子線を試料に照射し，円環状検出器で検知された高角散乱電子のシグナルと，走査させた電子線とを同期させることにより像を得ることができます．収束電子線のサイズを絞れば空間分解能が向上しますが，電子線のエネルギー密度が増加することによってナノクラスター自身が担持体上で動いたり分解したりしてしまいます．反対に，収束電子線のサイズを大きくしエネルギー密度を小さくすれば，ナノクラスターに与える影響を軽減することができる反面，空間分解能は下がり，像のノイズレベルも高くなってしまいます．ノイズレベルが高いと図 2(b) のように，強度プロファイルからサイズ

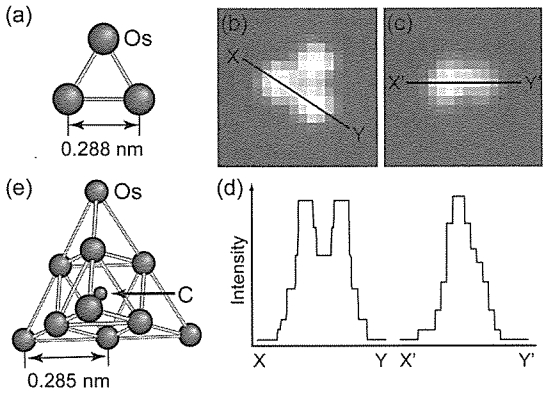


図 1　(a) $Os_3(CO)_{12}$ナノクラスターの骨格構造．(b)-(c) $Os_3(CO)_{12}$ナノクラスターのHAADF-STEMシミュレーション像．(d) (b)-(c)像中の1次元強度プロファイル．(e) $[Os_{10}C(CO)_{24}]^{2-}$ナノクラスターの骨格構造．

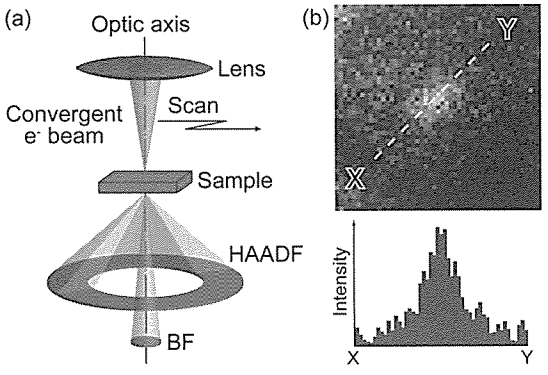


図 2　(a) STEM法における像生成原理の模式図．

を測定することは非常に困難になります．電子顕微鏡による極小ナノクラスターのサイズ分布の報告がなかったのは，これらの問題に起因していると考えられます．

測定の原理
ーぼかして測って，ぼかした効果を差し引くー

そこで，このようなジレンマを解決する方法として，ノイズレベルの高い像に「Gaussian Blur（ガウスぼかし）」を適用することを考えました．ご存知のように，Gaussian Blur とは像中の各ピクセルにGauss関数を畳み込む操作ことを言います．Gaussian Blur を施せば，ノイズを平坦化することができます．ただし，ノイズが平坦化されるだけでなく，ナノクラスター像自身がぼける，つまり大きくなってしまいますので，あとでその効果を取り除かなくてはなりません．一般に，HAADF-STEM 法によって得られた像に Gaussian Blur を施した像は，次式のように，物体関数にすべての点拡がり関数 (Point Spread Function) を畳み込み積分することにより表すことができます（図３）．

$$I = O \otimes P \otimes V \otimes F \otimes GB. \qquad (1)$$

ここで，I は最終的な像強度プロファイル，O は物体を構成する原子の電子散乱因子を加味した２次元投影物体関数，Pは電子線プローブの強度プロファイル，V は振動による点拡がり関数，F は焦点ずれによる点拡がり関数，GB は Gaussian Blur における Gauss 関数を表します．各関数の標準偏差σを用いると，ぼけの度合いの伝播は次式のように，自乗和により表すことができます．

$$\sigma_{meas}^2 = \sigma_{obj}^2 + \sigma_{probe}^2 + \sigma_{vib}^2 + \sigma_{focus}^2 + \sigma_{gb}^2. \qquad (2)$$

実験条件が良い場合，つまり振動がなく焦点が合っている場合，式 (2) 右辺の第３，４項は省略されるので，

$$\sigma_{meas}^2 = \sigma_{obj}^2 + \sigma_{probe}^2 + \sigma_{gb}^2, \qquad (3)$$

と表されます．つまり，人工的にぼかした像中のクラスターサイズ（σ_{meas}）を測定し，電子線プローブのサイズ（σ_{probe}）と Gaussian Blur のぼかしの度合い（σ_{gb}）を差し引けば，ナノクラスターの実際のサイズ（σ_{obj}）が求まることになります．

さて次に，ナノクラスターのサイズをどのように定義すればよいかという問題ですが，もっとも簡単な方法の一つは，電子散乱因子を加味した自乗平均値（Root-Mean-Square：RMS）をナノクラスターの半径（r_{RMS}）とみなすことです．

$$r_{RMS}^2 = \sum_i S_i r_i^2 / \sum_i S_i . \qquad (4)$$

ここで，r_iと S_iはそれぞれクラスターの重心からｉ番目の構成原子までの距離，ｉ番目の原子の電子散乱断面積を表し，後者はｉ番目の原子の微分電子散乱断面積をHAADF 検出器の立体角に関して積分することにより求められます．r_{RMS}は，直交座標系に変換すると$\sigma_{\mathrm{obj\text{-}x}}$，$\sigma_{\mathrm{obj\text{-}y}}$，$\sigma_{\mathrm{obj\text{-}z}}$の３つの成分に分解することができ，

$$r_{RMS}^2 = \sigma_{\mathrm{obj\text{-}x}}^2 + \sigma_{\mathrm{obj\text{-}y}}^2 + \sigma_{\mathrm{obj\text{-}z}}^2, \qquad (5)$$

各成分は式 (3) におけるσ_{obj}に対応します．STEM 像中のナノクラスターは，３次元物体の２次元投影であるので，３番目の成分$\sigma_{\mathrm{obj\text{-}z}}$は消失してしまい，実験的には$\sigma_{\mathrm{obj\text{-}x}}$，$\sigma_{\mathrm{obj\text{-}y}}$の２成分しか計測することができません．しかし，クラスターが等方的な場合，もしくは充分に多くの，ランダムな方向に向いたクラスターに関する平均をとった場合は，各成分の自乗平均値は等しくなるので，

$$\left\langle r_{RMS}^2 \right\rangle = 3\left\langle \sigma_{\mathrm{obj}}^2 \right\rangle = \frac{3}{2}\left(\left\langle \sigma_{\mathrm{obj\text{-}x}}^2 \right\rangle + \left\langle \sigma_{\mathrm{obj\text{-}y}}^2 \right\rangle \right), \qquad (6)$$

のように，RMS 半径を求めることができます．

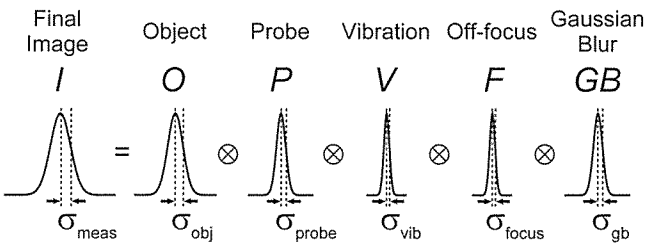


図３　HAADF-STEM法におけるぼけの度合いの伝播．物体関数にすべての点拡がり関数を畳み込むことにより最終的な像が得られる．

人工的にぼかした像中のクラスターサイズ（$\sigma_{meas\text{-}x}$, $\sigma_{meas\text{-}y}$）は，Gaussian Blur を施した実験像からクラスターを含む正方形部分を切り取り（図4(a)），その2次元強度プロファイル（図4(b)）に，2次元 Gauss 関数（図4(c)）をフィッティングすることにより求まります．図4(d) は，フィッティングして得られたσ_{meas}の自乗値を，人工的なぼかしの度合いσ_{gb}の自乗値に対してプロットした模式図を示します．σ_{gb}が小さい場合は，ノイズは完全には平坦化されないため，どの部分を切り取るかによって，得られるσ_{meas}^2値にばらつきが生じてしまいます．一方，σ_{gb}が充分に大きい場合は，ノイズによるσ_{meas}^2値のばらつきはなくなります．Gaussian Blur を施していないノイズレベルの高いクラスター像に2次元 Gauss 関数のフィッティングを行うだけでは，正確なサイズ情報が得られない理由はここにあります．σ_{gb}が充分に大きいところでのプロットの傾きは，式 (3) を見ると1になると考えられます．さらに，σ_{gb}が充分に大きいところでのσ_{meas}^2値を，縦軸（$\sigma_{gb}=0$）まで外挿することにより，人工的なぼかしの効果を含まない値を得ることができます．しかし，依然として電子線プローブによるぼけの影響が含まれていますが，実験により測定した電子線プローブのサイズ（σ_{probe}）を差し引くことにより$\sigma_{obj\text{-}x}$, $\sigma_{obj\text{-}y}$を求め，しいては式 (6) を用いてr_{RMS}を求めることができます．以上が，新しく開発した画像解析法の原理です[2]．

本手法の適用例

次に，本手法を MgO に担持された $[Os_{10}C(CO)_{24}]^{2-}$ ナノクラスターに適用した例を示したいと思います．$[Os_{10}C(CO)_{24}]^{2-}$ ナノクラスターの構造はエックス線回折などにより詳細に調べられており，図1(e) に示すような骨格構造を有します．$[Os_{10}C(CO)_{24}]^{2-}$ ナノクラスターは，図1(a) に示す骨格構造を有する $Os_3(CO)_{12}$ ナノクラスターを前駆体として合成されました．30個のクラスター像について得られたr_{RMS}値のヒストグラムおよびそれについてカーネル型密度関数推定（Kernel Density Estimation）を行った結果を図5に示します．3つのピークが必要十分であり，30個のナノクラスターを3つのグループにわけることができます．グループ1および2の平均r_{RMS}値はそれぞれ 0.201±0.009 nm，0.311±0.009 nm であり，エックス線回折による構造情報とに式 (4) より求めた $Os_3(CO)_{12}$ および $[Os_{10}C(CO)_{24}]^{2-}$ ナノクラスターの理論r_{RMS}値がそれぞれ 0.202 nm，0.295 nm であることから，グループ1は $Os_3(CO)_{12}$ ナノクラスター，グループ2は $[Os_{10}C(CO)_{24}]^{2-}$ ナノクラスターであると考えられます．両方のナノクラスターが共存するのは，前駆体である $Os_3(CO)_{12}$ ナノクラスターが反応しきれずに残ったためと考えられます．一方，平均r_{RMS}値が

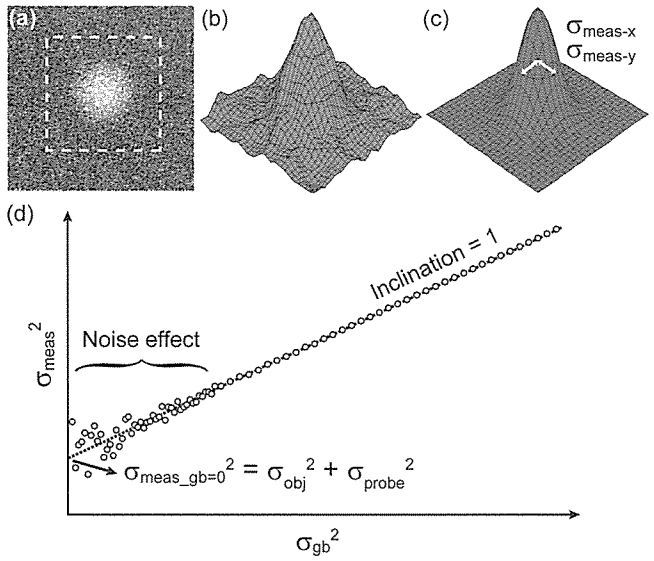


図4　(a) HAADF-STEM像(合成像)から正方形の領域を切り出す．(b) Gaussian Blurを施したHAADF-STEM像の2次元強度プロファイル．(c) 2次元Gauss関数の強度プロファイル．(d) 人工的なぼかしの度合いσ_{gb}の自乗値に対するσ_{meas}の自乗値のプロット(模式図)．

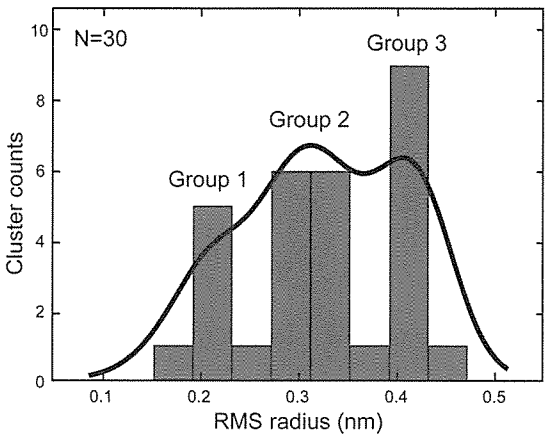


図5　Osナノクラスターのr_{RMS}値のヒストグラムおよびカーネル型密度関数推定（Kernel Density Estimation）によりもとめた確率分布.

0.416±0.005 nmのグループ3は，複数のナノクラスターが集合したもの，もしくは電子線の入射方向に重なって見えていると考えられます.

おわりに

このように，本手法を用いれば，ノイズレベルの高いHAADF-STEM像からでも1 nm以下のナノクラスターのサイズ分布を得られることを実証しました[2]．実を申しますと，これらのナノクラスターを観察し始めた当初，電子顕微鏡の電子銃の調子が芳しくなく，ブロードで強度の弱い収束電子線しか得られませんでした．そのため，どうすればノイズレベルの高い像からサイズ情報を得られるかを模索したわけです．もし，小さく強度の強い電子線プローブで観察していたならば，ナノクラスターが振動もしくは破壊されて，思うような像が得られず，本手法の開発には至ってなかったかもしれないことを想像すると，その時の幸運を感じます．近年の球面収差補正装置の開発によって，STEMの空間分解能は0.1 nm以下に達しており，原子構造のさらに微細な部分まで観察ができるようになっています．本稿で紹介いたしました手法は，空間分解能を敢えて下げ，像を人工的にぼかすことで0.01 nmオーダーの微細構造情報を失ってでも，0.1 nmオーダーの「サイズに関する」情報を得るというものであり，最近の電子顕微鏡分野の研究動向とは少し違う趣向の研究ができたのではないかなと感じております.

一層精進していく所存ですので，今後とも先輩皆様方にご指導･ご鞭撻を賜りたく宜しくお願い申し上げます.

参考文献

1) B. C. Gates, Chem. Rev. 95, 511-522 (1995).
2) N. L. Okamoto, B. W. Reed, S. Mehraeen, A. Kulkarni, D. G. Morgan, B. C. Gates and N. D. Browning, J. Phys. Chem. C, 112, 1759-1763 (2008).

談　話　室

精密角度回転核磁気共鳴法による強相関電子物質の研究

和　氣　　剛*

Angular Resolved NMR Study on Strongly Correlated Electron Systems

by Takeshi WAKI

1. はじめに

平成20年4月付けで，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．平成13年3月に京都大学理学部を卒業，平成18年3月に京都大学理学研究科化学専攻（金相学，吉村一良教授）で博士（理学）の学位を取得後，東京大学物性研究所新物質科学研究部門（瀧川仁教授）での博士研究員を経て現職に至っています．

筆者の興味は電子相関の強い物質（強相関電子物質）を探索し，その物性を微視的に明らかにすることです．強相関電子系は通常の金属と異なり電子間相互作用が無視できない系で，銅酸化物における高温超伝導やマンガン酸化物における巨大磁気抵抗など興味深い物性が発現することで知られています．このような系では，電子のスピン自由度が物性において重要な役割を果たし，物性を理解する上で微視的な磁性の知識が必要となってきます．

微視的な磁性をプローブする手段として，筆者は核磁気共鳴法（NMR）を用いてきました．NMRは，観測核周辺の電子状態を良く捉えることができ，静的また動的な磁気励起の情報が得られます．最近では，単結晶試料を用い磁場と結晶軸の角度を精密に制御することで，サイト分解性の良いデータを取れるようになり，これまで見過ごされてきた現象を捉えられるようになってきています．

本稿では，東京大学物性研究所瀧川研究室で行った精密角度回転核磁気共鳴法による強相関電子物質の研究のうち，β-$Sr_{0.33}V_2O_5$の研究[1]について紹介します．

*京都大学大学院工学研究科　材料工学専攻　助教

2. 単結晶を用いた核磁気共鳴

実験データをお見せする前に，精密角度回転核磁気共鳴法で何が分かるかについて説明します．物性を理解するためには物質の構造を明らかにする必要があり，強相関電子系では特に電荷及びスピン密度分布の知見が重要です．結晶の構造解析には周期性をもとにしたX線回折や中性子回折が用いられますが，散乱因子の似通ったイオン（価数がわずかに異なるサイト）を区別することは通常のX線回折では困難です．一方NMRは以下にみるように局所的なスピン密度，電場勾配に敏感なプローブで，回折実験と相補的な情報が得られます．

核スピンIを有する原子核を磁場中におくと，核スピンのエネルギー準位はゼーマン効果により$2I+1$つに等間隔に分裂します．それらのエネルギー差に相当する電磁波を照射するとエネルギーの共鳴吸収が起こります．電子スピンが系内に存在すると，磁場によりそれらが分極され核位置に付加的な磁場（超微細磁場$H_{hf}=gAS$，g：g因子，A：超微細磁場結合定数）を作ります．超微細磁場を考慮した核スピンのハミルトニアンは，外部磁場をH_0とすると

$$H_z=-\gamma\hbar I\cdot(H_0+H_{hf}) \tag{1}$$

（γ：核磁気回転比）と書くことができ，真空中の核スピンの共鳴周波数$\nu_0=\gamma H_0$からのずれの割合をシフト

$$K=\frac{\nu-\nu_0}{\nu_0}=\frac{H_{hf}}{H_0} \tag{2}$$

として定義します．このシフトから，観測核周辺のスピン密度に関する情報が得られます．

また，$I \geq 1$ のときには原子核の電荷分布が球対称でなくなり，核四重極モーメントと電場勾配との相互作用による項が生じます．そのハミルトニアンは

$$H_Q = \frac{eQ}{6I(2I-1)} \sum_{i,j} V_{ij} \left\{ \frac{3}{2}(I_i I_j + I_j I_i) - \delta_{ij} I^2 \right\} \quad (3)$$

(eQ：電気四重極モーメント，V_{ij} は電場勾配テンソル）と書けます．$H_z \gg H_Q$ の際には $2I$ 本の等間隔に分裂したスペクトルが観測され，それらの分裂間隔 ν_Q が磁場をかけた方向の電場勾配と

$$\nu_Q = \frac{eQ}{2I(2I-1)\hbar} V_{\alpha\beta} \quad (4)$$

のように結びついており，電荷の分布に関する情報が得られます．

超微細磁場結合定数も，実際はテンソル量なので，単結晶試料を用いて K，ν_Q それぞれの角度依存性から超微細磁場結合テンソル，電場勾配テンソルを明らかにすることができます．これらのテンソルは観測核における，スピン密度や電荷分布，また観測核位置の対称性を反映しており，対称性からサイトの同定を行うことができます．サイト個別の磁気的，電気的情報を得られることが，単結晶を用いた角度分解核磁気共鳴法の強みです．

本研究では図1に示した二軸試料回転機構を備えたプローブを用い，精密な角度制御を実現しています．

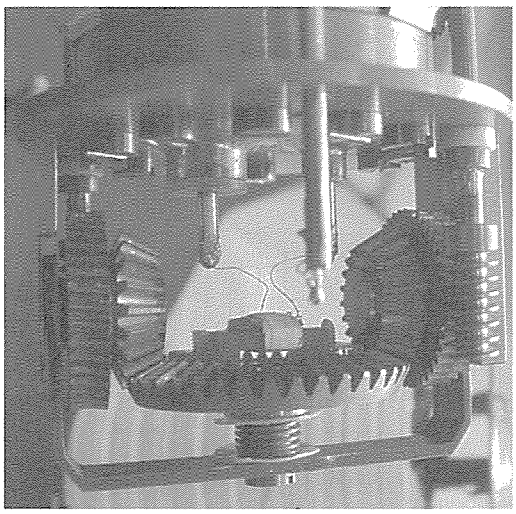


図1　二軸回転機構付きプローブ

3. 金属絶縁体転移物質β-$Sr_{0.33}V_2O_5$ におけるサイト選択的 ^{51}V-NMR

β-$A_{0.33}V_2O_5$（$A = Li^+, Na^+, Ag^+, Ca^{2+}, Sr^{2+}, Pb^{2+}$）は図2に示すように，酸素5配位もしくは6配位のVO多面体が点共有，稜共有により b 軸方向にV1，V3ジグザグ鎖（図2(b)）やV2二本脚梯子（図2(c)）を形成している擬一次元導体です．その殆どは温度誘起金属絶縁体転移を示し，絶縁体相の基底状態が A カチオンの価数により，反強磁性秩序状態（1価）およびスピンギャップ状態（2価）であることが知られています[2]．近年では圧力により電荷秩序を抑制することで発現する超伝導（$A = Na^+, Ag^+$）[3]や，電荷秩序の周期が圧力により敏感に変化する「悪魔の華」と呼ばれる相変化（$A = Sr^{2+}$）[4]が観測され注目されています．

本系の金属絶縁体転移の発現機構に関しては，結晶構造が複雑で金属相及び絶縁体相での詳細な電荷分布が不明であるため，用いるべきモデルが構築できず，電子相関によるものなのか低次元的なフェルミ面の不安定性によるものなのか明らかでは無い点がありました[1]．

そこで，本系に複数あるバナジウムサイトそれぞれの電子状態を明らかにすることが物性の理解に重要であると考え，近年良質な単結晶が得られるようになったβ-$Sr_{0.33}V_2O_5$ の金属相について角度分解 ^{51}V-NMR を行いました．この系は金属絶縁体転移温度が $T_{MIT} = 170$ K で，

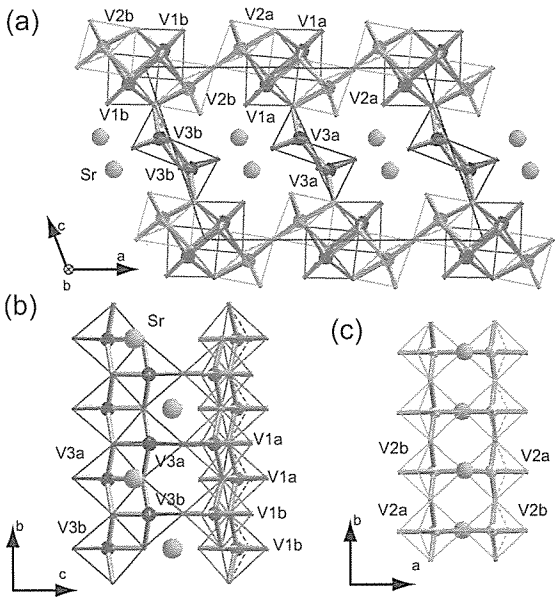


図2　β-$Sr_{0.33}V_2O_5$ の結晶構造

[1]最近の研究から，金属相は一つのV2-V2二本脚梯子と二つのV1-V3二本脚梯子が弱く結合した擬一次元導体であると考えられています．

金属相の磁化率は温度に対してほぼ一定値をとるPauli常磁性を示し，絶縁体相では$T=50$ Kでブロードなピークをとり$T=0$ Kで0に向かうスピンギャップ的な振る舞いを示します（図3）．

図4に$T=190$ K，$H=10.509$ T，$H\perp b$で測定したNMRスペクトルを示します．複雑な形状をしていますが，角度回転に対しスペクトルが連続的に変化していることが分かります．このスペクトルの解釈には群論的な知識が有用です．NMRでは，結晶学的には等価であっても磁場中で非等価になり，共鳴線が分裂する場合があります．β-$Sr_{0.33}V_2O_5$の空間群は$P2_1/a$で，あるバナジウムサイト1つにつき，単位格子中に結晶学的に等価なサイトが4つあります．これらのうち反転操作で結びついている2つづつについては磁場中でも等価ですが，それ以外の対称操作で結びついているサイトは，一般的な方向に磁場をかけると非等価になり，1つのバナジウムサイトからは2組の信号が観測されます．

図4のスペクトルは磁場をac面内にかけていますが，二回らせん軸がb軸と平行に存在するため，この対称操作で結びついているサイトはb軸に垂直つまりac面内に磁場をかけた場合は等価になり，この場合は，結晶学的に独立なサイトからは1組の信号が観測されます．本系では6組のバナジウムサイト（V1a, V1b, V2a, V2b, V3a, V3b）があり，^{51}V核は核スピン$I=7/2$であるため，$6\times7=42$本のスペクトルが期待されます．

スペクトルが重なり合っている等の理由により，すべてのスペクトルは分離できていませんが，K及びν_Qはそれぞれ

$$K(\theta)=K_1+K_2\cos^2(\theta-\phi_K) \qquad (5)$$

$$\nu_Q(\theta)=\nu_1+\nu_2\cos^2(\theta-\phi_Q) \qquad (6)$$

という角度依存性を示すことを考慮して，スペクトルをA〜Fの6サイトからの信号に分離・同定することが出来ました．

図5には同定した各サイトのK及びν_Qの角度依存性を示しています．特にKに注目すると（(A, B)，(C, D)，(E, F)）各組で極値を取る角度がそれぞれ共通していることがわかりました．Kはスピン（K_{spin}）と軌道（K_{orb}）からの寄与がありますが一般に$K_{orb}>0$なので，角度変化の大部分はK_{spin}によるものです．$K_{spin}(\theta)=(A_{cp}+A_{dip}(\theta))\chi_{spin}$（$A_{cp}$：内殻分極及び，$A_{dip}$：磁気双極子による超微細磁場結合定数）であり，$\chi_{spin}$の異方性は小さいので，角度依存性は$d$軌道にあるスピンが作る双極子磁場によるものです．

本系の場合$d^{0\sim1}(t_{2g})$なので，d軌道はVO多面体の中のバナジル結合V=O（多面体中で一番短い結合性軌道）に垂直な平面に広がっているため，それに垂直（つまりバナジル結合に平行）に磁場をかけた場合にKが極小値を取るものと期待されます．極小を取る角度と，結晶構造から決まるV=Oの方向に良い一致がみられ，これを元に信号をV1（A, B），V2（C, D），V3（E, F）に対応づけることができました（残念ながらa, bの区別はできませんでした）．

$|K|$は大まかにはスピン密度（電荷密度）に比例しているため，各サイトの電荷密度が金属状態において既に大きく異なっていることがサイト同定を行うことにより分かりました．特に本系では似通ったVna，Vnbサイトでの電荷密度の差が見られることが特徴的で，関連物質のβ-$Na_{0.33}V_2O_5$ではこのような差は見られず[5]，β-$A_{0.33}V_2O_5$系の金属絶縁体転移を考える上で重要な情報であると考えられます．

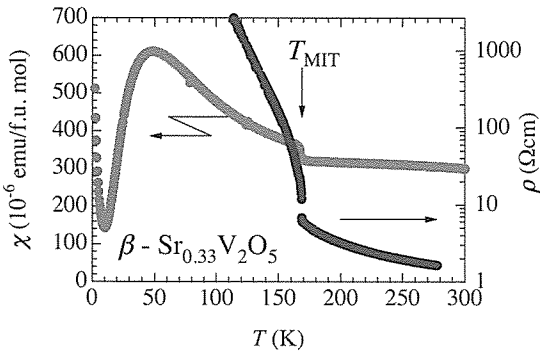


図3　β-$Sr_{0.33}V_2O_5$の帯磁率及び電気抵抗率の温度依存性．帯磁率の極低温での上昇は不純物のキュリー成分による．

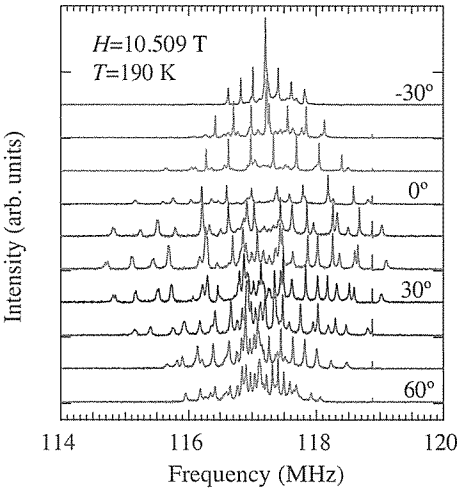


図4　$T=190$ Kにおけるスペクトルの角度依存性（$H\perp b$）

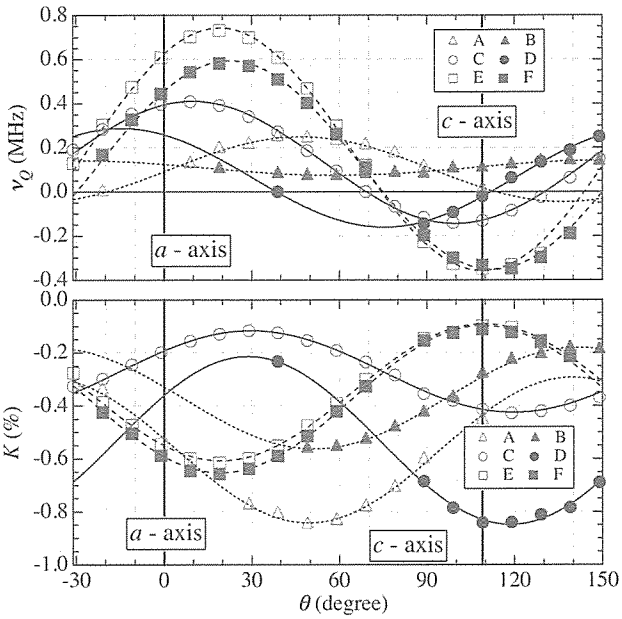


図5　T=190 K における ν_Q 及び K の角度依存性

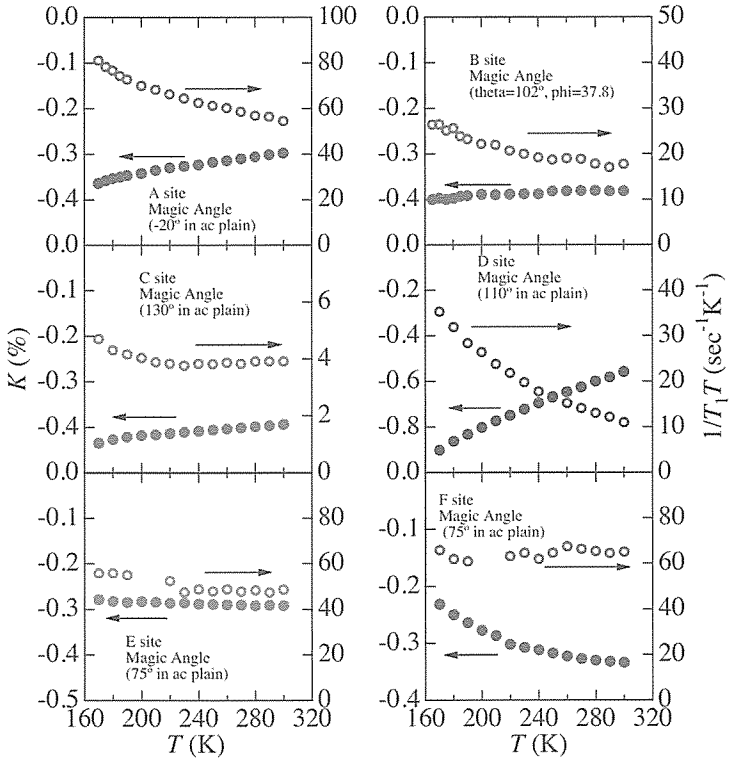


図6　各サイトの K と $1/T_1T$

図6に各サイトのマジックアングル（ν_Q=0 を取る角度，7本に分裂しているスペクトルが重なるため実験上有利）で測定した K 及び $1/T_1T$ を示します．これらについてもサイト依存性が見られサイト間で電子状態が大きく異なることが分かります．特に V2a, b サイトでは，類似したサイトであるにもかかわらず，一方は Korringa 的（C）（$1/T_1T$ が一定値をとる振る舞い，一般に金属状態で期待される），もう一方が低温に向かっ

て発散的（D）であるという極めて対照的な振る舞いが観測されました．金属状態における $1/T_1T$ の温度依存性は，通常スピンの揺らぎによると考えますが，D サイトの $1/T_1T$ の増加のベキは異常で，標準的な 1D-Luttinger 液体モデルや SCR 理論から予想されるベキを大きく超えています．

シフトについては，特に D，F で顕著な温度依存性が見られます．D サイトでは $|K|$ が増加し，転移温度直上で室温の値の 1.5 倍程度になっています．また，超微細磁場結合定数は 3*d* 遷移金属では負であり，帯磁率はわずかに増加しているため F サイトの $|K|$ が減少する振る舞いは一見異常です．

これらの振る舞いは，磁気揺らぎの温度変化だけでは解釈することはできません．D サイトの $K(\sim\chi_0)$ 及び $1/T_1T$ $(\sim\Sigma\chi_Q)$ の増強はスピン密度そのものが増加しているためと考えるのが妥当で，その増加分は F サイトの電荷密度の低下で補われているとすると矛盾なく説明することができます．我々が通常お目にかかる物質では，室温程度では相転移がおこらない限り電荷分布は温度に対し一定です．一方本系では，温度の低下に伴い V2-V2 二本脚梯子に V1-V3 二本脚梯子から徐々に電荷が流れ込んでおり，サイト間の電荷分布が相転移を伴わず連続的に変化するという新奇な状態が実現していることが分かりました．この振る舞いは，格子が作るポテンシャルに対し各サイトの電荷量が敏感に変化するということを示しており，狭い圧力範囲で「悪魔の華」のような多彩な相が出現する要因になっていると考えられます．

本系の金属相は一見単純な Pauli 常磁性金属ですが，微視的かつ精密な手法を用いることで，極端な電荷の不均一が存在しかつそれが温度依存することを今回初めて明らかにしました．また，本稿では詳細を述べませんでしたが，反強磁性揺らぎも増強されていることが NMR の結果から分かり，金属状態での電荷またはスピン密度の不均一性や電子相関により増強されたスピンのゆらぎの存在が，本系における金属絶縁体転移において重要であると考えられます．

4. 終 わ り に

ポスドク時代に行ってきた研究の一部を紹介させて頂きました．物質の研究というものは，実際やってみないと何がおこるか分からないというのが最近実感するところです．特に今回紹介した β-$Sr_{0.33}V_2O_5$ の NMR については，高圧相の研究の前段階として一応常圧相もおさえておこうという動機で始めた研究でした．マクロスコピックには一見変哲もない振る舞いであっても，微視的には複雑でありかつ豊かな物理が潜んでいることもあり得え，今まで見過ごしてきたことも多かったのではと考えさせられる教訓的な実験結果でした．

着任した中村研は発足したての研究室で，新しいことを始めるには良い環境にあります．「やって（作って，測って）みないと分からない」のですから，「やってみる」ことを大切に研究に取り組みたいと思います．

参 考 文 献

1) T. Waki, *et al.*, J. Phys. Chem Solid 68 (2007) 2143.
2) Y. Ueda, *et al.*, J. Alloys Compd. 317-318 (2001) 109.
3) T. Yamauchi, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 89 (2002) 057002.
4) T. Yamauchi, *et al.*, Phys. Rev. B75 (2007) 014437.
5) T. Suzuki, *et al.*, Phys. Rev. B73 (2006) 224421.

談　話　室

地震探査を使って地球を解明する

辻　　健*

Seismic Exploration of the Earth's Subsurface

by Takeshi TSUJI

1. はじめに

平成19年9月に社会基盤工学専攻地殻工学講座地質工学分野の助教に着任致しました辻健（つじたけし）と申します．この場を借りて，ご挨拶を申し上げると共に，これまでの略歴と研究成果の一部を紹介させて頂きます．私は早稲田大学理工学部環境資源工学科を卒業後，東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻（海洋研究所）で博士課程を修了しました．在学中は，地震探査データの取得と解析を行っておりました．また実験室での物性測定や孔内検層にも興味があり，それらの物性データと反射法地震探査データ統合して，地下の物性を三次元的に把握することも試みておりました．研究対象は地震発生帯の解明等といった理学的なものでしたが，石油探査で用いられているような工学的な手法を用いて理学的な課題の解決を試みておりました．博士後期課程を修了後は，独立行政法人海洋研究開発機構（JAMSTEC）で，半年間ポストドクトラル研究員として，三次元反射法地震探査データの解析処理に専念しておりました．本稿では，これまでに行ってきた反射法地震探査データを用いた研究を各章に分けて紹介させて頂きます．

2. プレート境界断層の構造と物性に関する研究

南海トラフなどのプレート収束帯におけるプレート境界断層の形状や物性は，日本列島に多く見られる付加体の構造形態や，大規模な海溝型地震の発生に影響すると考えられており，その解明が待たれています．特に南海トラフは，フィリピン海プレートが西南日本弧の下に沈み込む場所にあたり，日本列島の形成や地震発生過程を解明する上で重要な場所と考えられています．そこで，室戸岬沖南海トラフで取得された三次元反射法地震探査データの解析を行いました．解析の結果から，プレート境界断層の三次元的な形状を詳細に把握することができました（図1）．またプレート境界断層の発達に伴う物性変化を調べるため，三次元反射法地震探査データから振幅強度・位相・周波数・減衰定数など様々な種類のサイスミックアトリビュート（反射属性）を計算し，一般的な断面図では把握できなかった地下情報を得ることに成功しました（Taner et al., 1979）．次に数種類のアトリビュートを自己組織化マップに入力し，入力アトリビュートから構成されるベクトルが類似している領域（類似した波形情報を持つ領域）ごとに分類を行いました．類似した波形情報を持つ領域は，類似した岩石物性を持つと考えることができますので，自己組織化マップで分類された結果は岩層の変化を表していると考えることができます．その結果から，付加体内で最も海側に発達する前縁断層がプレート境界面に収斂する地点（図1の白破線）を境界として，プレート境界面性質が急激に変化していることが明らかとなりました．掘削データを用いることで，その急激な物性値の変化は間隙水圧の変化，またそれに伴う本格的なプレート間滑りの開始点を表していることが示唆されました．

自己組織化マップを用いたアトリビュート解析の結果（図1）からプレート境界断層に沿った間隙水圧の変化を捉えることができましたが，定性的な議論しかできませんでした．そこで反射法地震探査データから得られるP波速度から，南海トラフ付加体の有効応力と間隙水圧を定量的に推定することを試みました．プレート境界断層周辺の間隙水圧は，プレート間の固着の度合いに影響するため，付加体の構造形態や地震発生のメカニズムに強く関係すると考えられています．また地下応力・間隙水圧の推定は，掘削事故の防止，地下空間の開発，活断

*京都大学大学院工学研究科　助教

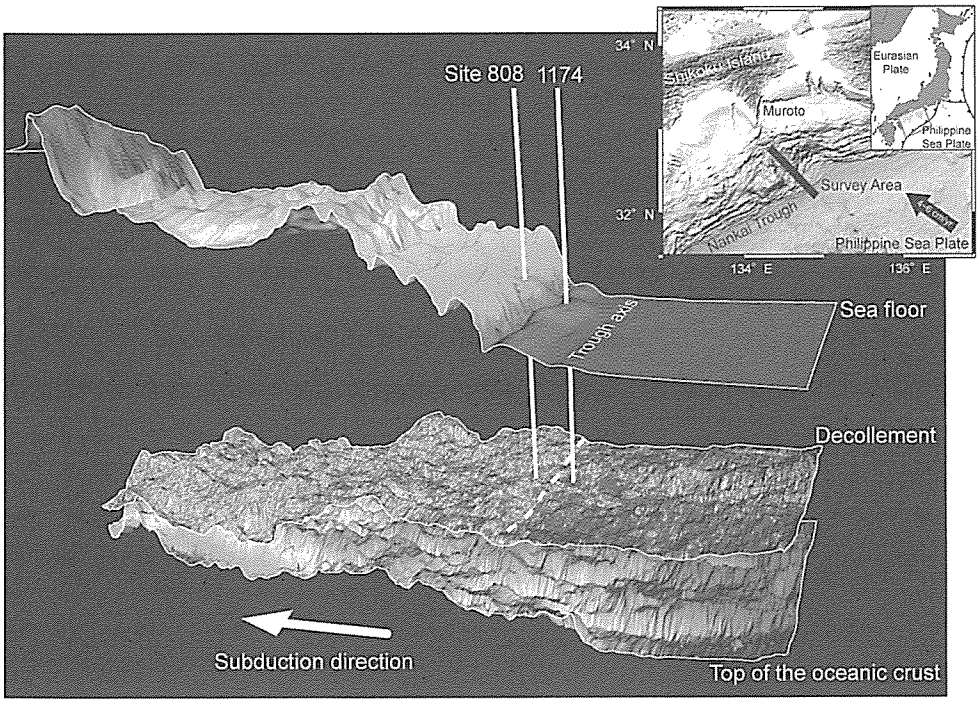


図1 海底面（Seafloor），プレート境界断層（Décollement），海洋性地殻上面（Top of the oceanic crust）の三次元形状（Tsuji et al., 2005a）．プレート境界断層の色は自己組織化マップによるクラス分けの結果を表しており，同じ色で示されている領域は類似した岩石物性を持つと考えられる．右上に四国沖南海トラフ海底地形図を示す．黒色の長方形が調査海域である．

層の評価といった幅広い工学分野においても重要な研究課題と考えられています．

反射法地震探査データ（速度データ）から地下有効応力や間隙水圧を推定する際には，標準的な圧密曲線を仮定するのが一般的です．しかし付加体内部は，(1) 掘削データが限られている，(2) 付加体内部は陸側へ向かって徐々に固結が進む，などの理由から圧密曲線を仮定して間隙水圧を推定することは困難で，その解析が進んでおりませんでした．そこで岩石物理モデル（クラックモデル）を応用して，プレート境界断層を含む付加体内部の地殻応力・間隙水圧分布を推定しました．まず間隙形状を実験室データと検層データから推測し，その推定された間隙形状を Differential Effective Medium 理論（Berryman, 1982）に入力することで有効圧に依存した理論的な弾性波速度を計算しました．これを実際の反射法地震探査データから得られる区間速度と比較することによって付加体内部の有効応力を推定し，さらに全圧との差から付加体内部の間隙水圧分布を求めました（図2）．地震断層といった地下深部では，間隙はクラックによってモデル化できるため，この手法は有効と考えられます．解析の結果から，プレート境界断層下位の沈み込み堆積物は高間隙水圧状態であることが分かりました．その原因として，プレート境界断層上位の付加堆積物による垂直応力の増加と，プレート境界断層に沿った低浸透率層が考えられます．プレート境界断層上位においても，トラフ軸（Trough axis）より陸側では高間隙水圧状態であることが推定されており，付加プロセスに伴う水平応力の増加が関係していると考えられます．

3. 深部の地震分岐断層の特性

南海地震の際に大変位を生じる断層は，反射断面図から推定されており（図3b; Park et al., 2002），分岐断層と呼ばれています（Out-Of-Sequence Thrust）．地震性の分岐断層は深部（>7 km）に存在しており，JAMSTEC の「ちきゅう」によって掘削が試みられています．しかし現時点では，深部分岐断層には達していないため，その性状を直接観察することはできておりません．そのため，断層の特性は反射法地震探査といった物理探査によって推定されてきました．そこで過去の分岐断層とされる九州の延岡衝上断層から取得された岩石試料の物性値を測定し，反射法地震探査データから得られる分岐断層の音響特性と比較することにより，深部分岐断層の全体的な構造と間隙水圧を推定しました（図3c; Tsuji et al., 2006）．延岡衝上断層の上盤は，泥質千枚岩

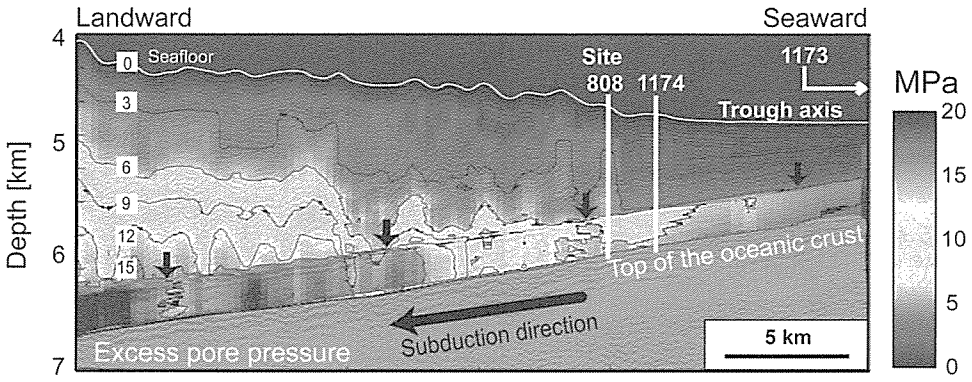


図2　南海トラフ付加体内部の異常間隙水圧分布 (Tsuji et al., 2008)．ここで異常間隙水圧とは，間隙水圧と静水圧の差である．調査海域は図1と同じである．フィリピン海プレートの沈み込み方向 (Subduction direction) を黒矢印で示す．また，プレート境界断層の位置を下向き黒矢印で示す．

から構成されており，顕著な地震波速度異方性が確認されました．断層コアの直上では，弾性波速度が非常に速く，Q値（減衰定数の逆数）も大きいことも分かりました．これはクラックが石英によって充填され，開口クラックが減少したことを反映していると考えられます．一方，下盤側は変形が顕著で，上盤よりも弾性波速度が遅く速度異方性も小さいことが分かりました．さらに延岡衝上断層のP波速度・S波速度・密度構造から理論的なAmplitude Variation with Offset（AVO）を計算し，反射法地震探査データから得られる活動的な分岐断層のAVO（Tsuru et al., 2005）と比較しました（図3g）．その結果，活動的な分岐断層の下盤側のポアソン比は，延岡衝上断層よりも非常に大きく，断層下盤側で高間隙水圧状態である可能性が示されました．

4.　モホ面の形状と特性

海台が周辺の海洋性地殻とモホ面に与える影響を解明するために，小笠原海台周辺で取得された反射法地震探査データの解析を行いました．しかし海洋性地殻以深では反射イベントが少ないことから，一般的な速度解析によって精度良い速度モデルを作成することは困難でした．そのため，重合断面図上でもモホ面などの深部の反射面は不明瞭にしか捉えられませんでした．そこで位相情報を用いた速度解析法を開発し，反射法地震探査データに適用することで，海台周辺の海洋性地殻内構造・モホ面の形状の推定を試みました．その結果，弾性波速度の決定が容易になり，モホ面を明瞭に画像化することが可能となりました（図4）．この解析で得られた反射断面図から，小笠原海台の形成時に貫入したと考えられる火成岩体を，海洋性地殻中に同定することができました．また海台周辺ではモホ面の深度が深くなることが断面図から分かりました（図4）．さらに小笠原海台の北部と南部で，海洋性地殻・モホ面の特徴が大きく異なることも解明されました．

5.　海水中鉛直微細構造の解明

反射法地震探査データを用いて，海水中の温度・塩分による微細構造を推定できることが最近の研究で分かってきました（Holbrook et al., 2003）．このアプローチを用いることで，これまでの1次元的な海洋物理観測と異なり，2次元的に海水中の微細構造を調査することができます．ここでは室戸岬沖で1999年6月26日から約2ヶ月間にわたって2日間隔で取得された反射法地震探査データを用いて，黒潮流路を横切る断面図上（図5）の微細構造を調べました．反射断面図から，室戸岬沖の黒潮流軸の深度700m以浅には鉛直スケール60～100mの層状の微細構造が存在し，これらの層構造は流軸を横切る方向に50km近くも連続していることが明らかになりました．また微細構造は，2ヶ月間にわたって取得された全ての断面図で確認できたことから，このような層状の構造はこの海域において普遍的に存在することがわかりました．このように反射法地震探査は，地下（海底下）の構造だけでなく，海洋の広範囲の鉛直微細構造を2次元的に観測する新たな手法としても期待されています．

京都大学に異動した後は，学生と共に反射法地震探査データに波形インバージョンを適用して，海水中の音波速度を精度良く決定する研究を進めています．海水中の音波速度構造が分かれば，温度構造の推定が可能となります．微細構造（形状）に加えて，温度構造を定量的に反射法地震探査データから推定できれば，海洋物理学において反射法地震探査が頻繁に用いられるようになると考えられます．

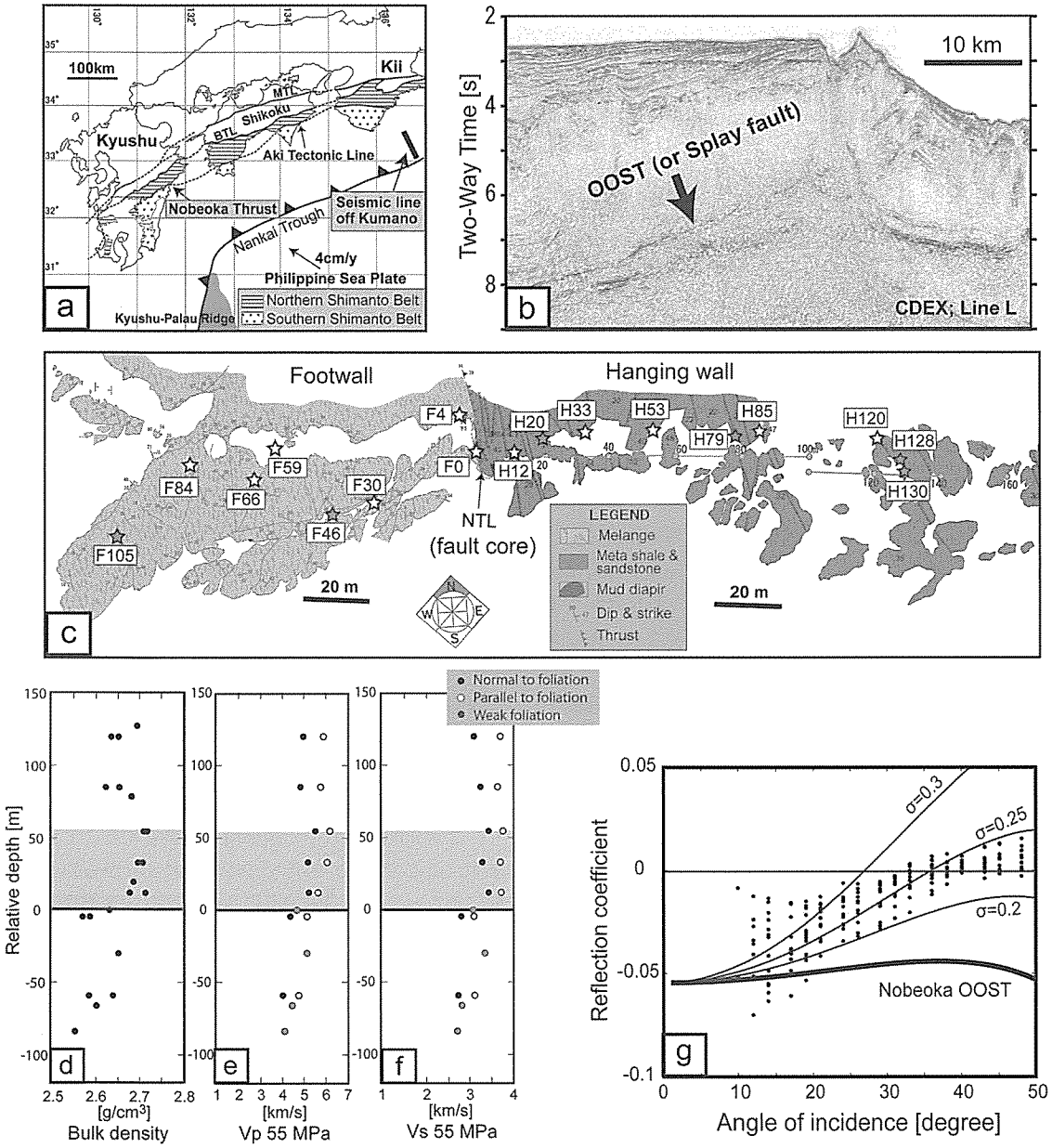


図3 (a) 延岡衝上断層の位置と周辺の地質帯．(b) 熊野沖の反射断面図でみられる地震性分岐断層（OOST）．断面図の測線は図3aの黒線で示されている．(c) 延岡衝上断層の海岸露頭でのサンプリング地点（星印）．(d) 密度プロファイル．縦軸は断層コアからの相対距離であり，上側が断層上盤に対応する．(e) 55 MPa 封圧下での P 波速度プロファイル．(f) 55 MPa 封圧下での S 波速度プロファイル．(g) 反射法地震探査データから得られる現在活動中の分岐断層の AVO（黒点：Tsuru et al., 2005），延岡衝上断層の物性値から推測される理論 AVO（太黒線），ポアソン比をパラメータとした理論 AVO（細黒線）．縦軸は反射係数，横軸は入射角である．

6. おわりに

これまでは反射法地震探査データを用いてプレート境界断層やモホ面といった理学的な研究を行ってきましたが，京都大学では資源工学的な研究に力を注ぎたいと考えています．例えば，岩石物理モデルを用いてメタンハイドレートの賦存状態を推定する研究をはじめつつあります．また地下の応力状態の推定は，安定した孔井を掘

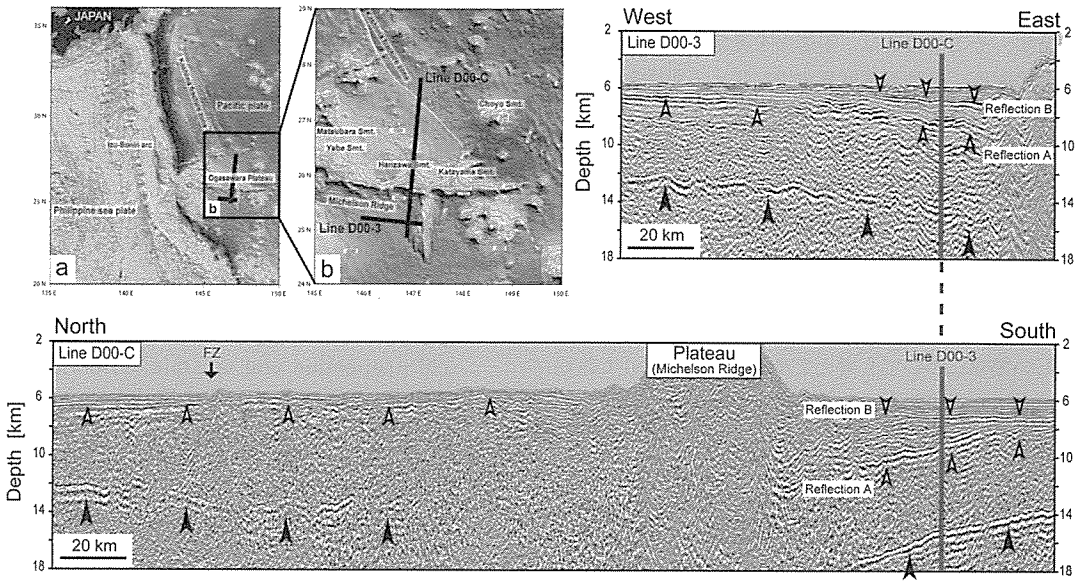


図4　小笠原海台周辺の海洋性地殻内構造とモホ面（Tsuji et al., 2007）．左上図：小笠原海台周辺の海底地形図と測線図．右上図：小笠原海台の南側を東西に切る測線．下図：小笠原海台を南北に切る測線．上向きの黒矢印はモホ面，上向きの白矢印は海洋性地殻の上面を表している．

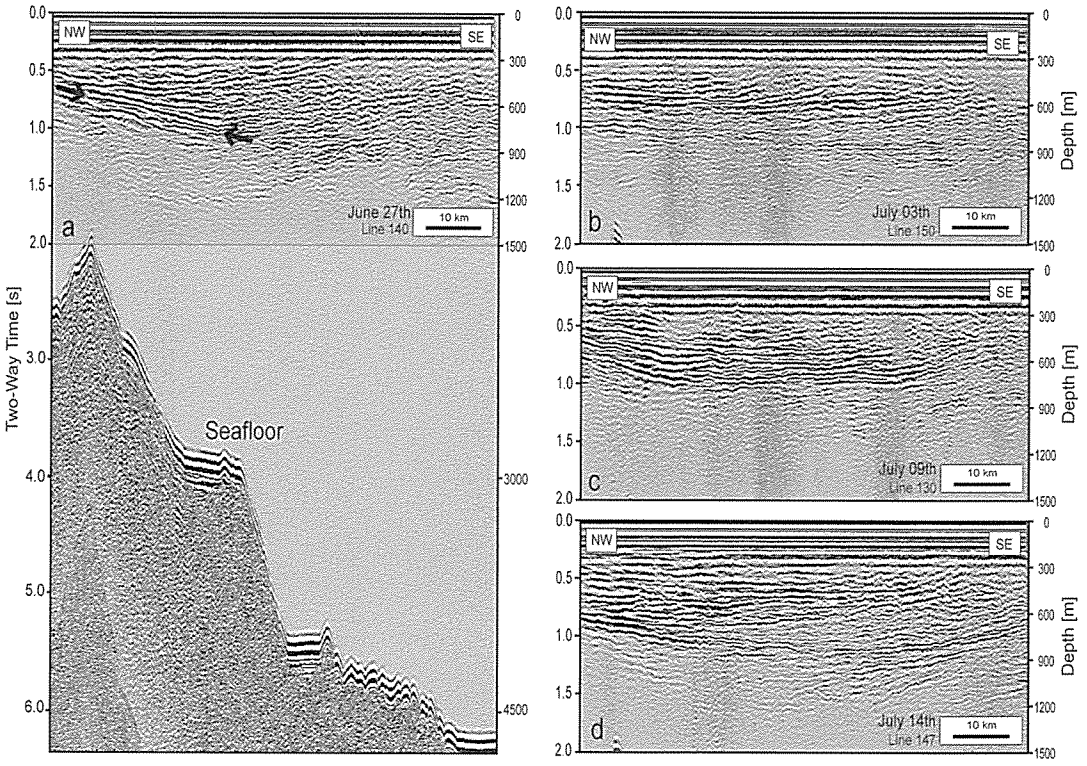


図5　反射断面図でみた海水中鉛直微細構造（Tsuji et al., 2005b）．数日間隔で同じ測線で取得された海水中の断面図を示す．調査海域は図1と同じである．

削するためにも必要で，資源開発の分野でも重要と考えられます．そこで最近は，差応力を推定するために，クラックの配列が弾性波速度異方性に与える影響を研究しています．本稿で紹介した付加体内部の有効圧と間隙水圧の推定（図2）では等方圧を仮定していますが，実際の地下環境では差応力が存在しているなどの問題が山積みです．このように反射法地震探査データの解析，手法の開発を行うことで，日本の資源探査技術の発展に少しでも寄与したいと考えております．また多角的な視点を持って地球システムを解明・理解し，地球と人間社会の望ましい関係についても考えてゆきたいとも思っております．今後ともよろしくお願い申し上げます．

参 考 文 献

1) Berryman, J. G. (1992), Single-scattering approximations for coefficients in Biot's equations of poroelasticity, *J. Acoust. Soc. Amer.*, 91, 551-571.
2) Holbrook, W. S., Paramo, P., Pearse, S., and Schmitt, R. W. (2003), Thermohaline fine structure in an oceanographic front from seismic reflection profiling, *Science*, 301, 821-824.
3) Park, J.-O., Tsuru, T., Kodaira, S., Cummins, P. R., and Kaneda, Y. (2002), Splay fault branching along the Nankai subduction zone, *Science*, 297, 1157-1160.
4) Taner, M. T., Koehler, F., and Sheriff, R. E. (1979), Complex seismic traces analysis, *Geophysics*, 44, 1041-1063.
5) Tsuji, T., H. Tokuyama, P. Costa Pisani, and G. Moore (2008), Effective stress and pore pressure in the Nankai accretionary prism off the Muroto Peninsula, southwestern Japan, J. Geophys. Res., 113, B11401, doi:10.1029/2007JB005002.
6) Tsuji, T., Nakamura, Y., Tokuyama, H., Coffin, M., and Koda, K. (2007), Oceanic crust and Moho of the Pacific Plate in the eastern Ogasawara Plateau region, *Island Arc*, 16, 361-373.
7) Tsuji, T., Kimura, G., Okamoto, S., Kono, F., Mochinaga, H., Saeki, T., and Tokuyama, H. (2006), Modern and ancient seismogenic out-of-sequence thrusts in the Nankai accretionary prism: Comparison of laboratory-derived physical properties and seismic reflection data, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L18309, doi:10.1029/2006GL027025.
8) Tsuji, T., Noguchi, T., Niino, H., Matsuoka, T., Nakamura, Y., Tokuyama, H., Kuramoto, S., and Bangs, N. (2005b), Two-dimensional mapping of finestructures in the Kuroshio Current using seismic reflection data, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L14609, doi:10.1029/2005GL023095.
9) Tsuji, T., Matsuoka, T., Yamada, Y., Nakamura, Y., Ashi, J., Tokuyama, H., Kuramoto, S., and Bangs, N. (2005a), Initiation of plate boundary slip in the Nankai Trough off the Muroto peninsula, southwest Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L12306, doi:10.1029/2004GL021861.
10) Tsuru, T., Miura, S., Park, J.-O., Ito, A., Fujie, G., Kaneda, Y., No, T., Katayama, T., and Kasahara, J. (2005), Variation of physical properties beneath a fault observed by a two-ship seismic survey off southwest Japan, *J. Geophys. Res., 110*, B05405, doi: 10.1029/2004JB003036.

談　話　室

第一原理計算に基づく多元合金の構造と相安定性の予測

弓　削　是　貴*

Structure and Phase Stability of Multicomponent Alloys: First-principles Study

by Koretaka YUGE

はじめに

平成20年4月付けで材料工学専攻プロセス設計学分野の助教に着任しました．これまでの経歴を簡単に述べますと，京都大学工学研究科材料工学専攻博士課程にて田中功教授のご指導のもと，平成20年3月に「Statistical thermodynamics calculations on structure and phase stability of multicomponent alloys」という論文で博士（工学）の学位を取得しました．本稿では，これまでの研究成果の一部についてご紹介させていただきたいと思います．

問題点：合金の構造・相安定性の予測

合金材料を開発する際，各温度・組成・圧力下での構造及び相安定性を把握することは応用上の観点から極めて重要であり，その際に平衡状態図が出発点となる．しかし，特に金属の合金表面やセラミックス合金では実験における基本的な熱力学データが不足していることが多い．その理由は第一に，低温においては構成原子の拡散が遅く実験時間内に相平衡状態に達しないことが挙げられる．また表面では，バルクと異なる組成・原子構造が一般に表面数原子層にわたって存在するために各層毎の原子構造を実際に確認することが困難であることや，分子吸着により表面の相安定性が容易に変化してしまうことが考えられる．一方でセラミックス合金では融点が高いものが多く，その場合は相平衡状態に到達するために超高温や特殊な雰囲気制御が必要になる．さらに応用上合金は多元系になることが多く，実験から状態図を決定するには膨大なデータ点が必要になるという問題点もある．したがって理論計算，特に経験的なパラメータを必要としない量子力学の理論に基づく第一原理計算を用いて合金表面やセラミックス合金の構造と相安定性を決定することの重要度は高く，合金材料の効率的な研究・開発のためには必要不可欠である．

近年の著しい計算技術や計算機性能の発展により，第一原理法に基づく金属の2元系合金バルク材料に対する状態図計算の研究は多数行われている．その一方で合金表面の平衡状態については，表面偏析を定性的に議論するにとどまっている．また多元系のセラミックス合金については，第一原理法に基づいた定量的な平衡状態図計算はこれまで行われていないというのが現状である．本研究では多元系の金属およびセラミックス合金のバルクや清浄表面，分子吸着した表面などについての構造と相安定性を第一原理計算に基づいて精確に予測する一般的な手法の開発と，その現実の系への適用を行ってきた．

計算手法：クラスター展開法

合金の相安定性を議論するためには一般に数百～数千程度の原子数とそれに対応した数百万程度の原子の配置数を考慮する必要があり，第一原理に基づいてこれら全ての原子配置に対する電子系のエネルギーを計算することは現実的に不可能となってくる．そのためこれまでにさまざまな代替手法が提案されてきており，特にSanchezらが開発した「クラスター展開法」が第一原理計算との組み合わせにより高い精度で平衡状態図を予測する強力な手法として確立されてきた．クラスター展開法では与えられた原子配置に対する物理量を原子配置の規格直交基底関数で展開する手法である．また計算コストも数百～数千原子程度の規模の計算が現在の標準的なCPUを用いて数時間～1日程度と現実的である．具体的な手続きとしては，複数の規則構造の電子系および格子系のエネルギーを第一原理法や第一原理格子動力学法

*京都大学大学院工学研究科　材料工学専攻　助教

により計算し，クラスター展開法に適用することで多体間のクラスター有効相互作用を抽出する．クラスター展開法における基底関数展開は現実には有限項で打ち切る必要があるため，各合金系に対して最適なクラスターを選択する必要がある．ここでは遺伝的アルゴリズムを用いて，クラスター展開法と第一原理法で予測した物理量の誤差が最小になるようにクラスターを選出する．この最適なクラスター有効相互作用をモンテカルロ（MC）法などに適用することで，数百～数千原子程度の原子数に対する物理量の統計平均を迅速に評価することができる．

Pt 合金系表面の構造と相安定性

遷移金属は合金化することで表面近傍の組成や原子配置が変化し，触媒活性や化学的性質に大きく影響を及ぼしうることが知られている．例えば近年では固体高分子形燃料電池の電極材料について，Pt と他の金属元素を合金化することで電極における Pt の使用量低減や触媒機能の改善に向けた研究が盛んに行われている．しかしながら，Pt 合金系表面の構造に関する基本的な熱力学データは，各温度・組成に対する安定な原子配置やその規則化の傾向，および表面偏析についてさえ定量的な議論がなされていない．そこで本研究では Pt-Rh 合金，Pt-Cu 合金という二つの合金系をモデルとして選択し，その構造と相安定性について吟味した．Pt，Rh，Cu は fcc 構造を有し，その原子半径は Pt に比べて Rh では 3% 程度，Cu では 8% 程度小さい．Pt-Rh 合金は原子配置の規則化の傾向が弱いため，表面偏析が各元素の表面エネルギーの差に主に支配されていると考えられる系である．また Pt-Cu 合金は逆に原子配置の規則化の傾向が強いために，表面偏析が表面エネルギーの差と混合のエンタルピーの寄与とのバランスで決定されると考えられている．

まず，Pt-Rh 合金に関する結果を示す．図 1 はクラスター展開法により求めた，表面各層毎のオンサイトの表面偏析エネルギーである．ここで偏析エネルギーが負の場合は Pt 原子が，正の場合は Rh 原子が表面に優先的に偏析する傾向にあることに対応する．したがって，表面第一層には Pt が，第二層には Rh が偏析することが予測される．表面偏析を定量的に評価するには，図 1 で示したオンサイトの表面偏析エネルギーに加え，表面での混合のエンタルピーの寄与を考慮し，モンテカルロ法により平衡状態をシミュレートする必要がある．図 2 は $T = 1373$ K の $Pt_{25}Rh_{75}$ 合金 (111) 表面に対して，これらの寄与を全て考慮した場合の表面各層毎の Pt 原子の濃度の計算結果を示す．図 1 の表面偏析エネルギーの符合から予想されたように表面第一層に Pt が，第二層には Rh が偏析していることが確認され，過去の実験報告と同様の傾向を示している．また，表面 1-10 層における Pt の濃度平均は 35% 程度であり，バルクの Pt 濃度 25% よりも高い．これは Pt の表面エネルギーが Cu のそれよりも低いため，表面近傍には Pt が優先的に偏析することと関連付けられる．

図 3 には同条件下での最表面の原子配置の計算結果と STM 像（過去の実験報告）を示す．暗い輝点が Pt，明るい輝点が Rh 原子を示す．実験の STM 像に特徴的な Rh 原子 3-7 個程度からなる鎖状の原子配列が計算で良く再現されている．この短範囲の規則化は第一層において第一近接が異種原子ボンドを好む傾向に加え，第二層での原子の短範囲規則化と第一層・第二層間での相互作用が大きく寄与していることが明らかとなった．最後に図 4 に $Pt_{25}Rh_{75}$ および $Pt_{50}Rh_{50}$ 合金 (111) 表面における

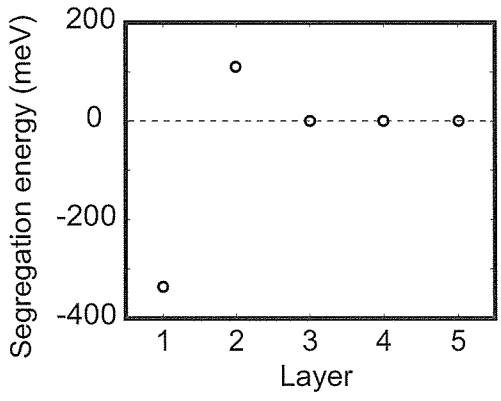


図 1　Pt-Rh 合金における表面各層毎のオンサイトの偏析エネルギー

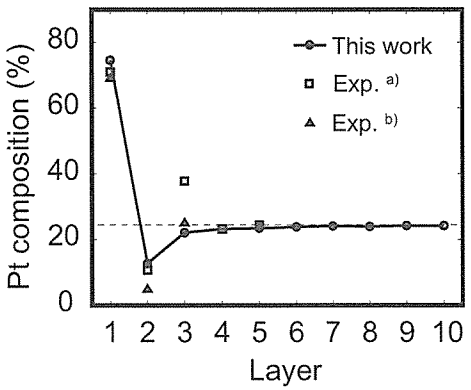


図 2　$T = 1373$ K における $Pt_{25}Rh_{75}$ 合金 (111) 表面の各層毎の Pt 濃度

Reference
a) E. Platzgummer et al., Surf. sci. 419, 236 (1999).
b) D. Brown et al., surf. Sci. 497, 1 (2002).

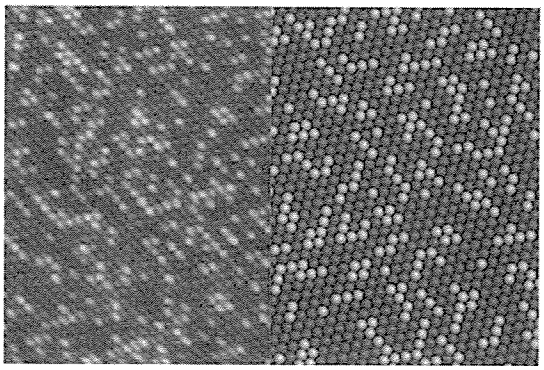


図3　T=1373Kにおける$Pt_{25}Rh_{75}$ (111) 合金表面第一層の原子配列
左：STM 像（実験 a)）
右：計算結果
Reference
a) E.L.D. Hebenstreit et al., Surf. Sci. 441, 441 (1999).

基底状態での表面近傍の原子配置を示す．どちらの組成においても表面第一層は Pt 原子のみで構成されており，Pt の最表面への偏析エネルギーの寄与が支配的であることが示唆される．一方で第二層では原子配置に顕著な差が確認される．$Pt_{25}Rh_{75}$ 合金の第二層は Rh 原子のみで構成されるのに対し，$Pt_{50}Rh_{50}$ 合金では表面に特有の $\left(\sqrt{3}\times\sqrt{3}\right)$R30° 規則構造を有している．また第三層ではそれぞれ $D0_{22}$ および "40" という規則構造を有することが確認されたが，これは $Pt_{25}Rh_{75}$，$Pt_{50}Rh_{50}$ 合金バルクの基底状態における規則構造に対応する．したがって，Pt-Rh 合金においては，表面に特有な組成および原子配置は表面第一層と第二層に現れることが示唆される．

第二層における原子配置の違いは，表面における混合のエンタルピー，配置のエントロピー，および表面偏析エネルギーにより定性的に説明ができる．すなわち，$Pt_{25}Rh_{75}$ 合金では Rh 原子の第二層への偏析の寄与が表面混合エンタルピーの寄与に比べて大きいため，層内での原子配置の規則化の傾向が弱められる．その結果，図2に示したように T=1373 K という高温では第二層の Rh の濃度が90% 程度であったものが，絶対零度付近では配置のエントロピーの偏析への寄与がなくなるために Rh 原子のみから第二層が構成されることになる．一方 $Pt_{50}Rh_{50}$ 合金では混合のエンタルピーの寄与が無視できない．そのため，絶対零度付近では第二層は Rh 原子のみから構成されるのではなく，表面に特有の規則構造を有することになる．この構造は T=300 K 付近で規則不規則転移を示すことが MC シミュレーションから明らかとなった．この相転移温度は，同シミュレーションで

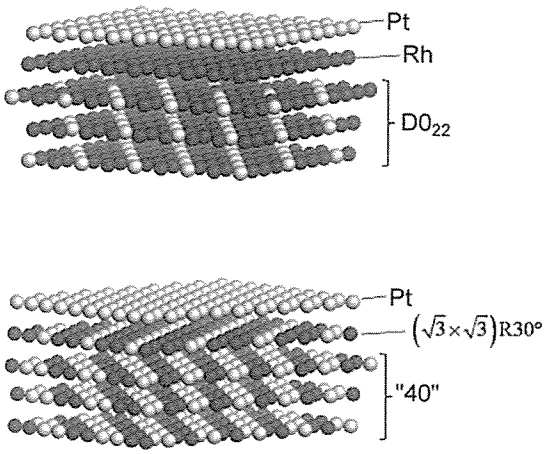


図4　基底状態の Pt-Rh 合金 (111) 表面近傍の原子配置
上図：$Pt_{25}Rh_{75}$ 合金
下図：$Pt_{50}Rh_{50}$ 合金

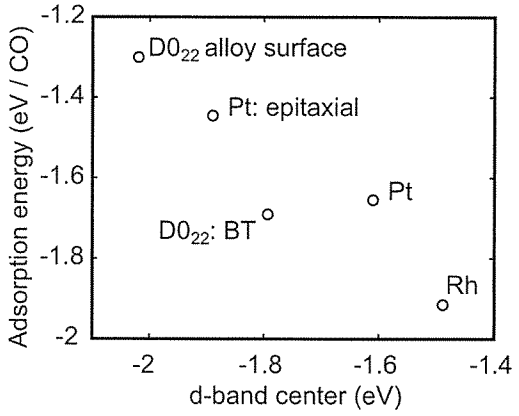


図5　dバンドの重心に対するCO分子の吸着エネルギー

予測されたバルクの基底状態の規則構造 "40" の相転移温度 T=120 K よりも高く，したがって絶対零度の基底状態から温度を上昇させた場合にバルクが先に規則不規則相転移をし，次いで表面第二層が相転移することを意味する．このように第二層の原子配置の規則化の傾向が強いことは，最表面への Pt 原子の強い偏析の傾向，および最表面と第二層の間の第一近接について同種原子を好む傾向があることとも関連付けられる．

次に，合金化による分子吸着特性の変化を吟味するために，Pt-Rh 合金 (111) 表面に対する CO 分子吸着エネルギーを第一原理法により計算した．図5は CO 分子の top サイトへの吸着エネルギーを，フェルミエネルギーを基準とした最表面原子の d バンドの重心に対してプロットしたものである．図中の "$D0_{22}$ alloy surface" は図4に示した $Pt_{25}Rh_{75}$ 合金の安定な表面構造，"Pt" は純粋な Pt 金属表面，"$D0_{22}$: BT" は $Pt_{25}Rh_{75}$ 合金バルクと

同じ規則構造を有する表面構造，"Pt: epitaxial" は純粋な Pt 金属を，表面に平行な格子定数が $D0_{22}$ 合金バルクと同一になるように epitaxial strain を与えた表面構造である．"$D0_{22}$ alloy surface" や "Pt: epitaxial" において Pt の d バンドの重心は純粋な Pt 金属表面よりも低い．これは，定性的には $D0_{22}$ 合金の格子定数が純粋な Pt 金属の格子定数よりも小さいことと関連付けられる．すなわち最表面と第二層の間で電荷の移行がないことを仮定すると，表面に平行な方向に格子定数が圧縮されることで Pt の d バンドの2次モーメントが増大し，さらに Pt の d バンドの電子数が5より多いために d バンドの重心がフェルミエネルギーに対して下がる．この d バンドの低下が CO 分子の吸着を弱めると考えられる．図5より，CO 吸着エネルギーは合金化による格子定数の変化に加え，最表面だけでなく第二層目以降の原子配列や組成にも大きく依存することが確認され，同時に合金の安定な表面構造を精確に予測することの重要性が示唆される．

次に，$Pt_{25}Cu_{75}$ 合金 (111) 表面に対する計算結果を簡単に紹介する．$Pt_{25}Cu_{75}$ 合金バルクは基底状態で $L1_2$ 規則構造を有し，相転移温度は $T=900$ K 付近である．本研究ではこの相転移温度より低い温度範囲における合金の構造と相安定性を吟味した．図6は Pt-Rh 合金の場合と同様の手法により求めた，表面各層毎のオンサイトの表面偏析エネルギーである．表面第一層から第四層において偏析エネルギーは全て負であり，Pt が各層に優先的に偏析する傾向があることを示唆している．図7には $T=800$ K 付近における Pt の偏析濃度を各層毎にプロットしたものである．ここで注目すべきは第二層において Cu 原子が優先的に偏析していることであり，これは図6において Pt の第二層への偏析エネルギーが負であることと逆センスである．すなわち第二層における Cu 原子の偏析は表面における原子配置の規則化の傾向が大きく寄与していることが分かる．このように Pt-Rh 合金とは異なり，$Pt_{25}Cu_{75}$ 合金のように原子配置の規則化の傾向が強い系においては，優先偏析原子種を偏析エネルギーの符合から定性的に予測することにさえ困難が生じる．したがって，合金表面の構造や相安定性について信頼度の高い予測を行うためには，本手法のように表面各層毎の偏析エネルギーや混合のエンタルピーの寄与を精確に評価することが重要となる．最後に，$Pt_{25}Cu_{75}$ 合金の基底状態での表面近傍の原子配置を吟味するため，表面第一層から第三層に対して可能な全ての原子配置に対する表面の混合のエンタルピーを計算した．図8には表面の混合のエンタルピーを，表面の Pt 濃度に対してプロットしたものを示す．図より，$Pt_{25}Cu_{75}$ 合金には a-e で示された5つの最安定あるいは準安定な表面の原子配置があることが分かる．計算の結果，基底状態での表面

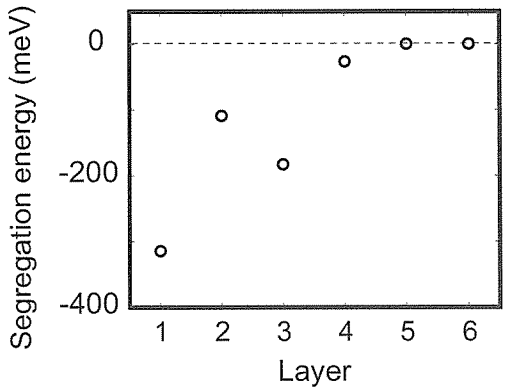


図6　$Pt_{25}Cu_{75}$ 合金における表面各層毎のオンサイトの偏析エネルギー

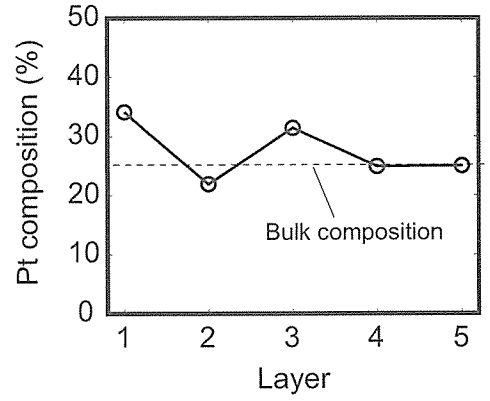


図7　$T=800$ K における $Pt_{25}Cu_{75}$ 合金 (111) 表面の各層毎の Pt 濃度

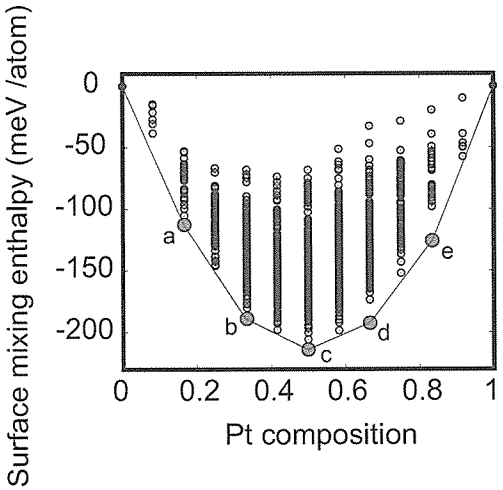


図8　表面の Pt 濃度に対する表面の混合のエンタルピー．a-e の5つの大きい丸は最安定あるいは準安定な表面の原子配置に対応する．

三層の Pt 組成は30% 程度であり，したがって基底状態の表面は a と b の原子配置が2相共存していることが明らかになった．ここで a と b について，最表面は各々 p(2x2) および p(1x2) 規則構造，第二層はともに Cu 原子のみから構成され，第三層は p(2x2) および p(1x2) 規則構造を有している．このように安定あるいは準安定な表面の原子配置は表面の Pt 濃度に大きく依存する．そのため図8のような安定な表面構造の包括的な探索により，第二元素を表面に導入して表面近傍の組成を変化させた場合に，どのような表面合金構造が熱力学的に安定に存在しうるかを予め精確に予測することも可能になる．

立方晶窒化ホウ素とダイヤモンドの三元系平衡状態図

立方晶窒化ホウ素（c-BN）とダイヤモンドはともに高い融点と硬度を有している．そのためその化合物である立方晶炭窒化ホウ素（c-BNC）はダイヤモンドよりも化学的に安定で，かつ高い硬度を有する新しい材料の候補として，これまで盛んに研究が行われてきた．しかし，立方晶炭窒化ホウ素の構造と相安定性については，未だ統一的な見解が得られていない．すなわち，c-BN とダイヤモンドは安定な中間相を作るのかあるいは2相分離するのか，また固溶限はどの程度なのか？といった点が明らかになっていない．本研究ではこれまでの2元系合金表面の計算手法を，多元系の平衡状態もシミュレーションできるように拡張し，c-BN とダイヤモンドの3元系セラミックス合金の平衡状態図作成を行った．まず安定な中間層の存在を吟味するため，c-BNC の可能なすべての原子配置に対する形成エネルギーを組成の関数として計算した．その結果，全ての原子配置に対して形成エネルギーは正の値をとり，c-BN とダイヤモンドの間に安定な中間相は存在しないことを確認した．図9には64原子までから構成される原子配置の中で，各組成において正ではあるが最も形成エネルギーが低かった原子配置について，その affinity を第一近接に対して計算した結果を示す．ここである原子 I と J に関する affinity α_{IJ} は次式で定義される：

$$\alpha_{IJ}=\frac{P_{IJ}(\text{system})}{P_{IJ}(\text{disorder})}-1$$

ここで右辺の第一項の分母は原子配置が完全に不規則な場合の IJ 原子ペアの存在確率，分子はわれわれが注目している原子配置についての IJ 原子ペアの存在確率である．したがって，$\alpha>0$ の場合は完全に不規則な原子配置を基準としたときに IJ 原子ペアが多く，逆に $\alpha<0$ の場合は IJ 原子ペアが少ないことが分かる．したがって図9より，c-BNC においてはエネルギーの低い原子配置は第一近接では B-N および C-C 原子の組み合わせを好み，B-C および C-N を嫌う．さらに B-B および N-N 原子の組み合わせは α がほぼ-1であることから原子配置中にほぼ存在していないことも分かる．このような傾向は IV-IV，III-V，III-IV，IV-V，III-III，V-V 族の組み合わせにおいて共有結合を形成する電子数の過不足からも定性的に理解される．最後に，図10には c-BN とダイヤモンドについての平衡状態図の計算結果を示す．図に示された固溶限は，Grand canonical ensemble の下での MC シミュレーションにおいて，与えた化学ポテンシャルに対する組成の統計平均を計算することで求められる．また c-BN とダイヤモンドは共に高い体積弾性率を有するため，有限温度における相安定性を議論するためには格子振動の効果が重要であると考えられる．さらに，実際に c-BNC の合成は通常数～数十 GPa 程度の圧力下で行われるため，相安定性の圧力依存性も吟味する必要がある．そのため図10中には破線で示された圧力

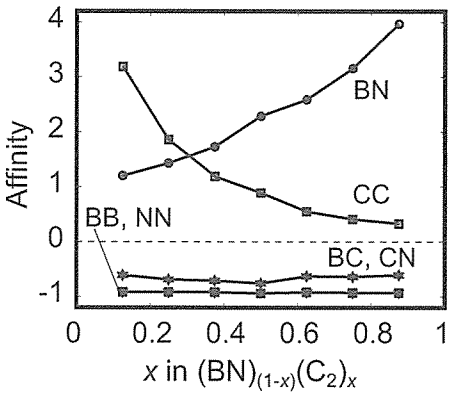


図9　各組成に対して形成エネルギーの低い c-BNC の原子配置に対する，第一近接における Affinity の計算値．

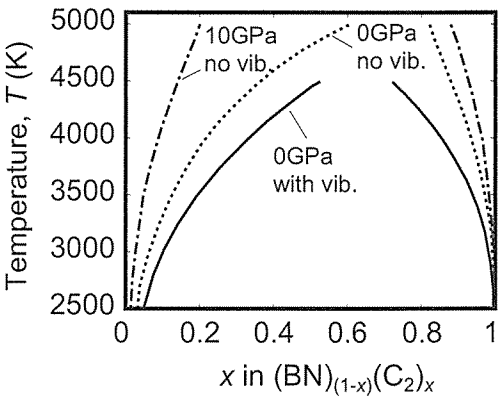


図10　c-BN とダイヤモンドの平衡状態図

$P=0$ GPa かつ格子振動の効果を無視した場合（0 GPa, no vib.），実線で示された圧力 $P=0$ GPa かつ格子振動の効果を考慮した場合（0 GPa, with vib.），および一点鎖線で示された圧力 $P=10$ GPa かつ格子振動の効果を無視した場合（0 GPa, no vib.）の3つの場合についての固溶限の計算値を示す．図より圧力 $P=0$ GPa の場合，格子振動効果は固溶限を大幅に増大させることが確認される．これは定性的には，c-BN とダイヤモンドの固溶体の形成に伴って第一近接の B-N および C-C 原子ペアが減少することにより格子振動のエントロピーが増大することで説明される．さらに，圧力を印加すると固溶限が減少しているが，これは固溶体の形成により c-BNC の体積がベガード則に対して正のずれを示し，これがギブス自由エネルギーの PV 項に正の寄与をしていることと関連付けられる．さらに，c-BN とダイヤモンドは融点以下では全率固溶しないことも確認された．

お わ り に

私はこれまで，理論計算による合理的な合金材料開発を目標に，第一原理計算に基づいて合金表面や多元系合金の構造と相安定性の予測を行ってきました．今後は，これまでに開発した計算プログラムを拡張し，より現実的な材料開発に利用できるような一般的な手法の確立を目指していきたいと考えています．材料工学専攻の助教に就任して数カ月，まだまだ浅学の身ではありますが精一杯研究に邁進していく所存です．今後ともご指導・ご鞭撻のほど宜しくお願い致します．

研究速報

工学研究科　社会基盤工学専攻

地殻工学講座
ジオフィジクス分野

ジオフィジクス分野は物理探査工学を中心とした地球物理関連の研究を行った．弾性波や電磁波を用いた地球計測や波動伝播メカニズムの解析を行った．探査対象域は海洋下の深部構造から陸上の極めて表層の領域まで多岐に及んだ．

波動伝播現象の解明および波動解析手法の基礎研究

平成19年度より遮熱塗料の赤外線散乱メカニズムの解明を目的とした研究を開始した．微小セラミック球を含む塗料には太陽光による温度上昇を抑制する効果があり，外壁塗装等への応用が進められている．本現象はセラミック球の光の散乱が主要因であるとの仮説を立て，Mie の理論に基づいた波動散乱による温度抑制現象の解明を進めた．

また，津波発生時の音響波伝播解析を継続して行った．2003年十勝沖地震の際，海底で水深相当振幅約 40 m に達する音響波が観測された．音響波の初動観測による津波伝播予報の高速化を目指し，海面と海底面の変動量・変動時間・疎密波の関係を調べた．水の圧縮性を考慮し，NS 方程式・連続の式・エネルギー式を有限差分法で解き，疎密波の伝播シミュレーションの開発を進めた．

さらに，波動理論の物理探査処理への応用を図り，分散関係式を用いた 3 次元 PS 波分離手法の開発を進めた．陸上反射法地震探査では，地層境界面において P, SV, SH を含む複数の波が発生する．性質の異なる波を分離することによりイメージング精度の向上を図ることが可能となる．反射波を平面波近似することにより成立する分散関係式を用い，3 次元における P, SV, SH 波分離手法を開発した．

海洋探査記録の解析手法および解析結果の地質解釈に関する研究

レシーバー関数解析による速度不連続面の推定方法の検討を進めた．地震記録からレシーバー関数を導き，地下構造モデルに対して適切なインバージョンが可能か検討した．デコンボリューションにより P 波と PS 変換波の時間差を検出し，不連続面深度を正確にインバージョン可能なことを示した．

また，海底電磁探査による沈み込み帯の解析を行った．メタンハイドレート賦存層などの海洋地殻浅部の高比抵抗層の検出を目指し，海底電磁探査法の高精度化を進めている．平成19年度は東海沖の記録解析に成功し，プレートの沈み込みに伴う低比抵抗領域の傾斜が確認された（図1）．

さらに，弾性波構造探査処理断面に基づいた沖大東海嶺発達史の解明を議論した．大陸棚の延伸を図るには，沖大東海嶺が海洋海嶺ではなく海底海嶺である証明をする必要がある．海底地震計により収録された弾性波伝播記録を用い，海嶺周辺の地殻構造の解明を進めた結果，海底海嶺であることを示唆する特徴が確認された．

電磁波を用いた新しい浅層構造調査手法に関する研究

電波時計に用いられる JJY 標準電波を用いた電磁探査法の開発を開始した．シミュレーションで検討した結果，既存の VLF 探査法に比べ，探査深度が浅いが高分解能となることが確かめられた．実用化に向けて計測装置の作成を行い，実測記録の解析を進めている．

また，偏波成分の解析による地中レーダ記録の高精度処理手法を検討した．数値計算により作成した受信記録と現場で取得した受信記録に対し，ベクトル波動場から誘導した解析手法とスカラー波動場から誘導した解析手法を適用し，得られた反射構造を比較した．その結果，ベクトル波動場から誘導した解析手法の方が，測線と埋設物のなす角度に影響を受けない反射構造を得ることができた．本解析手法を用いることで，測線方位による影響の少ないより精度の高い反射構造を得ることができた（図2）．

教　授　三ケ田　均
准教授　後藤　忠徳
助　教　尾西　恭亮

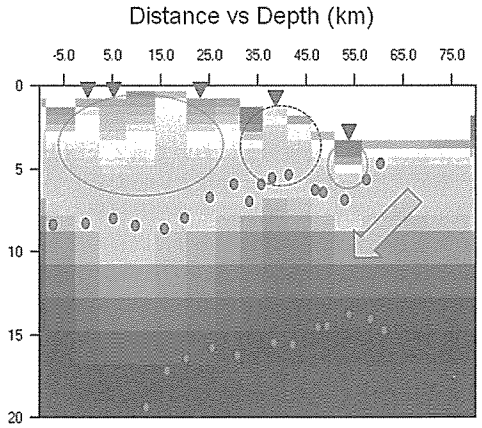


図 1　海底電磁探査によるプレート沈み込み帯の比抵抗分布

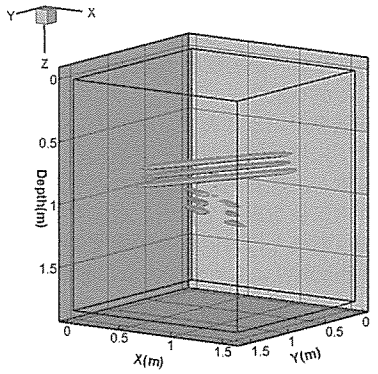


図 2　直交する埋設管の地中レーダによるイメージング結果

工学研究科　社会基盤工学専攻

地殻工学講座 地質工学分野

CO_2 地中貯留における貯留量評価手法と地化学的評価に関する研究

CO_2 地中貯留は地球温暖化をもたらす温室効果ガス削減の有効な手段として注目されており，Sleipner や In Salah のような商業規模の実施例がよく知られている．地中貯留において，帯水層に圧入された CO_2 挙動のモニタリングは基本的かつ重要な課題である．本研究室では，比抵抗や弾性波を用いた CO_2 モニタリング手法の開発や，CO_2 貯留量評価に関する基礎研究を行っている．現在は新潟県南長岡ガスで実施された CO_2 圧入実証試験の結果と，室内で行われている比抵抗と弾性波の同時測定の実験結果の比較検討による CO_2 貯留量評価手法の確立に焦点を絞っている．

一方で地化学的観点からは，地層水への CO_2 溶解による坑井のケーシングセメントに及ぼす影響評価も進めている．これまでの室内実験ではケーシングセメント中の鉱物溶解による二次鉱物の生成や二次鉱物による孔隙の充填を確認した．このほかに，貯留層の岩石鉱物との地化学反応による鉱物固定メカニズムや地中貯留の長期安全性に関する基礎研究も行っている．

地震波干渉法を用いた地下構造イメージングに関する研究

地震探査は資源・防災分野において重要な調査手法であり，本研究室では地震波干渉法といった新しい探査手法の開発を試みている．地震波干渉法とは異なる2地点間の地震応答を合成する手法であり，既存の探査手法の概念にとらわれない，震源－受振点の配置が可能となる．地震波干渉法を適用した最新の事例を以下に示す．

1. 能登半島で観測された自然地震記録から，能登半島周辺の地下構造のイメージングを行った．能登半島の震源は偏在している影響で，合成記録にノイズが卓越した．これにより，地震波干渉法では，震源と測線の位置関係が重要であることが確認された．
2. 都市型ノイズである地下を走行する電車振動に対して地震波干渉法を適用し，防災の面で重要である浅部地下構造のイメージングを行った．この電車振動は P 波に加えて S 波にも卓越していたため，人工震源で発生させるのが困難な S 波を用いた解析を容易に行うことができた．
3. 地震波干渉法を用いることで，坑井内に物理的な震源を設置せずに坑井間反射法を実施した．人工震源を地表に設置し，坑井内は受振器のみを設置することで，坑井内に仮想震源を合成した．その結果，通常の坑井間反射法とほぼ同様の断面図が得られ，干渉法が坑井間反射法にも有効であることが示された．

干渉 SAR による平成19年新潟県中越沖地震に伴う地表変動解析

干渉 SAR は，合成開口レーダ（SAR）によって取得された2回の観測記録の位相差から，観測間に地表で生じた変位を検出する手法である．衛星搭載 SAR は上空数百 km からの観測であり，広域にわたる地表変動分布をとらえることが可能となる．現在，新潟県中越沖地震に伴う柿崎地域の干渉 SAR 解析結果に注目している．この地域では震源から比較的距離が離れているにもかかわらず，トンネルの局所被害が確認されるなど，地盤変動が活発であったことが報告されている．干渉 SAR の解析結果から，これまで解明されていなかった断層の存在が明らかとなった．現在は，柿崎地域の地殻変動の要因について考察を行っている．

アナログモデル実験と数値シミュレーションを用いた海底斜面崩壊に関する研究

日本は複数のプレートの沈み込むプレート衝突帯に位置し，プレートテクトニクスに伴う地殻変形は，ひずみエネルギーを蓄積し巨大地震を引き起こしたり，斜面崩壊などの自然災害を引き起こしたりすると考えられる．本研究では南海トラフ付加体などにみられる海底斜面の崩壊現象に対してアナログモデル実験を行い，海洋プレートの沈み込みに伴う変形により引き起こされる海底斜面の崩壊をモデル化した．また実験データを画像解析することにより，その斜面崩壊には周期性や特徴的な崩壊パターンが存在することが明らかになった．これらの情報は，観測が難しいとされる海底斜面崩壊の研究に対して有益な崩壊過程の概念を与えるものである．今後はプレートテクトニクスに伴う地殻変形を理解するために，アナログモデル実験と数値シミュレーションを組み合わせたアプローチを行う予定である．

固体流体連成シミュレーションの資源開発分野への適用

格子ボルツマン法と個別要素法をカップリングさせた数値シミュレーション手法を用いて，資源開発分野に関わる現象の解明に取り組んでいる．格子ボルツマン法は，流体の仮想粒子の分布関数を計算し，その分布関数の発展方程式を解く数値解析手法である．また，この手法は，複雑かつ時間変化する境界形状を有する流体のシミュレーションに適している．一方，個別要素法は不連続体解析の一つであり，岩石の破壊現象の再現が可能であるとされている．本研究では，この固体流体連成解析手法を用いて，石油生産時における貯留層から坑井内へ流入する砂粒子の挙動（出砂現象）を解析している．その結果，ドロー・ダウンの大きさの違いによるパーフォレーション・トンネル周辺の砂粒子の挙動を再現することができた．今後は，①岩石の強度および粒度分布の違いが出砂障害発生にもたらす影響，②断続的な出砂障害の発生メカニズムについて検討する予定である．

教　授　松岡　俊文
准教授　山田　泰広
講　師　薛　　自求
助　教　辻　　健

工学研究科　社会基盤工学専攻

地殻工学講座
地殻開発工学分野

＜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＞

岩石の弾性係数の異方性に及ぼす間隙の分布特性及び岩石を構成する鉱物の分布とその弾性係数異方性の影響を調べるため，異方性を示す鉱物の配向は一様であるがその含有率が異なる数値岩石モデル，異方性を有する鉱物は一種類であるがその配向がランダムである数値岩石モデル，岩質部は等方的な弾性係数テンソルを有しているが間隙の分布が異方的な岩石モデルを作成し，それらに対して均質化法を用いて弾性係数テンソルを評価することで，異方性鉱物の含有率および配向，間隙の分布特性が岩石の弾性係数異方性に及ぼす影響について調べた．その結果，等方性鉱物の中に配向が一様な異方性鉱物が存在する場合，その異方性鉱物のもつ異方性が岩石全体の異方性を決めること，異方性鉱物の含有量が増加するにしたがって弾性係数テンソルの異方性は直線的にその鉱物の異方性に近づくことがわかった．また，異方性の鉱物の配向がランダムである場合，従来から言われてきたように岩石全体としては等方的な弾性係数となることを確認することができた．さらに，空隙の分布に異方性がある場合，その岩石の弾性係数テンソルの異方性は，間隙分布の異方性と一致することが確認できた．

＜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＞

複雑な幾何形状を有するフラクチャー内部の二相流動挙動は，フラクチャー表面の濡れ性，二相間の界面張力や粘性比などの影響を受けるものと考えられる．そこで，本研究では，フラクタル理論に基づく Glover らの方法を用いて数値フラクチャーモデルを構築し，その表面の濡れ性を変えた場合と水油間の界面張力の大きさを変えた場合それぞれについて二相流格子ボルツマン法を用いた流動シミュレーションを行うことで相対浸透率を評価し，相対浸透率に及ぼすフラクチャー表面の濡れ性及び水油間の界面張力の影響について考察した．その結果，従来，直線近似されていたフラクチャーの相対浸透率曲線は，フラクチャーの複雑な幾何形状の影響を受けて曲線として得られることがわかった．さらに，水油間の界面張力を小さくすることで毛細管圧力が小さくなり圧力勾配方向の流動が支配的になる．このため水油の各相ともに相対浸透率曲線が上昇し直線的になる傾向を示すことがわかった．

＜AE 測定による石油増進回収法の効率改善に関する研究＞

新規油田の発見が乏しくなってきた現在，代表的な増進回収法である水攻法による石油の回収率の向上は重要であるが，そのためには圧入した流体がどこまで侵入し，どのように生産性の向上に寄与しているかを知ることが重要である．このための方法として流体の注入に伴う AE の観測が有望であり，すでに北海油田の Ekofisk においては試験的な測定が行われているが，注水と AE 発生の関係は十分解明されておらず，Ekofisk の測定においても注水フロントは明確に把握できていない．そこで，本研究では，注水に伴う AE 観測が有用であるかを調べるために，ある実油田における水攻法を念頭においた岩石三軸試験を行った．具体的には，ある実油田における地圧状況を模擬した三軸応力下の岩石供試体に間隙水圧を徐々に上昇させ，岩石の破壊に伴う AE の発生メカニズムの検討を行った．その結果，間隙水圧の上昇による岩石供試体の巨視的破壊は，有効応力の低下により破壊基準に抵触して発生したことで説明でき，水攻法で生じる岩盤の破壊と AE の発生は，Mohr-Couloumの破壊規準と Terzaghi の有効応力理論で説明できることが分かった．また，その際，せん断破壊に伴う大きな AE が発生することが確認でき，水攻法に伴う AE の観測が有用であることがわかった．

＜炭酸ガスの地中貯留に関する研究＞

炭酸ガスの地中貯留では，帯水層，石油貯留層，枯渇ガス層，石炭層など様々な地層が対象となる．石炭層での貯留は，炭酸ガスを圧入して安定的に固定（吸着）させるとともに，石炭層中の未利用のメタンガスを生産する方法であり，微細な細孔構造を有する石炭の吸着材としての性質を利用したものである．堆積岩の中にも微細な細孔構造を有するものがあることから，石炭層と同様に吸着により炭酸ガスが固定化する可能性も考えられる．そこで本研究では，微細な細孔構造を有する岩石として来待砂岩，幌延珪藻質泥岩，そして比較対象としてベレア砂岩を用いて，岩石の炭酸ガス吸着特性を調べた．具体的には，それぞれの岩石を炭酸ガスに一定期間曝すバッチ試験に加えて，窒素ガス吸着法による比表面積，細孔分布の測定，吸脱着ヒステリシス曲線による細孔形状の推定を行い，細孔構造と吸着特性との関連性について検討を行った．その結果，比表面積が大きく，メソ孔と呼ばれる細孔径を多く含んだ岩石ほど吸着し，また，温度が低く，圧力が高いほど吸着量が増加した．さらに，吸脱着ヒステリシス曲線による細孔形状の推定の結果，吸着特性に岩石の細孔形状が強く影響を及ぼしていることが分かった．

教　授　石田　毅
准教授　村田　澄彦
助　教　深堀　大介

工学研究科　社会基盤工学専攻

地殻工学講座
ジオメカトロニクス分野

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 NATM などの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や既設トンネルに対する効果的な耐震補強の方法はいまだ確立されていない．当研究室では，このような山岳工法トンネルの耐震性向上に関して種々の検討を行っている．本年度は，既設トンネルの変状抑制の方法として実施あるいは提案されている裏込め注入工，繊維シート補強，ロックボルト工などについて，これらが耐震性の面からどれほど有効であるかについて，FEM による数値解析にもとづいて検討した．その結果，地震時の覆工の被害は背面空洞が存在する場合に大きく現れることから，裏込め注入工が覆工全体の剛性を高め，地震時の変形や破壊の抑制に最も有効であることが明らかとなった．一方，ロックボルトや繊維シート補強は，破壊の拡大や崩落の防止という点で一定の効果があることが示された．

適応信号処理を用いたトンネル壁面画像の処理

トンネル覆工の健全性を診断するために，壁面画像を自動的に採集し，その画像からひび割れの密度や大きさを測定するとともに，その経時的な進行状況を追跡することが行われている．しかしながら，トンネル全長にわたった膨大な画像記録からひび割れを抽出する作業は，未だ人的な手段に負うところが大きく，これを自動化する方法の開発が希求されている．トンネル画像においてひび割れの自動抽出が困難であるのは，画像の輝度や色調が緩やかに変動するのみならず，水濡れ箇所などで局所的に大きな変化を含む場合があるからである．本研究では，エコーキャンセラーなどで知られている適応信号処理の方法（固定的なフィルターではなく，フィードバックによってフィルター係数の最適化を行いながら逐次的に処理を行う方法）が，ひび割れの自動抽出にどれほど有効であるかについて検討した．フィルターサイズやフィルター更新における慣性係数をどのように適正に選ぶかなど，克服すべき点はいくつかあるものの，従来に比してかなりの高速化が期待できる方法であることが確認された．

レーザー超音波法による面状領域検査の高速化

構造物壁面の剥離や亀裂など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評価できる方法の開発が望まれている．当研究室では，このような広域一括検査への展開を視座に，レーザー超音波法について種々の検討を行っている．この方法は，パルスレーザーによる対象材へのスポット的な超音波の励起と，レーザードップラー振動計（LDV）による対象表面の波動観測を組み合わせたものであって，完全な非接触性と波動励起・観測点のスキャニングが容易であることを特徴とするものである．これまで，波動励起を１点とし，そこからの波動の広がりを，対象表面上の多数点で観測する方法を採用していたが，観測波形に十分な SN 比を確保するには，観測点ごとの LDV の焦点調整あるいは多数回のアベレージングが必要で，所要時間が膨大となるという難点があった．線形弾性体に対する相反定理が適用可能であるとすれば，パルスレーザーによる起振と LDV による受振を入れ替えても，全く同等の観測が可能なはずである．そこで，本研究では，LDV による観測を１点とし，パルスレーザーの照射を多数点で行う，いわゆる従来の送受を反転させた方式について検討を行った．模擬剥離試料を対象とした実験から，この送受反転方式が，従来法と同等以上の SN 比を持つものであること，またそれゆえに観測時間の大幅な削減が期待できることが示された．

構造用ケーブル及びグラウンドアンカー用の新しい荷重計の開発

吊構造物のステイ用ケーブルや，斜面安定用のグラウンドアンカーにおいては，安全性確保の観点から，その緊張力が規定どおり保持されているかどうかを定期的あるいは常時的に監視することが，最も直接的かつ重要なことであって，そのことに用いる簡便な荷重計の開発が望まれている．このような場で利用される荷重計としては，環境変動に対する十分な安定性と，長期使用に耐える優れた堅牢性を備えていることが必要である．本研究室では，これら長尺鋼線材やケーブルなどへの適用を前提とする新しい荷重計の開発を進めている．昨年度は，従来のひずみゲージ式ロードセルに替わるものとして，静電容量型の荷重計の開発を行ったが，本年度は，応力磁気効果にもとづく方法について検討を行った．ケーブルの一部を永久磁石によって長手方向に近飽和状態に磁化し，応力によるケーブルの磁化状態の変化を，空間磁界強度の変化として捉える方式のものであって，既設のケーブルにそのまま適用できるという特徴を有している．基本設計と試作器の製作を行い，この方式の荷重計が十分な感度を持つものであることを確認した．

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

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，原位置岩盤試験結果に基づく微視的パラメータ（幾何学的パラメータ，力学的パラメータ，水理学的パラメータ，力学－水理学連成パラメータ，気液二相流パラメータ）の決定法を検討した．原位置において実施したボーリング透気試験結果のシミュレーションによって，微視パラメータの設定と，それを用いた実際の岩盤挙動を評価し，当手法の適用性を確かめた．

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．

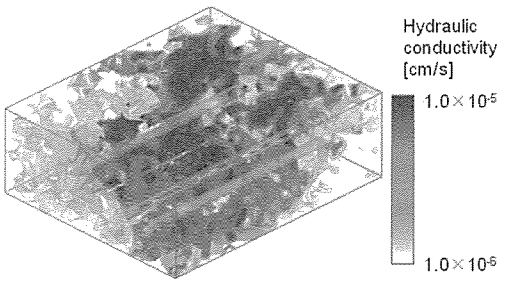
本年度は，岩盤内地下水の挙動を高精度に予測できる3次元水理地質モデルの構築を目的とし，地球統計学シミュレーションを用いたモデル化手法の提案を行った．まず対象とする領域で得られた透水特性のデータを基に地球統計学シミュレーションの一つである Sequential Indicator Simulation を用いて複数の水理地質モデルを作成した．次にそれぞれの水理地質モデルに対して3次元非定常浸透流解析を行い，一定の検証規準を満足するモデルのうち，地下水の実挙動を最も精度良く再現できるモデルを対象領域の水理地質モデルとした．この手法を水封式燃料地下備蓄タンク建設中の原位置岩盤に適用し，従来から用いられている均質モデルや Ordinary Kriging によるモデルと比較した結果，実測の間隙水圧の経時変化を高精度に評価できることを確認した．

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．

本年度では，グラウトの流動特性と充填過程を考慮した数値解析モデルを構築し，岩盤の亀裂性状および注入パラメータからグラウト充填効果を予測する手法を構築した．さらに，本手法を原位置岩盤に適用し，予測したグラウト充填範囲とグラウト注入実績との関係を検討することで手法の適用性を検討した．

教　授　青木　謙治
准教授　新苗　正和
助　教　水戸　義忠



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

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

電析法で作製されたナノラメラー Co-Cu 合金の機械的性質

ナノ結晶金属は高い強度を示すものの，延性が著しく悪くなること（破断伸び 1% 以下）が問題となっている．ナノ結晶材料の特性には粒界の影響が強く現れることから，粒界制御によって高強度，高延性が同時に発現させることが可能である．そこで本研究では，ナノスケールのラメラー構造を持った Co-Cu 合金を電析法により作製し，その機械的性質を調べた．

作製した Co-Cu 合金の透過型電子顕微鏡観察写真より，作製した Co-Cu 合金は高密度のナノスケールラメラー構造を有していることが分かった．ラメラー間隔は 3 nm，結晶粒径は 110 nm であった．また，EDX 分析より，Co93wt%，Cu7wt% であった．

引張試験の結果より，ナノラメラー Co-Cu 合金は降伏応力 1420 MPa，最大応力 1875 MPa を示した．これらの値はバルク材の3倍以上高い値である．また，ナノラメラー Co-Cu 合金の破断伸びは 3.3% であり，1% 以下しか伸びを示さないナノ結晶金属に比べ高い値が得られた．このような結果が得られたのは，ナノラメラー界面が転位の堆積および発生場所として作用したためと考えられる．

速度依存性から活性化体積を算出したところ，3.3 b^3 となった．このような小さな活性化体積から，変形の律速過程がナノラメラー界面からの転移の放出に関係があると考えられる．

AZ31 マグネシウム合金板材の室温張出成形性

資源の枯渇問題や環境・エネルギー問題などへの対応策として，材料のリサイクルや軽量化に関する研究開発が進められている．その中でマグネシウム合金は，リサイクル性に優れた軽量材料として最近注目を集めている．しかし，その反面，（特に冷間での）塑性加工性に乏しいという大きな欠点があり，これがマグネシウム合金の実用化の促進を阻んでいる．そこで本研究では，マグネシウム合金の加工性向上の指針を得ることを目的に，AZ31 マグネシウム合金板材の室温での一軸および二軸応力下における機械的性質を調べるとともに，それに及ぼす結晶粒径や集合組織の影響を検討した．

一般に，マグネシウムの室温延性を向上させるためには結晶粒の微細化が有効であることが知られている．ところが，室温での引張試験と張出成形試験の結果，結晶粒微細化は一軸引張応力下において室温延性向上に寄与するものの，二軸引張応力下では逆効果をもたらすことが明らかになった．それに対して，集合組織の弱化は一軸・二軸ともに，板材の室温延性・成形性の向上に大きく寄与することが分かった．

この原因は，それぞれ板厚方向の変形しやすさにあると考えられる．結晶粒微細化は非底面<a>すべりを活性化させるが，これは板厚方向の変形には寄与しない．一方，集合組織の弱化は，底面が圧延方向に対して傾くため，板厚方向の変形に寄与する．この違いが，二軸引張応力下での変形特性の違いをもたらしたと考えられる．

マグネシウム合金板材の実用化を目指すに当たって，一軸引張応力下のみならず二軸引張応力下での変形特性を理解することは極めて重要である．本研究によって，マグネシウムの室温張出成形性向上には，結晶粒微細化ではなく集合組織の弱化が有効であることが見出された．

岩石の繰り返し載荷による疲労破壊の解析

近年，放射性廃棄物の地層処理処分を始め，様々な目的で地下空間の利用が考えられており，岩石の変形・破壊メカニズムや透水特性の解明は重要な課題となっている．しかし，岩石の破壊や透水特性に密接に関連するマイクロクラックの分布や成長の過程には未知の部分も多い．繰り返し変化する応力に対する岩石の応答は，複雑なものと推察されている．本研究では花崗岩を用いて，試料の推定一軸圧縮強度のおよそ 7～8 割の応力を繰り返し負荷する試験を行い，試料中に存在するマイクロクラックを，蛍光観察法を用いて観察し，画像処理手法を適用して進展パターンを解析した．また，試験中のひずみをモニタリングし，載荷の繰り返しによっておこる特徴的なひずみ挙動の解析を行った．

蛍光法による観察の結果，試験の初期段階からマイクロクラックの生成，成長が観察され，とくに黒雲母粒子と隣接する石英粒子内でクラックの発生，進展が顕著であることが分かった．破壊に至る載荷回数の半数程度を越えると，これらのクラックが粒界を越えて他の粒子内部まで伸展する様子が認められた．これらの現象は，黒雲母粒子と石英粒子の弾性率の違いによるものと推定された．また，載荷が繰り返されることで，これらのクラックが選択的に載荷方向に伸展する傾向があらわれるものと推測された．

また，ひずみ挙動の解析では，最も高い応力を与えた際の最大周ひずみの変化率に注目したところ，破壊前に周ひずみが急激に増加するより前で，変化率が段階的に増加していることがわかった．この結果より，周ひずみが安定的に推移している際にも，試料内部に何らかの変化が段階的に生じていると推測された．

教　授　馬渕　　守
准教授　楠田　　啓（平成20年度より宇宙資源エネルギー学分野准教授）
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

マグネシウム合金板の温間引張曲げ成形におけるスプリングバック特性

マグネシウム（Mg）合金は，リサイクル可能でかつ比強度，比剛性が高いため，軽量化材料として期待されている．しかし Mg 合金は常温での塑性加工性が乏しいため，通常のプレス加工への適用は困難である．そのため温間プレス加工の適用が期待されているが，技術的課題が多く幅広い適用には至っていない．その技術課題の一つが，離型後の材料に生じるスプリングバック（弾性回復による形状変化）である．スプリングバックは成形品の形状精度に関わる重大な問題となっている．そこで,本研究では Mg 合金板（AZ31B）の温間引張曲げ成形におけるスプリングバック特性の解明を目的として，研究を推進している．本年度はスプリングバックに及ぼすマクロな材料特性の影響に焦点を当てて検討した．実験には独自に設計・製作した温間引張曲げ成形金型を用いて，25°（室温）～ 225°の範囲で行った．その結果，温度上昇に伴いスプリングバック量は大きく減少し，225℃ ではスプリングバックがほとんど発生しないことが判った．スプリングバック量に影響を与える因子として材料の引張強さとヤング率に注目し考察を行ったところ，温度上昇に伴う引張強さ低下の影響がより支配的であるため，温度上昇に伴いスプリングバックが減少することが明らかとなった．

（板津　正明，現：新日本製鐵（株））

傾斜した加熱固体平板に衝突するカーテン状水膜噴流の熱伝達特性

カーテン状水膜噴流は衝突点近傍において高い熱伝達率を有することから，鉄鋼製造プロセスの圧延工程における水冷に用いられている．これまでカーテン状水膜噴流と加熱固体面との熱伝達特性を実験的に研究した例は多く存在するが，水を冷却媒体とした低レイノルズ数（$Re < 10^4$），斜め衝突の研究例は少なく，それゆえにこれらの条件下での知見が乏しいのが現状である．そこで，傾斜した加熱固体面に衝突する水膜流の熱伝達特性を解明することを目的に実験によって研究を行った．厚さに対して幅が十分大きい断面形状のノズルから鉛直下方に噴出するカーテン状水膜噴流を，通電加熱したインコネル板に衝突させ，衝突点近傍におけるインコネル板の温度分布を熱電対で計測した．実験はインコネル板と噴流の衝突角，流量，ノズル出口-加熱固体平板間距離を変化させることで行った．垂直衝突では，衝突点においてヌッセルト数はピークをとり，そこから離れるに従い減少する．一方斜め衝突では，ヌッセルト数はピーク位置を離れるに従って減少するという定性的な分布は同様であるが，ピーク位置が衝突点より傾斜の上側に移動すること，さらに傾斜を急にするほどこの傾向は顕著となることがわかった．

（伊吹　和也，現：JFE スチール (株)）

ロール成形における電縫管成形有限要素シミュレーションモデルの開発

近年，石油資源枯渇に対する古井戸の再開発，深井戸化のための鋼管として，開発コストの低減を目的として，従来のシームレス管から電縫管への移行が進められている．また，自動車の軽量化および衝突安全性の両立から高強度薄肉鋼管の使用が拡大しており，高強度鋼板からの電縫管の造管技術の確立が望まれている．これまで，電縫管成形において行われてきた理論解析は簡易なものに過ぎず，主として経験則に基づいた設計が行われてきた．これは，電縫管成形が多段のロール成形であるため，プレス成形などに比べて解析対象が大規模であることにも因る．しかし，計算機能力およびソフトの向上により，実測の難しい造管中の詳細な板形状，応力，ひずみの解明，さらにはスプリングバックの予測が可能になってきている．本研究では，高強度鋼板を用いた最適な造管工程の解明のため，有限要素シミュレーションモデルを開発することを目的としている．本年度は，まず，MSC. Marc を用いてモデル化し，基礎的事項として，計算結果の安定に必要な板長さ，摩擦条件の影響，ロール径の影響などを調べた．

（櫻田　優貴，現：（株）デンソー）

管内脈動流による固体粒子の輸送機構

エアリフトポンプとは水で満たされた鉛直管内に空気を注入し，空気と液体の密度差による上昇流で液体や固体粒子を上方へ輸送するデバイスであり，化学工業，鉱業，海底資源の海上への輸送といった分野への適用がなされている．固体粒子の輸送を目的としたエアリフトポンプの操業において，粒子の輸送量は空気注入部以下の固液2相流部の流動に支配され，また鉛直管内全体は脈動状態となっている．そのため，エアリフトポンプの輸送効率を上げるためには固液2相脈動流中の固体粒子の挙動を把握することが重要である．そこで本研究では，垂直管内を上昇する脈動流中での固体粒子挙動の観察実験を行った．液相としては水，固相としては直径 3，5 mm の球形アルミナおよびガラス粒子を用いた．供給する脈動流の周波数，電磁弁の開閉時間比，脈動の流量の変動幅を変化させた．脈動は電磁弁の開閉を周期的に切り替えることで管内流量を規則的に変化させ実現した．固体粒子の挙動を2台のデジタルビデオカメラを用いて同期撮影し，三次元的に観察した．また，管内圧力の時間変動を測定した．その結果，輸送効率を高めるには，脈動周波数を上げること，脈動の流量の変動量を大きくすることが有効であることが明らかになった．

（芝辻　悠太，現：住友金属工業（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

銅電析に及ぼす重力レベルの影響

ULSI を中心とした半導体分野において，デバイスの微細化とともに銅配線プロセスにダマシン法が導入された．これを契機として，マイクロエレクトロニクス分野で電気化学プロセシングが大きく見直されつつある．ここでは，析出初期過程の核発生および結晶成長過程を制御することが重要である．このため，電気化学プロセシングでは数多くの添加剤効果が試行錯誤的に確認されている．しかしながら，電解液中のイオンの物質移動と核発生成長過程のカップリング効果について，定量化された検討はほとんど行われていない．本研究では電気化学プロセシングにおける非平衡析出反応場へ新たな自由度として種々の重力レベルを導入し，ナノ空間領域での結晶成長制御を試みることにした．重力レベル（以下，α）をパラメーターとし，種々の基板上の Cu 電析過程について，定量的に検討した．その結果，1 G 下，析出量一定（31.8 mC/cm^2）において，電位が卑になるにつれて，核密度は増加し，平均直径は小さくなった．更に，いずれの電位においても，A/C 配置の方が C/A 配置に比べて，核密度が高く，平均直径は小さくなった．ここで隣接核間距離について，ポアソン分布とのずれを分析した結果，核発生が抑制される“exclusion zone”の存在が確認された．高重力場においては，α の増加とともに飽和核密度がわずかに増加し，300 G 以降で飽和する傾向が見られた．電流の時間変化についても，?によって大きく挙動が異なることから，拡散律速成長過程に及ぼすαの影響が確認できる．これは，α の増加に伴い，濃度差に起因する自然対流の影響が顕著になり，イオンの物質移動が促進されたためであると考えられる．更に，AFM 分析により，電極配置及びαの影響による核の形状の変化が観察できた．

水電解操作における気泡発生界面現象

地球環境問題の解決策の一つとして，水素エネルギーシステムの構築が挙げられている．その中で水電解操作は純水素，酸素を製造する装置として重要視されている．また，工業水電解操作においては，上昇気泡群による電解液ポンプ作用が無意識的に利用されてきた．電極界面で発生する気泡の挙動は，固・液・気三相界面現象として，電極表面被覆率や気泡分散電解液の有効伝導度などを通して，電解効率を左右する大きな要因である．これらの研究は古くより蓄積され，技術は飽和しているように考えられてきた．一方で，磁場中で水電解操作を行うと電解液中にローレンツ力から，MHD（Magneto Hydrodynamics）対流が発生する．MHD 対流は自然対流を促進させた結果，電解効率や過電圧を改善する．本研究では，電極を水平に配置し自然対流を抑制させ，MHD 対流のみを起因することで MHD 対流の及ぼす効果を調査した．その結果，磁場強度 0 T および 5 T それぞれの陰極電位の時間変化について，電解開始直後に電極表面上に発生する O_2 気泡によって IR drop は増加すること，また，電位の上昇は磁場中での方が小さいことが判明した．このことが MHD 対流の及ぼす効果であり，電解開始と同時に発生し初期過程から過電圧を改善していることを考察した．さらに，気泡の観察結果から，MHD 対流の有無によって気泡の成長速度が異なることを確認した．これは MHD 対流によって溶存ガスが電極表面上から強制的に拡散されているためと考えられた．

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
材料設計工学分野

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いる．ナノ粒子形成過程での酸化還元反応を電気化学的な立場で解析し，ナノ粒子形成機構を明らかにする研究に取り組んでいる．これらの研究成果に基づき，企業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に分散させた微細配線用インクの開発や，金属ナノ粒子を有機系材料中に高分散させたハイブリッド材料の開発およびその物性についての研究も開始しており，今後も様々な応用の試行に取り組んでいく．

金属ガラスの構造安定性

酸化物ガラスやポリマーなどの一般的なガラス物質と同様に，明瞭なガラス転移を示す金属物質が存在する．このような金属物質を金属ガラスと呼び，その構造安定性の起源は，材料科学的な観点から興味深い研究対象である．また，金属ガラスは等方的な結合状態を示す金属結合を主体としながら，安定なガラス構造を発現するため，ガラスを研究する化学分野の研究者からも注目されている．我々は，東北大学の金属材料研究所や学際融合センター，本学の原子炉実験所のグループなどと共同して，金属ガラスの構造安定性の起源を，X線回折による構造解析，Spring8のX線非弾性散乱，熱分析，超音波スペクトロスコピーを用いて詳細に研究している．

軽量高強度マグネシウム合金の組織とその機械特性

自動車の軽量化を目的に，マグネシウム合金を用いた自動車用部材の製造技術開発に企業と共同で取り組んでいる．ここでは，マグネシウム合金の耐環境性改善のための表面処理技術の研究開発を行っている．

ナノスケール微細組織を持つ鉄基磁性薄膜の組織制御

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

コヒーレントX線回折による物質内部構造の可視化

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

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．

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

・常温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，チタンは非常に卑な金属であり，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，カソード分極挙動を明らかにし，これらを基に電析を行ったところ，チタンを含む物質の析出に成功している．現在，析出物が金属チタンかどうかを調査している．さらには，イオン液体中でのチタンイオンの挙動に関する研究も行っている．

・非平衡水素還元によるチタン酸化物の還元

酸化チタンを水素で直接純金属チタンに還元することは熱力学的に不可能である．そこで本研究では，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，さらに非平衡水素を用いた還元を試みた．その結果，低温水素プラズマやホットワイヤー法により生成した過冷却水素原子などの非平衡水素は通常の水素ガスに比べて，速度論的に高い還元力を有することを実証した．

・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として $BaZrO_3$ に着目し，動作温度を 600℃ 程度に下げることを目的として研究を行っている．特に，電解質における粒界抵抗が高いことが問題であり，現在この改善に取り組んでいる．本研究では，従来の固相反応法ではなく，硝酸塩凍結乾燥法を用いることで合成前の前駆粉末を微細にすることができ，従来よりも結晶粒界密度の低い焼結体を得ることに成功した．また，この方法を用いることで蒸気圧が高いためにドーピングが困難なアルカリ金属のドーピングに挑戦している．さらに，酸化物中の水の拡散係数および溶解量を測定する手法を確立し，酸化物中の水に関する有用な知見を得ている．

・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，中温域で極めて高いプロトン伝導度を示し，中温型燃料電池の電解質として期待される物質である．本研究では，さらに高いプロトン伝導率を有し，化学的に安定な新しい電解質の開発を目指し，様々なリン酸塩について調査を行っている．有望な候補としては，チタンのリン酸塩およびランタンのリン酸塩である．特に，チタンのリン酸塩については水溶液から薄膜を成長させることに成功している．この方法は燃料電池を作製するのに有利な方法であり，今後，燃料電池のセル構造としての有用性を試験する予定である．

・太陽電池材料に関する研究

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，シリコンよりも光吸収係数が 100 倍大きい β-$FeSi_2$ を用いた高効率化を検討した．β-$FeSi_2$ は低温相であり，融液から直接得ることは困難であるため，本研究では低融点金属を溶媒に用いた溶液成長による β-$FeSi_2$ のシリコン単結晶上への作製を試みた．溶媒に亜鉛を用いて実験を行ったところ，β-$FeSi_2$ の成長には成功したが，膜状にはなっておらず，今後，形態制御を行う必要がある．

・化合物半導体電析

化合物半導体は，現在の太陽電池基板の主流材料であるシリコンに比べて，光吸収係数が大きく，一般向けの実用化に向けて研究が進められている．しかし，実用化には低コストな作製手法を確立する必要がある．Zn_3P_2 はバンドギャップが 1.5 eV 程度の化合物半導体で，太陽電池としては理想的な値を持ち，安価な方法で薄膜形成できれば，太陽電池への応用が期待できる．そこで，本研究では水溶液からの電析による Zn_3P_2 の作製を目指した研究を行っている．これまでに，Zn イオンと P の共存した水溶液の電気化学的挙動に関する知見を得ており，これを基に薄膜電析を試みる予定である．

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による材料分析】

1 W 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て開発した A4 用紙サイズ，5 kg の小型全反射蛍光 X 線分析装置（図 1）を用いてペットボトル飲料水や河川水などの液体，または金属，プラスチック，木製品など固体試料からの浸出水の分析を行った．ウーロン茶から硫黄，カリウム，マンガンが検出され，茶葉の種類による検出元素の違いも見られた．河川水からは塩素，カリウム，カルシウムが検出された．プラスチック玩具の浸出水からはマンガンが検出された．金属材料の浸出水からは鉄，クロム，ニッケルが検出され，浸漬時間を長くすることで浸出量は多くなる傾向があった．また，木製のわりばしの浸出水からはマンガンが検出された．内標準法で定量を行ったところ，これらの検出元素の濃度は数～数百 mL^{-1}，絶対重量にして数十～数千 ng であった．

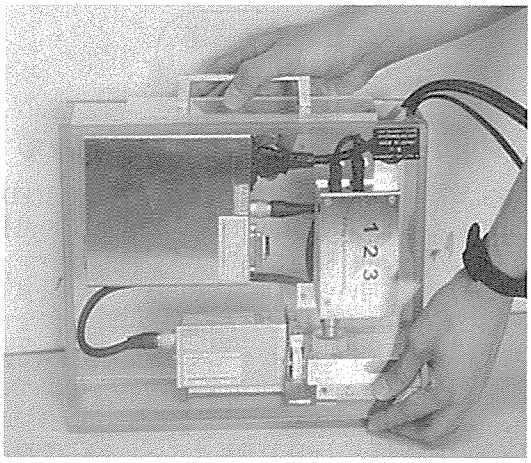


図 1

【X 線スペクトル Lα：Lβ強度比の変化要因に関する研究】

蛍光 X 線分析においてピークが重なった場合，重なりのないピークとの相対強度を用いてピーク分離を行う．量子力学による X 線スペクトルの計算結果では $L\alpha:L\beta=2:1$ となる．しかし，ピークの相対強度は様々な要因で変化し，定量分析を正確に行うためには，強度比の変化要因を知る必要がある．エネルギー分散型蛍光 X 線装置（EDX），一結晶波長分散型蛍光 X 線装置（WDX），二結晶 WDX，SEM-EDX を用いて Pb 及び他の重元素の Lα，Lβ線スペクトルを測定し，強度比の変化要因を調べた．その結果，(1) X 線管印加電圧（図 2），(2) 1 次 X 線フィルター，(3) SEM の電子加速電圧，(4) EDX か WDX か，(5) 分光器の分解能（WDX のスリット幅），(6) 検出器の計数効率，(7) 粉末の粒径や金属の表面粗さ，(8) 化学状態，(9) 原子番号によって強度比が $L\alpha:L\beta=4:1$ から $L\alpha:L\beta=1:1$ まで変化することが分かった．

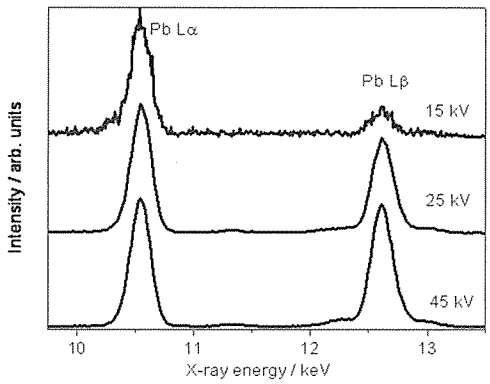


図 2

教　授　河合　　潤
助　教　山本　　孝
助　教　弓削　是貴
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と基板の上に GaN 膜を作製することがベストである．当研究室では導電性窒化チタン（TiN）バッファ層を開発し，AlN バッファ層上の GaN 膜との比較，Si 基板上での TiN バッファ層/GaN 膜を成膜するプロセスの最適化を行った．また，金属バッファ層は酸に溶解し，GaN 層は酸に溶解しないことを利用し，GaN 層（GaN 基板）の下地基板からの剥離技術の開発を行った．

過飽和 Cu(Ti) 合金膜を用いた極薄拡散バリア材の形成

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 Si/SiO_2 基板上に成膜・熱処理することにより，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 $\mu\Omega$-cm 以下にできることを実証した．更にこの技術を発展させるため，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 リッチ層の構成相は，絶縁体膜組成に依存していた．現状では，反応生成物の形成エンタルピーの大きさよりも絶縁体膜組成により構成物が異なるようであることを明らかにした．絶縁体膜の C 組成が約 17at.% より低ければ，アモルファス Ti 酸化物と TiSi を形成し，C 組成が約 17at.% 以上になるとアモルファス Ti 酸化物と TiC を形成した．

界面層の形成速度は，界面層の構成相の違いにより異なった．400℃ では，アモルファス Ti 酸化物と TiC の形成速度は，アモルファス Ti 酸化物と TiSi の形成速度より顕著に速かった．アモルファス Ti 酸化物と TiC を含む界面反応層の層厚の増加は熱処理時間のルートに比例し，その反応が拡散により律速されていることを示唆している．TiC 単相の反応形成は反応層中 C の拡散により律速されているという報告があり，本研究でも反応層中の C の拡散が反応層の形成を律速していると考えている．以上のように，反応層の構成相の決定や反応の速さには C が重要な役割を果たしているようである．

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，透過性と伝導性の向上を目指して，スパッタ成膜した Nb ドープ TiO_2 膜の作製条件（例えば，膜厚依存性）の最適化を行った．

また，導電性の Nb ドープ TiO_2 膜と ITO 膜の屈折率差が大きいことより，それぞれの膜を交互に積層し導電性の全反射積層膜の作製を試みた．この組合せでは，青色の波長域近辺（460 nm）で反射率が最大となる．また，これまでの全反射積層膜は絶縁体であったのに対し，本試料では導電性を付加した全反射積層膜の作製を目的とした．

得られた試料の中で，TiO_2/ITO の積層を10回繰り返した試料で導電性を有しながら青色光の反射率 93% が得られた．しかし，これは理論値よりも約 5% 低い結果である．半導体のバンド間遷移による光吸収，表面や界面の凹凸，組織の不均一性などに起因する吸収などが原因と考えられる．さらなる高反射を目指すには，さらに多層化を行い，導電性と反射率が高くなる製膜条件を最適化する必要がある．

教　授　白井　泰治（2008年4月着任）
准教授　伊藤　和博
助　教　着本　　享（2008年4月異動）

工学研究科　材料工学専攻

先端材料物性学講座
先端材料物性学分野

STM による材料表面の原子レベル評価

(1) LBH（Local Barrier Height）測定による半導体中のドーパント検出

これまで続けてきた LBH 測定によるドーパント検出の研究がほぼ収束した．LBH 測定は走査トンネル顕微鏡を用いた比較的簡便な装置で，原子分解能に近い空間分解能で表面近傍のポテンシャル変化を検出しうる手法であるが，半導体表面に LBH を応用した場合には STM 探針によって誘起されるバンドベンディングの影響が無視できない．我々の研究室では GaAs(110) 表面でドーパントの無い“清浄な”箇所とドーパント直上のサイトにおける LBH のバイアス電圧依存性を詳細に調べた．LBH の理論的なシミュレーションと，実験結果の比較の結果，表面近傍の表面ポテンシャルの変化は LBH のバイアス依存性に現れることが明らかになり，この手法によって高い空間分解能でのポテンシャル計測が可能なことが示された．

(2) TiSi ナノアイランドにおける電流-電圧特性

ナノスケールの構造ではマクロサイズの構造には現れない様々な現象の存在が知られている．クーロンブロッケード現象もそのひとつである．クーロンブロッケード現象は微小な構造において電子１つ分の電荷による帯電エネルギーが無視できない大きさになり，次の電子の移動が制限される現象である．この現象は主に低温下で観測される現象であるが，シリコン表面上の大きさが数 nm のアイランド構造では室温でクーロンブロッケード現象が観測されたと報告されている．ところで,このような微小なアイランドではアイランド周辺の表面状態がクーロンブロッケード現象の特性に影響を与える可能性がある．本研究では酸素導入を行うことで表面状態の量を制御し，クーロンブロッケード現象が表面状態にどのような影響を受けるか調べた．

研究の結果，従来報告されていたクーロンブロッケード現象の兆候はアイランドそのものの電子状態に起因する可能性が高いことが明らかになった．

(3) FIB（収束イオンビーム）加工によるナノサイズ接点の形成と走査トンネル顕微鏡による直接観察

サブ nm の間隙をもったギャップの作成は，分子デバイスの研究を中心に要求があり，いくつかの方法が提案されている．本研究では２端子構造であるナノギャップに第３の電極を導入し，様々な測定・研究を行うことを目指して，金ナノギャップの作成と STM による直接イメージングを試みた．結果ギャップ間隔数 nm までのギャップの作成，イメージングに成功した．今後はよりギャップ間隔の狭いギャップの作成および STM 観察に適した電極の作成に注力する予定である．

原子・分子サイズ接点の研究

(1) 貴金属単原子接点の破断電圧

我々の研究室では金属単原子接点の生成確率のバイアス依存性から接点の高バイアス安定性を調べる実験を行ってきたが，従来の手法では接点が単原子に至る以前に電流誘起不安定化を起こす可能性があり，単原子接点生成確率の解釈は容易ではなかった．このため今回の実験では最初に低バイアスで単原子接点を生成し，その状態でバイアスをスイープして接点が破断する電圧を測定する手法を採用した．測定には室温・超高真空仕様の MCBJ 装置を使用し，Au および Cu を対象として実験を行った．測定された Au および Cu 単原子接点の破断電圧は幅広い分布を示し，平均値はそれぞれ 1.1 V および 0.7 V であった．この Au と Cu の安定性の相異は我々の以前の実験から示唆されていたものであるが，今回直接的に実証されたことになる．

(2) Al 合金原子サイズ接点のコンダクタンス

s 状態的な価電子を有する Au の場合には，合金の原子サイズ接点のコンダクタンスヒストグラムは合金組成とともに徐々に形状が遷移してゆく．一方 Al は p 状態的な価電子も有しているため，Al 合金のコンダクタンスの組成依存性は Au の場合とは異なると予測される．今回メゾ10合金，AlMgSi 合金，AlMg 合金についてコンダクタンス測定を行い，メゾ10合金の場合に純 Al と異なるヒストグラムを得ている．析出物の影響も含めて研究は継続中である．

(3) BPY 単分子の $I-V$ 特性

BDT に引き続き，Au 電極間に架橋した 4-4' ビピリジン（BPY）単分子の $I-V$ 特性の測定を行った．測定には MCBJ 装置を使用し，測定環境は室温・Ar 雰囲気中である．これまで BPY の $I-V$ 特性を直接測定した例はなく，今回の測定が初めての測定となる．コンダクタンス 0.01 G_0 の状態における BPY は BDT と同様に低バイアスでは直線的な $I-V$ 特性を示し，gap は観測されない．しかし高バイアスでは同じコンダクタンス状態の BDT の $I-V$ 特性よりも電流が速く立ち上がり，また特性の形状も BDT のものと少し異なっている．今後理論との比較検討が必要である．

(4) ポルフィリン分子架橋のコンダクタンス

首都大学東京の杉浦健一先生との共同実験として，同先生から試料を提供いただき，Au 電極間に架橋した各種ポルフィリン分子のコンダクタンス測定を行った．分子は電極との結合部分が異なるもの，分子内を共役結合が貫通するもの，など様々である．これまでにいくつかの分子で 0.003 − 0.005 G_0 程度の，この種の分子としては比較的高いコンダクタンスが観測されている．

教　授　酒井　　明
准教授　黒川　　修

工学研究科　材料工学専攻

材料物性学講座
量子材料学分野

ハイドロキシアパタイトの陽イオン交換能に関する理論計算

ハイドロキシアパタイト（HAp）は，骨や歯の無機質の主成分として知られており，近年，バイオセラミックスとして研究が進められている．HAp が持つ他の重要な特性として，高いイオン交換特性が挙げられ，有害重金属イオンの回収材として，環境保全分野への用途が期待されている．しかし，HAp によって回収可能なイオン種と，そのイオン交換メカニズムについてはほとんど理解されていない．本研究では，第一原理計算を用いて，HAp 中での様々なイオン種の交換エネルギーを算出し，そのメカニズムを調べた．各種二価カチオンのイオン交換エネルギーの pH 依存性を評価した結果，酸性から中性領域に pH が増加するにつれ，イオン交換エネルギーが低下することがわかった．また，顕著にイオン交換しやすい Pb^{2+} は他のカチオンと比較して近接の酸素と強固な共有結合を形成することが判明した．このような結果から，共有結合形成と配位数増加がイオン交換能の支配因子であると結論づけられた．

第一原理計算による $BaZrO_3$ におけるプロトン伝導発現機構

ジルコン酸バリウム $BaZrO_3$ は，3 価のカチオンをドープした上で湿潤雰囲気に曝されることにより，プロトン伝導性を示す．本研究では，Y および Sc をドープした $BaZrO_3$ における欠陥平衡の関係やプロトン伝導の素過程を第一原理計算により評価した．Y 添加 $BaZrO_3$ について，酸化性湿潤雰囲気での各欠陥の熱平衡濃度を各温度に対して計算した結果，電気的中性条件を満たすために導入される点欠陥としては，500 K 以下の温度域においては格子間プロトンが主要であるのに対して，700 K よりも高温においては酸素空孔の方がより安定に導入され，格子間プロトンの濃度は大幅に低下することがわかった．Sc がドープされた $BaZrO_3$ において各欠陥の熱平衡濃度を求めたところ，その傾向は Y をドーパントとした場合と類似の結果が得られたが，Y をドーパントとした場合に比べて格子間プロトンの濃度が低く，プロトンが主要なキャリアとなる温度も低下することがわかった．

AlN および BN 中の希土類ドーパントの局所構造

希土類元素を絶縁体や化合物半導体に添加し，蛍光体などに利用する例は数多く報告されている．しかし，ホストの陽イオンとの半径差が大きい系における希土類元素の局所構造については未解明な点が多い．本研究では，Ce 等の希土類元素を添加した AlN および BN 試料を対象に X 線吸収分光実験を行い，それと並行して第一原理計算を行うことにより希土類ドーパントの局所構造を評価した．X 線吸収分光実験の結果，Ce は AlN 中では主に 3 価で存在するのに対し，BN 中では結晶構造によって異なった価数をとることがわかった．また，第一原理計算から，AlN 中では大部分の化学ポテンシャルの条件下で Al サイトの孤立 Ce^{3+} が相対的に低いエネルギーを取り，BN 中では 2 つの B 空孔と 1 つの N 空孔を伴った格子間サイトの Ce^{3+} が安定であることがわかった．このように，AlN 中と BN 中とで Ce の局所構造は大きく異なることが示唆された．

PLD 法による Co 添加 Ga_2O_3 薄膜の作製とその構造

3*d* 遷移金属元素を非磁性半導体に添加し磁性を付与した系は，希薄磁性半導体と呼ばれ，スピントロニクスへの応用の観点から注目を浴びている．本研究では，最近，当研究室が室温強磁性を示す希薄磁性半導体として報告した Mn 添加 Ga_2O_3 の類似系である Co 添加 Ga_2O_3 を取り上げ，Pulsed Laser Deposition（PLD）法による成膜を行い，その結晶構造や Co の局所環境，磁性を評価した．その結果，Co 添加 Ga_2O_3 薄膜はスピネル型構造の γ-Ga_2O_3 であり，$MgAl_2O_4$ 基板上に γ-$Ga_2O_3(100)\|MgAl_2O_4(100)$，$\gamma$-$Ga_2O_3[001]\|MgAl_2O_4[001]$ の方位関係をもってエピタキシャル成長することが確認された．また X 線吸収スペクトルの Co $L_{2,3}$ 端近傍微細構造の解析により，Co は主に 6 配位サイトに 2 価で存在することがわかった．

第一原理計算による超イオン伝導相 δ-Bi_2O_3 の構造

Bi_2O_3 はおよそ 730℃ で α 相から δ 相に変態し，高い酸化物イオン伝導性を発現する．この δ 相は欠陥蛍石型構造をとり，酸素副格子上における酸素原子と空孔の配列は不規則と考えられている．本研究ではそのような構造を形成する要因や高いイオン伝導性の起源について知見を得るため，種々の空孔配列を有する構造モデルに対して系統的に第一原理計算を行った．また，欠陥蛍石型構造の一種であるが酸素原子が規則的に配列した C 希土構造を安定構造とする Y_2O_3 との比較を行った．その結果，δ 相 Bi_2O_3 では，酸素原子が蛍石型構造の理想位置から大きく緩和することにより，安定な構造となることがわかった．また，Bi_2O_3 と Y_2O_3 の両者について C 希土構造が基底状態となったが，Bi_2O_3 は Y_2O_3 に比べて空孔配列の違いによるエネルギーの変化が小さいこともわかった．これは，δ 相 Bi_2O_3 では熱的に励起されることにより様々な空孔配列をとり得ることを示唆している．

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

Ni 基超合金の高温クリープ変形で生じる結晶方位分散機構とその寿命予測への応用

Ni 基超合金は耐酸化性や高温クリープ特性に優れた材料であり，航空機用ジェットエンジンや発電用ガスタービンのタービン翼として用いられている．熱効率を高めるために，より高温に耐える材料への要求が非常に強く，数多くの研究者が精力的に研究することで，より優れた合金が次々と発表されている．しかしながら，Ni 基超合金の高温クリープ変形における，内部組織の変化とそのクリープ寿命との関連はいまだに解明されていない部分が数多く存在し，半ば手探りの合金開発となっている．本研究では，クリープ変形に伴ってラメラ界面が徐々に波打つ組織変化に着目し，組織と結晶学的な方位の分散との関連を解明することを目的とした．本研究ではまず，クリープ中断試験片について組織学，結晶学的な観察を SEM-EBSD および X 線回折により行った．その結果，ラフト構造中のラメラ界面はクリープ変形に伴い，(001) 面から傾き波打つこと．定常クリープ域でのγチャネル内の内部歪場は，クリープ転位の運動を妨げるものであること．クリープ変形に伴い，結晶方位が分散すること．また，この結晶方位の変化は，ラメラ界面に堆積したクリープ転位によっていることが明らかになった．これらの実験的な知見を踏まえ，ラメラ界面に堆積した転位を考慮した材料中の弾性歪場の計算を行った結果，ラメラ界面が (001) 面から傾くことで，内部応力の正方対称性が低下し，クリープ変形の進行を抑制できなくなるとともに，結晶回転を引き起こすことが明らかとなった．結晶回転は X 線回折を用いて非破壊で調べることができることから，クリープ余寿命を非破壊検査によって評価する手法の指針を得ることができた．

$ReSi_{1.75}$ 基シリサイドの欠陥構造の制御とその輸送特性への影響

$ReSi_{1.75}$ は非常に小さいバンドギャップを有する縮退半導体であり，赤外線検出素子などのオプトエレクトロニクス材料，熱エネルギーと電気エネルギーを直接相互に変換することを可能にする熱電変換材料としての応用が考えられる材料である．$ReSi_{1.75}$ は正方晶系の $C11_b$ 構造を母格子としながら規則的に Si サイトが欠損した超格子構造を有する．これまで我々の研究室では第三元素置換を行うことによって，その特異な Si 空孔規則配列を変化させる事に成功してきた．本研究では第三元素置換とは異なる方法—二元系 $ReSi_{1.75}$ に種々の熱処理を施すこと—によって Si 空孔規則配列を変化させ，それに伴う輸送特性の変化を明らかにする事を目的とした．得られた結果は以下の通りである．二元系 $ReSi_{1.75}$ に急冷を施すことによってシアー構造と呼ばれる多数の面欠陥を含む結晶構造に変化し，その結果として Si サイトの空孔が減少することが分かった．また，この様な面欠陥が生じることによって欠陥が無い状態では p 型半導体である $ReSi_{1.75}$ が n 型半導体に遷移することが明らかとなった．欠陥を制御することによってキャリアタイプ，キャリア濃度を変化させるというアプローチは熱電変換材料の研究において新しいものであり，特性を制御するための重要な指針が得られた．

(Li, La)TiO_3 固体電解質/電極界面設計と電池特性制御

リチウム二次電池の安全性，信頼性の向上策の一つとして，不燃性の固体電解質を用いた全固体リチウム二次電池の開発が提案されている．この場合，サイクル特性や内部抵抗などの電池特性は，電解質/電極間に形成される固体/固体界面により大きく左右されるため，全固体電池の実用化には高い構造安定性を有し，同時にイオン伝導特性に優れた固体/固体界面構造設計が必須となる．本研究では，結晶性固体電解質を用いた全固体リチウム二次電池の界面構造設計による電池特性制御法を確立することを目指し，様々な表面処理を行った $La_{2/3-x}Li_{3x}TiO_3$ 固体電解質（通称 LLT）多結晶あるいは異なる表面方位を有する単結晶 LLT に HT-$LiCoO_2$ 正極を蒸着したモデル系を用いて，表面処理により導入されるナノ欠陥構造や結晶配向関係と電池特性の相関に関する基礎研究を行った．得られた成果は以下のようにまとめられる．

1. LLT 表面に，機械研磨，Ar イオン照射，ショットピーニングといった処理を行うことで，アモルファス領域などのナノ変質領域が形成され，それらは正極蒸着後も界面に安定に存在し，界面の構造安定性に寄与していると考えられる．
2. LLT 単結晶の (110) 面に $LiCoO_2$ を蒸着させた場合，界面に対して $LiCoO_2$ 中の Li 層が垂直方向にエピタキシャル成長するのに対し，(112) 面に蒸着した場合には Li 層が界面に対して約20度傾いている結晶粒が優先的に成長する．界面抵抗の値は前者のほうが一桁程度低い値をとる．

以上の実験結果から，界面の構造安定性および界面抵抗の低減には，アモルファス相などの界面ナノ変質領域の形成と，界面に対する $LiCoO_2$ の配向性制御が有効であり，これら2つの効果をバランスよく兼ね備えた界面ナノ構造設計により，電池特性が向上できることが明らかとなった．

教　授　乾　　晴行
准教授　田中　克志
准教授　岸田　恭輔
助　教　岡本　範彦

工学研究科　材料工学専攻

材料物性学講座 構造物性学分野

低密度多体電子系の相挙動

電子ガス模型（一様な正電荷を背景としてクーロン相互作用する多体電子集団）は，金属中の価電子を記述するレファレンスモデルとして認知されている．ウィグナー予測（電子ガスが希薄になると結晶化する）以来，種々の電子ガス系の多体理論研究が精力的に進められており，近年では電子ガスにおける遍歴強磁性や非フォノン機構の超伝導の出現など，興味深い物性予測がなされている．このような物性の出現は，相互作用エネルギーが運動エネルギーに対して優位となる低電子密度領域で顕在化しており，電子どうしの相互作用による多体効果がこれらの物性の出現に対して重要な因子となっていることを示している．多体理論では，通常，「密度パラメータ」と呼ばれる r_s の関数として電子ガスの基底エネルギーが与えられる．ここで，r_s は，電子についてのWigner-Seitz 球の半径を有効 Bohr 半径で規格化した無次元量として定義され，電子密度の低下に伴い増大する．r_s はクーロン相互作用エネルギーとフェルミエネルギーの比に比例し，電子間相互作用の強さの指標となる．注目に値するのは，基底エネルギーから導かれる圧縮率が，密度の低下に伴い $r_s = 5.25$ で正から負に転ずることである．電子ガス模型は背景正電荷の圧縮率を考慮しないモデルであるため，電子圧縮率が負になる状況は，ただちに系全体の相転移を意味するものではない．しかしながら，なんらかの不安定性を電子系が内包していることを示すものであり，現実の物質において電子の不安定挙動が如何なる形で顕在化するのかは興味深い．事実，上述の強磁性や超伝導などの物性の出現予測領域は，電子ガスの負の圧縮率が出現する領域に対応し，相互の関連性を示唆する．そこで，当研究室では，金属元素の中でも電子ガス模型のプロトタイプであるアルカリ金属に着目し，その超臨界状態を利用することにより低密度電子ガスの相挙動についての研究を進めている．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．気液共存線を迂回するように流体を膨張させる，すなわち超臨界状態を利用することにより，単体物質で，電子密度ならびにイオン密度を，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る．このことにより，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が可能となる．

低密度アルカリ金属流体の高分解能コンプトン散乱測定

平成19年度から基盤研究 (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．電子ガス模型において圧縮率が負になる低密度領域で，多体電子系がどのように振舞っているか．その電子状態を観測するためにコンプトン散乱実験を実施している．電子の運動量分布を与えるコンプトン散乱は，物質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．近年，放射光を利用したコンプトン散乱実験の精度が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．コンプトンプロファイルのフェルミ波数付近には，電子間相互作用を反映して特異なプロファイルが現れる．電子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プロファイルから，どのようなずれを生ずるかを調べることは興味深い．昨年度4月より，専用の高圧容器の設計と製作を開始しており，昨年度末の3月に高圧容器を完成させることができた．今年度から散乱実験に着手し，流体ルビジウムを対象として 1100℃ までの散乱実験を実施したところである．今後さらに低密度領域における実験の実現に向けて技術開発を行っている．

低密度流体アルカリ金属の局所構造とゆらぎ

これまで，SPring-8の放射光を用いたX線回折測定，およびX線小角散乱測定を実施し，アルカリ金属流体の低密度化に伴うイオン系の空間配置，すなわちミクロ構造の変化を調べている．流体ルビジウム，流体セシウムを対象とした実験の結果によれば，体積膨張により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し，かつ密度ゆらぎが増大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よい一致を示している．多体理論によれば，総和則により，電子系の負の圧縮率はその静的誘電関数が長波長極限で負になることを意味する．ここで，電子ガスを媒質として捉えると，その中の同種のテスト電荷間に実効的な引力が働くという状況を意味する．実験的に観測された最近接原子間距離の低下や密度ゆらぎの増大といった構造不均質性の出現領域が，この領域と符合していることは興味深い．この構造変化は，イオンを電子ガス中のテスト電荷と捉えた場合，同種電荷間の実効引力の顕在化，すなわち電子ガスの不安定挙動を反映したものと考えられる．

助　教　松田　和博

工学研究科材料工学専攻

先端材料機能学講座
先端材料機能学分野

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

(1) Bi 系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ならびに液体窒素温度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．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，Bi2212 複合材でも同様の解析による評価が可能であること，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，測定困難な長尺線材の特性予測に有効であることなどを明らかにした．

(2) 融液成長アルミナ/YAG 共晶複合材料の超高温変形モデル化および室温残留応力評価

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圧縮変形挙動について，高温変形構成式と有限要素法を用いてモデル化し，測定した塑性変形域における流動応力の変形温度・変形速度依存性を計算機で再現することに成功した．さらにアルミナ/YAG の方位関係を特定した後にそれぞれのピークの対についての歪を X 線で解析することにより，その内部での残留歪を評価した．その結果は破壊亀裂進展の形態から予想される方向と一致した．

(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，引張軸に垂直方向の圧縮応力の変化，座屈に伴う界面剥離の進展，およびこれらに及ぼすコーティング層のクラック間隔と厚さの影響を有限要素解析により調べた．これら一連の研究で，負荷ひずみ増加に伴う剥離現象の図化に初めて成功するとともに，コーティング層のクラック間隔が広い場合，コーティング層が厚い場合は，剥離が促進されることを初めて定量的に示した．

(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については，測定に必要な鋭い人工ノッチの導入が困難なため，非晶質繊維でのミラーゾーンサイズを用いた経験的な手法により得られた値しか報告されていない．この問題に対し，一昨年度より，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し，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きた．今年度はこの手法を適用して，非晶質炭化珪素繊維の破壊靱性およびそれに及ぼす高温暴露の影響を調べた．その結果，非晶質炭化珪素の破壊靱性は結晶質繊維のそれよりやや低いこと，高温暴露により低下すること，そのため高温暴露で形成される表面凹凸欠陥で強度低下が生じることなどが明らかになった．

(5) Zr 基金属ガラスのなかの構造と組成揺らぎの検討

Zr 基金属ガラス中のクラスター的な不均一構造と準結晶晶出の関係を調べるため，全真空条件での異常小角散乱実験をすすめた．ナノスケールの準結晶を初期に晶出する Zr 基合金に注目した．従来組成が母相と変化せず，小角コントラストはないと考えられていた ZrPt 合金のナノ準結晶組織からの小角散乱を定量解析し，Zr 吸収端でのコントラスト変化の解析により，小角散乱の原因となる電子密度コントラストの起源にはナノ準結晶の内部わずかな組成の変動と密度の変動が同程度にかかわっており，密度変動は組成変動によって二次的に引き起こされると解釈するとほぼ定量的な説明が可能であ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試料へと適用を進め，準結晶化初期の機構を検証してゆく．

(6) 化合物半導体系ナノドットの GI-SAXS による構造解析

斜入射 X 線小角散乱法（GISAXS）の，III-V 族化合物半導体ナノドットの構造解析への適用を進めた．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が，成長中の合金化などについて諸説のあったものである．まず成長直後の形態を GISAXS で定量化するため，α-As 埋めこみ状態の InAs ナノドットのファセット構造の解析をおこなった．多重散乱効果の弱い領域を利用することにより，InAs 成長初期のファセット率を評価した．

教　授　落合庄治郎
准教授　奥田　浩司

工学研究科　材料工学専攻

材料機能学講座 材料物理学分野

強相関硫化物の磁性

$BaVS_3$ は，$T_{MI}=70\,K$ で金属絶縁体転移を示す強相関硫化物の代表例であり，低温での磁気構造や金属絶縁体転移の機構などが未解明の謎として残されている，興味深い物質である．本研究では，S サイトを Se で置き換えた $BaVSe_3$ との混晶系 $BaV(S, Se)_3$ の強磁場磁化・NMR・電気抵抗などの測定を行い，Se 置換による物性変化を調べた．その結果，Se 置換によって磁気的基底状態が反強磁性から強磁性に変わること，それに伴い金属絶縁体転移が失われること，強磁場磁化の値から強磁場中では Se 濃度によらず同じ強磁性状態を持つこと，Se 高濃度領域での強磁性状態では磁性サイトが複数存在すること，などが分かった．

圧力誘起超伝導体 $GaNb_4S_8$ の基底状態

圧力誘起超伝導体 $GaNb_4S_8$ は Nb_4 原子からなる正四面体クラスタが面心立方格子を構成した，クラスレート化合物の一種である．Nb の d 電子は正四面体クラスタ内では分子軌道を形成し，クラスタ間では電子の波動関数の重なりはほとんどない，金属と絶縁体の中間的な状態を持つ，とみなせる．この物質は，高温では1クラスタあたり $S=1/2$ の局在モーメントを持つ常磁性状態をとることが知られているものの，低温での磁気的状態に関しては良く分かっていない．本研究では，この $GaNb_4S_8$ の NMR 測定を行い，低温では非磁性のスピン一重項状態をとることを明らかにした．このスピン一重項状態は，2つのクラスタが対になった“Nb-octamer”形成によって実現している，と考えられる．

希釈イジング反強磁性体におけるランダムネスの効果

二次相転移の臨界現象には，相互作用の強さなどのパラメータには依存しない“普遍性”という概念が存在し，系の空間次元などの極少数のパラメータのみが影響を与える．ランダムネスは，臨界現象を劇的に変えるパラメータと考えられており，ランダム系における相転移の研究は，理論・実験の両面から広く行われている．本研究では，反強磁性転移を示す金属間化合物 $HoRu_2Si_2$ の磁性 Ho サイトを非磁性の Y で希釈することによってランダムネスを系に導入し，相転移がどのように変化するか，を中性子散乱実験で調べた．その結果，Y 希釈によって磁気構造などには変化がないものの，純粋系と希釈系の磁気転移温度 $T_N(0)$, $T_N(x)$ の間の温度領域 $T_N(x)<T<T_N(0)$ で，巨大磁気クラスターのダイナミクスに起因する“グリフィス異常”が存在すること，を示唆する結果を得た．

TDGL モデルによる超伝導材料のナノ組織と磁束ピンニング特性の検討

超伝導材料の電力ケーブルやモーターなどへの応用には，磁場中での臨界電流密度 J_c の上昇が必要不可欠である．そのためには，超伝導材料中で量子化磁束を効率よくピンニングする必要がある．本研究では，実用材料での J_c 特性の向上を目指し，様々なタイプの微細組織の量子化磁束のピンニング特性を TDGL シミュレーションを用いた数値計算によって評価した．その結果，ピンニングセンターが，試料中にランダムにある場合（ランダムピン）と，特定方向に平行に並んでいる場合（パラレルピン），ではパラレルピンの方が高い J_c を持つこと，パラレルピンの場合 J_c を最大にする最適なピン間隔 d が存在すること，などが分かった．

P/M7000 系合金における $Al_3(Sc, Zr)$ 粒子の分散制御が熱間加工中の動的再結晶に及ぼす影響

P/M7000 系 Al 合金における熱間押出し中の組織変化に対する Sc, Zr 添加の影響を調べた．その結果，Sc, Zr 添加により析出した L12 構造の $Al_3(Sc, Zr)$ が初期粒界をピンニングすることにより熱間押出し中に連続動的再結晶（DRX）が発現することが明らかとなった．また，DRX により形成された結晶粒は直径 $1\,\mu m$ 程度と非常に微細であり，DRX 粒数は $Al_3(Sc, Zr)$ の粒子径と体積分率，界面エネルギーにより計算することが出来る粒界ピンニング力と線形関係にあるため，粒子径制御を行うことにより，結晶粒微細化を行うことが出来ることが分った．

教　授　中村　裕之
助　教　足立　大樹
助　教　田畑　吉計

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

Si (111) 表面へのビニルフェロセンの固定化

近年，自己組織化現象の一種である，自己集積化単分子膜（Self-Assembled Monolayer; SAM）技術が注目されている．SAM とは，適当な基板と，その基板表面と親和性を持つ有機分子を，特定条件下で共存させた場合に基板表面に形成される有機超薄膜のことである．自己集積化単分子膜は，ナノスケールのデバイス作製におけるボトムアップアプローチの一つと考えられ，基礎研究および応用の面から着目されている．特にフェロセン等の電気化学的に活性な分子の単分子膜は，センサーやメモリデバイスなどへの応用が期待される．本研究では，水素終端化シリコン表面と，ビニル化合物の反応によって得られるシリコン直接結合型 SAM 形成技術の一つとして，シリコン基板上へのビニルフェロセン（VFC）分子の固定化を試みた．その結果，可視光励起法による固定化により，熱励起法に比べてより均一な薄膜が得られることがわかった．また，従来から検討してきた mesitylene 溶媒の代わりに decane 溶媒を用いることでも，VFC 分子の重合を抑制し，より均一な膜を得ることができた．このようにして p 型シリコン基板および n 型シリコン基板表面に形成した VFC 単分子膜の電気化学特性を明らかにした．シリコン直接結合型 SAM では，シリコンのダイヤモンド骨格に有機分子が Si-C 結合を介して直接結びついており，この形成技術はシリコンが有する半導体物性と種々の有機分子の物性を融合し新しい分子デバイスを構築する手法として期待される．

分子修飾テンプレートへの金ナノ粒子の選択的集積

金ナノ粒子の二次元アレイは，局所的な化学物質の検出や，局在プラズモンを利用したナノ光素子などへの応用が期待されている．アレイの作製手法の一つとして，ナノ粒子コロイドを使って自己集積化単分子膜（Self-Assembled Monolayer; SAM）によってアミノ基などで終端された基板上へ，ナノ粒子を吸着されるというものがある．従来この手法においては，紫外光や電子線などを使って SAM を一部分解除去することでパターンを形成し，位置選択的にナノ粒子を吸着させてきた．一方，近年になって，基板上に自己集積させたニトロベンゼンなどのニトロ基を，低エネルギーの電子線や X 線照射により非破壊的にアミノ基に還元することが可能と報告された．しかし，電子線や X 線の利用は必ずしも簡便とはいえず，紫外光や可視光を用いた変換が行えればそちらのほうが望ましい．本研究では，まずニトロ基をもつ SAM を作製し，これを位置選択的に可視光を使って還元し，アミノ基のパターンを形成することに成功した．また，得られたパターンへの金ナノ粒子の選択的集積が可能なことを見いだした．

ルテニウム-アミン自己集積化錯体分子膜

ルテニウムイオンと含窒素配位子の錯体は，色素増感太陽電池などへの応用に見られるように，可視光に対する応答性と酸化還元特性を兼ね備えている．本研究では，Si基板上にまずキレート錯体を形成しやすいエチレンジアミン基を有する分子 *N*-(2-aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane（AEAPS）分子からなる自己集積化分子膜を形成し，ルテニウムイオンを配位させて，ルテニウム錯体分子を高密度に自己集積化させるプロセスを開発した．この膜（ルテニウム-アミン自己集積化錯体分子膜）について，その吸着状態，および電気化学応答を調べた．また，得られた分子膜にさらにアミノ基を有する 1,8-diaminooctane（DAO）または octylamine（OA）分子を吸着させることにより，多層化を試みた．

イオン液体浴を用いた還元拡散法による Cu-Zn 合金皮膜形成

Cu-Zn 合金のうち亜鉛含有量が20～45 at.% のものは黄銅や真鍮と呼ばれ，金に似た美しい光沢を放つことから装飾めっきに多用される．この黄銅皮膜を簡単に得る方法として「錬金術師の夢」実験として古くから知られる手法がある．これは，ジンケートイオンを含む水溶液中で Cu 素地を Zn 粉末と接触させることにより Cu 素地表面を Zn と合金化させ（還元拡散法），さらに熱処理すると金色の黄銅を得るものである．金色を呈する Cu-Zn 合金の組成範囲は狭いため，単に室温で Cu 素地に Zn を拡散させて合金化するこの手法では金色を呈する黄銅相は得られず，合金化後の熱処理によって原子の拡散を速め黄銅相形成を促進する必要がある．一方，イオン液体（ionic liquid）と呼ばれる，アニオンとカチオンのみから構成される溶媒を用いれば，浴温を 100～200℃ の中低温域まで高めることができるため，Zn 原子および Cu 原子の相互拡散を速め，1段階プロセスで黄銅皮膜が得られると期待される．本研究では還元拡散法の一つであるガルバニック接触法を用いイオン液体浴での Cu-Zn 合金形成を調べた．一般的にイオン液体は，難揮発性，高い熱的安定性，合成および取り扱いの容易さ，吸湿性の低さ，および広い電位窓など，有機溶媒や水溶液にはない優れた特性を持つものが多い．本手法は，イオン液体の新しい用途を拓くものとして期待される．

教　授　杉村　博之
准教授　邑瀬　邦明
助　教　一井　　崇

エネルギー科学研究科　エネルギー社会・環境科学専攻

社会エネルギー科学講座
エネルギー社会工学分野

研究室の現状

ポスドク研究員1名,（中国湖南大学より）
博士課程学生5名,（ベトナム，韓国，南アフリカ各1名）
修士課程学生9名,（メキシコ1名）
学部学生4名

その他に，JICA/SEED-Netによりマレーシア理科大学より博士課程のうち1年間を日本で研究するというサンドイッチプログラムで来ているベトナム人が1名.

さらに10月にはベトナムとタイから1名づつ博士課程に入学予定である.

上記にスタッフ4名を加えて23名のうち外国人が6名占めている．言葉も多彩で，日本語，英語，中国語，韓国語，スペイン語，ベトナム語という6カ国を母国語としていて，グローバルな環境の下研究を行っている.

最近の研究から

博士課程修了予定のベトナム留学生Nguyen Duc Quang君の研究を紹介する.

本論文は，ベトナムにおける廃家電製品のリサイクル状況について調査し，それに基づく将来予測から今後のあるべき廃家電リサイクルシステムの可能性について検討した研究をまとめたものである.

（1）従来，ほとんど把握されていなかった，ベトナムにおける家電製品の使用状況とリサイクル過程を現地におけるアンケート調査とヒアリング調査により明らかにした．そこで得られた知見に基づき，現状の廃家電製品の流通過程を定量的に評価した．その結果，2004年に128万台の家電製品が廃棄されていることが判明した.

（2）ベトナムにおける今後の家電製品の普及がロジスティック関数，保有期間がワイブル分布に従うという仮定に基づき，ポピュレーションバランスモデルを用いて2025年までの家電製品の普及量と廃棄量の予測を行った．その結果，2025年には廃家電製品が総計1700万台（563,000トン）になると予想した.

（3）家電製品のユーザー・業者間の移動がマルコフ過程であると仮定して，実地調査に基づき廃家電製品の動きを評価した．その結果，修理しながら，平均で2回以上使用されており，20年近い使用期間を有していることが判明した.

（4）ベトナムにおいては家電製品の中古市場が国内市場で重要な位置を占める．以上の解析を元に中古市場の今後の動向についてシナリオ分析を取り入れながら評価を行った．その結果，経済発展が数年間持続すれば低所得層が新製品を購入できるようになり，中古市場は現在をピークに減少する傾向にあることが判明した.

以上の結果は，資源・環境の保全から整備が望まれているベトナムの家電製品のリサイクルシステムに対して有用な知見を与えるものであり，少ないデータから推定していく手法はベトナムにとどまらず発展途上国の家電製品リサイクルシステムの整備に活用されることが期待される.

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

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，電気化学的手法により作成された半導体薄膜を対象とした光学物性の探求を主目的としている．

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

可視光応答型炭素ドープ二酸化チタンの合成と光触媒作用

近年，二酸化チタンに金属イオンやアニオンをドープすることにより，紫外線領域から可視光線領域まで広い波長範囲を吸収できることが分かっており，不純物ドープ二酸化チタンの製造方法が盛んに研究されている．例えば，二酸化チタンをアンモニア雰囲気中で熱処理することにより高活性光触媒窒素ドープ二酸化チタンを製造する方法，二酸化チタンを炭化熱還元して炭素ドープ二酸化チタンを製造する方法，プラズマを利用して遷移金属を二酸化チタンにドープする方法等が提案されている．しかしながら，これらの合成方法は長時間の熱処理や複雑な装置を必要とするため，実用化するためにはより簡便な合成方法の開発が求められている．

本研究は，マイクロ波を用いて短時間で簡便に可視光応答型炭素ドープ二酸化チタンを合成することを目的とし，京都大学生存圏研究所，同エネルギー理工学研究所の研究グループとの共同研究として行われている．アナターゼ型の光触媒用二酸化チタンとエタノールを混合したペーストを市販の電子レンジ（2.45 GHz, 500 W）を用いてマイクロ波照射，炭素ドープ二酸化チタンを調整し，分光光度計による光吸収特性（図1），赤外吸収による表面状態，KI 溶液中の三ヨウ化物イオン（I_3^-）の濃度を吸光光度分光法で測定することによる光触媒特性の評価（図2）を行った．

ATR-FTIR 測定によって，エタノール由来と考えられる複数の有機官能基を有する表面構造が観測され，炭素ドープ二酸化チタンの表面層の生成が認められた．図1に示すとおり，炭素ドープ二酸化チタンは 420 nm 以上の可視光領域の光を吸収することが確認できた．図2に示す通り，マイクロ波未照射試料の可視光照射による三ヨウ化物イオン（I_3^-）生成速度は，触媒単位質量あたり 9.01×10^{-6} mol g^{-1} h^{-1} であるが，照射後は 2.29×10^{-4} mol g^{-1} h^{-1} となり，25倍以上の生成速度を有することが分かった．

[1] T. Sonobe, J. Jitputti, K. Hachiya, T. Mitani, N. Shinohara, S. Yoshikawa, JJAP, 印刷中

助　教　蜂谷　寛

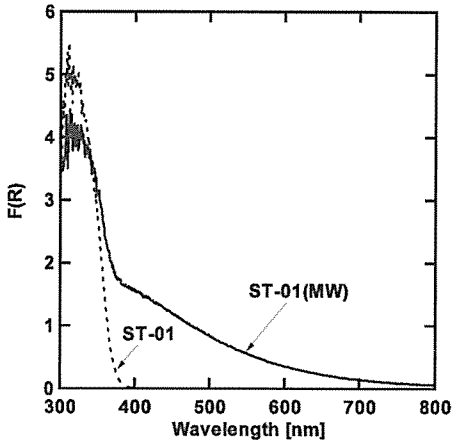


図 1　紫外-可視吸収スペクトル（マイクロ波照射前（ST-01），照射後（ST-01 (MW)））[1]

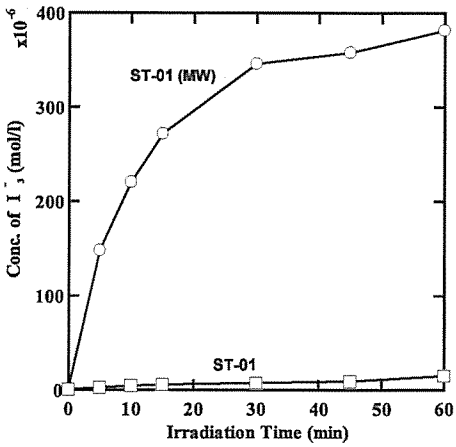


図 2　三ヨウ化物イオン濃度と可視光照射時間（マイクロ波照射前（ST-01），照射後（ST-01 (MW)））[1]

エネルギー科学研究科　エネルギー応用科学専攻

エネルギー応用プロセス学講座 材料プロセス科学分野（高温プロセス分野）

平成21年度より分野名を材料プロセス科学に変更します．これまでの研究室の伝統を守りつつも，「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ます．今後ともよろしくお願いいたしします．

ダイレクトメタノール型燃料電池の触媒の開発

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

アルコール還元法による炭素担持白金触媒作製における酸およびアルカリ添加の影響

アルコール還元法を用いて炭素担持Pt触媒を作製する際に，酸およびアルカリを溶液に添加することによって，Pt の担持状態にどのような影響があるのかを調べ，その結果から酸およびアルカリ添加時の反応メカニズムを提案した．また，得られた触媒の電気化学特性を評価した．酸を添加することによって Pt の担持量を増やすことができ，アルカリを添加することによって Pt の平均結晶径を小さくし，Pt 有効表面積を大きくすることができることが明らかとなった．

燃料電池用触媒における粒子形状および担持状態の評価

白金担持炭素触媒の特性の向上には，粒子の微細化とともに白金粒子の分散性の向上が有効である．しかし，分散性を客観的に評価できる評価法は確立されていない．そこで本研究では，透過型電子顕微鏡で観察した画像から，画像処理を行い，白金粒子を抽出することにより，触媒粒子の形状および担持状態（分散度）を定量的に評価することを試みた．試料の顕微鏡画像を，画像処理ソフトを用いて，画像信号の周波数を選択し，濃度を平坦化，コントラストを調整することにより，白金粒子のみを抽出し，白金粒子の直径および重心位置を計算した．そのデータを解析処理し，画像から取得される平均粒子径，および重心間距離の標準偏差を得た．その結果，これらは担持状態を特徴付けるパラメーターとして有効であり，触媒性能と担持状態との相関を定量的検討するのに有用な指標となることが明らかとなった．

ポリオール法による燃料電池用 PtRu 触媒作製における前駆体溶液について

コロイド法による触媒作製の前駆体である塩化白金酸-塩化ルテニウム-エチレングリコール溶液の溶存化学種の保存中の径時変化過程を把握するため，塩化白金酸-塩化ルテニウム-エチレングリコール溶液の紫外可視吸収スペクトルの径時変化を測定し，以下の知見を得た．時間の経過とともに，$[PtCl_6]^{2-}$ 由来の吸収ピークは低下した．NaOH を多量に加えた場合，金属 Pt の生成が認められた．金属 Pt が生成するのは $[PtCl_6]^{2-}$ 由来の吸収ピークが消失した後である．この現象は $[PtCl_6]^{2-}$ が Pt(II) へ還元され，さらに金属 Pt へと還元されたとすることにより合理的に説明できた．金属 Pt が生成した後も，金属 Pt の生成は緩やかに進行する．これらの反応は光を遮断することによって抑制された．

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．

電析法による Al-Zn 合金薄膜の作製

ジメチルスルホン-$AlCl_3$-$ZnCl_2$ 電解浴を用いた Al-Zn 合金電析について調べた．得られた電析物の主成分は Zn であるが，1～8at% の Al の共析が認められた．X 線回折により Zn の回折ピークは確認できたが，Al の回折ピークは認められなかった．Zn の回折ピークは電流密度の増大とともに減少した．電流密度 100 mA/cm^2 の定電流電解で得られた電析物には Zn および Al の回折ピークがともに認められず，SEM 画像でも明瞭な結晶は見られなかった．これは，電流密度の増大により，Zn とともに金属 Al が析出し，過飽和固溶体もしくは非晶質相を形成した物と考えられる．以上のことからジメチルスルホン浴を用いて Al-Zn 合金の電析物を得られるが，これは従来の溶融めっき法により得られる合金とは異なる性質を持っていると考えられる．

電析 Cd-Te の熱処理による結晶化

電析による CdTe 薄膜製膜の高速化を目指して，Te-rich なアモルファス Cd-Te 電析と電析物の熱処理を組み合わせることによる電析物の再結晶化過程について調べた．ITO ガラス基板に CdS 薄膜を形成し，その上にアモルファス Cd-Te を析出し，温度 400℃ のもとで空気中で熱処理を行うことにより，粒径約 50 nm の結晶性 CdTe が得られた．

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

溶融 CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO 系スラグへの塩素溶解度

1. 緒言

塩素系廃プラスチックを高炉へ吹き込むと，高温で熱分解をおこし，塩化水素を発生する．本研究では，CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO 系スラグへの塩素溶解度のスラグ組成依存性，及び温度依存性を調査したので報告する．

2. 実験方法

$(\%SiO_2)$ / $(\%MgO)$ = 40 / 25，$(\%Al_2O_3)$ = 30又は35とした CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO スラグを用い，$(\%CaO)$ を39%～56% まで変化させた．Fig. 1 にスラグ組成を●印で示す．これらの組成でスラグは CaO 活量の高い均一液相を形成する．

実験温度（1673 K～1823 K）に保持した横型炉内に Ar-H_2-HCl-H_2O（P_{HCl} = 5.91 × 10^{-3}atm, P_{H_2O} = 3.55 × 10^{-2}atm）ガスを流通させた．スラグを炉内に6時間保持して，平衡させた．スラグを急冷し，試料中の塩素濃度（$wt\%Cl$）を分析した．

3. 実験結果・考察

スラグと HCl との反応は，以下のように考えられる．

$$(HCl) + (1/2)\langle CaO\rangle = \{Ca_{1/2}Cl\} + (1/2)(H_2O) \quad (1)$$

Fig. 2 に，1773 K におけるスラグ中の塩素濃度（$wt\%Cl$）と（$\%CaO$）の関係を示す．図より，（$\%CaO$）が高くなるほど（$wt\%Cl$）が増加しており，式 (1) と矛盾しない．

Fig. 3 にスラグ中の塩素濃度（$wt\%Cl$）と温度の関係を示す．図より，温度の上昇と共に（$wt\%Cl$）は低下していることから，スラグへの塩素溶解反応は発熱反応であることがわかるが，これは式 (1) の反応熱が負の値を取ること，つまり発熱反応であることと整合している．

教　授　岩瀬　正則
准教授　藤原　弘康
助　教　長谷川将克

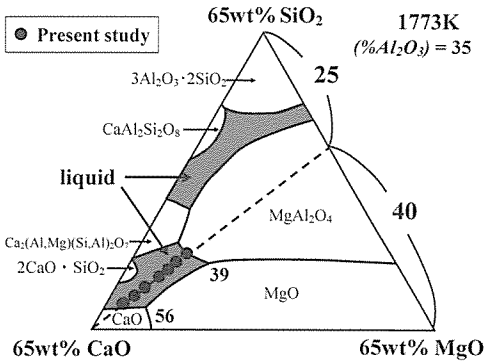


Fig.1　1773Kにおける $(\%Al_2O_3)$=35一定での擬三元系組成図

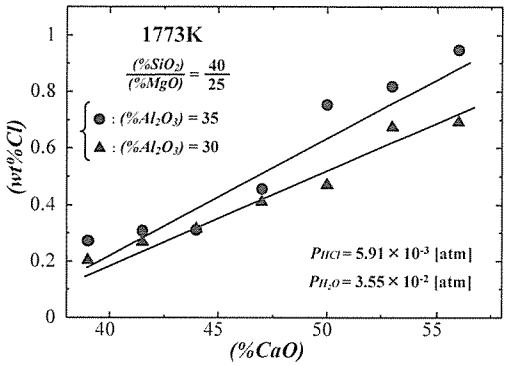


Fig.2　1773Kにおけるスラグ中の塩素濃度 $(wt\%Cl)$ と $(\%CaO)$ の関係

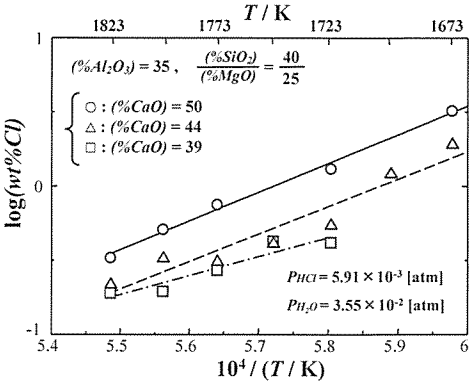
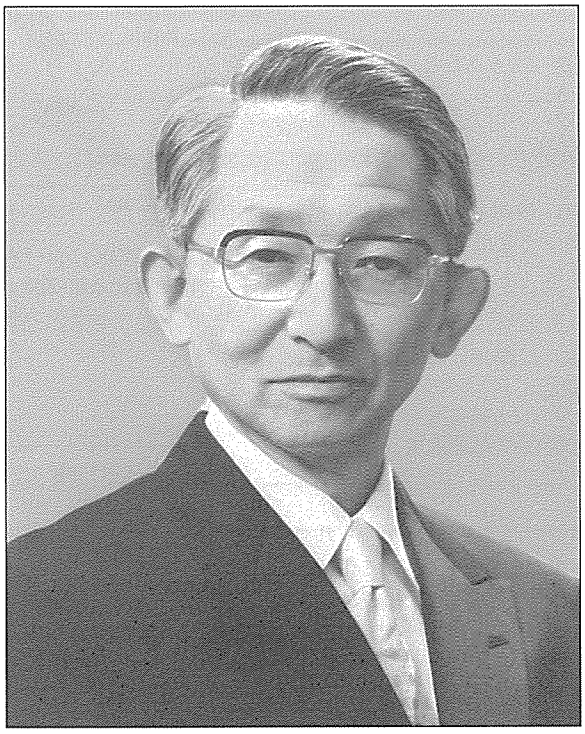


Fig.3　スラグ中の塩素濃度 $(wt\%Cl)$ と温度の関係

会 報

追 悼

特別名誉会員 盛 利貞 先生



追悼の辞

一 瀬 英 爾

京都大学名誉教授，産業技術短期大学名誉教授 盛利貞先生は2007年12月1日，享年89歳をもって逝去されました．ここに先生の生前のご功績を偲び，謹んで哀悼の意を表します．

先生は，1942年京都帝国大学工学部冶金学科をご卒業後，同工学部講師，海軍技術大尉を経て，1958年京都大学教授に任ぜられ，冶金学第1講座，鉄冶金学講座を担任され，1982年に定年退官されると同時に鉄鋼短期大学（現産業技術短期大学）学長に就任され，1990年任期満了にともない退職されました．

先生は，まず鉄，ヒ素，炭素を含む2元系，3元系状態図の作成，鋼材の機械的諸特性に及ぼす各種元素の影響の測定，また鋼のガンマ粒度に及ぼす多くの元素の影響を調査し，結晶粒度調整法に関する有益な知見を得るなど鉄鋼材料に関する研究を行われました．次いで行われた鋼中非金属介在物の熱力学的挙動とオーステナイト結晶粒度との関係に関する研究は当時先駆的な研究として高い評価を得られました．次いで溶鉄中の炭素の溶解度およびガンマ鉄中の窒素の溶解度に及ぼす多くの元素の影響を測定し，活量係数，相互作用母係数を決定しこれらの元素の鋼中における熱力学的挙動の解明に有用な知見を明らかにされました．またクヌーゼンセル質量分析法により製鋼温度における鉄2元溶体の活量測定を行なわれました．ジルコニア固体電解質を用いた起電力測定法により，各種酸化物の標準生成自由エネルギーの決定，各種溶体中の活量測定を行い多くの重要な熱力学的数値を決定し，また固体電解質測定法に関する研究を行われました．炭化石灰による溶鉄の脱硫にはじまり溶鉄からの各種有害元素の除去に関する熱力学的，反応速度論的研究を行い，とくにカラー映画撮影の手法を採用した浮揚溶解法による金属の酸化・脱酸に関する研究は内外の注目を浴びました．またラテライト鉱石の脱ニッケルの研究，スラグからの気化脱硫，気化脱弗に関する反応速度論的研究なども行っておられます．このように鉄冶金学の学術・技術の分野において多くの成果を挙げそ

の発展に尽くされました．また先生は学術振興会委員，産業技術短期大学学長，日本鉄鋼協会副会長，日本金属学会副会長，など多くの要職を歴任され斯界の発展と人材の育成に多大の貢献をされました．

これらのご業績・ご功績に対して日本鉄鋼協会からは俵論文賞，協会事業功労賞，西山賞，製鉄功労賞を，また日本金属学会からは谷川・ハリス賞を，また本多記念会から本多記念賞を受賞しておられます．また1991年には勲二等瑞宝章を授けられました．

先生は私たちに自由に研究をさせて下さいましたが，一方得られたデータや結論に対しては大変慎重かつ厳正に臨まれ，信頼性の高いデータの重要性を厳しく示されました．私は藤田先生や大脇さんと一緒に鋼の中の窒素の分析精度を ppm のオーダーにまで高めるのに苦労したことを覚えています．

私はかつて，先生のご退官記念講演を拝聴した時，先生がご自分の業績を紹介されるに当たって，次々とその研究に関係した卒業生の名前を挙げられるのを伺っていて，先生がいかに一人一人の学生を大切にし，それぞれの寄与を評価し尊重されておられるかに深い感銘を受けました．先生のこの態度こそが盛研究室の基調になっていたと思っています．公正無私，やさしいお人柄を卒業生はお慕いしていました．また多くの人の信頼を克ち得，数々の要職に就かれたのも宜なるかなと思っております．

長年にわたる鉄冶金学の教育・研究，さらに斯界の発展に尽くされました先生の偉大なご功績を偲び，ここに謹んでご冥福をお祈り申し上げます．

（京都大学名誉教授　昭和32年卒）

盛　利貞先生を偲んで

杉　田　　宏

京都大学名誉教授・産業技術短期大学名誉教授盛利貞先生は，2007年12月1日御逝去されました．1958年沢村先生の後任として教授御昇格とともに，冶金学第一講座鉄冶金学を担任されました．同じ時期に，我々4回生の内3人は，卒論研究として，先生の御研究中の「溶鉄の炭素飽和溶解度におよぼす Mo, W, Cu の影響および多元系溶体の炭素の活量計算法」（鉄・協1960･1）の実験とその特性把握を担当しました．当時は先生にとっては，膨大な引継ぎや，室内研究生への指導等最も御多忙な時であったと思われます．が，実験室内でのキビキビした小走り以外は，穏やかな英才学者とお見受けしました．私共学生にも，自らの研究内容を講義されましたが，その数式と実験の具体策は見当がつかず，後で研究室の先輩方に教えを乞い，乏しかった実験器具は，藤田助手（中部大学名誉教授）に造っていただき，炭素ルツボでの平衡実験を，計器を見つめつつ，徹夜を続けて行ったのも懐かしく思い出されます．「覚える」のではなく，「考え抜く」「実行する」を体験し，その後の自己形成の芯になったと感謝しております．

当時は光輝焼鈍設備導入の時期であり，就職直後から，盛先生に教えを乞いに，時にはお宅迄伺いました．話は「極限真空での平衡論」に迄および，他大学の先生方の紹介までいただき，あまりの熱心さに，その日いただいた夕食の内容等は，未だに想い出さず，先日お会いした奥様に笑われました．数年前に脚骨折を克服され，近隣散歩を目標としておられましたが，難聴が進み自らも不便を訴えておられました．2007年12月1日，奥様娘様の一年余にわたる手厚い介護の中で，天国へ向われました．私的には，私共の仲人をお引受けいただき，後には子供の結婚式にも御夫妻の御列席を頂いたり，近しくしていただきました．キビキビした行動力と，澄みきった温い目で接していただき，先生と云うより，大兄貴の様な存在でした．心から感謝をこめて御冥福をお祈りいたします．

（昭和34年卒）

盛先生の思い出

諸　岡　　明

先生が鉄冶金学講座を担当されたのは昭和33年，私たちが3回生のときで，夏休みの工場見学の最中に教授になられたと伺った．先生の引率で，八幡製鉄では出銑，三井金属彦島では亜鉛華の製造現場，神戸製鋼の長府工場ではパイプを曲げる方法といったものを見学させてもらった．初めての工場見学ということもあって，いずれも強烈な印象が記憶に残っている．当時は2年間の楽しい教養課程を経て，三回生になって初めて専門科目の講義を受ける．受講届けをするときの開講講義科目表の担当者名に助教授と印刷されていた．先生御自身は数年前から講義を担当されていたようだが，私どもの学年が教授としての先生の講義を初めて受けたことになる．

三回生の鉄冶金学第一の講義の内容は後で知ったのだが，アメリカで発行されていた，“Basic Open Hearth Steelmaking” を基に進めてくださった．今のようにコピーが簡単に出来る時代ではなく，口述筆記が中心で，一回でも講義をサボると後が大変な時代だった．今から考えると，当時の講義の仕方が最も身に付く方法で，一番充実した内容だったと記憶している．当然のことながら，それぞれの講義で，ノートをとっていたのだが，この講義のノートが一番充実し，完全に近いものだったので，最後まで残していた．

四回生になって，講義室は第一講義室で，これが階段教室，一番前列で，熱心に受講している少し年上の人がいて，それが，ここで執筆されている一瀬先生だった．講義は鉄鋼精錬に関する熱力学が中心だった．正直なところ，私自身そのときは内容を理解するには程遠い消化不良の状態だった．ただ，何となく将来の勉強に役立ちそうだといった予感だけはしていた．専門科目でその重要性が広く知れ渡っていたのか，他の専門の学生も受講していたのは先生の講義だけだった．

その頃は鉄鋼業界の景気が上向きで，粗鋼生産高がアメリカに次いで二番目，いずれは追い越すだろうという勢いだった．いまでもそうだろうが，学生もそういったことには敏感で，鉄冶金学講座が人気の中心だったと思う．学部での配属では，私は自信もなかったので，別の講座を選び，修士課程になって，勉強しなおすつもりで，あらためて鉄冶金学を専攻した．

先生は様々な分野を研究されていて，そのごく一部ではあったが，参加させていただき，大変楽しく，幸せだったと感謝している．

金属溶液論において，活量係数の対数の線形一次の近似式の係数が，溶体を構成している元素の相互作用を表わし，これらを相互作用パラメータと呼んでいる．これと似た感じの溶解度パラメータというのもあって，両者の関係が当時まだすっきりしていなかったが，ドイツの研究者が，整理してくれ，その際，様々な種類のパラメータが考えられることを示唆してくれた．この論文を見て，今までのわだかまりがすっと消えた感じがして，先生とパラメータ理論の一般化に取り組んだ．その結果，様々な有用な関係が得られた．その中で，それまで無限希薄溶体に限って成り立つと云われてきた特別な関係が実は成分の濃度がある条件を満たせば常に成立する関係に過ぎないことが判った．研究者によってはこれらの関係は実験によって求めるのが困難なときに利用できるだけという理解をしておられる向きもあるが，両系の実験が可能な場合はそれらの測定値が正しいかどうかの判定条件になる．この後，高次の展開も行ったが，先生には最初から最後まで，丁寧に検算をしていただき，大変ありがたかった．

実験の方では固体鉄の高温における水素吸収力（溶解度），スラグからの脱弗に関する研究などを手掛けさせていただいた．いずれも測定値は出たが，特に後者の場合は，反応性が高いので，なかなかきれいなデータが得られず苦労した．水素関係では高温になると容器から漏れ出したり，酸化物を還元したりする．また，熱伝導度も他の不活性ガス Ar と比べると大きな差がある．分子量の近い He も高温では殆どの物質を通り抜けてしまう．この性質はこのガスの精製に使われている．このような性質があるため，反応容器ごと外部から加熱すると，容器の耐熱性も問題になり，高温での測定は出来なくなる．そこで，研究の前半では比較的低温の領域で，測定を行ったが，反応容器の耐熱性がそれほど問題にならない高周波誘導加熱という内熱方式を採用しようと実験を始めた．その頃，ドイツのある学位論文に同じ方式で測定した研究が発表されたことも後押ししていたが，いざ我々が測定してみると，発表されたような結果がなかなか得られない．これは数値計算によるシミュレーションで固体金属の高周波加熱時の温度分布を求めた結果，熱力学的平衡状態にはできないということが判り，実験を中止した．この部分の研究などはまったく別の面から原因を追究できたわけで，先生が自由にやらせてくださったお陰と考えている．

また，自分自身，完結できなかったという思いの強いものに，固体内拡散，浮揚式溶解法，光学的測温法等々もある．いずれにしても様々な研究に関与させていただいた．これらすべての研究は自分にとって，かけがえのない貴重な経験となっていて，楽しく勉強させていただいたと感謝している．

学部学生の頃，ソ連が世界初の人工衛星を打ち上げ，その科学技術力を世界に見せつけた．そこで，ソ連に対する関心が高まり，ロシア語の習得ブームが広がった．冶金学教室内でもロシア語の先生を講師に招き，当時若かった先生方や，同級生の仲間たちと何回か講習を受けた．教養部では臨時のロシア語教室が開かれ，教室の割り当てが無いもので，ロシア語の先生の部屋で講義があって，学生が溢れていた状態だった．

当時のソ連における研究状況は霧の中で，ロシア語の学術誌がどうにか国内に入りつつあった．数編の論文を翻訳した．そのうちの一編を学振19委員会で紹介していただいたこともある．確か希土類元素による脱酸だったと記憶している．その頃から学術振興会第19委員会にはよく連れていって頂き，前述の相互作用パラメータや，化学反応平衡値の推奨値決定の作業にも参加させていただいた．そのときは各委員が調査した文献のリストを自作のデーターベースソフトで整理し，皆さんに提供したこともある．また，鉄鋼便覧執筆に参加させていただき，図表の作成や計算に携われた．これなどは，気ままに好き勝手なことをやらせて下さった賜物と思う．

マイクロコンピュータが世の中に普及するごく初期の頃，これに凝ったときも，マイクロコンピュータを使った制御を卒論のテーマにし，その学生と一緒に勉強したことがあるが，その頃周囲の大半の人は殆ど関心を示していなかったようだが，先生は逆に，後押ししてくださっていた．

尼崎へお出でになった後も，何度もお邪魔し，研究の

ことや様々な御相談を受けていただいた．

話は変わって，博士課程の頃だった．

最近は大掃除するという風習がなくなったようだが，先生が年に一度のお宅の大掃除のときに呼んでくださり，お宅を隅から隅まで見させていただいたことがある．そのとき，一枚の油絵を見つけた．伺ったところ，先生がお若い頃お描きになったのだという．（そういえば，麻雀もお強いとのこと，）普段研究室ではお見せにならない一面を見せていただいた気がした．ずっと後になって，御友人の絵を買いたいと言われたとき，このことを思い出していた．私自身も小さいとき絵を描くことが好きで，自由の身になった今になって，先生を思い出しながら再開し，毎年，一度は小さなグループ展に小作品を何点か発表しているが，最近，ある全国規模の公募展に初めて出品し，入選，入賞させていただき，なぜか会友にもならせて頂いている．

お正月になると，研究室の職員と在洛のあるいは自宅に帰りそびれた学生全員を先生のお宅に御招待くださる．大勢がお邪魔し，先生もさることながら，奥様も大変だったろうと思う．私たちには到底真似が出来ないだろうと思いながら御好意に甘えていた．

先生は数多くの仲人をしておられる．私どももそのうちの一組だ．結婚前に，家内（その当時は婚約者といった方が）と先生のお宅へお邪魔したとき，奥様が，家内を慮って「鉄の話ばかりじゃ，面白くないでしょ？たまには男女の関係などの話のほうもね．」と仰ってくださったのを覚えている．

先生のお宅へは度々お邪魔させていただいたが，何時も，奥様は笑顔でお迎えくださっていた．長男が生まれて，間もなしの頃，お宅へお邪魔したときなどは，息子がむずかりだし，気がついたら，オムツが．奥様がお手伝いくださり，交換したが，あの応接間で，オムツを交換させていただいたのは，恐らく息子だけではないかと思う．

ある時期，年末になると研究室の職員全員を家族ぐるみで市内のホテルか時には著名なレストランに招待くださり，ひと時を過ごすということが何年か続いた．あるときは末娘が，先生に夢中になって話しかけ，先生が一つ一つ丁寧に受け答えしてくださったり，あるときには長男が，子供向けに用意していただいた料理よりも大人用の料理が欲しいと言ってごねたこともあったが，そのときも上手に受け答えしてくださっていたのが印象的だった．私どもの子供たちも可愛がってくださり，あるとき，長男をこの子だったら貰っても良いと言ってくださったときは冗談だとはわかっていたが，大変にうれしかった．その長男が大学に入ったときは自分の子どものことのように心から喜んでくださった．その息子も，今は親になり，この夏も，家族を連れて，帰郷してきた．先生の話をしたところ，大変懐かしがっていた．

まるで自分史のようになってしまったが，それほど先生は私の人生に大きく関わってくださった．

想い出は次から次へととめどなく，走馬灯のごとく，連鎖反応のように出てくる．

お世話になりました．沢山の楽しい想い出を戴き，有難うございました．

（京都大学名誉教授　昭和35年卒）

盛　先生の思い出

岡　島　弘　明

1. 出会い

盛 先生に初めてお会いしたのは教養部の時代でした．

私は当時，数学や機械の授業の内容についていけず，技術者として将来やっていけるのだろうかと悩んでおりました．それで金属系教室の学生相談係を担当しておられた先生の所にお伺いしたのです．大変やさしい物静かな印象でした．私の話を静かに聴いてくださり，学部での授業の内容や技術者とはなにか等ご自身の体験も交えながらお話してくださいました．それでスッカリ気持ちが落ち着いて，その後は迷うことなく楽しく授業に取り組めたのを憶えています．

2. ご家庭

ご自宅に初めて訪問したのは憧れの鉄冶金研究室に配属になった後のお正月でした．

閑静な場所のお住まいに大挙してお伺いし，山のようなお正月料理のおもてなしを受けました．とても明るいさわやかなご家庭との印象をうけました．

その時のすごい量の栗きんとんの印象が強く，私も結婚して家庭をもちましたが，お正月には妻に栗きんとんは必ずつくってもらい手間がかかるのでクレームをつけられています．

3. 研究

私の研究課題は，Fe－C－第3元素系合金における炭素の活量係数に及ぼす第3元素の影響ということで，第3元素としてS，Mo，Wを担当しました．当時分析方法が化学分析で大変苦労を致しました．1年間の努力の結晶がグラフの上のたった1点なのです．研究者魂をみる思いがいたしました．先生は我々の苦労をよくご存知で，励まし，ご助言をいただき，そして結果を評価してくださいました．修士論文のときに活量係数の数値と結晶構造との関係を解析しようと試み，当初簡潔な関係式が得られたのですが，その後不明点を考慮して弄くってかなり複雑な関係式になり断定しがたくなってしまいました．先生も当初期待していただいておりましたので

残念がっておられました．私の知識と能力がもう少しあったならと残念でかつ申し訳なく今でも思っております．

4. 鉄鋼短期大学学長

先生は第2の職場として鉄鋼短期大学（現在，産業技術短期大学）の学長になられました．私はこのことを大変嬉しく思いました．先生に最もふさわしい第2の職場であると思いました．

私にもこの大学の思い出があります．入社して実習生のとき，私の配属先の事業所からなかなか鉄鋼短大にうからないということで補習授業が計画され，私は化学の授業を担当いたしました．その年は見事全員合格ということで整員教育担当の管理職の方からご褒美に阪神ホテルでチーズフォンヂュウなるものを初めて食べさせてもらったのです．

また，私は西宮の阪急沿線の夙川という所に住んでいますが，なんとある日，夙川の駅といかりスーパーとの間の久出川の橋のところでいかりスーパーの買い物袋を持った先生にお会いしたのです．「ここの品物は良い，間違いがない，信用が置ける」とおっしゃられました．当時，先生が甲陽園の方に住んで居られたことを後で知りました．

5. 最後に

その後，盛先生御夫妻にお会いしたのは先生の藍綬褒章叙勲記念祝賀会の時でした．永年鉄鋼技術の研究と教育にご尽力くださった先生にふさわしいことと大変嬉しく思いました．将来，私も私の好きな原子の世界に仲間入りするときがくるわけでありますが，その時，先生とどのような出会いとなるかわかりませんが，今後より良き人生を送り先生に胸を張ってお会いできるようにしたいと思っております．

（昭和41年卒）

恩師 盛利貞先生

竹 士 伊知郎

私の恩師と呼べる先生は何人かいらっしゃいます．盛先生は，間違いなくそのお一人でした．

しかも，私のこれまでの人生に大きな影響を与えていただいたお一人でした．

考えてみますと，盛先生のおそばで直接ご講義を受け，研究の指導をいただいたのはわずかの年数であり，私の50年ほどの人生を考えましても，極めて短時間にすぎないのです．

それでも，最大の恩師のお一人と思うのです．

思い起こせば，卒業の前年の9月にさかのぼります．（当事の就職活動の開始は，そんなものだったのです）

その時代は，第一次オイルショックにつづく第二次オイルショック後の不況期で，鉄鋼や重工メーカーを主とする重厚長大型産業（今では死語ですが）が新規採用を大幅に手控えた時期でありました．そんな時に就職を希望する私を，先生は，大変心配していただいたのです．

教授室で，先生は静かに口を開かれました．

「鉄鋼は，今はあまりよくないが，わが国の基幹産業として将来も重要な素材産業である．技術者は冶金屋が主流を占めている．

君は家も京都で，長男であるし，関西に本社と主力工場のある中山製鋼はどうか？

僕の冶金の後輩にあたる常務も，久しぶりの京大からの採用に熱心である．最近は業績も好転しているし，今後，大型の設備投資の計画もあるようだ．必ずや活躍の場はあると思うよ」等々，こちらを思いやった真摯でかつ理詰めのお話は，当時，大した将来展望もないくせに「熱い・汚い・きついの素材産業より組立て型産業のほうがいいな．いや，製造業でなくてもいいさ．それに，人生いたる所青山あり，就職すれば日本中いや海外だってどこででも働くぞ」などの，ひそかな，若者特有ではあるが幼稚な意気込みを，瞬時で打ち砕くには，充分であったのです．

こうして，あれよあれよという間に，半年後には大阪の鉄鋼メーカーに身を置くことになりました．

爾来，会社では種々の業務を経験しました．中でも，当時すでに成熟したといわれていた鉄鋼業にありながら，複数回に渡り，大型の設備投資計画に携わることができました．

棒線圧延，熱間薄板連続圧延の新鋭工場の建設・立上げを担当したのはその最大のものです．最近では，熱間薄板連続圧延工場で生産される，超微細粒鋼板の研究・開発をやらせていただく幸運にも恵まれました．これらの研究・開発活動を通じ，牧先生，梅本先生，津崎先生，飴山先生ら多くの水曜会の諸先生方にご指導いただき，その後，大河内賞受賞など望外の成果にもつながりました．

また，製鋼関係の仕事をしていた折には，一瀬先生，小野先生の研究室にお邪魔をして，製鋼ダストの処理に関するお知恵を拝借したこともありました．鉄鋼技術に関する仕事に携わってきたことで，卒業後の方が先生方にお世話になっているのです．

鉄鋼の製造技術に関する業務と並行して，会社から派遣された品質管理セミナー参加をきっかけに，（財）日本科学技術連盟 大阪をベースに，統計と品質管理の勉強と指導を20年以上続けています．ここでも水曜会の近藤先生，倉知先生，朝木先生，澤本先生，大槻先生らの諸先生にご指導をいただいております．鉄鋼に限らず，

わが国の「強いものづくり」にいささかなりとも貢献できる活動を続けたいとも思っております．

私事の話ばかりで恐縮なのですが，こうして振り返ってみますと，つくづく30年近くの間，無我夢中で，思う存分やってこられたと思うのです．そしてそれは，天の配剤とでもいうべき幸運の賜物であり，さらにその幸運は，あの時，盛先生が示された「鉄鋼」「関西」の二つのキーワードなしには考えられないのです．

しかし，キーワードが意味する先生の真の親心を身にしみて理解したのは，社会人になって20年以上も経過してからであったように思います．

ご退官後，尼崎にある鉄鋼短大（現産業技術短期大学）の学長をされていたころ，鉄鋼協会の関西支部の行事などでお目にかかる機会がありました．

「今度は，君のところへ，学生の派遣をお願いにいかないといけないねえ」と気さくに声をかけていただいたことも思い出します．同短大は，今と違い鉄鋼業を主とする企業からの派遣学生がほとんどだったからです．

その後，盛先生の薫陶を受けた同短大の卒業生である弊社スタッフといっしょに仕事をしたことも幾たびかありました．大いに彼らの仕事振りに支えられたもので，これもまた盛先生のお陰かと思ったものです．

これらの思いと感謝の念は，結局，先生には直接お伝えすることができなかったのです．ここ10年以上は，直接お目にかかることもなく，年賀状を差し上げ，いただくだけのやり取りになってしまっていました．お元気なうちに，せめて近況の報告をさせていただくことのできなかったことを悔やむばかりです．

しかし，先生なら「元気でやっているのならそれでいいよ」といっていただいたはずとも，手前勝手な私は思うのです．

この場にて，あらためて心から御礼を申し上げます．「先生，私は，先生のお陰で，水曜会の諸先生，諸先輩にも，ご指導いただき，エンジニアとして思う存分，仕事をさせていただきました．そしてこれからも，若い人を指導し，少しでも社会に貢献できるような仕事ができればと願っています．先生のお導きのおかげと改めて感謝する次第です．ありがとうございました．先生どうか，ゆっくりお休みください．そしてこれからも，不肖の私をお見守りください」

（㈱中山製鋼所　昭和54年卒）

「盛研最後の世代同窓会」　開催報告

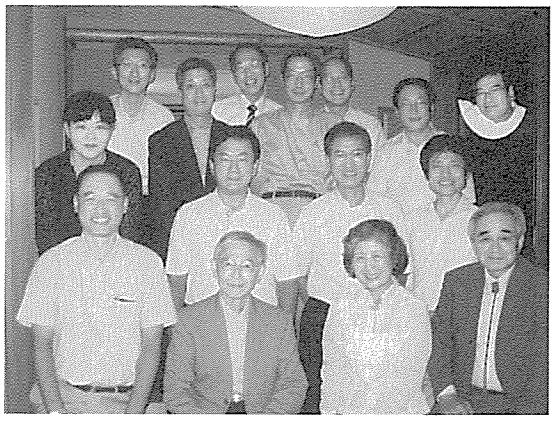
増　村　茂　樹

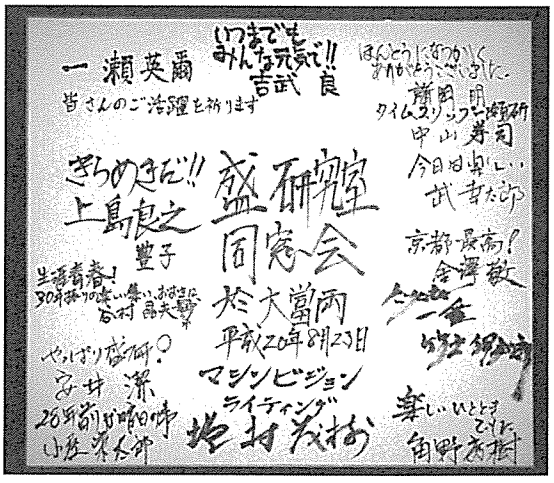
去る8月23日（土）に京都の先斗町鴨川沿いの大當両にて，「盛研最後の世代同窓会」ということで，故盛先生のご縁により，かつての鉄冶金教室盛研に集った最後の5年間の卒業生が集まり，当時，盛研究室におられた一瀬先生と諸岡先生を囲んで，旧交を温める会が催されました．

この会は，5月に開催された盛先生を偲ぶ会に集った有志が相談し，これを機に，盛先生をご縁として盛研の最後を飾った者達が集まり，盛先生が研究室現役時代にやっておられた御前会議（当時，研究進捗会議を盛研の学生達はこう呼んでいた．また，更には「お座敷」というのが通称であった．）を模して，ほぼ30年ぶりに改めて近況を報告し合い，盛先生のご縁を大切にして何かできることを模索しよう，という主旨でまさに「お座敷」よろしく，開催されました．

これは，盛先生がいつも真摯な姿勢を貫かれた，自らのご研究や我々学徒に対する御指導に対して，いつとはなく盛研に受け継がれてきたネーミングの会議であって，それを模した当日の会も，まるで盛先生がそこにおられて，皆の話にうれしそうに頷いておられるような，そんな感じのする会になりました．

今はそれぞれの分野において現役でご活躍中の有志





が，これが種となり，またなにか新たな仕事ができるかもしれない，という予感を感じさせる会でした．会が終わる頃には，早くも，次回の予定の話が出るなど，皆やる気満々です．

最後に一瀬先生からは，「『ものづくり』という視点に於いて，単に『作る』や『造る』ということだけではなく『創る』ということを心がけて，単なるものの製作や製造だけでなく科学や原理を創り出しなさい」というお話しや，諸岡先生からは，「この世における人生を大切にして，一生を何度も生きる気持ちで，皆，体を大切にして自らの人生に誠を尽くせ」という人生訓をいただき，一堂，ほぼ30年前の学生に戻った心持ちで，その日の感動を胸に，またそれぞれの持ち場へ散ってゆきました．

会が終わる頃には嘘のように上がった折からの嵐のような雨は，まるでこれまでのさまざまなことを綺麗に洗い流してまっさらな心を取り戻し，我々を新たなステージへと誘っているようでもありました．

（シーシーエス㈱　昭和56年卒）

第1回盛研最後の世代同窓会参加者：（一瀬英彌先生ご夫妻）（諸岡明先生）（S. 52 上島良之）（S. 52 金澤敬）（S. 52 武幸太郎）（S. 53 谷村晶夫）（S. 54 竹士伊知郎）（S. 54 吉武良）（S. 55 角野秀樹）（S. 56 小屋栄太郎）（S. 56 上島豊子）（S. 56 安井潔）（S. 56 中山孝司）（S. 56 増村茂樹）（水曜会入会年順・氏名）

追　悼

特別名誉会員　日下部吉彦　先生



日下部先生，長い間お疲れ様でした

金　山　清　一

今年の正月に先生からの年賀状を拝見して，「あれっ，先生の筆跡が変わって来たようだ．これまでの整って慣れた文字とは少し違う．」と感じたのは恐らく私だけでは無かったでしょう．

ご葬儀の折，ご遺族様から昨年先生が入院された際，何が何でもと頑なに年賀状をしたためられたとの話をお伺いしました．先生の生への証というべきか，周りの人々への思いやりの心に，ただただ頭の下がる思いが致します．

昨年，私は電力会社を退職して，現在は高松にある地質調査会社に勤めております．大学卒業以来，40年間余りの大半は地質調査とその周辺の分野の仕事に費やして来ました．

そもそもこのように野外調査へ入るきっかけを与えて頂いたのは日下部先生でした．大学4回生に進級して，以前から漠然とフィールド科学に憧れを抱いていた私は迷わず工学系の地質研究室にお世話になりました．早速5月から卒論のフィールドとして京都丹波地域を与えられました．先生は地質のイロハも知らない私に対して，野外で厳しくそして細やかに指導して下さいました．日が経つにつれ，先生に見習って石を叩いたり，割ったりしながら後からついて歩きました．この石の中に一億年よりもっと前の小さな化石が入っていると言われ，失敗を重ねながらも何枚かの薄片を作り，顕微鏡下に点在する小さく丸い放散虫の化石を見出した時の感激は今も忘れることができません．

先生は当時，通産省の広域地質調査委員をなさっておられたので，私は大学院に進んでからも先生の採取した岩石の担ぎ手の一人として，兵庫，滋賀，奈良，和歌山の近畿一円にとどまらず福井や岐阜，四国にもご一緒させて頂きました．その間，先生から有用鉱物のことはもとより，山崩れや地すべり，トンネルやダムの地質について多くのご教示を賜りました．これまで私は仕事上の様々な場面で専門家の方々からの助言を頂いたこと，あるいは若い人たちへ技術の大切なところを伝えることがありましたが，この時期の経験が何よりも心強い助けとなり，自信を与えてくれたのでした．

会社では，本業の新規発電所などの立地調査に従事する傍ら，これまでの地形・地質に関する実務経験から香

川県の活断層や四国中央構造線の地震発生可能性調査に携わることとなりました．そしてこれを契機にトルコ，インドネシアなど海外の地震断層についても見聞を広めることができました．

京大の助手から会社員に転身して間もない頃，先生は学生を率いて四国の採石原石山へ視察に来られ，高松に宿泊されました．そして我が家にも立ち寄って下さいました．阪神大震災の10年位前でしたが，私はこの時期，震度7クラスの地震が発生するかも知れないと言われていた，高松市南部の長尾活断層の調査を行っていました．そこで代表的な断層露頭へ案内して皆で議論したことがありました．今もそれらが昨日の出来事のように思い出されてきます．

今日まで大過なく好きなことを続けられたのは，ひとえに日下部先生の厳しく，かつ愛情に満ちたご指導の賜物と深く感謝しております．

ここに謹んで哀悼の意を表し，先生のご冥福を心よりお祈り申し上げます．

（田村ボーリング株式会社，昭和42年卒）

日下部先生を偲んで

山 崎 久 枝

1974年修士を終え，結婚，休職とはっきりやるべき仕事が見出せず，研究室に時折顔を出していました．日下部先生は，当時1977年ごろ，1号館へ教室が移転する際に鉱物標本室の引越しという大変お忙しいさなかにおられましたが，そんな私のために資料の整理のアルバイトを命じて下さいました．そういう日々昼休みの研究室は日下部先生がいつもあれこれ世事を談義しとくにスポーツ談義は盛り上がっていました．野球はアンチ巨人．1979年のいわゆる江川事件のときなどもとても立腹しておられたように思います．反骨精神の強さと人一倍のユーモアで研究室の昼休みが今でも忘れることはできません．なお私のお世話になりました鉱床研には，港先生，鈴鹿先生，西山先生，金山先生がおられました．そして優秀な先輩，後輩が大勢寄り集っていました．

私はその後環境計量という仕事をすることになりました．見知らぬ分野に進む不安がありましたが，大いに関連があってびっくりしました．アスベストや粉塵の分析においても，前者は，クリソタイル，アモーサイト，クロシドライトと，多様ですし，粉塵においては遊離石英（コーツ）があるかないかで異なり，ノレルコのチャートもまた鉱物等の分離分析の技術も必要であるのはいうまでもなく幅広く資源鉱物的な知識が求められました．

そういうわけで卒業後まで先生に甘えてお世話になりっぱなしだったこと，恩返しすべきときなのにとうとう一度として実現できなかったことを心からおわびしたい気持ちでいっぱいです．先生のご冥福を心からお祈り申し上げます．

（昭和46年卒）

日下部先生の思い出

吉 田 宇 男

日下部先生と初めてお話ししたのは，私が大学3年生の時のはずですが，山ばかりで，授業にあまり出ておらず，実際に記憶にあるのは4回生となり，日下部先生が助教授をされていた港先生の研究室に入ってからです．

ただ，3回生の時だと思いますが，日下部先生の応用地質の講義を聞き，地質に興味を持ち，港研究室に入った記憶があります．

勉強での先生との思い出は思い出しませんが，次のことがよく記憶に残っています．

私が阪神タイガースの大ファンで阪神が勝ったときには，研究室に行くときにいつもスポーツ新聞を持って行き，日下部先生は南海ホークスのファンだったと記憶していますが，お互い応援するチームが弱いため，よく愚痴を言いながらプロ野球談義をしたことを思い出します．日下部先生はいつも静かな口調でしたが，愚痴っぽくプロ野球の話をしておられたことをよく覚えています．京都生まれの京都育ちで柔らかな京都弁でよく話しに付き合ってもらっていました．

卒業後，学校にあまり顔を出さず，先生と疎遠になっていましたが，日下部先生，港先生が元気にされていることを聞いていて何時までも元気でいて下さると思っていました．

日下部先生の若干愚痴っぽい京都弁が懐かしく思い出されます．

ご冥福をお祈りするとともに，ご家族が元気でおられることを祈念しております．

（日本工営株式会社，昭和53年卒）

日下部先生へ

渡 辺 秀 敏

先生

訃報を耳にした時私は日本におりませんでした．この手紙を書いている現在もまだ先生のお墓参りも出来ていない有様です．非礼をお許しください．

最初に先生に会った時自分の中でイメージしていた大学の先生と実際の先生とのギャップに驚いたことを未だに思い出します．

本当にその辺にいる普通のオッサンに思えたからで

す．（先生すみません．）その後授業を受けてからは見た目と中身が違うことに気付き安心しましたこと付け加えさせて頂きます．

大学卒業以来二十有余年たち，私自身当時の先生の年齢に近いどこから見てもまぎれもない中年親父になりました．

大学生とはいえ，まだ何も訳のわからない我々を根気良く指導くださった当時の先生の御苦労がやっと判るようになりました．

地質鉱床学教室の仲間はそれぞれ別々の道を歩んでいますが，おそらく自分たちの人生のなかで最も充実した時を日下部先生と過ごせたこと，私だけでなく皆も誇りに思っていることと存じます．

あと数十年すれば，私もまた先生にお会いできます．今度は一つも単位を落とさぬよう勉強しますので楽しみにお待ちください．

それでは，次お会いできる時までごきげんよう．

（住友金属鉱山，昭和57年卒）

日下部先生追悼文

小 池 克 明

日下部先生とは平成元年の退官記念パーティーにお会いして以来，年賀状で近況をお伝えするだけになっておりました．13年ほど前にようやく博士論文がまとまり，先生にお届けしましたところ，自筆でのご丁寧なお礼の手紙をいただきました．そのとき助手としての職務に勤しみながら，博士論文をまとめるのに苦労しておりましたが，先生のお手紙にそれまでの大変さが報われた気持ちになり，さらに尽力しようと勇気付けられました．退官記念パーティーから19年近く経ってお会いしましたのが，最後の悲しいお別れの場となってしまい，長い間のご無沙汰をとても申し訳なく感じました．しかし，先生の温厚なお人柄を偲ばせる安らかなお姿に，これまでのご厚誼への感謝を込めながら合掌できましたことに，少し救われた気持ちになりました．先生にも少しはご容赦いただけたのではないかと思います．

3回生の夏休み前に仮配属のための研究室紹介や訪問がありました．地質関係の研究室とは決めていながらも，いずれも魅力的なテーマを研究されており，最終的に絞り切れていませんでした．7月の土曜日の昼下がりに日下部先生の研究室を訪問しましたところ，コーヒーをいただきながら，先生と研究室の先輩方と暫く雑談させていただきました．もちろん自分の取り組みたい研究テーマで最終的には研究室を決めましたが，このときの研究室のアットホームな雰囲気，および授業とは違い，リラックスされたときの先生の優しいお人柄も決め手になったような気がします．また，私の父とお年が同じということにも親しみを感じました．

4回生と修士課程の計3年間，日下部先生には大変お世話になりました．この間，北山での地質巡検，信楽での長石鉱床調査，丹波山地での地質調査などに連れて行っていただき，クリノメータの使い方も覚束無い初学の私に，地質の見方や調査法のイロハを教えていただきました．先生は地質鉱床学と応用地質学の分野で幅広く研究されましたが，当時は長石鉱床の分布や鉱量評価の研究にも取り組まれていたと記憶しております．信楽でアプライト脈の走向傾斜や幅という初歩的な測定でしたが，本の少しはお手伝いできましたことを嬉しく感じております．先生は還暦を迎えられてはおりましたが，地質巡検では誰もついて行けないほど健脚で，次から次へと各露頭で岩石名や地質構造を教えられました．修士論文の一環として丹波帯にある複数の花崗岩体の節理調査を行いましたが，その下準備の調査にも先生に来ていただきました．片っ端から機械的に節理を見るのではなく，まずは全体を見回して方位を代表する節理を選び出すことが重要，と教えていただいたことが昨日のように思い出されます．

調査や研究室対抗の野球大会の打ち上げでは決まって，大学近くの中華料理屋から大量につまみを仕入れ，夜遅くまで研究室で飲みました．研究室恒例の新年会では各自の故郷の土産を持ち寄りました．松坂牛などは大好評でしたが，私が持ってきた栃木特産の干瓢には誰も手を付けようとしませんでした．この干瓢を先生はご自宅に持って行かれ，翌日，美味しく煮て来ていただいたことも懐かしい思い出です．

先生は多くの授業を持たれていましたが，いずれも豊富な資料を用意され，丁寧に分かりやすく教えられました．普段は温厚な先生ですが，授業中の私語には特に厳しかったです．この授業への熱意，厳しさは教員の鑑となるものです．期せずして私も大学の教員となりましたが，先生のお姿は知らず知らずのうちに良いお手本となっています．今後も先生のように学生思いで，フィールドワークを大切にし，自然から学びとる姿勢を持ち続けたいと存じます．

日下部先生の研究室で3年間を楽しく過ごさせていただきました．先生の多岐にわたってのご教授に重ねて感謝申し上げながら，ご冥福を心よりお祈りいたします．

（熊本大学大学院自然科学研究科，昭和61年卒）

日下部吉彦先生の思い出

上 田 晴 彦

冬も盛りの今年の一月二十五日，日下部吉彦先生が他

界された，と楠田啓先生より連絡が入った．卒業してから久しい年月が経ってはいたが，電話から聞こえる楠田先生の懐かしい声とともに，自分の青春時代に大きな影響を与えてくださった日下部先生がもうこの世にいないという寂しさで，しばし呆然となった．

私が日下部先生に初めてお目にかかったのは，教養課程の頃であったと思う．まだ専門課程に進む前であったため，遠目からお見かけするだけでお話しする機会などなかった．そのときは学者特有の威厳のようなものを感じたが，学年が進みさらに先生の研究室に所属し身近に接するようになると，親しみやすいお人柄にどんどん惹かれていった．今思うと，古き良き時代の大学教授の典型的な方であったのではないかと感じている．

日下部先生の研究上のご活躍についてはご存知の方も多いと思われるので，ここでは先生にまつわる私的な思い出のひとつをご紹介したいと思う．私は平成元年卒業であるので，日下部先生退官の年と同じになる．そのため私の卒業後，すぐに退官記念パーティーが開かれた．日下部先生にゆかりの深い年配の人たちに紛れ込んでうろうろしていると，私を見つけた先生が一緒に写真をとろう，といって私を先生のおそばに立たせてくださった．「私でよいのですか」と訪ねたら，「年齢とかそんなもの関係ない．同じ研究仲間だ．」といって笑っていらしたが，その笑顔は今でも鮮明に覚えている．

その後，私は全く異なった分野を専攻し，現在では地方大学の教員として教育研究にいそしむ多忙な毎日を送っている．私は学生とは「学問を愛する同士」という形で接しようと心に決めているが，それは日下部先生のお人柄から受けた影響が大きいと思っている．私の大学教育の理想像は，日下部先生をはじめ，その当時お世話になった西山先生・楠田先生，また京都大学の自由な校風に大きく負っている．日下部先生から教えを受けた最後の学生として，心より先生のご冥福をお祈りするとともに，わが母校のますますの発展を切に願っている．

（秋田大学教育文化学部，平成元年卒）

日下部篤子様（日下部先生ご長女様）よりのお手紙

拝啓　立春を過ぎたとはいえ、まだまだ厳しい寒さが続きますが、皆様にはご健勝にてご活躍のこととお喜び申し上げます。

先般、父、吉彦の永眠に際しましては、過分なご供花を賜りまして誠にありがとうございました。お蔭様をもちまして本日、

釋　吉　寳

忌明け仕りました。

生前、卒業生の方々が各分野でご活躍されることを何より喜んでおりました父ですが、私達にとっては武骨で無口な父でした。家では大学でのことをあまり話さず、先般の通夜、葬儀告別式の折に、卒業生の皆様から父のいろいろなエピソードをお伺いして、初めて、私達の知らない父の一面を伺い知ることができました。私達にも生前にもっといろいろな話をしてくれればよかったのにと思いつつ、生前の父を懐かしんだ次第です。

ご存知のように父は健康に大変自信を持っておりました。それが仇となりまして、昨年6月半ばに、胆管癌がかなり広がった状態で見つかりました。東京も含めて複数の病院で診断を受け、治療方法について相談した結果、母校の京大にて治療を受けることになりました。82歳という高齢も考えた上で、手術はせず、放射線にて胆管内の癌を縮小させ、胆管にチューブを埋め込んで胆管を詰まらせぬように処置し、10月3日にいったんは、元気に退院致しました。しかし、このまましばらく元気に過ごしてくれるのではとの私達の願いもむなしく、退院して1ヶ月あまりで、胆肝炎を併発してしまい、11月13日に再入院いたしました。高齢のためゆっくり進行する癌よりも、胆管を詰まらせ肝機能を落とし抵抗力を弱め死に至らしめやすい胆肝炎の方が危険だと言われていましたので、私達も注意していたつもりだったのですが、ここでも、父の丈夫さゆえ状態の変化に気が付くのが遅れてしまったのが、家族としては残念でなりません。ただ、この持ち前の丈夫さで、父は、その後何度か陥った危険な状態の度毎に持ち直してくれました。

元気になって家に帰ることを最期まで希望しておりましたので、今年のお年賀状も病院のベッドの上で気力を振り絞

って書きましたが、望みを果たせず、1月23日23時44分に力尽きました。あまり苦しむことなく過し、逝くことができましたのが、せめてもの救いと思っております。

水曜会では特別名誉会員にしていただいておりましたので、送られてくる会誌を読んだり、またどんどん会員数の増えていく名簿を拝見して、大きな組織になったなあと感慨深げにしておりましたことを記憶しております。会員の皆様には、お体の過信などなさいませんように、どうかくれぐれもご自愛の上、ますますご活躍下さいますようお願い申し上げます。

本来ならばお伺いしてお礼を申し上げるべきところでございますが、略儀ながら書状を持ちましてお礼申し上げます。

敬具

平成20年2月23日

日下部　篤子

水曜会会員の皆様

京都大学大学院工学研究科教授　福中康博先生は定年退職されました.



福中康博先生ご略歴

福中康博先生は，平成20年３月31日をもちまして定年退職されました．先生は，昭和43年３月京都大学工学部冶金学科をご卒業後，同年４月に京都大学大学院工学研究科修士課程冶金学専攻に入学，昭和45年４月に博士課程に進学され，昭和48年３月に所定の単位を取得後退学されました．その後，昭和50年３月に京都大学工学博士の学位を授与されておられます．同年４月からカナダのトロント大学において，ポストドクトラルフェローを経てリサーチアソシエイトとして研究に携われておられます．昭和52年10月に京都大学工学部冶金学科助手に任官となり，平成７年10月に京都大学工学部資源工学科助教授に昇任され，平成８年４月に大学院重点化に伴い京都大学大学院工学研究科助教授となられました．京都大学大学院エネルギー科学研究科の発足に伴い平成８年５月に同研究科エネルギー応用科学専攻助教授に配置換となられ，その後，平成18年７月に同専攻教授に昇任され，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を担当され，退職まで至っておられます．

福中先生は，この間，永年にわたって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，環境資源工学会理事，日本マイクログラビティ応用学会理事等の要職に就かれ，関連分野の学術行政に大いに尽力されました．さらに先生は，学術交流活動として，多くの国際会議に我が国を代表して出席されただけでなく，多くの国際会議・シンポジウムを主宰しておられます．研究面では，鉱石等の粒子の粉砕・分級・混合に関する研究，流動層の反応操作解析，トップインジェクション（吹込み溶錬操作）に関する研究，微小重力場における水電解に関する研究など，基礎研究から応用研究に至るまで多くの優れた研究を推し進めて来られ，それらの成果を国際的に著名な学術雑誌に多数発表されておられます．

このように福中先生は，約40年にわたって冶金学，資源工学，エネルギー科学，それぞれ専門分野において，斯学の進歩に大きく貢献されました．現在，早稲田大学客員教授として，学生の研究に指導的な立場として継続してご尽力されています．

（日下英史）

福中先生退官に寄せて

葛　谷　俊　博

私が修士の２回生の時に福中先生が助教授として赴任

してこられて以来，10年以上お世話になっております．先生の最初の印象はあまり良い物ではありませんでした．毎日先生に会うたびに小言を言われ，最初の2年間はなるべく先生と目を合わさないようこっそりと研究室へ通う有様でした．研究室のゼミでは少しでも不勉強な所があると2時間にわたってつるし上げを食らうこともありました．福中先生が研究指導されている学生は，昼夜を問わず実験しており，この先生は鬼のように厳しい先生だと唖然としておりました．その半面，先生のやっておられる研究テーマは先進的なところがありμGでのCu電析実験やLi電池の研究は，非常に興味深いものでした．現在の，電気自動車の開発や半導体の銅配線技術など，先生の研究テーマは時代を先取りした物であったのだなと今更ながら感心させられます．

先生が宇宙資源エネルギー研究室（当時は，資源精製工学講座と呼ばれていました．）に来られて3年目ぐらいから先生と色々話すようになりました．今までの先生に抱いていた考えはすべて誤解ではなく，間違いなくその通りだと再認識させられました．しかし，博士をとるにあたっていろいろとお世話になり，先生の家の方角に足を向けて寝られないなと思うようになったのもこのころであります．博士を取得してから一年間，福中先生からはいろいろな分野の先生を紹介していただき，電子顕微鏡や乾式精錬を習う機会を与えていただきました．また研究室を出る時も出てからも，いろいろと面倒を見ていただきました．特にポスドク先を紹介していただいたことや，ポスドク期間中においても研究の便宜を図っていただいたことは今でも感謝の念に堪えません．

福中先生が退官されると聞いて，先生との思い出が走馬灯のように思い出されます．大部分はつらい思い出なのですが，軽井沢での研究会や初めて電子顕微鏡に触った時など研究者としての喜びや刺激も先生からたくさん与えていただいたのだなと思います．先生はこれからも研究の世界で活躍されることと思いますが，今後とも先生のご活躍を願ってやみません．

（室蘭工業大学，平成6年卒）

僕知らん，は嘘．

本　山　宗　主

学部四回生で福中先生の研究室に配属されて以来，私が京都大学を離れるまでの約七年の間，研究に関わる事は固より，学会や学食での昼食など，実に色々な場で御一緒させて頂きました．本当に，数え上げればキリがないほどの御面倒を，親身になって見て頂きました．この場を借りて，改めて，心より御礼申し上げたいと思います．本当に有難うございました．

先生の発する言葉の端々に，先生の信念や価値観を垣間見る瞬間が，私にとっては何よりの思い出です．正しい知識や研究への取り組み方を教えるだけでなく，そういった，学生達に自然と伝わる信念や価値観への影響も含めて教育であるという意識を，非常に強くお持ちだった先生のように思います．

福中先生は海外にも幅広い人脈を持っておられ，そして積極的に著名な海外の先生方を研究室へ招かれました．私達学生に高い目標を与え，そして動機付けをされる事に大変熱心に取り組んでおられました．必要があれば，滋賀県立大学の菊池潮美先生や名古屋工業大学の隅山兼治先生の研究室に足繁く通わせて頂きました．幅広い経験と，堅実な知識を学生に植え付ける事を大事と考えておられたように思います．ときには非常に高いハードルを課す事もありました．学生を守りに入らせない事が，何よりも学生の成長につながるというお考えではなかったかと御推察します．

J. R. Selman先生，F. McLarnon先生，W. Schwarzacher先生，D. R. Sadoway先生，P. C. Searson先生，R. M. Penner先生，R. C. Alkire先生，S. Nakahara先生，F. B. Prinz先生，P. Alivisatos先生，名前を挙げればキリがないほどの，大勢の著名な海外の先生方を京大へと呼ばれ，私達学生にその先生方と接する機会を与えて下さいました．Selman先生の奥様には，個人的に大変感謝しております．海外の方と話し掛けるときの緊張が，おかげで随分楽になりました．先生が広げて下さった交流のおかげで，私も今はPrinz先生という素晴らしい方の下で心機一転やりがいのあるテーマに取り組む事ができています．Alivisatos先生とも関わりを持てるようになった事は，信じられないような心持ちです．博士号を取得した後のSearson先生の講義は，これ以上ない刺激になりました．

福中先生と進路の話をする中で，「研究所よりも大学がいいと思う．」と私に勧められた事がありました．「大学の方が色んな学生が入ってきて面白い．」そう言っておられました．研究所という場所が，大学に比べて本当に面白いか，面白くないかは人によるかと思います．ですが，先生がいかに「学生」という段階にある人間と接する事を愛し，学生が集まる大学という学び舎を誇りに思っておられるのかを実感できる言葉でした．確かに，大学ほど野放図な振る舞いが許され，そのため非常に個性的で言う事を聞かない学生達が毎年毎年入れ替わり立ち代り入ってくる場所もなかなか無いかもしれません．私もその一人であった事は言うまでもありません．そんな駄目学生の私に悪戦苦闘しながら，それでも最大限に鼓舞して頂き，私の微かな能力を研究へ向けさせようと熱心に尽力されていたお姿を，私は一生忘れる事はない

と思います．学生の持つ才能こそ宝だと考えておられ，教育に対するはっきりとした信念と使命感をお持ちだったように思います．

反発する学生を勝手にしろと突き放す事は簡単で，そうすれば楽になれるのかもしれません．ですが，口では「僕知らん．」と言いながらも，福中先生はその選択肢を決して選ぼうとはせず，最後まで私達を良い方向へ導く努力を諦めようとはされませんでした．

先生がお元気な内は，私も恥ずかしい内容の研究はできません．また嫌味をたくさん聞かされますので．どうかいつまでもお元気で．まだ研究の世界から離れるおつもりは無いようですので，福中先生のこれからの御活躍に期待しております．学会でお会いできる機会を楽しみしております．

（スタンフォード大学，平成14年卒）

福 中 先 生

西 川 慶

私は修士課程より宇宙資源エネルギー学分野に配属となり，福中先生にご指導いただきました．宇宙資源エネルギー学という非常にスケールの大きなテーマの下で，研究活動を始められたことは，今振り返れば，非常に貴重な経験でした．福中先生は厳しい一面もお持ちでしたが，学生と議論することを大切にされており，研究室の学生はみな激しく意見を戦わせていたことが非常に印象深く記憶に残っております．また，毎日学生部屋で学生と共にコーヒーをお飲みになって，積極的に学生とのコミュニケーションをお取りになられ，議論の際に学生が遠慮することのないような雰囲気作りにもご尽力されておられました．先生ご自身は口癖のように「学生に馬鹿にされて」と自嘲気味に方々で語っておられましたが，学生からは非常に慕われていたのも事実であります．

このような非常に雰囲気のよい研究室に在籍させていただいたことが，私の博士課程進学の決定に大きな影響を与えました．博士課程進学後も，頻繁にご指導いただき，特に折に触れ，海外の著名な研究者と知り合う機会を与えてくださったことは，貴重な財産となっております．

退職後も，精力的に活動されていることを聞き及んでおります．先生のますますのご活躍を祈念いたしまして，筆を置かせていただきます．

（Ecole Polytechnique, France, 平成16年修了）

福中康博先生のご退職に寄せて

西 村 友 作

研究室に配属されて以来，福中先生の下で研究を行う中で，大変多くの事を学ばせていただき，また経験させていただきました．一つは自然科学の面白さ，自ら考えることの楽しさについてです．ゼミや授業，或いは昼食のお供をさせていただいた時に拝聴した先生のお話は，広い学問分野に造詣が深い先生ならではの多岐に亘るお話で大変興味深く，またそのようなお話を通じて科学の面白さを教えて下さいました．研究についても，学生の自由な発想を尊重して下さいました．また先生は国内外に広い交友関係をお持ちで，著名な先生方と直接議論できる貴重な機会を数多く与えて下さいました．このような研究風土の下，気概を持って自ら考え，実験に励み，そして世界に向けて研究成果を発表していくという研究の醍醐味を教えていただいたように思います．

また福中先生は私たち学生に対しまして時に厳しく，時に優しく接して下さいました．私は言わば研究室の異端児的な学生で，研究に対する考え方·方針に関して幾度となく先生と衝突し，激論を交わした時間は数十時間にも及んだのではないかと思います（数多くの無礼極まりない行為，誠に申し訳なく思っております）．それにも関わらず，愚かな私を最後まで見捨てようとせず，真剣に議論に向き合って下さいました．今の私は，先生の寛大なる心と優しさなくしては存在し得ません．ここまで育ててきて下さった福中先生には，この場を借りて心から感謝し申し上げる次第でございます．

福中先生との出会い，福中先生と過ごした三年間は，私にとって人生の転機であり，また研究者としてこれからの人生を送っていく上で，非常に貴重な時間であったと思います．これからも宇宙に輝く北極星の如く，私たち研究室卒業生の前途を明るく灯す永遠なる目標として，研究者として輝き続けられることを心から願っております．今後ともご指導・ご鞭撻の程，宜しくお願い申し上げます．

（京都大学大学院エネルギー科学研究科博士後期課程，平成17年卒）

僕と先生とときどき宇宙

佐久間 剛

何故，先生がこれほどまでに精力的に活動できるのか不思議でならない．これが私の先生に対する印象です．朝は学生よりも早く研究室に来てコーヒーを飲み，昇り降りもエレベーターを使わず，学会がある度に出張し，何人もの外国人の先生を招く．今思うと学生よりも数倍元気であったことは確かだと思います．退官間際でも目をギラギラと光らせていて，隠居というよりもこれから一花咲かせようかというような野望に満ちた目をしてら

っしゃったことを覚えています．まだまだやりたい事があるという気持ちが原動力になっているのかも知れません．

さらに先生は学生に対しても非常に面倒見が良く，とにかく出来の悪い怠け者の私を最後まで見放さず支えて下さいました．進路や研究についても多くのアドバイスを頂き，自分の納得のいく進路を決められたと思い感謝しています．ただ，多少面倒見が良すぎる部分があり，学生の居室に自分の席を作って仕事をされる，学生を昼ご飯に誘ってくださる等といったこともして下さいました．この部分については学生達と意識のズレがあったのかもしれません．私も初めのうちはご飯をご一緒させていただいたのですが，徐々に疎遠になってしまい，M2の後半はほとんど行かなくなってしまいました．わざわざ電話で誘っていただいた事もしばしばあったのですが，行けなくて残念でした．今では後一回ぐらいは行っとけば良かったなと思っております．

また研究室の学生には意外にも反宇宙派が多く，親宇宙派の私と先生はタッグを組み，宇宙について討論するということがありました．その時に先生がおっしゃった「まず宇宙ありき，や！」という言葉は忘れることが出来ません．まさに鶴の一声でした．他にもいろいろな事がありましたが，先生と研究室で過ごした日々は今までで一番密度の濃い時間だと思います．最後にこの場をお借りして厚く御礼申し上げます．

（株式会社小松製作所，平成20年修）

お祝とお礼

樺　島　智　大

福中先生，長い間お疲れ様でした．ご退職おめでとうございます．僕はまだM1で，先生にお会いしてから1年ちょっとですが，この短い間だけでも，大変ご迷惑をかけ，いろいろなことでお世話になりました．そして，今もお世話になり続けております．今回，このような機会をいただいたので，短期間ですが，これまでにあったことを振り返るとともに，福中先生への感謝を示したいと思います．

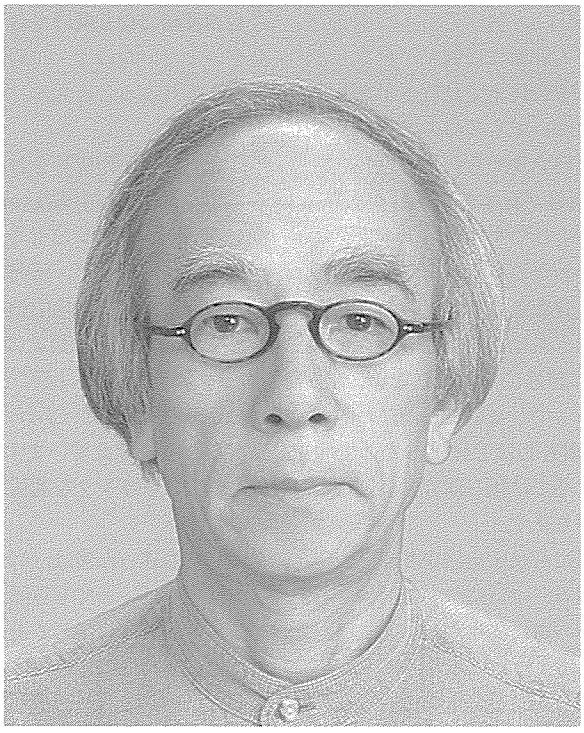
研究室配属が現実味をおびてくるのは3回生の終りごろですが，僕は福中先生の研究室にいきたいなと，もう少し前から考えていました．そうこうしているうちに，配属の時期になって，研究室訪問に友人と2人で行きました．そこで偶然，福中先生とお話する機会をいただいたのですが，先生に最初に言われたことは，「君，資源（コース）か？」ということでした．なぜそう言われたか分かりませんが，「あれっ？」と肩透かしをくらったようなことを覚えています．また，その話の中で，「教授と学生はフランクな関係でないといけない」とも仰いました．

そして血迷った僕は，何とか福中研に配属されました．その研究室は，とても雰囲気が良く，皆さん仲が良い感じで，僕も非常に楽しく過ごさせていただきました．そこで過ごすうちに，先生はフランクな関係を実践されているなと感じました．そして，卒論のときもいろいろ支えていただき，お酒をいただいたり，食事に連れて行っていただいたり，非常に良くしていただきました．

退職されたとはいえ，先生は今も様々な場所で活躍されています．僕も大学院に入学するとともに研究室を移りましたが，いまだにお世話になり続け，非常に感謝しております．あとどれくらいになるかは分かりませんが，これからもよろしくお願いいたします．でも，リタイアして第2の人生を楽しむっていうのも悪くないと思いますよ．

（京都大学大学院工学研究科修士課程，平成20年卒）

京都大学大学院工学研究科教授　田村剛三郎先生は定年退職されました.



田村剛三郎先生ご略歴

田村剛三郎先生は，昭和42年3月京都大学理学部物理学科をご卒業され，京都大学大学院理学研究科修士課程物理学第一専攻を経て，昭和47年3月京都大学大学院理学研究科博士課程物理学第一専攻を単位取得退学されました．また，昭和48年11月には京都大学より理学博士の学位を授与されています．その後，京都大学理学部研修員，独国フンボルト財団研究員を経て，昭和56年12月より京都大学理学部助手として採用され，昭和60年4月広島大学総合科学部の助教授に昇任されました．昭和63年4月，広島大学大学院生物圏科学研究科担当，平成3年10月，広島大学総合科学部教授に昇任されました．その後，平成13年7月に京都大学大学院工学研究科に異動され，材料工学専攻材料物性学講座を担当されました．平成20年3月31日をもって定年退職され，同年4月に京都大学名誉教授になられました．先生は，永年にわたり学生の教育と研究者の指導に尽力され，多くの人材を養成し，平成14年4月より同15年3月まで京都大学大学院工学研究科材料工学専攻長，工学部物理工学科材料科学コース長，大学院教育制度委員などを務められました．一方，学外においては，昭和60年4月より平成13年6月まで広島大学において専任助教授，教授として学生の教育と研究者の指導にあたり，多くの人材を育成されました．また，平成10年4月より同11年3月まで日本高圧力学会会長，さらには日本高圧力学会年会実行委員長，日本放射光学会年会実行委員長，日本金属学会評議員，日本金属学会関西支部支部長，文部省学術審議会専門委員，日本学術振興会審査会専門委員等を務め，学術行政に尽力されました．海外においても，多くの国際会議にわが国の代表として出席され，組織委員，財務委員長等を務められました．特に，専門分野のコア会議である液体およびアモルファス金属国際会議では，平成9年以降国際諮問委員を務め，同13年9月の第11回会議ではプログラム委員長を務められました．さらに，仏国，伊国よりの招聘に応じて液体金属材料工学に関する集中講義をこれら諸国の大学教員，技術者に対して行い，国際交流に貢献されました．また，仏国研究者とは永年にわたり放射光に関わる国際共同研究を行い，成果を挙げてこられました．

先生はこれまで40年間にわたり，金属材料の構造と物性に関して数多くの研究業績を挙げられました．その主なものは，「超臨界金属流体の静的・動的構造の研究」，「液体およびアモルファス半導体の光誘起現象の研究」，「超高圧下の固体物性に関する研究」です．これまでの研究業績が評価され，東レ科学技術研究助成賞，金属材

料科学助成賞を授与されています．特に，「超臨界金属流体の静的・動的構造の研究」は，文科省科研費・特別推進研究のもとに実施し，水銀における金属‐絶縁体転移に特有の密度ゆらぎの発見，アルカリ金属における低密度電子ガス不安定性の実証等，数多くの先駆的業績を挙げられました．これらの成果は学術論文として和文論文24編，欧文論文131篇として発表され，材料物性工学，金属物理学などの材料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．また，材料工学の新領域への展開において，特に高温高圧下における金属材料工学および技術に指導的役割を果たしてこられました．これまでの先生のご指導に厚く感謝申し上げると共に，今後の先生の益々のご健勝とご活躍をお祈り申し上げます．

（松田和博）

田村剛三郎先生の御退官に寄せて

細川伸也

田村先生にお会いしたのは，京都大学で私が4年生ゼミで先生が所属しておられた理学部物理の遠藤先生を訪ねたときですので，もう既に30年になろうとしています．そのときに既に先生は学位を取得されておられ，オーバードクターという将来の見えない状況でしたが，焦っておられる様子もなく，アルバイトをしながら熱心に研究をされておられました．そのうち，ドイツのマルブルク大学に留学されることが決まりました．出かけられる直前でしたが，物理学教室の中庭にあったガラス工作室から出火し，先生と大学院生の一人が必死で消火活動をしたそうです．その決死の行動がなければ，中においてあった水素ボンベ数本が大爆発する可能性が大きかったそうです．その影響で，先生は風邪を引いたままドイツへ旅立たれました．

さて，ドイツから帰ってこられてすぐ，遠藤研究室の助手として就職され，私どもの大学院での研究でもずいぶんお世話になりましたが，そうこうしているうちに，広島大学総合科学部に助教授として移られ，独立した研究室を持たれることになりました．液体金属の理論の教授であった渡部先生が，田村先生の学問的センスと人柄を買われ，熱心にお誘いしたのだそうです．それから半年遅れて私も田村研究室の助手として広島大学に赴任しました．

広島大学での研究テーマは，超臨界流体セレンの半導体－金属－絶縁体転移についてで，高温高圧下での光吸収実験の準備をされておられました．セレンは，高圧下で温度を上げていくと，密度が減少しながら電気伝導度が増大し，最後には金属化してしまうという，特異な性質を持つ流体です．ドイツで仕事をされているうちに，どうしてもまずこれを究めたい，と思われたのだそうです．研究室を一から立ち上げる，というのはまさにこのときの状況をいうと思いますが，私が赴任したときは，居室に古い机，椅子と本箱らしきもの，が各人1つずつ，それから金属工作用の工具セットが一箱，という状態でした．実験室は床も壁もぼろぼろで，そのうち入ってくる紫外可視赤外分光器のためにまず床のタイル貼りを最初に2人でやりました．分光器は赴任時に物理グループで準備していただいたお金や理論の先生方からお借りするなどしてかき集めたのですが，それでも検出器の一つが買えずに会社からお借り（出世払い）しました．高温高圧装置のほうはどうされるつもりなのだろうと思っていましたら，先生が大学院生の時にお世話になった高圧ガス装置の会社の方と話はついていたのだそうで，1000万円くらいかかるだろう装置を1/10の値段で調達されました．しかも支払ったのは確か納入されてから2年後ではなかったかと記憶しています．

さてそれから2年くらいは毎日実験準備をしていたような気がします．主として高圧容器内部の昇温装置（1700℃まで）の作成と，光吸収測定用の試料容器を開発することでした．容器の材料は，測定温度が非常に高いので，非常に高価なサファイアを使うしかありません．最も大きな問題は二つのサファイア棒間のすき間の距離，つまりそこに導入される試料の厚さです．厚さ1 mmくらいのすき間は簡単にできます．私の大学院時代に腕のいいガラス工作技官が作ってくれたのは，0.1 mmのものでしたが，この厚さのものもほどなく自作できるようになりました．そのことを先生に報告すると，一言だけ，「もうちょっと薄くなりませんかねえ．」でした．そこで2ヶ月ほど試作を繰り返して，0.01 mmまでできましたが，それについてのコメントもまた同じ一言だけでした．この厚さではセレンの半導体－金属転移点を決める高吸収領域（バンドギャップ）の測定までできないことがその理由であることは，私にもちゃんと理解できていてはいたのですが，技術的にはこれが限界だと自分で壁を作っていたのかもしれません．最終的には試料容器の厚さは0.002 mmまで到達し，半導体－金属転移を正確に観察することができました．その後，エネルギー分散X線回折法を開発して，原子配列の立場から超臨界流体を研究するという，世界に例のない研究をスタートし，それが田村先生の代表的な仕事となっていくことになります．

田村先生は，このように研究に妥協をされない方ですが，研究一辺倒ではありません．広島の歓楽街，流川に，それはもう頻繁に連れて行っていただきまして，早くて12時，午前2時3時は普通，ひどい時は日があけるま

でその近辺にいて，その頃はあまり上手ではなかったカラオケで琵琶湖周航歌を何度も歌っておられました．実は，私はそこでお金を払ったことがなく，私もその年齢になったら，若い共同研究者と世界的な研究をし，そのように慰労したいと思っていましたが，まだそういう立場に立てていないことを非常に残念に思っています．

田村先生は定年退官間際にも，科学研究費の基盤研究(A)を獲得され，今でも次に向かって熱心に研究をしておられます．御健康に留意されて，いつまでも分野をリードしていただき，私たち後輩の研究に助言をいただきたいことを切にお願いして，拙文を閉じたいと思います．

(広島工業大学　准教授)

田村剛三郎先生のご退職に寄せて

乾　　雅祝

田村先生に初めてお会いしたのは，私が京都大学理学部4年生になり遠藤裕久教授の研究室に配属されたときでした．当時，田村先生はドイツ留学から戻られ助手になられた直後で，私が博士前期課程を終えるまで約3年間，研究や実験に関して初歩からご指導を頂きました．私が博士後期課程に進学するとき，田村先生は広島大学総合科学部に研究室を構えられました．このころから独自のアイデアで困難を克服し，当時実験が余り行われていなかった超臨界金属流体の構造研究に取り組まれました．院生だった私は広島市内にあった田村先生の実験室を何度か訪れ，助手だった細川さんの世話にもなりながら，遠藤教授との共同研究である，放射光を利用したX線吸収微細構造測定の実験準備を手伝ったりしました．

田村先生の助教授に採用していただいた後は，PF(フォトンファクトリー)，ESRF(ヨーロッパ共同体放射光施設)，SPring-8(高輝度光科学研究センター)の放射光を利用して構造研究を展開してきました．思い出深いのは，4月に広島大学に赴任したら，6月末にESRFでフランスとの国際共同研究が行われるから，それまでに装置の準備をしてフランスに送らなければならない状況だったことです．当時理学部にいた細川さんや就職したばかりの久保井君には休日を返上して手伝いに来てもらい，田村先生と，当時学生だった坂口君や野田君らと連日夜遅くまで働いて，ようやく間に合わせました．その後，単身フランスに渡った田村先生が，向こうの研究者，技術者と大変な苦労をして何とか最初の実験を行うことができたと，帰国された後に聞きました．翌年からこのプロジェクトは科研費に採択され，数年の間，フランス研究者との共同研究が続き，何人かのフランス人が広島までやってきました．私も田村先生とESRFでの実験に参加しましたが，時差と徹夜実験の両方で，気を失いそうになり，田村先生にしかられながら実験したことを覚えています．

1997年からSPring-8での実験が始まり，日本で放射光を利用した高温高圧下の超臨界金属流体の構造研究が行えるようになりました．ここに至るまで，田村先生にとってどれほど長い道のりであったでしょうか．田村先生は，広島大学に放射光施設を設置する計画には当初から参画され，PFクラスの高輝度X線を強く望まれていたのですが，設置されたのは軟X線分光を主とする小型放射光施設でした．SPring-8に高温高圧ビームラインの設置を要望しつつ，実績をフランスとの共同研究で積み上げ，ようやく実現したのが，1700℃，2000 barまでの高温高圧実験が行える高温ビームラインでした．ところが最初に設置した高温高圧容器は，実際使ってみるといくつかの欠点が見つかり，苦労して得たデータの解析がまた大変でした．しかし，期待されていた流体水銀の金属－非金属転移に関する成果を何とか得ることができ，これが評価され，徐々に大きな科研費を得て，高圧ガス設備を増やしてゆきました．2001年には，X線回折，X線小角散乱，高分解能非弾性X線散乱の3種類の高温高圧実験をSPring-8で行うことができるまでになりました．

田村先生から学びとれなかったことはたぶん数多くあり，学んだつもりでいることを実践するにも私はまだまだ未熟ですが，田村先生が種を蒔いて育てた木がどこまで大きくなるか，今後ともご指導ご鞭撻を頂けるよう，いつまでもお元気でいて頂きたいと心から願っています．

(広島大学　准教授)

田村剛三郎先生のご退官によせて

坂口佳史

田村先生に関しまして思い出しますことは，先生のお仕事に関する国際的な評価の高さでした．国際会議に行きますと，高温高圧のそれまでのレコードを越えた測定結果に注目が集まり，また，何よりも測定精度の高さに大きな信頼を得ていました．特に，計算機実験家にとって，新しい測定結果は，自らが新たに計算を行う上での動機づけとなるものであり，注目度も高かったように思います．海外からの訪問者も多く，国別にあげても，ドイツ，フランス，イタリア，ロシア，アメリカ，中国等，いたるところからひっきりなしに訪れ，バングラディッシュからの留学生の受け入れも行っていました．そんな世界的有名人である田村先生ではあるのですが，私にとっては少し違った側面がありました．

私は，田村先生が広島大学総合科学部で助教授として研究室を興されたころの，研究室に配属された最初の学部学生の一人にあたります．総合科学部というところは，文系，理系の様々な専門の学問分野がすべて一緒になって集まっており，学際的研究という上で刺激的な場所でありましたが，反面，物理系の専攻に属していた田村研にとっては，学生の不足が悩みの種でした．年によって違いがありますが，おおよそ1学年150人いる学部学生の内，物理を専攻する学生は10人を越えることはなく，2人しかいないという年もありました．物理系に属する研究室としては10ぐらいの研究室がありましたので，またその中から田村研に来る学生の確率となると，かなり低いものとなったのです．そんな状況で，田村先生としては学生が欲しいという切羽詰ったところがあったのだと思います．

あれは1989年8月5日のことだったと記憶しています．4年生の卒業研究学生として田村研に配属された私は，就職活動をしており，卒業後は企業への就職を予定していました．それまでの学生生活を送ってきた私にとって，社会を見ることがまず必要と思えたからです．しかしその一方で，学問の面白さも，実際に研究室に配属され，生の研究活動を見る中で実感していました．もう少し突っ込んだ研究を行いたいという気持ちも出てきて，大学院の受験勉強も並行して始めていました．広島の暑い夏の日のことです．受験勉強をする学生も，研究活動をする先生方も，夕方になれば疲れてそれ以上続けていける状況にはなかったのでした．「お食事にでも行きませんか．」田村先生の音頭で，助手の細川伸也先生(現広島工業大学)，大学院生の松岡正さんと私は，近くの居酒屋に入ることになってしまいました．どんな話がそこで行われたのか，詳しいことは忘れてしまいましたが，当時は京都で開催される国際会議の発表準備の最中で，新しい測定装置を用いた初めての結果を見せることになるので，そのことへの期待が語られていたように思います．これは，その後SPring-8でも行われることになる，高温高圧流体のエネルギー分散型X線回折の一番最初の発表の機会であったのでした．その後，かなり飲んだように思いますが，その後のことはあまり記憶にありません．しかし，その会がお開きになった後，先生と私の家の方向が同じということで一緒に帰ることになりました．そして，帰り道，横にラーメン屋があり，そこにまた入ることになったのです．先生と駆け出しの4年学部生が，さしで飲むことになったのです．先生は，自らの研究の魅力を語り，「君の志向にあっている」という類のことをほのめかします．さらに「学生の意見をききますよ」と，民主的な研究室の方針があることを力説します．その後も随分飲んだような気がします．私は当時早起きでしたが，翌朝は早起きできず，目覚めてみると，広島で一番暑い夏の太陽がギラギラと照りつけていました．その後，私は大学院に進むことを決めたように記憶しています．そして今日に至るまでお世話になることになったのですが，先生にとっては大きな誤算で，とても申し訳ないことをしたと思っております．

広島にいる当時は，学生・スタッフ不足，大学のバックアップ体制での不足，業者の対応の遅延，雑用の多さ，と数え上げれば限がないほど，また，指摘し始めたらそれだけで時間がつぶれてしまうほど，多くの困難を抱えていました．特に，先生にとって気の毒に思えたのは，ご家族を京都に残しておられ，毎週末，京都の家に戻られていたということでした．先生だけでなく，ご家族も大変であったことでしょう．その先生が，京都大学に移られてからは，多くの点で恵まれた環境へと変わり，多くの業績を残されました．これまでご苦労の多かった奥様にとりましても大変喜ばしいことであったと思います．定年ご退官に際しまして，これまでの長きにわたりお世話いただきましたことに感謝申し上げますとともに，先生のこれからの益々のご発展をお祈り申し上げます．

(Boise State University)

田村剛三郎先生の御退官によせて

石　川　大　介

私は，広島大学と京都大学在籍時に田村剛三郎先生にご指導いただきました．学部四年，私は田村先生が教授をされている液体非晶質半導体物性研究室を配属先に選択しました．明確な理由があったわけではないのですが，落ち着いて研究するには田村研究室が良いのではと他研究室の院生が言っていたことをおぼろげに思い出したことと，田村研究室が実験施設としていたシンクロトロン放射光を利用したユニークな研究に惹かれたからでした．この始めの直感は，後から思い返すと的中しておりました．

最初に与えられた研究は，装置を設計から始めて製作すること．図面をひき，旋盤，フライス盤からガラス加工までおこない，気がつくとほとんど工員のような状態になっていました．はじめて配属された研究室がそういうものだったので，研究とはこういうものかと思っていたら，暫くして他の研究室と比較して，どうやら研究スタイルが随分違うということが判りました．その当時の研究は，私の努力不足もあり，結果的になかなか進捗しなかったわけですが，自分で手を動かして装置をつくり上げるという経験をさせていただいたおかげで，そのことが今日非常に役立っており，財産になっています．

また，先生は学生に見聞を広めることも推奨されました．私は，幸運にも放射光施設の新ビームライン建設のため，現地に常駐して X 線光学を学ぶ機会を与えていただきました．その後，先生は，このビームラインを利用して，世界に先がけて超臨界金属流体の X 線非弾性散乱の実験に着手され，非常に重要な結果を得られております．

今年二月には田村先生の最終講義が催され，長い間お世話になった先生の最後の講義を拝聴することができました．若手研究者としての時代から極最近の研究まで，内容の濃いとても充実した素晴らしい講義でした．しかも先生の視点は，その先，その先の先に注がれおり，その探究心の深さが非常に眩しく映りました．また，次の世代に向けた新しい視座もご提示下さいました．特に，先生ご自身も実践されてきた「先端の研究ではなく，誰かがやらなければならない重要なことをしなさいと」いう言葉は胸に刻まれました．

最後に，多くのご指導いただきましたことに心から感謝申し上げます．退官後も健康に気をつけられ，ますますご活躍されることを祈念申し上げます．

（独立行政法人理化学研究所）

平 成 20 年 度 水 曜 会 大 会

●日　時　平成20年6月7日（土曜）11：00－16：30
●会　場　工学部6号館および京大会館

平成20年度水曜会大会は6月7日（土）に開催され，午前は工学部6号館内の「水曜会教育資料展示室（166号室）」の公開，および6号館167号室にて各研究室紹介のポスター展示が行なわれました．午後からは京大会館にて懇親会，総会，特別講演会が開催されました．当日は梅雨の合間の晴天に恵まれ，教育資料展示室およびポスター展示室にはおよそ30名以上の方が見学されました．懇親会には60名程が参加され，総会・特別講演会には例年を上回る約90名の参加者がありました。

まず，水曜会教育資料展示室の公開および各研究室紹介のポスター展示が約1時間開催されました．その後，場所を京大会館へ移し，101号室において懇親会が開催されました．懇親会は白井泰治教授の司会のもと，近藤良夫名誉教授の音頭で乾杯が行われ，齋藤敏明名誉教授，冨井洋一氏（大阪大学接合研），小岩昌宏名誉教授から挨拶がありました．立食形式の料理を楽しみながら，会は和やかな雰囲気のうちに終了しました．

場所を210号室に移し，総会は三ヶ田均教授の司会で進められ，まず栗倉泰弘会長から平成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ました．次いで石田毅会計幹事から会計報告および田中功会計監事から監査報告がなされ，いずれも承認されました．続いて，次期役員推挙により，新会長に青木謙治教授，新副会長に落合庄治郎教授が選出されました．その後引き続き，特別講演が開催され，本年度は以下の2件の講演が行なわれました．

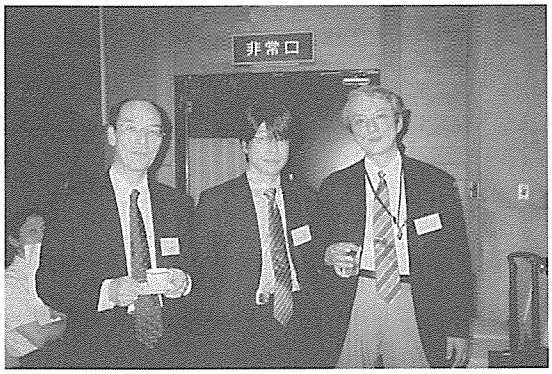
「石油開発：あらたなる挑戦」

帝国石油株式会社　取締役副社長　牧　　武志　氏

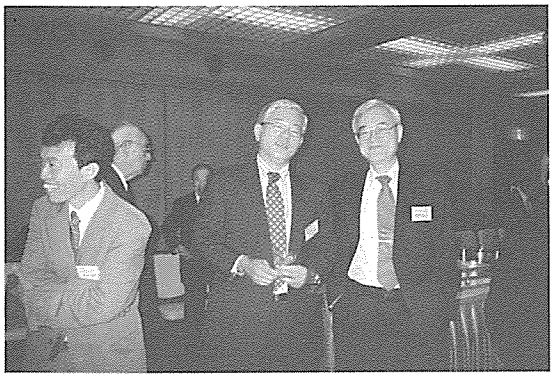
「材料工学専攻の自己点検・評価について」

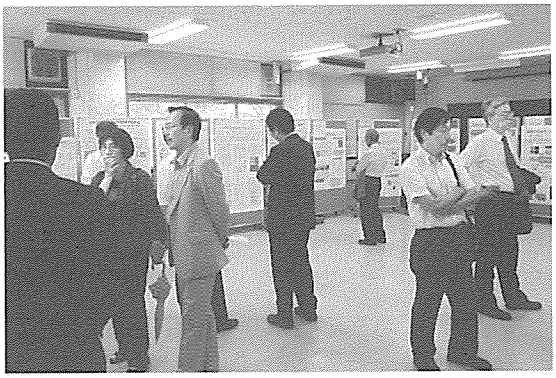
京都大学大学院工学研究科材料工学専攻　教授　栗倉　泰弘　氏

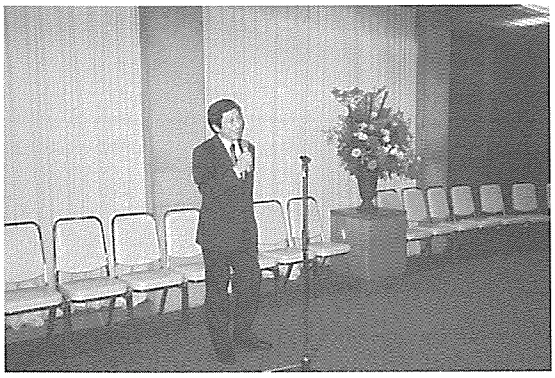
特別講演会の内容は大会記念講演として本誌にご寄稿いただいているので，詳細はそちらにゆずりますが，牧氏の講演では，エネルギー資源の確保・開発に関する現況や今後の戦略について解説がありました．また，栗倉会長の講演では，材料工学専攻の教育・研究・組織の現況と外部点検評価結果について解説されました．いずれの講演も説得力のあるもので，参加者は皆，熱心に傾聴していました．平成20年度水曜会はこれら2件の講演が終了した後，午後4時半に散会しました．なお、来年度の水曜会大会は平成21年6月6日(土)に京大会館で開催の予定です．


非常口







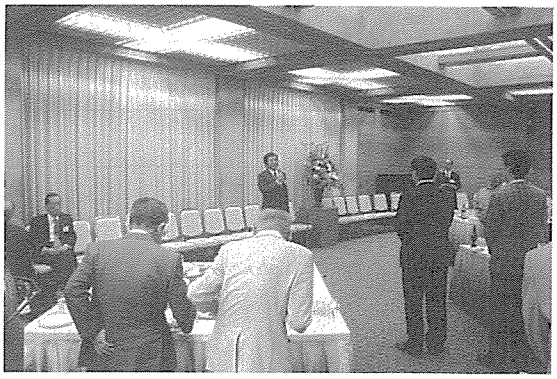


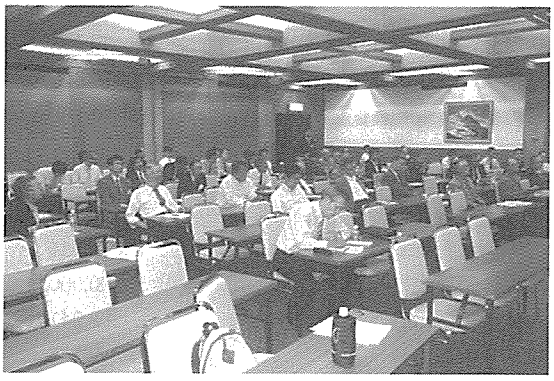










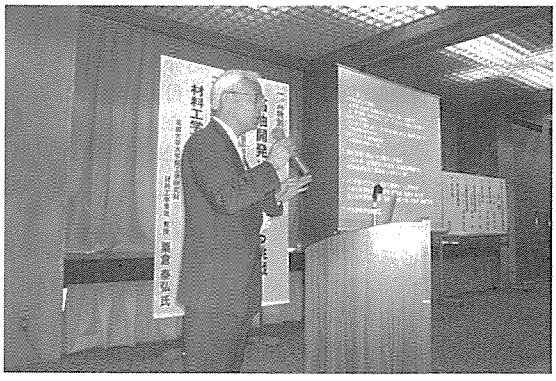





一、《特別講演》
石油開発・あらたなる挑戦
牧　武志氏
二、《特別講演》
材料工学専攻の自己点検・評価について







平成19年度水曜会会計報告

平成20年３月31日現在

収　　入		支　　出	
前年度繰越金	6,345,474円	会誌印刷代（製版・封筒・郵送料込）	
会　　費	3,560,000	23巻10号	1,916,948円
会誌広告掲載料（製版代込）		水曜会大会経費（19年６月９日）	1,221,816
23巻10号	642,535	編集委員会経費	88,556
名簿売上	31,500	会誌原稿料	157,000
会誌売上	8,470	新入生歓迎行事援助	17,000
水曜会大会懇親会費	240,000	通信費	61,530
預金利息	8,971	事務人件費	629,000
		封筒・文具・コピー代等	74,135
		三年未納者への請求（印刷・郵便料込）	74,375
		その他経費(弔慰経費)	10,500
収入合計	10,836,950円	小　　計	4,250,860円
		次年度への繰越金	6,586,090円
上記の通り会計中間報告致します。		内訳　銀行普通預金	1,874,944
平成20年６月７日		銀行定期預金	4,500,000
会計幹事　石田　毅		郵便振替預金	208,941
以上の通り相違ございません。		手持現金	2,205
会計監事（監査）　田中　功		支出合計	10,836,950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．

会員消息

二八会旅情記
(S28年冶金学科卒)

昭和28年冶金学科卒業生は毎年各地を巡回し旅情を楽しんでいる．平成19年11月5，6日両日桝村君の鎮魂の思いをこめて彼の故郷金沢の地を選んだ．11月5日午後2時頃金沢駅に10名が集合する．西村君の適切な配慮に従って東京，大阪方面より約同時刻に到着する．桝村夫人の手配によるマイクロバスに乗り同夫人の実家に立寄り，馥郁たる香りに満ちた部屋で煎茶を戴き一息つく．高齢のため正座が出来ずあぐらを組む事で寛恕して戴いたが，流石100万石の城下町らしく文化の香りの洗礼を受ける事が出来たのは幸いであった．小休止の後，桝村君の墓所を訪ねる．浄土真宗らしい墓前に額付き同君の母校四高の代表寮歌「北の都」を斉唱して亡き友のありし日の姿を偲ぶ．泉下の同君に通じたであろうか．我々もやがて後追って行くであろうとの感懐の思いに耽入った次第である．

バスで目的地の湯涌温泉「さかえや」に着く．一風呂浴びて懇親会となる．いつも常連として出席している渡辺君は仕事多忙のため欠席している．現在，現役で活躍している貴重な存在であるので，彼の成功を信じ全員署名の嘆願書を作成する．開宴すると日本海の海の幸，山の幸を賞味し地元銘酒「手取川」に杯を傾ける．話題はタイムスリップして大学時代に回帰するが，高齢のため病気の話題が多いのも自然の流れか．森田君が自宅で栽培した四つ葉のクローバーを全員に配布する．幸運を齎すといわれているが，これは森田君の病気が治癒した霊験あらたかな実績ある貴重なもので有難く頂戴する．次いで松村君の押し絵が配布されるが，素人ばなれした見事な出来栄えで，二八会員の多士済々ぶりが窺われる．瞬く間に時は流れ，最後に再び「北の都」を斉唱し酒を好んだ桝村君の供養をした次第である．

翌6日ホテル前の夢路美術館を見学する．夢路は岡山県出身であるが，湯涌温泉に滞留し美人画を画いた．当館には絵画と共に，三名の女性に慕われた艶福家として記念品が陳列されているが，羨ましい限りである．

バスにて金沢市内に向い21世紀美術館に着く．白壁とガラスに囲まれた新世紀を志向するモダンな建物で，テレビ等でよく紹介されている．内部は抽象的なモダンアートで充たされ，我々の世代には馴染めなく，作者の自己満足としか思えない．芸術的な評価は理解し難いとあって早々に引き上げ前方の兼六公園に足を運ぶ．

公園の梅林の中の船型小屋で小休止した後，根上り松，唐崎の松，日本武尊の銅像を見学する．ここには日本武尊が何故在すのか？観光ガイドの説明を聞いたがこの点に触れず解明されないままに終わった．最後に公園の象徴である徽軫灯籠を経て公園を一周して鑑賞を終わった．主たる松は豪雪から守るため枝つりが行われており，風雪前の静寂な風物詩を味わう事が出来たのも幸いである．兼六公園を回遊するに当たっては桝村夫人より懇切丁寧な説明を受け大変よく理解することが出来，有意義な観光であったと感謝している．又天気予報は雨であったが，曇り空で快適な気温に終始し天も我に味方したように思う．その後，金沢駅で昼食を取り各自東西に分れて帰途についた．

金沢旅行が成功裡に終わったのも，桝村夫人の丁寧なおもてなしと，西村君の周到な準備の賜と思う．ここに深甚なる感謝の意を表する次第である．又今回は桝村君の懐旧鎮魂の旅であったが，黄泉の国で如何に感じてくれた事であろうか．

思うに我々は八十路にかかっている．時間というものは誠に非常に無情である．待ってくれと嘆願しても全く見向きもせずに冷酷に時を刻む．

鳥兎匆匆
往事茫々
感慨無量
一期一会

我々に残された時間は限られたものとなった．しかし学生時代に培われた友誼の情は堅く結ばれ消える事なく揺曳している．この残された時間を前向きに豊かに生きる糧として我々の会合を大切にしたいと思っている．来年は卒業五十五年の記念すべき年です．出来るだけ盛大に行い，多数の参加を得て，光芒を放ち掉尾を飾ろうではありませんか．

(松浦記)



（下段左より）　桝村夫人，倉知，西村，森田
（中段左より）　津田，浅井，川島婦人，松浦
（上段左より）　松村，川島

昭和33年冶金　卒業50周年記念同窓会
（於：京都）

＜五十年（いそとせ）をかへりみすれば秋の夜も紅もゆる湯の花の宿＞　松本岳舟（洋祐）

昭和33年卒業以降の50年は，将に激動・激変の半世紀であった．

その星霜を乗り越えて来た同期の仲間達．鬼籍に入った者は5人．体調を崩している者も数人いるが，卒業50年という節目を迎えて，恒例の同窓会はチョッピリ豪勢にやろうと企画した．

関西組と関東組から交互に幹事を出すという仲間内の決まりは，今年も変わらず．担当の関東組から川口宜人君が幹事を相務め，素敵な企画を立ててくれた．

場所は勿論青春の思い出の地京都．観光のハイシーズンよりやや早めに，10月15，16日の両日を設定．

15日，京都の奥座敷，湯の花温泉（亀岡）の「すみや『亀峰庵』」で温泉に浸り，懇親の宴．

翌16日は紅葉には早いが，保津川下り．引き続いて，50周年にふさわしいハイブロウな企画で，『桂離宮』を拝観し散会という企画である．

現在の在籍の同期の仲間達21人の内，参加は12名．残念ながら所用などで欠席が4名．体調を崩しているために欠席するもの5名．

第一日の15日は，京都駅山陰線ホームに集合．嵯峨嵐山から「トロッコ列車」に乗り換え亀岡に．

宿の「湯の花温泉『亀峰庵』」には早く到着したのでユックリと温泉に浸る．

いつの間にやら申し合わせたように三々伍々，併設の露天風呂に，多くの仲間が集まり，長湯になるのも忘れ，一足早く交歓の輪が出来る．話題は豊富だったが，最後は各人それぞれに奥方殿の棚卸し（実態はお惚気？と感謝の言葉）．結論は『二人揃って元気なことが何より』『主導権は奥方殿に譲ることが円満の秘訣』と図らずも愛妻家ぞろいであることが判った．

宴は，季節の松茸の加わった料理．加えて地の銘酒「翁鶴」も中々の美味．但し嘗ての酒豪連も頓に酒量が落ち，「酒はしづかに飲むべかりけれ」の雰囲気．宴の中，幹事川口から，今日の欠席者の近況（特に体調芳しくない仲間達を主体に）報告．次いで参集したものから順次近況報告．

締めは，恒例の『紅萌ゆる』に始まり『われは湖の子』，『月見草』，『人を恋ふる歌』を大合唱．幹事川口の気配りで歌詞集が準備されたおかげで無事歌い上げ，ひとときの青春回帰の気分となる．

来年の幹事は関西組の当番で大谷四聰君と決定．

＜瀬を早み舟うつ波のしぶきにも時を惜しむか秋の保津峡＞　松本岳舟（洋祐）

第2日の16日は，保津川下りに始まる．紅葉にはまだ早いが，ときおり猿の姿を垣間見るなど，変化に富む風景を眺めながら，1時間40分の川下りを楽しむ．

次いで，建築家ブルーノ・タウトの過剰とも言える賞賛の文章でも知られる桂離宮を拝観．事前予約の関係で，

拝観が3組に分かれたため，一旦散会の形を取り，時間待ちまでに同じ拝観グループ同士，あるいは個人で，あるものは「桂キャンパス」見学，また酒好きのものは松尾大社へ，あるいはまたグループで善峰寺，正法寺などの洛西の名寺巡りなど．

拝観は回遊路に沿って1時間．タウトが「釣り合いと調和」の極致と言った庭園を鑑賞．深い印象に残る拝観であった．

＜今にみる雅びのきはみうつつなく桂離宮はたふとかりけり＞　松本岳舟（洋祐）

味覚も風景も，酣の京都の秋を満喫した記念同窓会であった．

（報告　松本善文）



湯の花温泉　亀峰庵前にて
後列　谷井，辻，大谷，馬場，上仲，堀，松本（洋），伴
前列　川口，里見，向坂，松本（善）

38水曜会卒業45周年記念同窓会
（昭38冶金卒）

38水曜会は卒業20周年同窓会を皮切りに，当初の5年に一度が，5年に二度に，毎年にと次第に開催頻度が増え，今回は節目の年でもあり，初めての1泊旅行と相成った．また，歳をとるにつれて母校が懐かしくなり，京大ゆかりの地をめぐる旅行となった．

一行19名は平成20年5月13日にJR京都駅に集合し，マイクロバスで北に向かって出発した．最初の訪問地は京大そのもの，本部構内の正門を入り，左手にあるカフェレストラン「カンフォーラ」のテラスで新緑に映えるくすの木の後ろに聳える時計台を眺めながら，古代エジプトのエンマー小麦を使用した特製のビール「ホワイトナイル」を飲む．学内で，昼間に学生が行き交うところでビールを飲めるとは，自由の学風を重んじる伝統があるとはいえ，京大は開けたものだ．ひととき京大構内を散策し，みやげに京都大学第24代尾池総長がプロデュースしたレトルト食品の総長カレーを買う．

バスは鯖街道を北上し，八瀬，大原を過ぎて花折峠を越えた山中にある「花折」で名物の鯖寿司の昼食に舌鼓．琵琶湖西岸にある滋賀県高島市今津の「琵琶湖周航の歌」資料館に立ち寄り，若くして亡くなった作詞家，作曲家をしのぶ．その後今津港から船で琵琶湖に浮かぶ竹生島めぐり．竹生島宝厳寺拝観．バスに戻り若狭に向かう．昨秋から今春までNHK連続テレビ小説「ちりとてちん」の舞台になった福井県小浜市に入り，若狭塗箸「せいわ」に立ち寄り，小浜港近くの老舗旅館「福喜」に宿泊し，遅くまで歓談．

翌日は奈良・東大寺二月堂の春の行事「お水取り」の水が採取される神宮寺，国宝三重の塔がある明通寺を拝観して丹波の美山に．美山では風情のある建物の「河鹿荘」で昼食後「かやぶきの里」を散策．少し足を伸ばせば，芦生の京大演習林があるが，時間の関係で断念．周山街道を南下し，高速道路を通って京都へ．定刻にJR京都駅に到着し，来年の再会を約して解散．

いろいろと思い出深い同窓会でした．

（吉澤記）



（後列左より）阪，角南，石田，村田，宮木，溝内，竹田，川島，吉村，竹内，小菅，濱崎
（前列左より）須江，大谷（泰），中井，長田，西村，吉澤，大塚

同窓会報告

冶金学科を昭和39年の同窓生が平成20年1月12日（土）に東京駅前に集まり，「過門香丸の内トラストタワー店」で集いを開くことができました．関東在住のメンバーはかなり以前から度々の集まりを持っていたとのことで，西日本からのメンバーにも呼びかけた集いは43年ぶりとのことでありました．同窓49名のうちで32名が集まりました．世話役は向井達夫君でした．

皆がすぐに気付いて確認しあったことは，「元気なこと」「いっそう紳士になったこと」でありました．東京在住のグループのゴルフ愛好者らはゴルフの成績がいま

もずっと向上していること，シングルプレヤーになった者までいるとのことで，お元気なことです．昔話のあれこれに大いに花が咲きました．

来年は卒業45年になるからそれまでに京都で集まろうと申し合わせて散会しました．下の写真は散会時の写真です．次回の召集は関西の者が行う予定です．

（文責：小松啓七，猪飼靖）



会　員　通　信　欄

平成20年度水曜会大会への返信はがきには，会員の方々から多くのお言葉や近況報告を頂きました．ここにその一部を掲載致します．なお，文章を損なわない程度に表現を変えた部分もあることをお断りいたします．

高嶋　　宏（採治，昭15）名誉ある我が水曜会大会を迎え大慶に存じます．小生ら冶金昭和15年卒の生き残り3名がお互いに連絡をとりながら母校冶金教室の益々の発展を心から祈っています．15年卒なれば3人共90才を越える高齢ですが本大会の盛会ならんことを再び祈ります．

村上陽太郎（冶金，昭17）お陰で元気です．毎朝速歩のウォーキングと若干の研究活動ができる現在を感謝しながら，楽しく日々を送っています．

三谷　裕康（阪大工学部冶金，昭17）卒寿を過ぎましたが元気に暮らしています．描くことを楽しみ乍ら．

田中　　安（冶金，昭19）老化のため膝関節変形ですが，介護保険では「自立」と認めてくれました．好きな事（ピアノ練習）に明け暮れています．御盛会を祈ります．

山本　剛男（冶金，昭20）毎月水曜会の同窓と集って健康を語り合っています．

池田　　保（冶金，昭21）お陰様でで元気に日々を過ごしています．テニスも今のところ毎週楽しんでいます．

佐伯　博蔵（冶金，昭21）まず健康に気をつけ，趣味などいかしつつ，心ゆたかな人生をおくりたいと思います．

田辺　精三（冶金，昭22）年相応に元気に暮らしております．毎日平均7千歩程度のウォーキングを心掛けています．

寺井　士郎（冶金，昭22）83才となりました．金属学会，軽金属学会，水曜会誌と学会誌を楽しみに致しております．

三谷　文夫（鉱山，昭23）私の世代では「消息不明」の方が多くなりましたが．愚生は，まあまあ，歳相応に元気に過ごしております．ただ，この頃は余り聞いたこともない新語や片仮名語が多くなって，若い人とのコミュニケーションに苦労しております．

岡田　　明（冶金，昭23）今年は残念ながら欠席します．諸先生方によろしくお伝えください．返事遅れましてすみません．昭和23年冶金学科卒業生の同窓会金友会は毎年盛会で今年は卒業60年会を開催する予定です．

神保健二郎（鉱山，昭24）元気にしております．（独）科学技術振興機構・文献情報事業本部の下部機関からの主として外国技術文献の抄録，検索作業を自宅でほんのわずか行なっています．

青木　信美（冶金，昭24）同期同窓会を前夜京都で行なうので良い機会と出席します．京大時代からの合唱を続けています．京大合唱団同窓会で京大ホールでも2004年12月こけら落しに歌いました．現在放送大学で生命科学等を学び日本科学未来館で宇宙開発，生命科学ボランティアをやっています．

小川　昌平（鉱山，昭26）友人とは昔話が多くなりました．一方，この4月から日仏会館の中級クラス出ています．

寺田　　孚（鉱山，昭27）今年6月23日に満80才になります．後期高齢者医療被保険者証を利用する機会が多い身体の状態になっています．

青山三樹男（鉱山，昭27）従来通り壮健で相談役として毎日出社しています．明石工業界の会長として世話役もつとめています．

田中　晃三（冶金，昭27）多段式圧延機用ロールの製造販売の企業としていささか業界に貢献しております．来年は創業45周年になります．工学部卒をしみじみ感謝しております．

浅井　浩実（冶金，昭28）卒業後満55年“やそじ”の年令が目前に迫ったが，何とか元気で消光しています．

倉知　三夫（冶金，昭28）当日，イタイイタイ病の原因となった神岡鉱山の調査に参っておりますので，残念乍ら欠席いたします．お陰様で，神岡鉱業（株）は無鉱害経営を目ざし，神通川及びその流域が非汚染の自然界に回復しつつあります．21世紀には環境と平和の課題を解決しなければなりません．皆様のご健勝を祈ります．

松浦　菊男（冶金，昭28）旧制三高同窓会の業務に関係しております．

三浦　　精（冶金，昭29）崇城大学（旧熊本工大）に10年勤務し，京都へ帰って1年余りたちました．ほんの少しばかり書き残した論文を書く他に気ままに好きな習い事をしてすごしています．ずっと続けていたアイスホッケーはまだOB戦に何とか出場していますが現役の試合を見に行く機会が増え喜んで居ります．

菅野　　齋（冶金，昭29）週1回ボランティア活動と週

３回のテニスプレーにて余生を楽しんでおります．

栗山　隆勝（鉱山，昭30）喜寿を迎えますが，一応健康に過ごしています．知的障害者へのボランティア活動をライフワークと心得え，健康な間今しばらく盡力したいと思っています．水曜会大会の盛会をお祈りいたします．

清滝昌三郎（鉱山，昭30）昨年公的職務はすべて辞しましたが日墺協会，日本オペレッタ協会等私的な場で元気にやってます．

若松　貴英（鉱山，昭30）晴耕雨読の毎日をエンジョイしております．

佐藤　史郎（冶金，昭30）資源の高騰，枯渇が懸念されるなか，日本の非鉄金属加工産業（アルミ圧延，伸銅業）の将来につき憂慮しています．目下，健康です．

米津栄次郎（鉱山，昭31）歳を彩るクラブ活動並びに社交ダンス中級レッスンに専念中です．

野村　悦二（冶金，昭31）時々頭を熱くして資料を作成し，大部分は冷やしています．お陰で歪も残らず，元気に過ごしています．

田村　敬二（冶金，昭32）世田谷区卓球連盟の参事として卓球にいそしんでいます．

本間　良治（冶金，昭33）昨年より（株）推研を引退して相談役になりました．体調が悪いので，１日２時間程度しか仕事をしていません．

武川　哲也（冶金，昭33）週日はテニス，休日は謡・仕舞をたしなんでいます．

西田　米治（鉱山，昭35）数年前と比べると，ワクワクの振幅が小さくなった気がする．独り善がりの浮沈も困りものだが，横着者にできる工夫はと思案しています．

柳沢　恒雄（鉱山，昭35）安売りのクラシックスキー板３本も買い込んでいたのが漸く乗りつぶし，今冬からカービングスキー板にかえました．次はフィルムからデジカメへ切替です．

小澤不眠夫（鉱山，昭36）資源外交と貧困さと資源開発の重要さを痛感しております．若きエリートが京大からはばたいていただきたいと思いつゝ元気に過ごしています．

赤井　愼一（冶金，昭36）昨年11月（加齢による）腰椎変形が原因の坐骨神経痛を発症し，健康ゴルフも止めて，「真向法」を毎晩風呂上りに続けて半年になります．現役当時の柔軟な身体に戻り，ゴルフも再開しました．まだムリは禁物ですが……．

恩田　　怜（冶金，昭36）市会議員を止めてからは環境問題に取り組んでいます．丹波に畑を１反借りて週末農業有機栽培をしています．

白井　　勲（鉱山，昭37）細々と仕事を続ける傍ら，七十の手習いで中国語を習っています．

原田　省吾（鉱山，昭37）2002年９月でサラリーマン生活に終止符を打ちました．現在，ボランティアでパソコン講師を勤めたりおもちゃドクターとして子供達のこわれたおもちゃの修理で楽しんでいます．

名和田　進（冶金，昭37）昨年「よく似た英語と日本語の慣用句集」（文芸館）を出版しました．退職後約５年をかけてとり組んだものです．

秦　　瑛（冶金，昭37）地域の自治会長と地域連合の社会福祉協議会の議長にこの４月より選出されて汗を流しております．

小松　啓七（冶金，昭39）水曜会入会以来，44年になります．来年は45周年で同期会の開催を検討中です．

水田　義明（資源，昭40）４月１日付で崇城大学工学部長，大学院工学研究科長，評議員になり昼夜忙しくしております．

大石　敏雄（冶金，昭40）本年３月関西大学を退職いたしました．

横山　羌泰（資源，昭41）５月末から10ヶ月間，JICAのシニア海外ボランティアとして３回目のマラウイに赴任します．

稲田　善紀（資源，昭42）昨年３月に29年間勤務しました愛媛大学を定年退官し，神戸に帰ってきました．官庁や企業の顧問を５つ，委員会の委員長や委員を10余り続けています．国内外のツアーによく出かけています．

加藤　雅典（冶金，昭42）昭和42年冶金学科卒関東在住者の会を発足し，幹事役の一端をお引き受け中です．第１回は平成20年４月５日に開催しました．

黒木　正純（冶金，昭43）子会社の60周年行事があり残念ながら欠席します．未曾有の造船ブームで，売上高の80％を占める舶用製品（ポンプ，タービン）で多忙の極みですが趣味の山歩きで現役を維持しています．

中川　正義（冶金，昭43）ISO9001，14001の審査員，システムの構築のコンサルをしています．

村上　忠彦（冶金，昭43）４回試験に挑戦の末昨年社会保険労務士になりました．現在行政協力として社会保険事務所でねんきん特別便の窓口業務をやっています．

淺井　達雄（資源，昭44）４月に副学長に就任しました．これまでの経営情報系教授の仕事に加え，広報・情報分野で大学運営の一端を担います．

丹羽　正男（資源，昭44）昨年腰を痛めました．自宅にて療養生活を楽しんでいます．

中野　勇男（冶金，昭44）三洋電機（株）アドバンストデバイス研究所に週４日勤務しております。新幹線沿い，長良川のすぐ西側です．

八十　致雄（金属，昭44）“たたら製鉄”の和鋼博物館で勤務しています．山陰に来られたら是非お立ち寄り下さい．

大井　武男（資源，昭45）H18. 3. 31を以て高知県を定年退職し，自適な生活を送っています．卒業後大学の専門と別な生活をしてきましたので大会に出席してもほとんどわかりませんので欠席します．3～10月最終日曜日石川県に行っています．

中井　健（冶金，昭46）60才を過ぎましたが，現役でやっております．7年前に鉄鋼から全く異分野の工業用ベルト会社に転籍し，世界を飛び回っております．

廣内　鐵也（冶金，昭46）昨年6月に定年退職し，再雇用で同会社（住金精圧工業）で継続して働いています．生産性向上の担当をしておりまだまだがんばって参ります．

福井　康司（金属，昭48）京大を卒業して以来ずっとアルミ箔，パウダーペースト関連の会社に勤務しています．今は技術企画，品質，安全を担当しています．

井口　義朗（資源，昭50）三次元物理探査船の運航管理業務で軌道に乗せるのに苦労しています．

贄川　潤（金属，昭50）昨年7月，4年2ヶ月ぶりに福島県喜多方から神奈川県大和へ異動転勤しました．仕事は光通信用の部品及びペルチェモジュール製品の開発，製造，販売です．京都からは残念ながら，何年か遠ざかっています．

明珍　宗孝（金属，昭52）溶融塩電解による核燃料再処理に手を染めて，10年となりました．

西井　理（資源，昭53）イランとカザフスタンで地震防災プロジェクトを実施しています．

宮脇　新也（金属，昭53）昨年4月より東京勤務です．着慣れた作業着をスーツ，ネクタイ姿に変え元気で過ごしています．

竹士伊知郎（金属，昭54）同窓の諸先生・諸先輩にお世話になることが多く，水曜会のありがたさを痛感しています．

矢内　雅造（金属，昭54）原油価格の高騰等で，製造原価が大巾アップし，厳しい環境ですが，どうにか頑張っています．

北村　公亮（資源，昭55）ISOなど品質保証の仕組み作りに追われつつ，本当に心ある商品を作ることのできる人質作りが何より大切と思う毎日です．

須川　壮己（資源，昭55）BPO，特に大量事務受託の会社を設立しそこに出向しております．元気にやっております．

竹川　禎信（金属，昭55）最近は家庭用の配線器具（スイッチ，コンセント等）の仕事をしています．

安倍　研吾（金属，昭57）厚鋼板の製造・品質管理の業務に従事しています．造船業をはじめとした需要に支えられ好調です！原材料の高騰がいつまで続くか，先行きは不透明ですが……？

小山　大祐（冶金，昭58）次世代航空エンジン日英協同開発と生産を推進して居ります．

竹内　正（冶金，昭58）地球温暖化防止を各人できる範囲でまじめに考え，実行しないと，地球はともかく人類の存続が本当に危なくなってきました．みなさん，何か1つ，毎日できることを，ご家庭でやってみて下さい．でないと数10年後，生活が大変なことになってしまいます．本当ですよ．

田中　秀敏（金属，昭59）機械関係の部門に居ても鋳物から離れられない日々を送っています．

土井　健司（金属，昭60）通訳としてアルジェリアで仕事をしています．

古谷　精市（金属，昭60）本年4月より，産業機械品用の鍛鋼品を製造する技術室へ異動となりました．

山本　保（金属，昭60）長野工場に異動になりました．ハードディスクのヘッド開発をしています．

木村　得彦（金属，昭61）相変わらずめっきとプレスの一貫生産で，主としてコネクターの金属端子を生産しています．さすがの自動車業界も少しブレーキがかかってきたようで今年は厳しくなりそうです．

木成　寿秀（資源，平元）インドネシアのカリマンタン島に赴任中です．

安藤　聡（冶金，平元）電機向け表面処理鋼板の開発をやっております．原料高騰の折，これからますますコスト削減に向け厳しくなりそうです．

中森　英行（金属，平元）原材料高による大きな波が当社にもやってきて，とにかく価格転嫁できるよう頑張ってます．今年から弟も入社してパワーアップして頑張ります．

西　孝文（資源，平7）最近開発していたイメージセンサーが商品に組み込まれ発売される予定です．

佐藤　彰洋（材料，平8）（株）IHI基盤技術研究所にて航空エンジン用材料の開発に従事しております．

高瀬　嗣郎（資源，平10）津波防災の仕事を継続しております．年度末のあわただしさからやっと解放され，今は束の間の休暇を楽しんでおります．

安井　雅人（物理工，平10）連絡が遅れましたこと，おわびいたします．企画部IEソリューション室にて統計手法を駆使しながら現場の改善業務を行っています．鉄鋼各プロセスを見ることができ，まだまだ変えるところはあるなと思いつつ業務しております．

袴田　昌高（地球工，平14）図らずも地元に戻ることとなりました．研究員として働いております．

渡邊　哲平（物理工平15）入社4年目で金属材料関係の仕事をしております．

中村　利宗（地球工，平17）現在，北海道苫小牧市沼ノ端にてドリリングクルーの一員として頑張っています．

山口　拓人（物理工，平18）平成20年4月から転職により再び金属の世界に戻って参りました．公設試の研究員として元気に頑張っています．

田中　祐輔（物理工，平19）来年度からJFEスチールです．

山岡　幸男（元教官）韓国と日本を行ったり来たり，13年間技術顧問をして元気にやっております．

森　　英嗣（元教官）水曜会の益々の発展をお祈り申し上げます．最近はガラスのリサイクルに関する研究で執筆の依頼を頂く様になりました．

平成20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		
大川恵理	微小セラミック球による電磁波の散乱に関する研究	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
田中暁	沖大東海嶺における地殻構造探査に関する研究	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
山崎鍾史	JJY標準電波を用いた浅層EM探査に関する研究	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
地質工学分野		
黒田佳宏	Caに富む岩石に対するCO_2鉱物固定化への実験的研究	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
中岡健一	Molecular Dynamics Simulations of Oil-Water Interface for Enhanced Oil Recovery	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
仲田典弘	地震波干渉法による電車振動を震源とした地下可視化の試み	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
山下佳彦	付加体における海底地すべり過程とその崩壊堆積物に関するモデル実験	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
地殻開発工学分野		
大谷敏記	炭酸ガス地中貯留における残留ガストラップに及ぼす空隙形状の影響	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
岡島拓郎	多孔質岩石の空隙分布異方性が弾性係数異方性に及ぼす影響	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
小川威	二酸化炭素の異なる細孔分布を有する岩石への吸着に関する研究	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
佐藤亮介	石油増進回収の水攻法を模擬した岩石三軸AE測定試験	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
上岡正実	採掘に伴い進展する空洞群周辺の三次元解析による安定性評価	未定
ジオメカトロニクス分野		
伊藤靖将	インバート接合面の施工条件がトンネルに与える影響の評価	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
三好拓志	断層位置でのトンネルの耐震補強に関する研究	未定
升井駿	埋設長尺部材中の超音波ガイド波の伝播特性に関する基礎的検討	東京大学新領域創成研究所
百野浩一	レーザー超音波法による面状検査の高速化について	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		
遠藤啓太	粒状体個別要素法における解析パラメータについての検討	東京大学大学院工学研究科(修士課程進学)
田中太一	個別要素法による3次元応力-浸透流連成解析手法の原位置岩盤への適用	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
堀部修平	岩盤の亀裂充填過程を考慮したグラウタビリティの評価手法について	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
前田侑里	地球統計学シミュレーションを用いた岩盤の3次元水理地質モデルの構築	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		
梶川弘太	電析法により作製された超弾性 Cu-Sn 合金薄膜	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
林　健太郎	マイクロスコープによるメタンハイドレートの気液界面における成長挙動の観察	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
渡邊耕太	疲労破壊過程における Westerly 花崗岩中のマイクロクラックの成長	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		
越智啓介	マグネシウム合金の温間引張曲げ成形におけるスプリングバック特性に関する実験研究	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
久保雅寛	垂直管内を上昇する脈動流中の粒子挙動	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
佐藤雄介	固体平板に衝突する水膜噴流の熱伝達特性	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
西田一喜	伸びフランジ成形の有限要素シミュレーションによる成形限界予測	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
宇宙資源エネルギー学分野		
越後拓海	琵琶湖水の水電解操作	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
樺島智大	Tailoring of Nano and Meso Structured Oxides for Energy Applications（エネルギー技術分野におけるナノ－メソ構造酸化物テーラリング）	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
中西　賢	Li 金属負極反応に伴うイオンの移動現象と表面形態変化のカップリング現象	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
古川敏之	落下塔による微小重力環境における ZnO ナノワイヤ配列の電気化学プロセシング	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		
前島裕一	ベクトル場処理による地中レーダ探査測線方位の普遍化に関する研究	(株)山陰合同銀行
地質工学分野		
宮川歩夢	数値シミュレーションによる南海トラフ付加体内における長期力学環境の変化の再現とモデル化	京都大学大学院工学研究科(博士後期課程進学)
鳥居健太郎	地下可視化に向けた地震波干渉法の自然地震記録への適用	シュルンベルジェ(株)
高橋功治	帯水層における気体の挙動と残留ガス形成メカニズムに関する実験的研究	コーセル(株)
池田紘幸	メタンハイドレート賦存層における力学的強度の評価及び結晶成長シミュレーション	京都市高校講師
地殻開発工学分野		
赤井崇嗣	格子ボルツマン法を用いたフラクチャーの浸透率及び相対浸透率評価に関する研究	(独)石油天然ガス･金属鉱物資源機構
小畑明広	均質化法による岩石の異方弾性定数評価に関する基礎的研究	国際石油開発(株)
冨井将允	岩石の吸着特性に着目した二酸化炭素地中固定化技術の検討	(株)村田製作所

氏 名	研 究 論 文 題 目	就 職 先
ジオメカトロニクス分野		
磯 井 卓 哉	適応信号処理を用いた欠陥情報抽出に関する研究	(株)島津製作所
妹 尾 尚 宜	施工過程を考慮したトンネル変状の3次元解析	西日本旅客鉄道(株)
中 野 亮	山岳トンネルの地震被害とその対策に関する研究	東京ガス(株)
福 間 淳 史	分散性を考慮したガイド波の波形制御について	(株)フィリップスエレクトロニクスジャパン
地殻環境工学講座		
清 水 靖	地球統計学手法を用いた岩盤の3次元水理地質モデル構築に関する研究	国際石油開発帝石ホールディングス(株)
田 尾 拓 也	3次元個別要素法を用いた岩盤空洞の気密性能評価に関する研究	日本コントロールシステム(株)
藤 原 崇 行	グラウト充填機構の評価法及び地下水制御システムの合理化に関する研究	日鉱金属(株)
平 野 千 恵	キレート剤による鉛汚染土壌の洗浄特性	京都府
資源エネルギーシステム学分野		
浅 尾 祐 基	Fabrication of metallic microchannels by spacer method and inner microfluid characteristics (スペーサー法による金属マイクロ流路の作製および内部マイクロ流体挙動)	三菱重工業(株)
木 村 克 也	Stretch formability at room temperature in AZ31 Mg alloy sheets (AZ31マグネシウム合金板材の室温張出成形性)	住友金属鉱山(株)
中 本 圭 昭	Mechanical properties of Cu and Co-Cu alloy processed by electrodeposition (電析法で作製されたCuおよびCo-Cu合金の機械特性)	トヨタ自動車(株)
小 林 正 幸	(修士課程中途退学)	経済産業省
資源エネルギープロセス学分野		
板 津 正 明	Springback Characteristics of a Magnesium Alloy Sheet in Warm Draw Bending	新日本製鐵(株)
伊 吹 和 也	Heat Transfer Characteristics of a Planar Water Jet Impinging Obliquely on a Flat Surface	JFEスチール(株)
櫻 田 優 貴	Development of Finite Element Simulation Model for Manufacturing Seam-Welded Pipes in Roll Forming	(株)デンソー
芝 辻 悠 太	Transport Mechanism of a Solid Particle in Pulsatile Pipe Flow	住友金属工業(株)
宇宙資源エネルギー学分野		
稲 荷 博 文	Gravitational Level Effects on Cu Electrodeposition (銅電析に及ぼす重力レベルの影響)	日揮(株)
佐久間 剛	Interfacial Phenomena of Bubble Evolution in Water Electrolysis (水電解操作における気泡発生界面現象)	(株)小松製作所

博士後期課程修了者

氏　名	研究論文題目	就職先
地質工学分野		
加藤政史	列車走行に起因する地盤振動の粘弾性波動論に基づく数値シミュレーションに関する研究	石油資源開発(株)
林　宏一	Development of the Surface-wave Methods and Its Application to Site Investigations	応用地質(株)
ジオメカトロニクス分野		
松長　剛	トンネル変状の進展予測と対策の合理化に関する研究	

博士学位授与者　課程博士

氏　名	研究論文題目	主　査	取得年月日	備　考
地質工学分野				
加藤政史	列車走行に起因する地盤振動の粘弾性波動論に基づく数値シミュレーションに関する研究	松岡俊文	平成20年3月24日	
林　宏一	Development of the Surface-wave Methods and Its Application to Site Investigations	松岡俊文	平成20年3月24日	
ジオメカトロニクス分野				
松長　剛	トンネル変状の進展予測と対策の合理化に関する研究	朝倉俊弘	平成20年3月24日	

博士学位授与者　論文博士

氏　名	研究論文題目	主　査	取得年月日	備　考
ジオメカトロニクス分野				
登坂敏雄	高品質吹付けコンクリートによるトンネル覆工の単一構造化に関する研究	朝倉俊弘	平成20年3月24日	群馬工業高等専門学校卒業 昭和47年3月
前田穣	都市部地下構造物の維持管理に関する研究	朝倉俊弘	平成20年3月24日	京都大学工学部土木工学 昭和56年3月 卒業

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		
小柳孝彰	Niナノ粒子の作製と定量解析	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
鈴木健人	超臨界二酸化炭素を用いたマグネシウム金属への高分子コーティング	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
村松孝紀	Sn基鉛フリーはんだ合金の組織形成	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
雪谷俊介	ARB加工アルミニウム材料の変形その場測定と電池を用いた蓄積エネルギー評価	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
劉　斐	熱応力によるFePt磁性薄膜のナノ粒子c軸配向制御	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
表面処理工学分野		
奥 村 友 輔	YおよびScをドープした$BaZrO_3$におけるH_2Oの浸透挙動の解明	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
片 上 貴 文	$BaZrO_3$のAサイトドーピングの可能性の調査	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
高 嶋 章 伍	イオン交換法によるビスマス－バナジウム複合酸化物の表面改質	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
田 中 範 之	Zn溶媒を用いたSi単結晶上へのβ-$FeSi_2$の液相成長	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
伊 藤 友 二	バリウムジルコネートの相安定性と電極材料との反応性	(株) 小松製作所
プロセス設計学分野		
岡 田 健 二	重元素のスピン軌道相互作用に関する基礎研究	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
弘 栄 介	焦電結晶を用いた粒子加速器の開発	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
松 谷 広	大気圧下での質量分析法の開発	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
山 本 知 央	蛍光X線による酸化物配位数分析	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
大 村 宏 明	制動放射を用いた材料分析法の研究	不明
マイクロ材料学分野		
池 袋 哲 史	TiNバッファ層の選択的酸溶解を用いたGaN層の剥離技術の開発	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
坂 本 真 之	Cu(Ti)合金配線材における自己組織化バリア層形成に熱処理時の雰囲気が与える影響	東京大学大学院工学研究科(修士課程進学)
薗 川 裕 美	透明導電性酸化物を用いた波長帯制御型高反射ミラー薄膜材の作製	BNPパリバ証券(株)
中 村 惇 志	透明導電性Nb添加TiO2薄膜材の電気特性・微細構造に及ぼす膜厚の影響	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
本 橋 雄 介	$Ni_2Si_{1-x}Al_x$の電気特性に及ぼすAl固溶度の影響	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
先端材料物性学分野		
橋 本 修 平	単一分子架橋の電子伝導特性	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
後 藤 真 幸	高温におけるAu原子サイズ接点のコンダクタンス	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
津 田 斉 祐	半導体(001)面でのLBHのバイアス依存性	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
水 上 祐 輔	Al合金原子サイズ接点のコンダクタンス	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
長 江 和 佳	金属ガラス原子サイズ接点のコンダクタンス	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
量子材料学分野		
磯 山 佳 甫	PLD法によるGa_2O_3:Mn薄膜の合成と評価	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
坂 本 健 志	典型元素酸化物の誘電関数の理論計算	千住金属工業(株)
橋 本 量	$R$$InO_3$, $R$$GaO_3$(R=希土類元素)の合成と強誘電相転移	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
森 正 弘	層状酸化チタン中のプロトンと構造安定性	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
山 崎 寛	立方晶Bi_2O_3中の3価元素の固溶エネルギー	未定

氏　名	研究論文題目	就職先
結晶物性工学分野		
大島真宏	共晶ファイバー除去法によるTiNi形状記憶合金の低弾性率化	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
後藤健吾	ペロブスカイト系化合物 $La_{2/3-x}Li_{3x}TiO_3$ の結晶構造とリチウムイオン伝導特性の組成依存性	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
田中清泰	Ce-Mg-NiおよびNd-Mg-Ni三元系合金の相平衡と水素吸蔵特性	松下電池工業(株)
橋本裕	Nb-Cu合金の微細組織と水素透過特性	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
橋本和太郎	Ni基超合金の高クリープ強度化のためのγ/γ'二相組織の弾性解析	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
平山隆浩	Co/Co_3(Al,W)二相合金単結晶の圧縮変形挙動	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
先端材料機能学分野		
新井貴博	DyBCOコーテッドコンダクターの引張変形下におけるクラック数と臨界電流値との関係	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
柏谷悠介	X線異常小角散乱法を用いたZrCu(Pt)，ZrNi(Pt)金属ガラスの微細構造解析	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
成宮洋輝	GA鋼板の調質圧延がコーティング層の破壊に及ぼす影響	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
増本直高	InAsナノドットのGaAsキャップ成長初期構造解析	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		
奥江政晃	偏極中性子回折実験による $ErNi_2Ge_2$ の磁気的異方性の解明	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
加藤真行	スピンアイス系における気液型相変態に関するモンテカルロシミュレーション	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
高橋悠祐	希土類ヘリカル磁性体Gd-Y合金の非線形磁気応答	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
宮崎祐一	P/M7000系合金の微細組織と機械的性質に及ぼすFSW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)
機能構築学分野		
上西成卓	気相法による二元系混合SAMの作製	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
河盛誠	走査プローブリソグラフィによる金属ナノ粒子アレイの作製	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
神田雅央	化学吸着アミノシラン分子膜の分子集積密度	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
中井基継	イオン液体浴を用いた金属酸化物皮膜形成	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
簗瀬功造	走査型プローブ顕微鏡によるポルフィリン系分子/Au(111)の吸着構造の評価	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
趙明修	Zr(IV)表面への芳香族ジカルボン酸分子の自己集積化	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
エネルギー社会工学分野		
浦 野 親 人	種々の酸化チタンを用いた色素増感太陽電池の性能及び磁場の影響	ホンダ
難 波 一 成	超音波処理を施した炭酸水の吹き出し挙動に及ぼす不純物の影響	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
藤 縄 慎 吾	CaO を用いた二酸化炭素の固定及びメカニカルミリングの影響	無職
南 埜 良 太	グラファイト粉末の NOx 吸着・分解能とその反応機構について	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
宮 木 和	メカニカルミリングを用いたセルロース/アルミニウム複合材料の開発	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
山 田 善 紀	種々の光触媒材料のメチレンブルー分解および磁場の影響	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
高温プロセス分野 **(現 材料プロセス科学分野)**		
和 泉 晃 浩	ポリオール法による燃料電池用 PtRu 触媒作製における NaOH 添加の影響	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
祖父江 智 之	燃料電池用触媒電極における触媒分散性に及ぼすペースト作製条件の影響	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
竹 中 和 己	電析法による Al − Zn 合金薄膜の作製	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
東 村 圭 祐	電析 Al 薄膜のアノード酸化による機能性薄膜の作製	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
渡 部 薫 平	電析 CdTe の熱処理に関する研究	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
プロセス熱化学分野		
一 瀬 麻 衣	Na_2MoO_4-MoO_3 系融体中への La_2O_3 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)
稲 垣 貴 行	固体鉄中への浸炭	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
柿 沼 共 宏	CaO 系フラックスによる溶銑脱硫	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
仁 井 谷 洋	石灰系フラックスによる溶銑脱 S 反応の酸素ポテンシャル	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
松 居 悠	CaO-Nepheline 系の相平衡	京都大学大学院工学研究科(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		
上 田 侑 正	高温相 $Mg_{51}Zn_{20}$ の相分離挙動と機械特性	住友金属工業(株)
内 原 武 志	鉄基垂直磁化膜のナノ組織形成機構	住友電気工業(株)
小木曽 裕 紀	Mg 基高温はんだ合金の組織形成と機械特性	千代田化工建設(株)
中 川 朋 輝	液相還元法による Sn ナノ粒子の製造とその応用	日新製鋼(株)

氏　名	研究論文題目	就職先
表面処理工学分野		
桂　翔生	固体酸型燃料電池における電極触媒性能の評価	(株)神戸製鋼所
川上　彬	双方向パルス電解法によるニッケル表面のNi-Mo合金化	(株)神戸製鋼所
末広広一	$La_{0.6}Ba_{0.4}ScO_{2.8}$－$BaZrO_3$系酸化物の固溶領域探索と水和・脱水特性	国土交通省
関本英弘	ニッケル共存下におけるチタン酸化物の水素還元	京都大学大学院工学研究科(博士後期課程進学)
プロセス設計学分野		
塩井亮介	蛍光X線スペクトルLα/Lβ強度比に与える化学結合効果の研究	(株)大同特殊工業
工藤智行	アルミニウム及び硫黄化合物のXANESとEXEFSスペクトルの比較	(株)古河スカイ
木宮宏治	軟X線・電子分光装置の開発	(株)JFEスチール
佐々木宣治	X線スペクトル強度比に与える励起エネルギーの効果に関する研究	京都大学大学院工学研究科(博士後期課程進学)
渡辺大輔	ポータブル全反射蛍光X線分析装置の材料分析への応用	(株)神戸製鋼所
マイクロ材料学分野		
李　相陳	TiNバッファ層を用いたSi基板上でのGaN半導体エピタキシャル成長	Samsung Advanced Institute of Technology
酒井康明	GaN成長用TiN系バッファ層とその上のGaN系多層膜の再成長の研究	大同特殊鋼(株)
先端材料物性学分野		
藤田啓一	微小接点のSTMによる直接観察	東京エレクトロン(株)
堀口和孝	ナノリンク分子の電子伝導特性	京都大学大学院工学研究科(博士後期課程進学)
前田頼宣	$TiSi_2$ナノアイランド上へのキャリア注入に表面・界面状態が与える影響	(株)村田製作所
三浦大輔	原子サイズ金属接点の電流誘起破断	(株)ディー・エヌ・エー
量子材料学分野		
稲盛弘毅	ハイドロキシアパタイトの陽イオン交換能に関する理論計算	第一生命保険相互会社
岡本憲亮	第一原理計算による$BaZrO_3$におけるプロトン伝導発現機構	DOWAホールディングス(株)
酒井俊文	AlNおよびBN中の希土類ドーパントの局所構造	シャープ(株)
下村育生	PLD法によるCo添加Ga_2O_3薄膜の作製とその構造	川崎重工業(株)
松本章史	第一原理計算による超イオン伝導相δ-Bi_2O_3の構造	京都大学大学院工学研究科(博士後期課程進学)

氏名	研究論文題目	就職先
結晶物性工学分野		
井上 暢	Ni基超合金の高温クリープ変形で生じる結晶方位分散機構とその寿命予測への応用	JFEスチール(株)
原田俊太	$ReSi_{1.75}$基シリサイドの欠陥構造の制御とその輸送特性への影響	京都大学大学院工学研究科(博士後期課程進学)
山口裕司	(Li,La)TiO_3固体電解質/電極界面設計と電池特性制御	新日本製鐵(株)
構造物性学分野		
尾崎祐輔	超臨界流体イオウの微視的構造変化	三菱商事(株)
成瀬 聖	X線小角散乱によるアルカリ金属流体の構造研究	住友商事(株)
林 健太郎	低密度流体セシウムの局所構造と電子ガス不安定性の研究	関西電力(株)
先端材料機能学分野		
久野啓志	GI-SAXS法による埋め込まれたGeおよびInAsナノドットの構造評価	(株)大阪チタニウムテクノロジーズ
深澤優哉	ポーラスメタルの引張弾性および破壊プロセスについての研究	野村證券(株)
福本武文	X線異常小角散乱法によるZr基金属ガラスの構造評価	(株)豊田自動織機
向井康博	Bi2223超伝導テープ材の力学的挙動とその臨界電流分布に及ぼす影響	関西電力(株)
材料物理学分野		
奥野良和	TDGLモデルによる超伝導材料のナノ組織と磁束ピンニング特性の検討	古河電気工業(株)
山本裕介	P/M7000系合金におけるAl_3(Sc,Zr)粒子の分散制御が熱間加工中の動的再結晶に及ぼす影響	住友軽金属工業(株)
機能構築学分野		
足立耕作	分子修飾テンプレートへの金ナノ粒子の選択的集積	ローム(株)
笠原大爾	Si(111)表面へのビニルフェロセンの固定化	日亜化学工業(株)
西崎ゆい	イオン液体浴を用いた還元拡散法によるCu合金の形成	川崎重工業(株)
森口隆広	ルテニウム-アミン自己集積化錯体分子膜	東京電力(株)
エネルギー社会工学分野		
伊藤亮太	SiC薄膜のNOx吸着・分解能に関する研究	みずほ情報総研
高岡利安	国内家庭部門における電力消費削減対策とその費用対効果	NTTコムウェア
沼田 健	小型電子機器からの資源リサイクル評価	関西電力
原 康祐	TiO系のメカニカルミリング	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
量子エネルギープロセス分野		
石川 怜	溶融塩電気化学プロセスによるMg_2Si薄膜の形成と制御	九州電力(株)
村中陽一	電気化学的手法によるZnO薄膜作製に関する研究	白光(株)

氏　名	研究論文題目	就職先
高温プロセス分野 (現　材料プロセス科学分野)		
加納慶達	アルコール還元法による炭素担持白金触媒作製における酸およびアルカリ添加の影響	旭硝子(株)
白坂翔平	燃料電池用触媒における粒子形状および担持状態の評価	三菱重工(株)
プロセス熱化学分野		
竹下裕晃	CaO-P_2O_5-SiO_2系の熱力学	JFEスチール(株)
林　竜也	Na_2O-Al_2O_3-SiO_2-Fe_xO系の熱力学	JFEスチール(株)
古河直樹	固体鉄中への浸炭に及ぼす炭材結晶化度の影響	新日本製鐵(株)

博士後期課程修了者

氏　名	研究論文題目	就職先
先端材料物性学分野		
小林賢吾	走査プローブ顕微鏡を用いた半導体中の不純物のポテンシャル計測	エスアイアイ・ナノテクノロジー(株)
量子材料学分野		
豊浦和明	Lithium diffusion in graphite intercalation compounds based on transition state theory	京都大学大学院工学研究科(PD)
弓削是貴	Statistical thermodynamics calculations on structure and phase stability of multicomponent alloys	京都大学大学院工学研究科(助教)
結晶物性工学分野		
金　正煥	Crystal structure and thermoelectric properties of Ba-Ge based type-III clathrate compounds (Ba-Ge系type-IIIクラスレート化合物の結晶構造と熱電特性)	サムスン電機
材料物理学分野		
堀出朋哉	Influence of the nanostructure on quantized vortex behavior in $REBa_2Cu_3O_{7-x}$(RE=Y,Gd)films($REBa_2Cu_3O_{7-x}$(RE=Y,Gd) 薄膜中のナノ構造が量子化磁速の挙動に及ぼす影響)	(株)日立製作所

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
先端材料物性学分野				
小林賢吾	走査プローブ顕微鏡を用いた半導体中の不純物のポテンシャル計測	酒井　明	平成20年3月24日	
量子材料学分野				
豊浦和明	Lithium diffusion in graphite intercalation compounds based on transition state theory	田中　功	平成20年3月24日	
弓削是貴	Statistical thermodynamics calculations on structure and phase stability of multicomponent alloys	田中　功	平成20年3月24日	
結晶物性工学分野				
金　正煥	Crystal structure and thermoelectric properties of Ba-Ge based type-III clathrate compounds (Ba-Ge系type-IIIクラスレート化合物の結晶構造と熱電特性)	乾　晴行	平成19年9月25日	
材料物理学分野				
堀出朋哉	Influence of the nanostructure on quantized vortex behavior in $REBa_2Cu_3O_{7x}$(RE=Y,Gd)films($REBa_2Cu_3O_{7-x}$(RE=Y,Gd) 薄膜中のナノ構造が量子化磁速の挙動に及ぼす影響)	田中　功	平成20年3月24日	

水曜会誌卒業年次幹事制について

水曜会では，下記のような付則にもとづき卒業年次幹事を委嘱しております．年次幹事には卒業の年次ごとに金属系，資源系より各１名の年次幹事を定め，各系同年次会員の連絡先の掌握や同年次会員を代表して水曜会運営へのご協力をお願いすることになります．年次幹事にご就任頂く会員の方々には，水曜会の活動をより充実したものとするため，何卒ご協力の程お願いいたします．

水曜会年次幹事に関する付則

（目　　的）

第１条　水曜会の円滑な運営のため年次幹事を定め，水曜会会長は次の任務を依頼する．

1. 同年次会員の連絡先の掌握，
2. 同年次会員を代表して水曜会運営への協力

（定　　員）

第２条　年次幹事を各卒業年次ごとに旧資源系（鉱山）１名，旧金属系（冶金）１名を定めるものとする．

（任　　期）

第３条　任期は２年とし，重任は妨げないものとする．

（委　　嘱）

第４条　年次幹事の選任は，同年次会員の推薦により会長が委嘱するものとする．

この付則は平成15年６月14日より施行する．

逝　去　会　員

平成20年１月23日	日下部吉彦	特別名誉会員
平成20年１月６日	成瀬　一郎	昭16・採
平成20年１月17日	河合　　彌	昭17・鉱
平成19年12月１日	盛　　利貞	昭17・冶
平成20年３月１日	福田　政之	昭17・冶
平成18年６月13日	佐々　正實	昭18・鉱
平成20年２月24日	北村　洋二	昭18・冶
平成19年	山本　禎一	昭20・冶
平成20年７月22日	畑　　博	昭21・鉱
平成14年	吉岡　正勝	昭21・鉱
平成19年10月23日	川島　誠一	昭21・冶
平成19年６月４日	角谷　卓爾	昭21・冶
平成20年２月６日	藤井雄二郎	昭21・冶
平成20年４月	塩津　貫夫	昭21・冶
平成19年７月12日	本山　信一	昭22・鉱
平成19年８月18日	中谷　林平	昭22・鉱
平成20年３月	福田　一雄	昭22・鉱
平成18年12月11日	増田　　秀	昭23・鉱
平成19年12月28日	佐伯　善行	昭23・冶
平成20年１月18日	永野　　啓	昭24・鉱
平成20年２月16日	小西　恭三	昭25・冶
平成19年２月２日	木村　宏一	昭26・鉱
平成19年８月５日	蒲原　忠也	昭27・冶
平成20年１月24日	京井　　勲	昭27・冶
平成19年10月	田中　宣行	昭28・鉱
平成20年６月21日	片岡　　巍	昭29・鉱
平成19年８月	尾尻　啓介	昭31・資源
平成20年１月28日	彦谷　直司	昭31・鉱
平成19年３月13日	菊川　元隆	昭31・冶
平成19年５月	井上　博正	昭31・冶
平成19年10月22日	溝渕　芳昭	昭32・冶
平成20年１月15日	成田　　進	昭32・冶
平成18年７月27日	松井　正治	昭34・冶
平成20年１月４日	田村　秀昭	昭34・冶
平成20年５月28日	北尾　吉延	昭36・冶
平成20年１月22日	水野　直治	昭42・金
平成20年２月５日	大山　　伸	昭43・冶
平成18年９月14日	大越　　徹	昭44・金
——	山下　信明	昭49・冶
平成18年10月３日	松本　　望	昭50・金
平成18年７月３日	田中　秀康	昭50・金
平成19年５月	杉本　直樹	昭51・資源
平成19年12月５日	久保　文男	昭53・金
平成20年２月11日	真嶋　宗位	昭60・金

教　室　報　告

教員人事

＜旧資源系＞

平成20年３月１日	三ヶ田　均	教授に昇任
平成20年３月31日	福中　康博	定年退職
平成20年４月１日	楠田　　啓	宇宙資源エネルギー分野に異動
平成20年９月30日	新苗　正和	辞職（転任）
平成20年10月１日	後藤　忠徳	准教授に採用

＜旧金属系＞

平成20年２月１日	岡本　範彦	助教に採用
平成20年２月１日	田畑　吉計	准教授に昇任
平成20年３月31日	田村剛三郎	定年退職
平成20年３月31日	着本　　亨	辞職（転任）
平成20年４月１日	白井　泰治	教授に採用
平成20年４月１日	和氣　　剛	助教に採用
平成20年４月１日	弓削　是貴	助教に採用
平成20年４月１日	小山　幸典	助教に採用

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．

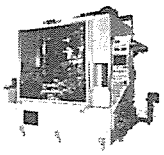
また，このほかに取り上げるべき企画や記事などご提案がございましたら編集委員会までお知らせ下さい．

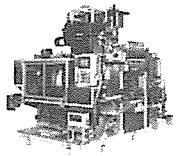
次号の発刊に向け，常時，会員の皆様からの投稿をお待ち致しておりますので，奮ってご応募くださるようお願い致します．投稿を予定されて今回，間に合われなかった原稿につきましても，引き続きお待ちしておりますので，どうぞよろしくお願い致します．

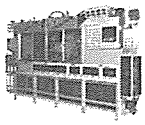
ネツレン　誘導加熱のパイオニア

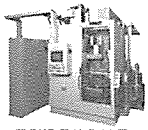
各種高周波焼入・焼戻装置

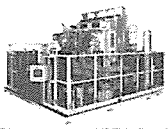
ネツレンは、創業以来50余年誘導加熱のパイオニアとして常に最先端技術の研究・開発に力を注いでまいりました。これからも顧客のニーズに対応した小型・省エネ・高信頼性で生産性の高い高周波焼入装置を提供してまいります。

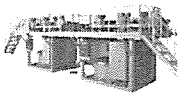

等速ジョイント焼入焼戻装置

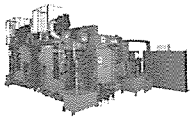

ドライブシャフト焼入焼戻装置


カムシャフト焼入焼戻装置


竪型汎用焼入装置


大型シュー/レース/ギア焼入装置


チェーン焼入焼戻装置


クランクシャフト焼入焼戻装置

NETUREN

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　〒660-0095　尼崎市大浜町2-28-8　TEL.06-6412-2211　FAX.06-6412-2171
・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20年度水曜会誌編集委員

委員長　杉村博之
幹事　村田澄彦（会誌）　伊藤和博（広告）
委員　奥村英之　酒井明　楠田啓　竹島康志
沼倉宏　松本要　小野玲児　水野正隆
佐藤彰洋　木戸俊朗　袴田昌高　萩野智行
葛谷俊博　山本真哉　山下善弘

平成20年10月25日　印刷　平成20年10月30日　発行

編集兼発行者　青木謙治
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（月・木曜日）

振替口座　京都 01090-8-26568 水曜会
銀行口座　みずほ銀行出町支店　普通 1242526　水曜会

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。

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。

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

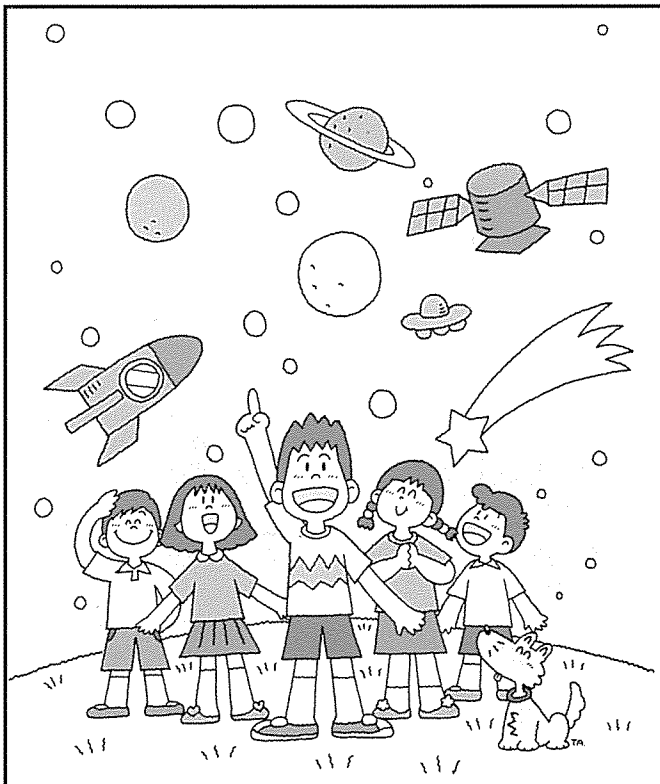
日本印刷出版株式会社
お問い合せ先
〒553-0006　大阪市福島区吉野1-2-7
TEL 06(6441)0076 e倶楽部係　FAX 06(6443)5815

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。



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

October 2008

CODEN : SUIYAA
Vol. XXIV, No. 1

Suiyōkwai-Shi

TRANSACTIONS OF THE MINING AND METALLURGICAL ASSOCIATION
KYOTO

CONTENTS

Retirement Memorial Lectures

Forty Years in the Study of Liquid Metals ····· Kozaburo TAMURA ····· 1

No Regrets for Majoring Materials Science ····· Masanori MURAKAMI ····· 16

Memorial Lecture in the Annual Meeting of Suiyokwai

Petroleum Development - A Challenge by the Newly Merged Japanese Oil Company ····· Takeshi MAKI ····· 29

The Present State of Affairs in the Department of Material Science and Engineering ····· Yasuhiro AWAKURA ····· 39

Forum

The Bansho Kou : The Notes On the Sweet Potato ····· Yoshio ATSUTA ····· 49

Product Development is as same as "People" Development ····· Kentaro SUKIMURA ····· 53

Finite Earth Resources and the Importance of Geoexploration ····· Hitoshi MIKADA ····· 55

CO_2 Sequestration into Hydrothermal System ····· Akira UEDA ····· 60

Nanocluster Size Measurement from Dark-field Scanning Transmission Electron Microscope Images ····· Norihiko L. OKAMOTO ····· 67

Angular Resolved NMR Study on Strongly Correlated Electron Systems ····· Takeshi WAKI ····· 72

Seismic Exploration of the Earth's Subsurface ····· Takeshi TSUJI ····· 77

Structure and Phase Stability of Multicomponent Alloys: First-principles Study ····· Koretaka YUGE ····· 83

Current Studies in Laboratories ····· 89

Suiyokwai Information ····· 112

Letter to Editor ····· 146

Kyoto University
Japan