郵政省告示　第159号
昭和42年２月28日　学術刊行物指定

ISSN 0371-408X

水曜會誌

第 23 巻　第 9 号

目　　次

退職記念講演
相分解の動力学……長村　光造……981

大会記念講演
自動車と特殊鋼……森田　章義……989
循環型社会における「資源開発」の役割……厨川　道雄……996

講　　座
金属学とその研究手法の進歩　－研究生活を顧みて〔V〕……村上陽太郎……1007

談　話　室
夕張回想記　－固体燃料から炭層ガスへ－　……加藤　高尚……1015
クラーク博士／ビフォアー・アンド・アフター・イン・ジャパン……熱田　善男……1022
地圧と岩盤破壊音の測定……石田　毅……1028
金属／酸化物異相界面の電子論的研究……松永　克志……1032
全固体リチウム二次電池における固体電解質－正極界面構造と電池特性……岸田　恭輔……1037
Caltech 材料学科……宇田　哲也……1041
私のこれまでの研究とこれからの研究……市坪　哲……1047

研究速報……1052

会　　報……1076

会員消息……1090

卒業者名簿……1100

平成 18 年 10 月 30 日発行

京　都　大　学

水　曜　会

この広い空の下、いくつもの夢が舞い上がる。



古河スカイが育む、アルミニウムの可能性。

軽量で、リサイクル性に優れたアルミニウム。
アジア最大のアルミ圧延メーカーである古河スカイは
アルミニウムのリーディングカンパニーとして
アルミニウムのもつ無限の可能性を拡大しながら
地球時代にふさわしい循環型社会づくりに貢献しています。

古河スカイ株式会社
www.furukawa-sky.co.jp
〒101-8970 東京都千代田区外神田4丁目14番1号
秋葉原UDX12階
TEL.03-5295-3800(代)　FAX.03-5295-3760

真空の極限を目ざして…

KYOTO TAKAOSIN

ULVACグループ代理店

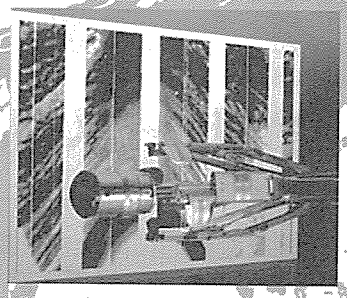
株式会社 京都タカオシン

本　　社　〒606 京都市左京区川端丸太町東入ル　(075) 751-7755㈹
FAX (075) 751-0294

滋賀営業所　〒523 滋賀県近江八幡市古川町1173－68　(0748) 36-6682
FAX (0748) 36-6683

Schlumberger

We provide the world-wide technology



Logging services

FMI /FMS
(フォーメーションマイクロイメジャー)
ﾌﾗｸﾁｬｰ解析、坑壁画像解析、
コアイメージ分析に有効
使用範囲:100mm～600mm径

詳細は下記までお問い合わせください。

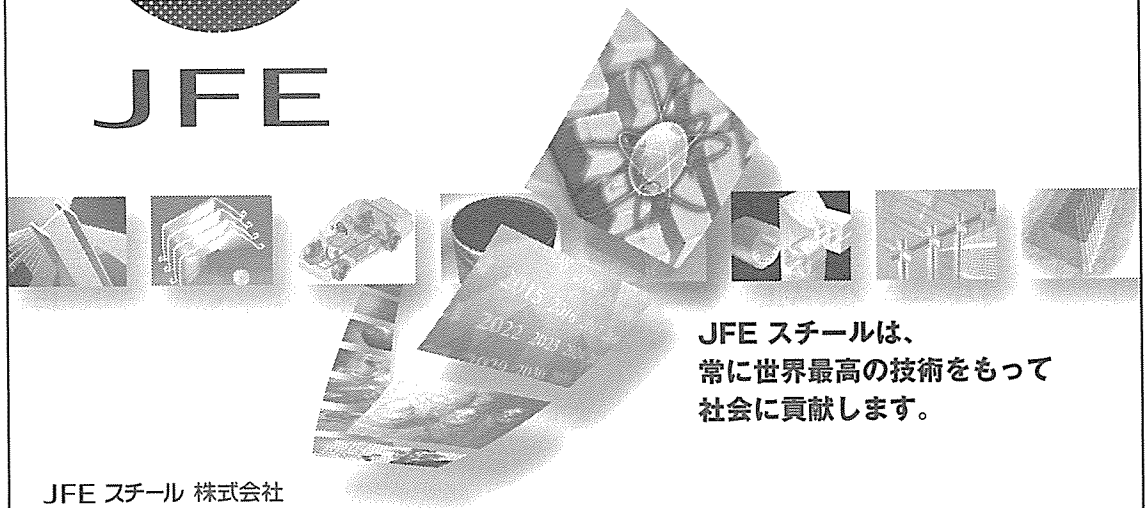
長岡事業所　Tel 0258-24-9600　Fax 0258-24-9620
新潟県長岡市北陽2-14-30
ofs-japan@slb.com

東京事業所　Tel 03-3431-0997　Fax 03-3431-1779
東京都港区浜松町2-7-1ハウス浜松町ビル7F
gq-tko-support@slb.com

シュルンベルジェグループ

挑戦・柔軟・誠実
JFE スチール

JFE



JFE スチールは、
常に世界最高の技術をもって
社会に貢献します。

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

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



抜群の加工性を誇る汎用冷間ダイス鋼。



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

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

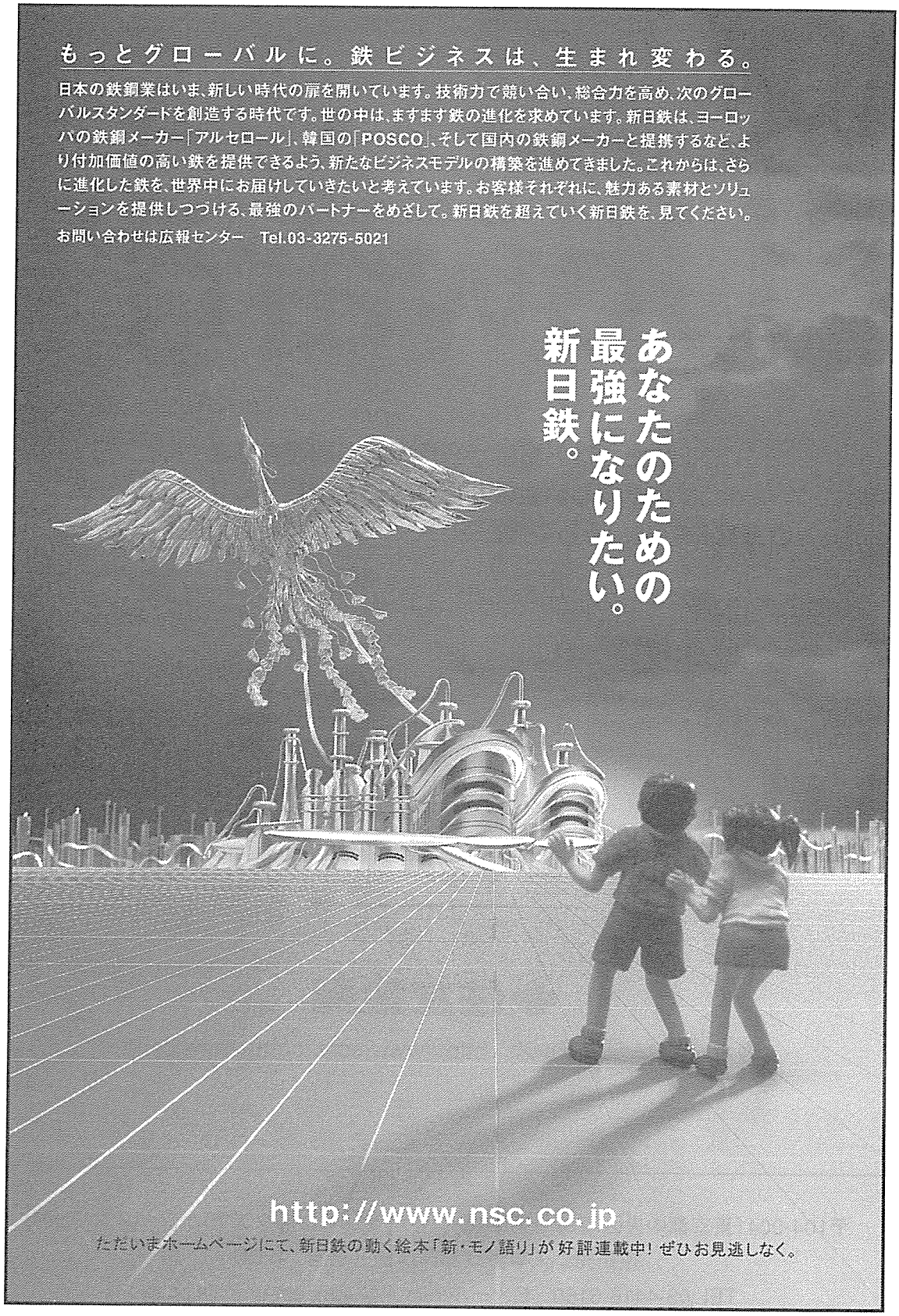
2 優れた金型寿命。
- ●満足のいく金型寿命、品質向上が得られます。
- ●冷間ダイス鋼としてハイテン材の曲げ、絞りにも対応します。

日本高周波鋼業株式会社 http://www.koshuha.co.jp

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

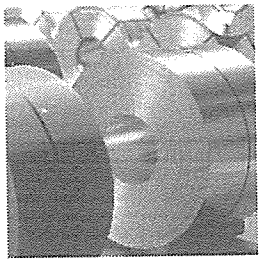


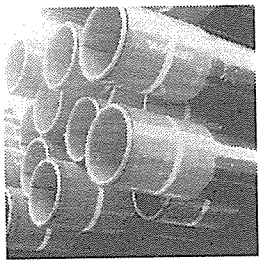
http://www.nsc.co.jp

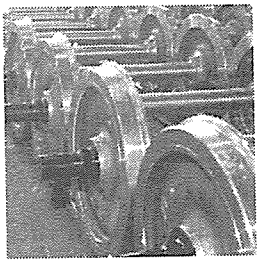
ただいまホームページにて、新日鉄の動く絵本「新・モノ語り」が好評連載中！ぜひお見逃しなく。

Onward, Upward

私たちはお客様から信頼され尊敬される
「素晴らしい会社」になることを目指します
さらなる前進、そして飛躍を――私たちは住友金属です。







住友金属

●ホームページアドレス　http://www.sumitomometals.co.jp

〒104-0041東京都中央区晴海一丁目8番11号（トリトンスクエア/オフィスタワーY）
連絡先：人事労政部人事室（担当：秋田）
TEL:03-4416-6160　Eメール:recruit@sumitomometals.co.jp



平成18年度　水曜会大会　記念写真（平成18年６月10日　京大会館にて）



平成18年度　水曜会大会　懇親会寄せ書

退職記念講演

相分解の動力学

長　村　光　造*

Dynamics of Phase Decomposition

by Kozo OSAMURA

1. はじめに

まだ大学時代を懐かしむというほど時間が経っていませんが，編集部からの催促もあり，これまでにどんなことを研究し，教えていたのか考えてみることにしました．最も興味を引かれた研究対象は統計物理学的諸事象にあったと思います．大学時代に随分勉強もし，講義にも取り入れてきたつもりですが，ここではブラウン運動と時効析出現象がどのような経緯で結びつくのか，私なりの理解の程度を皆さんにお話してみたいと思います．

巨視的な運動に原子レベルでの力学的作用がどのようにかかわるであろうか．たとえば静かな水面に浮いた木葉があちらこちらへゆっくりと動くのを観察するであろう．これは典型的なブラウン運動の例であるが，木葉に似た小さな球形粒子をブラウン粒子とよびこの運動について最初に考察しよう．図1に示したようにやや大きめの粒子があり，それが時間tの瞬間に速度v(t)で矢印の方向に運動しているとする．まわりにいっぱい原子が熱運動しており，この粒子と衝突する．衝突によって粒子の速度と運動方向は変わる．さてここで一個の粒子と一個の原子との衝突であれば，初期条件既知のもとで厳密に数学的にその運動の様子を記述することができる．しかし極めて多数の原子がほとんど同時刻に絶え間なくあらゆる方向から衝突するような場合にはどうだろうか．分子動力学的に大型計算機で調べる方法がある程度成功するかもしれないが，10^{23}個の原子集団ともなるとおいそれとまともには計算できなくなるので，まわりに平均場近似などを使うようにならざるを得ない．そのような小細工をするのであれば，いっそ統計物理学的に自然の法則性から考察を始めたほうがむしろ本質に近づくのではないか．さらにやや大きめの粒子のサイズを周りの原子のサイズと同じにしたらどうだろうか．熱運動，衝突といった素過程か全く変わらないので，考察の中身は変わらないことになる．このように，この拙稿では結晶格子点上の2種類の原子の間で起こる相互拡散ひいては相分解の素過程もブラウン粒子が支配されると同様の運動の法則に従うことを明らかにする．

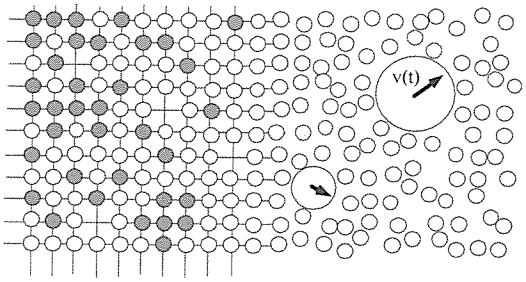


図1　奇妙な模様

2. ランジバン方程式

質量mのブラウン粒子がある時刻において速度vで流体中を運動する時，摩擦力がその粒子に働く．その運動はストークスの法則によって次式のように表される．

$$\frac{dv}{dt}+\gamma v=0 \qquad (1)$$

ここで摩擦係数は$\gamma=\alpha/m=1/\tau$とした．今初期速度を$t=0$で$v(0)$とすれば粒子の速度は次式に従い緩和時間$\tau=1/\gamma$でゼロに向かって減衰する．

$$v(t)=v(0)e^{-t/\tau}=v(0)e^{-\gamma t} \qquad (2)$$

摩擦という物理現象は微視的にみると流体中の分子（あ

*京都大学名誉教授（財）応用科学研究所　理事・主要研究員

るいは原子）がその粒子に衝突し，粒子の運動量が流体中の分子に移され，その粒子の速度がゼロへと減少することである．ここで流体中の分子は質量が小さくランダムな熱揺動をしていると考えている．時間 t での速度 $v(t)$ は式(2)に示されるように初期速度によって完全に決定できるとき，微分方程式(1)は決定論的方程式とよばれる．

しかしブラウン粒子が周りの分子と同程度に小さくなると，熱揺動による速度への寄与が無視できなくなる．1次元の場合には質量 m の粒子の熱的な平均エネルギーは次式で与えられる．

$$\frac{1}{2}m\langle v^2\rangle=\frac{1}{2}kT \tag{3}$$

ここで，k はボルツマン定数，T は温度である．つまり m が小さいときには，熱速度 $v_{th}=\sqrt{\langle v^2\rangle}=\sqrt{kT/m}$ が無視できなくなり，粒子の熱速度は平均値のまわりで顕著に広がりをもつようになる．するとブラウン粒子の運動を(1)式では表すことができなくなる．すなわちまわりの分子から働く力は(2)式で示される継続的な減衰力 $F_c(t)=-m\gamma v(t)$ と熱揺動による力 $F_f(t)$ の和で与えられる．ブラウン粒子と分子（原子）との衝突はあらゆる方向からあらゆる相対速度で起こると考えられるから $F_f(t)$ は確率論的なランダムな力であり平均値としてのみ取扱うことができる．このことを式で表すと

$$\frac{dv}{dt}+\gamma v=\Gamma(t) \tag{4}$$

のようになる．つまり(4)式で示す揺動力 $\Gamma(t)$ を含む確率的な微分方程式はランジバン（Langevin）方程式と呼ばれる．この式中の単位質量あたりの熱揺動による力，

$$\Gamma(t)=F_f(t)/m \tag{5}$$

はランジバン力（Langevin force）と呼ばれる．熱揺動によるランジバン力はあらゆる方向からブラウン粒子に作用するので，長時間の平均は

$$<\Gamma(t)>=0 \tag{6}$$

となる．ここで扱う物理的条件のもとでは粒子に分子が非常に頻繁に衝突し，その平均の衝突間隔 τ_0 は，(2)式に与えられる粒子速度の緩和時間 τ よりも極端に小さい場合であるとしてよい．ある時刻 t で衝突が起こり，別の任意の時刻 t' で衝突が起こる確率を与える相関関数は次式のように表される

$$<\Gamma(t)\ \Gamma(t')>=2L\delta(t-t') \tag{7}$$

つまり衝突という事象がランダムにいつでも起こるとすると，２つの衝突が同時刻に起こる($t=t'$)確率はランジバン力を表すノイズ強度 L に比例すると解釈できる．ここでノイズ強度は

$$L=\gamma k_BT/m \tag{8}$$

のように摩擦係数 γ に結びつけられる．

3. フォッカープランク方程式

ランジバン方程式(4)は初期条件(v_0, t_0)を与えると

$$v(t)=v_0e^{-\gamma t}+\int_{t_0}^{t}e^{-\gamma(t-t')}\Gamma(t')dt' \tag{9}$$

のような形式的な解が得られる．ここで熱揺動による力 $\Gamma(t)$ は確率論的な量であるので，時刻 t における速度 $v(t)$ は試行ごとに異なる値となるはずである．何回も試行を繰り返す．あるいは全く同様な多数の系（アンサンブル）を用意して初期条件(v_0, t_0)のもとに(9)式を解くことを試みる．全体で n 個のアンサンブルの中で速度が($v\sim v+dv$)の範囲にある系の数の割合を確率密度(probability density) $W(v, t)$ とよぶ．この確率密度の分布の時間変化は次のフォッカー・プランク(Fokker-Planck)方程式とよばれる運動方程式に従う．

$$\frac{\partial W(v,t)}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial v}C(v)k_BTW_e(v)\frac{\partial}{\partial v}\left[\frac{W(v)}{W_e(v)}\right]$$

$$=\frac{\partial}{\partial v}C(v)\left(\frac{\partial \mathrm{H}(v)}{\partial v}+k_BT\frac{\partial}{\partial v}\right)W(v) \tag{10}$$

ここで $C(v)$ は一般に v に依存する係数，$W_e(v)$ は平衡状態での確率密度の分布である．ブラウン運動のハミルトニアンを $\mathrm{H}(v)$ とすれば，

$$\beta\,\mathrm{H}(v)=-\ln W_e(v) \tag{11}$$

の関係がある．ここで $\beta=(k_BT)^{-1}$ である．この(11)式を用いると(10)式の第２項が得られる．ブラウン粒子の運動では $\mathrm{H}(v)=\frac{mv^2}{2}$，$C(v)=\frac{\gamma}{m}$ と置けるので，上記(10)式で示したブラウン運動に対するフォッカー・プランク方程式は次のようになる．

$$\frac{\partial W(v,t)}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial v}\left(\gamma v+\frac{\gamma k_BT}{m}\frac{\partial}{\partial v}\right)W(v,t) \tag{12}$$

平衡状態では $W(v, t)$ は時間的な変化はなくなり，さらに $v\to\pm\infty$ で $W(v, t)\to 0$ であるので，分布関数 $W(v)$ は次のように与えられる．

$$W(v)=\sqrt{\frac{m}{2\pi k_BT}}\exp\left(-\frac{mv^2}{2k_BT}\right) \tag{13}$$

これはよく知られているように熱平衡状態の気体分子の速度の分布を与える Maxwell 分布である．

4. 自由エネルギー密度

さてここで我々がこれから考察の対象とする合金の自

由エネルギーについて考えよう．A-B 2元合金では結晶格子点上をAあるいはB原子が占有している．均一固溶体は巨視的にみたとき系のどの部分を調べてもその平均組成は同じはずであるが，ミクロなスケールで考えると場所によって組成はある範囲内でゆらいでいる．今体積Vの合金を考え，溶質原子の平均モル分率を$\bar{c}$で表す．この系をN個の微小領域に分割し，i番目の領域の溶質原子組成を$c(r_i)$で示すことにする．ここでr_iはi番目の微小領域の中心位置を示す．もちろん微小領域の組成の体積全体にわたる平均$<c(r_i)>$は$\bar{c}$に等しい．では微小体積$v=V/N$はどのような大きさにとるのが合理的であろうか．考察の対象となる時間スケールで充分に原子の置換すなわち拡散が起こるような統計的に均質な領域とすることができる．このようなメゾスケールの変数への置き換えを粗視化（coarse graining）という．

さてここで組成について次のように置きかえをおこなう．組成cは元素Bのモル分率とした．一方物理の教科書ではよくゼロを中心に±1に変化するような変数（秩序パラメータ）ψを用いる．このψとcの間に

$$\psi = 2c - 1 \tag{14}$$

の関係を与える．本章においても説明の都合上ψを用いた表現をすることにする．合金中のある位置rを中心とした微小領域vでの自由エネルギー密度を溶質組成$\psi(r)$の関数として次のように表す．

$$f(\psi) = f_o(\psi) - h\psi + \frac{1}{2}K|\nabla\psi|^2 \tag{15}$$

$$f_o(\psi) = \frac{1}{2}a\psi^2 + \frac{1}{4}u_o\psi^4 \tag{16}$$

ここで係数τは次のような温度依存性をもつ，

$$a = A(T - T_c) \tag{17}$$

hは磁場のような外場に関係するものでここではゼロとおく．u_oは正の定数，$\frac{1}{2}K|\nabla\psi|^2$は組成の空間的変動からの寄与を表す項である．(15)式のような自由エネルギー関数はGinzburg-Landau型の自由エネルギーと呼ばれている．巨視的な自由エネルギーは自由エネルギー密度の系全体での積分として

$$F\{\psi(r)\} = \int_V f[\psi(r)]dr^3 \tag{18}$$

で表される．ここで$\beta H = F\{\psi(r)\}$と置き，Hを粗視化された変数$\psi(r)$のハミルトニアンとよぶ．

さてここで(15)式で示される自由エネルギー密度の組成依存性を図2(a)に示す．$T>T_c$つまり$a>0$のとき自由エネルギーは下に凸で$\psi=0$で最小となる．一方$T<T_c$，つまり$a<0$のとき極小値が2個所現れる．ここで$f(\psi)$の一次導関数をゼロとする，すなわち$\frac{df}{d\psi}=0$となる組成の軌跡を図2(b)に示す．これは共存曲線（coexistence curve）とよばれている．一方$\frac{d^2f}{d\psi^2}=0$の軌跡はスピノーダル曲線（spinodal curve）とよばれている．とくに図2(b)において領域mおよびnをそれぞれ準安定，不安定領域という．なお図中点Aで示した位置に強制固溶された状態の過飽和度は$\zeta = (T_S - T_A)/(T_C - T_A)$のように与えられることがある．

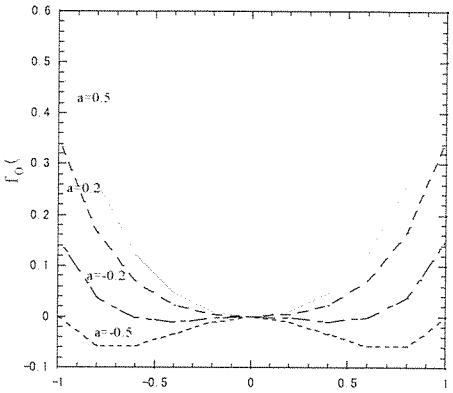


図2 (a)　Ginzburg-Landau型自由エネルギーの組成依存性

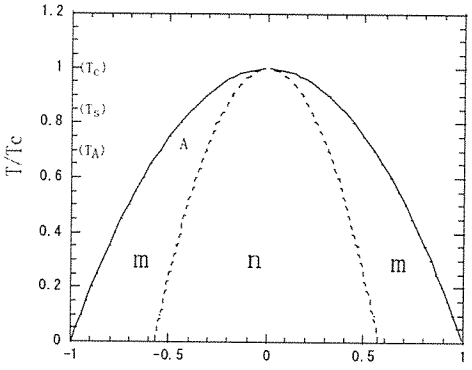


図2 (b)　2相分離曲線

5. 相分解の様式

相分解初期過程で過飽和固溶体がどのような様式でどんな速度で相分解するかは理論的にもまた実際面でも興味がもたれ古くから多くの研究がなされてきている．相分解はある非平衡状態（1相の過飽和状態）からその温度での平衡状態（2相状態）への遷移過程であり，あるポテンシャル場の中での空孔を媒介にした原子の交換により，領域ごとに同種原子が富化する現象と定義することができる．この相分解過程は現象面から2つの様式に分類されてきた．1つは過飽和水蒸気からの液滴の形成

のように，ある潜伏期間を経て新相の核（クラスター）が形成され成長するとする核形成・成長様式である．あるひとつのクラスターに注目したとき，そのクラスターと周囲の原子との間で溶質原子を吸収あるいは放出を繰り返してクラスターは成長する．系には様々なサイズをもつクラスターがガスのように分布するものとし，系全体の自由エネルギーが低下するようにそれらクラスターの数密度の時間変化を記述するのがクラスターモデル（cluster model）である．

図3を用いて相分解中の組成変動をクラスターモデルで考えてみよう．ある時刻(t_1)で臨界サイズ以上の核が発生する．核のところでは溶質組成はψ_pとなりマトリックスとの界面は鋭い．時間が経過するとクラスターは成長し，また新しい位置に核発生が起こる（核発生段階）．やがてクラスターの数は一定となり，各々のクラスターが成長する（成長段階）．結晶中の組成分布をみると，クラスターの組成はψ_p，マトリックスの組成はψ_mに2分される．その頻度つまり組成の確率分布関数$W(\psi(r))$は図3右図のようになる．成長が続くとクラスターの占める割合が増え，マトリックスの組成は減少する．

他方はいかなるエネルギー障壁もなく組成ゆらぎが発展するスピノーダル分解様式である．非平衡な状態では粗視化した組成分布$\{\psi(r)\}$にゆらぎがあり，時間とともに系の自由エネルギー$F\{\psi(r)\}$が低下するように組成分布が変化する．このような構造の時間的変化を記述するのが共同モデル（cooperative model）である．

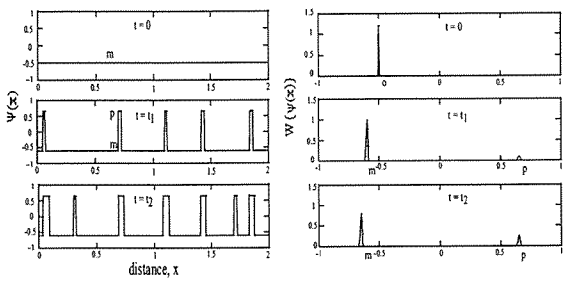


図3 核形成・成長様式による相分解過程を説明する模式図，ここで$\psi_{mo}=-0.5$とした．

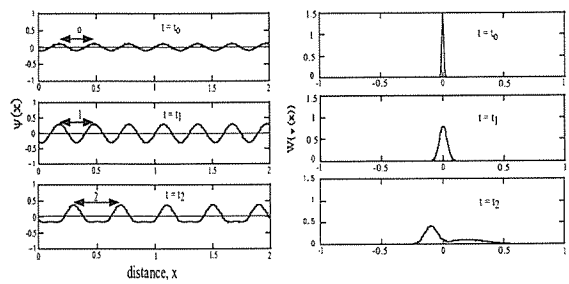


図4 スピノーダル分解様式による相分解過程を説明する模式図．ここで$\psi_o=0$とした．

スピノーダル分解では周期性のある組成変動が現れる．図4のように簡単のため正弦波的な組成変動が発生したとすれば，組成の確率分布$W(\psi(r))$は図4右のようになる．時間が経ち相分解が進行すると組成変動の周期($\lambda_1=\lambda_0$)は変わらないが，その振幅が増加する段階（線形段階），から周期($\lambda_2>\lambda_1$)も振幅も変動する段階（非線形段階）に進展すると考えられる．組成の確率分布$W(\psi(r))$は線形段階では平均組成ψ_0の周りで対称であるが，非線形の段階では非対称になり分布は2分されるようになる．

6. スピノーダル分解

合金の相分解過程では成分AとBの全体の量は一定であるから保存系と呼ばれる．ちなみに規則―不規則変態では規則度パラメータはゼロから1まで変化するので非保存系という．さて相分解がはじまり試料中に図4に示すような組成ゆらぎあるいは組成変調が起こっている状況を考えよう．組成勾配すなわち化学ポテンシャル勾配$\partial\mu/\partial x$があるとその逆向きに物質の流れつまり拡散が起こる．これを3次元的に表せば

$$J=-M\nabla\mu+\theta(r,t) \tag{19}$$

ここでMは移動度であり，さらに微視的なスケールでは熱遥動によるランダムな原子の運動の項$\theta(r,t)$が付け加えられている．ここではMは組成に依存しない定数として扱う．物質の保存則を表す連続の式は次のようになる．

$$\frac{\partial\psi(r)}{\partial t}=-\nabla J \tag{20}$$

ここでランダム項を$\nabla\theta(r,t)=-\eta(r,t)$と表せば，この$\eta$について

$$<\eta(r,t)>=0 \tag{21}$$

$$<\eta(r,t)\eta(r',t')>=-2L\nabla^2\delta(r-r')\delta(t-t') \tag{22}$$

の関係が得られる．従って確率変数$\psi(r,t)$に関するランジバン方程式は次のように表される．

$$\frac{\partial\psi(r,t)}{\partial t}=\nabla\left[M\nabla\mu(r,t)\right]+\eta(r,t) \tag{23}$$

この式から組成の空間分布の変動を計算することが可能である．しかしこのままでは実空間（r-空間）でのある一点の時刻tでの情報が(23)式から得られたとしても，系全体での空間分布の変動を記述することは大変難しく，さらにr-空間での$\eta(r)$に関する解を得ることも困難である．そこで実験と比較が容易な逆空間（k-空間）

でのランジバン方程式に移り考察を進める．その準備としてある場所での組成を

$$\psi(r) = \psi_0 + u(r) \tag{24}$$

のように平均値ψ_0とそのずれ（ゆらぎ）$u(r)$に分ける．任意の2つの位置r_1, r_2でのゆらぎ$u(r_1,t)$, $u(r_2,t)$の相関を次のように与える，

$$\tilde{S}(r,t) = \langle u(r_1,t)u(r_2,t)\rangle \tag{25}$$

ここで$r = r_2 - r_1$であり，<...>は確率密度分布$W\{\psi(r)\}$についての平均を意味する．この$\tilde{S}(r,t)$のフーリエ変換を

$$S(k,t) = \int \tilde{S}(r)e^{ikr}dr \tag{26}$$

で与える．実際にはすこし複雑な手続きがあるが，(25)式の相関のフーリエ変換を実行し，線形項のみをとり整理すると，次式が得られる．

$$\frac{\partial S(k)}{\partial t} = 2R(k)S(k) + 2Mk_BTk^2 \tag{27}$$

この式がランジバン方程式(23)式に対応するk-空間での構造の時間変化を表す運動方程式である．ここで$R(k)$は振幅因子とよばれ，

$$R(k) = -Mk^2\left(Kk^2 + \frac{\partial^2 f}{\partial \psi^2}\right) \tag{28}$$

のようにkの関数として表される．この(27)式はCookにより初めて得られた関係である．なお右辺第二項$2Mk_BTk^2$を無視した関係式はCahnとHilliardの線形方程式と呼ばれる．(28)式でスピノーダル分解が起こるときには$\partial^2 f/\partial \psi^2 < 0$であり，R(k)が最大になるときの波数に対応する波長$\lambda_m = 2\pi/k_m$は次式で与えられる．

$$\lambda_m = 2\pi\left(\frac{1}{2K}\left|\frac{\partial^2 f}{\partial \psi^2}\right|\right)^{-1/2} \tag{29}$$

つまり(27)式の運動方程式の解は次のような性質を示す．λ_mの組成波を中心にしてその組成振幅が指数関数的に増大するような相分解が予測される．しかし実際には中心波長は時間とともに長くなる非線形性を示し，また組成振幅は時間のべき乗に比例し変化する等，上記の理論と矛盾することが明らかにされている．そこで自由エネルギーの3次以上の高次の項を正しく取り入れること，移動度に相応する係数Mが組成に依存する等の非線形性をとりいれることにより理論の改良がなされている．

多数のアンサンブルにわたる組成の空間分布が$\{\psi(r)\}$をとる確率を汎関数$W\{\psi(r)\}$で表したが，この汎関数の計算量は膨大で，実行が不可能であるため，あるひとつのアンサンブルの分布のみに注目して，そのアンサンブル内での確率分布$W(\psi(r))$を考察することにする．図4に示したように相分解により2つの平衡組成へ近づくことを考慮して$W(\psi(r))$をガウス関数の重ね合わせとして次のように表す．

$$W(u(r)) = \frac{b_2}{\sqrt{2}\sigma(b_1+b_2)}\exp\left[-\frac{(u-b_1)^2}{2\sigma^2}\right] + \frac{b_1}{\sqrt{2}\sigma(b_1+b_2)}\exp\left[-\frac{(u-b_2)^2}{2\sigma^2}\right] \tag{30}$$

ここで$\psi(r)$のかわりに(24)式で定義された$u(r)$についての表現とした．

この変数の確率分布$W(u(r))$についてのホッカープランク方程式は

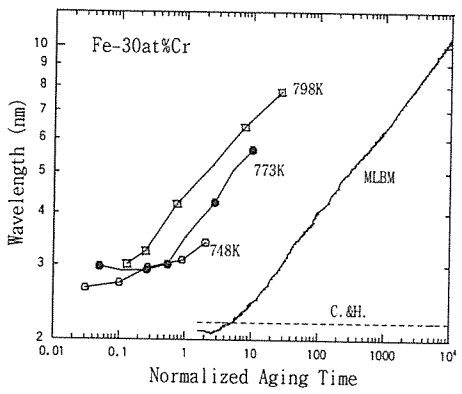


図5　Fe-Cr合金を748～798 Kに等温保持したとき生ずるスピノーダル分解による組成変調の平均波長の変化 [Ujihara et al, 1998]

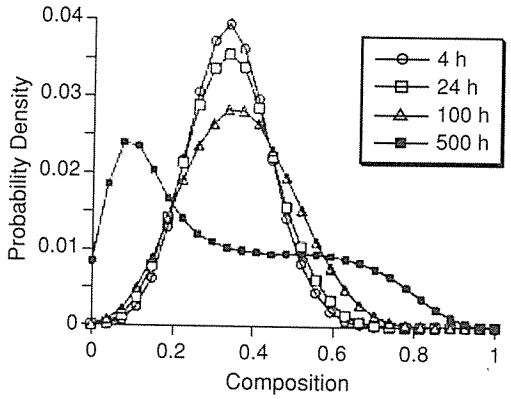


図6　Fe-45at%Cr合金を773Kで等温時効中にAtom-Probe法で検出された組成変調の確率密度W(c) [Hyde et al, 1995] ここで組成cとψの間には(14)式の関係がある．

$$\frac{\partial W(u)}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial u}\left(-\beta M\nabla^2\right)\left[\frac{\partial H}{\partial u}+k_BT\frac{\partial}{\partial u}\right]W(u) \qquad (31)$$

で表されることになる．この式は(10)式と対比させることができる．(31)式を解くことによりu(r)の分布を知ることができる．それより(25)式の相関，ひいては(27)式の運動方程式を解くことができる．このようにしてスピノーダル分解過程での組成変調の時間依存性を理論的に求めることができる．図4右図の確率分布はこのようにして求めた結果の一部である[Ujihara et al 1998].

これまで述べてきた理論の結果はどのように実験的に検証できるかまとめておこう．図5中のC.&H.で示したのはCahnとHilliardの線形理論の結果であって，スピノーダル分解は時間とともに組成揺らぎの振幅が大きくなっても波長は一定であることを示している．これは明らかに現実とは矛盾している．非線形性をとりいれたLBM理論[Langer et al, 1975]，やさらに移動度に組成依存性を取り入れたMLBM理論[Ujihara et al, 1998]では組成揺らぎの波長は図5に示すように時間と共に増加し，実験と定性的に一致している．

図6はFe-Cr合金において実験的に求められた組成の確率密度分布である．時効初期では合金組成を中心に対称的な分布を示すが時間が経つと非対称になり，やがて二つの分布に分離することがわかる．組成分布に非対称性が表れ，図5の組成波の中心波長が長波長に変化することから，この合金系では非線形なスピノーダル分解が起こっていることがわかる．ちなみに上述した非線形理論でもLBM理論ではこの確率密度分布が2つに分離することを説明するのは難しく，やっとMLBM理論に至って有効な時間範囲で分布が2つに分離することが理論的に説明できるようになった．

7. 核形成・成長

母相中に組成の異なる小さな領域が生じたときそれを一つの微小クラスターとみなす．これらクラスターの発生と成長を考えるためには，クラスターの数密度，サイズ分布，組成の変動，形などのいくつかの特徴を指定しなければならない．今半径Rの1個の球状クラスターの自由エネルギーを次のように表すことにする．

$$\Delta f(R)=\frac{4}{3}\pi R^3\Delta f_d+4\pi R^2\sigma \qquad (32)$$

ここでΔf_dはクラスター形成による自由エネルギー変化，σは界面自由エネルギーである．図7にクラスター半径と(32)式の自由エネルギー関係を示す．半径Rのクラスターの単位体積あたりの数を$n(R)$と書くと，系内にはいろいろな大きさのクラスターが生じているので，その確率分布を$\{n(R)\}$のように示すことにする．

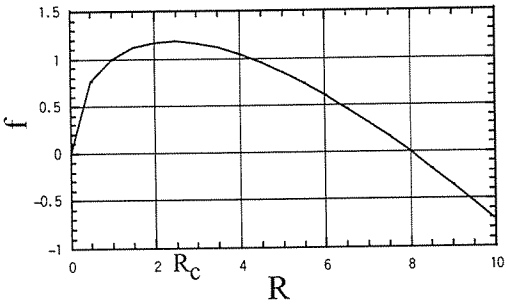


図7 自由エネルギーのクラスター半径依存性

そこで半径Rの球状のクラスターの成長速度は

$$\frac{\partial}{\partial t}R=2L\left(-\frac{1}{R}+\frac{1}{R_c}\right) \qquad (33)$$

に従う．つまり臨界半径R_cに対して，$R>R_c$のドメインは成長し続け，$R<R_c$のドメインは収縮する．この決定論的方程式に，クラスターサイズのゆらぎの影響を考慮して次のランジバン方程式が得られる．

$$\frac{\partial}{\partial t}R=-\frac{1}{k_BT}\chi(R)\frac{\partial}{\partial R}\Delta F+\theta(R,t) \qquad (34)$$

$$\chi(R)=\frac{k_BTL}{4\pi\sigma R^2} \qquad (35)$$

半径Rのクラスターにはm個の原子が含まれるとする．つまり原子容をv_0とすれば$m=\frac{4}{3}\pi R^3/v_o$の関係がある．クラスター成長の最も基本的な機構はm個の原子からなるクラスターに1個の原子が吸収されm+1のクラスターに成長する，あるいは1個の原子を放出してm–1のクラスターに収縮する．つまり

$$\cdots\leftrightharpoons(m-1)\rightleftharpoons m\rightleftharpoons(m+1)\rightleftharpoons\cdots \qquad (36)$$

のように1個の原子の吸収・放出によるやりとりでクラスター分布の時間変化を記述されることである．この考え方は蒸発・凝縮（Evaporation and Condensation）モデルと呼ばれる．しかしクラスターの数密度が非常に高いときには成長過程でクラスター同士が互いに衝突（接触）し，合体する過程が顕著になる．このような成長の考え方は拡散・合体(Cluster Diffusion and Coagulation)モデルとよばれる[Binder and Stauffer].

さてここでは蒸発・凝集モデルに基づき考察をすすめる．このときクラスター分布$\{n(R)\}$に関するホッカープランク方程式は

$$\frac{\partial n(R,t)}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial R}\left\{\chi(R)n_o(R)\frac{\partial}{\partial R}\left[\frac{n(R,t)}{n_o(R)}\right]\right\} \qquad (37)$$

で表される．ここで$n_0(R)$は過飽和固溶体中のクラスターの定常分布で

$$n_o(R) = n_1 \exp\left(-\frac{\Delta f(R)}{k_B T}\right) \quad (38)$$

で与えられる．ここで(38)式のクラスター分布を定性的に図8に示す．つまり(36)式の原子の吸収・放出の遷移確率について $\chi_{i-1\to i} = \chi_{i\to i-1} = \chi_{i\to i+1} = \chi_{i+1\to i} = \chi^*$ のようにすべて等しいとすると $R<R_c$ の範囲ではクラスターの数密度に関して $\frac{dn(R)}{dR} < 0$ の勾配をもつことからクラスターが成長する方向に駆動力が働く．臨界半径の付近でクラスターの成長が定常状態で起こるものとすると(37)式で $\frac{dn(R,t)}{dt} = 0$ としてよいから右辺の{....}内は一定となる．つまり

$$-\chi^* n_o(R)\frac{\partial}{\partial R}\left[\frac{n(R,t)}{n_o(R)}\right]$$
$$= -\chi^*\left[\frac{\partial n(R,t)}{\partial R} + \frac{n(R,t)}{k_B T}\frac{\partial \Delta f(R)}{\partial R}\right] = const \equiv J \quad (39)$$

ここで χ^* は単位時間にサイズ R のクラスターが原子1個を吸収あるいは放出する確率である．核形成速度はクラスター分布の勾配 $-\partial n(R,t)/\partial R$ に比例する拡散項と，力 $-\partial \Delta f(R)/\partial R$ に比例するドリフト項の和によって与えられることがわかる．ここで注意すべきことはたとえドリフト項が正であっても拡散項が充分に大きければ核形成は継続することである．定常的にクラスターが成長するときには核形成流は R にかかわらず一定となり，これを J_s とすれば，

$$J_s = Z\chi^* n_1 \exp[-\Delta f(R_c)/k_B T] \quad (40)$$

となる．ここでZはZeldovichのパラメータとよばれるもので，

$$Z = \left[\frac{-1}{2\pi k_B T}\frac{\partial^2 \Delta f(R_c)}{\partial R^2}\right]^{1/2} \quad (41)$$

で示される．

以上が溶質原子の蒸発・凝集を素過程として定常核形成流が起こる場合の理論的な考え方である．しかし非常にクラスターの数密度が高い場合には拡散・合体モデルがあてはまる．その理論的な扱いは(37)式のホッカープランク方程式にもどり，mのクラスターとm'のクラスターが合体しm+m'のクラスターになる場合の方程式を求めることから始まる[長村1986]．

核形成・成長の例としてAl-Zn合金をとりあげよう．比較的希薄なAl-Zn合金では溶体化処理温度から急冷して得た過飽和固溶体からマトリックスに整合なZnに富化したG.P.ゾーンと呼ばれる準安定なクラスターが析出する．Al-4.0at%ZnとAl-6.8at%Zn合金における析出の極初期における準安定相の平均クラスター径(R_g)と全クラスター数(N_t)の時間変化を図9に示す．これらの値はX線小角散乱法によって調べたものである．極初期のクラスター半径は0.3nmでありAlの単位格子のほぼ1個分に相当する．時効後期ではクラスター半径は約1nmになるが，これはAlの単位胞125個分に相当する．一方全クラスター数は溶質組成の高い合金ほど高く，時効が進むと急速に減少する．上記の理論では臨界核の数は一定となる定常核形成について考えたが，実験では粒子数は最初からむしろ一方的に減少する．図9でみるように時効極初期ではクラスターの数密度が高く，クラスター直径の3～4倍の距離に次のクラスターを見出すように，クラスターが互いに接近している時には拡散・合体モデルに近い成長が起こると考えるのが妥当である[長村1986]．

核形成・成長様式による相分解過程では核形成，成長，粗大化過程，停滞の4つのステージ分けることができる．核形成・成長が充分進行すると新相（析出相）の体積分率は飽和し一定となる．体積分率 V_f は析出相の形状を半径 R の球と仮定すれば，その数密度を N として

$$V_f = \int \frac{4}{3}\pi R^3 n(R)dR \cong \frac{4}{3}\pi R_g^3 N_t \quad (42)$$

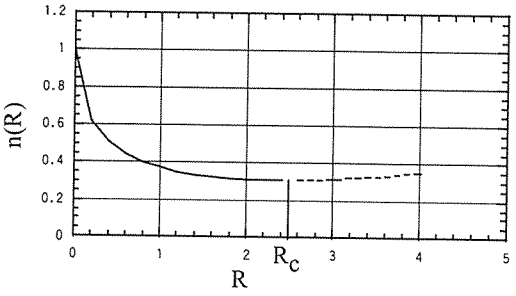


図8　定常状態におけるクラスターの数密度の半径依存性

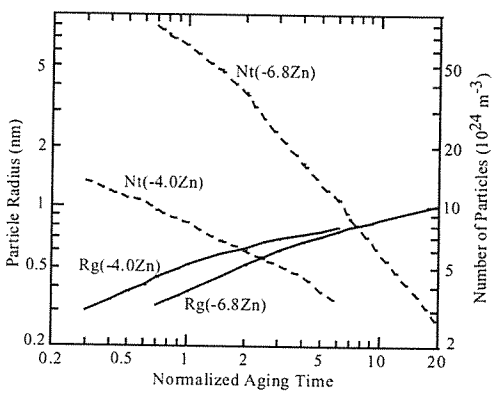


図9　Al-Zn合金を274Kで等温時効したときの，準安定相の平均粒子半径(R_g)と粒子数(N_t)の時間変化．ここで時効時間は拡散係数で割り，規格化してある[Osamura et al, 1988]．

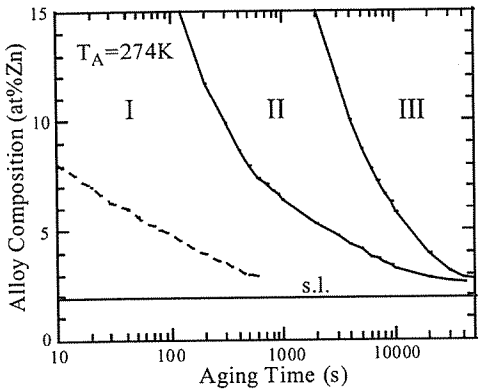


図10 Al-Zn合金を274Kで等温時効したときの相分解過程の時間依存性．ここでIは核形成・成長，IIは粗大化，IIIは停滞過程を示す．点線は相分解が10%進行したときの時間を示す．

で表される．体積分率一定のときクラスターの全表面積は$S=3V_f/R_g$となるので，平均半径が大きくなると，全表面積は減少し系の自由エネルギーが低下する．このように体積分率一定のもとで平均半径が増加する過程を粗大化過程とよぶ．この過程ではクラスター半径は時間の1/3乗に比例して増加することが実験的にも，Lifshitz-Slyyozov[1961], Wagner，最近ではTokuyama等[1987]の理論によっても示されている．さらに時間が経過すると相分解速度は非常に遅くなり実験事実上変化は停止したようにみえる．この過程は停滞（slowing down）と呼ばれるが，本当に反応は停止したといえるか理論的にはまだ明らかにされていない．

さてこのような核形成・成長（I），粗大化（II），停滞（III）の各過程がどのように現れるかの例が図10に示されている．図中の点線は析出相の体積分率が10%になるときの時間を示す．相分解の速度は合金組成，つまり過飽和度によって著しく変化するのがわかる．過飽和度がゼロになる固溶限(s.l.)の近くでは核形成・成長が非常にゆっくりと進行する．10at%Zn以上の高組成合金では数秒以内に核形成が起こってしまうことがわかる．

8. まとめ

これでひととおりの合金の相分解の動力学の流れのめぼしがついたことになるが，まだ現実の現象を記述するにはほど遠い．合金では数密度と合金組成という二つの秩序パラメータが内在しているから，それを顕にした定式化が必要である．また規則相の析出，歪エネルギーや磁性の影響等々を組み入れたフォッカー・プランク方程式の定式化の方法論についても，まだ多くの研究が必要とされる．ナノテクノロジーということがもてはやされている今日この頃であるが，ひとつだけ言えば，有限温度，つまり熱を含む系の安定性の本質には，統計的な分布が付きまとうことをその考察の前提として考えなければならない事であろう．

実はこの拙稿の大部分は挫折してしまった教科書の一部として用意したもので，その準備として3回生あるいは大学院の授業で使ったものを，まとめ直したものである．金属学の分野では時効析出現象は組織制御の一大技術であり，古くから実験的にも理論的にも多くの研究がなされてきた．一方統計物理の分野から非平衡の統計熱力学の好例として研究対象にされてからは，理論的な側面が充実されてきた．しかし現状においても定性的には何となく分かっても，組織制御の技術として定量的に相分解現象を扱うためにはまだまだ多くの研究が必要と考えられる．

参考文献

[Lifshitz-Slyyozov, 1961] I.M.Lifshitz and V.V.Slyozov, J.Phys.Chem.Solids, 19(1961), 35.
[長村1986] 長村光造，軽金属, 36(1986), 582.
[Tokuyama et al, 1987] M.Tokuyama et al, Physica, A143(1987), 183.
[Osamura et al, 1988] K. Osamura et al, Metall. Trans. A, 19(1988), 1973.
[Hyde et al, 1995] J.M.Hyde et al; Acta metall. mater., 43(1995), 3403.
[Ujihara et al, 1998] T.Ujihara and K.Osamura; Phys. Rev., B58(1998), 11371.
[Langer et al, 1975] J.S.Langer, M.Bar-on and H.D.Miller, Phys. Rev. A11, 1417(1975).

大会記念講演

自動車と特殊鋼

森　田　章　義*

Automotive Industry and Specialty Steel

by Akiyoshi MORITA

1. はじめに

近年，日本の自動車産業の海外展開拡大と共に，日本の高品質な特殊鋼の価値が再評価されて国内の需給が逼迫し，中長期的にも供給不足が懸念される状況にある．本報告では，まず，産業革命以降の自動車と鉄づくりの発展の歴史を主に技術の進化の視点から振り返るとともに，日本の自動車産業の発展と特殊鋼との関わり，および今後の展望について，トヨタ自動車の成長の歴史などいくつかの事例を交えて報告する．

2. 21世紀の難問

世界人口は，これまで，比較的緩やかなカーブで増加を続けてきており，現在では約64億人が地球上で生活している．しかし，専門機関の推計によれば，今後は，発展途上地域を中心に爆発的に人口が増加し，2050年頃には90億人を越える状況となることが予測されている．(図1)

こうなると当然，地球規模でいくつかの難問を抱えることになる．ひとつは，既に20世紀における経済活動の負の遺産として大きな問題となっている地球環境破壊の加速である．そして2つ目は，石油に代表される化石燃料など，地球資源の枯渇である．さらにもうひとつは，人口爆発と環境破壊がもたらす食糧不足と考えられる．1972年，ローマクラブの委嘱による研究チームがまとめたレポート「成長の限界」の中では，人口と工業化投資がこのまま幾何級数的に成長を続けると，先ほど述べたような難問にぶち当たり，100年以内に成長は限界に達するという結論を出している．

しかし，我々人類が，叡智を集めて難問解決への行動を起こせば，長期に渡って持続可能な生態的，経済的安定を確立することは可能であるとしている．

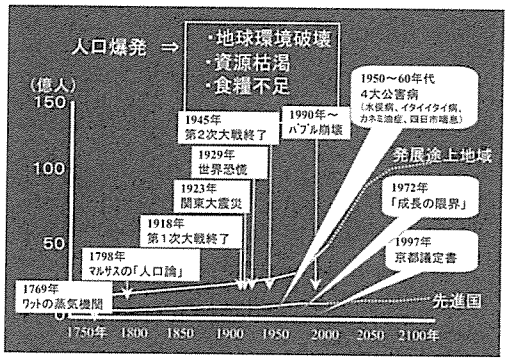


図1　1750年から2100年までの世界人口の推移

人類は，これまでも2度の世界大戦，公害問題など大きな危機的局面に遭遇しながらも，その過ちに気付き，難題を克服しながら成長を続けてきた．ただ悔やむべきは，甚大な犠牲を払ったあとでの行動であったことである．我々は，今後予測される21世紀の難問に対しては，大きな犠牲を払う前に行動を起こし，次世代に負の遺産を残さないよう，持続的成長に向けた課題に取組んでいかねばならない．

2. 20世紀は自動車の時代

20世紀は，先進諸国を中心とした自動車産業および，その裾野を支える関連産業が世界経済を牽引した時代といえる．図2は，世界人口と自動車生産台数の推移を示したものであるが，自動車産業の流れは，欧州に始まり，米国，そして日本へと発展の波が移ってきた．

自動車技術の幕開けは，1876年，オットーの4サイクルエンジンの発明に始まり，欧州におけるベンツ，ダイ

*愛知製鋼㈱　取締役社長

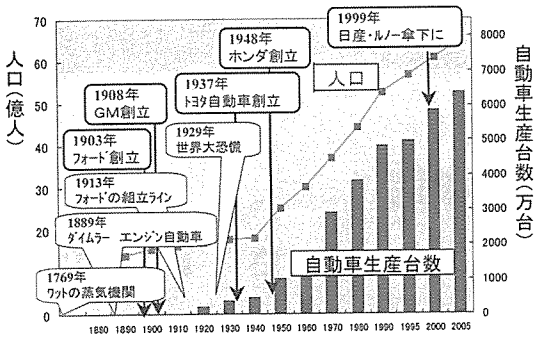


図2　世界の人口と自動車生産台数

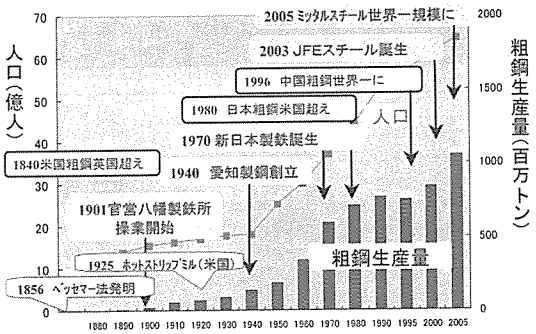


図4　世界の人口と粗鋼生産量

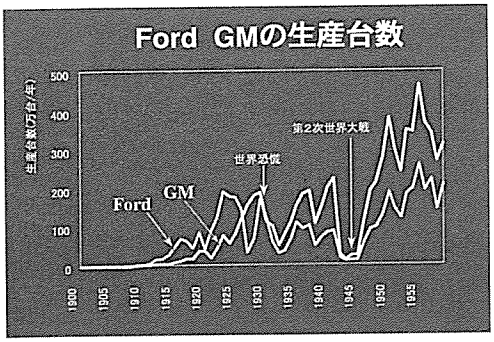


図3　Ford & GMの生産台数

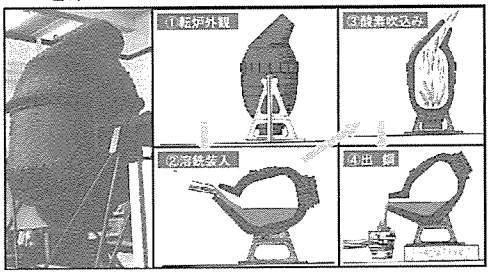
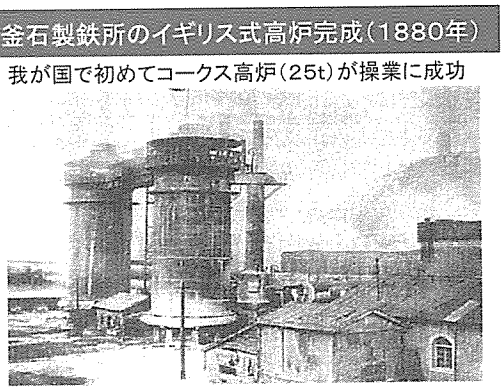


図5　ベッセマー法



「鉄鋼100年のあゆみ」（日本鉄鋼連盟）より

図6　釜石製鉄所のイギリス式高炉風景

ムラーによって現在のエンジン式自動車の基礎が築かれた．その後，自動車の発展の部隊は米国へと移り，GM，Fordの躍進によって大量生産，大量消費の時代を迎えることになる．（図3）

そして，第2次大戦以降は，日本の高度成長と共に，マイカーブームが到来し米国にせまる勢いで日本の自動車生産が拡大していった．

今後は，中国をはじめ，BRICs諸国が次の大きな自動車市場として注目されており，各国の有力メーカーが競って現地生産拠点を拡大しつつある．

3．自動車を進化させた鉄

自動車の発展に，鉄鋼製品が大いに貢献してきたことは言うまでもない．

軽量化が進んだ最近の自動車でも，ボディや，エンジン・足回り部品などには，普通乗用車クラスの場合，重量比で約73％程度の鉄が使われている．2000年の日本自動車工業会による調査結果では，普通鋼54.8％，特殊鋼16.7％，銑鉄1.5％といった構成割合となっている．

図4に世界の人口と粗鋼生産量の推移を示す．高品質な鉄鋼の大量生産の先駆的役割を果たしたのは，1856年にベッセマーが発明した転炉製鋼法（図5）である．これにより高炉による高品質鋼の大量生産が可能になったのである．日本における近代製鋼法の幕開けは，明治初頭になってからである．1880年に釜石に初めて洋式高炉（図6）が完成し，1901年には銑鋼一貫の官営八幡製鐵所が操業を開始した．その後，産業の米と呼ばれる鉄は，着実に量を伸ばし，現在の世界粗鋼生産量は2005年で11.3億トンに達している．この間，日本では，1970年の富士，八幡製鐵合併による新日鐵の誕生，2003年の川崎

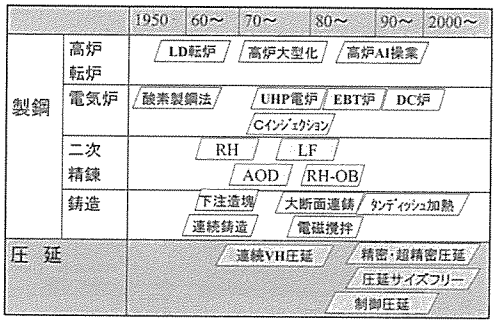


図7　自動車用特殊鋼製造の技術の進化

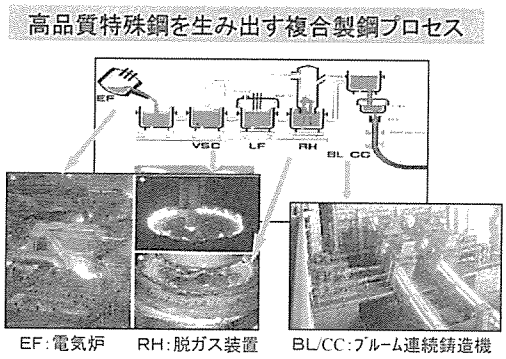


図8　複合製鋼プロセス（愛知製鋼）

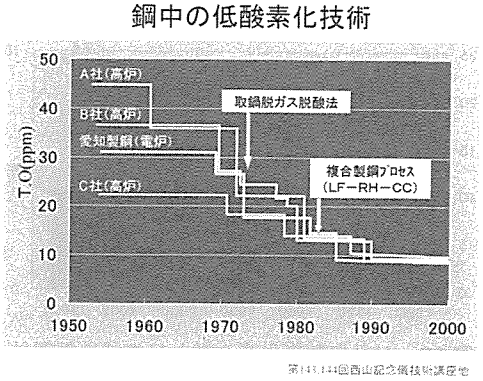


図9　酸素の精錬限界の進展

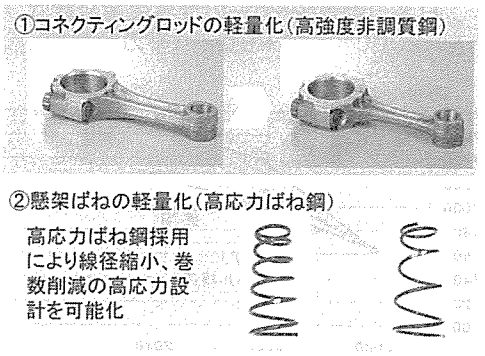


図10　自動車部品の軽量化貢献事例

製鐵と日本鋼管合併によるJFEスチール誕生など，国内での大規模業界再編が進んだ．また，直近では，ミタルスチールによるアルセロール買収により，日本の年間粗鋼生産量に相当する1億トン規模の巨大メーカーが誕生するなど，世界的な合従連衡が進展してきている．世界一の技術競争力を誇る日本の鉄鋼メーカーも，例外ではなく，敵対的買収には十分な備えをしなくてはならない．

自動車に使われる鉄鋼材料のうち，特にエンジンや足回り部品など，自動車の「走る・曲がる・止まる」といった基本性能を支えているのが特殊鋼である．

自動車メーカーの高度で多様な要求に応えるため，特殊鋼の製造技術は著しい進歩を遂げ（図7），世界No.1の技術競争力を確立してきた．図8は，愛知製鋼がいち早く導入した複合製鋼プロセスである．

特殊鋼製造技術の高度化の例として，図9に鋼中の低酸素化技術の進歩の様を示す．長年の技術革新を経て現在では，日本のどのメーカーもほとんど同レベルの低酸素化を実現できている．

また，最近では，燃費改善を目的とした自動車部品の軽量化にも，様々な形で特殊鋼は貢献してきている．図10に，高強度非調質鋼によるコネクティングロッドの軽量化と高応力ばね鋼の適用例を示す．自動車には非常に多くの特殊鋼鍛造部品が使われているが（図11），どの部品に不具合が出ても基本性能を確保できないため，厳しい品質保証システムが要求される．特殊鋼メーカーでは，これに対応するため，たゆまぬ技術革新を進め信頼性を高めてきた．

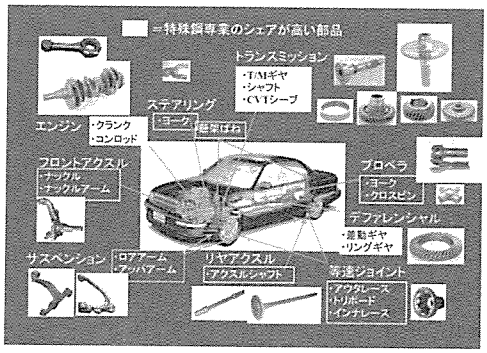


図11　自動車に使われる特殊鋼鍛造部品

図12は，日系自動車メーカーの自動車生産台数と特

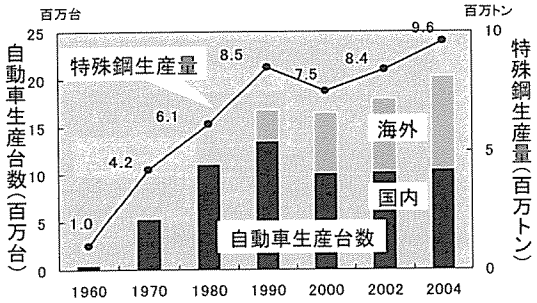


図12 日系自動車生産台数と日本特殊鋼鋼材（棒線）生産量

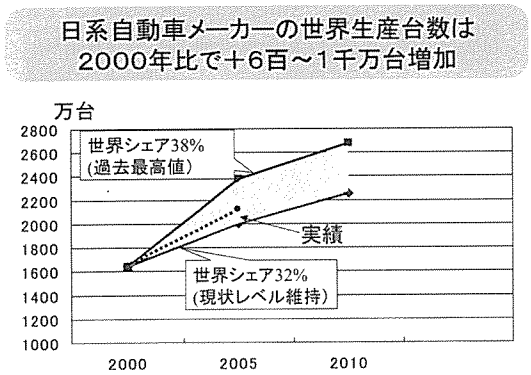


図13 日系自動車メーカーの世界生産予想（当社推定）

殊鋼生産量の関係を示したものであるが，2000年以降，自動車の国内生産が落ち込み，海外生産が増えたにもかかわらず，特殊鋼の生産は，トータルの自動車生産台数の伸びに応じて増加傾向にあることがわかる．これは，海外生産される自動車にも，日本の特殊鋼が使われていることを意味する．逆を言えば，日本の特殊鋼のような高品質の鋼材は，現在のところ海外の現地調達は極めて困難ということである．

世界の自動車市場は，2010年には7千万台を越えるといわれており，高性能で燃費のよい日本車は，確実にシェアを伸ばすであろう．（図13）そして，その部品として使われる日本の特殊鋼は，当社試算では，更に60～170万t規模（2003年比2010年）の需要増が見込まれると推測される．現在，日本の鉄鋼メーカーでは，これらの需要に対応するため，ボトルネック工程の増強等で能力拡大を図るとともに，高級特殊鋼の製造技術向上に一層の力を入れている．

4. トヨタ自動車の成長の歴史

筆者は，1967年にトヨタ自動車工業（株）に入社し，

◆トヨタ自動車の成長（1950～73）

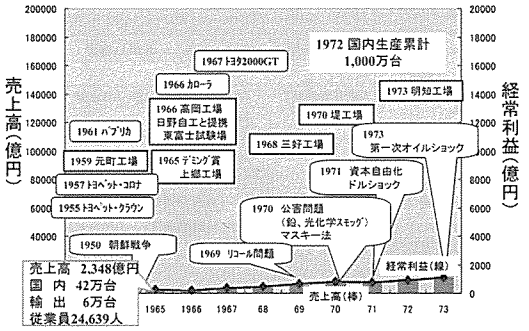


図14 売上高と経常利益（単独）1950-73

◆トヨタ自動車の成長（1978～85）

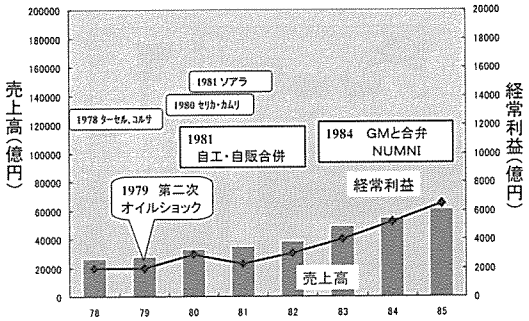


図15 売上高と経常利益（単独）1978-85

◆トヨタ自動車の成長（1985～94）

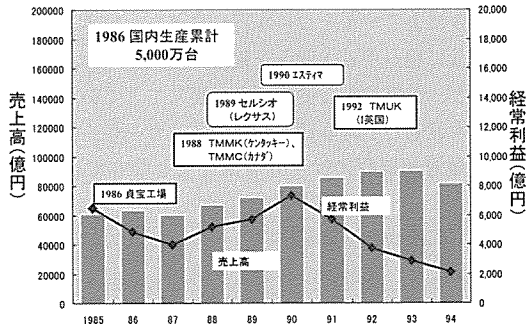


図16 売上高と経常利益（単独）1985-94

2000年6月，現在の愛知製鋼へ移るまで，主として研究開発，生技開発部門を歴任し，トヨタの成長とともに歩んできた．世界をリードするまでに発展してきたトヨタの歴史を振り返ってみたい．

図14に示すように，国内生産台数累計1000万台を達成した1972年までは，リコール問題，公害問題，オイルショックなど，幾多の試練があったが，トヨタは，そ

◆トヨタ自動車の成長（1995～2000）

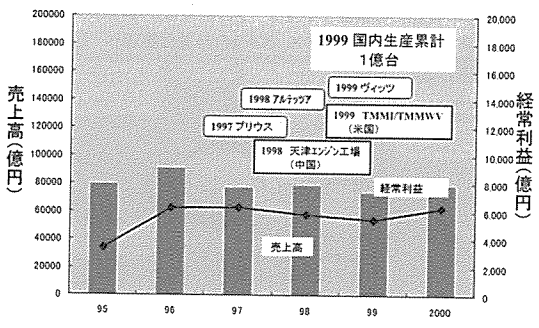


図17　売上高と経常利益（単独）1995-2000

◆トヨタ自動車の成長（2000～2005）

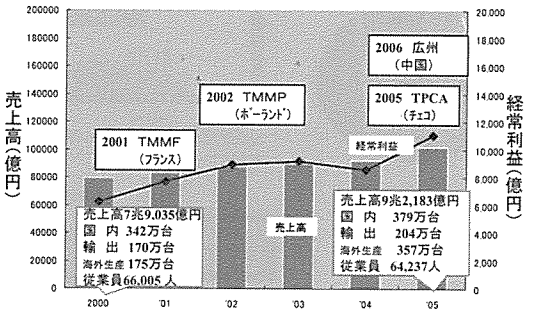


図18　売上高と経常利益（単独）2000-2005

のような危機に直面するたびに，たゆまぬ技術革新を行い，乗り越えてきた．1980年代にはいってからは，1981年の自工・自販の合併による製販一体化をはかり，1984年には，初の海外生産拠点となるNUMNIをGMと合弁で立ち上げた．(図15)

バブル崩壊後しばらく利益が低迷したが，1997年の初のハイブリッド車プリウスや，1999年のヴィッツなど，時代にマッチした新車投入により再び成長の道を歩み始めた．2000年代にはいってからは，海外展開を加速し，米国に加えて，欧州，中国などの市場拡大に向け，積極的な拠点づくりを展開してきた．

国内生産でみると累計1000万台までが35年，累計5000万台までが14年，1億台までが13年と加速的な成長である．(図16，図17，図18)

5．自動車と地球環境

21世紀の難問のひとつである地球環境破壊に対し，特に地球温暖化防止の点で，自動車産業はCO_2削減という大きな技術課題を抱えていることは周知の通りである．「走る・曲がる・止まる」という車の基本性能の向上はもちろん，環境対応と魅力ある商品提供という課題

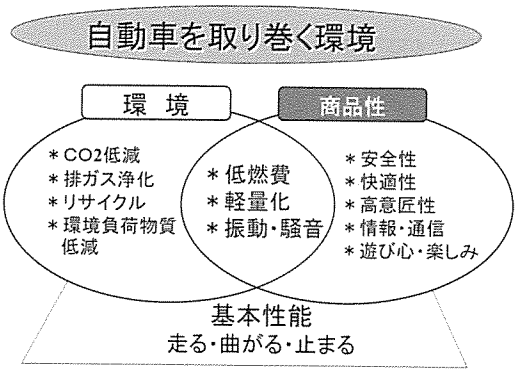


図19　自動車を取巻く環境と課題

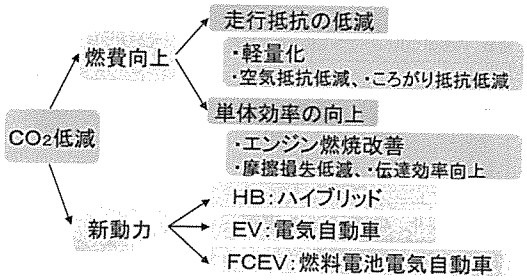


図20　自動車のCO_2低減化技術

を解決していくことが今後の成長の大きなカギであることはまちがいない．(図19)

自動車走行時のCO_2低減化技術は，図20に示すように，大きく分けて燃費向上と新動力化に分類される．

特に燃費向上は，最近の原油高騰を背景に，購入者の重要な評価ポイントとなっており，軽量化や，高能率エンジンの開発に相当の経営資源を投入し取組んでいる．日本車が世界市場で高い評価を受けている大きな理由のひとつがこの燃費優位性である．

一方，新動力化については，燃料電池車や水素自動車などのクリーンエネルギー車の開発も相当の勢いで進んではいるが，クリアすべき課題が多く，一般大衆に普及していくには，まだ相当の時間がかかると推測される．少なくとも2015年頃までは，効率の良いハイブリッド車が主流になるであろう．

6．将来の成長を担うオンリーワン商品

愛知製鋼は，創業者豊田喜一郎の「良きクルマは，良きハガネから」という高い志のもと，1940年にトヨタ自動車から分離独立して誕生した特殊鋼会社である．これまで，自動車用の特殊鋼・鍛造品製造を主力として，自動車産業の発展とともに成長してきた．「新素材が限り

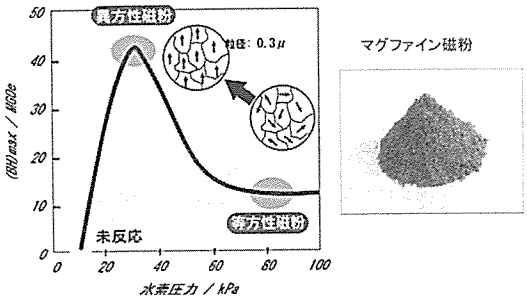


図21　ネオジム系異方性ボンド磁石マグファイン

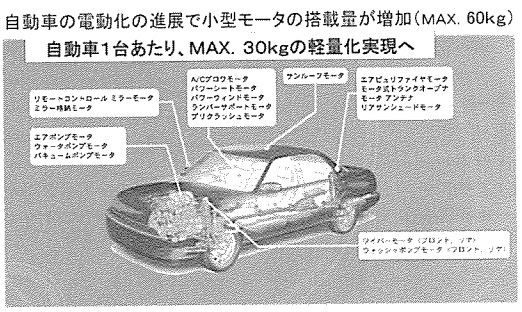


図23　自動車用小型モータの軽量化への貢献

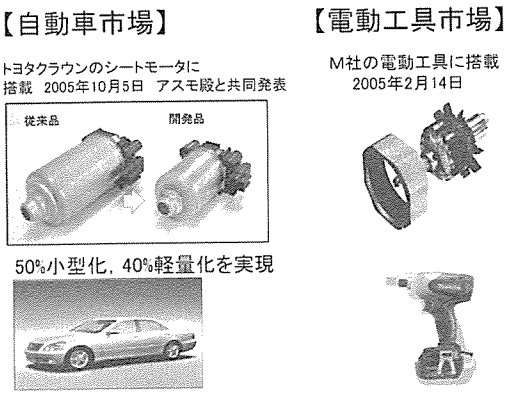


図22　マグファインの市場拡大

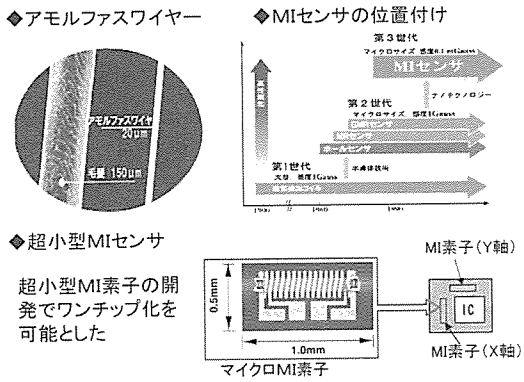


図24　アモルファスワイヤとMIセンサ

ない未来を切り拓く」という信念のもとに，これまでの素材に関わる研究開発活動から，新たなオンリーワン商品を生み出し，現在，鋼材・鍛造品事業に次ぐ新たな経営の柱に育成するため，事業化を進めている．以下に現在取組んでいる３つのオンリーワン商品について紹介する．

6.1　磁石（マグファイン）

マグファインとは，世界最高の磁気特性（磁力25MGOe，耐熱150℃）を誇るネオジム系異方性ボンド磁石（図21）の商品名である．当社は，この異方性ボンド磁石の磁粉をつくる画期的な製造プロセスを開発し，事業化を進めている．すぐれた磁気特性を応用してモーターの大幅な軽量化が可能となるため，自動車や，電動工具，家電など，広く用途開発を進めてきている．（図22）

自動車市場では，既に，トヨタクラウンのシートモーターに搭載されるなど，今後，自動車分野における小型モーターの軽量化に革命的変化をもたらすものと期待している商品である．（図23）

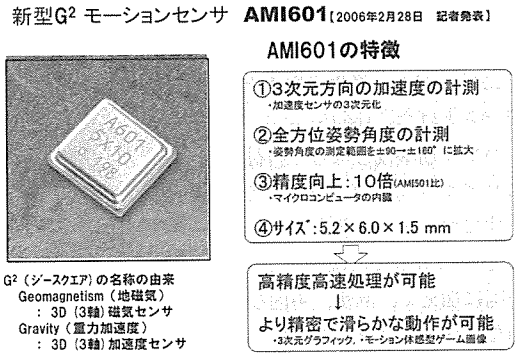


図25　G2モーションセンサAMI601の特徴

6.2　MIセンサ（Magneto Impedance Sensor）

MIセンサは，ナノテクノロジーにより実現した特殊な電子スピン配列のアモルファスワイヤに，パルス電流を流すことによって超微小磁界を検知する超小型・高感度の第３世代の磁気センサである．（図24）

当社では，いち早く，この原理を応用した商品開発に取組み，マイクロチップの製造に成功した．現在，携帯

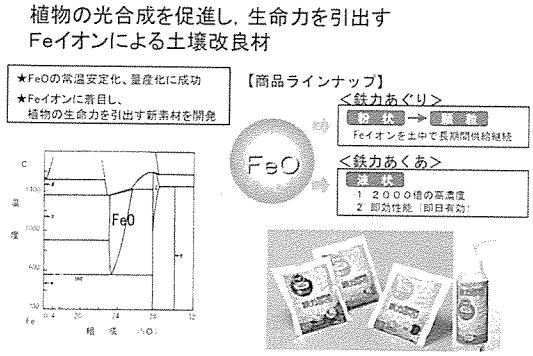


図26　鉄力あぐりとは

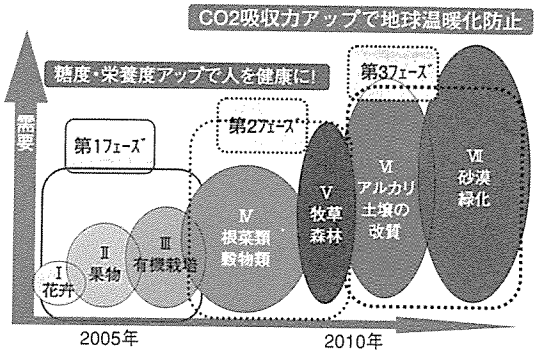


図27　鉄力あぐりの将来展望

電話用センサとして，マイクロコンピュータを内蔵した超小型のモーションセンサAMI 501，AMI 601を開発し，高精度高速処理が要求されるゲームや，ナビゲーション機能を搭載した機種に展開されている．(図25) 今後，携帯電話での世界標準化で市場拡大をはかると共に，自動車分野への用途開拓も進めて行く予定である．

6.3　鉄力あぐり

「鉄力あぐり」とは，土壌に2価の鉄イオンを供給し，植物の光合成を促進する土壌活性材として当社が開発した商品である．(図26)

2価の鉄イオンは，FeOが水に溶けることにより供給が可能となるが，FeOは高温下では安定的に存在するものの，常温になるとすぐに酸化して水に溶けくいFe_2O_3になるという大きな問題があった．当社では，この常識を打ち破りFeOを常温で安定化させる独自製法を開発し，商品化することに成功した．

現在は，農作物や家庭菜園など，栄養度アップによる健康増進をねらいに関係業界への展開を図っているが，将来は，植物の光合成によるCO_2吸収作用を利用した地球温暖化防止や，地球規模で進んでいる土壌劣化（アルカリ土壌，砂漠化）の再生による食糧増産も視野に入れ展開をはかる予定である．(図27)

7. おわりに

20世紀は，工業の発達，高エネルギー消費経済の進展によって，地球と生命の持続可能性の観点から，多くの負の遺産を21世紀に引継ぐことになった．冒頭にお話した21世紀の難問解決に向けて，企業活動や提供する商品を通してどのように貢献できるかを常に考えて行動していくことが，我々の重要な使命と考えている．

参考文献

1) 「鉄鋼100年のあゆみ」(日本鉄鋼連盟)．
2) 「自動車年鑑」(日刊自動車新聞社，日本自動車会議所編)．

大会記念講演

循環型社会における「資源開発」の役割

厨　川　道　雄*

Role of Resources Development for Recycle Based Society

by Michio KURIYAGAWA

1. まえがき

1972年にローマクラブは「成長の限界」で，「世界の人口，工業化，汚染，食料生産および資源消費が，今のままの成長率を保つとすれば，来るべき100年以内に地球の成長は限界点に達するだろう」と指摘した．その20年後の1992年，この調査を実施した研究グループが「限界を超えて」を発表した．そのなかで，「1991年に再びデータやコンピュータ・モデル，そして自らの経験を考慮した結果，技術的改良や環境意識の高揚，環境政策の強化などが見られるにもかかわらず，多くの資源や汚染のフローが既に持続可能な限界を超えてしまっていることがわかった.」と述べている．

レスター.ブラウンやマイケル.カーレーらは，直線モデル型経済から循環型モデル型経済への転換，すなわち生産物が「揺りかごから墓場までではなく，揺りかごから揺りかごへ」のライフスタイルが重要であると指摘している．

「成長の限界」で指摘された資源の枯渇に対する懸念に加え，大量生産，大量消費を続けてきたことによる環境の破壊や廃棄物処分場の逼迫に対処するため，我が国は循環型社会を提案した．循環型社会におけるマテリアルフローの概念図を図1.1に示す．地球にある鉱山や森林から原料が採取されて製品になり，やがて地球に廃棄物として戻されるフローのなかで，リサイクルなどによるマテリアルの循環を取り入れたモデルである．

この図で，マテリアルは，地球の有する限りある資源から供給され，さまざまなパスを経て最終的には地球に廃棄物が戻されていることに注目すべきである．リデュース，リユース，リサイクルを積極的に促進することにより，限りある天然資源の投入を削減することは，資源の枯渇や地球環境の観点から重要である．しかし，世界で年間約300億トンの鉱物資源が採取されているというのが現状である．循環型社会において鉱物資源の供給は当面の間避けられないという視点に立ち，現在の鉱物資源をいかに供給していくかの問題に取り組むことが，循環型社会を考えるうえで重要と思われる．

さらに，物質を循環させるためには，エネルギーと水が必要である．エネルギー源として重要な位置を占める化石燃料も枯渇する資源である．さらに，エネルギーはリサイクルができない．以上のことから，天然資源の投入を含めた金属資源のライフサイクル全体に対する検討

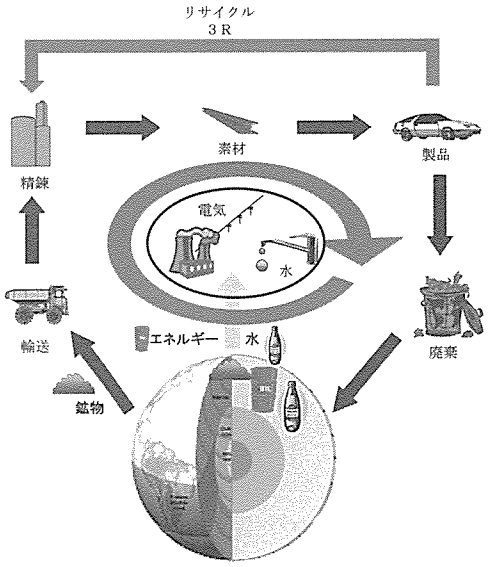


図1.1　マテリアルフローの概念図

*(株)つくば研究支援センター常務取締役
(独)産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門　研究顧問

が必要である．海外から天然資源の輸入に依存している我が国は，天然資源の供給に関して検討すべき課題は非常に多い．現在，経済産業省においても，非鉄金属の安定供給に向けた戦略に関する議論が行われ，安定供給のための問題点の摘出とそれに対する対策が提案されている．

天然資源の供給を検討する場合，鉱物生産国における社会リスク，政治リスク，経済リスク，自然災害，鉱山開発に伴う環境問題，鉱物のコストや需要なども考慮しなければならないが，ここでは，これらの問題には触れず，鉱物資源の資源量と生産量のバランスを中心にまとめた．「成長の限界」の予測と異なり，我々が利用できる鉱物資源はまだ地球上に存在することは確かである．しかし，事態が好転し，枯渇問題が解決されたわけでもない．自然は我々にチャンスを与えてくれたと考え，限りある天然資源をいかに有効に利用し，循環型社会を形成することを真剣に考えなければならない．

なお，埋蔵鉱量や生産量などのデータは，ほとんどすべて米国地質調査所の「Mineral Commodities Summaries」から引用した．米国地質調査所は，鉱物の埋蔵量や生産量に関して，次のように定義している．

埋蔵鉱量：精査あるいは概査によって確認され，かつ経済的に採取可能な資源量（金属元素の量）

埋蔵鉱石量：精査あるいは概査によって確認され，かつ経済的に採取可能な資源量（金属元素を含む鉱石の量）

埋蔵鉱量ベース：埋蔵鉱量の他，精査あるいは概査によって確認されたが，現在準経済的および一部の経済限界下の資源を含む資源量（金属元素の量）

埋蔵鉱石量ベース：埋蔵鉱量の他，精査あるいは概査によって確認されたが，現在準経済的および一部の経済限界下の資源を含む資源量（金属元素を含む鉱石の量）

鉱物生産量：鉱山から生産される金属元素の量

鉱石生産量：鉱山から生産される金属元素を含む鉱石の量

ここで，鉱石の量は，鉱物によって鉱石に含まれる元素の量が異なることから，それぞれの鉱物について具体的に説明している．

2．鉱物資源の「成長の限界」の予測結果と現状 －全体の傾向－

「成長の限界」では，主要な金属やエネルギーなどの資源が，何年後に枯渇するかという予測をしている．個々の鉱物資源の埋蔵量を年間消費量で割ると，可採年数が求められる．可採年数には2つの考え方，すなわち年当たりの生産量は将来とも変化しないと仮定することによって求められる静態可採年数と生産量は年とともに変化すると仮定することによって求められる動態的可採年数がある．「成長の限界」では，天然資源の消費量は幾何級数的に増加すると仮定し，それぞれの鉱物資源について，成長が大きいケースと小さいケース，さらに平均的なケースの3つに分けて成長率を予測している．それらの値を，表2.1に示す．1972年現在の静態的可採年数および平均成長率を用いた求めた動態的可採年数を図2.1に示す．当然のことながら，動態的可採年数に比べて静態可採年数の方が大きな値となる．「成長の限界」が発表されて35年経過した現在，可採年数が35年以下の鉱物資源はすでに枯渇しているはずである．図2.2に「成長の限界」をもとに求めた2004年現在の静態的可採年数，すなわち1972年に発表された可採年数から34年を引いた値を示す．この図から，金，銀，鉛，亜鉛，水銀，スズが枯渇すると予測されていた．また，動態的可採年数をもとに枯渇する鉱物資源を求めると，これらの鉱物資源に銅とタングステンが加わる．

枯渇するものと予測されていた金，銀，鉛，亜鉛，水銀，スズ，銅，タングステンは，現在本当に枯渇したのだろうか．図2.3に米国地質調査所による2004年の静態的可採年数と図2.2に示した「成長の限界」による現在の静態的可採年数を示す．この図から，鉱種によって違いはあるが，枯渇すると予測された金属を含め，ここにとりあげられた金属で枯渇したものはない．

そこで，ベースメタルやレアメタルなど重要な金属資源について，どの程度の埋蔵量があり，どのくらいの鉱物が生産されているかなどについて，次節で検討する．

表2.1　「成長の限界」による金属資源の予測成長率

	予想成長率(%/年)		
	高	平均	低
金	4.8	4.1	3.4
銀	4.0	2.7	1.5
銅	5.8	4.6	3.4
鉛	2.4	2.0	1.7
亜鉛	3.3	2.9	2.5
スズ	2.3	1.1	0.0
水銀	3.1	2.6	2.2
ニッケル	4.0	3.4	2.8
クロム	3.3	2.6	2.0
タングステン	2.9	2.5	2.1
コバルト	2.0	1.5	1.0
モリブデン	5.0	4.5	4.0
マンガン	3.5	2.9	2.4

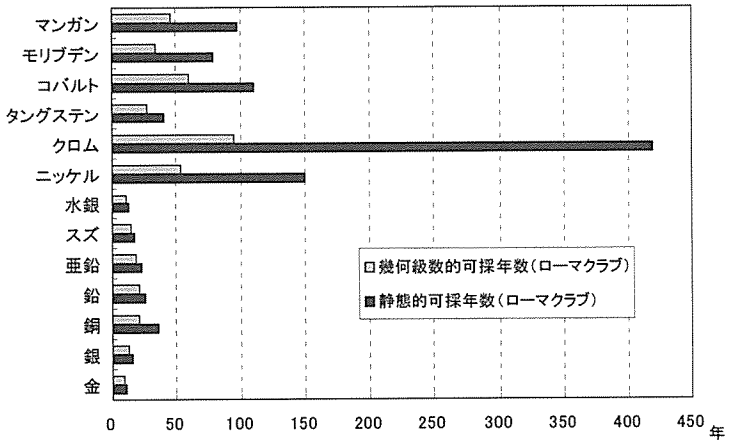


図2.1 「成長の限界」の静態的可採年数と動態的可採年数

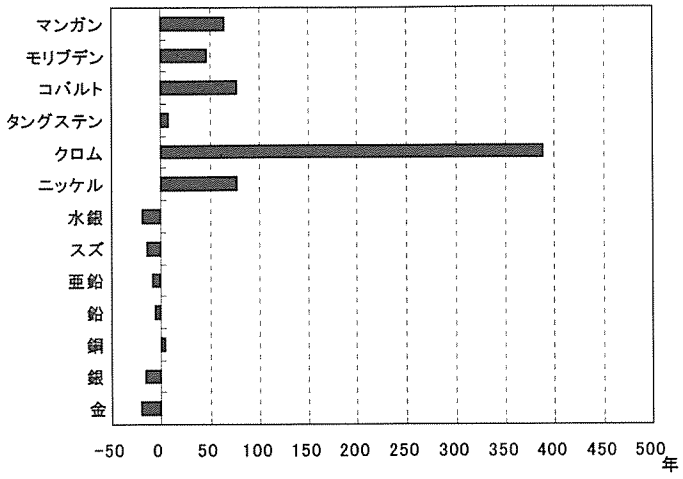


図2.2 「成長の限界」で予測された現在の静態的可採年数

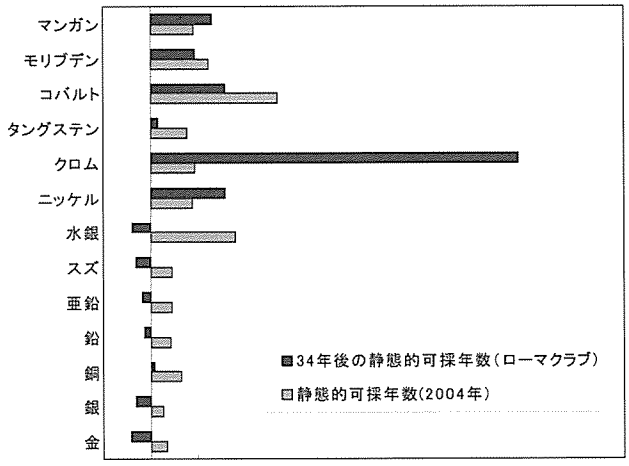


図2.3 2004年現在の静態的可採年数と「成長の限界」による静態的可採年数の予測結果

3. 鉱物資源の「成長の限界」の予測結果と現状 －個々の鉱物資源の傾向－

前節で述べたように，鉱物資源の可採年数は，「成長の限界」の予測と異なる動向を示している．そこで，個々の鉱物資源について，「成長の限界」で示された鉱物資源の成長率に基づく生産量の予測結果と実際の鉱物生産量とを比較してみる．ここでは，表2.1に示す平均予測成長率を用いた．

3.1 「成長の限界」の予測以上の成長をしている金属

「成長の限界」の予測と比較し，予測以上の鉱物生産量を示す金属資源として，クロムとコバルトがある．

クロムは図3.1に示すように常に予測を上回る生産量を示しており，最近の増加は著しい．クロムの鉱物生産量は1970年から2004年にかけて590万トンから1,750万トンへと約3倍増加している．一方，クロムの最大保有国である南アフリカにおいて，2001年および2002年に埋蔵鉱量が大幅に減少した．このようなことから，クロムの静態的可採年数は，1970年において420年であったが，2003年には52年へと大きく減少している．

コバルトの鉱物生産量もおおむね「成長の限界」の予測を超えている．しかし，1995年から2000年にかけては，予測よりも少ない値を示したが，2004年には再び予測を超えている．コバルトの鉱物生産量は，1970年には2.36万トンから2004年には5.24万トンへと増加したが，静態的可採年数は110年から133年に増えている．これは2001年以降，埋蔵鉱量が増加したことによる．

3.2 「成長の限界」の予測とほぼ同じ成長をしている金属

このような傾向を示す金属として，銀とタングステンがあげられる．銀は，1970年から90年までの20年間，ほぼ予測通り推移した．95年には一度減少したが，それ以降増加を続けている（図3.2）．銀の鉱物生産量は1970年には9,360トンであったが，2004年には19,700トンへ増えた．静態的可採年数は，この期間16年から14年へと幾分減少したに過ぎない．

これに比較してタングステンも，銀と同様1970年から90年までの間，予測通り推移したが，95年に生産量はほぼ半減した．その後回復の傾向を示し，2004年にはほぼ予測値に近い生産量を示している．1970年と2004年の鉱物生産量を比較すると，3.36万トンから7.37万トンへと増加したが，可採年数は40年から39年とほとんど変化していない．

3.3 「成長の限界」の予測までは成長していないが，増加の傾向を示す金属

ニッケル，金，モリブデン，銅，亜鉛がこの分類に当てはまる．いずれも，1970年から増加の傾向を示しているが，「成長の限界」での予測値には至っていない．

図3.3にニッケルの例を示す．金，モリブデン，銅，亜鉛についても，増加の割合は異なるが，ニッケルと同

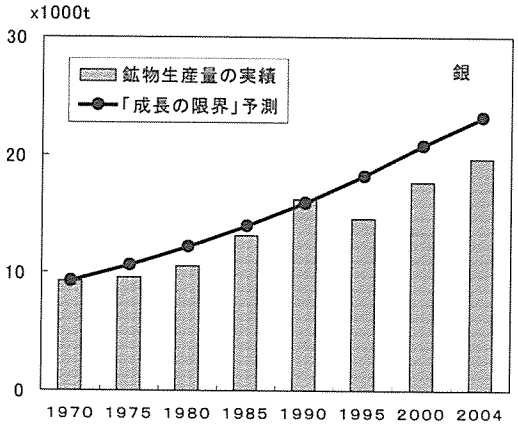


図3.2　銀の「成長の限界」の予測と実際との比較

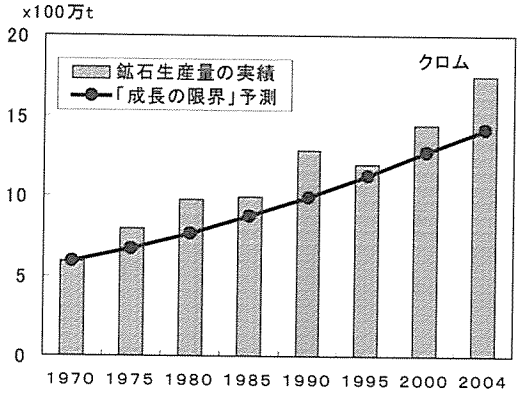


図3.1　クロムの「成長の限界」の予測と実際との比較

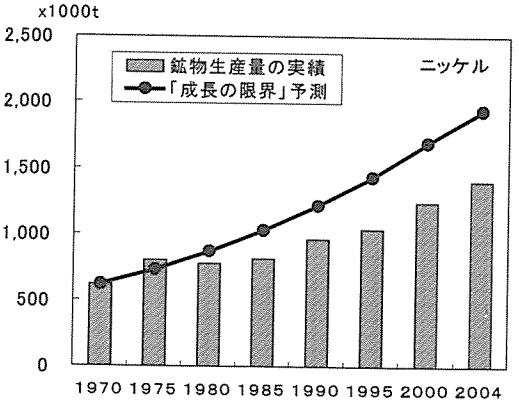


図3.3　ニッケルの「成長の限界」の予測と実際との比較

様，増加する傾向を示している．ニッケルの鉱物生産量と静態的可採年数について，1970年と2004年を比較すると，生産量は62.2万トンから140万トンへと増加し，可採年数は150年から40年へ減少している．金については，生産量は1,470トンから2,430トンへ，可採年数は11年から17年へ増えている．モリブデンの生産量は，7.4万トンから14.1万トンへとほぼ倍増しており，可採年数は79年から61年へ減少している．銅については，生産量が596万トンから1,460万トンへ増加し，可採年数は36年から32年へと幾分減少している．また，亜鉛の生産量は550万トンから960万トンへ増加し，可採年数は23年と変化していない．

3.4 鉱物生産量がほぼ一定している傾向を示す金属

これに分類される金属は，スズとマンガンである．図3.4に示すように，スズの1970年の鉱物生産量は，23.0万トンから2004年の26.4万トンへと34年間で15%増加したに過ぎない．この期間可採年数は，17年から23年へと逆に増加している．マンガンについては，「Mineral Commodity Summaries」に1990年以前のデータの記載がないため，91年以降の傾向を調べた．その結果，鉱石生産量は，1991年において760万トン，2004年には940万トンへと24%の増加に留まっている．また，この期間可採年数は，95年から40年へと減少している．

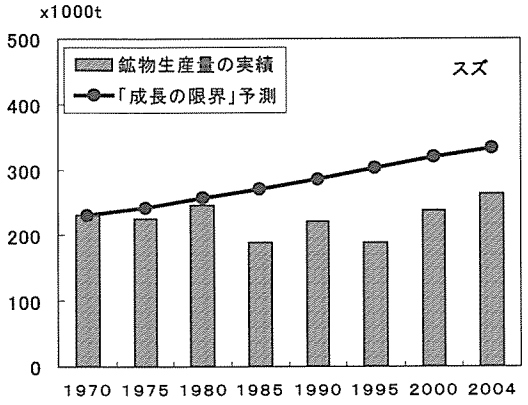


図3.4 スズの「成長の限界」の予測と実際との比較

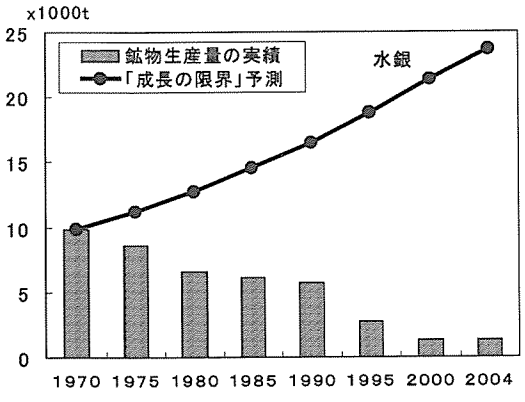


図3.5 水銀の「成長の限界」の予測と実際との比較

3.5 鉱物生産量が減少の傾向を示す金属

この傾向を示す金属として，有毒性が問題となっている水銀と鉛があげられる．図3.5に示すように，特に水銀の生産量の減少は著しく，1970年の9,880トンから2004年には1,340トンとなっている．可採年数は，13年から90年へ大幅に増加している．鉛に関しては，減少の傾向を示すものの，1970年の340万トンから2004年には302万トンと，減少の割合は小さい．また，可採年数は26年から21年へ幾分減少している．

4. レアメタルの動向

「成長の限界」では取り上げられていないが経済産業省が今後注視すべきレアメタルとしてリストアップしているバナジウム，白金族，ニオブ，アンチモン，ジルコニウム，ストロンチウム，タンタル，インジウム，レアアースについて，最近10年間の動向を調べた．

4.1 可採年数が増加している金属

1994年と2004年の静態的可採年数を比較すると，図4.1と図4.2に示すように，バナジウムとジルコニウムの2種類の金属の可採年数が増加している．

1994年のバナジウムの生産量は3.4万トンで，2002年には6万トンまで増加したが，その後減少し，2004年には4万トンとなっている．バナジウムの鉱物生産量と埋蔵鉱量は，南アフリカ，中国，ロシアの3カ国でほとんどが占められており，2002年の生産量の増加は中国の生産量増加による．静態的可採年数は1994年の295年から2004年には323年に増えている．これは2001年に埋蔵鉱

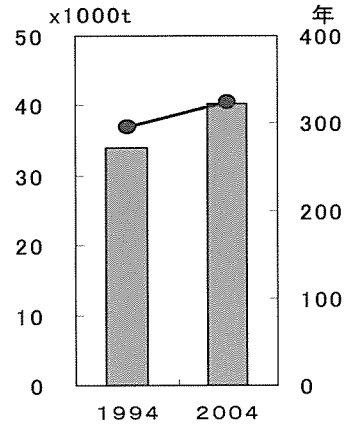


図4.1 1994年と2004年のバナジウムの鉱物生産量と可採年数

量が増加したことによる．

ZrO_2換算値で示されるジルコニウムの鉱石生産量は，1994年の89万トンから2004年には85万トンへ減少している．この期間，静態的可採年数は，36年から45年へと増加している．しかし，2005年にはいくつかのジルコニウム鉱山が閉山したり，鉱石の品位が低下したこともあり，供給は需要に追いつかなかった．そのため，ジルコニウムの価格の上昇を招いた．

4.1　可採年数が減少しているが，2004年現在100年以上の金属

この条件に該当するレアメタルとして，レアアース，白金族，ニオブがあげられる．

レアアースには，ランタン，セリウム，プラセオジム，ネオジム，サマリウム，ユウロビウム，ガドリニウム，テルビウム，ジスプロシウム，ホルミウム，エルビウム，ソリウム，イッテルビウム，イットリウムが属し，それぞれが異なった用途を有している．図4.3には，レアアース全体の鉱石生産量（希土類酸化物換算値）の傾向を示す．レアアースの鉱石生産量は圧倒的に中国が多く，世界の93％を占めている．一方埋蔵鉱石量は，中国が31％，独立国家共同体が22％，アメリカ15％である．静態的可採年数は1994年の1,550年から2004年には863年となっている．

白金族には，プラチナ，パラジウム，ロジウム，ルテニウム，イリジウム，オスミウムの6種類の金属が含まれる．プラチナについては，南アフリカが約75％を占め，ロシア，カナダ，アメリカがそれに続いている．パラジウムの鉱物生産量は，南アフリカが一番多く40％

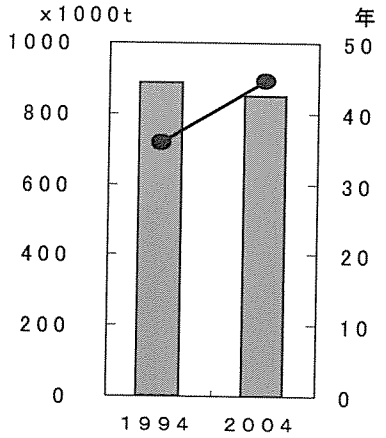


図4.2　1994年と2004年のジルコニウムの鉱石生産量と可採年数

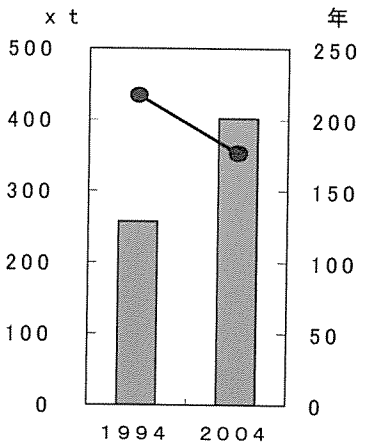


図4.4　1994年と2004年の白金族の鉱物生産量と可採年数

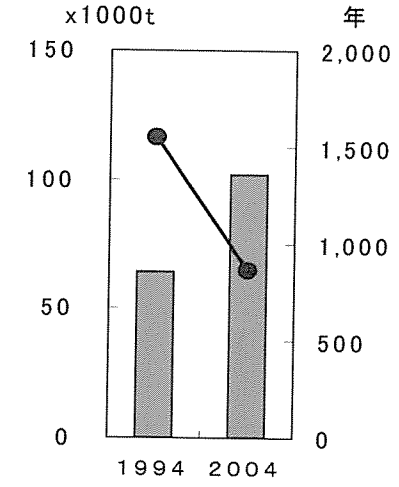


図4.3　1994年と2004年のレアアースの鉱石生産量と可採年数

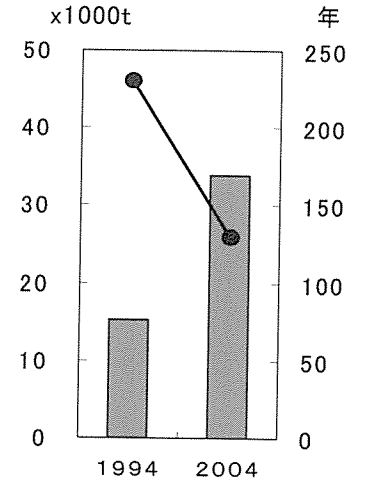


図4.5　1994年と2004年のニオブの鉱物生産量と可採年数

強であるが，ロシアも40％弱とほぼ同じ鉱物生産量を保っている．図4.4に示すように，白金族の鉱物生産量は1994年から2004年にかけて，258トンから402トンへ増加し，静態的可採年数は217年から177年へ減少している．

ニオブの鉱物生産量の88％，埋蔵鉱量の96％をブラジルが占めている．ここ10年で生産量は増加の傾向を示し，図4.5のように1.5万トンから3.4トンへ，大幅に増加し，可採年数も290年から129年へと大きく減少している．

4.1 可採年数が減少しており，2004年現在30年以下の金属

この分類に，タンタル，アンチモン，ストロンチウム，インジウムが含まれる．タンタルは，オーストラリア，ブラジル，カナダに集中している．タンタルの鉱物生産量は，1994年から1999年まで徐々に増加し，2000年から2002年まで急速に伸びている．その後2003年には幾分減少したが，2004年には再び2002年のレベルに回復している．タンタルの静態的可採年数は，94年には68年であったが，2004年には29年へと大きく減少している（図4.6）．

アンチモンの埋蔵鉱量は減少の傾向を示し，1994年の420万トンから2004年には180万トンまで減少した．図4.7に示すように，1994年と2004年の鉱物生産量はほとんど変化していない．静態的可採年数は1994年には40年であったが，2004年には16年まで減少している．

ストロンチウムの鉱物生産量は，メキシコ，スペイン，中国の3国で，約85％を占めている．埋蔵鉱量のデー

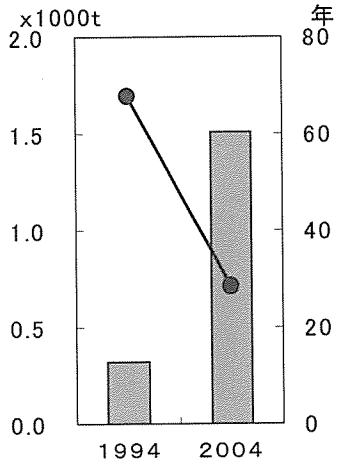


図4.6 1994年と2004年のタンタルの鉱物生産量と可採年数

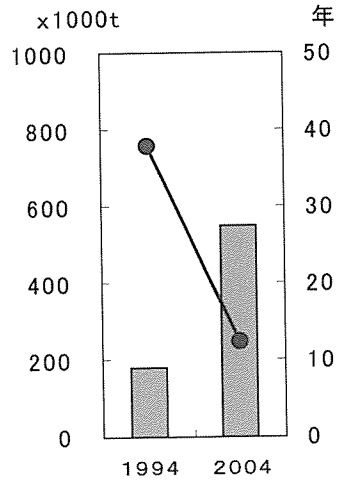


図4.8 1994年と2004年のストロンチウムの鉱物生産量と可採年数

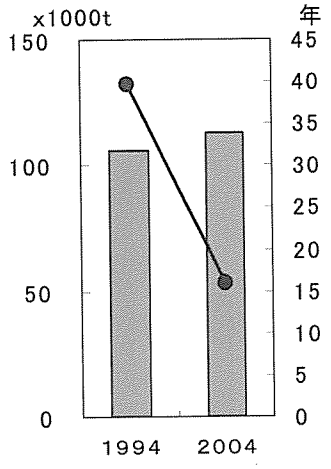


図4.7 1994年と2004年のアンチモンの鉱物生産量と可採年数

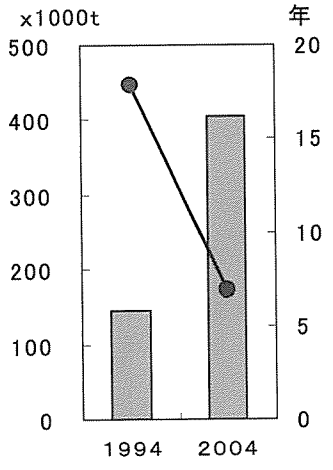


図4.9 1994年と2004年のインジウムの鉱物生産量と可採年数

タは，中国を除いてほとんどの国で公表していないが，世界全体で10億トンを超えるものと予想されている．一方，静態的可採年数は，94年から95年にかけて40年であったが，その後減少し，2004年には12年となっている（図4.8）．

2004年におけるインジウムの鉱物生産量は，中国が半分近くを占めているが，日本も17％と2番目に多い．埋蔵鉱量については，カナダが最も多く，アメリカ，中国が10％程度である．日本では，豊羽鉱山が2006年に閉山したことから，インジウムの生産量及び埋蔵鉱量はゼロとなった．図4.9に1994年と2004年のインジウムの鉱物生産量と静態的可採年数とを比較した結果を示す．鉱物生産量が大幅に増加したのに伴い，可採年数は18年から7年へと大きく減少していることがわかる．

5.　国別の埋蔵鉱量と鉱物生産量

主な資源保有国について鉱物資源毎に，世界の埋蔵鉱量に対してそれぞれの国がどの程度の埋蔵鉱量を有しているかをまとめてみた．図5.1～図5.4は，中国，南アフリカ，オーストラリア，ロシアの世界の埋蔵鉱量に対するそれぞれの国の埋蔵鉱量の割合を，百分率で示したものである．さらにこれらの図に，それぞれの国が占める鉱物生産量の世界の生産量に対する割合も示した．

中国は，多くの金属資源を保有している．ベースメタルに関しては10％程度であるが，多くのレアメタルの埋蔵量が多い．最も割合の多いタングステンは60％を超え，アンチモン，バナジウム，モリブデンも40％を超えている．今後ますます注目されると思われるレアア

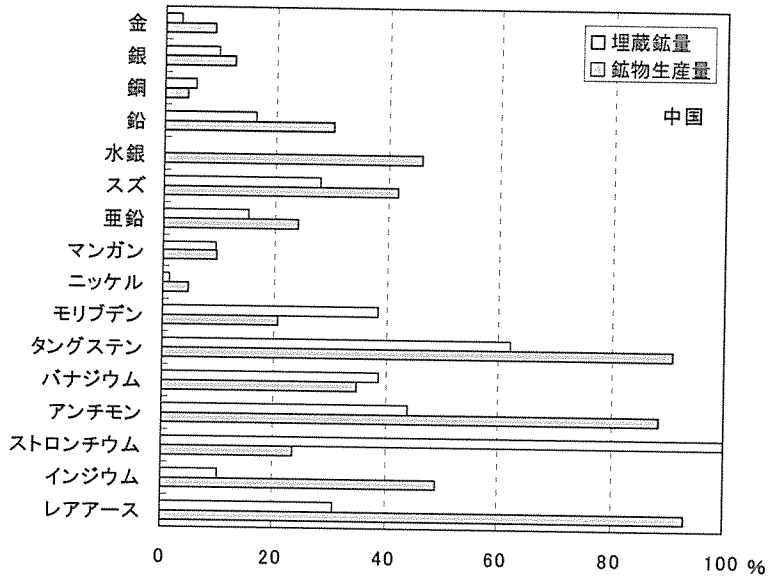


図5.1　中国の鉱種別の埋蔵鉱量と生産量

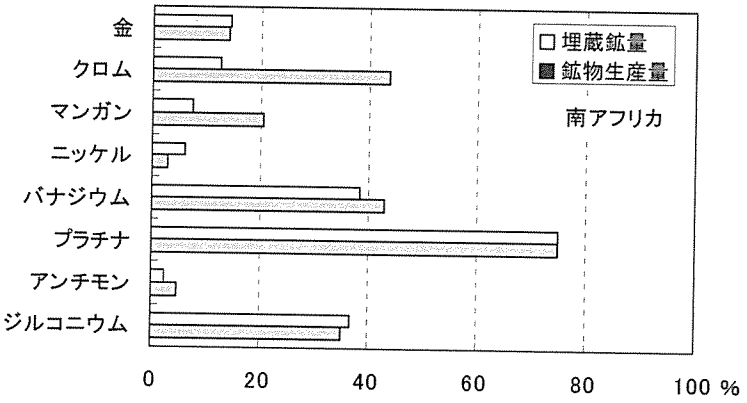


図5.2　南アフリカの鉱種別の埋蔵鉱量と生産量

ースの埋蔵量も30％を占めている．さらに，タングステン，アンチモン，レアアースの鉱物生産量は，90％あるいはそれ以上となっている．その他，インジウム，スズ，水銀の鉱物生産量は40％を超え，バナジウムの生産量も35％近い．このように，中国は鉱物資源の保有国及び生産国として，世界において重要な位置を占めていることがわかる（図5.1）．

南アフリカにおいては，生産している鉱種は少ない．プラチナの鉱物生産量及び埋蔵鉱量はともに70％を超えている．バナジウムとジルコニウムの鉱物生産量と埋蔵量，クロムの鉱物生産量は，約40％を占めている（図5.2）．

オーストラリアも，ベースメタルからレアメタルまで多岐にわたる鉱物資源に富んでいる．ニッケル，ジルコニウム，タンタルの他，レアアースも賦損する（図5.3）．

ロシアも資源大国である．ベースメタルからレアメタルまで多くの鉱物資源を保有している．ニッケル，バナジウム，プラチナの割合が多い（図5.4）．

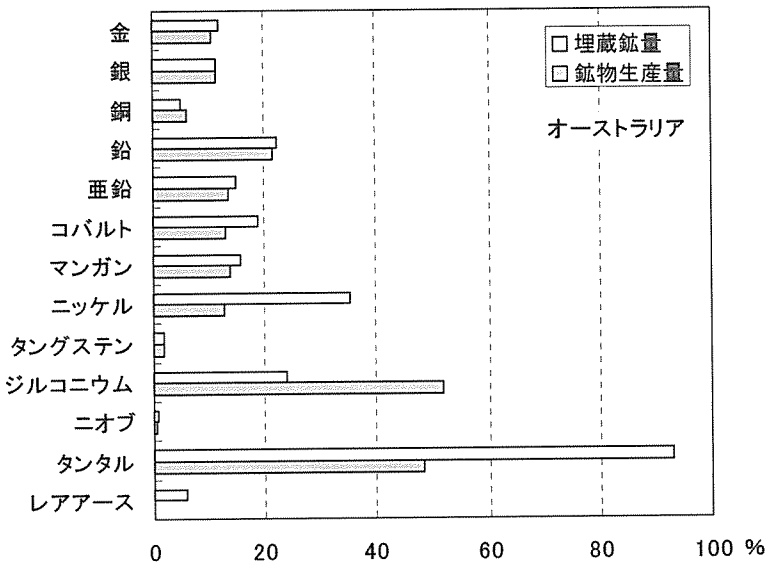


図5.3　オーストラリアの鉱種別の埋蔵鉱量と生産量

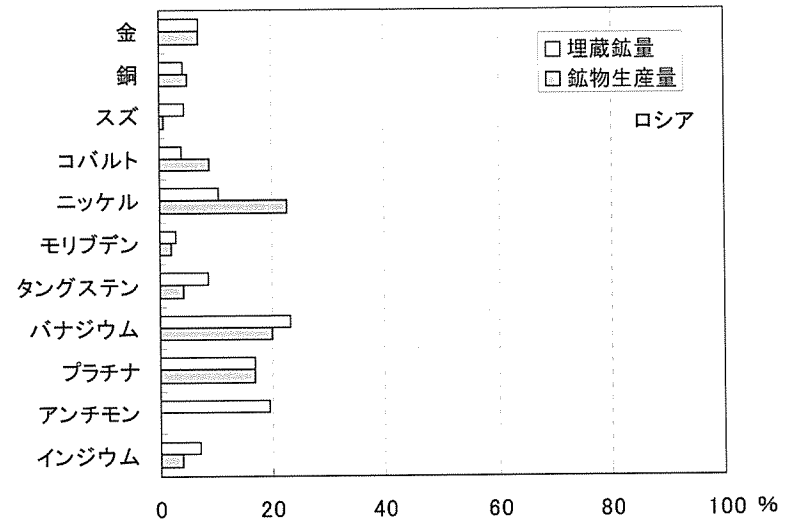


図5.4　ロシアの鉱種別の埋蔵鉱量と生産量

6. ま と め

ここでは，資源量の予測（可採年数）と偏在，生産量とその変遷についてまとめた．また，1972年に出版された「成長の限界」で予測された鉱物資源の生産量，可採年数と比較することにより，最近35年の金属資源の現状と動向を明らかにした．さらに，最近めざましい発展を遂げているITなどの分野での消費が著しいレアメタルについて，ここ10年間の動向をまとめた．その結果，以下のような課題が明らかになった．

1. 埋蔵鉱量の把握の必要性

「成長の限界」で議論された鉱物資源の可採年数は，鉱山からの生産量と埋蔵鉱量から求められる．したがって，これらの値の信頼性が低いと，可採年数そのものも信頼性が低くなる．生産量は実績に基づくものであるから，ある程度信頼性があると判断してもよいと思われる．

米国地質調査所の「Mineral Commodity Summaries」によると，埋蔵鉱量は対象とする鉱床について何らかの調査を実施した結果から求められた値であり，それぞれの政府が公表したデータや関連企業からのデータをもとにしている．しかし，埋蔵鉱量が大幅に増加したり，減少したりしているケースが見受けられる．例えば，中国の埋蔵鉱量の公表データは，1995年から2004年の間，銅，鉛，亜鉛，モリブデン，タングステン，バナジウムが上方修正，アンチモンとインジウムが下方修正，スズとニッケルが上方及び下方修正されている．このような傾向は，他の資源産出国にも認められる．

循環型のシステムを設計する場合，天然資源の供給の安定性は重要な検討課題である．そのため，埋蔵鉱量を正確に把握すること，すなわちこれらのデータがどのような情報に基づいているのかなどを確認する必要がある．現在，アメリカの地質調査所がネットワークを有して，世界のデータの収集等を行っているが，我が国としても近隣国であるアジアを中心に埋蔵鉱量を正確に把握するような方策を講ずることが重要と思われる．

2. 埋蔵鉱量の把握のための資源保有国との協力

埋蔵鉱量を正確に把握するために，鉱床の探査技術を開発しつつ自ら探査を実施することや，我が国の進んだ探査技術の移転など，アジアを中心とした資源保有国に対して新たな鉱床の発見に貢献することなどを通して，埋蔵鉱量を把握することが考えられる．例えば，産業技術総合研究所が有しているアジアのネットワーク(CCOP)，南アメリカやアフリカなどに対するネットワークを有効に利用して，データを収集することも有効である．さらに，ODAなどの事業を利用した技術的援助も一つの方法である．

3. 資源の偏在

レアメタルを始め，多くの資源は偏在している．特に中国は，レアアース，タングステン，アンチモンの埋蔵鉱量のほぼ90％を占めている他，インジウム，スズ，水銀，鉛などなどの賦存率も高い．中国は，経済成長に伴う内需の拡大を背景に，輸出抑制的な政策に転じていることが問題となる他，将来の供給に向けて不安要素が多い．

また，中国の鉱種別の埋蔵鉱量と生産量の世界に占める割合を見ると，図7.1に示されているように，銅，モリブデン，ストロンチウムを除いて生産量の占める割合が埋蔵量の占める割合に比べて大きいことである．このことは，保有する資源量に対して，生産する割合が他の国に比べて多いことを示している．この傾向が続けば，他の資源保有国に比べて枯渇するまでの期間が短いともいえる．

4. 需給構造の変化に伴い生産量等が大きく変動している資源

中国やインドなどにおける経済的な発展を背景に，多くの金属資源の需給構造が変化している．特に，レアメタルであるクロム，コバルト，タングステン，白金族，ニオブ，アンチモン，ストロンチウム，タンタル，インジウム，レアアースおよびベースメタルである銀の鉱物生産量が大きく増加し，それに伴って可採年数が大幅に減少している．これらの金属のうち，クロム，コバルト，ニオブ，白金族，レアアースの可採年数は50年以上となっているが，タングステン，ストロンチウム，タンタル，アンチモン，銀の可採年数は40年以下となっており，インジウムは7年に過ぎない．今後とも，これらの金属に対して十分な注意を払う必要がある．

5. 個々の金属資源の目標値の設定

循環型社会の推進のため，個々の金属資源に対して全ライフサイクル，すなわち資源量（埋蔵鉱量や可採年数）の把握，資源産出国の社会的，政治的問題の解析，我が国との関係，新たな資源投入とリサイクル，さらに廃棄に至るまでの経済的および環境負荷（エネルギー消費を含む）の解析などを行い，それぞれの金属資源毎に，天然資源の投入率，リサイクル率，あるいは代替品開発の必要性などについての具体的な目標を定め，その実現に向けた活動が必要である．

謝 辞

本書をまとめるに当たり，(独)産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門長瀬戸政宏博士，同副部門長矢野雄策博士に多くの助言をいただいた．また，住友金属鉱山株式会社執行役員・川口幸男氏から多くの助言や資料の

提供を頂いた．新エネルギー・産業技術総合開発機構理事・本城薫博士からもアドバイスを頂いた．ここに多大な感謝の意を表する．

参 考 文 献

1) 「Mineral Commodity Summaries」米国地質調査所，2006年版他．
2) D.H.メドウズ，D.L.メドウズ，J.ラーンダズ，W.W.ベアランズ3世，「成長の限界－ローマクラブ「人類の危機」レポート」ダイヤモンド社，1972年．
3) JOGMECホームページ http://www.jogmec.go.jp/data/data_1_3.html.
4) 岩波理化学辞典第4版（1989年12月発行，岩波書店）．
5) 「レアメタル要注視9鉱種等の受給の現状について」経済産業省資源エネルギー庁，平成16年5月．
6) D.H.メドウズ，D.L.メドウズ，J.ラーンダズ，W.W.ベアランズ3世，「成長の限界－ローマクラブ「人類の危機」レポート」ダイヤモンド社，1972年．
7) D.H.メドウズ，D.L.メドウズ，J.ラーンダズ，「限界を超えて　生きるための選択」ダイヤモンド社，1992年．
8) M.カーレー，F.スパーペンス，「地球共有の倫理」日科技連，1999年．
9) レスター・ブラウン，「エコ・エコノミー」家の光協会，2002年．

講　　座

金属学とその研究手法の進歩 －研究生活を顧みて〔V〕

村　上　陽太郎*

Progress in Metal Science and Its Research Technology －Look Back upon My Research Life [V]

by Yotaro MURAKAMI

1. はじめに

本誌23巻5号[1]（平成14年12月発行）から，6号[2]，7号[3]，及び8号[4]に，表記題目の4報文を連載していただいた．第3報迄は私の研究生活に直接関係した題目に就いて書いたが，第4報は大学の研究生活から離れて，各種の委員会や企業との関係で得られた知識をもとに書いた．京都大学を1981年に停年後，関西大学工学部金属工学科に移ったが，当時軽金属学界では，超急冷疑固法による高性能アルミニウム合金の研究開発が注目されていたので，研究室の主要題目として選んだ．それらに関する研究データーや資料も十分にあるが，趣旨が違うので取り上げないことにした．最近アルミニウム関連学会では，大阪工業大学の羽賀俊雄教授が開発を進めている高速双ロールキャスター[5,6]が大きな関心を持たれている．アルミニウム薄板は，後述するように，半連続DC（direct chill）鋳造と圧延加工の組合せで製造されているが，設備費が少なくて済む直接鋳造圧延法も利用されてきた．しかし従来の双ロール鋳造法では，その圧延速度が1～15m/minであるのに対して羽賀教授の双ロール鋳造法では，60～150m/minと高速度の鋳造が可能で生産性が格段に優れ，且凝固速度が10^3℃/sec以上と速く，Fe量の混入が高いリサイクル材でも，Al-Fe-Si系の晶出物の微細化が可能で，Feの悪影響が排除できる等のメリットが大きい．筆者はこの方法に最近大きな関心を持つようになっている．又Hazelett法には，古くから関係しているので，多くの知識を持っている．このような事情から本報文では，高速双ロールキャスターを目標にして，アルミニウムの凝固と連続鋳造技術の進歩について，基礎を含めて書くことにした．

*京都大学名誉教授（昭和17年，冶金卒）

2. 凝固・鋳造とマクロ及びミクロ組織

アルミニウム（以下Alと略記）が金型に鋳造されて凝固した時，最も普通にみられるマクロ組織を図1[7]に示す．小さな等軸晶のチル層（外殻層），柱状晶の領域，及び少し大きい等軸晶の領域の3部分からなっている．又この最後の領域には凝固収縮によるミクロ収縮孔及び成分偏析が生じる．溶湯の凝固は結晶核の形成に始まり，

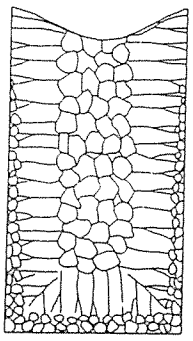


図1　金型中で凝固した鋳塊のマクロ組織の模式図[7]

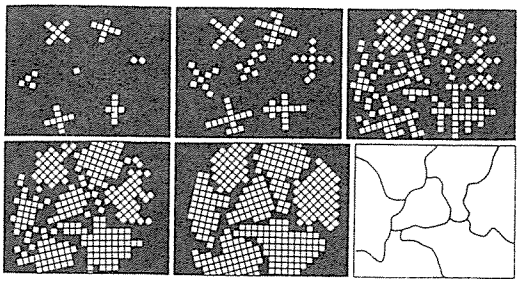


図2　等方向な熱の放散の場合の等軸結晶粒組織生成の模式図[8]

核の成長による，所謂「核生成・成長（nucleation and growth）」機構によって起る．理論的な議論は詳細に解明されている．純Alの場合，融点660℃に達すると，少量の過冷（supercooling）が起こり，結晶核が発生して凝固が始まる．凝固の潜熱が等方向に取り去られる場合には，夫々の場所で結晶核の生成と成長が，図2[8]に示すように進行する．図2の小さい立方体は単位セルを表し，黒色部は融液を示す．最終的には，夫々から成長してきた結晶は相互に衝突してできた界面は結晶粒界（grain boundary）と呼ばれる．実際の鋳造凝固は熱流が等方的でなく方向性を示すので，結晶核の成長は方向性を持ち樹枝状（dendrite）的に成長する．図3[8]の左側に図式的に示すように，立方体状に成長しつつある結晶の角において，面心の位置よりも有利になるので，立方格子の角における成長が先行し，最終的には星状の形状になる．樹枝状晶の形成を図3右側に図式的に示す．合金では樹枝状組織を示すことが多く，鋳塊を切断すると多くの枝が認められる．図4の下部に模式図的に示すように，樹枝状晶には1次，2次，3次及び4次のアームが見られる．図4の上部は切断面のミクロ組織で，アームの間には，合金元素が濃化している．特に重要なのは，樹枝状晶の2次アーム間隔（dendrite arm spacing, DAS），dが凝固中の冷却速度，Qと一定の関係，$d=\beta Q^{-\alpha}$（β：定数，$\alpha \approx 1/3$）が成り立つことである．図5[9]は，Al-0.25%Fe及び0.55%Fe合金のQとdの関係を示すもので，上部の表は冷却速度に対するDASの実測値を示し，下部の図は両者を両軸に取ると，一直線上に乗り，$d=33.4Q^{-0.33}$の式が成立する．dの微細化に伴い，晶出物も微細になるので，Feなどの不純物元素量が多く含有されていても，靭性劣化が防止できる．

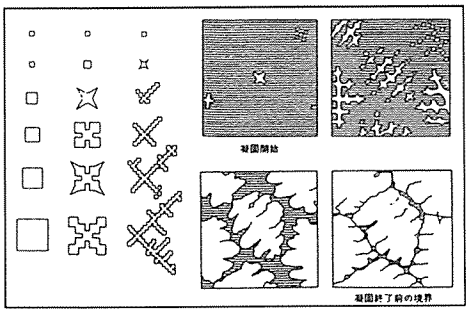


図3　純Alが樹枝状に結晶化する際の模式図（G. Sachsによる）[8]

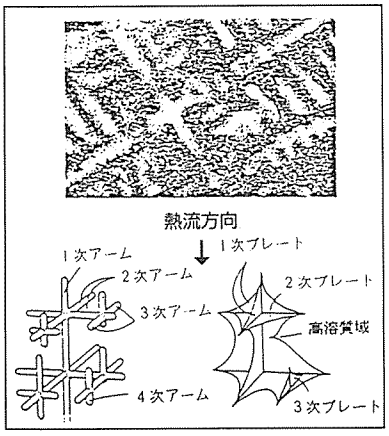


図4　熱流方向と樹枝晶成長の模式図，上図は樹枝状晶のミクロ組織

3.　半連続鋳造法[10]

展伸用Al及びAl合金は通常DC鋳造法（direct chill casting process）と呼ばれる方法で，半連続的な鋳造方法で鋳塊が製造され，熱処理後熱間並びに冷間の塑性変形によって，板，型材成型品が作られる．DC鋳造法には改良が加えられ，ホット・トップ鋳造法や電磁鋳造法が開発され進歩している．

1）DC鋳造法：この方法の概略説明図を図6[10]に示す．溶湯は注湯管（dip tube）を通して，Al又は銅製の水冷鋳型中へ導かれる．そのレベルは分配フロートによって一定に保持される．鋳型内の溶湯は一次冷却を受け，鋳塊殻が形成される．下型の降下と共に鋳塊も降下し鋳型から出た所で，水が直接当たり，さらに冷却水が貯蔵されているピット中に入り二次冷却を受け凝固が完了す

冷却速度	樹枝状晶のアーム間隔
42　°C/sec	7.8～ 11.5 μm
29	12　～ 13.5
18	27　～ 50
13	15　～ 18
12	10　～ 17
7.6	14.5～ 18
4.4	19　～ 23
0.1	70　～ 80
0.01	150　～200

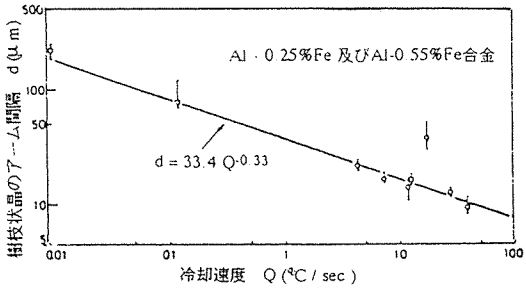


図5　Al-0.25%及び-0.55%Fe合金の樹枝状晶のアーム間隔と冷却速度の関係[9]

る．凝固が終了すると鋳塊は引上げられる．“半連続”という所以である．図7[11]にDC鋳造法で製造されたスラブを示す．作業員の身長から鋳塊の大きさが判る．鋳塊には“発汗帯”という欠陥ができる．鋳塊殻が鋳型から出た所で，凝固収縮によって鋳型から離れるので，鋳型を通しての熱の逃散が非常に減少し，溶湯の顕熱及び凝固潜熱によって，鋳塊は再加熱される．溶質に富んだ結晶粒界がまず再溶融し，融液が表面に溶け出す所謂“発汗帯”が周期的な線状に形成される．発汗帯には溶質原子の逆偏析がしばしば見られる．その為，鋳塊は厚さ2mm程度の面削が行われ，熱処理，熱間及び冷間圧延をして，薄板が製造され，コイルに巻き取られる．Al-Li系合金の場合は，Liの含有量が2wt%以上になると，溶湯は水と反応すれば激しい水素爆発が起こるので，そのDC鋳造には特別な配慮が必要になる．筆者が関係していた（財）金属系材料研究開発センター（JRCM）内の「アルミニウム系新材料の高機能化に関する調査部会（部会長：筆者）」では，傘下の当時のアルミニウム圧延7社は，Al-Li合金の組織制御によって，その強度，靭性及び耐食性等を共同で研究し，この分野で欧米先進国に遅れを取っていた我国のR&Dを強力に推進するために，平成元年3月24日に平成8年3月までを期限として，（株）アリシウム[12]を設立し，軽金属押出開発（株）の敷地内に四日市研究所に建設し，4トン規模の実用鋳塊の製造設備の開発と製造技術の確立を目標とした．図8[12]は，完成した，容器を真空にした後アルゴンガスを導入して合金を溶解する精緻な4トン規模の溶解炉の外観を示す．更に溶湯の爆発防止のために，溶湯は通常のDC鋳造のように，凝固後の鋳塊を水中ピット中に導入するのではなく，ピットには水を貯めずに，鋳塊外殻を冷却した水はピットの底から取り出すドライピット方式のDC鋳造設備を設置して，健全な4トン規模の各種Al-Li系合金の製造に成功した．溶湯の爆発は，假りに鋳塊殻が破れて溶湯が流出しても，溶湯量が水量に対して圧倒的に多い場合には大きな爆発は起こらないためである．研究所では大きな爆発は起こっていない．製造された8090，2090及び2091合金（AAに登録されている合金）は，通常のAl合金と同様なプロセスで板及びシートに製造され，規格値を上回る性能か得られることが確認された．しかし，その直後からAl-Li合金の価格が高すぎるということが主な理由で，その利用が各国においても

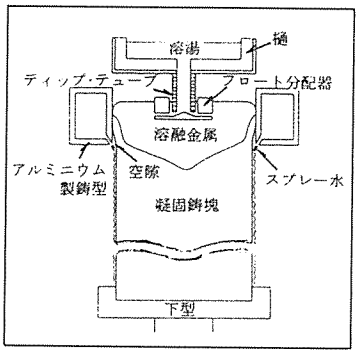


図6　DC鋳造法の概略図[10]

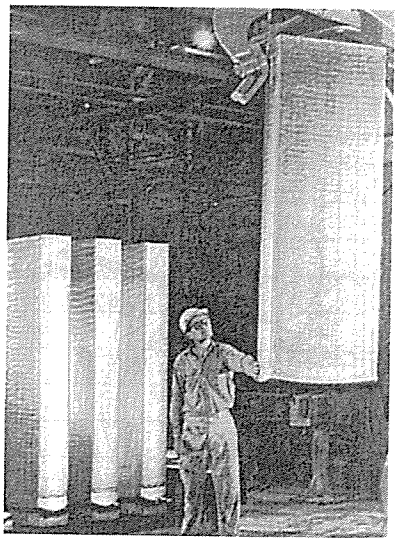


図7　DC鋳造法によって製造されたスラブ[11]

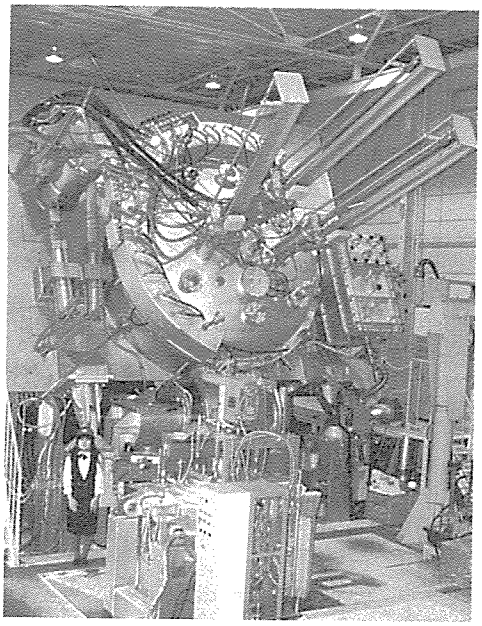


図8　(株)アリシウム四日市研究所に設置されたAl-Li系高強度合金製造のための4トン規模のアルゴンガス－真空溶解装置[12]

停滞し，これらの設備が活用されなかったのは誠に残念である．

2）ホット・トップ鋳造法[10]：この方法の概略図を図9[10]に示す．分配フロートを用いて，鋳型内の溶湯レベルを浅くするのには限界がある．その為に開発されたのが本方法である．薄い水冷鋳型とその上に置かれた断熱耐火材で作られたヘッダーから構成されている．又圧延用スラブの鋳造には通常のDC鋳型の上部を断熱材でライニングして行うこともある．溶湯は炉から断熱材製の樋を通って，乱流を生じない水平注湯によって鋳型に導かれる．この方法の利点は，安定した低湯面鋳造が可能で，良好な表面と薄い粗大セル層が得られることと分配フロートを使用しないので，小径ビレットが鋳造できることである．この方法の開発当初は鋳塊表面にリップルの欠陥が生じた．これはヘッダー直下の張り出した所に凝固殻が形成されその降下と共に鋳型への熱伝達が不良になり，凝固殻が再溶融し溶湯が再び鋳壁面に供給されるためであることが判明した．これを防止するため，ヘッダーと鋳型の間から潤滑剤を強制的に供給すると共に，ヘッターと鋳型の間に鋳型材質よりも熱伝導率の小さい黒鉛などのリングと挿入すること，鋳型を黒鉛製にすること，ヘッダーと鋳型の間の空間を気体による加圧等によって，凝固開始点をヘッダーと鋳型の境界より下方に移動させること等で，リップルのない滑らかな表面と薄い偏析層の鋳塊が得られるようになっている．

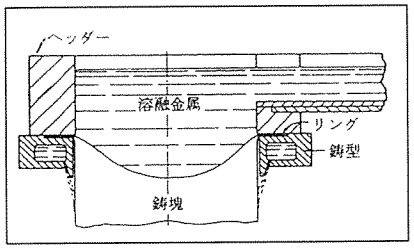


図9　ホット・トップ鋳造法の概略図[10]

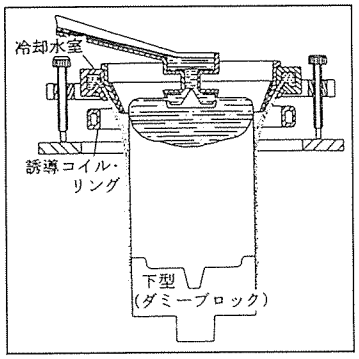


図10　電磁鋳造法の概略図[10]

3）電磁鋳造法[10]：本法の説明図を図10[10]に示す．電磁コイルによって発生する交流磁場内に導入された溶湯は，交流磁場によって拘束され，コイル形状と相似の溶湯柱が形成される．この溶湯柱面に直接当てられた水によって冷却され凝固する．DC鋳造のような一次，二次冷却もないので，極めて滑らかな，発汗帯もない良好な表面の鋳塊が得られる．DC鋳塊にみられる粗大セル層もなく，表面の逆偏析層の厚さも著しく減少する．しかし，多本注ぎ鋳造されている押出用ビレットの鋳造には，互いに他の電磁力が距離的に影響し合うので利用できない．圧延用の大型スラブの鋳造に採用されている．

4．連続鋳造圧延法[13]

高速双ロールキャスターは後で述べることにして，先ず従来の方式について述べる．この方法は，棒，線材の製造に広く利用されているプロペルチ（properzi）法と薄板の製造ができる3種類の方法がある．

1）プロペルチ法：この方法は図11[14]に示すような周囲に鋳型になる溝を掘った銅合金製の水冷鋳造ホイールと上型になる軟鋼製のベルトによって構成され，ベルトはスプレー・ボックスからのスプレーによって冷却される．凝固したバーは，コンパクトな3方ロールの多段タンデム熱間圧延機によって線材に圧延され，巻き取られてコイルになる．その生産性は高く，8～9トン／時に達するものもあり，2トン以上の巻取重量も可能であることから，電気用Al荒引線の生産に広く利用されている．プロペルチ法の鋳造冷却速度等は表1[10]に示すようにDC鋳造法とほぼ同等であるが，鋳造バーの再加熱をせずに圧延加工されるので，不純物のFeなどの固溶量が多く導電率は低い．しかし，Fe, Zrなどを添加した合金を用い，多量に固溶させた後，微細析出物として析出分散させ，耐熱性の優れた線材を得ることができる．

2）薄板の連続鋳造圧延法[13, 15]：この方法は，（イ）双ロール鋳造法，（ロ）ベルト鋳造法及び（ハ）ブロッ

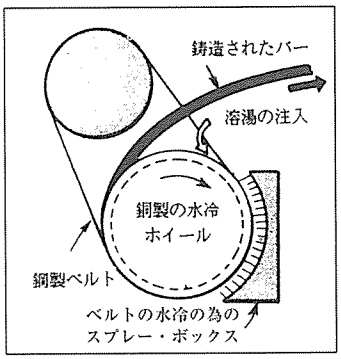


図11　Properzi法の模式図[14]

ク鋳造法に大別されるが，それぞれの方法も表2に示すように相互に多少異なっている．

（イ）双ロール鋳造法[15]：この方法は図12[10]の下部に示すように水冷された鋼製の一対のロール間隙にセラミック製のチップによって溶湯を導入し，双ロールによって急冷凝固する．この際凝固した鋳造板はロールによって，10～20％の塑性変形を受けてロールの外に出る．これは鋳造板とロールの間に，伝熱抵抗の大きな空隙が生じないようにする為である．凝固時の冷却速度は，表1のハンター・エンジニヤリングで示されているように，200～700℃/sec．二次デントライト枝間隔は3～6μmで，DC鋳造に較べて速い．溶湯を双ロールに注入する方法として，図12の上方に示すように，下方から垂直に行うHunter Engineering式と，横方向より導入するCoquillard 3C，Alusuisse Caster 1，Harvey式がある．この方式で凝固温度範囲が50℃以下の，例えばMg 2.5%以下のAl-Mg合金の厚さ6～8mmの広幅の冷間圧延用コイルが製造できる．近年大きなロール径を使用するスーパーハンターやジャンボ3C等が開発され，5%Mgまでを含む合金が鋳造できるようになっている．

（ロ）ベルト鋳造法[15]：この方法は図13[15]に示すように，内側から水冷されながら回転する一対のエントレスの軟鋼製のベルトの間隙に注湯し凝固させる方式で，Hazelett式が代表的なものである．鋳造機の後に配置した，鋳造速度と同期させた熱間圧延機で，所定の厚さまで圧延され，コイルに巻き取られる．厚さ15～40mmの2%Mg程度を含有する合金を鋳造できると云われているが，筆者の知るところでは，経験を積めばもっと広範囲の各種のAl合金の鋳造もできる．この方法には“technology”というよりは“art”の範疇に入る領域が存在している．

（ハ）ブロック鋳造法[15]：ベルト鋳造法と同様であるが，エンドレスのベルトの代りに，図14[15]のように連結したチルブロックを用いる．代表的なものにHunter-Douglas法があり，厚さ約30mmの，3.5%Mg程度を含有する合金を鋳造することができる．チルブロックを改良したAlusuisse Caster IIは5%Mgまでを含有する合金の鋳造が可能である．このチルブロック方法は冷却速度はDC鋳造と同程度で，デンドライト・アーム間隔も40

表1　各種工業的鋳造法式で鋳造した鋳塊のデンドライト間隔と冷却速度[10]

鋳造方式	デンドライト間隔	冷却速度
ハンター・エンジニアリング	3 ~ 6 μm	200 ~ 700 °C/sec
圧力ダイキャスト	11 ~ 17	20 ~ 80
DC 鋳造	17 ~ 40	0.5 ~ 20
プロペルチ方式	20 ~ 57	0.5 ~ 13
金型鋳造	70 ~ 80	~ 0.5
セル・モールド	150 ~ 200	~ 0.01

表2　板の連続鋳造圧延法の概要[10]

名称	方式	厚さ(mm)	幅(mm)	鋳造速度(mm/min)
Caster I	Roll	6 - 12	-1700	0.6 - 1.2
Hunter	Roll	6 - 13	- 1676	1.1
3C	Roll	4 - 10	- 1550	0.6 - 1.6
Jambo 3C	Roll	4 - 10	- 2000	1.7 - 2.0
Caster II	Block	15 - 40	600 - 1700	2 - 5
Hazelett	Belt	9 - 51	305 - 1676	---
Rotary Caster	Belt	12 - 30	100- 400	---

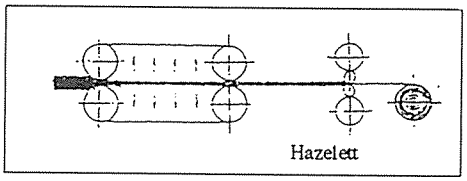


図13　ベルト鋳造方式[15]

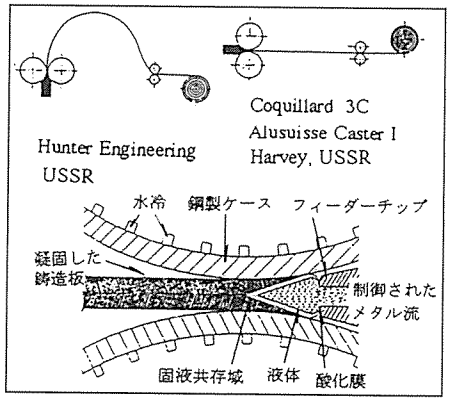


図12　双ロール鋳造方式[10]

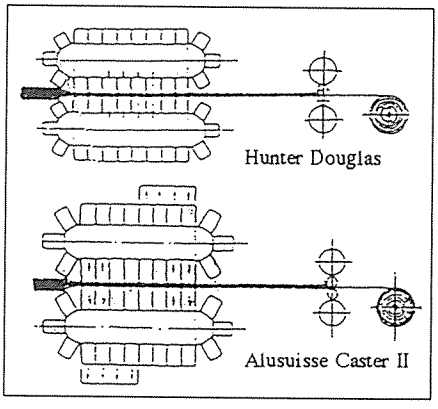


図14　ブロック鋳造方式[15]

～70 μmと同程度である．これらの板の連続鋳造圧延法では，面削は行われないので陽極酸化処理用に対しては品質の高いDC鋳造板よりも劣るので使用されない．

5. 高速双ロールキャスター[5)]

(1) キャスターの構成：縦型高速双ロールキャスターの概要図を図15[5)]に示し，従来の双ロール法との比較項目を表3[5)]に示した．この相違点によって，高速度の鋳造が可能になっている．このキャスターは，水冷した銅製のロール，特徴的なノズル及び軟鋼製BNコーテングした水冷傾斜冷却板から構成されている．一方のロールは固定し，他方のロールにはバネにより，単位幅当たり0.1～0.5kN/mmの荷重を負荷し，ロールと鋳造板の間の熱伝達を良好にした．板厚は圧下により調節するのではなく，ロール周速と凝固距離によって調節する．ロール周速を速くするか，凝固距離を短くすると，凝固時間が短くなるので板は薄くなる．鋳造開始時には，ロール間隙を板厚より薄い0.5～2mmに設定しておく．鋳造中にロール間隙は板厚まで拡がる．所定の速度でロールを回転させた後に注湯を開始する．通常のAl合金用の双ロールのノズル（チップ）は一体物であるが，本機では2枚のサイドダムプレートと2枚のノズルプレートを機械的に結合したものである．2枚のノズルプレートは位置を個々に設定できる．ロール周速を速くするに従い，ノズルプレートを移動して凝固距離を長くする等の変更が容易にできる．このようなノズルを用いる事で溶湯ヘッドによりノズル先端の溶湯圧力を高めることができる．従来のキャスターではチップ先端の圧力は，レベルラインの発生を防止するために極力低く設定されているが，本機では溶湯とロール間の熱伝達を向上するため溶湯圧力を高くする．溶湯が漏れるのを防ぐため，ノズルの先端とロールは接触させてある．ノズルは軟鋼板に耐熱ペーパーを接合したものである．鋳造速度の高速化を目的として，低温鋳造又は半凝固鋳造を行うため，傾斜冷却板を利用した．傾斜冷却板は内部を水冷しただけの軟鋼板製の樋で，取付けるために特別な改造の必要もなく，また注湯も容易である．

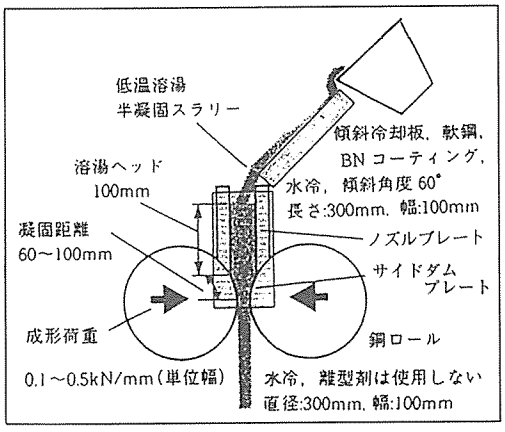


図15　縦型高速双ロールキャスター[5)]

表3　従来のアルミニウム合金用双ロールキャスターと縦型高速双ロールキャスターの比較[5)]

比較項目	従来の双ロール	縦型高速双ロール
型式	横型 離型剤	縦型
ロール材質	鋼	銅
離型剤	使用する	使用しない
成形荷重	1～10 kN/mm	0.1～0.5 kN/mm
スピード	1～15 m/min	60～150 m/min
注湯温度	一般的な温度で鋳造	低温鋳造，半凝固鋳造
薄板の厚さ	4～7 mm	2～3.5 mm

(2) 本機による鋳造時の冷却速度と組織[6)]：この鋳造機では水冷式の純銅製のロールを使用し，離型剤をロール表面に塗布せず，また傾斜冷却板を用いて溶湯の温度を可能な限り低下させているので，大きな冷却速度が得られることが期待できる．鋳造用Al合金AC4CH (Al-7.0Si-0.20Fe-0.20Cu-0.10Mn-0.30Mg) 用いて実験を行った．図16[6)]は鋳造した板材の長手方向に垂直な断面の光学顕微鏡組織を示す．この組織中の初晶αデンドライ

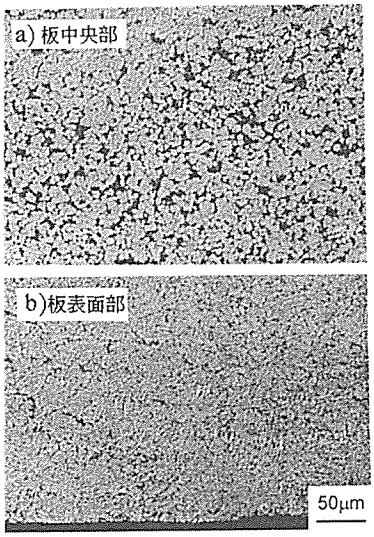


図16　高速双ロールキャスターで鋳造した侭のAC4CH合金の断面の光学顕微鏡組織[6)]

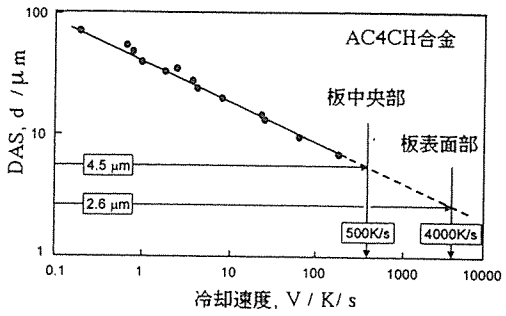


図17　AC4CH合金におけるDASと冷却速度との関係[6]

ト晶の二次DASを測定した結果，その大きさが異なり，表面部が中央部に較べてより細いことが判った．板厚中央部では4.5μm，板厚表面部では2.6μmであった．AC4CH合金に就いては，これ迄の研究によって，DASと冷却速度には，図17[6]のような関係があることが明らかにされている．このDASの測定値をこの図に当てはめると，このキャスターで製造されたAC4CH合金は，板厚中央部でも，約500℃/s，板厚表面部では，約4000℃/sと極めて速い速度で凝固しており，本高速双ロールキャスターは優れて急冷凝固能を有することが明らかになった．同様の検討を，6000系合金等でも行ない，合金の種類によらずほぼ同程度の冷却速度が得られることが確認されている．

(3) 6063合金板材における不純物元素Feの影響[6]： Al合金のリサイクル時には，不純物元素特にFeの含有量が問題になる．Fe量が多くなると，粗大な針状のAl_3Fe金属間化合物が形成され，変形中に割れやボイドの原因になって，成形性が害され，強度特性が大幅に低下する．そのためJISにおけるFeの許容量は0.35質量%と規定されている．しかし急冷凝固によって，Fe化合物を微細化させれば，その許容量が増大し，Al合金のリサイクル性の向上が期待できる．これらを解明するため，6063合金とこれにFe量を，0.7，1.0，2.0，3.0，4.0，5.0及び6.0質量%添加し合金を，この双ロールで鋳造した．540℃×2hの溶体化処理を行ない，冷間圧延によって板厚0.5mmの薄板を作成した．T4処理材と160℃×6hの高温時効処理T6材で曲げ試験，引張試験及び硬さ試験を行った．ミクロ組織観察では，板厚表面部に較べ中央部には大きな晶出物がみられた．特にFe量が3質量%以上では粗大な針状金属化合物Al_3Feが存在し，その数とサイズはFe量の増加と共に増大した．曲げ試験では，何れの時効処理材でも，3.0質量%まではき裂は確認されず，良好な曲げ性が得られた．図18[6]はT4及びT6処理材の耐力と引張強度（UTS）のFe量との関係を示す．

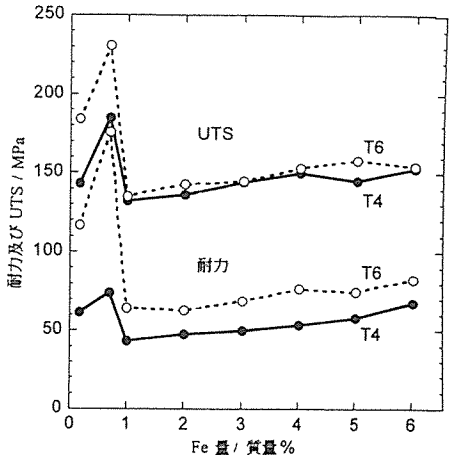


図18　耐力及びUTSとFe量との関係[6]

0.7質量%Fe合金は，6063合金に較べて耐力とUTSも高い．しかし1.0%以上のFe含む合金では，T4及びT6処理材で耐力もUTSも低下している．Al-Mg-Si系合金では時効硬化は主としてMg_2Si関係の析出によって起こる．Feが増加すると，Al-Fe-Si系金属間化合物が晶出し，Mg_2Siの形成に必要なSiが消費されるため，結果としてMg_2Si関係の析出量が減少することに起因すると考えられる．従って本研究の冷却速度の範囲では，0.7質量%程度までは時効硬化性に影響しないが，それ以上のFe量では析出硬化能が失われることが明らかになった．

(4) 高速双ロールキャスターの問題点： この方式の鋳造速度は，数10～百m/minと従来のロールキャスターに較べて速く，鋳造組織の微細化も可能になり，Al合金のリサイクルにおけるFe不純物の許容含有量も高くできること等が示され，Al合金薄板の優れた鋳造法であることが実証された．しかし，これらの研究結果は，通常約3kg程度のAl合金溶湯をバッチ式に鋳造し，幅100mm，長さ約3mの薄板が作成されたもので，これを実際に工業的プロセスとして利用するためには，いくつかの条件がクリヤされねばならない．それらを列挙すると，（イ）工業的規模の量の合金溶湯を高速で安定的に注湯できること，（ロ）高速で鋳造された板をコイルに連続的に巻き取ること，（ハ）面削を行うことなく，許容できる良好な表面性状が得られることの3条件の中，少なくとも最初の2条件は充たす必要があると思われる．現在の連続鋳造法の開発の歴史をみても，artの時代からtechnologyへの進化してきた．現在では多くの計測法や自動化の技術が発達している．これらの適切な活用が望まれる．本方式は極めて優れたAl合金の凝固・鋳造プロセスであることは間違いない．その発展を望みたい．

6. おわりに

現在も技術のコンサルティングをしている2社で，Hazelett法と高速双ロールキャスターに関して，多くを学んだ．連続鋳造圧延法には，特に関心がある．凝固・鋳造の基礎と連結鋳造法の解説を行った．金属学も随分に進歩したが，凝固・鋳造のプロセスには，technologyになっていないartの部分が多く残されていることを痛感している．その一例として，最近中国において従来CC鋳造法では不可能であった．表面状態がDC鋳造と同等の品質を持ったAl箔が製造できるようになり，我国にも一部輸入されている．CC鋳造品は，DC鋳造品よりも価格が格段に安いので，我国のAl箔メーカーはその推移に大きな関心を持っている．

謝辞：末尾に挙げた文献から，図，表，写真及び内容等多くを引用させて戴いた．それらには，番号を附記してある．これらの著者の方々に深謝する．特に羽賀俊雄教授から文献と共に直接教示を受けた．心から御礼を申し上げる．

参考文献

1) 村上陽太郎：金属学とその研究手法の進歩－研究生活を顧みて〔I〕，水曜会誌，23, [5], 451–460, (2002), 12月．
2) 村上陽太郎：同上〔II〕，同上，23, [6], 600–615, (2004), 1月
3) 村上陽太郎：同上〔III〕，同上，23, [7], 755–770, (2004), 12月
4) 村上陽太郎：同上〔IV〕，同上，23, [8], 883–898.
5) 羽賀俊雄：アルミニウム合金の双ロールキャスティング～そのリサイクル性と高速化について～，アルミニウム，第11巻，第58号，137–144, (2004), 8月．
6) (財)軽金属奨学会，課題研究成果報告書，循環型アルミニウム材料の創製—凝固プロセスの開発と力学的特性の向上，研究代表者熊井真次，(2006), 6月，(熊井，羽賀両教授の高速双ロールキャスターとその利用についての多数の文献が収蔵されている)．
7) 大野篤美著：金属の凝固，(株)地人書館発行，昭和59年8月10日，11頁．
8) D. Altenpohl著：小林晴雄他共訳，アルミニウム金属加工学入門—内部からの観察，(社)軽金属協会発行，1971年11月15日，23頁，及び27頁．
9) 三木　功，小菅張弓，長浜勝介：軽金属，25 (1975), 1–9.
10) 小菅張弓：1, 2, 3, a)，半連続鋳造法，(社)軽金属協会編（委員長　村上陽太郎）アルミニウム材料の基礎と工業技術，37頁，昭和60年5月1日発行．
11) I, J, Polmear: Light Alloys, Arnold, 1981, p.69.
12) 村上陽太郎：我が国のアルミニウムの研究とその手法—初期と現在，軽金属，48 (1998), 8, 414頁．
13) 小菅張弓，横田　稔：b) 連続鋳造圧延法，文献10と同じ，40頁．
14) 文献11）と同じ，p.71.
15) 神尾彰彦：アルミニウムの連続鋳造技術と鋳塊組織，軽金属，32 (1982), 311.

談　話　室

夕張回想記 —固体燃料から炭層ガスへ—

加　藤　高　尚*

Memories of Yubari

by Takahisa KATO

1. 夕張における石炭生産の歴史

開拓使のお雇いアメリカ人である地質学者ヘンリー・スミス・ライマン氏は，石狩炭田調査のため明治7年に夕張川を遡り，川床の砂礫の中に炭塊が散在しているのを発見し，上流に大炭層があると推定した．

北海道庁は，明治21年坂市太郎道庁技師（ライマン調査隊の随員）に探検を行わせ，シホロカペツ川上流に石炭の大露頭を発見，明治22年に北海道炭鉱鉄道会社が創立され，明治25年に夕張炭山の採炭が開始された．

採炭開始初年度の明治25年は1山で，その年は27,659トンであった．日清戦争時は2山で年間平均144,800トン，日露戦争時は，年間平均3山55万8千トン，第一次世界大戦の折は6山あり，年間合計162万3千トン，第二次世界大戦のうち昭和19年までは，5山で年間335万トン，敗戦の昭和20年は6山で年間173万トン，翌21年は6山で122万トンに落ち込んだ（表1）．

敗戦後，壊滅に瀕した日本の産業復興の柱として，石炭・鉄・食糧の増産政策がとられ，昭和25年には，朝鮮動乱で我国の石炭開発が進んだ．しかし，昭和28年の動乱終息と共に需要が減少したため貯炭が増加し，昭和30年に石炭鉱業合理化臨時措置法が施行され，非能率炭鉱の整理と高能率炭鉱の育成策がとられた．

昭和35年頃より，石炭から中近東の安い石油に転換する産業が急増し，一般炭の需要は大きく減少したが，夕張市域の炭鉱は原料炭生産を本命としていたため，大きい影響は受けなかった．

明治25年の出炭開始以来，平成2年に炭鉱が閉山するまでの夕張市域の総出炭量は，約1億9千5百トンであった．

平成10年に夕張市は，開基110年，市制施行55年を迎えたが，第1回国勢調査（大正9年）時の夕張町の人口は51,214名であった．以来，概ね5万人を前後していたが，昭和不況の影響で昭和10年の第4回国勢調査では42,508名に減少した（表2）．

その後，第二次世界大戦に伴う石炭増産に比例して夕張の人口は漸増し，昭和18年には人口73,993名となり市制が施行された．敗戦後，石炭産業復興政策に伴い，昭和25年には99,530名となり，第8回国勢調査（昭和30年）には107,332名であった．

昭和34年に北炭は70周年を迎えたが，その年の夕張市の人口は116,278名で，これが夕張市の市勢の最高時であった．

2. 夕張新鉱開発

戦後の我国の石炭政策は，エネルギー革命の潮流の中で一般炭の炭鉱を維持することは困難であったため，原料炭の開発・増産方針を堅持していた．

三菱南大夕張は，この原料炭開発の波に乗ったが，北炭は夕張新鉱の開発着手期が遅れた．昭和43年にやっと新鉱開発本部が設立され，昭和45年10月に漸く開発工事に着手している．三菱南大夕張炭鉱は，開発資金の金額について国の肩代わりを受けたが，北炭夕張新鉱は肩代わりのチャンスを逸らした．

当時，萩原会長は夕張市の地域経済のため，沼の沢鉱区の開発構想を持っていたが，炭層が深部に賦存しガス量が多いため，開発に際しては賦存しているガスを坑外井によってガス抜きしたいと考えた．

当時の通産省両角石炭局長はこれに対応して，坑外井によるガス抜きを国が助成する方針を打ち出したが，北炭の技術陣は消極的で実現しなかった．

米国では，坑外井によるCBM採取の企業化が1990

*元夕張市地下資源開発計画委員　北炭OB

表1 夕張市の人口・炭鉱数・従業員数・生産高

年 次	人口(人)	炭鉱数	従業員数(人)	生産量(t)
昭和20年	74,665	6		1,734,300
昭和21年	68,523	6		1,223,050
昭和22年	82,123	7		1,594,500
昭和23年	92,577	8		1,658,100
昭和24年	97,077	8		1,802,911
昭和25年	99,530	8	19,451	1,990,715
昭和26年	100,537	8	19,398	2,247,802
昭和27年	103,083	10	19,551	1,939,152
昭和28年	105,536	14	19,555	2,111,419
昭和29年	107,343	15	18,009	2,400,391
昭和30年	107,332	15	17,294	2,254,313
昭和31年	111,398	16	16,647	2,666,495
昭和32年	113,534	16	16,820	2,770,568
昭和33年	114,239	17	16,936	2,215,279
昭和34年	116,278	17	17,204	2,963,160
昭和35年	107,972	17	16,027	3,296,804
昭和36年	111,608	17	16,273	3,445,087
昭和37年	106,804	15	13,974	3,273,654
昭和38年	101,669	14	11,265	3,962,944
昭和39年	100,292	13	10,813	4,029,855
昭和40年	85,141	11	11,025	4,035,845
昭和41年	84,078	10	11,155	4,264,227
昭和42年	81,453	9	10,567	3,997,191
昭和43年	79,577	8	9,993	3,739,122
昭和44年	76,330	8	9,466	3,850,534
昭和45年	69,871	9	9,617	3,761,698
昭和46年	70,503	9	9,737	4,007,254
昭和47年	67,624	7	7,706	4,208,747
昭和48年	57,958	7	6,474	3,301,720
昭和49年	53,652	6	6,675	3,127,075
昭和50年	50,131	5	6,290	3,173,203
昭和51年	50,167	5	6,296	3,363,771
昭和52年	48,663	5	6,082	3,291,443
昭和53年	47,027	4	6,029	3,006,354
昭和54年	44,613	4	5,655	3,175,917
昭和55年	41,715	3	5,202	2,423,774
昭和56年	40,829	3	4,940	2,236,355
昭和57年	38,568	2	3,141	2,055,876
昭和58年	35,190	2	3,094	1,845,004
昭和59年	33,544	2	2,950	1,833,600
昭和60年	31,665	2	2,796	1,528,060
昭和61年	31,406	2	2,567	1,709,790
昭和62年	28,596	2	2,446	985,310
昭和63年	25,921	1	1,142	748,000
平成元年	24,440	1	1,027	603,230
平成2年	20,969		0	
平成3年	20,752			
平成4年	19,956			
平成5年	19,202			
平成6年	18,535			
平成7年	17,116			
平成8年	17,340			
平成9年	16,785			
平成10年	16,211			
平成11年	15,821			
平成12年	14,791			
平成13年	15,115			
平成14年	14,719			

表2　人口の推移

年　次	世帯数	人　口			1世帯当り人員	人口密度(1km²当り)	資　料
		総　数	男	女			
明治24年	69	307	—	—	4.4	0.4	北海道戸口表
39年	4,052	18,142	10,079	8,063	4.5	23.8	公募（常住人口）
大正9年	10,840	51,064	27,340	23,724	4.7	67.0	第1回国勢調査
14年	9,855	48,697	26,193	22,504	4.9	63.9	第2回国勢調査
昭和5年	10,271	51,967	27,266	24,701	5.1	68.2	第3回国勢調査
10年	8,109	42,508	22,144	20,364	5.2	55.8	第4回国勢調査
15年	11,582	64,998	35,983	29,015	5.6	85.3	第5回国勢調査
18年	12,499	73,953	42,308	31,645	5.9	97.1	市制施行年
22年	15,141	82,123	43,812	38,311	5.4	107.8	第6回国勢調査
25年	19,359	99,530	52,337	47,193	5.1	130.7	第7回国勢調査
30年	21,218	107,332	54,850	52,482	5.1	140.9	第8回国勢調査
35年	25,156	116,908	59,416	57,492	4.6	153.5	最多人口（4月30日）
35年	23,042	107,972	54,892	53,080	4.7	141.8	第9回国勢調査
40年	21,070	85,141	42,525	42,616	4.0	111.8	第10回国勢調査
45年	19,862	69,871	34,682	35,189	3.5	91.7	第11回国勢調査
50年	15,944	50,131	24,650	25,481	3.1	65.8	第12回国勢調査
51年	15,732	50,167	24,791	25,376	3.2	65.9	9月30日
52年	15,520	48,663	24,078	24,585	3.1	63.9	9月30日
53年	15,193	47,027	23,297	23,730	3.1	61.7	9月30日
54年	14,553	44,613	22,078	22,535	3.1	58.6	9月30日
55年	14,992	41,715	20,715	21,000	2.8	54.8	第13回国勢調査
56年	13,794	40,829	20,350	20,479	3.0	53.6	9月30日
57年	13,309	38,568	19,170	19,398	2.9	50.6	9月30日
58年	12,427	35,190	17,438	17,752	2.8	46.2	9月30日
59年	12,062	33,544	16,662	16,882	2.8	44.0	9月30日
60年	12,152	31,665	15,628	16,037	2.6	41.6	第14回国勢調査
61年	11,653	31,406	15,570	15,836	2.7	41.2	9月30日
62年	10,786	28,596	14,137	14,459	2.7	37.5	9月30日
63年	10,421	25,921	12,729	13,192	2.5	34.0	9月30日
平成元年	9,983	24,440	11,854	12,586	2.4	32.0	9月30日
2年	8,791	20,969	10,078	10,891	2.4	27.5	第15回国勢調査
3年	8,887	20,752	9,986	10,766	2.3	27.2	9月30日
4年	8,726	19,956	9,555	10,401	2.3	26.1	9月30日
5年	8,534	19,202	9,207	9,995	2.3	26.1	9月30日
6年	8,319	18,535	8,867	9,668	2.2	24.3	9月30日
7年	7,593	17,116	8,127	8,989	2.3	22.4	第16回国勢調査
8年	7,997	17,340	8,307	9,033	2.2	22.7	9月30日
9年	7,814	16,785	8,035	8,750	2.1	22.0	9月30日
10年	7,652	16,211	7,724	8,487	2.1	21.2	9月30日
11年	7,548	15,821	7,550	8,271	2.1	20.7	9月30日
12年	6,878	14,791	6,952	7,839	2.1	19.4	第17回国勢調査
13年	7,408	15,115	7,192	7,923	2.0	19.8	9月30日
14年	7,294	14,719	7,000	7,719	2.0	19.3	9月30日

夕張市のウェブサイトより

年に成功している．この米国の坑外井によるCBM採取技術が，当時確立していれば，夕張新鉱のガス突出対策として効果があったのではなかろうか．

これはさておき，ドイツルール炭田各社は1960年代に産業不況による貯炭増に苦しみ，隣接する炭鉱間の合理化を進めるには，各社の各炭鉱を統合し1社で運営すべしとする所謂炭鉱1社案が叫ばれていた．

当時，日本石炭協会長の職にあった北炭萩原会長はドイツの現地を視察して，当時の石炭協会麻生副会長と共に石炭協会傘下の炭鉱会社を統合する炭鉱統一1社案を昭和42年に提唱した．通商産業省は両手をあげて賛意を表したが，某社の反対で実現しなかったと聞いている．当時，石炭各社はスクラップアンドビルト政策で構造不況に陥り莫大な負債を抱え，石炭協会は第3次石炭政策の負債の肩代わりを要請していた時であったため，石炭各社が統一会社になる事は社会通念としても望ましいことであった．

当時，比較的安定経営であった北炭が一肌脱ぐことに

驚く向きもあった．1社案が反故になった事が夕張新鉱開発を決意する発端になったのだろうか．知る術もないが，翌昭和43年から新鉱開発が始まった．

三菱南大夕張鉱の開発計画は100万トン/年，百億円と報じられた．夕張新鉱は，100万トン/年，150億円の開発計画と150万トン/年，300億円の二つの開発計画があり，後者に決まったと聞いている．夕張地区では，従来から一坑口の出炭実績は4,000トン/日が最高であったと記憶しており，最新鋭を誇っていた南大夕張鉱の実績から勘案しても，120万トン/年が1つの目安であっただろう．

開始された夕張新鉱開発は，開発途上でオイルショックに伴う諸物価及び労賃の高騰と，開削中に高圧の坑内水の出水に対処する防水工事で出炭開始時期が遅れ，開発資金は増加し，出炭開始は昭和50年6月であった．

折悪く，同年11月に幌内炭鉱でガス突出事故があり，同鉱が昭和52年10月に生産再開するまでの2年間，夕張新鉱は幌内鉱より従業員を単身赴任の形で一週間交代で受け入れた．しかし，現場で両鉱労使間のコンセンサスに苦労が多かったためか，目標出炭達成に至らなかった．

3. 北炭の再建と政治

昭和53年には，第2次オイルショックによる諸物価，労賃の高騰もあり，北炭は資金繰りに苦しんでいたが，その矢先，昭和56年10月に夕張新鉱でガス突出事故がおきた．この為北炭は，同年12月会社更生法の適用申請の已む無きに至った．直ちに保全処分が命じられ，保全管理人による運営となったが，負債総額は720億円とも1,150億円とも言われていた．

そのような中，昭和57年1月の何日であったか忘れたが，保全管理人である山根弁護士から小生に電話があり，山根喬事務所に行った．山根さんは誰からの紹介かは僕に言わないで，『昨日，夕張に行って坑内を見て来ました．北部の十尺層は良い石炭ですね．山ではあの十尺層の採炭をしたいようでしたが，加藤さんの意見を伺いたくて今日来てもらいました』との事だった．

僕は『新聞で，平安八尺層を採炭し一般炭として供給する計画がある事を知ったが，平安八尺層は清水沢鉱，平安鉱で原料炭として生産して来たので，夕張新鉱で平安八尺層が原料炭にならないのは可笑しい．夕張新鉱は原料炭を生産する計画で開発されており，新日鉄，日本鋼管から40億円の融資も受けており，国からは原料炭生産鉱として開発を認められ，多額の融資を受けているので，社会通念として原料炭として供給すべきである．仮に一般炭として供給するなら，原料炭価格22,660円/tに対し，一般炭は19,075円/トン（昭和55年全国平均）であり，手取りは年間50億円以上も減少する．十尺層のガス抜き対策を確立して北部の十尺層に採炭現場を移し原料炭生産するのが妥当と思う．当面，北部十尺層の採炭が許されないなら，平安八尺層を採炭し，原料炭として供給するのが妥当と考える』等，概略以上の意見を申し上げた．

昭和57年，庭の残雪も消えた頃，時日は忘れたが，岩見沢市の望月会計事務所から池畑（夕張事務所）さんが質問のため来宅された．誰からの依頼か説明無く質問が始まり，夕張市域に露天掘りの可能箇所はないか聞かれた．僕は，『旭町の居住地をのぼりつめた渓谷に露頭がある．夕張鉱業所勤務の折，現場を知っているが，旭町水源地の涵養林内にあり，実収炭量は少ない事を知っているので，夕張新鉱を維持するだけの生産量は期待がもてない．又，高松露天坑は天然記念物保全のため露天掘りの拡張は望ましくない．そもそも露天炭の埋蔵量は少ないので，期待しないほうがよい』旨答えた．

その後，夕張新鉱から夕張市に20数億円の融資要請がある事を仄聞したので，当時の夕張市長に『北海道副知事の新谷昌明さんは，商工部勤務の折，北海道石炭対策として中小炭鉱に融資をしたが，閉山が迫った炭鉱に融資した額は莫大になり，返済されず困ったと述懐されていた事を知っている．夕張新鉱に融資すれば同様運命を背負わされるだろう．しかし，融資は断れないと思うので，土地や鉱区〈石炭・天然ガス〉等の物権を取得しておくのがよいのではないか』と，概略以上のような話をした記憶がある．

昭和57年4月には北炭夕張の会社更生手続開始決定に伴い，三井鉱山の監査役大沢誠一氏が管財人に決まった．大沢さんは昭和34年に日本労働史上最大と云われ，総資本対総労働の対決と報じられた三池大争議の折，現地第一線で苦労された労務担当で，大争議に立ち向かって解決された威大な存在であった．

対する労働側を指導したのが，北炭平和出身の原茂炭労委員長であったので，大沢さんは北炭夕張の管財人となり複雑な心境であったと思う．

昭和57年10月の政府・炭労交渉で安部通産大臣が『政府としては石炭業界による新会社によって，早急に再開発が行われる結論を出すことを要請する』旨の発言を行ったと報じられた．これを読んで私は次のように予感した．

石炭協会は第一次負債肩代わりで1,000億円，第二次850億円，第三次には645億円の肩代わりを国に要請し，三菱南大夕張の開発資金額まで含めて実施されたので，夕張新坑の負債については開発時の投資総額300億円とオイルショックによる物価労賃による高騰及び坑内異状出水の防水工事による支出を併せた負債について，石炭

協会から通産省に第四次肩代わりが申請されるだろうと政府は覚悟していたのではなかろうか，と。

しかし，石炭協会は夕張新鉱の負債肩代わりの申請をしなかった．

三菱南大夕張の開発は順調に推移し，計画出炭の目標に達成するほか炭鉱ガス抜きに成功し，ガスタービン発電で自家発電すると共にメタノール工場を建設し，メタノール生産を行う等黒字経営であった．にも拘わらず第三次肩代わりの枠に入っていた．何故，夕張新鉱の負債については肩代わりの申請が行われなかったのだろうか？

昭和57年11月に鈴木内閣は中曽根内閣に交代し，通産大臣は山中貞則氏となった．昭和58年5月，山中大臣は北海道と石炭協会の第3セクターによる新会社で再開発を行うと発表したが2週間後，突然辞任に追い込まれた．

昭和58年4月の統一地方選挙で，北海道知事に革新候補の横路孝弘氏が当選した．知事は夕張新鉱の再開発を公約していたので積極的に活動したが，通産省と石炭協会は知事提案を拒否した．

昭和58年6月，山中大臣に代り宇野宗祐氏が通産大臣となり，同年7月11日に夕張新鉱再開発断念が発表されている．

炭鉱住宅融資で問題を起こした田中角栄さんは，以来炭鉱嫌いになったと仄聞している．中曽根さんも何故か石炭業界に冷たかった．福田赳夫さんは，エネルギー・セキュリティの立場から石炭鉱業を大切に育ててきた．福田，中曽根両氏は群馬の選挙区で犬猿の仲であったと言われており，有力政治家の石炭業界に対する考え方や，軋轢が夕張新鉱開発に影響したのだろうか．

4. 夕張復興への努力

夕張市は昭和57年の北炭新鉱の炭鉱災害に伴う閉山・北炭の倒産後，ポスト石炭の地域振興策を策定する必要にせまられ，地下資源開発計画委員会を設け，振興策策定作業を開始した．

委員会は温泉開発とCBM（炭田ガス）開発に取組み，温泉開発は北海道の助成を受け温泉掘削に成功し3ヶ所の温泉をオープンしたが，炭田ガス開発は実現していない．

炭田ガス開発については，夕張市は昭和62年の地下資源開発委員会報告に基づいて，関係官庁及び諸団体に要請を重ねていた．その結果，平成3年に通商産業省は国内CBM資源可能調査をNEDOを通じてJCOALに委託した．

これを受けてJCOALは，平成10年9月に石狩区域についての調査成果を発表，開発有望区域が夕張市域にある事が判明した．

処が翌年11年6月に資源通信社は，『我が国の炭鉱の採炭に伴って湧出するメタンガス回収は技術的に世界に冠たるものとなった．しかし，炭層ガス開発に対する見解として地表からの試錐によるメタンガス開発は捨てざるを得ない』と報じた．

この見解が，夕張市域の炭田ガス開発を阻んだと思われるが，この見解は，恐らく石狩炭田全域のガス集積度が9,580万m^3/km^2で，夕張地区以外（石狩北部区域）のガス集積度は7,460万m^3/km^2に止まることを根拠にしたものと思われる．

しかしながら，夕張地区のガス集積度は15,480万m^3/km^2にのぼり，石狩炭田平均を大きく上回る．夕張地区には炭層メタンガス（CSG）として240億m^3が賦存していると推定される．

この他，夕張地区には，夾炭層の上下盤の化石水に共存するメタンガス（炭田ガスCBM）が賦存する区域があり，その量は恐らく150億m^3以上と推定される．

加えて，平成11年に石油資源開発（SK）が清水沢で試錐したその折，地表深度1,000 m, 3,000 m, 4,650 mの三箇所で石狩層群の石炭に逢着し4,650 m地点で掘削中ガス圧が強く掘削不能となり，目的の白亜紀層の審査はあきらめて打ち切っているが，この石炭層群のガスは勇払ガス田と同じ層群で，この清水沢区域には勇払に匹敵するメタンガスが賦存するものと推定されるのである．

かくして，夕張地区には恐らく可燃性天然ガスとして数百億m^2の賦存が推定され，回収率を50%としても250億m^3～300億m^3のメタンガス生産が期待できるのである．

最近は，CO_2と炭層の関係が注目をあびている．CO_2を炭層に吸着させてCO_2の空中排出量を削減させながら，炭層からメタンガスを湧出させる研究で，この研究が実を結ぶとメタンガス回収率は20%程度上昇すると見込まれ，効率的なメタンガス生産と地球温暖化の効率的な対策が可能となると考えられているのである．

石炭を固体として消費することは何れ抑制される日が来よう．地下に賦存する炭層を天然ガスとして採取し，エネルギー資源として供給する時期は近いと考える．夕張はその最適地にあるのである．

夕張が，メタンガス生産によって日本のエネルギーの重要な供給基地として復活することを期待して止まない．

＜補遺＞我が国の石炭鉱業の歴史と石炭政策

我国の石炭鉱業は200年前に始まり，出炭統計は，明治7年から始まった．

明治7年は21万トン，明治36年1,000トン，大正元年

1,964万トン，大正8年3,100万トンと順調に増加していたが，この年から数年間は第一次大戦後の長期的不況で出炭が低迷した．

その後，昭和6年には満州事変後の軍備拡張の波に乗って石炭市況は再び活発になり，第二次世界大戦のもとで増産時代に入り，昭和15年には5,630万トンの最高記録を出した．

終戦の昭和20年は，戦前の半分の2,230万トンになり，石炭不足が深刻となって，翌年末に特定物資の傾斜生産方式が実施され，3,000万トンが昭和22年の生産目標となった．

昭和23年には3,480万トンとなり，昭和24年には3,730万トンに上昇したが，昭和24年9月には貯炭量が555万トンに達したため，200以上の炭鉱の休廃止が行われた．

昭和25年には，朝鮮動乱で一時的なブームを呼び，石炭は蘇ったが，動乱終結と共に合理化に迫られ，昭和27年に炭労は64日の長期ストを行った．これが需給の混乱を招き，重油の輸入を促進する一因となった．

我国石炭鉱業は昭和20年までは戦争によって活気を呈し，昭和20年の敗戦後は産業復興の柱として（三池，夕張両炭鉱は天皇陛下皇后殿下のお巡幸で激励のお言葉を賜った）石炭鉱業は繁栄したが，昭和30年代の中東石油へのエネルギーシフトによって国内炭は斜陽化した．

昭和30年代は石炭企業の合理化がさらに強化され，ながれ閉山が社会問題化して，石炭対策が大きな政治課題となり，昭和30年に石炭鉱業合理化臨時措置法が公布施行された．

昭和31年のスエズ戦争を機に神武景気のブームがおこったが，僅か2年間で不況に転じ，32年末に策定された昭和50年度7,200万トンの石炭生産計画は夢に終わった．

昭和33年以降エネルギー革命が進行，昭和34年には5ヶ年間で1,200円の炭価引き下げが決定された．出炭は，ほぼ5,000万トンの水準であったが，炭鉱数は，昭和31年の843山から昭和39年には263山に激減し，労務者は28万人から11万人に減った．この間，月一人当り能率は14トンから36トンになったが，炭労は，合理化反対の大衆運動を展開し，組合は33年に保安放棄ストを宣告したため，会社側はロックアウトで対抗した．

この流れの中，石炭政策に関する世論の関心も高まり，昭和37年10月に石炭鉱業調査団答申が出され，昭和38年から一次石炭政策が実施された．この政策は石炭鉱業の崩壊がもたらす地域経済の混乱の防止を訴え，生産規模5,500万トンを維持するものであった．

しかし，石炭斜陽化のムードと労務者の離山ムードが高まって，計画出炭の維持は困難となり，昭和39年12月の第二次答申に基づく第二次石炭政策が昭和40年から実施された．第一次から第二次政策の出炭は5,100万トンから5,000万トンを維持できたが，第三次策から第五次策の実施によって，スクラップを基調とした需給の縮小均衡と石炭企業の経営改善対策にあたり，第三次策の昭和42年には，約1,000億円の第一次肩代わり安定補給金交付等を実施した．第四次策の昭和45年には，約850億円の第二次肩代わり実施と特別閉山交付金制度を創設し，出炭目標は明示しなかったため，出炭は4,350万トンから約2,700万トンに激減した．

昭和45年の大気汚染防止法施行に伴って，電気事業連合会は窒素酸化物を許容範囲に抑える事は至難となり，石炭火力による発電を止めた．この結果，一般炭生産量2,500万トンのうち2千万トンの需要がなくなり，一般炭の需要は電源開発石炭火力と産業自家発電及び暖房用等500万トンにとどまった．この需要激減に伴って，太平洋釧路・九州松島の2炭鉱は閉山の危機に瀕した．松島は採掘区域を池島に転じ原料炭生産となったが，太平洋釧路鉱は原料炭の生産はできないため，電源開発磯子と高砂へ需要増を要請すると共に，暖房用炭の売り込みで市場拡大を努め生き残りを図った．

運良く昭和48年にオイルショックがおきて，国は国内炭鉱から電力用炭を供給する方針をとったが，既に閉山炭鉱を再開する事は困難であったため，電力各社は政府に急遽電力用炭の輸入と海外炭開発を働きかけた．

当時，窒素酸化物排出抑止方法が確立したとは聞いておらず，理解し難い事であったが，とにかく太平洋，松島両社の閉山の危機が去った．

第五次策は昭和47年6月に答申が出て645億円の第三次肩代わりの実施，運転資金対策，炭価改定ルールの確立，各種補助率融資比率の引上げが行われたが，出炭は2,000万トンから1,860万トンに縮減した．昭和48年のオイルショックに対応するため第六次策では国内炭生産の維持・国内炭開発促進が図られたが，国内石炭開発は難しく海外炭の開発輸入の円滑化が図られた．

第六次石炭政策の実施中，北炭夕張新鉱ガス突出がおこった．第六次策中は概ね1,850万トン前後の出炭が1,750万トン弱に落ちた．昭和56年8月第七次策の答申が出された．政府は石炭鉱業の自己努力，政府の適切な指導と助成及び需要業界の協力により，石炭鉱業の自立を目的とする事を基本に昭和57年度が実施された．

第七次策で1,740万トンから1,645万トンに減少した．昭和61年11月に第八次答申が行われた．この答申の国内炭の生産を段階的に縮小し，最終的には概ね1,000万トンの供給規模とし，これに伴う地域経済雇用に及ぼす影響をできるだけ緩和する事の必要性を述べている．

この時期，中曽根首相は，『国際協調のための経済構造調整研究会』を発足させ，前川レポートとして報告さ

れている．昭和61年4月7日に報告された前川レポートには，産業構造の転換と積極的産業調整の推進と云う事で『石炭鉱業については，地域経済に与える深刻な影響に配慮しつつ，現在の国内生産水準を大幅に縮減する方向で基本的見直しを行い，これに伴い海外炭の輸入拡大を図るべきである』と記されてある．

このレポートに先立って，来日したレーガン大統領が日の出山荘で中曽根首相との会談し，米国から日本への石炭輸出が昭和49年の2,500万トンから逐年減少し1,000万トン台に，そのうち原料炭は1,000万トンから700万トンに減少しているので，米炭の日本への輸入量を増量するよう申し入れがあった．この結果，国内の原料炭の生産を抑制する事になって，我国の原料炭炭鉱は平成2年で壊滅したのである．しかしレーガン大統領の申し入れに拘わらず，我国の鉄鋼業界は，その後も豪州，カナダ，旧ソ連中国等の安い原料炭を輸入し，米炭の輸入増加はなかった．中曽根首相のレーガン大統領への約束は，空手形になったようだ．

昭和61年の第八次策以降平成3年度までに5つの大手炭鉱が閉山し，八次策の最終年度には1,258万トンから793万トンとなり，1,000万トンラインを大きく下回った．

その後，合理化努力にもかかわらず為替レートが円高に進み海外炭のコストが低減し内外炭価格差が広がり，需要業界の引き取り義務軽減要求，石炭対策財源の在り方についての関係方面からの問題提起，石炭補助金等をめぐる国際的な議論の厳しさ等，国内石炭鉱業を取り巻く環境は厳しくなった．

この様な状況で平成4年度以降の石炭政策の在り方が検討され，新しい石炭政策が平成4年度から実施された．この新しい石炭政策は1990年代を国内石炭鉱業の構造調整の最終段階と位置づけ，国民経済的役割と負担の均衡点までは経営の多角化・新分野開拓を頼りつつ，国内炭生産の段階的縮小を図る事が必要と述べ，平成4年度760万トンから平成9年度には397万トンにまで縮小する計画であった．この石炭政策は2001年（平成13年）で終了し，太平洋炭鉱の閉山により，我が国における石炭産業はその幕を降ろしたのである．

この我が国石炭産業が最終局面を迎えつつあった平成11年の石鉱審に於いて，現存する石炭会社は2002年以降，当時の炭価15,000円/トンを12,000円/トンにまで引き下げる旨表明したが，電事連は2004年中に10,000円未満の水準にすべきであると主張した．

資源エネルギー庁によれば，当時の水力発電コストは13円/KWhであるのに対し，石炭火力・石油火力ともに発電コストは10円/KWhであった．即ち，国内炭価格15,000円であっても発電コストは水力より低く石油火力と同程度であったので，石炭価格が15,000円であっても不都合はなかったはずなのである．今もって電事連の主張は理解に苦しむところである．

ドイツをはじめ欧米先進国は，国内炭と国外炭との炭価差が3倍以上であっても，エネルギー・セキュリティ上，依然として国内炭鉱を維持している．

我が国の電力業界が，大気汚染を理由に国内炭を締め出しておきながら，昭和48年のオイルショック後は，あわてて海外の安い石炭を輸入したため国内炭鉱が維持できなくなった事は先に述べた．

欧米先進国と我国のエネルギー・セキュリティに対する考え方には大きな開きがある．

中国を始めとするアジア諸国のエネルギー使用量急増による，世界のエネルギー需給構造の変化を目の当りにして，日本においてエネルギー・セキュリティについての議論が深まること，そして夕張市域に賦存するメタンガスのように我が国に埋もれているクリーンエネルギー資源の開発が，一日も早く開始される事を期待したい．

談　話　室

クラーク博士／ビフォアー・アンド・アフター・イン・ジャパン

熱　田　善　男*

Dr. William Smith Clark before and after in Japan

by Yoshio ATSUTA

ボーイズ・ビー・アンビシャス

Boys, be ambitious.

Be ambitious not for money or for selfish aggrandizement.

Not for that evanescent thing which men call fame.

Be ambitious for the attainment of all that a man ought to be.

これがクラーク博士の別れの言葉だそうです．明治10年，1877年，4月16日，8カ月の札幌農学校の教頭職を終えて帰国の旅についた日，学生全員と教授全員それに行政職も含み，総勢約30名が馬に乗り，札幌から20km程にある島松村まで約2時間かけて見送りにきたのでした．島松村は本土からの入植者の村．札幌からの南回り道路に沿って駅逓が設けられていた．駅逓は書状や荷物がここを中継してつぎへ輸送されるのだが，人馬の休憩所や宿泊所も兼ねている施設である．

一行はその駅逓で離別の昼食会をしたのだった．

クラークは教え子一人一人に握手を交わしながら座をまわる．それがおわるやヒラリと馬にまたがり，皆のほうを振り向いて，「ボーイズ・ビー・アンビシャス」の言葉を発して，そして馬の腹にムチをあて雪どけの泥道を，教え子で通訳の堀誠太郎と，森のかなたに消えていった．

この場所は国指定史跡島松駅逓所として保存されている．

この別れの言葉を，現在語に意訳してみました．

きみたち，大きい夢をもってくれ．

金銭や名声にとらわれないで，

人間の本分を尽くしてほしい．

この別れの言葉は，「ボーイズ・ビー・アンビシャス」だけのが伝承されている．しかし，教え子の一人，大島正健は，別れの場にいた一人として，この時から約50年後に，次のように記している．

「青年よ，この老人の如く大志を抱け」と叫ぶなり，鞭を馬腹にあて，さっとばかりに行ってしまわれた．

同じ大島がこの時からさらに10年後に書いた別れの言葉は，「ボーイズ・ビー・アンビシャス」となっている．

つまり大島はクラークの別れの言葉を2通りあげているのである．

明治27年札幌農学校学芸会誌には「この老人のごとく」が入っているのが出ている．

他にもいろいろの説があるのである．

冒頭に挙げたのもその一つである．現在のように映像と音声が残っておれば正確なこともいえるが，どれが真実だったかは，誰にもわからない．しかし，人間の記憶の保存性からいえば古いものが正解だともおもわれる．

しかし筆者の熱田には，「ビー・アンビシャス」だけのには，功名心とか欲深さを感じ，世俗の成功にむかって野心を持つようにととれて，クラークの精神とは離れているようにおもえ，強い違和感を持つ．

クラーク博士は日頃の学生との接触の場で，冒頭の全文をよく言っておられたのではないかと想像する．だから「アンビシャス」とだけ言われたのかも知れない，が全文が別れの言葉として教え子達の心に届いたのだろう．そして，今になっても力強く伝わっているのだろう．

「アンビシャス」といいながら，「金銭や名声にとらわれないで，人間の本分を尽くしてほしい」とつづくのは，とても気持ちのよい言葉である．

*村上研OB（S34年卒），新日鉄OB
元・文京学院大学講師

またクラークはキリスト教の人であるが，キリスト教臭い言葉をださないで，人間の道徳の言葉としてだしているので次元の高いものになっている．

生い立ち

クラークは，1826年7月31日，マサチュセッツ州アッシュフィールドという丘に囲まれた静かな村に生まれた．父は開業医アーサトン・クラーク，母は後妻のハリエット．土佐の漁師ジョン万次郎（15歳）が難破して，アメリカ捕鯨船に救助されたのが，1841年であり，日本人の移民第1陣がハワイに着いたのが1868年であるので，当時のアメリカでは，日本という国が地球上に存在することも殆どの人は知らなかった時代です．

父の先妻に3人の子どもがいたが29歳でなくなり，後妻のハリエットは，クラークのあと女児を3人もうけている．7人の異母兄弟姉妹の家族であった．

クラーク少年が8～9歳の時，父はアッシュフィールド村から約10km離れているイーストハンプトンという町に引っ越した．

開業医の父がこの町の有力者ウイリストン家をクライアントとし，やがて家ぐるみ親交をもつようになる．

ウイリストン家の当主サムウエルは，実業家であった．元々は牧師を志望だったので，事業で得たお金を社会のために積極的に高額の寄付をしていた，特に教育界を対象にしていたようである．地元のイーストハンプトンの高校もその寄付により設立されたものであった．

サムウエル夫妻は4人の子どもを授かったが，4人とも亡くしている．そして4人の養子を迎えている．その1人，クラークの実母と同名の，ハリエット嬢は，クラークとは6歳年下で，家族ぐるみのつき合いのなかで，幼なじみとして成人していく．

クラーク少年は，活発で元気のよい子どもだった．

「私はいつでも誰よりも速く走り，幅跳びでも高跳びでも誰にも負けず，喧嘩は一番強く，泳ぎも一番うまかった」と，後年，札幌農学校の学生たちに述懐しているが，なにをするにも人に負けたくなく，練習を一生懸命にして，本番では必ず勝つのだと頑張ったのだった．

彼が育ったマサチュセッツ州の西部は丘陵地帯がひろがり森林が豊かで，好んで戸外を動き回り自然に親しんで育ちました．そのおかげで，自然に鍛練ができて強靱で敏捷な肉体ができあがりました．

15歳で，ウイリストンの寄付でできたウイリストン高校へ，1期生として入学します．1841年のこと．

ジョン万次郎が救われた年で，この捕鯨船はマサチュセッツ州のニューベドホードを母港としており，帰港時には新聞に載ったはずで，イーストハンプトンにも伝わり，高校生たちの話題になりました．クラークも初めてジャパンやジャパニーズという言葉を聞いたのですが，将来そこと縁ができるとは夢にもおもいませんでした．

高校時代．妹と一緒に山野を歩きまわり花を採集したりした．採集した植物の標本製作技術やその保存技術を身につけていき，植物の生態にも造詣を深めていきます．

また近くの鉱山へ鉱物を探しにも行く．この地の自然環境が植物の採集や鉱物の探索にむいていたので，学校での勉強の他に植物学と鉱物学に強く興味をもちます．

大学生活

イーストハンプトン町から20kmぐらいのところのアマースト市にあるアマースト大学に入ります．マサチュセッツ州といえば州都はボストン，全米で一番の学園都市でもあります．アマーストはボストンからは150km，当時の駅馬車では17時間の距離にある，静かな地方都市です．後に鉄道が開通してからでも汽車で5時間かかりました．

歴史的にはアマーストは農業を主とし，コネチカット河流域の東端の低い丘陵地で流域全体が一望でき，その風景の美しさを，住民達は誇りにしていました．そして樫，松，楡といった樹を大切に育てつづけてきました．その樹木の見事さでも広く知られていました．

アマースト大学の設立は，1821年で，この大学が中心となり，都市全体に知的・文化的活力が満ち満ちていて，アメリカ東部の学者や知識人をひきつけていました．

ボストンをアメリカの京都と考えると，アマーストは奈良とでもいえる都市環境を備えていました．

大学生活は順風満帆とはいきませんでした．父は開業医で経済的にはまずまず．が，子どもが多く生活費がかかり，息子のクラークに十分な学費を送ることはできません．母が家計をやりくりして学費を捻出．

一時は，大学をやめることも考えたようです．

幸運が舞い込みます．クラークは，高校時代からの鉱物採取を大学へ入ってからも続けていました．博物学の教授がクラークの集めた鉱物標本のなかの価値あるものを教材用に高額で買い上げてくださったのです．2年生の中頃です．その後も教授の指導もあって鉱物採取をつづけて，貴重なものを見つけるようになり，結局，鉱物標本を買い上げてもらったお金が，学費の貴重な財源になり，危機を乗り切ることができたのです．

大学生活は楽しいが，ハード．しかし，とても有益．学友との友情が育ち，ながく続きそうである．学問の課題はディフィカルトで，レポートはきついが，満足に完成したときの感激は，ほんとうにすばらしい．大学生になるといろいろ誘惑に負けないように自己規制も必要，学問以外にもしたいことや気になることも多く時間のや

り繰りには大変です．しかし，知識を身につけ，理解力や判断力を磨き，規律ある生活を身につけており，将来は必ず役に立つはずです．

こんなふうに，クラーク青年は家族宛の手紙に書いています．

学生たちのエピソード．学生寮の窓から水を捨てて通行者をびしょ濡れにしたとか，石やカボチャが飛んできて寮の窓ガラスを割ったとか，部屋の鍵穴に物を詰め込んでみたり，若いエネルギーを持て余しているようでもあった．クラークは自身は悪戯には，積極的には，参加しなかったようです．

メイフラワー号

メイフラワー号がプリマス沖についたのは，1620年．押し詰まった12月26日でした．102人のピューリタンが，180トンの3本マストの帆船で自由の国を求めてきたのでした．このプリマスはマサチュセッツ湾にあるのです．プリマスに入植した人々は，過酷な冬を越すのがたいへんで何人も死者が出ましました．信仰の犠牲になったのです．

この歴史の地を抱えているマサチュセッツは新教の土地なのです．

クラーク家は新教徒で，彼は幼児で洗礼を受けていました．クラーク青年が本当に信仰に目覚めるのは，アマースト大学時代だったのです．学費問題も一段落して，青年の感性が人間の在り方に，いろいろおもいを巡らせます．母親が特に信仰心があつく，いつもお祈りをしていました．それを見てきたので，やはりキリスト教の信仰にいちばん関心を持ちました．アマースト大は元々は牧師養成のために設立され，当時は学内で信仰のリバイバルの動きも活発で，それに触発されクラーク青年は，祈りを捧げてみますが，宗教的高まりには達することができず，教授や友人，牧師や宣教師などに信仰について教えを受け討論し疑問を出し，数カ月，悩み苦します．

そして，とうとう，神の啓示をうけます．ある夜，熱心に祈りを続けていると，宗教的興奮におそわれたのです．そして，神の存在をかみしめることになります．

彼の場合は，プリミティブな宗教心ではなく，科学学徒として，学問を究めるほど自然の仕組みの不思議さに感じ，創造主の偉大さにも打たれたのでした．彼のキリスト教は道徳律であり，自己規制のために聖書の教えを大切にしていくことになります．

ちょっと道草．メイフラワー号の102人の中に，トマース・クラークという一等航海士がいました．この人はプリマスに永住して98歳の生涯を終えたと記録されています．この人がクラーク家の先祖だという説があるようです．

本物の信仰心を獲得したクラークは，勉強に励みます．植物学・鉱物学・化学の3分野を学び研鑽します．

卒業時のスピーチで当時の社会ではニセモノ扱いされていた「錬金術師」をテーマにとりあげます．

世人は錬金術師を，インチキだと，軽蔑しますが，自分はそうはおもわない．貴金属を化学反応を通じて作る夢に向かって挑戦してきました．失敗しても失敗しても険しい道に飽くなき努力を一生涯続けました．大抵は熱心で誠実な人柄で，職業人としてはまともな人でした．錬金術が化学に対して貢献した事は多大で，やはり，失敗の経験を乗り越えるときに，いろいろ新しい発見発明をしてきたのです．科学とは過去の学説をただ守るのではなく，新しい発想と試みをもとに，その人ならではの新しい発見発明することであるのです．こんな趣旨で，錬金術師を肯定的にとらえて，発言しました．

このように，夢を持ち，勤勉と努力をして，自分独自のことを作り上げることが，アマースト大学での4年間に，かれの行動規範として出来上がってきたのです．

全米の学生の優等生（$\phi\beta\kappa$：ファイ・ベータ・カッパ）の一人に選ばれます．

ファイ・ベータ・カッパとは，ギリシャ語で，Philosophia Biou Kubernetesの頭文字をとったものです．英語では，Philosophy the Guide of Lifeです．

これは，優等生で組織する米国最高の学生友愛会で，設立は1776年と古く，伝統のあるものです．その名誉あるメンバーに選ばれたのでした．

そして卒業．母校ウイリストン高校の教師をします．

目的は世界の科学の中心であるドイツで学位を取るための留学費を貯めるためです．約2年間高校教師．ウイリストン家のハリエット嬢が同時期に同高校の生徒として在校．

ドイツへ留学，ゲッチンゲン大学へ入ります．あの大数学者ガウスがまだ存命でこの大学の終身教授として在任されていました．

さすが，ドイツの有名大学，諸施設も堂々としてその内容もたいへん充実しており，理想の学問環境でした．ここで，2年間，朝早くから研究室に出て研究と実験に励み，下宿へ帰っては遅くまで勉強をしました．またキリスト教にも今まで以上に関心をもち，教会へも熱心に通いました．予定の2年間で，化学の博士号を取得します．論文は「隕石中の金属の化学構造に関する一研究」でした．

この学位論文のくわしい内容はわかっていませんが，表題から推測すると，隕石の金属組織学的な研究ではなかったかとおもいます．そして，帰国．

アマースト大学の教授

母校で教鞭．26歳，1852年．この同じ年にストー夫人の「アンクル・トムの小屋」が刊行され，大評判になった．「オールド・ブラック・ジョー」の作曲者フォスターは，クラークと同い年で，この時期は，フォスターの歌が全米で歌われていました．

東部の知識階級の一人として人種問題には強い関心をもったはず．

1852年，ウイリストン家の養女ハリエットと結婚．幼なじみじみから育んできた愛を完成しました．2人の愛のデュエットは11人の子どもをもうけることになります．

閑話休題．残念ながら3児は早世しましたが，あとの8人は長寿に恵まれます．101歳を筆頭に，一番若死にした人も77歳でした．

アマースト大学では，博士の学位を持った教授は，数年間は，彼1人でした．教授として新風を吹き込みその活躍の他に，新任とはおもえない実務面での手腕も発揮していきます．

例えば図書館建設のための募金活動の責任者になると，それまでめども立たなかったのが，僅か4年間で目標額を集めてしまいます．彼の「精力的であきらめない」活動のおかげでした．

動物標本館の設立委員に任じられると，定年間近い他の二人の委員を補佐し実質的には推進役を果たします．

次のような事実も残っている．

科学について一般市民を啓蒙しようという企画を大成功させている．

1854年のクリスマスの日のことで「寒さ，その源，本質およびその影響」というポピュラーなテーマでした．炭酸ガスに高圧をかてけ液化し，さらにドライアイスにまでして見せ，このプロセスを平易な素人にでも内容をよく理解させるような上手な話をして，たいへんな評判になった．

このように，日常の仕事の他にいろいろ新しい事に常に関心を持ち，持つだけではなく，実際にやってみて，難なく成功させる，そんな力量をもっていた．

また，先輩であろうと一般市民であろうと，たちどころに心を開き，よい人間関係をつくり，理解を深めることが出来る人柄だった．

体育・教練など，体を使うことは，小さいときか好きで得意でした．馬については特別でした．当時は，馬が乗り物なので男子は馬術は誰でも身につけていたが，クラークは特別に好きだった．高校時代から始めて，アマースト大学の学生の頃は，荒っぽい乗り手だと有名だった．スピードも目茶苦茶，曲乗りもうまく，現在風にいえばオートバイ狂の若者のようなところがあった．

クラーク教授は，学生から好かれ，スポーツも上手で，夫婦も円満で子宝に恵まれ，奥さんの実家はお金持ち，物心両面で安定していました．町の人達からも注目と尊敬の的でした．また，面白くインパクトのある話をする人だと社交界でも有名でした．

南北戦争に参戦

1860年奴隷制に反対するリンカーンが大統領に当選，奴隷制存続を主張する南部11州が合衆国から離脱．南北戦争が始まる．

東部の知識階級は，奴隷制に批判的であったが，35歳の大学教授のクラークが，少佐として北軍に志願するとは，世間の人には想像もできないことだった．

しかし彼を良く知る人達には意外でも何でもなかった．いつも新しいことに挑戦するクラークの精神からすれば当然のことであった．

たいへん勇敢で優秀な指揮官で，最初の頃の戦闘で数々の戦功で，中佐へ，そして大佐へと昇進しました．さらに大きい殊勲をあげ准将に推挙されます．戦況が段々北軍に有利になり，あとは持久戦で決着をつけるような状況に入ると，戦争に関心を失い，将軍に昇進するのを待たず，大佐のまま辞めたのでした．20カ月兵役に従事したことになります．

大学新設／学長への道

アマースト大学に復職したクラーク教授には，学者としての環境は戻ってきませんでした．

南北戦争の凱旋将校として市民から祝福され大学でも帰還報告会を開催され，いまやアマースト市では知らない人がないぐらい有名人になってしまいます．

そのころ，州立の農科大学を誘致する運動があり，クラーク教授はその中心人物させられます．そして州議会議員も3期6年つとめます．大学の場所はアマーストに決まり，その準備にも精力を注ぎます．

開設準備期間にこの大学の教授に任命され，スタート直前に学長に任命されました．41歳でした．

1867年10月2日，教授4名，学生約50名，校舎3棟という，ささやかな規模で出発しました．これが，マサチュセッツ農科大学です．

実習を重要視して，労働作業もかみして，軍事教練も取り入れました．理論と実践を兼ね備えた学生を育てていきます．

熱意を持ち，平易に丁寧に，学生と同じ目線で，教育をしていきます．やがて，州内にマサチュセッツ農科大学の行き方が知れ渡るようになり，クラーク学長の評価は上がっていきます．

この評判が，日本新政府の黒田清隆の耳に入る．当時，黒田は北海道開発のために設立された北海道開拓使の長官であった．開拓使仮学校札幌校は，1875年・明治8年に，設置された．黒田は進取の人，アメリカの農務長官ケプロンを顧問に雇うぐらい力もあり魅力もあった．

ケプロンの推薦で，クラークを招聘することにしたのだった．

日本／札幌へ

1876年，クラークは大学を，1年間，休暇で休んで日本へ来る．

東京での用件を済ませて，札幌入りは，7月31日，ちょうど，クラーク50歳の誕生日でした．マサチューセッツから連れてきた教師3人と，日本人1人，一緒に，小樽から騎馬でした．

クラークと教師の1人が札幌の中央通りを馬で疾駆してきた時は，肩を並べての競り合いで，クラークの乗馬ぶりはとうてい50歳を迎えた人とは見えない姿だった．

僅か8カ月の札幌滞在で，札幌農学校を立ち上げて，日本の教育の歴史に残る大きい成果を挙げたのである．

明治10年，1877年，4月16日，教頭職を終えて帰国の旅についた．

冒頭に書いたように，学生全員と教授全員それに行政職も含み，総勢約30名が馬に乗り札幌から20km程にある島松村まで約2時間かけて見送りにきた．

「ビー・アンビシャス」の言葉を残して，馬で雪道のかなたに去っていったのである．

新しい企画

クラークは，帰国して，マサチュセッツ農科大学学長に復帰する．しかし，それも束の間．1879年，52歳の時，学長を辞めて，世界一周洋上大学の企画に参加する．これは，3000トン級の鋼鉄製蒸気船で，世界一周の旅行と船上での講義を組み合わせたもの．

ニューヨークを出港して，ヨーロッパから中近東，インド，東南アジア，中国各地に寄港．後は長崎，大阪，横浜，東京．ハワイ諸島を経て，サンフランシスコへ．最後はニューヨークまでは，列車で大陸横断を．

教授陣はクラーク学長の他に10人．船上講義は，天文学，数学，航海術，化学，物理学，建築学，考古学，地質学，鉱山工学，博物学，近代ならびに古代各種言語，歴史，地理，蒸気船工学が開講されることになっていた．

ハイテク・ハイタッチ，時代の最先端を行く企画が，クラークの心に響いたのでした．

しかし，生徒募集がすすまず，計画を休止をして再起を図ります．そんな時，中心人物が急死します．その後，クラークが引き継ぎ，精力的に事後処理にあたり，あたらしい魅力的な企画を付加して，再募集しましたが，予定の生徒数が集まらなかったのです．企画は優秀だったのですが，参加費が高かったのが原因だったようにおもえる．

よい企画だから売れるはずだという武士の商法で，マーケットを見る目がなかったのですね．

おおきい挫折

洋上大学の関係でニューヨークで人に知られるようになり，ある男が近づいてくる．「鉱山新聞」を発行していたジョン・ボスウェルである．

2人で，クラーク・ボスウェル社を設立して，鉱山経営に乗り出す．

資本主義の最先端であるといえる投資会社．夢多きクラークの精神を揺さぶったのでしょう．

7つの鉱山会社と1つの鉱山機械会社を経営して，クラーク社長は，お飾りではなく，頑健な体力で，旧式汽車や粗末な駅馬車に揺られて昼夜兼行で，各鉱山を回って，数千kmの出張旅行をしている．がんばりました．

一時期，マスコミに持て囃され，株価の値上がりで莫大な利益を得て，クラークは多大な年収を得るが，ブームが終わり，僅か1年半，株券は紙屑同然．

経営的な見通しの欠如が原因にあったとおもわれる．

アマーストの友人知人にも投資をすすめたので，大きな迷惑をかけてしまったのである．

そして病に倒れる．55歳．1986年3月6日，59歳で亡くなるまで，病苦に苛まれながら倒産した会社の後始末．大学人，知識人，そして軍人としての栄光とは無縁のまま暗い日々をおくったのでした．

札幌とアマースト

北海道大学のキャンパスには，クラーク博士の胸像がある．多いときには何100人という人が訪れて，尊敬のまなざしで眺め，そしてその前で記念撮影をする姿が，朝から夜遅くまで，ほとんど途切れなく続く．その近くにはクラーク記念館があるが，これは，来日80年を記念して1956年に建てられたものである．

そこから地球を半周したところのアマーストにあるマサチュセッツ大学（マサチュセッツ農科大学は1331年にマサチュセッツ州立大学に，1946年にはマサチュセッツ大学になっている）には，クラーク・ホールがある．しかし，ここの学生は誰一人として，クラークのことは知らない．教官の数人が話に聞いている程度である．

この場所から2km位のところにクラーク家のお墓があるが，このお墓を訪ねるのは，1年を通じて数10人～数100人，ほとんど日本からの人である．

日本では，何100万という人が，クラークの業績を知っている．ボーイズ・ビイ・アンビシャスという言葉を知るのは，何千万人だろう．

アメリカでは，人名辞典の中を探して，やっと4～5行の記事を目にできる程度である．

このように，クラークは，日本では不朽といっていい名声を残しているのに，本国アメリカでは，無名に等しいのである．

偉大な人物になる条件は申し分なかった．

少年時代から，学校の勉強以外に，いろいろ興味を持ち，例えば植物採集にしても専門家並の技術もっていた．馬にしても，プロ顔負けの優秀な乗り手でした．

ファイ・ベータ・カッパに選ばれたし．

ドイツのゲッチンゲン大学へ留学して，博士の学位をも取得したし．

教授としても，軍人としても，学長としても，いいところまで到達していた．

いつも，何か，何か，何か，に挑戦することが好きで，誰にも負けない結果が出せたのが，次々と新しいことに挑戦する原動力になったのですね．

しかし，教授として，これから油がのる大切な時期に，奴隷開放のための戦争に加わる．しかも手柄をたてることができた．ところが，将軍になるまで我慢できずに，あっさり辞めてしまった．挑戦心に駆られて，名利に執着しなかったのは，教授としても軍人としても，やはりマイナスではなかったか．

学長として大切な最後の詰めの時期に，日本からの招聘に応じてしまったのも挑戦心でした．名利に恬淡なのは美徳ですが，世俗的には軽率といわれるのではないでしょうか．

しかし，札幌農学校の立ち上げは，クラークの挑戦心のたまものでした．クラークの人間力が，短期間に，大きい結果を出したのですね．

4番打者として来日した外人選手が，来日1シーズン目に，チームを優勝に導いたようなものですね．

不朽といっていい名声を残したのですね．結果を出すというのは，こんなに大切なもことです．

しかし，人生の最後に，その挑戦心が，結果に結びつかなかった．おまけに，友人知人に，大きな迷惑をかけることになった．

あ と が き

私のテーマは，松下幸之助の研究です．松下幸之助の研究のサブテーマとしてまとめたものです．

幸之助も挑戦心のカタマリのような人です．しかも，ほとんど失敗のない人でした．成功の神様でした．

いろいろ有名人がおられますが，晩年の結果が悪いと世間は評価しませんね．

クラークもそのような人だったですね．

マサチュセッツ農科大学の学長として全うすれば，よかったとおもわれますね．

主に，下の著書を参考にしました．
「W.S.クラーク／その栄光と挫折」
著者：ジョン・エム・マキ
訳者：高久真一
発行：北海道大学図書刊行会
他に，稲富栄次郎著「明治初期教育思想史の研究」
月刊誌「ニューモラル」No. 437 2006.1

・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・

平成18年8月末日，原稿完成．

ご意見やご感想をいただければうれしいです．よろしくおねがいします．
連絡先：熱田善男
メール：y.atsuta@jcom.home.ne.jp
〒276-0032　八千代市八千代台東6-18-4

談　話　室

地圧と岩盤破壊音の測定

石　田　　毅*

Stress Measurements and Acoustic Emission Monitoring in Rock

by Tsuyoshi ISHIDA

はじめに

本年6月に，斎藤敏明先生の後任として着任しました，石田と申します．昭和52年3月に資源工学科を卒業し，博士課程1年次まで大学院に在籍した後，（財）電力中央研究所に就職して11年3ヶ月，さらに山口大学に異動して14年11ヶ月勤務して，京都大学に戻って参りました．専門は岩盤力学ですが，地圧の測定と評価，破壊音（Acoustic Emission）の測定に基づく岩盤破壊の研究を主な研究対象としてきました．いままで携わってきたこれらの研究の概要と私の感じているその面白さを以下にご紹介したいと思います．

地圧とは何か

大ヒットした映画「タイタニック」で有名なタイタニック号は，1912年4月15日の深夜2時半に大西洋上で沈没し，深度3821mの深海に何10年も横たわっていたわけですが，これを調査した潜水艦の窓ガラスは23cmもの厚さがありました．1平方cm当り0.38トン作用する大きな水圧に耐えるためです．このことは私が調べたものではなく，映画の冒頭のナレーションをそのまま書き写したに過ぎません．岩盤の比重は2.5程度ですので，岩盤中では水中の2.5倍の圧力，つまり地圧が作用することになります．

水深1000mの水圧は1平方cm当り0.1トンですが，地下1000mの岩盤中の地圧は1平方cm当り0.25トン，これは乗用車1台の重さを1トンとすると，手を広げた程度の広さの1m四方になんと2500台の乗用車が乗っている圧力に匹敵します．日本アルプスを貫く関越トンネルや新清水トンネルは，最深部でこのような深さを貫いていますし，すでに閉山した四国の佐々連鉱山などでは，地表からの深度が1000mを大きく超える深さで採掘を行っていました．また人間が地下に入って採掘している最も深い鉱山は，現在のところ南アフリカのMponeng Mineですが，私が訪問した5年前の時点では3800mの深さを掘削していました．富士山の標高が3776mですから，ヨハネスブルグの平坦な地表面から，富士山と同じ高さを逆に地下に向けて掘り込んでいることになります．このような深部に空洞を掘削すると，空洞の壁面には，上記のような非常に大きな圧力が作用するわけです．現実には応力集中が加わるため，空洞壁面の近傍にはさらに数倍の大きな圧力が作用します．岩盤の強度が作用する圧力を十分上回っていれば，空洞は崩壊することなく維持されます．しかし，このような大きな地圧下におかれた空洞は，じわじわと時間とともに，あるいは，何かをきっかけに瞬時に大きな破壊を生じて崩落することがしばしばあります．日本で1000m近い深さの炭鉱が次々と事故を起こして閉山していった背景には，このような大きな地圧の作用がありました．学生時代は，平松，岡，斎藤先生の指導のもと，20数名の方が亡くなった炭鉱の地下1000mの事故現場で地圧測定を行いました．冬の北海道で，朝薄暗いうちに坑内に入り，外に出てくるとすでに日が暮れているという生活を延べ3ヶ月も送りました．地下の坑内は真っ暗で，地圧で岩盤が破壊するミシミシという音がしばしば聞こえ，予告なしに近くで発破されたり，ときには坑内火災が起こったりする現場で重労働をし，授業料を払って何でこんな思いをしなければならないのかと，しばしば人使いの荒い研究室の先生方を恨めしく思ったものです．しかし今となっては，これが現場を知る最初の貴重な経験となったことを自覚し，感謝の念にかわりつつあります．

以上に述べてきた地圧は，厳密に言えば，岩盤自重に

*京都大学大学院工学研究科　社会基盤工学専攻　教授

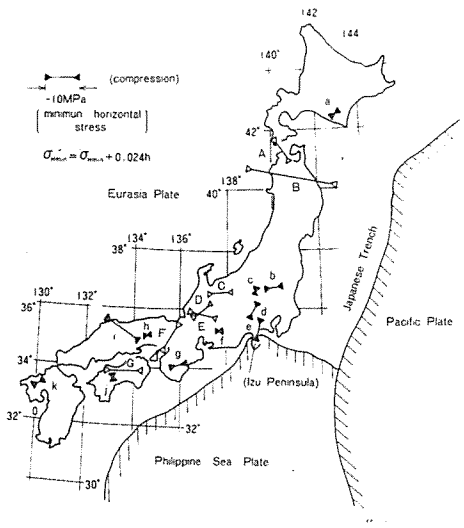


図1　鉱山の坑内などで応力解放法により測定された最大水平地圧の方向（白三角は京都大学，黒三角は電力中央研究所の測定結果）

よる鉛直方向の地圧の大きさですが，水平方向にも地圧が作用しています．図1は，私や先輩が鉱山の坑内など地表下数100m～1500mの深さで測定した地圧の水平方向の最大圧縮応力をプレート境界と比較して示した図です[1]．日本列島には，フィリピン海プレートと太平洋プレートいう海底の岩盤がそれぞれ毎年約10cmの速度で押し寄せ，フィリピン海プレートが伊豆半島の付け根で日本列島に衝突して南北方向に，太平洋プレートが東北の太平洋沿岸で衝突して東西方向に日本列島を圧縮しています．我々が測定した地圧の最大圧縮方向は，伊豆半島の北部では南北方向を，他の地域では東西方向を向いており，水平地圧は，地殻変動の影響を大きく受けていることがわかります．（この図は古い図で，その後北米プレートの存在が指摘され，また地圧測定データを追加した新たな研究成果[2,3]が報告されています．）

電気は夜間よりも昼間に需要が多いため，夜間の余った電気で下の貯水池から上の貯水池に水をくみ上げ，昼間にこの水を上池から下池に落として発電することにより電力需給の調整が行われています．この揚水発電とよばれる発電方式では，上池と下池の間に揚水ポンプを兼ねた発電所を設置する必要があり，地下に大空洞を掘削して発電所を建設します．このような地下発電所は日本全国に30箇所程度建設されており，規模はさまざまですが，大雑把に言って，幅30m，高さ50m，長さ100m程度の横長の大空洞になり，長手方向に直角に大きな地圧が作用すると壊れやすくなります．そこで空洞を掘削する前に地圧を測定して，これを参考に空洞の長手方向を決め，空洞補強の設計を行います．電力中央研究所に勤務していたころは，地下発電所空洞の設計に関連した地圧測定に携わりましたが，鉛直方向より水平方向の地圧が大きい地点もいくつかありました．空洞の長手方向の変更は，上下の貯水池と発電所をつなぐ水路を大きく屈曲させねばならず容易ではないのですが，地圧測定の結果に基づいて空洞の掘削方向を変更した地点もありました．海底の岩盤が日本列島に衝突しているのは地下数千～数万mの深さのはずで，これに比べれば，地下発電所の掘削位置はせいぜい地表下500m程度と随分浅いのですが，このような事例を目にして，地表近くまで地殻変動の影響が大きく及んでいることに驚きます．

地震は，応力が地殻の強度を超えて作用した結果生じる岩盤の破壊現象です．京都大学理学部の（故）田中豊先生は，兵庫県北部の平木鉱山で，数年間隔で繰り返し地圧を測定しておられましたが，兵庫県南部地震の前まで徐々に大きくなってきていた水平地圧が，この地震の後低下したことを報告しておられます[4]．水平地圧を継続的に測定することによって地震の発生を予知ができる可能性があり，このような分野での研究の展開もぜひ試みてみたい今後の課題のひとつです．

岩盤破壊音（Acoustic Emission）の測定

私が携わってきたもうひとつの研究は，岩盤の破壊音を測定することにより，岩盤の破壊の予知や予測を試みる，あるいは破壊のメカニズムを研究することです．ここでいう破壊音とは，材料の微小な破壊に伴って発生する“Acoustic Emission”，略してAEと総称される高周波の弾性波動のことです．割り箸を曲げていくとペキペキと音がしはじめ，そのうちバキッという大きな音とともに2つに折れる．岩石でも割り箸と同じように，破壊に先立ち小さな音が発生し，大音響とともに大きな破壊が起きます．私が炭鉱の坑内で耳にしたという，ミシミシという岩盤の破壊音もそのひとつです．最も大きな岩盤破壊音は，地殻の岩盤が破壊される地震に伴う地震動といえるでしょう．割り箸の音を聞いていれば2つに折れる時期と位置が予想できるように，斜面や地下空洞などで岩盤の破壊音を測定すれば，破壊の予測ができるとともに，破壊のメカニズムを調べることができます．

1996年2月10日に発生した北海道豊浜トンネルの大事故を覚えておられるでしょうか．巨大な岩盤がトンネル内に崩落し，たまたま通りかかったバスと乗用車を押しつぶして20名の尊い命が失われた事故です．雪の降り積もった海岸沿いの崩落現場が繰り返し報道されるにもかかわらず，救出が遅々として進まないのに苛立ちを感じた方も多かったと思います．この事故現場を訪れると，トンネルの入り口の慰霊碑には，今も亡くなった方へ手向けられたお菓子や花が数多く置いてあるのに，心



写真1 大崩落後の斜面．楕円形で囲んだ部分が監視対象の不安定岩塊

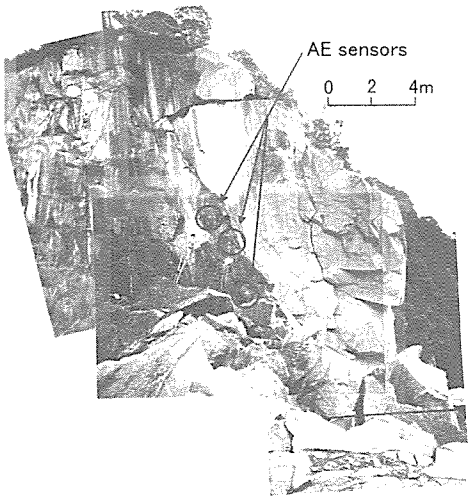


写真2 測定対象の不安定岩塊とAEセンサーの位置

痛む思いがします．しかし，トンネルの入り口には，「異常があったらこの電話で連絡してください」という非常電話が置かれているだけで，未だにそれ以上の対策が何も施せないことに，この種の事故に対する技術開発の遅れを痛感します．

この事故のあと，AE測定による斜面崩壊の予知に期待が寄せられ，研究開発が多方面で進められました．そのような折，勤務していた山口大学の近くの花崗岩採石場の跡地で大規模な岩盤崩落が発生し，落石が県道を塞ぐ事故が起きました．写真1は，崩落現場の写真です．この大崩落の6日前に小崩落があり道路が通行止めになっていたため，歩行者や自動車に直接的な被害が及ぶことはありませんでしたが，通行車両があれば豊浜トンネルに似た惨事が発生していたに違いありません．この大崩落の前日，先に発生した小崩落後の斜面形状を測量していた技術者が岩盤のきしむ音を聞いて不気味な異常を感じ，作業を取りやめていたという報告がありました．つまり，大崩落の直前に岩盤の壊れる音がしていたのです．

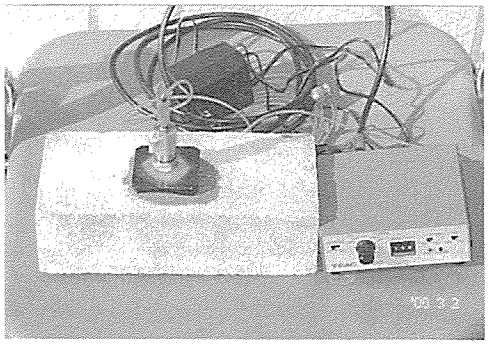


写真3 AEセンサーとプリアンプ

この崩落跡に不安定な岩塊が残り，復旧工事中に落ちてくる危険性があるため，変位などの他の測定とともにAEの測定を行い，危険な兆候があれば工事を中断することにしました．写真2は問題の不安定岩塊です．岩塊のすぐ下に今にもすべりそうな亀裂があり，この亀裂に沿ってセンサーを設置しました．3つの丸印の中心がAEセンサーの位置です．一番上の丸印の左下に小さく見える作業員や脚立と比較すれば，岩塊の大きさがわかると思います．写真3は，コンクリート・ブロックを岩盤と見立てて，AEセンサーの設置状態を示したものです．まず鉄板をコンクリート・ボンドで岩盤に接着し，センサーを鉄板に接着しました．

このようにして測定したAEデータは，斜面の監視を請け負った地質コンサルタント会社の事務所と，大学の私の研究室，そして私の自宅に1時間に1回，E-mailで送信し，岩塊の動きを監視していました．測定していた研究者の立場としては少し残念ともいえるのですが，幸いにしてその後崩落はなく，破壊音の顕著な発生もありませんでした．しかし，不安定岩塊の近くで復旧工事のための発破が行われるとその後2～3時間破壊音の発生が増える傾向がはっきりと現れました[5]．発破などで強い振動を与えると微小な亀裂が数時間破壊音を発生しながら，少しずつ進展するのだと思います．このようなAE測定と他の新しい測定法を組み合わせ，実用的な斜面監視法を確立するのが私のもうひとつの課題です．

ここでは，わかりやすい写真が手許にあった斜面のAE測定をご紹介しましたが，この測定手法を利用して，地熱開発や枯渇した石油井の刺激に使用される岩盤の水圧破砕や，高レベル廃棄物の地層処分などに関連した岩盤の熱破壊のメカニズム研究などを行ってきました[6]．特に，電力中央研究所在職時代に，関西電力（株）大河

内，中部電力（株）奥美濃，東京電力（株）塩原の地下発電所空洞掘削時の監視法として提案して実施したAE測定は，その後の地下発電所の掘削時にも規模を拡大して利用されており，自分の研究が社会に受け入れられた喜びを感じています．

最近では，東京大学のベンチャー企業と光ファイバAEセンサーの研究を進めています．このセンサーは防爆性や耐候性に優れ，高温下でも測定が可能なため，このセンサーを利用すれば，従来高温のため測定が難しかった3000mを超える深い石油や天然ガスの井戸で長期間にわたるAE測定を行える可能性があります．そこで，このセンサーを利用して，新たな石油・天然ガスの探査や生産，あるいは地球温暖化ガスの二酸化炭素を地下に貯留にして処分するプロジェクトに寄与できるAE測定ができないかと夢を広げています．

最後に

大学を卒業して以降，どちらかといえば，土木のフィールドで仕事をしてきましたが，地下発電所の建設をはじめとする大規模な土木プロジェクトが国内では少なくなりつつあります．専門の岩盤力学を今後どのような形で社会に役立てていけばよいのか，頭を悩ませているところです．しかしながら幸いなことに，京都大学には関連分野で活発な活動をしておられる先生方が多くおられます．これらの先生方から，また，実務に携わっておられる水曜会の先輩や後輩の皆さまから，さまざまな情報や刺激をいただきながら，研究課題を探索していきたいと思っております．ぜひ，ご支援，ご鞭撻をいただきたいと思います．

なお本稿では，わかりやすさに心がけたつもりですが，説明が不十分な箇所が多々あったかと思います．逆にわかりやすさを心がけただけ分だけ，正確さや厳密さに欠けた表現も随所にあるかと思います．これらの点を，お許しいただければ幸いです．

参考文献

1) 齋藤敏明，石田毅，寺田孚，田中豊：実測結果に基づくわが国の地下岩盤内の初期地圧状態の検討，土木学会論文集，第394号／III-9，pp. 71-78，1988.
2) Sugawara, K.: Measuring rock stress and rock engineering in Japan, in *Rock Stress*, Sugawara, K. and Obara. Y. (eds.), Balkema, 1997.
3) Yokoyama, T., Ogawa, K., Kanagawa, T., Tanaka, M. and Ishida, T.: Regional in-situ stress states in Japan based on measurements, pp. 335-341, in *Rock Stress*, Sugawara, K., Obara, Y. and Sato, A. (eds.), Balkema, 2003.
4) 田中豊，藤森邦夫，大塚成昭：地殻応力・歪の測定・観測による大地震発生の予測，地震，第2輯，第50巻別冊，pp. 201-208, 1998.
5) 石田毅，西川直志，北村晴夫，田仲正弘，古屋憲二：山口市鳴滝地区岩盤崩落地点における変位とAE測定による不安定岩塊の挙動監視，土木学会論文集，第722号／III-61, pp. 345-355, 2002.
6) 石田毅：「岩盤破壊音の科学」，近未来社，1999.

談　話　室

金属／酸化物異相界面の電子論的研究

松　永　克　志*

Theoretical study of atomic structures and bonding at metal/oxide interfaces

by Katsuyuki MATSUNAGA

1. はじめに

平成17年7月に材料工学専攻材料物性学講座量子材料学分野に助教授として赴任いたしました．本稿では，これまで著者が行ってきたセラミックス系異相界面の電子・原子構造と界面特性に関する理論研究についてご紹介させていただきたいと存じます．

2. セラミックス系異相界面

近年の先端材料開発においては，複数の物質を組み合わせその微細構造をナノレベルで制御することにより材料特性の向上および新機能付加をねらった研究が盛んとなっている．その結果，材料内部に異なる物質間の界面構造がおのずと形成され，さらに材料構造の微細化が進むにつれて材料全体において界面の占める割合が大きくなり，界面特性が顕著に巨視的な材料特性に反映されることになる．このようなことから，界面構造・特性の重要性が多くの研究者・技術者によって認識されるようになり，とりわけ界面や結晶粒界において特異な材料特性を発現するセラミックス系材料では，界面制御が新材料開発のキーポイントとされている．しかしながら，具体的に材料界面を合理的かつ高度に制御した研究開発例は非常に少ない．これは，結晶方位関係や格子ミスフィットなどの幾何学構造，界面特有の電子構造や点欠陥の集積などの化学状態といった特性発現因子の多様さに起因するものである．したがって，界面構造と特性を結びつける支配因子を明確にすることが，高度に界面制御した高機能材料開発には不可欠である．本研究では，金属部材のセラミックスコーティングや電子セラミックスと電極との接合などで工学的にも重要な金属／酸化物界面に着目し，その界面結合性の電子論的起源を第一原理計算により明らかにすることを目的とした．また，異相界面では隣接する結晶間の格子ミスフィットが重要な幾何学的パラメータであり，実在する界面の多くは大きなミスフィットを有するものと考えられる．そこで特に大きな格子ミスフィットからなる非整合界面の界面結合メカニズムを明らかにすることを目的とした．

3. 異相界面構造の分類

本稿で紹介する金属／酸化物界面のような異相界面構造を議論する際，金属と酸化物の結晶構造および格子定数の差異による格子ミスフィットが重要なパラメータの一つである．そこで図1には異相界面構造の幾何学的分類[1]を模式的に示した．界面を形成する二つの物質が理

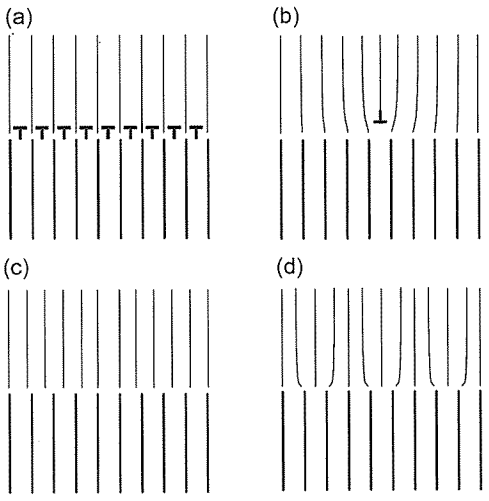


図1　各種異相界面の模式図．(a)整合界面，(b)半整合界面，(c)非整合界面，(d)擬半整合界面

*京都大学大学院工学研究科　材料工学専攻

想的に同一の格子定数を持ち，すなわち格子ミスフィットがゼロの場合，界面に垂直な両結晶の結晶面は整合性良く連続的につながり，いわゆる整合界面（coherent interface）を形成する．しかしこれは非常に特殊な場合であり，実際的に小さな格子ミスフィット（明確な定義はないがおおよそ2～3%以下）が存在する場合，弾性定数のより小さい結晶内部が一様にひずむことにより同様な整合界面が形成されうる．このときのひずみの様子は界面に沿った連続的な仮想転位によって表すことができる（図1(a)）．しかし結晶の厚みが増加するにつれ，結晶内部に蓄積されるひずみエネルギーが大きくなり，結晶がある臨界厚みを超えたときミスフィット転位が導入されひずみエネルギーを緩和する．このような界面に沿ったミスフィット転位の周期的配列により記述できる界面は半整合界面（semicoherent interface）と呼ばれる（図1(b)）．この半整合界面では局所的な格子ひずみは存在するものの，ミスフィット転位のコア部分以外では整合界面と同様な格子の連続性が存在することになる．

半整合界面の形成は格子ミスフィットが比較的小さい（一般に約4～5%）ときに実現されるが，さらに格子ミスフィットが大きくなると結晶の臨界厚みが一原子層以下になり，図1(c)に示す非整合界面（incoherent interface）が形成される．複合材料や基板上での薄膜などの実材料の多くが，非整合界面に相当するような大きな格子ミスフィットを有するものと考えられる．本来，完全な非整合界面は整合界面や半整合界面のような格子の整合性がなく，両結晶間に相互作用が全く存在しないことを意味する．しかし，電子顕微鏡等を用いてこれまでにCu/Al_2O_3を始めとする非整合界面の存在が確認されており[2-4]，さらには特定の結晶方位関係を示すことからも，非常に弱くとも何らかの結合が界面を介した原子間に存在するはずである．その場合，界面での化学結合により弾性定数の小さい方の結晶の界面近傍原子が原子変位を起こし，図1(d)に示すような整合領域が転位コア構造のような局所的格子非整合領域によって仕切られたような構造をとることが考えられる．このような界面を擬半整合界面（pseudo-semicoherent interface）といいV/Al_2O_3系で観察されており[1]，転位状の格子非整合構造を半整合界面でのミスフィット転位と区別して幾何学的ミスフィット転位と呼ぶ．したがって格子ミスフィットが多少大きくても，界面での原子間相互作用が強い場合は擬半整合界面となり，相互作用が弱いほど図1(c)のような非整合界面に近い構造となると考えられる．

4. 金属／酸化物界面の第一原理計算

界面の結合力や電子物性などを明らかにするためには，界面の電子状態についての詳細な知見が必要となる．しかし元来電子状態の異なる金属結晶と酸化物結晶からなる界面の電子状態・結合状態を，従来からの化学結合論的概念でイオン結合性や金属結合性などと容易に定義することはできない．したがって界面結合を何らかの相互作用モデルで記述するのではなく，詳細な電子状態解析を行い界面結合の具体的描像を明らかにすることが肝要である．

幸いにも最近の計算理論の進歩および計算機演算速度の高速化により，異相界面のような複雑構造についても界面での詳細な原子構造や電子状態，およびエネルギー状態を第一原理計算で高精度に取り扱うことが可能となってきた．これまでにも金属／酸化物界面についてはAg/MgOを始めとする幾つかの系について第一原理計算による計算解析が行われており，その結果，界面結合力は酸化物側の界面終端面の極性や原子種に大きく依存すること等が明らかとなってきた[5,6]．しかし従来の金属／セラミックス界面の研究は，格子ミスフィットが極めて小さい整合界面を主な対象としている．これは，界面計算で用いられる擬ポテンシャル法を始めとした第一原理バンド計算では，結晶の原子配列およびポテンシャルの周期性に基づいて系の波動関数を求めるため，計算する界面モデル（スーパーセル）についても界面に沿った周期的構造が存在することが必要となるためである．さらに，計算量はモデルに含まれる原子数に依存するため，なるべく界面は短周期構造で表現されることが望ましい．また図1(b)のような半整合界面であっても界面の広い領域は整合界面と見なすことができるため，金属結晶に人工的に一様なひずみを与えることで仮想的に整合界面として取り扱う手法がとられてきた．

以上のように，整合界面については界面電子状態の理論計算が多く報告されてきたが，整合界面は異相界面における特別な幾何学的構造であり，より一般的には大きな格子ミスフィットによる非整合異相界面の結合状態を明らかにすることが材料科学としての意義が大きい．しかしながら上にも述べたような現実的な計算量による制約もあり，非整合界面であっても合理的にその特異な界面構造を取り扱うことができる計算モデルの構築が必要となる．そこで，これまで実験観察されてきた多くの金属／酸化物界面の中から次に示す金属ニッケル／酸化ジルコニウム界面に着目し，非整合界面の結合状態を明らかにすることにした．

5. ニッケル／酸化ジルコニウム非整合界面の結合メカニズム

5.1 界面結晶方位関係と界面モデル

本研究で対象としたニッケル／酸化ジルコニウム界面

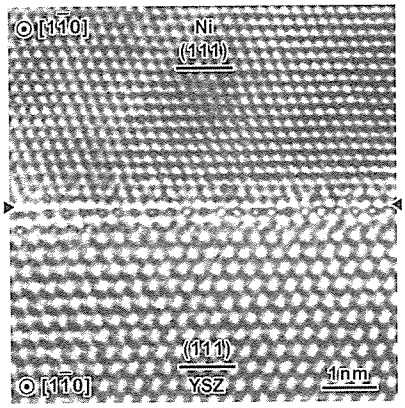


図2 Ni/YSZ(111)界面の高分解能電子顕微鏡像

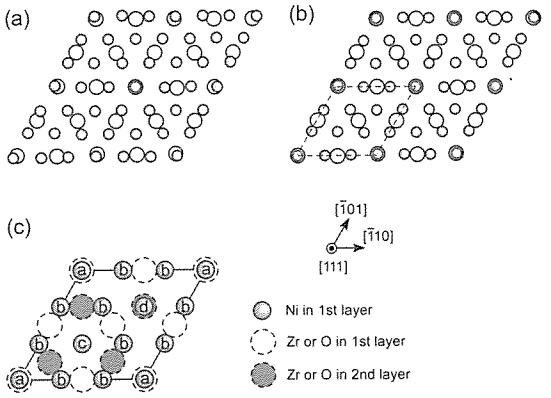


図3 Ni/ZrO_2(111)界面層の原子構造図．(a)格子ミスフィットが31%の場合，(b)Ni層を約3%圧縮した場合，(c)(b)における最小周期構造

の実験観察結果について示す．この系は燃料電池電極に含まれ，電極反応の活性サイトの一つとして考えられている界面である．図2は，レーザーアブレーション法で酸化ジルコニウム（8 mol% Y_2O_3添加立方晶ZrO_2, YSZ）の(111)面上に金属ニッケルを蒸着した試料断面の高分解能電子顕微鏡像である[7]．界面は原子レベルで平坦であり，アモルファス状の構造やボイドなどの微小欠陥が存在せず，結晶方位関係は$(111)_{Ni}//(111)_{ZrO2}$, $[1\bar{1}0]_{Ni}//[1\bar{1}0]_{ZrO2}$であることが判明した．しかしながら，この系における格子ミスフィットは31%であり，半整合界面などで期待される格子ミスフィット値（4～5%）と較べても非常に大きな値である．実際，界面に沿ってミスフィット転位に相当するようなコントラストは確認されず，非整合界面であると判断できる．

このような方位関係からなるNi/ZrO_2(111)界面に対して第一原理法による界面電子状態解析を行うため界面構造のモデリングを行った．しかしこの界面の格子ミスフィットは31%と非常に大きく，従来研究で行われてきたようにNi格子やZrO_2格子に一様なひずみを与えて，計算モデル上で格子ミスフィットをゼロにする仮想的整合界面としての取り扱い方は，得られる構造やエネルギーの妥当性を議論する際に大きな問題となる．そこで，この界面特有の大きな格子ミスフィットとそれによる界面特有な原子構造を合理的に考慮した計算モデルを構築しなければならない．

界面を介したNi原子およびZrO_2原子の相対的位置関係を概観するため，Ni(111)面とZrO_2(111)の一原子層を重ね合わせ，面に垂直方向から観察した構造を図3 (a)に示す．いまNi(111)面の一つのNi原子に着目し，ZrO_2(111)面上の特定のZrもしくはO原子直上(ZrO_2(111)の各原子面はZrかOのみからなる原子面）に重ね合わせても（図3 (a)では中心のサイトに相当），31%の格子ミスフィットにより同じくZrもしくはO原子直上に位置するNi原子をその近傍で見いだすことは出来ない．しかしながらNi(111)面を界面に沿って等方的に3%程度圧縮すると，図3 (b)に示すような周期的構造を見つけることができ，その構造を拡大したのが図3 (c)である．この界面構造は，Ni(111)面の最小周期構造（近接する4つのNi原子を結んで形成される平行四辺形）を<1$\bar{1}$0>方向に3周期，同様にZrO_2(111)については同方向に2周期拡張した超周期構造に相当する．このように拡張した界面周期構造を用いることにより，実際の格子ミスフィットより十分小さな約3%の一様ひずみを与えるだけで界面での異種原子間の各種配位環境を考慮した計算が可能となる．図1 (c)でも述べたように完全な非整合界面では二つの結晶間に結合相互作用がなく，界面を介して連続的に格子がつながった部分はほとんど存在しないはずである．しかし現実的には何らかの界面結合が生じ，互いの原子面が少しずつ変位することにより整合性良くつながる部分が形成されうる．この考え方に基づくのが本研究の界面モデルであり，coherent boundary modelでも同様な非整合界面の構造モデルが提案されている[8]．

図3 (c)の構造では，9個のNi原子がa～dで表される四種類のZrO_2 (111)表面上サイトに存在している．ZrO_2(111)にはZr面とO面の二種類があるため，Zr終端界面およびO終端界面の二種類を考慮した．また，実界面ではZrO_2内に添加剤のYや酸素空孔が含まれ界面のエネルギー状態などに影響するものと考えられる．しかし実験的には界面でのY偏析は観察されなかったこと[7]，非整合界面のintrinsicな結合状態を明らかにするという本研究の目的から，これら点欠陥の効果は現段階では考慮していない．最終的には図3 (c)の界面モデル構造を

基に，界面に垂直方向にNi(111)面を7層程度，ZrO_2(111)面を9層程度含む積層スラブモデルからなるスーパーセル（原子数は90～100個程度）を用い平面波基底第一原理計算を行った．各原子配置における電子状態を収束させたのち各原子に働く力を求め，それに従い原子位置の緩和を行った．詳細な計算条件については引用文献[9]を参照されたい．

5.2　界面での電子構造と結合状態

図4には(a)Zr終端界面，(b)O終端界面のスーパーセルにおける界面近傍原子と界面から離れたバルク中の同種原子の部分状態密度を示す．ZrO_2は絶縁体で第一原理計算によるバンドギャップ値は約4eVとなり，その様子がバルクZrもしくはOの部分状態密度において見てとれる．しかし界面Zrもしくは Oの状態密度にはバンドギャップ相当部分にわずかながら状態密度の成分が存在することがわかる．これは，界面形成時にZrO_2のバンドギャップ位置にNiの3d軌道を主成分とするバンドが重なり，Ni-Zrもしくは Ni-O間の軌道相互作用による金属誘起準位（metal induced gap state, MIGS）が形成された結果である．このようなMIGSの存在は金属もしくは酸化物から界面への電子の流れ込みを意味しており，界面結合に深く関連する界面準位である[10]．また界面とバルクのNi状態密度を比較すると，特にZr終端界面において状態密度形状の差異が顕著であり，界面Niはバルクとは異なる化学的環境にあるといえる．

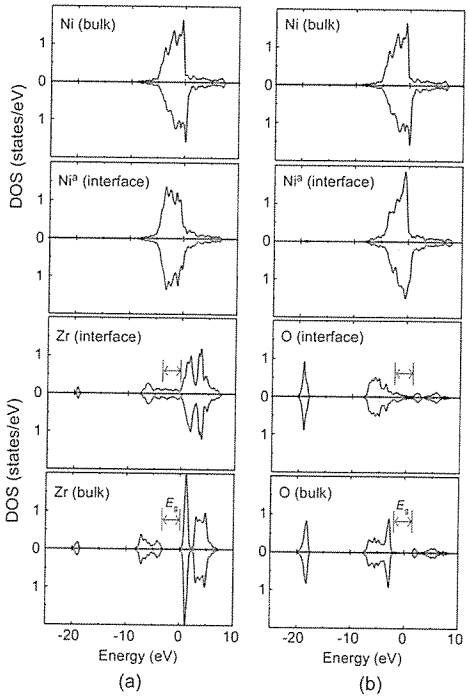


図4　Zr終端界面（(a)）とO終端界面（(b)）における界面原子およびバルク中原子の部分状態密度．各状態密度で上側が多数スピン電子，下側が少数スピン電子の状態密度に相当する．また図中のE_gはZrO_2のバンドギャップを意味する．

さらに界面での結合形成の様子を明らかにするため，差電子密度分布による界面近傍の電荷移行状態を示したのが図5である．Zr終端界面およびO終端界面ともに，終端Zr原子（O原子）直上に存在するNi^a–Zr（Ni^a–O）結合は原子間に局在した電子の集積が観察され，共有結合的に相互作用していることを示している．その他のサイトのNi原子は終端Zr原子やO原子との間で共有結合的に電子を共有するのではなく，金属Ni表面近傍の電荷分布再配列と分極を引き起こし，いわゆる鏡像ポテンシャルで説明されるようなイオン結合性の相互作用を持っている．また，Zr終端界面では一部金属結合的なNi^b–Zr結合も存在している．したがって，格子ミスフィットの大きな界面では様々な結合距離・配位構造からなる金属原子－酸化物原子ペアが存在するが，それらの結合状態は同一界面上であっても特定の結合様式で一括して記述できるのではなく，結合サイト依存性を示す．

5.3　非整合界面での界面剥離挙動

非整合界面が5.2で述べたような界面結合のサイト依存性を持つ場合，界面の重要な性質の一つである界面剥離挙動に大きな影響を及ぼすと予測される．なぜなら界面剥離は原理的には界面結合の連続的切断によるからである．そこで第一原理計算による界面垂直方向への引張試験を行い，界面の剥離挙動を調べることとした[9]．

図6は計算により得られた応力－歪み曲線である．Zr終端界面ではひずみに伴い応力が上昇し10%ひずみにお

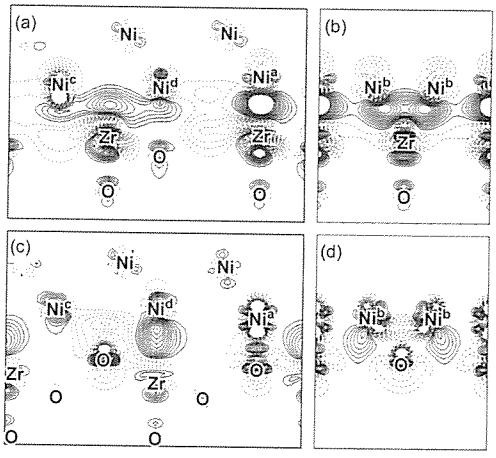


図5　Zr終端界面（(a)と(b)）およびO終端界面（(c)と(d)）の界面近傍における差電子密度分布．実線が電子増加領域，波線が減少領域を意味する．

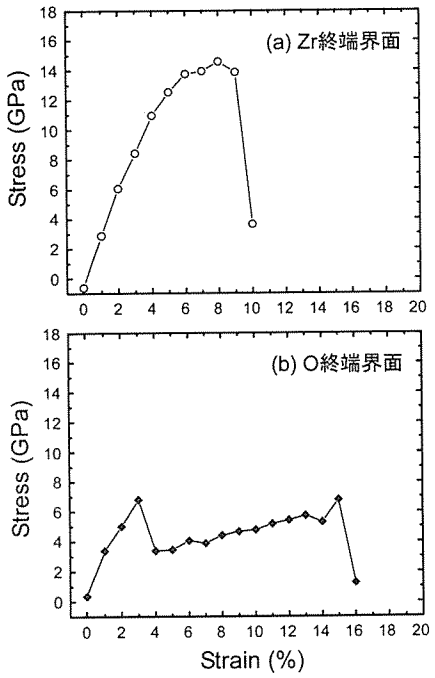


図6 Zr終端界面およびO終端界面の第一原理引張試験による応力－ひずみ曲線.

いて急激な応力低下が起こる．引張試験時の原子構造を調べたところ，このときZrO_2内部での劈開していることが判明した．Zr終端界面の剥離エネルギーは4.4 J/m^{2}であり，ZrO_2(111)面の劈開エネルギー（1.7 J/m^2）に較べて十分大きく，格子ミスフィットの大きな非整合界面でありながらも強固な界面が形成されていることがわかった．一方Zr終端界面とは異なり，O終端界面では剥離エネルギーが0.5 J/m^{2}と非常に小さく，引張試験によって界面剥離が確認された．剥離エネルギーは界面からNi表面とZrO_2表面を形成するときのエネルギー変化に相当するため，その終端面依存性は新たに形成されるZrO_2表面のエネルギー状態に起因する．ZrO_2(111)表面の場合，Zr終端表面がZrリッチであり表面エネルギーもO終端表面に較べ非常に大きいため，上に示したような終端面依存性を示すものといえる．

また応力－ひずみ曲線に着目すると（図6 (b)），Zr終端界面で観察されたZrO_2劈開（図6 (a)）と比較してO終端界面はより複雑な形状を示していることが観察される．これは界面のNi－O結合力がサイトに依存して異なるためであり，例えばひずみ4％での急激な応力低下は，図3 (c)におけるbやcサイトNi原子と直下のO原子の結合が切れるためである．その後徐々に再度応力が上昇し始め，最終的にはaサイトNiとOの結合が切断され界面全体で剥離した．この結果は，図5 (c)で示したようにNi^a－Oの共有結合は強固であり剥離に対する大きな抵抗力となるのに対し，金属側の電荷密度分極によるイオン結合的相互作用を持つその他のNi－O結合力は弱いためであるといえる．

以上の結果から，界面結合に対する酸化物側終端面の効果は整合界面と同様に非整合界面においても非常に大きく，さらには非整合界面では結合状態のサイト依存性が存在し，界面結合の微視的破壊メカニズムに大きな影響を及ぼすことがわかった．今後は，本研究で着目した格子ミスフィットやここでは考慮しなかった点欠陥効果のような複雑な界面因子の影響を一つ一つ着実に明らかにしていくことにより，それらの知見を系統化した異相界面の材料科学を構築できるものと考えられる．

6. おわりに

様々な材料分野における最近の研究開発で界面というキーワードが頻繁に使われていますが，ほとんどの場合，本質的な界面現象に対する理解は得られておらず依然ブラックボックスのままというのが現状です．よって材料科学の基礎研究として今後さらに深めていくべき重要なテーマであると考えております．また，これまで著者が中心としてきたセラミック材料や金属材料分野だけでなく，界面現象が重要とされる生体材料や高分子関連材料へもアプローチし，多角的に研究に取り組んでいく所存です．今後ともご指導，ご鞭撻の程，宜しくお願い申し上げます．

参考文献

1) Y. Ikuhara and P. Pirouz: Microsc. Res. Tech. 40, 206 (1998).
2) G. Dehm, M. Rühle, G. Ding and R. Raj: Phil. Mag. B 71, 1111 (1995).
3) C. Scheu, W. Stein and M. Rühle: Phil. Mag. A 78, 439 (1998).
4) T. Sasaki, K. Matsunaga, H. Ohta, H. Hosono, T. Yamamoto and Y. Ikuhara: Sci. Tech. Adv. Mater. 4, 575 (2003).
5) F. Ernst: Mater. Sci. Eng. R14, 97 (1995).
6) M.W. Finnis: J. Phys.: Condens. Matter 8, 5811 (1996).
7) T. Sasaki, K. Matsunaga, H. Ohta, H. Hosono, T. Yamamoto and Y. Ikuhara: Mater. Trans. 45, 2137 (2004).
8) J.W. Matthews: in Dislocations in Solids, F.R.N. Nabarro ed., vol. 2 (North-Holland Pub., Amsterdam, 1979).
9) K. Matsunaga, T. Sasaki, N. Shibata, T. Mizoguchi, T. Yamamoto and Y. Ikuhara: Phy. Rev. B 74, 125423 (2006).
10) 香山正憲：高温学会誌 24, 12 (1998).

談　話　室

全固体リチウム二次電池における固体電解質－正極界面構造と電池特性

岸　田　恭　輔*

Influence of Microstructures of the $LiCoO_2$ Cathode / $La_{2/3-x}Li_{3x}TiO_3$ Solid Electrolyte interface on the Electrochemical Properties of All Solid-State Lithium Secondary Batteries

by Kyosuke KISHIDA

はじめに

私は，平成17年4月付けで材料工学専攻結晶物性工学分野（乾　晴行教授）の助手に着任いたしました．着任前は，平成10年3月に材料工学専攻結晶物性工学分野において博士の学位取得後，米国イリノイ大学シカゴ校において博士研究員として，さらに独立行政法人物質・材料研究機構において研究生活を送ってまいりました．これまでは，次世代の軽量耐熱構造用材料として期待されている金属間化合物材料の塑性変形機構に関する研究を中心に行ってきました．特に学生時代は「TiAl基金属間化合物の塑性変形機構」という基礎研究を，前職では「Ni_3Al基金属間化合物の冷間圧延箔の開発」という応用的側面の強い研究を行い，材料研究の様々な側面についての経験を得ました．このような研究においては，材料のマクロ特性と結晶格子欠陥などのナノスケール構造との相関を横断的に理解するということを念頭に置き，結晶成長技術，透過電子顕微鏡法（TEM）や走査透過電子顕微鏡法（SEM）を用いた評価技術，データ解析手法等々様々な知識と技術を身につけてきました．現在はその知識・経験を活かして，さまざまな金属間化合物材料やセラミックス材料などの熱電特性や電池特性など，主として材料の機能特性に着目し，結晶構造や欠陥構造の制御による特性向上法の確立を目指した基礎研究を行っています．以下ではその一例として，全固体リチウム二次電池における固体電解質/正極間の界面構造と電池特性に関する研究の現状について紹介させていただきます．

*京都大学大学院工学研究科　助手

1．全固体リチウム二次電池研究の背景

近年の携帯電話やラップトップコンピュータなどのモバイル機器の普及に伴い，リチウム二次電池が広く使われるようになっている．現在市販されているリチウム二次電池では，正極，負極，電解質として，それぞれコバルト酸リチウム（$LiCoO_2$），炭素材料，有機溶媒にリチウム塩を溶解させたものが用いられているが，このうち有機電解液は揮発性かつ可燃性であるため，安全性，信頼性の点でさらなる改善の余地がある．このような問題の解決法の一つとして，電解質に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，特に新規電解質の探索を中心とした数多くの研究が行われている[1]．固体電解質の候補には，大別して結晶系材料，ガラス系材料，ポリマー系材料などがあるが，いずれの場合も一般にイオン伝導率が現在の有機電解質の値（室温で10^{-3}～10^{-2}S/cmのオーダー）に比較して数桁低いことが問題であった．最近の研究でLLTと呼ばれる$La_{2/3-x}Li_{3x}TiO_3$という結晶系材料が有機電解質に匹敵する優れたイオン伝導性を持つことが明らかとなったことから，このLLTの全固体リチウム二次電池としての実用化を目指した基礎研究が数多くなされている[2]．

2．本研究室での最近の研究

リチウム二次電池では，充電時に正極材料から電解質中にLi^+イオンが放出され，放電時には逆にLi^+イオンが正極へと挿入される．このようなLi^+イオンの放出・挿入の繰返しに伴い，正極材料は膨張収縮が繰返される[3]．このため，固体電解質をリチウム二次電池用電解質として用いる場合，電池特性は固体電解質そのもののイオン伝導特性だけでなく，固体電解質－電極間の機械的安定性に大きく左右される．固体電解質－電極間の機械的安

定性や界面抵抗は，界面における結晶方位関係や微細構造，界面近傍に導入される格子欠陥の構造の影響を強く受けることが予想されるが，それらについてはこれまであまり研究されてこなかった．本研究室では，LLT固体電解質と$LiCoO_2$正極からなるモデル系を用いて，LLT－$LiCoO_2$間の結晶方位関係や界面微細構造を解明すると同時に，電池特性評価を行うことにより，界面構造，欠陥構造と電池特性の相関を明らかにし，結晶系材料を用いた全固体リチウム二次電池の電池特性向上のための指針を得ることを目的とした基礎研究を行っている．

現在市販されているリチウム二次電池において正極材料として用いられている$LiCoO_2$は，層状のLi，Co，Oがc軸方向に積層している，いわゆる層状岩塩構造（空間群：$R\bar{3}m$，格子定数（六方晶表記）：a=0.2816nm，c=1.40536nm）をとる（図1）．一方，LLT相はペロブスカイト構造を基本とする超格子構造をとるが，組成，結晶作製条件，熱処理条件によりさまざまな異なる結晶構造をとることが知られている[3]．図1にはその一例として立方体がc軸方向に2個積み重なったタイプの正方晶の結晶構造を示してある．LLT相は高温では立方晶が安定であり，試料作成時の冷却過程において，正方晶のc軸がもとの立方晶の<100>軸のいずれかと平行となるため，3種類の方位の異なるバリアントからなるドメイン構造が形成される．本稿では簡単のため，LLTの結晶構造，結晶方位を基本構造であるペロブスカイト構造（格子定数a_p～0.389nm）であらわすことにする．

LLT固体電解質には，Li_2CO_3（99.999%），La_2O_3（99.99%），TiO_2（99.9%）をモル比1:1:4で混合した出発材料から，固相反応により作製した多結晶材料を用いた．作製したLLTを厚さ1mmに切断し，片側の表面に2種類の異なる表面処理，へき開あるいは機械研磨処理を施し，$LiCoO_2$正極蒸着面とした．試料のもう一方の面は電池特性の比較を容易にするために，いずれの試料についても同様の機械研磨処理を施した．機械研磨面はダイヤモンドペースト（1μm）によるバフ研磨により仕上げた．以後，これら2種類の試料をへき開試料，機械研磨試料と呼ぶことにする．これらの2種類の試料表面に$LiCoO_2$薄膜正極をPLDにより成膜し，さらに電極のコンタクト材料としてPtを蒸着し，組織観察用ならびに電池特性の評価に用いた．また電池特性の評価として，サイクリック・ボルタンメトリー（CV），充放電サイクル試験を行った．

図2にサイクリック・ボルタンメトリー（CV）による電気化学特性評価を行った結果を示す．CVでは電位を3.2Vから4.3Vの範囲で0.1mV/sの条件で繰返し変化させたときの電流変化を測定した．上側に凸の曲線は充電反応，すなわち$LiCoO_2$からLi^+イオンが放出される時の電流変化に，下側に凸の曲線は放電反応時（$LiCoO_2$へのLi^+イオンの挿入反応時）の電流変化に対応している．へき開試料,機械研磨試料の充電，放電反応のいずれの場合にも，3つのピーク（図中のA，B，Cは充電反応時のピーク位置に対応）が観察される．へき開試料では一回目の充電反応が比較的低電位から始まっており，初期界面抵抗が低いことが予想される．しかしながらその後の充電反応時，放電反応時のピーク電位がサイクルごとにそれぞれ高電位側，低電位側へとシフトしていることから，サイクルの繰返しに伴い，電池の内部抵抗が増大していると考えられる．このようにへき開試料は充放電のサイクルに対し不安定である．これに対し，機械研磨試料ではサイクルの繰返しによるピーク電位の変化はほとんど見られず，比較的安定なサイクル特性を示しているといえる．機械研磨試料について，充放電サイクル試験（充電電流0.1mA，放電電流－0.1A，充電カットオフ電位4.3V，放電カットオフ電位3.2V）を行った結果，6サイクルの充放電後もほとんど容量低下が見られなかった．このことからも機械研磨試料が良好なサイクル安

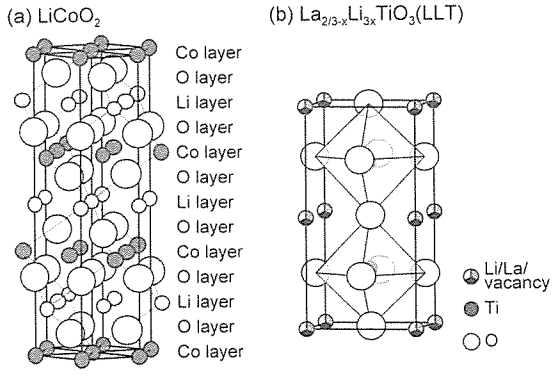


図1　LiCoO2正極と$La_{2/3-x}Li_{3x}TiO_3$（LLT）固体電解質の結晶構造

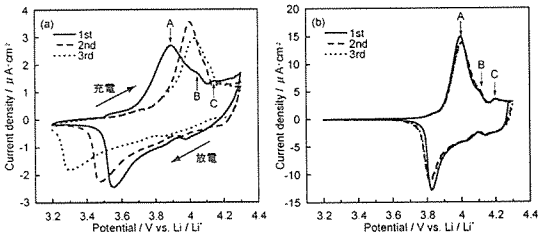


図2　サイクリック・ボルタモグラム．
(a) へき開試料，(b) 機械研磨試料

定性を持つことが確認された．

図3にへき開試料の正極蒸着直後およびCV3サイクル後の表面，断面組織のSEMによる観察結果を示す．正極蒸着直後のへき開試料表面には，ほぼ結晶粒径に対応したサイズの表面起伏が見られる．断面試料の観察からLLT/$LiCoO_2$界面における剥離等の欠陥は観察されず，良好な界面が形成されていることがわかる．しかしながら，3サイクルのCV測定後の試料では，$LiCoO_2$正極がLLT電解質から剥離しているところが観察された．この剥離によりLiイオンの挿入脱離反応の有効面積が減少したことが，充放電サイクルによる電池特性の劣化につながったものと考えられる．これに対し機械研磨試料についてはCVサイクルによる顕著な組織変化は見られなかった．

次に$LiCoO_2$正極／LLT固体電解質界面での方位関係や微細構造の影響を明らかにするために，正極蒸着直後の試料についてTEM観察を行った．図4に2種類の試料の断面組織の明視野像および制限視野電子回折図形を示す．TEM内の傾斜実験により，どちらの試料についても$LiCoO_2$とLLT間には$(110)_{LLT}//(11\bar{2}0)_{LiCoO2}$，$[001]_{LLT}//[\bar{4}401]_{LiCoO2}$で記述できる一定の方位関係があることがわかった．上述の方位関係についてはFE-SEM内での後方散乱電子回折法（EBSD）によっても確認された．また機械研磨試料では界面の面指数は場所により異なるが，へき開試料では場所に寄らずほぼ一定で，界面はLLT相の（110）に平行であった．このことからLLTのへき界面は主として{110}であることがわかる．図5に界面構造の高分解能TEM観察の結果を示す．へき開試料については，LLTの[001]および$LiCoO_2$の$[\bar{4}401]$から観察した高分解能像となっている．LLT/$LiCoO_2$界面においては不純物層や反応層の形成は見られず，LLTの（110）へき開面上に$LiCoO_2$がエピタキシャルに形成されていることが確認できた．これに対し，LLTの[110]方向から撮影した機械研磨試料の高分解能像ではLLT/$LiCoO_2$界面において厚さ5nm程度のアモルファス領域が不連続に存在することが確認された．組成分析の結果，アモルファス領域はLLT/$LiCoO_2$の反応層ではなく，LLTがアモルファス化したものであることがわかった．アモルファス領域がLLTであり，かつ不連続であることから考えると，アモルファス領域は機械研磨によってLLT表面に形成されたものであると考えられる．

以上の結果から，電池特性とLLT/$LiCoO_2$界面との相関について考察する．図6にTEMおよびSEM-EBSDにより得られた方位関係をステレオ投影したものを示す．

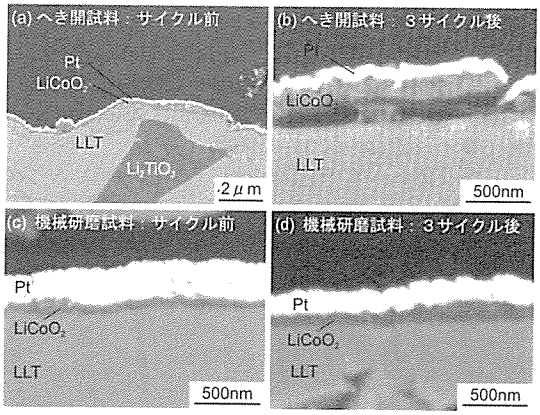


図3　サイクリック・ボルタンメトリー前後の試料断面のSEM観察像

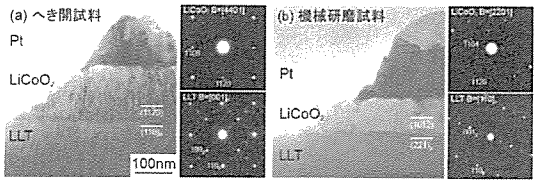


図4　正極蒸着直後の試料断面のTEM解析

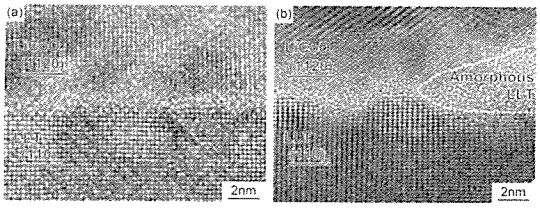


図5　正極蒸着直後の試料のLiCoO2正極/ $La_{2/3-x}Li_{3x}TiO_3$（LLT）固体電解質界面の高分解能TEM像．(a) へき開試料，(b) 機械研磨試料

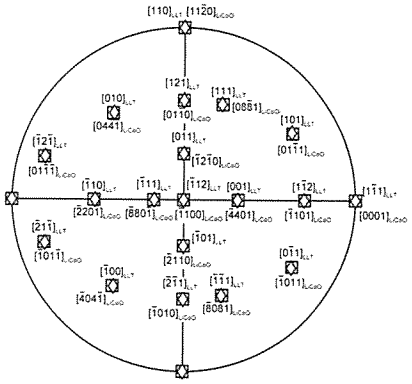


図6　LiCoO2正極/ $La_{2/3-x}Li_{3x}TiO_3$（LLT）固体電解質間の結晶方位関係

図から明らかなように立方晶（近似）のLLTの結晶方位と菱面体晶の$LiCoO_2$の結晶方位は非常によい対応関係にある．$LiCoO_2$ではLi層は（0001）に平行に存在しているが，ステレオ投影に示した方位関係を元に考えると，LLTの（$1\bar{1}1$）と平行となっていることがわかる．この場合，$LiCoO_2$の（0001）およびLLTの（$1\bar{1}1$）の格子ミスフィットは2~3%となるため，LLTの（110）へき開面に対して$LiCoO_2$がエピタキシャルに形成されたものと考えられる．またこのような方位関係の界面が形成された場合，単位界面積当たりのLi層の密度が最大となるので，界面抵抗が比較的小さくなることが予想されるが，このことは実際にへき開試料の一回目の充電サイクルでは反応が比較的低い電位から始まっていることに反映されていると考えられる．しかしながら，$LiCoO_2$の（0001）が界面に垂直となっていることは，Li^+の放出・挿入に伴う格子定数変化に対しては問題となる．$LiCoO_2$からLi^+が放出に伴い，層状構造に垂直なc軸が最大で約2.3%膨張する[3]．このため充電により界面でのミスフィット歪が増大し，界面に非常に高い応力が発生することになり，これにより$LiCoO_2$正極薄膜のLLTからの剥離が誘発され，不安定なサイクル特性につながったものと考えられる．

一方，機械研磨試料では，同一の方位関係を持つものの，界面に対する$LoCoO_2$の配向はランダムであった．このことは$LiCoO_2$正極薄膜の膨張によるミスフィット歪の影響がへき開試料に比べて小さいことを意味する．また界面に存在していたアモルファス領域が$LiCoO_2$正極薄膜の剥離を抑制する役割を果たしていることも予想される．これら$LiCoO_2$正極薄膜の配向とアモルファス領域の存在が，界面の機械的安定性を高める役割を果たし，良好なサイクル特性につながったものと考えられる．さらに最近の研究でLLTのアモルファス相は結晶相よりもイオン伝導率が高いことが報告されており[4]，イオン伝導の観点からもアモルファス相の積極的利用が電池特性の向上に有効であると考えられる．

おわりに

本研究室における研究内容の一例として，全固体リチウム二次電池用固体電解質に関する研究の現状について簡単に説明させていただいたが，この研究はまだ始まったばかりであり，まだまだ不明な点も多い．今後はさらに精密な実験を行い，詳細なメカニズムが解明を目指す．これらの研究を通じて，リチウム二次電池用の固体電解質だけでなく，そのほかのイオン伝導体の有効利用に繋がる知見が得られるとものと期待している．

現在，本研究室において研究対象としている材料やその機能特性に関しては，これまで主として研究してきた金属系の材料やその力学特性とは異なる点が多いため，常に自分にとって未知の領域を学生達と一緒に勉強させていただいている毎日である．最後に，京都大学での研究・教育生活という非常に貴重な機会を与えてくださった材料工学専攻の諸先生方に深く感謝いたします．

参考文献

1) 田村秀雄 監修：電子とイオンの機能科学シリーズ，vol.3，次世代型リチウム二次電池，エヌ・ティー・エヌ (2003年)．
2) S. Stramare, V. Thangadurai, and W. Weppner: Chem. Mater., 15, 3974-3990 (2003).
3) J.N. Reimers and J.R. Dahn: J. Electrochem. Soc., 139, 2091-2097 (1992).
4) S. Furusawa, H. Tabuchi, T. Sugiyama, S. Tao, and J.T.S. Irvine: Solid State Ionics, 176, 553-558 (2005).

談　話　室

Caltech 材料学科

宇　田　哲　也*

Essay on California Institute of Technology

by Tetsuya UDA

1. はじめに

平成17年4月1日付けで，材料工学専攻表面処理工学講座助手に，平成18年8月1日付けで同講座助教授に昇任いたしました．これまでの経歴は，平成6年3月京都大学工学部冶金学科卒，平成8年3月京都大学工学研究科材料工学専攻修士修了，その後，東北大学工学研究科金属工学専攻博士後期課程に進学，早稲田嘉夫教授，岡部徹助手（現東京大学助教授）のご指導のもと，平成11年3月『導電体を介した反応（EMR）によるチタン塩化物の還元反応の研究』と題する研究にて博士（工学）の学位を得，東北大素材工学研究所（現　多元物質科学研究所）にて，3年間助手として，リサイクルと希土類の分離に関する研究に関わった後，平成14年5月にカリフォルニア工科大学（通称　カルテック）で博士研究員として赴任し，燃料電池に関する研究に3年間従事しました．途中，カリフォルニア工科大学では，同僚のポスドク2人と指導教授であった，Sossina M.Haile准教授とベンチャー会社，Proton Power, Inc.（現 Super Protonic, Inc.）の創業に携わるチャンスを得，貴重な経験をしました．今回，このような場所で原稿を記すチャンスを与えてくださったので，最初に，博士の学位を得てからこれまでの研究内容を極めて簡単に紹介をさせて頂き，その後，アメリカでの研究とカリフォルニア工科大学について綴りたいと思います．

2. 学位を得てからこれまでの研究の紹介

2.1 希土類元素間の相互分離（東北大にて）

希土類元素は化学的性質が極めて類似しているため，これらを分離することは極めて困難であり，数十段から数百段の溶媒抽出を行うことが必要である．しかし，今後，爆発的に増大することが予想されている希土類磁石の需要に対して，このような低生産性のしかも，大量の廃液を出すプロセスでは，対応することが困難ではないかと推測される．そこで，希土類ハロゲン化物の混合物に対して選択還元蒸留法を新しく考案し，その有効性を実証した．一例を挙げると，これまでの溶媒抽出法では，分離係数10程度であったNdとSmの分離を，890以上の分離係数で分離可能であることを実証した．このような高温プロセスでは，原理的に廃液を出さず，しかも，比較的小型の装置で大量生産できる特徴があると考えている．

2.2 希土類を含むスクラップのリサイクル（東北大にて）

希土類焼結磁石の製造工程では，製品重量と同程度量のスラッジ（主に汚泥状の切削屑）が発生しており，資源保全ならびに原料の安定確保の観点から，これを再生するプロセスの開発が急務である．そこで，2塩化鉄による希土類元素の塩化抽出法により，Nd-Fe-B系磁石のスラッジ中の希土類元素のみを抽出し，96%以上の抽出率で，鉄合金と99%以上の純度を持つ希土類塩化物に分離する手法を考案・実証した．本手法は，乾式法であり，原理的に廃液を出さず，しかも主な副生成物は，鉄合金のみであり，環境に優しいリサイクルプロセスと期待できる．さらには，本手法はLa-Ni系合金などその他の希土類－鉄族元素系合金のリサイクル法としてもそのまま利用することが可能であり，その適用範囲は極めて広いと考えている．

2.3 固体酸を用いた燃料電池（カルテックにて）

従来，固体酸の一つであるCsH_2PO_4では，高温相（変態点，231℃）において，プロトン導電性がある可能性が指摘されてきたが，ほぼ同時におこる脱水反応のため

*京都大学大学院工学研究科　材料工学専攻　助教授

に，その詳細は，明らかではなかった．実際に，2003年においても，プロトン導電性があるという論文と，ないという論文が発表されている．そこで，本研究では，脱水反応がおこる水蒸気分圧を実験で決定し，脱水反応が起こらない条件下で，CsH_2PO_4を電解質として用いたセルのI-V測定を行い，燃料電池としての優れたパフォーマンスを実証することに成功した．また，CsH_2PO_4電解質の薄膜化手法についても取り組み，25ミクロン程度の膜厚の燃料電池セルを作成し，高分子型燃料電池（PEM）と競争しうる出力密度を持ったセルを実証し，これらの成果をもとに，燃料電池の開発・普及を目的としたベンチャー会社，Proton Power Inc.,（現Superprotonic, Inc）を創業した．

3. アメリカでの生活とカルテック

3.1 Pasadena（パサデナ）について

カリフォルニア工科大学は，ロサンゼルス郊外のパサデナ市にあり，閑静な住宅地に隣接する形で大学は存在する．付近の治安は極めて良好で，3年間の生活で一度も銃声を聞くことはなかったし，夜でも女の子が一人で歩けるような場所にある．気候は，年間を通じて温暖であり，冬でも朝晩を除けば，半袖で十分で，雨も年間を通して，10日ほどしか降らない．私が着任したのは5月であったが，その後11月頃までは，雨が降らず，11月になって，“雨期”になったとかで，週1回程度雨が降った．余談であるが，映画のスタジオで有名なハリウッドもロサンゼル市郊外にあり，このような雨が降らない温暖な気候のために，多くの映画会社がスタジオをハリウッドに設けたということである．というのも，映画の撮影では，雨を降らすことはできても，雨をやますことはできないからだそうで，なるほどと納得した．このハリウッドは，パサデナからは車で30分の距離にあるし，2人の子供と毎週のように通ったディズニーランド*も車で50分程度にあるので，パサデナは，住むという意味では最高の場所であった．アメリカに行く前に，ある先輩に，ロサンゼルスに行く話をすると，頭が腐るぞと忠告してくれたそのとおりの楽園であった．

3.2 カリフォルニア工科大学（CALTECH）について

カルテックは，アメリカでは，東海岸のMIT，西海岸のカルテックと呼ばれる存在であるが，日本での知名度は，MITに比べて著しく劣る．その理由としては，その規模が，MITの1/3程度であること，特に，材料関係の研究に関しては，材料科学科の先生が，MITが30人程度いらっしゃるのに対して，カルテックでは4人しかいないことに原因があるようである．著者自身，正直に話すと，カルテックに行く前までは，カルテックが小さな大学ということも，30人を越すノーベル賞を出していることもよく知らなかった．知っていたのは，ポーリング教授とファインマン教授が教鞭を取っていた大学であり，ファインマン教授の著，『ご冗談でしょうファインマンさん』を学部時代に熟読していた私は，きっとおもしろいところに違いないという期待感のみで，赴任した．参考までに，カルテックと京大の人員を比較した表を表1に示す．

この表からもわかるように，カルテックの教員の数は，

表1 カルテックと京大との人員の比較表

	カルテック	京大	工学部/工学研究科
教授，助(准)教授，助手の合計	283	2911	436
ポスドク	559	1012	
サポートスタッフ	2586	1349[a)]	183[a)]
学部生（4学年合計）	891	13064	4253
大学院生（合計）	1281	9578	2734
		(内博士コース 3889)	(内博士コース 524)
博士授与者数 (2003)	137	724	142
ノーベル賞	31(32回)	6	2

a) サポートスタッフでは，付属病院スタッフ，特定有期雇用教員，特定有期雇用医療職員，事務補佐員を除く．

* 余談をもう一つ許してもらえるならば，ロサンゼルスのディズニーランドは，比較的古いが，年間利用券を150ドル程度で購入することができた．アメリカの緊張感のある生活の中で，唯一ガードをおろして安心できる憩いの場所であった．娘は今でもうわごとのように，プリンセスの名前をつぶやいている．

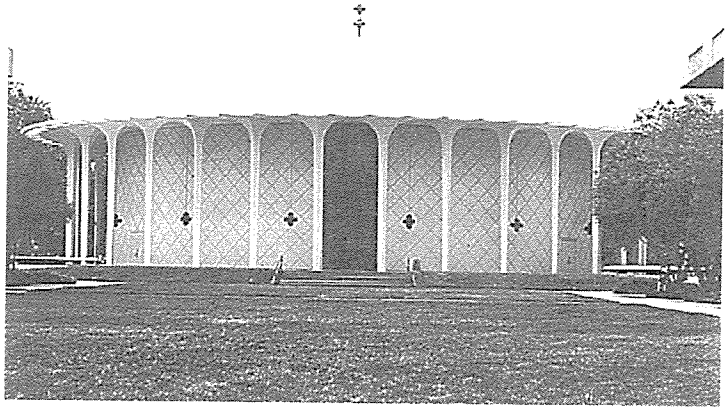


写真1　カルテックの講堂．この芝生で例年6月に卒業式が行われる．その光景はとても美しい．この他，2重らせんの噴水の池，ファインマンが裁判長を務める宗教画，アインシュタインが夏の宿に利用したアインシュタインスイートなどなど，狭いが美しいキャンパスが広がる．ぜひ，一度訪ねて見て欲しい．

京大工学研究科の約半分強であり，この人数で，工学，天文学から哲学，経済学に至る領域をカバーしている．しかし，学部生の数は，わずか891人であり，少人数の良質な教育が行われている．サポートスタッフは，2586人もおり，およそ9人で1人の教員を支えているという計算になる．このため，研究費獲得などでのオーバーヘッドは，実に60%にも達する．つまり，日本の科研費に相当するNSFの予算を，例え15万ドル頂いても，実際に使えるのは，6万ドルであり，もし，そのプロジェクトに，大学院生一人をつけるとすると，その大学院生の授業料2万ドルに加え，生活費2.4万ドルを払う必要があり，残るのは，およそ1.6万ドルである．この点では，日本の研究環境がいかに恵まれているかがわかる．オーバーヘッドの60%は，大学の運営費に充てられ，新しい教官のシードマネー，共通機器などにも使われるが，全米一と言われる美しいキャンパスの維持にも年間2億円以上も使われているそうである（写真1に，カルテックの講堂の前の写真を示す）．

従って，研究室を運営する教授連は，予算申請に忙殺され，まったく大変な毎日であるが，大学院生，博士研究員にとっては，研究を行う上で，まさに楽園の中の楽園である．カルテックに関して，もう一つ付け加えると，NASA最大の研究所であるジェット推進研究所（JPL）は，カルテックが運営する機関であり，人員の交流など密接な関係にある．実際，著者と京大の同級生である池田輝之君は，カルテックの博士研究員であるが，JPLで熱電材料の研究をしている．

3.3　カルテックで生き残ること

カルテックでは，教員の階級は，Professor, Associate Professor, Assistant Professorの3種である．日本語に訳せば，教授，准教授，助手に当たると思う．Associate Professor以上が，テニュア（終身在職権，Tenure）を有しており，Assistant Professorは，通常5年間の後にその審査を受ける．万が一テニュアを拒否されたAssistant Professorは，大学を去らなければならず，学生ともどもの移籍先探しが始まる．幸い，私のボスのHaile先生は，私がグループに参加してすぐ，無事Associate Professorに昇任され事なきを得た．従って，Assistant Professorは，死にものぐるいで研究を指揮し，そこの大学院生や博士研究員には相当なプレッシャーが掛かっていると聞く．大学院生のほとんどは，Ph.D.を目指して入学してくる．しかし，表1のデータからもわかるように，在籍している大学院生は，1281人であり，2003年で言えば，博士を無事取ることができたのは，わずか137人である．平均在学年数が5年としても，半分程度の大学院生は，学位を取れずに，大学を去っていることがわかる．言い換えると，学位を得た大学院生が好条件で職を見つけることは容易で，私の知り合いでは，NASAのジェット推進研究所，Duke大学のAssistant Professor，GEの研究所，投資信託会社にそれぞれ就職した．例えば，GEの研究所に行った中国人女性の初年度の年俸は8万ドルとのことであったし，投資信託会社に就職した天文学を修めたパキスタン人の初年度の年俸は10万ドルだそうである．ただし，もっと優秀なのは，

え一っと、実はボスが予算獲得失敗したのでクビです。 研究員の話はほかにいくつかありましたが、またアメリカをさまようのも疲れたので、実家（富山）に帰ります。
まぁ先輩がびっくりしてどっかにポスト用意するとか言ってくれてますが、今の大学の惨状からしてどうなることやら。 まぁ今の研究に飽きてきたので、なんかぜんぜん違うことでもしようかなぁとこっそり考えているところです。

友人からのE-mailの紹介（友人には承諾済み）

カルテックの学部を卒業した人たちであり，彼らのうちほとんどが大学院には進学せず，実業界に進み，アメリカをリードしているとのことであったが，著者はその実情を知らない．またの機会に調査しておく．最後に博士研究員（ポスドク）について書く．ポスドクは，基本的に1年契約であり，バイオ系では，5年6年と長くポスドクをやる人がいらっしゃったが，応用物理，材料系では，2,3年が，普通のようである．日本人のポスドクは，およそ全部でも15人程度で，皆優秀で，各研究室をリードする存在の方が多かったと思う．ポスドクの仲間では，何か戦友に近い感覚を共有するものがあり，分野がまったく違うのにもかかわらず，よくメキシコ料理店“Amigo”に飲みに行った．皆，論理が明快，発想が豊かで非常に刺激的であった．現在では，その仲間は，京大医学部教授を筆頭に，NIH，Duke大学，千葉大学，東北大，理研等に散らばっているが，一方で，上に示したような衝撃的なメールをくれる人もおり，ポスドクとしての生活は，未来があるかもしれない極めて細い稜線を歩くようなものであると思う．

4. Haile研での生活

4.1 Haile Lab.

私のボスであったSossina M. Haile（ソシナ ハイレ）先生は，エチオピアの最後の皇帝 ハイレ・セラシエI世と一部名前を共有するが，関係はないそうである．しかし，ハイレ先生も1974年のエチオピア陸軍によるクーデターの被害者という点では同じである．ハイレ先生の父は，クーデターによって樹立した政府に抵抗し，軍よって銃撃され，負傷しながらも命からがら，1976年，一家でアメリカに亡命した．このとき，ハイレ先生は10歳だったそうであり，各自スーツケース1つだけを持っての亡命だったそうである．ハイレ先生の父は，ミネソタの大学にポジションを得たが，その生活は貧困を極めたそうである．しかし，ハイレ先生は，10歳にしてアメリカに渡りながら，16歳でマサチューセッツ工科大学（MIT）に入学，19歳にして，MITを卒業した．25歳にして，MITからPh.Dを得，26歳にして，Assistant Professorとして，独立した研究室を，University of Washingtonでスタートさせている．アメリカでは，Professor, Associate Professor, Assistant Professorがそれぞれが独立しており，それぞれが，一般的には，同じ規模の研究室を運営している．といっても，研究室の大きさは，獲得資金に比例するようであり，同じ規模というのは間違いで，同じ土俵でというのが正解と思う[†]．Haile研も，私がいた時で，大学院生が毎年2～3人，博士研究員が5名，秘書が1人という規模であり，毎年，同じ人数程度の大学院生が卒業もしくは脱落するといった感じであった．研究室内の国籍は，アメリカ人がおよそ半分で，中国，インド，ノールウエー，日本，韓国，メキシコ，ドイツ等々であり，極めて多彩であった．出身も各国の最高研究機関，すなわち，精華大学@北京，ソウル大学，Indian Institute of Technologyなどからの集まりであり，今更言うまでもないことであるが，アメリカの大学の競争力の原点を垣間見た．研究は，大目標は決まっているが，かなり自由にやってよく，また，ちょうど資金が潤沢にあった時期だったので，思う存分のことはできた．ノルマは，隔週のSmall group meetingと半年に1回ぐらいのGroup meetingでの発表であり，4半期に一度のDOE（Dapertment of Energy）へのレポートも必要であった．DOEとは，日本で言うNEDOの役割を果たしており，エネルギー関係の大きな研究予算を持っていた．4半期毎のマイルストーンを自分で設定し，そのマイルストーンをいかに達成したか，何割達成したかを自分で評価するレポートを書かなければならなかった．これに加え，2003年に，ベンチャー設立に参加してからは，毎週の会社の運営会議があった．正直，最初着任した時は，Haile研でやっていけるのかという不安で一杯であったが，徐々に，自分のペースで仕事を始めた結果，今まで

[†]研究室の大きさは，獲得資金に応じて大きくなるので，研究室は無限に大きくなる可能性がある．そこで，ある学科では，研究室の構成人数は最大で30人と定めている学科もある．

日本で受けていた教育が十分に通用し，実験室の中で困ることはなかった．むしろ，実験方法などはこちらが教える機会が多かった．これに関して，日本の私の恩師に感謝してもしきることはないと思っている．

4.2　ベンチャー立ち上げ

アメリカ人の学生は起業意欲が強く，実験のモーティベーションは，学位のためというより，起業したいとの一念ではないかと疑いたくなる学生もいる．生涯の友人になりそうなDane A. Boysenもその一人で，彼は，大学院生であったが，Ph.Dのテーマとして選んだ物質の一つCsH_2PO_4という物質を電解質に使って，燃料電池を販売する会社の立ち上げを狙っていた．その物質は，ハイレ先生にやめろと言われていた不安定な物質で，周りも悲観的であったが，アラスカ育ちの彼はねばり強くチャンスを狙っていた．彼の熱意に，いつの間にか，私も毒されて，朝から，午前2時，3時まで実験を繰り返す日々を過ごし，いろいろな幸運も重なり，2003年，見事，ちゃんとした燃料電池として発電に成功し，初期的にクリアしなければならない耐久試験も成功してしまった．次に，彼のオフィースメートである，テキサス生まれで世界一の楽天家Calum Chisholmと一緒に，Daneの念願の会社（彼は数年前から名前を決めていた），Proton Powerという会社を起業することになり，私は，CTO（Chief Technical Officer）として加わった．Proton Powerは，創業後すぐに，Proton Power Systemsという別の会社から，トレードマーク侵害で訴えられ，残念ながら，名前をSuperprotonic Inc,に変更しなければならなかったが，現在でもちゃんと存続しており，DaneとCalumの名コンビで，今も運営されている．私の株は，最初200万株（全株の20％）であったが，日本に帰るに当たって，100万株に減らしてもらった．もし仮に，会社が上場にこぎ着けたとすると，例えば，Googleの上場の際の上場株価が，1株100ドルだそうなので，“超”取らぬ狸の皮算用的には，100万株=100億円である．可能性はないにしても気持ちのいい額ではある．当初，ベンチャーの経営は，家内におままごとと言われるぐらい，アマチュアだったが，去年，8社からなる投資家連合から，4ミリオンドルの投資を受けることができ，当分存続できそうになった．また，このお陰で，私とSuperprotonic, Incとも，この8月1日研究開始で，共同研究契約書（JRA）をまとめることができ，2年間の

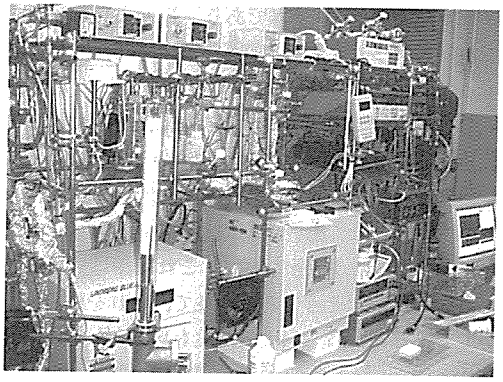


写真2　著者が自作した燃料電池評価装置（TORO）

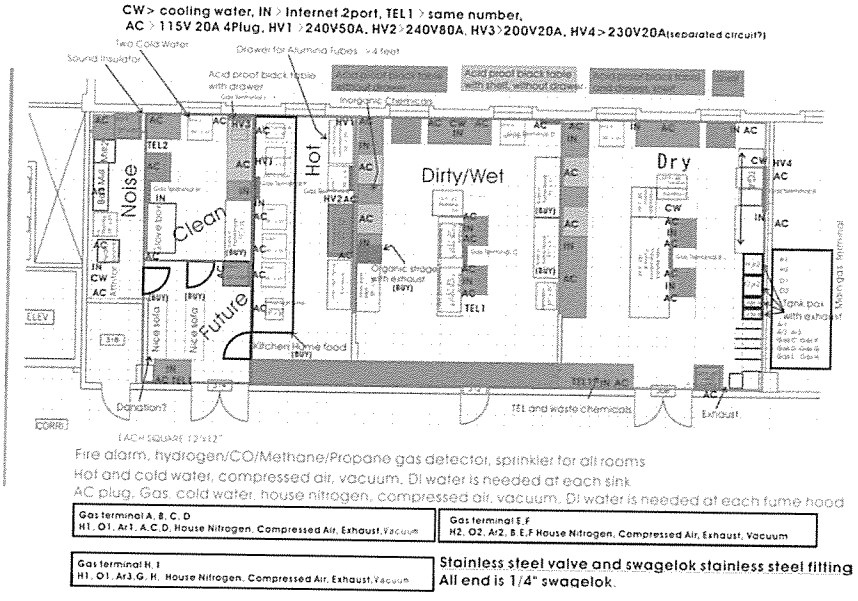


図1　Haile研のNew Lab. Planのドラフト

共同研究を開始した．この研究は，最初からおもしろい展開になりそうであり，商売を抜きにして，学術的にもおもしろい．このJRAをまとめる課程では，京大の産学協力課のお世話になったが，京大で，英語で共同研究契約書を結んだのは初めてだそうであり，貴重な経験と自負している．

4.3 実験室の設計

私には，たくさんの恩人，師匠がおり，その内の二人，K.T.Jacob教授と岡部徹助教授の名前にちなんで，TOROという名前の燃料電池評価装置を作った．インド人のJacob教授は，岡部徹先生のことを，Toruと発音しようとするのだが，どうしても，Toruと発音できず，Toroになってしまう．そこで，Toruとダイレクトに呼ぶのに，少し気が引けた私は，２人にちなんで，Toroと装置の名前を付けた．その装置の写真を写真２に示す．アメリカは，Sushiブームであり，Toroという単語を知っている人も多く，結果，非常に親しみのある名前だったようである．この装置は，潤沢な予算を反映させて，自分のアイデアの思いつく限りを試した装置で，何でもできる装置にしてあった．これが，いろいろな場面で自分を助けてくれた．チャンピオンデータも出してくれた．感謝している．ただし，最初の９ヶ月は，装置作りに没頭していたので，Haile先生は，これはやばい日本人が来たと思っていたそうである．さて，これを使って，結果がでてくると，新しい大学院生も真似をして，それぞれ１台づつ似たような評価装置を作成し，T2とか，Kikueとか，名前を付けていたようである．そこで，現在，Haile研には，中国人ポスドクの作った１台を加えて，燃料電池の評価装置が４台あるはずである．

そうした中，大変なことに研究室の引越しという難題が襲ってきた．誰かが，白紙からプランをまとめ，図面を引かなければならないというMeetingで，著者は，ひたすら顔を背けて関係ない，今日の晩飯は何かな？という素振りをしていたのに，“Tetsuya”と，当ててくれた時のことは忘れない．それ以後，返事だけは良くて，なかなか仕事の進まない施設のElvin Nixonとの交渉，わがままを言いたい放題の大学院生と博士研究員たちとの調整は，大変だった．その時の著者が書いた図面のドラフトを，図１に示す．図には，乗っていないが，Haile研には，もう一つ大きな部屋があり，実験室だけの合計面積は，200m^{2}程度だったと思う．この新しい実験室の完成は，日本に帰国後であり，残念ながら最後まで見ることはできなかったが，無事完成したよしである．最後に，ここまでの話を読むと，工作やお金儲けの事ばかりをして，科学的なことは全くやってないようであるが，そうではないことを，言い訳しておくと，Haile先生との３年間の共著論文は，７報になり，ちゃんと研究者として成り立っていると思う．研究成果の詳細は別の機会にということで，今回は，前述の簡単ではあるが概要を参考にされたい．

5. 最 後 に

著者は，ここで紹介したような経験を資産にして，材料工学の分野の発展のために，また，燃料電池やレアメタルプロセスに関わる新しい研究のために，奮闘しようと思っている．世界に通用する研究を目指して，力の限り挑むつもりであるので，今後ともご指導ご鞭撻を頂ければ幸いである．

談　話　室

私のこれまでの研究とこれからの研究

市　坪　　哲*

My Previous Studies and Future Works

by Tetsu ICHITSUBO

1. はじめに

いつも拝読させて頂くだけの水曜会誌に私が原稿執筆できることをたいへん光栄に思います．私自身のこれまでの研究を述べる前に，まず自己紹介を簡単にさせて頂くことにいたします．私は，平成3年4月に京都大学工学部金属系に入学して，平成12年3月に京都大学大学院工学研究科材料工学専攻博士後期課程（当時の小岩研究室）を修了し，同年4月1日付けで大阪大学大学院基礎工学研究科システム人間系専攻（現 機能創成専攻）機械科学分野・助手に着任，その後，平成15年4月1日付けで東北大学金属材料研究所・助手として転任，平成17年6月1日付けで京都大学大学院工学研究科材料工学専攻・助手として転任，そして平成18年8月1日付で同専攻・助教授に着任いたしました．大学院を修了してからおよそ6年間に，3大学を助手として異動し，自身の引越しや装置などを含めた研究室の大移動などを経験してまいりました．

京都大学に戻って来ることができたのは，私の上司である松原英一郎先生に依るところが大きくあります．旧金属系校舎（6号館）の3階に博士課程の学生が「吹き溜まる」ように集まった時期に，同階に居室をもたれていた先生が颯爽と廊下を歩いて来られ，いつも煙草を吸って廊下にいた私に声をかけて下さったことが，先生と一緒に仕事をさせて頂く契機になったと思います．その後，先生が東北大金研で教授をされているときに私を金研に招いて下さり，先生の京大への異動に伴い私も同時に異動してきたことが，京都大学での現職に繋がっております．京都大学卒業後，大阪大学→東北大学→京都大学とおよそ2－3年の間隔で移動してきたわけですが，研究の発展性・連続性からすると，効率が悪いということは言うまでもありません．研究が少し軌道に乗りかかったと思うとよそへ行くわけですし，たとえ同じスタッフの研究室であっても，装置が移動すれば約半年から1年は何かと稼動できない状態になるからです．しかしながら，多種にわたる研究内容，学風や学生の気質の違いなどを味わえたことは，貴重な良き経験のひとつであると思います．私の異動話で前おきが長くなってしまいましたが，以下に，私のこれまでの研究および今後の研究について年代を追って紹介させて頂きます．

*京都大学大学院工学研究科　材料工学専攻　助教授

2. これまでの研究

2.1 京大博士課程時代（平成9年4月－12年3月）

「FePd合金の規則－不規則相変態に及ぼす外部応力・磁場効果に関する研究」（博士論文題目）を遂行しました．このFePd合金の規則化では，構造はfcc不規則相から$L1_0$規則相へと変化します．今でこそ$L1_0$構造磁性合金は次世代の垂直磁気記録材料として注目され，無数と呼べるべき研究発表がありますが，当時（1996-2000年頃）は日本では勿論のこと，世界的にもPittsburg大学のWA Soffa教授ら以外はあまり研究されていない合金系であったと記憶しております．本合金系ではfcc立方晶から$L1_0$正方晶への構造変化を伴いますので，3種類のバリアント（兄弟晶）が生成し，そのため弾性場が相変態の組織形成に大きく影響し，異種バリアントから形成されるツイード組織と呼ばれる特殊な組織（<110>方向にstriationが入った構造）から<110>微細双晶構造へと一連のパターン形成を示します．私の研究では，まずこのパターン形成のメカニズムを弾性論と熱力学の観点から理解し，次にその基礎を踏まえ単一バリアント構造を形成させることを目指した研究を行いました．単一バリアント構造の形成は，垂直磁気記録薄膜の作製にお

いて非常に重要となり，実用として物になるかならないかを決める鍵となるものです．ですから，研究室指導教官（小岩昌宏先生や田中克志先生）のご指導のお陰ではありますが，当時としては若干の「先見の明」がある研究であったと自負しております．

ツイード組織の形成は，異種バリアント間の弾性相互作用によることがAG Khachaturyanらによって指摘されておりましたが，私自身のマイクロメカニクス計算およびフェイズフィールド微視力学によっても同様の結果が示されました．すなわち，自然に相変態させる限り単一バリアント構造の形成は起こりません．しかしFePdの場合には，不規則相からの相変態過程の間に単結晶<001>方向に応力や磁場をかけておくと，正方晶軸比c/aが1以下であることおよび磁化容易軸がc軸であることから，期待通り単一バリアント構造に制御することができました．しかし本質的に異種バリアント間の弾性相互作用によって双晶が安定化されるのですから，応力や磁場などの一方向性のある外場をかけても単一化する保障は全くありません．現に，形成組織は変態温度に強く依存し，高温相（不規則相）の不安定温度以上での核生成・成長型の変態モードを経る場合には，外場によって核生成頻度をバリアント間で顕著に差をつけることによって，自己組織的に単一化することができますが，逆に不安定温度以下でのスピノーダル規則化の場合には，外場を与えても全く組織を変化させることは出来ませんでした．このメカニズムを理解するため，モンテカルロ法を利用した自由エネルギー計算法の考案，時間依存ギンツブルグ・ランダウ理論に基づく外場を考慮した組織形成シミュレーション，カノニカル・アンサンブルに基づく非保存系熱揺らぎの定式化などを行い，最終的に単一バリアント構造の形成メカニズムを理解することができました．ここで行った地味ではありますが着実（？）な実験手法や理論計算は，その後の研究の糧になっていることは言うまでもありません．

2.2 阪大基礎工・助手時代（平成12年4月－15年3月）

阪大基礎工在職時には，主に超音波計測法に関連する研究，マイクロメカニクスを利用したコンポジット材料の有効弾性定数（巨視的平均値）の予測法の確立を主な研究課題としてきました．特にこの時期には手法の確立に重点をおき，材料科学的な「物質の理解」という観点からの研究は行っていませんでした．「機械系」と「材料系」と似て非なるもの（文化，考え方，学問領域がかなり異なると感じます）に属していたことが主因であります．そこで携わった研究は多岐にわたっており，研究室から与えられたテーマとしては，「二相ステンレス鋼の熱脆化の音響評価」，「接触に伴う弾性体の共鳴周波数変化を利用した接触型超音波顕微鏡の開発（初期段階のみ）」，自らの研究テーマとしては，「ロータス型ポーラス金属の異方的弾性率の計測およびマイクロメカニクスモデリング（阪大産研 中嶋英雄先生との共同研究）」，「ニッケル基超合金のラフト形成メカニズムのマイクロメカニクス計算に基づく解明と超音波による非破壊世寿命評価に関する研究（物材機構 原田広史センター長との共同研究）」，「金属ガラスの弾性・擬弾性に関する研究（当時，東北大 松原先生，東北大学際センター 才田淳治先生，RIMCOF東北大学研究室 西山信行先生との共同研究）」，「$L1_0$型磁性合金を利用した垂直磁気記録膜の作製」などを遂行しました．博士学位取得後すぐの助手生活にしては，節操無く多くの研究を行ったため，大部分の研究は中途半端な状態であったと思います．

博士課程時代と比較して上述の様な落ち着かない研究生活を送っていた中で，私にとって幸いであったことは，私が受け持った一番初めの学生（現 阪大助手）がポーラス金属の研究のテーマで博士課程進学を希望し，その後数年間，共に研究を行ってくれたことです．これによって，マイクロメカニクス計算の新手法「有効平均場近似法，Effective Mean Field (EMF) Method」（有効媒体近似の考え方を従来のMori-Tanakaの平均場近似法に取り込むことにより，高い介在物分率の場合でも高精度で定性的に正しい結果を導く計算方法）を考案することができましたし，ロータス型ポーラス金属の力学的なモデル化を系統的に行うことができました．この学生には多くのことを教えましたし，また私も彼から多くのことを学びました．まさに「先生と学生」の非常に良い関係にあったと思いますし，今でも良い共同研究者でいてくれています．

また，ニッケル基超合金のラフト化メカニズムの解明は「機械系ならでは」のマイクロメカニクス理論を利用した研究であり，現在は乾研究室の田中克志先生によってラフト構造の崩壊メカニズムまで理解が進んでいます．金属ガラスの弾性・擬弾性の超音波計測については，最初は全て自ら合金を作製し，炉で融解させた後水焼入れすることによって作製したガラス材料を超音波計測しておりましたが，結晶化を完全に抑制することは難しく，より良い試料を松原先生が提供して下さることによって，現在の私の研究の柱になっている「超音波振動下での結晶化促進現象」を見出すことができました．しかし，そのメカニズムについて当時は全くわかりませんでした．磁性膜の作製については，200－300万円くらいでスパッタガンを2つ購入し，廃棄された真空蒸着装置（ベルト式のロータリーポンプ付）のチャンバーを改良してそれらを装着し，手作りのスパッタ装置を作製して成膜したことが印象に残っています．廉価なスパッタ装

置であっても，基板に綺麗に数ナノメートルほどのナノ粒子を無数に分散させた膜を作製することが出来るようになりました．

阪大時代は，「自分の興味の研究テーマ」および「論文を書くための研究テーマ」を複数設定し，その中で自分がどのような態度で研究を遂行すれば満足し納得できるかについて，若いながらに相当考えてきました．「自分が興味を持っている長期的な基礎研究を行う」ということと「論文数を増やすための短期的・即利益的な研究を行う」という「相容れない要請」の消化の仕方を模索してきたような気がします．

2.3　東北大金研・助手時代（平成15年4月－17年5月）

松原先生に平成13年の冬に「一緒に仕事をしよう」というオファーを頂き，丸々1年以上段取りを整えて，平成15年の4月1日に仙台に入りました．阪大基礎工の雰囲気とは全く異なる東北大金研への転勤です．圧巻は，約30の研究室が存在することと，多種多様の共同利用装置を兼備していること，研究資金の獲得が半端ではないこと，博士課程の学生が発表する論文の数やNature誌など主要ジャーナルでの発表論文の多さなどです．「京大最高」という気持ちは依然変わりませんが，東北大金研は世界を代表するすばらしい研究所の一つであることは間違いないでしょう．

さて金研・松原研における自分についてですが，機械系で基本的に力学計算や超音波計測をしていた研究環境から材料系の環境に戻ったのですから，最初は相当リハビリが必要でした．何と言っても，状態図の見方から復習しなければならないのです．先生に与えられた課題は，「SnZnはんだ合金実用のための合金設計」についてです．これは，状態図とMiedemaの凝集エネルギーとのにらめっこです．その他のテーマは，阪大の時から引き継いだ「金属ガラスの研究」と「磁性薄膜作製に関する研究」です．特に垂直磁化膜の研究では，松原先生に申請書の書き方などの指導を頂いたお陰で科研費・若手研究（A）を獲得でき，それによって3元同時高周波スパッタ装置を購入することができました．阪大時代に200万円程度で作った自作装置が大変身したというわけです．また，東北大金研は金属ガラス研究のメッカですから，当然，金属ガラスの振動誘起結晶化の研究にも力を入れました．このように自然と研究テーマは絞られ，構造・物性などの基礎研究，磁性膜のようなハイテク技術研究，はんだ合金開発のような基盤技術研究の3本柱を基調とするような研究テーマを選択する形となりました．

3.　京大材工に移動（平成17年6月－現在）してからの研究と今後の研究

東北大金研時代の研究テーマに加え，京大での新たな研究テーマを新たに立ち上げて遂行しつつあります．具体的には，強加工材料の力学・組織に関する実験および解析，リチウムイオン電池の負極材料の長寿命化に関する研究と新たなマグネシウムイオン電池のためのマグネシウム酸化物の正極としての可能性などを加えて現在に至っております．特に後者の研究テーマを遂行する背景には，平成17年4月にカルテックから着任してこられた宇田哲也先生（現 粟倉研・助教授）の知識的・実験的ご助力があります．以下に，これまでの研究内容において成果がまとまっているものについて簡単にその内容を紹介させて頂きます．

(i) SnZn系鉛フリーはんだ合金の実用化へ向けた基礎研究

低融点共晶合金であり廉価で実用化が期待されているSnZn合金は，Znが非常に活性である（酸化されやすく，拡散も早く，Cu界面で脆いCuZn化合物が形成される）ことから，Znの安定化が必要とされています．我々はNiやCuを添加して，更に急冷アトマイズ法を用いて組織を微細化することにより，220℃程度の低融点を示し，図1に示すように，界面化合物が

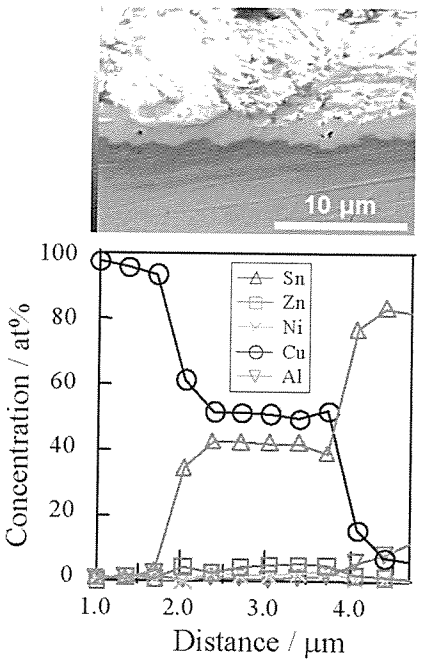


図1　SnZnAlNiCu はんだと Cu 基板のはんだ付け後，120℃ 500h の熱処理を施した場合の界面反応層．

従来のSnPbと同様のCuSn系の化合物が形成されるはんだ合金を作製することができました．アトマイズ処理をしない合金においては，確実にCuZn化合物相が界面で形成されてしまいます．このように「Znを含むはんだがCu基板とCuZn化合物相を形成しない」というのは，大変興味深い現象だと思っております．実は，このメカニズムは拡散とパーコレーションの問題に良く似ていると考えています．現在は，耐熱性，高温強度の試験を行い，実用化に向けた研究に取り組んでいるところです．

(ii) $L1_0$型磁性超微粒子の基板上での規則配列とc軸面直配向技術の確立

実用的な機能性磁性材料として注目されているFePtやFePdなどの$L1_0$型磁性超微粒子を基板上に規則配列させ，その正方晶c軸を面直方向に配向させる方法は，次世代磁気記録媒体開発の核をなす重要な技術であり，多くの研究が行われています．我々は，$L1_0$型合金における磁場下での規則-不規則変態の研究経験に基づいて，基板上に形成させた$L1_0$型磁性超微粒子を強磁場下で熱処理を施すことで粒子の配置に関して規則配列をさせる研究を行っています．また，ある種の酸化物ガラス層を下地層や中間層として混在させておくと，図2に示すように，磁場をかけなくても正方晶c軸が面直に配向することも分かりました．現在はそのメカニズムを検討しており，より一般的な面直配向技術の確立に向けて努力しているところです．また，FePtなどの高価な材料に頼ることなく磁気異方性を発揮させるようなFeナノロッド薄膜の作製にも興味を持って現在遂行しているところです．

(iii) 金属ガラスの超音波誘起結晶化観察による構造安定性機構の解明

近年，金属でありながらアモルファス構造をとり明瞭なガラス転移を示す「金属ガラス」と呼ばれる合金が東北大金研・井上教授らによって開発され，それらの構造・熱的安定性，物理的・化学的性質，機械的性質などが盛んに研究されています．一般にガラス科学において，ガラス転移やガラス構造に関する本質的なところは，未だミステリアスなところが多く，現在でもなお世界的に盛んに研究がなされています．

我々は最近，金属ガラス材料を超音波振動下で熱処理を施すことにより，通常の結晶化温度よりも相当低い温度（ガラス転移温度近傍）で結晶化が劇的に促進されることを見出しました．ガラス転移温度より10℃程度低い温度で超音波熱処理を施し部分的に結晶化させた試料を，高分解能電子顕微鏡を用いて観察すると，図3に示すようにアモルファス領域を結晶壁が取り囲んだような特異な組織になることが分かりました．通常の結晶化の初期過程では，アモルファスマトリクス中に孤立した結晶相が生成するのが普通です．このような特異な構造を生み出す超音波誘起結晶化のメカニズムは，ß緩和とよばれる力学緩和とその特性周波数の観点から理解することができます．すなわち，超音波振動下での低温結晶化は，ß緩和現象における原子ジャンプが周期的歪と共鳴することにより通常とは異なるジャンプ位置に起こる（一種の確率共鳴現象）ことに因ると推論されます．そして，そのような原子ジャンプは，ガラス構造の中で相対的に密度が低く結合が弱い領域で起こると考えられます．したがって，写真のようにアモルファス－アモルファスクラスター間の弱結合領域において容易に結晶化が進行すると考えられるわけです．

今後の研究では，この振動誘起結晶化機構およびガラスの巨視的構造を，粘性のフラジリティパラメータに着目して，弾性・擬弾性，X線回折・小角散乱および非弾性散乱，高分解電子顕微鏡などの手法を駆使して解明することにあります．現在，Spring-8/BL35XUでのX線

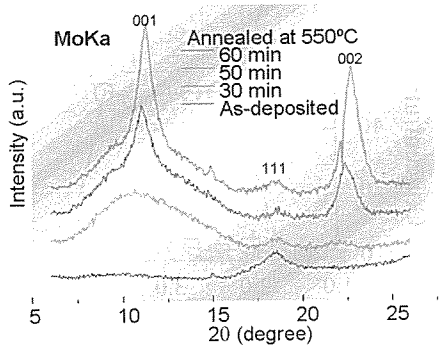


図2 FePt/酸化物多層膜のXRDプロファイル．規則化してc軸がほぼ完全に面直方向に配向する．

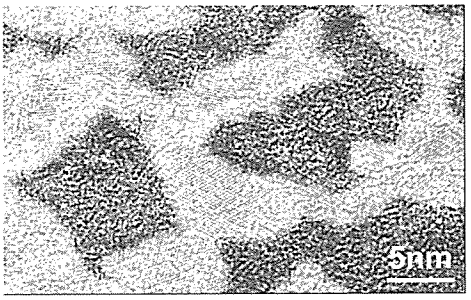


図3 ß緩和によって結晶化した組織の高分解能電子顕微鏡像（試料：Pd-Ni-Cu-P金属ガラス）．アモルファス領域（黒）と結晶化領域（灰）を色分けして区別してある．

非弾性散乱実験による解析により，ガラスの構造不均質性に関する有意な情報を引き出せつつあります．次に，より実用化を目指して，超音波振動下で部分的に低温結晶化させた金属ガラスのガラス構造に着目して高靭性特性を得るための組織を探索する予定です．金属ガラスは「ガラス」と呼ばれることからも容易に想像できるように，ガラス転移温度（T_g）以下では，ほとんど塑性変形をせずに破壊してしまいます．これは，ガラス中には結晶特有の転位が存在しないので，塑性変形が困難になるためです．しかし金属ガラスにおいては，破壊あるいは塑性変形が起こるまでの応力は通常の金属材料に比較して数倍高く，降伏応力に関する高強度特性は魅力的な特性です．そこで本研究では，高い強度特性をもつ金属ガラスを超音波振動共鳴法で部分的に結晶化させることにより，塑性変形が可能な部分結晶化金属ガラスを創製することを目的とした研究を行っていく予定です．図3のような高強度ガラスを塑性変形可能な結晶相が取り囲むことにより，転位の移動が容易になると同時に破壊に寄与する弱結合部が消失すると考えられます．すなわち，ある程度高強度特性を保ちながら塑性変形も可能になることが期待されます．本研究では，このようなナノヘテロ組織における結晶相厚さと強度，靭性などの機械的性質の相関を系統的に明らかにすると共に，空間的に一様にこの組織が形成できる手法を探索する予定です．

4. おわりに

京都大学を卒業し，大阪大学そして東北大学の助手として異動し，再び京都大学に戻って来ることができたことを大変嬉しく思っております．他大学にも勿論特有の雰囲気はありますが，京都大学という独特な学風を漂わせる雰囲気の中で，「ゆっくりと」そして時には「せっかちに」研究をすることができるのは何よりも幸せです．また，先輩後輩を含めた仲間がすばらしいと感じますし，先輩の先生方は，この業界でトップランナーです．そのような分野をリードする研究者集団を構成する一員として，恥ずかしくないような仕事や業績を残せていけるよう努力するつもりです．また，優秀な学生が多数在籍しているのもこの大学の特徴ですので，一人でも多くの博士課程進学者を残せるような雰囲気作りに励んでいきたいと思います．本年8月1日付けで助教授に着任させて頂きましたが，まだまだ33歳という若輩者であり，一層の精進をしていく所存ですので，今後とも，学内・学外を問わず，諸先輩皆様のご指導・ご鞭撻を何卒宜しくお願い申し上げます．

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

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

以下に平成17年度の主な研究タイトルと内容を示す．

メッシュレス法による岩石試験の数値シミュレーション

近年注目されているメッシュレス法の一種であるエレメントフリーガラーキン法を用いて岩石の破壊現象を再現することを試みた．その際に，解析対象に与える物性値にワイブル分布に従うばらつきを与えることによって，岩石のもつ非均質性を表現した．また，破壊後の要素の挙動としてdegradation modelを採用することによって，拘束圧に依存する挙動の変化を再現することを試みた．上記の方法で，一軸引張試験・圧裂試験・三軸圧縮試験を行った結果，供試体の破壊挙動は実際の岩石試験と定性的によい一致を示した．また，寸法効果や統計的性質の再現性などに関しても確認することができた．

列車走行による地盤振動解析に関する研究

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

海底変動による津波発生時に生ずる疎密波内部伝播の二次元シミュレーション

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

空溝による表面波の減衰効果に関する研究

個別要素法では原理的に自由表面の境界条件は自然に満足されるため，空溝などのように地表面に複雑な地形が存在するモデル作成が容易に行えるというメリットがある．本研究では，地表面に空溝のある個別要素法モデルを作成し，シミュレーションを行った．従来から行われてきた実験などによる研究から，空溝による表面波の振動遮断効果は波長λと溝の深さdとの関係で決定され，d/λが大きいほど振動遮断効果が指数関数的に高くなると言われている．本研究のシミュレーション結果から従来の実験結果と同様な傾向の結果を得ることができた．特に幅の小さい空溝において，表面波のエネルギー比から理論的に算出した透過率曲線と非常によく合った結果を得ることができた．

P，S分離波を用いたKirchhoff型重合前深度マイグレーション

反射法地震探査の鉛直方向と水平方向の受振記録からP波成分とS波成分を分離する分離フィルタの作成を行った．また，走時計算にFast Marching Methodという手法を導入することで，PS波やSP波にも対応したKirchhoff型重合前深度マイグレーションの作成を行った．

浅層反射法地震探査を用いた3次元モデリングとイメージングに関する研究

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

2方向アンテナによる地中レーダ探査

地中レーダ探査におけるイメージング精度の向上のために複数方向のアンテナ配置によって得られる受信データを用いたマイグレーションを行った．その結果，特に対象物を斜めに通過する測線において振幅が強調され，埋設管や地下の走向が不明なことの多い実フィールドにおいて有効であることが分かった．これは，送信アンテナと受信アンテナが垂直となる配置の場合，測線が対象物に対して垂直の場合は感度が弱いが，測線が埋設管に対して角度を持つことにより感度が上がり，得られる受信データにおける反射波が強く現れたためだと考えられる．さらに地中レーダの測定が簡便かつ高速であることを利用して，データ取得から解析まで結びつけることは非常に有用であると考えられる．

海洋MT法データの2次元インバージョン解析

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

教　授　芦田　譲
助教授　三ケ田　均
助　手　真田　佳典

工学研究科　社会基盤工学専攻

地殻工学講座
地質工学分野

PSInSARデータとモデル実験を用いた新潟県中越地方の地表変状解析

地震や地滑りなどの地盤変動災害を低減するためには，活断層周辺地域などでの地表変動を正確に計測・把握する必要がある．今回は，衛星画像情報を用いて微小変動を解析する手法の一つであるPSInSARの解析結果に注目し，モデル実験によって再現された地質現象の表面変動を計測し，両者を比較した．その結果，PSInSARによって抽出された地表面変動情報には，広域応力場による地質変形によるものが含まれることが確認された．この成果は，広域を高精度かつ安価に調査できるPSInSARとモデル実験を組み合わせる手法の有用性を示している．

数値シミュレーションと震探データ解釈によるベトナム・ソンホン堆積盆地炭化水素ポテンシャルの検討

ベトナム沖北部に位置するソンホン堆積盆地の炭化水素ポテンシャルは，盆地形成過程によって大きく左右されるため，この地域で取得された震探データを用いてモデル化し，数値シミュレーションによる検討を加えた．その結果，インド亜大陸がユーラシア大陸に衝突したことによって形成された大規模剪断帯であるred river faultの活動に伴ってこの盆地が形成され，その後の応力場の転換に伴って全体として圧縮されたことが明らかとなった．したがって，この堆積盆地の炭化水素ポテンシャルは基本的に圧縮性プルアパート堆積盆地として評価できる．

個別要素法を用いた南海トラフ付加体形成における海山の影響に関する研究

南海トラフ付加体にはメタンハイドレートの存在が確認されており，その集積過程を解明するためには付加体形成過程と流体移動の関係を明らかにする必要がある．今回は，解析対象を粒子集合体として近似する個別要素法を用いて，付加体形成過程における海山沈み込みの影響を検討した．その結果，海山沈み込みによって付加体には特徴的な形態が形成されることや，断層系に明らかな系統変化が生じることが分かった．これらは実際に南海トラフ付加体で取得された震探データや流体試料の同位体データと整合的である．

貯留層特性分布解析手法の流線に着目した高速化に関する研究

油田開発時に必要な坑井試験による貯留層特性解析手法の高速化を図った．貯留層特性を反映した地質構造モデルから流線アプローチ法を用いたインバージョンを行い，坑井での生産データから貯留層特性の推定を行った．流線アプローチでは流線に沿って様々な生産データと共に生産データに対する貯留層特性の感度を得る．これらを用いてインバージョンを行った結果，高速に貯留層全体の浸透率分布を推定することが可能となった．将来はこの高速解析性能を利用し，パラメータ数が多い条件下での逆解析が可能となり，推定精度の向上化が見込まれる．

CO_2圧入に伴う貯留岩試料の比抵抗変化の計測に関する研究

CO_2地中貯留の電気探査によるモニタリング手法の開発のため，室内圧入試験による比抵抗計測実験を行った．地中の高温，高圧状態を再現可能な実験装置を構築し，貯留岩試料にCO_2を圧入させ，比抵抗変化を測定した．アーチーの式を用いて算出した試料のCO_2置換率が排水体積から求めた置換率と近い値を示し，比抵抗測定によるCO_2置換率の推定手法は高い精度を有することが示された．気相に比べ液相や超臨界相の場合に置換率が高まり，大きな流量で圧入した方が置換率が高まることが観測された．

メタンハイドレート層の弾性波速度モデルの構築に関する研究

メタンハイドレート賦存域の探査精度向上のため，ハイドレート層の地震波属性の把握を目的とした研究を行った．ハイドレート層をランダム不均質媒質と仮定し，実探査で取得されたP波速度検層解析から統計的特徴を得る事でモデル化した．作成した速度モデルで弾性波動シミュレーションを行い，実際の現場で得られた反射法地震探査記録を比較，検討した．合成地震探査記録からハイドレートの層状分布に伴う特徴的な反射波が得られ，提案モデルのメタンハイドレート層モデルとして妥当性を確認した．

教　授　松岡　俊文
助教授　山田　泰広
助　手　尾西　恭亮

工学研究科　社会基盤工学専攻

地殻工学講座
地殻開発工学分野

数値岩石モデルによる岩石の力学物性評価法に関する研究

岩石の弾性係数はテンソル量であるが，等方性や横等方性などの単純な異方性を除いて全てのテンソル成分を実験的に求めることは簡単でない．しかし，微視的に複数の相からなる非均質材料に対して均質化法を用いると，均質化された材料物性値として各相の分布特性によって生じる異方性を考慮した弾性係数を求めることができる．本研究では，実岩石をリアルに表現した数値岩石モデルに対して均質化法を適用し，岩石の弾性係数テンソルを計算機上で評価する方法について詳細な検討を行い岩石に対する新たな力学物性値の評価法の一つとして提案することを目的としている．そこで，空隙部と岩質部を物性の２つの相から構成されていると見なすことができる多孔質岩石の弾性係数テンソルを定めるため，まず，異方性の方向が明らかになるように空隙を配置した単純な多孔質岩石モデルに対して均質化法を適用し，求まった弾性係数の値と異方性の方向の妥当性を確認することによりこの手法の有効性を確認した．次に，マイクロフォーカスX線CTスキャナー画像から再構築したベレア砂岩の数値多孔質体モデルに対して均質化法を適用し，均質化法の計算に用いるユニットセルの寸法が弾性係数の評価値に与える影響について検討した．その結果，ユニットセルを適切に取ることにより妥当な弾性係数が求まり，本手法の妥当性を確認することができた．また，ベレア砂岩についてユニットセルは少なくとも最大空隙径の9倍程度のサイズが必要であることがわかった．今後，岩質部を構成する鉱物の異方性を考慮した方法についても検討を行う予定である．

格子ボルツマンモデルを用いた貯留層岩石の流体流動特性評価に関する研究

原油・天然ガスの効率的な開発とその地下貯蔵ならびに温室効果ガスの地中隔離のためには，貯留層岩石内における流体の流動挙動を精度よく評価する必要がある．貯留層岩石内の流体流動現象は，油，ガス，水が貯留層岩の空隙内を流動する多相流動現象であり，この多相流動では，各相間の界面張力や岩石表面の濡れ性に加えて岩石の複雑な空隙形状が各相の飽和率や相対浸透率に影響を及ぼしている．

本研究では，貯留層内におけるミクロな多相流動現象について理解し，残留油飽和率に対する影響因子を調べるため，まず，単純な形状の３次元空隙モデルに対して，格子ボルツマンモデル(LBM)を用いて水攻法シミュレーションを行い，油の残留状態が空隙の濡れ性や形状によってどのように変化するのかについて調べた．次に，ベレア砂岩の数値空隙モデルに対して同様のシミュレーションを行い，実岩石における油の残留状態について調べた．その結果，まず，LBM二相流シミュレーションにより，岩石の濡れ性などの二相流動特有の現象を再現できた．次に，単純空隙形状モデルを用いて行ったシミュレーションでは，濡れ性や界面張力の違いが流体の流動挙動に影響を及ぼし，残留油飽和率を変化させることが明らかになった．また，残留油飽和率と空隙形状の関係について評価することができた．最後に，ベレア砂岩の数値多孔質体モデルを用いてシミュレーションを行った結果，比較的大きい連結した空隙であっても水と油の間で界面が生じることにより油が取り残されており，単純空隙形状モデルに比べて多くの油が取り残されることを確認した．

炭酸ガスの地層貯蔵に関する研究

炭酸ガスを帯水層に圧入して固定する方法は，現在最も有望な固定法と考えられている．この方法では帯水層上面の帽岩は，長年超臨界炭酸ガス及び飽和炭酸水にさらされるため，これらの流体に対して力学的にも水理学的にも安定していることが必要である．また，炭酸ガス圧入井のケーシングパイプの固定に用いられるケーシングセメントについても，炭酸水と反応して劣化し漏洩の原因となることが予想される．このため，帯水層固定を安全かつ確実に実施するためには，このような地層バリアの安全性を正しく評価することが重要である．そこで，帽岩試料として野外露頭において採取した泥岩を，ケーシングセメント試料として一般の石油坑井で用いられているクラスGセメントとEORの炭酸ガス圧入井用に開発された炭酸ガス対策セメントを用いた．それぞれの試料を超臨界炭酸ガスに一定期間曝すバッチ試験に加えて，クラスGセメントおよび炭酸ガス対策セメントに対して超臨界炭酸ガスによる供試体表面の時間的変化を直接観察する影響可視化実験を，クラスGセメントに対して超臨界炭酸ガスが供試体内を浸透するプロセスにおける供試体の変化を調べる炭酸ガス流動実験を行った．その結果，影響可視化実験により，実験開始後３～４日頃からクラスGセメントでは表面が褐色に変色し始めたのに対し，炭酸ガス対策セメントでは表面に白色の結晶が析出し始め，時間とともにそれぞれの変化が進行する様子が観察できた．また，CO_2流動実験により，試験後の供試体断面には白色や褐色に変化した部分が見られ，流出側へ近づくにつれて変化は小さくなっていた．さらに詳しく断面を顕微鏡で観察すると，変色部と非変色部との境界には溝状の凹みが形成されている様子がみられた．クラスGセメントは，１ヶ月のバッチ試験により引張強度が低下したが，このような凹みの形成が引張強度低下の原因の一つと考えられる．

教　授　齋藤　敏明（平成18年3月31日　退職）
教　授　石田　　毅（平成18年6月1日　着任）
助教授　村田　澄彦

工学研究科　社会基盤工学専攻

地殻工学講座
ジオメカトロニクス分野

地山の強度劣化を考慮した変状トンネルの三次元解析

トンネル覆工の変状の進行を予測し，適切な対策工の選定とその効果の定量的な評価を可能とするものとして，本研究室では，変状の進行を周辺地山の強度劣化に伴う応力再配分の帰結として表現するモデルを提案している．このモデルでは，実測された内空変位などのデータにもとづいて，地山強度の経時変化を算定し，それを時間的に外挿して，その後のトンネル変状の進行を予測するものである．現時点で取りうる種々の対策工について，それらの良否を定量的に予測・判定できるとともに，実際の管理業務に反映させられる情報を直接的に得ることができる点を最大の特徴としている．本年度は，側壁部への押し出しやひび割れ等の変状が発生している双設トンネルの連絡坑周辺を例として，本提案手法が三次元問題においても有効であるかどうかについて検討した．その結果，三次元的な変状の進行もうまく再現できることが確認された．また，対象とした双設トンネルにおいて2回にわたって実施された対策工の効果についても適切に評価することができた．

低土被り地山における山岳工法トンネルの耐震性に関する検討

土被りが浅くかつ固結度の低い地山のトンネルにおいても，近年では山岳工法が採用されることが多くなっている．しかし，その耐震性については十分な検討がなされておらず，地震時の影響を考慮した覆工設計法は未だ確立していない．そこで，このような低土被り地山に施工された山岳工法トンネルの地震時応答を，二次元FEM解析を用いて検討した．実施した解析は応答変位法に準じるものであり，土被り，地盤剛性，基盤層の位置等をパラメータとして，地震時の覆工被害の程度について検討した．その結果，兵庫県南部地震クラスの地震動に対しても，一般的な地盤条件の範囲内においては，現状の設計基準でも，大規模な被害（アーチ部の剥落やブロック塊の落下など）の生じる可能性は低いことが示された．また，個々の地盤条件の差異が覆工被害へ及ぼす影響はそれほど大きいものではなかった．過去の被害事例が示すように，特殊な地質や施工条件においては，被害が甚大になることも予想される．地震時のトンネル覆工の被害が主として何を原因とするものであるか，また，どのような耐震性向上策がありうるかについて，今後検討していく予定である．

ガイド波を利用した埋設長尺部材の超音波検査

ロックボルトやグラウンドアンカーなど地盤中に埋設された長尺鋼材の劣化状況を，露出した片端から導入した超音波によって検査する方法について研究している．有限な断面形状を持つ長尺部材には，ガイド波と呼ばれる特徴的な波動伝播形態があり，それらには周波数と位相速度に一定の関係（速度分散特性）をもち，断面内の変位分布が異なるいくつものモードが存在する．本研究では，このような検査においては，導入された波動が周囲の岩盤や土などにあまり散逸しないことがまず重要なことであると考え，そのようなガイド波の周波数とモードの組合せが存在するか，またそのような組合せが選択的に励起できるかについて検討を行っている．昨年度，埋設丸棒を対象として，ガイド波の速度分散特性と断面内変位分布について理論解析を行い，合わせてレーザードップラー振動計による伝播波動の直接計測を実施して，周囲媒体よりも丸棒内の波動エネルギーの方が大きいと予測される波動モードと周波数の抽出を行った．また，石膏内に埋めたアルミ棒を使った実験によって，選択したモード・周波数の組み合わせが実際に周囲媒体への波動の散逸が少ないものであることを確認した．今年度は，そのようなガイド波のモード・周波数の組み合わせを，選択的に励起できるかについて基礎的な検討を行った．レーザーパルス光による励振など，実験的にいくつかの方法について調査し，その可能性は十分あるものとの見込みを得ている．

吊橋ハンガーロープ端末部への全磁束型劣化検査法の適用

当研究室では，本四架橋などの大型吊橋のハンガーロープに対して，その腐食劣化を非破壊的に評価できる検査法の開発に取り組んでいる．これまでにハンガーロープの通常部分については，全磁束法と名付けている検査手法の開発が完了し，実用的かつ定量的な計測技術との認知をうけて，すでに実検査に利用されている．昨年度より，従来検査不可能域とされていた端末固定部近傍まで，その検査範囲を広げることについて検討を行っている．すなわち，固定部裏側の端末ソケット部に補助コイルを配置することで周囲鋼材の存在による磁化不足を補償し，端末部近傍に対して近飽和状態までの強い磁化を実現して，腐食断面減少の定量的評価を可能ならしめようとの考えにもとづくものである．昨年度実施した磁場解析と縮小モデルによる実験的な検討の結果を踏まえ，本年度は，実機システムの製作を行って，実際に大鳴門橋において試験を実施した．その結果，補助コイルとの併用によって，少なくとも主コイル端部までは検査範囲を広げることができることを確認した．

教　授　朝倉　俊弘
助教授　塚田　和彦

工学研究科　都市環境工学専攻

地殻環境工学講座

堆積軟岩における掘削影響領域の評価とAE挙動に関する研究

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

高圧ガス貯蔵岩盤タンクの水封メカニズムの解明に関する研究

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

本研究では，これまでに構築した岩盤-地下水-貯蔵ガスの相互影響を考慮した力学的・水理学的連成解析手法を開発し，高圧ガス貯蔵岩盤タンクにおける水封メカニズムの解明を行ってきたが．本年度は，タンクの水封機能を評価するための解析手法・設計フローを提案し，原位置岩盤への適用を行った．

地下構造物の建設における岩盤の水理特性モデルの構築に関する研究

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.本研究ではこれらの岩盤水理モデルを基に，調査段階から施工段階にわたる岩盤水理モデルの構築システムを検討した．

動的注入工法によるフラクチャーシーリングに関する理論的研究

高レベル放射性廃棄物処分施設や液化石油ガスの地下備蓄施設などの岩盤地下貯蔵施設では，長期にわたって貯蔵物質に対する高度な遮蔽性能が要求されるため，低透水性岩盤にサイトを選定する必要がある．しかしながら，この長期にわたる高度な遮蔽性能を十分に確保するために必要な水理性状を，自然の岩盤そのものに求めることは難しく，人工的にさらなる透水性の改良が要求されるのが一般的である．

このような背景のもと，低透水性岩盤に対する有効なシーリング技術として，定常圧に振動圧を付加し，セメントに水を混入したグラウト材と呼ばれる注入材を岩盤亀裂に注入・シーリングする動的注入工法を提案してきた．この工法においては，振動圧を与えることにより，グラウトの流動性の向上，及び目詰まりの抑制が期待され，現在までに原位置試験や室内実験より，その有効性が確認されている．特に，グラウト注入をより効率的かつ確実に行うため，注入パラメータと動的注入効果の関係を検討することによって，動的注入工法による低透水性岩盤の微小亀裂に対するグラウト注入のメカニズムの解明を進めてきた．このうち充填特性に関するメカニズムについては，これまでマクロな視点からセメント粒子の充填過程をモデル化することで検討を進めてきたが，現実的な充填機構の解明には，まだいくつか問題が残されている．そこで，本年度は，動的注入工法におけるグラウト充填機構をより詳細に解明することを目的として，粒状体個別要素法を用いたシミュレーションに基づく検討を行った．また，注入パラメータおよび亀裂形状がグラウト充填過程に与える影響を検討した．この結果，動的注入を行うことで，より低透水性岩盤に対して，より安定した高濃度のグラウト材を注入できることが確認できた

教　授　青木　謙治
助教授　新苗　正和
助　手　水戸　義忠

エネルギー科学研究科　エネルギー応用科学専攻

資源エネルギー学講座
資源エネルギーシステム学分野

超軽量・多機能ポーラス金属材料の開発

ポーラス金属材料は，構造材，衝撃吸収材，防音材，フィルタ，熱交換器等への応用が可能な新しい軽量素材として注目を集めている．本研究室では，マイクロメートルオーダーおよびナノメートルオーダーの微小な孔径を持ち，かつ70%以上の高気孔率を有する超軽量・多機能ポーラス金属の創製および特性評価を行っている．

純Al粉末と整粒したNaClの混合粉を放電プラズマ焼結装置にて焼結した後，水洗によりNaClを除去し，数百μmの均一な孔径分布を持つポーラスAlを得た．発泡鋳造法で作製された市販のポーラスAl合金と圧縮疲労特性を比較した結果，スペーサー法で作製したポーラスAlでは載荷繰り返し数の増加にともない圧縮ひずみが漸次的に変化したのに対し，市販のポーラスAl合金ではある繰り返し数で圧縮ひずみが急激に増加した．このように，ポーラス金属の疲労特性に気孔性状の均一性が影響することが示唆された．

また，脱成分腐食法により作製したナノポーラスAu（孔径5－10 nm）を酸処理に供することで，セル柱サイズが500 nm以上に粗大化し，しかも密な壁に囲まれた柱状構造を形成することがわかった．この特異な構造は亀裂を有するナノポーラスAu試料内への酸性溶液の浸透と関係があることが推測された．

軽量マグネシウム合金の力学特性に関する研究

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．一般に，マグネシウムは引張応力下と圧縮応力下で異なる力学特性を示すため成形性が低く，このことがマグネシウム合金の大規模な実用化を阻んでいる．そこで本研究ではAZ31マグネシウム合金押出材の引張・圧縮特性を調べるとともに，マグネシウムに特有である双晶変形に着目し，力学特性ならびに双晶生成量に及ぼす変形温度・結晶粒径・集合組織の影響を検討した．

その結果，室温条件下では，引張と圧縮の降伏応力に大きな差（力学異方性）が見られ，双晶の生成量にも大きな差があったが，これらの差異は温度上昇とともに減少した．さらに，室温変形において，結晶粒径が大きいほど，また集合組織が強いほど，引張・圧縮における力学異方性は大きく，双晶生成量の差も大きかった．以上のことから，AZ31マグネシウム合金押出材の引張・圧縮特性と双晶の生成挙動が深く関連していることが示唆された．

メタンハイドレート膜の成長挙動

メタンハイドレートはエネルギー資源としてだけではなく，天然ガスの効率的な輸送・貯蔵方法としても注目を集めている．ガスハイドレートは，水とゲスト分子相の間の界面で膜状に生成・成長することが知られているが，その成長挙動には不明な点が多い．そこで本研究では，光学顕微鏡及び高圧セルを用いて気液界面におけるメタンハイドレート膜の成長挙動の観察及び考察を行った．

その結果，成長形は温度圧力条件によって異なっているのが観察された．メタンハイドレートの平衡条件に近い温度圧力条件下でメタンハイドレート膜は多角形状を呈しており，平衡条件から離れると円形状に成長する様子が観察された．また，水に溶存しているメタンの過飽和度とメタンハイドレート膜の成長速度の関係を調べることにより，メタンハイドレート膜の成長において律速過程となるのは，水に溶存しているメタン分子の拡散過程であることが推測された．メタンハイドレート膜の成長速度にはメタンの溶解速度も関っていることが予想されるので，今後は気液界面における物質移動を考慮したメタンハイドレート膜の成長モデルについて検討を行う予定である．

岩石の破壊にともない発達するマイクロクラックの解析

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

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

教　授　馬渕　守
助教授　楠田　啓
助　手　陳　友晴

エネルギー科学研究科　エネルギー応用科学専攻

資源エネルギー学講座
資源エネルギープロセス学分野

鉛直円管内における脈動上昇流中の固体粒子挙動

エアリフトポンプは空気圧縮機以外に機械的な運動部分を持たないため，液体および固体粒子の輸送に適しており，今後適用範囲の拡大が予想される．これまでの研究から，エアリフトポンプの空気注入部以前の固液2相流部分における固体粒子の非定常挙動が，ポンプ性能に影響を与えることがわかっている．そこで本研究では，脈動上昇流中の固体粒子の非定常挙動を実験によって調べた．実験では輸送管内に上昇流を起こし，バルブによって液相平均流速を制御した．脈動流はタイマーを用いてポンプ電源のON/OFFを周期的に切り替えることで実現した．液相平均流速，粒子速度，粒径，脈動周期（ON動作時間＋OFF動作時間）をパラメータとし，輸送管内の固体粒子の様子をビデオカメラにより観察した．また，圧力センサで液相の圧力を測定した．以上の実験観察により，脈動上昇流中の固体粒子の非定常挙動を明らかにした．（永谷卓也，現：マツダ）

スリットノズルから噴出する水膜流の実験及び数値解析による研究

自由表面水膜噴流は様々な工業分野で利用され，その流れは実験および数値解析により研究されている．しかし実験による研究では自由表面の不安定性解析を目的としたものが多く，流れの基礎データが不足している．また，理論解析や数値解析では流れを二次元と仮定したものが多い．この観点から，本研究ではスリットノズルから噴出された自由表面水膜流の流れを実験および三次元数値解析によって検討した．実験では自由表面水膜噴流の形状を写真撮影および触針法を用いて調べた．またレーザドップラ流速計を用いて水膜の表面流速および表面周囲の空気流速を測定するとともに，熱線流速計を用いて水膜内部の流速を測定した．一方数値解析では，三次元直交座標系，非定常，非圧縮性粘性流体のNavier-Stokes方程式系を適用し，重力，粘性，表面張力の効果を考慮した．上記方程式系に加え，自由表面の変化を追跡するためVOF（Volume-of-Fluid）法に基づく色関数の式を導入した．解析結果は実験結果と良好に一致し，解析の妥当性を示した．数値解析により，自由表面水膜噴流の流れを明らかにした．(堀端裕司，現：松下電器産業)

延性破壊条件式を組み込んだ有限要素法による高張力鋼板の張出し成形解析

近年，自動車の衝突安全性と軽量化対策として高張力鋼板の適用が有効であることから，その使用拡大が期待されている．しかし，高張力鋼板は強度が高まるほど延性が低下し，成形難易度が高まるため，高張力鋼板の成形限界の予測が極めて重要となる．本研究では，延性破壊条件式を有限要素シミュレーションに組み込んだ新たな手法による，高張力鋼板の成形限界予測への有効性を検討した．まず二軸張出し試験により成形限界線図を作成した結果，Cockcroftらの延性破壊条件式が高張力鋼板には最も適していることを示した．これを受けてCockcroftらの条件式を用いて張出し成形の有限要素シミュレーションを様々な条件下で行った．その結果，解析結果はいずれの条件においても定性的および定量的に実験結果と良い一致を示した．これより，提案した手法により高張力鋼板の張出し成形の成形限界を良好に予測できることを示した．(丸山寿徳，現：トヨタ)

教　授　宅田　裕彦
助教授　藤本　仁
助　手　浜　孝之

エネルギー科学研究科　エネルギー応用科学専攻

資源エネルギー学講座
宇宙資源エネルギー学分野

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

非平衡エネルギー変換貯蔵プロセシング（地上実験）

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

宇宙空間での非平衡電気化学プロセシング

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

気泡と微粒子の衝突に関する数値的研究とその応用

水質浄化や浮遊選鉱法では，浮力により液体中を上昇する気泡を利用して不純物や有用鉱物粒子を分離する方法が採用されている．気泡表面への液体あるいは固体微粒子の捕収は，大きく分けて二つのプロセスがあり，一つは気泡と微小粒子の衝突，もう一つは分子レベルの特性に関連した現象である．当研究室では，その物理的プロセスである，気泡と微小粒子の衝突について流体力学的な理論解析を行っている．得られた知見は，目下，微小重力あるいは強磁場などの特殊環境下の電気分解における気泡の発生とその挙動解析へと展開している．

光触媒反応を利用した環境浄化技術に関する基礎研究

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

リサイクル設計要素技術

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

教　授　福中　康博
助　手　日下　英史

工学研究科　材料工学専攻

材料設計工学講座

平成17年4月1日に発足した新しい研究室である．現在研究室には，教授 松原英一郎・助教授 市坪哲の二人の教員以外に，修士学生7人および学部生6人が在籍している．本研究分野の研究テーマは，主として，X線回折法による構造解析，熱分析，弾性・擬弾性などの物性評価に基づいて，アモルファスや非鉄材料などのバルク・薄膜・ナノ粒子などの様々な形態の物質を対象に，ガラス転移，結晶化，規則－不規則相転移などの相変態現象を研究し，新しい物質創製の実現を目指している．現在行っている具体的な研究テーマは，以下の通りである．

1．非鉄金属組織に関する研究：耐熱マグネシウム合金の組織に及ぼす添加元素の影響，亜鉛基合金の組織形成に及ぼす添加元素の影響，高温耐熱強度発現SnZn系はんだ合金の組織とはんだ特性，音響的手法による強歪加工アルミニウム材料中の転位の性質の評価，
2．溶液反応プロセス：溶液還元によるCu合金ナノ粒子製造，金属ニッケル石けんを塗布した鉄表面の腐食初期過程，亜鉛酸化物薄膜めっきの成膜とその光学特性，
3．酸化物伝導体：リチウム電池負極材料用金属錫－ガラスコンポジットの作製，マグネシウムスピネルの構造と伝導特性，
4．金属ガラス・アモルファス：ZrNiAlCuおよびZrNiAlPdガラスの部分結晶化による高延性・高強度コンポジットの作製，FeNbBアモルファスの結晶化過程の加熱速度依存性評価と安定化機構，Zr基金属ガラスにおける超音波振動下における結晶化過程，
5．鉄基薄膜のナノ組織化：Fe基金属薄膜の磁場中成膜による形状磁気異方性発現，ガラスバッファー相を利用したFePtナノ粒子の結晶軸・配列制御，
6．新放射光X線回折技術：コヒーレントX線回折技術のメゾスケール金属組織観察への応用

これらのテーマのうち，現在までに特に新しい結果が得られている金属ガラス研究の成果を簡単に紹介する．

金属ガラスの構造安定性

近年，金属でありながらアモルファス構造をとり明瞭なガラス転移を示す「金属ガラス」と呼ばれる合金が開発され，それらの構造・熱的安定性，物理的・化学的性質，機械的性質などが盛んに研究されている．我々は最近，金属ガラス材料を超音波振動によって刺激することにより，通常の結晶化温度よりも相当低い温度で結晶化が促進されることを見出した．この超音波誘起結晶化機構を力学緩和特性とその特性周波数の観点から理解することができる．すなわち，超音波振動下での低温結晶化は，β緩和と呼ばれる緩和現象が周期的な超音波歪と共鳴することにより起こり，そしてガラス構造の中で相対的に密度が低く結合が弱い領域で起こると考えられる．ガラス転移温度より10℃程度低い温度で超音波熱処理を施し部分的に結晶化させた試料を，高分解能電子顕微鏡を用いて観察すると，アモルファス構造を結晶相が取り囲んだような特異な組織を得ることができた．以上のことから，特にフラジャイルなガラスにおいてはその巨視的な構造は均質ではなく，硬い領域および柔らかい領域，結合が弱く原子が動きやすい領域と相でない領域からなることが予想される．今後は，このような構造不均質性を結晶化に頼らない方法で導き出すことを目標としている．また，β緩和，ガラス転移という物理現象を構造の観点から理解することを目指している．

次に，金属ガラスの応用上の側面を発展させていきたいと考えている．従来から金属が構造材料として広範囲に利用されてきた理由は，「延性・靭性」という性質をもつために塑性加工が容易であり，また降伏応力以上の応力負荷状態であっても容易に脆性破壊をしないという特徴があるからである．しかし金属ガラスにおいては，「ガラス」と呼ばれることからも容易に想像できるように，ガラス転移温度（Tg）以下では，ほとんど塑性変形をせずに破壊してしまう．これは，ガラス中には結晶特有の転位という変形に寄与する線欠陥が存在しないので，塑性変形が困難になるためである．しかし，金属ガラスは破壊あるいは塑性変形が起こるまでの応力は通常の金属材料に比較して数倍高く，降伏応力に関する高強度特性は魅力的な特性である．そこで今後は，高い強度特性をもつ金属ガラスを振動誘起結晶化法で部分的に結晶化させることにより，塑性変形が可能な部分結晶化金属ガラスを創製することを目的とした基礎研究に取り組む．具体的には，高強度ガラスを塑性変形可能な結晶相が取り囲むことにより，転位の移動が容易になると同時に破壊に寄与する弱結合部が消失すると考えられる．すなわち，高強度化され塑性変形も可能になることが期待される．本研究では，このようなナノヘテロ組織における結晶相厚さと強度，靭性などの機械的性質の相関を系統的に明らかにすると共に，空間的に一様にこの組織を形成できる手法を探索する予定である．

教　授　松原　英一郎
助教授　市坪　　哲

工学研究科　材料工学専攻

材料プロセス工学講座
表面処理工学分野

電析法を用いるCdTe化合物半導体薄膜作製とその評価

次世代半導体材料として，直接遷移型のバンド構造をもつ化合物半導体が有望視されている．CdTe化合物半導体の禁制帯幅は，太陽光から電気エネルギーへの変換に適しており，n-CdS/p-CdTeのヘテロ接合太陽電池が実用化されている．本研究室では，これに代Te(IV)イオンの溶解度が高く浴管理が容易な塩基性の電解浴を使用するCdTe電析技術を開発している．本年は昨年度に引き続き(1)電析浴中の塩化物イオンが電析物に与える影響，(2)オートクレーブを使用した高温浴からのCdTe製膜に関して研究を行った．また，パルス法を用いる電析に関連し，得られたCdTe薄膜のアノード溶解挙動についても調べた．

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．具体的には，高分子膜を電解質に用いたPEMFC型と固体酸化物電解質を用いたSOFC型が有力であるが，PEMFC型では，動作温度が80℃程度以下に制限され，コジェネレーションに不利であり，一方，SOFCは，高温動作型でありコジェネレーションに適するが，その動作温度は，700～1000℃程度であり，安価な燃料電池システムの構築の観点からは，いっそうの動作温度の低下が望まれる．本研究では，プロトン導電性固体酸化物電解質を用いることによりこの動作温度を，約500℃に下げることを目的とし，伝導度の最適化について，基礎的知見を得ることを目的とした研究を行った．その結果，Scをドープした$BaZrO_3$酸化物の状態図を明らかにし，安定に粒成長する条件を見出した．

固体酸型燃料電池に関する研究

CsH_2PO_4に代表される固体酸の一部は，高温相で，超プロトン伝導相と呼ばれる極めて高いプロトン伝導度を持つ．この変態点は約230℃程度であり，いわゆる中温型燃料電池として期待される温度範囲である．しかし，CsH_2PO_4は，高温相における脱水分解反応が問題となっている．そこで，本研究では，分解反応の詳細を明らかにする研究を行い，分解反応を決定し，かつ，分解反応を抑える正確な条件を導出した．

イミド系イオン液体を用いる金属皮膜形成に関する研究

不揮発性かつ不燃性といった特徴をもつイオン液体はグリーンケミストリーを指向する新しい機能性溶媒として種々の応用が検討されている．当研究室ではこれまで，脂肪族4級アンモニウム陽イオンと含フッ素イミド型陰イオンからなる疎水性イオン液体の広い電位窓に着目し，卑な金属の電析溶媒としての可能性を探って来た．本年度はこれに対し，イオン液体の不揮発性かつ不燃性の特長を活かした，中低温での用途開発を目指し，還元拡散の手法を用いるCu-Sn合金形成の研究を行っている．Cu-Sn合金はアレルギー誘因性のあるニッケルめっきの代替として有望な合金皮膜である．その結果，水溶液からの一般的なCuめっきの技術に本手法を組み合わせることで，基材上へのCu-Sn合金薄膜の形成が可能であることを明らかにした．また，これとは別に，イオン液体中の金属イオンの輸送挙動に関する研究も行っている．

双方向パルス電解法を用いた鋼表面の鉄クロム合金化処理

双方向パルス電解法は，母材となる基板を溶解させ，その後溶解させた母材金属イオンと浴中の金属イオンを共析させるプロセスである．電極近傍における母材金属イオン濃度を単純なパラメータ操作（印加電位や電位印加時間等）で制御でき，複数の浴を用意せずとも合金被膜組成を変化させることができる可能性がある．本研究室では双方向パルス電解法により，3価クロムめっき浴を用いて鉄基板表面に傾斜組成を持つ鉄クロム合金被膜を形成し，双方向パルス電解法のパラメータ操作が被膜組成に与える影響を詳細に調べた．またモリブデン酸イオン浴を用い，ニッケル基板表面にニッケルモリブデン合金被膜を形成することに成功した．

塩化銅(I)を含む電解浴からの銅の電解採取

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

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

教　授　粟倉　泰弘
助教授　宇田　哲也

工学研究科　材料工学専攻

材料プロセス工学講座
プロセス設計学分野

マグネシウム合金の水素吸蔵特性

軽い水素吸蔵合金の開発の一環としてMg-AgおよびMg-Ag-Y合金について，その水素吸蔵特性を測定した．アーク溶解法で合金試料を作成し，合金組成は蛍光X線分析法ならびにICP発光分光法で測定した．試料を真空中573Kで2時間加熱した後，水素圧2MPa，573 Kの条件で水素吸蔵・放出量をジーベルツ法により測定した．水素吸蔵前後の試料表面状態をSEMによって観察するとともに，エネルギー分散型蛍光X線分析装置でX線スペクトルを測定した．

Mg-Ag合金において，Ag組成が10~20％の範囲では水素吸蔵量と速度はともに増加したが，さらにAg量を増すと逆に吸蔵能は低下した．Yの添加で水素吸蔵の速度が増加した．また水素吸蔵・放出サイクルによって微粉化現象が確認された．試料表面からのX線スペクトルは水素吸蔵前後で変化は見られなかったが，加速電圧を減少させるとともにMg/Ag強度比が増加した．しかし$MgSi_2$化合物について同様の測定を行ったが同様の現象は見られず，Mg-Ag合金の場合はMgが試料表面に偏析しているものと考えられる．

XAFSを用いた環境試料中の硫黄の化学状態分析

ディーゼル車の排気ガス粒子，黄砂粒子および土壌の各種試料について，硫黄のX線吸収微細構造XAFSを測定した．測定は高エネルギー加速器研究機構の放射光実験施設Photon Factoryにおいて行った．蛍光X線収量と電子収量の同時測定によって，試料表面とバルクにおける硫黄の化学状態を区別して調べることができた．またX線スペクトルの吸収端位置の変化ケミカルシフトから硫黄の酸化価数を求め，硫黄化合物の推定を行った．

同一メーカー製で製造年が異なるディーゼル車の排気ガス粒子について得られた結果をまとめると次のようになる．粒子のバルクに違いは見られないが，PM規制が始まった1994年以前に製造された車両の粒子では，その表面における硫黄の価数が＋6以外に－2価のものも見出された．次に黄砂試料は，国立環境研の標準試料，中国国内で採取した3種類の試料および京都で採取した4種類の試料である．中国国内の試料の分析から，タクラマカン砂漠から中国東方の瀋陽方面に飛来する間に，粒子表面に付着した硫黄が粒子内部まで反応していることが明らかになった．また京都市内で採取した黄砂試料には6価の硫黄以外に－2価の硫黄も検出され，さらに+4価と推定されるピークも存在するなど，中国国内とは違った様相が見られた．土壌試料については，産業技術総合研究所の岩石標準試料2種類と京都市内で採取した試料6種類である．幹線道路脇の土壌には＋6価の硫黄以外に+4価と推定されるものも検出された．一方，大きな河川敷では硫黄が検出されないものもあり，検出された試料は－2価と＋6価の両方の硫黄が見出されるなど，交通の激しさによる違いも見られた．

焦電式X線源によるX線吸収分光法の可能性

X線吸収分光法は元素の電子状態，その近傍の局所構造を知るための有力な分析方法であるが，現在は大規模施設にあるシンクロトロン放射光などの高強度で単色化されたX線を用いて行われており，手軽に測定できる環境にない．そこで9ボルトの乾電池1本でも駆動が可能である焦電結晶を用いたX線源と，Si-PINフォトダイオード検出器あるいはTESマイクロカロリメータを組み合わせて金属薄膜試料のX線吸収分光を行い，その可能性について検討した．試料としてTi, Co, Ni, Cuの純金属薄膜（厚さ数μm）と各種合金薄膜（厚さ3～10μm）を用いた．

いずれの検出器を用いた測定においても，試料構成元素の吸収端が明瞭に観測できた．Si-PINフォトダイオードを用いた測定では質量吸収係数の測定値は文献値とほぼ一致した．しかしエネルギー分解能が200eV程度であるため，試料から放出される蛍光X線と吸収端を分離することができないため，得られた吸収端はなだらかなものとなり，吸収端の立ち上がりを明確にとらえることはできなかった．一方，エネルギー分解能が約10eVのTESマイクロカロリメータを用いた測定では，試料からの蛍光X線と吸収端とを分離することができ，吸収端の立ち上がりをはっきりととらえることができた．しかしながら，TESマイクロカロリメータは電気的ノイズが多く，またX線の計数値が低いため，得られたX線吸収スペクトルのS/N比が悪く，X線吸収微細構造を明瞭に観測することはできなかった．今後，TESマイクロカロリメータの電気的ノイズの低減や計数率向上が実現すれば，シンクロトロン放射光を用いない乾電池式X線源を用いたX線吸収分光が可能になると思われる．

教　授：河合　　潤
助教授：田邊　晃生
助　手：石井　秀司
（平成18年5月転勤のため退職，現在㈱イオン工学研究所）

工学研究科　材料工学専攻

材料プロセス工学講座
マイクロ材料学分野

窒化ガリウム用導電性窒化物バッファ層の開発

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

p/n型炭化シリコン用同一オーミック・コンタクト材の同時形成とその機構解明

SiCはその優れた物性からSiに代わる次世代パワーデバイス用ワイドギャップ半導体として注目されており，燃料電池自動車のインバータなどへの応用が期待されている．SiCパワーデバイス実用化には低抵抗なオーミックコンタクト材開発が不可欠な要素技術であり，これまでにp型にはTi/Al系，n型にはNi系が開発されている．しかし，プロセス簡略化などの観点から両伝導型に対して同一コンタクト材を同時形成することが望ましい．当研究室では，これまでNi/Ti/Alコンタクト材を用いることにより，両伝導型に対して同時にコンタクト材を形成できることを報告してきた．しかし，その機構については明らかではない．そこで，機構を解明するため，より簡単なNi/Alコンタクト材で両伝導型へ同時にコンタクト材が形成できるか検討した．その結果，Al膜厚の増加に伴い，コンタクト材の主伝導型がn型からp型へと単調に変化し，Al膜厚が5～6nmの時に両伝導型にオーム性を示すことを見出した．界面では，Al濃度の増加により，δ-Ni_2Siに加えて$Ni_{13}Al_xSi_{9-x}$化合物が生成する．$Ni_{13}Al_xSi_{9-x}$化合物はその電気特性評価より半金属またはnarrow-gap半導体と考えられ，p型SiCとのショットキー障壁を低減し，p型SiCに対してオーム性を示すと考えられる．以上のように，機構解明に加えて，元素数を減らすことにより，プロセスの簡略化に貢献するコンタクト材を見出した．

銅配線合金化による極薄拡散バリア材の自己形成

Si-ULSIデバイスの高性能・高集積化に伴い，Cu配線材の配線幅は100nm以下に微細化している．しかし，100nm以下の配線幅では，粒界散乱と，バリア層によるCu配線材の有効断面積の低下により，抵抗が著しく増加する．バリア層は，CuがSi基板中に拡散するのを防ぐ目的で，スパッタ法によりSi基板上に形成されている．スパッタ法による極薄バリア層を均一に成膜するのは困難であり，極薄バリア層形成の新規プロセス開発が望まれている．本研究では，過飽和Cu合金薄膜と薄膜の表皮効果を用いて極薄拡散バリア層を自己形成させるプロセスの開発を目指した．過飽和Cu合金薄膜を高温で熱処理することにより，合金薄膜中の固溶元素が薄膜表面および薄膜/基板界面に偏析し，合金中の固溶元素濃度は減少する．Cuに固溶させる元素は，低固溶・相分離型・低融点化元素であり，かつ従来のバリア材の研究から耐熱性に優れた元素が望まれる．我々は，Cu(Ti)合金薄膜を選択し，実際にTi-richな層(～10nm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．本年度は，同プロセスを高温高圧リフロープロセスと組み合わせ，配線プロセスへの応用の可能性を検討した．高温高圧リフロープロセスとは，400～500℃で高圧Arガスによりスパッタ Cu膜を極細Cu配線溝に埋め込むプロセスのことである．このプロセスでは，Cu合金薄膜に上記温度での十分な変形能が要求される．Cu(Ti)合金薄膜には，極細Cu配線溝に隙間なく埋め込むだけの十分な変形能がない．本研究では，SbやDyなどの第3元素を添加し，合金薄膜の融点を低下させることにより，変形能の改善と自己バリア形成能の両立が可能か検討した．また，薄膜の成膜を2段階に分けた配線プロセスの可能性も検討した．極薄の合金膜の成膜は難しいが，数十nm厚のCu(Ti)合金膜を極細Cu配線溝にスパッタ法により成膜することは可能で，次いで数百nm厚の純Cu膜を成膜する．数百nm厚の純Cu膜は配線溝を十分埋めていないので，高温高圧リフロープロセスにより埋め込む．このようなプロセスを考案し，実際に数nmのTi-richなバリア層を配線溝に形成させた低抵抗Cu配線を作製できた．このような自己バリア形成と高温高圧リフローとを組み合わせたプロセスが，Cu配線作製へ応用させることを期待する．

教　授　村上　正紀
助教授　伊藤　和博
助　手　着本　　享

工学研究科　材料工学専攻

材料物性学講座
量子材料学分野

第一原理格子動力学計算によるシリコン中の熱平衡欠陥の定量的評価

シリコン中の固有点欠陥はドーパントの拡散やキャリア濃度に影響を及ぼすため，その物性について実験及び理論計算による研究が多数行われてきた．しかし，例えば陽電子寿命測定においては報告間での結果の不一致が見られ，またドーパント拡散を用いた空孔熱平衡濃度の測定においては値に大きなばらつきがあるなど，いまだ統一的見解には至っていない．一方，理論計算によって有限温度における点欠陥物性を扱った報告もいくつか存在するが，電気的特性に影響を及ぼす点欠陥の帯電状態を含めた研究は報告されていない．本研究の目的は，第一原理格子動力学計算によってシリコン中の固有点欠陥の形成自由エネルギーを求め，点欠陥熱平衡濃度を定量的に評価することである．点欠陥の種類については空孔2種，格子間原子3種，及び近年理論計算によって予測されたFFCDと呼ばれる欠陥を，帯電状態については－2価から＋2価までを考慮した．

点欠陥形成エネルギーについては，+1価の空孔が不安定となるnegative-U効果をはじめ，これまでの報告とおおむね一致する結果が得られた．第一原理格子動力学法によるフォノン計算から，六員環中心の侵入型原子は六員環と垂直方向にわずかに変位した位置が安定となることがわかり，過去の報告と一致した．中性点欠陥の形成エントロピーは空孔が約$10k_B$と最も大きく，FFCDが約$3k_B$と最も小さいことがわかった．また，空孔の形成エントロピーは負に帯電するほど増大し，$8k_B$から$12k_B$まで変化することが確認された．形成自由エネルギーが最小となる点欠陥種は，融点近傍かつn型では空孔，それ以外ではFFCDという結果が得られた．

点欠陥熱平衡濃度を導出した結果，真性状態における空孔熱平衡濃度は融点近傍でも10^{17} cm^{-3}と低濃度であることがわかった．これは陽電子寿命測定において，真性状態における融点近傍の空孔熱平衡濃度がその検出限界である10^{16} cm^{-3}程度であると考えられていることと相容れる．また，空孔の熱平衡濃度はn型のときに最も高くなることがわかった．このことは，陽電子寿命測定においてn型のときに比較的低温から空孔が検出されていることと対応がつく．フェルミ準位の温度依存性とバンドギャップの補正について考察を行った結果，両者による熱平衡濃度への影響は融点近傍では無視できるほど小さいという結論が得られた．また，各点欠陥種別の熱平衡濃度を実験値と比較した結果，空孔ではなくFFCDの熱平衡濃度が実験によって測定されている可能性が示された．

Theoretical analysis for the formation and diffusion of point defects in proton-conductive perovskite oxides

Some perovskite-type oxides such as $SrZrO_3$ and $BaZrO_3$ show high protonic conductivity by addition of appropriate amount of trivalent cation into Zr sites. Such acceptor doping results in the formation of interstitial proton to maintain charge neutrality. It is of great importance to fully understand the formation and diffusion mechanisms of point defects, since ionic conductivity is attributed to point defects. In this study, the formation energies of point defects and the minimum energy path for proton migration are systematically computed using first-principles calculations.

The calculations are made using plane-wave projector augmented wave method based on the density functional theory. Supercells composed of 160 atoms for $SrZrO_3$ and 135 atoms for $BaZrO_3$ are constructed as defect containing models. In order to obtain the defect formation energies at elevated temperatures, we consider the dependence of chemical potentials of gaseous molecules on temperature and their partial pressure. The minimum energy path of proton diffusion is determined using the Nudged Elastic Band methods.

The migration process in $BaZrO_3$ is found to be divided into two stages. First, the source (O_s) and destination (O_d) oxygen ions get close to each other with keeping the length of initial O_s-H bond (step I). Then the O_s-H bond is broken and proton migrates toward O_d (step II). When the moving proton is located at the middle of O_s and O_d, energy changes from the initial state become largest. The increments of energy are 0.08 eV and 0.12 eV in the steps I and II, respectively. Theoretical migration energy, which is given as the summation of excess energy in the steps I and II, is estimated at 0.20 eV. A similar migration mechanism is found for $SrZrO_3$.

教　授　田中　功
助教授　松永　克志
助　手　大場　史康
助　手　桑原　彰秀

工学研究科　材料工学専攻

材料物性学講座 結晶物性工学分野

Alを添加した$ReSi_{1.75}$基シリサイドの欠陥構造と熱電特性

$ReSi_{1.75}$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，高性能な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．$ReSi_{1.75}$は正方晶系$C11_b$構造を基本構造として，空孔が規則的に配列した単斜晶系の結晶構造をとる．本研究では，Siを価電子数が異なるAlで置換することにより作製した$Re(Si,Al)_{1.75}$基シリサイドに導入される格子欠陥構造変化の解析，及び熱電特性の評価を行った．得られた結果は以下のように要約される．価電子数4のSiを価電子数3のAlで置換することにより，様々な欠陥構造をとりながらSi空孔濃度が変化する．欠陥構造はAl濃度の増加に伴い，$ReSi_{1.75}$二元系の結晶構造に(a) 一般式 (h0l)[±100]=p(001)[±100]+q($\bar{1}$01)[±100]+r(101)[±100] (複合同順)であらわされるシアー操作を加えた構造，(b) ($\bar{1}$01)1/2[3$\bar{1}\bar{1}$]で表されるシアー操作を加えた新しい単位格子に，(a)と同様のシアー操作を加えることで理解できるシアー構造，(c) Si空孔の配列がなくなり，SiとAlが規則配列した構造，へと変化する．この中で(a)の欠陥構造を持つAl置換材の単結晶試料を作製し，熱電特性の評価を行ったところ，特に$[100]_{C11b}$方位に関して，Al置換により電気抵抗率およびゼーベック係数の大幅な低下，熱伝導率の上昇が見られ，熱電材料として好ましい方向へ特性が変化することがわかった．

電子回折による対掌性，極性識別法の開発と有機結晶への応用

右手と左手の様に互いに鏡面対称の関係にあり，重ね合わすことのできないペアを対掌体（鏡像体）と呼び，そのような性質を対掌性と呼ぶ．また，極性とは，ある方向[uvw]とその逆方向[$\bar{u}\bar{v}\bar{w}$]とが結晶学的に等価でないことを言う．本研究では，電子回折による対掌性識別法を，極性を持つ結晶へ拡張し，結晶学的に存在するすべての結晶の対掌性・極性識別法を提案するとともに，その手法により有機結晶の対掌性の識別を行った．得られた結果は以下のように要約される．(1)バイフット対反射が対称に配列する入射方位，すなわち2回軸に垂直な入射方位で回折図形を撮影すれば，強度分布は2回軸の投影に対して非対称となり，HOLZを用いることでZOLZに表れる(hkl)-($\bar{h}\bar{k}\bar{l}$)フリーデル反射の指数が決定でき，極性の識別が可能である．実際に，3C-SiC（空間群$P\bar{4}3m$）の極性の識別に成功した．(2) 有機結晶は一般的に電子線の損傷は激しいが，ビデオカメラを用いて連続的にCBED図形を撮影することで，対掌性の識別が可能であった．実際，有機結晶のκ-(BEDT-TTF)$_2$Cu(NCS)$_2$に関しては，*d*-体と対掌性を識別できた．

$LiCoO_2$正極のサイクル特性に及ぼす(Li, La)TiO_3固体電解質表面状態の影響

現在，リチウム二次電池には可燃性の有機電解質が使用されているが，安全性やサイクル特性の観点から，不燃性の(La,Li)TiO_3固体電解質(LLT)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．本研究では，$LiCoO_2$正極/LLT固体電解質界面の微細構造が電池特性へ及ぼす影響を明らかにすることを目的として，へき開あるいは機械研磨したLLT固体電解質表面に$LiCoO_2$正極薄膜を蒸着した試料について，電子顕微鏡法を用いた詳細な構造解析および電気化学特性評価を行った．得られた結果は以下のように要約される．(1) いずれの試料についても，$LiCoO_2$正極はLLT表面上に$(110)_{LLT}$//$(11\bar{2}0)_{LiCoO2}$，$[001]_{LLT}$//$[\bar{4}401]_{LiCoO2}$という結晶方位関係を満たすように形成される．(2) へき開試料では$LiCoO_2$中のLi層は界面に垂直となるように形成されるため，1サイクル目の充電反応に対する内部抵抗は比較的小さい．しかしながらサイクリック・ボルタンメトリーのサイクル数増加に伴い，$LiCoO_2$正極がLLT固体電解質から徐々に剥離し，その結果として内部抵抗が増大する．(3) 研磨試料は非常に良好な充放電サイクル特性を示す．研磨試料では，界面近傍における部分的なLLT非晶質層の形成が見られ，それが$LiCoO_2$/LLT界面の安定性を向上させていると考えられる．

教　授　乾　　晴行
助教授　田中　克志
助　手　岸田　恭輔

工学研究科　材料工学専攻

材料物性学講座
構造物性学分野

本研究室では，SPring-8における放射光を用いた金属流体の構造研究，メカニカルスペクトロスコピーを用いた結晶中の原子移動のメカニズムとダイナミクスの研究を行っている．今回は，これまで行ってきた研究テーマに加え，最近新たに，液体半導体の光照射による構造変化についての実験的研究を始めたので，その結果について報告する．

1. 液体イオウにおける光誘起重合転移と自己秩序化現象

イオウは融点（113℃）直上で八員環分子からなる分子性液体であるが，温度を上げ，159℃になると鎖状高分子と八員環分子との混合液体へと重合転移を起こすことが古くから知られている．我々は，このような重合転移を重合転移温度以下においても光を照射することによって起こすことができることを，レーザー励起過渡吸収スペクトルの測定から明らかにした．さらに高輝度のパルスレーザー光を数ミクロン以下に閉じこめられた液体イオウに照射すると，照射部分が虹色に色付くという現象を見出した．この色付きのパターンの面積，色成分の詳細な解析を行った結果，虹色への色付きは回折格子のような可視光程度の秩序が形成されたために生じたと考えられることがわかってきた．ランダムな分子配列をしている液体に光を照射するだけで結晶様の秩序が形成されるのは興味深い現象である．今後この現象が，微小領域での光の制御が要求されるオプトロニクスの分野で応用できる可能性があると我々は考えている．

2. 液体セレンにおける光誘起半導体－金属転移

液体セレンは鎖状高分子からなる単体で唯一の液体半導体である．温度を上げると，電気伝導度は増加し，鎖は切断されて短くなっていく．圧力をかけて沸点を超える温度まで液体領域を広げ，さらに温度を上げていくと，1400～1500℃で10原子程度からなるクラスターとなり，半導体から金属へと転移することが知られている．我々は，この半導体-金属転移を光照射によっても起こすことができないか，という点に着目し，レーザー励起過渡電気伝導度の測定を行った．その結果，温度580℃で20mJ/pulseのレーザーを照射すると，$4\times10^{-4}(\Omega^{-1}cm^{-1})$から$12(\Omega^{-1}cm^{-1})$へと5桁もの電気伝導度の増加が観測された．12という値は金属と通常呼ぶには小さい値であるが，鎖状構造を有するセレンでは最小金属伝導度が10程度とする議論もあり，ここで光誘起半導体-金属転移が起こっている可能性は充分に考えられる．現在，その検証に向けての研究を進めている．

3. アモルファスおよび液体カルコゲナイドにおける光黒化

アモルファスAs_2S_3やAs_2Se_3のようなアモルファス砒素カルコゲナイドは，バンドギャップ光を長時間照射するとバンド端の光吸収スペクトルが低エネルギー側にシフトし，照射を止めた後もそれが半永久的に保持される，いわゆる光黒化現象を起こすことでよく知られている．我々は，アモルファスAs_2Se_3のレーザー励起過渡吸収スペクトルの測定を行い，ナノ秒パルスレーザー光照射後，ナノ，マイクロ秒の時間領域において過渡的な光黒化のあることを見つけた．従来，光黒化は非平衡の準安定状態でしか観測されないとされてきたが，このナノ，マイクロ秒の時間領域における過渡的な光黒化は430℃の熱平衡状態にある液体においても観測された．この結果は，アモルファス，液体に共通して存在するクラスターのようなものが存在し，そこを舞台とした構造変化が光照射によって生じていることを示唆している．

教　授　田村剛三郎
助教授　沼倉　宏
助　手　松田　和博

工学研究科　材料工学専攻

材料機能学講座
材料物理学分野

RE123系超伝導材料の結晶配向制御と線材化

RE123系超伝導材料は，その通電損失がきわめて小さいことを活かして，77 Kでの電力機器等への広範な応用が期待されている．そのためには長尺金属テープ上に2軸配向したRE123超伝導薄膜を連続的に形成する技術開発が必要である．2軸配向化手法としては現在，IBAD法とRABiTS法とがある．IBAD法はイオンビームアシストをしながら2軸配向した酸化物バッファを金属上に形成し，そのうえにRE123膜をエピ成長させる．RABiTS法ではfcc金属基板を圧延と熱処理によって立方体集合組織化し，その表面に酸化物バッファとRE123薄膜をエピ成長させるものである．どちらの方法においても得られるRE123薄膜はc軸配向化し，かつ面内においてもφスキャンの半値幅が5～7度となって，2軸配向化する．しかし製造方法の違いから，形成されたRE123薄膜の組織には大きな違いがある．我々はEBSPによる組織観察とPPMSを用いた磁場中での臨界電流測定によって，組織の違いと超伝導特性との相関を調べた．IBAD法によればRE123薄膜の結晶粒径は1 μm以下と小さく，隣接する結晶粒の方位差は2度程度であることが分かった．一方，RABiTS法ではRE123薄膜の粒径は50～100 μmとなり，その方位差は7度程度となった．このような違いは臨界電流の磁場中特性に顕著に現れた．すなわち，IBAD上のRE123の臨界電流は磁場中においても低下が小さかった．しかし，RABiTS上においては磁場中での臨界電流の低下が大きく，粒径や方位差の違いが現れているものと思われる．

ナノ組織制御された銅酸化物超伝導薄膜の研究

銅酸化物高温超伝導体の77 Kにおける磁場中の臨界電流値は現在，実用にはまだ不十分である．これは，銅酸化物超伝導体のコヒーレンス長が1 nm程度と短いため磁束量子のピン止め力が小さく，かつ動作温度が臨界温度に近いことから熱ゆらぎの影響も大きくなるためと考えられている．しかしながら，我々は，薄膜中に十分なピン止め点が導入されていないのも原因とひとつであると考えている．我々はこの状況を改善するため，薄膜成長プロセスに種々の工夫を施すことによって，磁束量子の強力なピン止め点を高密度に導入することを試みた．薄膜成長法としては，複合酸化物の組成制御性に優れたパルスレーザー蒸着法を用いた．まずこの手法を用いて，ゼロ磁場中にて3MA/cm^2 (77K)の特性を実現した．その後，基板表面に修飾を施す方法を用いて薄膜中に10^{14} m^{-2}という高密度の転位導入に成功した．転位コアおよびその周囲においては超伝導状態が破れているため，転位は強いピン止め点として作用すると考えられている．我々は転位密度を10^{12} m^{-2}～10^{14} m^{-2}の範囲で変化させることによって，ゼロ磁場における臨界電流値は大きく変化しないが，転位密度増大とともに磁場中における臨界電流値が従来値の2～3倍まで向上することを明らかにした．さらに，臨界電流の磁場印加角度依存性を調べることで，磁場方向が転位の長手方向に平行になるときに臨界電流が増大することを明らかにした．これらの結果から，我々は転位がc軸方向の相関ピンとして作用しているものと考えている．

三次元アトムプローブを用いたアルミニウム合金中のナノ析出物の組成決定

三次元アトムプローブ（3D-AP）は試料表面から電界蒸発したイオンの飛来位置を位置敏感型検出器で測定することにより，試料表面の二次元原子マップを作成し，これを深さ方向に拡張することにより三次元原子マップを作成するという究極のナノスケール観察手段として知られている．しかしながら，これまでに報告されたAl-Zn-Mg系合金中のη'析出相の組成にはZn+Mg=20～66at%と大きな幅が存在し，3D-AP測定の信頼性には疑問がある．本研究では3D-AP測定により生じる上記の様なずれの原因を調べ，補正する方法を提案することによりナノ析出相の組成を決定することを試みた．

研究の結果，組成のずれが生じる原因は主に二つあることが分かった．一つは原子による電界蒸発強度の違いである．今回の研究に用いたAl-Zn，Al-Zn-Mg系合金では母相原子と析出物原子の電界蒸発強度の違いが大きいことから，測定中に試料表面に凹凸が生じる．電界蒸発した原子は試料曲率法線方向に飛ぶため，凹凸のある試料からは正しい原子マップの再構築が出来ず，析出粒子の組成やサイズに大きなずれが生じたと考えられる．もう一つはリフレクトロンを用いたことによる原子位置情報の劣化である．リフレクトロンはエネルギー偏差のある蒸発イオンの軌道を曲げる事によってエネルギーを補償し，正確な元素特定を可能とするが，このエネルギー補償量の多寡により検出位置に変化が生じると考えられる．前者による影響は凹凸の曲率半径を考慮することにより補正し，後者による影響は蒸発イオンのエネルギー偏差が正規分布をとると仮定することにより本来の検出位置からどの程度ずれるかを見積もることにより補正を行った．その結果，η'相の組成はAl-37Zn-27Mgであると結論づけられ，η'相のサイズも小角散乱測定による結果とほぼ同程度となった．

助教授　松本　要
助　手　足立　大樹

工学研究科　材料工学専攻

材料機能学講座
材質制御学分野

本研究室では，鉄鋼・チタン合金等の構造材料の組織制御と新機能創成に関する基礎研究として相変態・析出・再結晶の組織学的研究を行うとともに，これらと密接に関係する形状記憶や超弾性効果，超塑性などの機構解明や力学的性質の向上についても研究している．2005年度は以下のテーマについて研究した．

1．鉄合金マルテンサイトの内部微視組織および結晶学に関する研究

鉄合金のα'マルテンサイト（bccまたはbct構造，以下M）は，合金組成や生成温度によって形態が様々に変化し，生成温度が高い順にラスM，バタフライM，レンズM，薄板状Mと変化する．この様に様々な形態のMが存在するのは鉄合金のみに見られる特異な現象であり，その理由は未だ明らかでない．

本研究は，鉄合金Mの形態を支配する因子を解明するための一連の研究の一部であり，本年度はレンズMの本性の解明に重点を置いた．

Fe-33%Ni合金のレンズM内部の結晶方位をEBSD法により詳細に測定し，中央部のミドリブから界面に向かうに連れてMの結晶方位が連続的に約3度変化すること，さらに周囲のオーステナイトの方位も界面近くで変化していることを初めて見出した．この結晶方位の変化はM内の微視組織の変化と密接に関係していることを確認した．オーステナイトとの結晶方位関係は，ミドリブ領域ではG-T関係に近いのに対し，界面に向かうに連れてK-S関係に変化していく．

Fe-33%Ni合金のレンズMのM/A界面微細構造を高分解能電子顕微鏡を用いて観察し，レンズMの界面は光顕レベルでは湾曲しているが，原子レベルでは平行最密面のステップ構造を形成しており，2種類の界面転位が存在していることを明らかにした．また，この界面転位は平行最密面上では純粋ならせん転位であり，ラスMで観察されたものと同等であった．このことによりレンズMの変態に伴う歪みの緩和機構はラスMの緩和機構と非常に類似している事が明らかになった．

鉄合金Mの形態変化の支配因子として生成温度，変態時体積変化（ΔV/V），正方晶性(c/a)の影響を系統的に調べるために，Fe-Ni-Co-C合金でNi添加によるMs点の調整，Co添加によるキュリー点の調整とインバー効果を用いてΔV/Vの調整，C添加によるMs点とc/aの調整を行った．種々の組成の合金について検討した結果，M変態時のΔV/Vが負となるMの生成に初めて成功した．一連の研究の結果，薄板状Mの出現には大きなc/aが必要条件であること，またΔV/Vの減少に伴ってレンズMおよび薄板状Mの生成温度域が大きく上昇する事が明らかになった．

2．Fe合金のプラズマ窒化挙動に関する研究

Ti, V, Al, Crを約1%含有するフェライト（α）系Fe二元合金のプラズマ窒化組織を観察し，TiおよびV添加材ではTi-NおよびV-Nクラスターが高密度に生成し大きな強化が生じること，Al, Cr添加材ではクラスターは生成せずAlNやCrNが析出することを明らかにした．さらに，熱力学的観点から相分離の可能性を検討し，合金元素によるクラスター形成の有無を説明することに成功した．

α系Fe-(1～30%)Cr合金の窒化組織が窒化温度によって異なること，つまり，高温(943K)では通常の微細なCrNがα中に均一に分散した組織であるが，低温(843K)で窒化すると窒化方向に大きく伸びた柱状α組織になることを見出し，その組織がαとCrNのラメラ組織からなることを明らかにした．今までに詳細な報告のない低温窒化で生成する柱状α粒の成因を主として結晶学的観点から検討し，窒化初期にCrNが連続析出した際の歪みによりαの再結晶がおこり，その後CrNが不連続析出するという新しい析出誘起再結晶モデルを提案した．

3．チタン合金のマルテンサイト変態および超弾性に関する研究

応力誘起α"マルテンサイト変態による形状記憶効果を示すnear-β型合金Ti-10V-2Fe-3Al(mass%)に，固溶強化能が大きい侵入型元素である窒素(N)を0.2mass%程度添加すると室温で超弾性を示すようになることを昨年度見出した．本年は，この合金の超弾性特性の向上を目指し，溶体化処理後の冷却速度の影響について詳細に研究した．

N無添加材では，溶体化後の冷却速度が50℃/s以下の時に超弾性が発現するようになる．一方，0.2%N添加材では全ての冷却速度(50℃/s～270℃/s)で超弾性が発現するが，50℃/s冷却材では超弾性による回復歪量が大きく増加し，最大3.2%の弾性回復歪み量が得られた．

上記以外に，低炭素鋼の変態組織におよぼすNb添加の影響，極低炭素オーステナイト系ステンレス鋼の時効析出挙動，高炭素鋼の温間変形時の動的再結晶による微細組織の形成，等の研究を行った．

教　授　牧　正志

工学研究科　材料工学専攻

材料機能学講座
機能構築学分野

カルボン酸－遷移金属自己集積化多層膜

分子の自己集積化による薄膜形成は，膜厚を分子レベルで制御することができるため，膜厚2,3nmの超薄膜を極簡単なプロセスで形成する手法として注目されている．光・電子機能材料や耐食皮膜等への応用を目指し，研究が進められている．これまでの分子自己集積化による薄膜形成は，単層膜成長に関する研究例が殆どで，多層膜形成に関しては報告例が少ない．しかし，多層膜形成には，膜厚を幅広いレベルで可変にできるとう利点と，異種分子を集積化することによる新奇な機能発現への期待があり，分子自己集積による機能材料開発の鍵となる重要な技術となる．

われわれは，カルボン酸分子と遷移金属元素との錯体形成を介する有機－金属交互単層膜積層に着目し，芳香族ジカルボン酸であるテレフタル酸の単分子層をジルコニウム単原子層で連結する，自己集積化多層膜を形成することに成功した．表面に水酸基終端化した酸化シリコン膜を形成したシリコン基板を，Zr(IV) *n*-butoxideと反応させ，OH基とブトキシ基の脱アルコール反応により土台となるZr(IV)イオン層を形成した．次に，テレフタル酸溶液に基板を浸漬し，カルボキシル基とZr(IV)イオンの配位結合を介してテレフタル酸分子を吸着させた．以下同様に，Zr(IV)イオンとテレフタル酸を交互に積層し，Fig. 1aに示す構造を有する自己集積化多層膜を作製した．Fig. 1bは，各積層ステップで，試料表面に堆積した薄膜の膜厚を示す．テレフタル酸(TPA)分子層およびZr(IV)イオン層の積層を，をそれぞれ1ステップとしてカウントした．TPA-Zr(IV)ペアの層厚は約0.6nmであり，TPA分子の長さにほぼ等しく，各層が単層で積層していることが確認できた．

高分子表面へのアミノ基集積

高分子基材表面に特定の官能基を高密度集積することで，さまざまな機能発現が期待できる．例えば，アミノ基を集積化すれば，遷移金属イオンや二酸化炭素分子の捕集，たんぱく質・糖鎖・DNA等の生体機能分子の固定化，無電解めっき触媒コロイドの吸着等の機能が生まれる．

われわれは，高分子材料のシランカップリング処理によるアミノ基集積と機能化について検討した．シランカップリング剤による表面処理は，主として，金属や無機固体の表面改質に用いられてきたが，高分子材料には，高分子材料表面には通常シランカップリング反応の起点となる活性反応サイトが無いために，一般的にはシランカップリング処理は出来ないと考えられている．そこで，真空紫外(Vacuum Ultraviolet, VUV)光を用いた光酸化・表面活性化により，高分子基板表面にシランカップリング反応起点となるサイトを形成することで，高分子材料の表面処理を可能にした．

酸素雰囲気下（通常の大気下）で，ポリカーボネート(Polycarbonate, PC)基板表面を，VUV光（波長172 nm

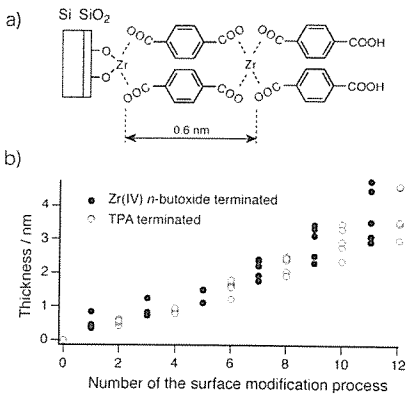


図1　Zr-TPA交互積層による自己集積化多層膜形成．a) 多層膜の模式図，b) 積層ステップ数と膜厚の関係

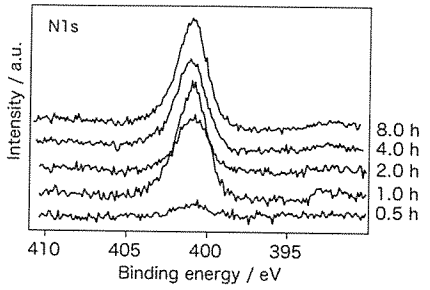


図2　AEAPS処理PC基板のN1sスペクトル

のエキシマランプ光を使用）で照射すると，PC基板表面は，その水滴接触角がほぼ0度となるまで親水性となる．X線光電子分光（X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS）分析により，PC基板表面が酸化し親水性の極性官能基（-OHや -COOH等）が形成されていることを確認した．次に，VUV照射親水性PC基板と，100℃で加熱気化した*N*-(2-aminoethyl)-3-aminopropyl trimethoxysilane, AEAPS, とを反応させる．図2は，各処理時間におけるAEAPS処理PC基板のXPS-N1sスペクトルである．表面N原子濃度は，処理時間1時間で約5%となり，それ以上の処理時間を伸ばしてもほぼ一定であった．VUV処理PC表面の活性化サイトが，処理時間1時間でAEAPS分子によりほぼ埋め尽くされたためである．この値は，酸化シリコン表面を同じ分子でアミノ化した場合の値の2倍近い．

吸着したAEAPS分子のアミノ基は化学的に活性であり，このAEAPS処理PC基板は，カルボン酸分子やパラジウムコロイドが特異的に吸着する．このパラジウム吸着基板は，無電解ニッケルめっきによるメタライジングが可能である．

教　授　杉村　博之
助教授　邑瀬　邦明
助　手　李　　庚晃（平成18年5月転勤のため退職）
助　手　一井　　崇（平成18年9月着任）

エネルギー科学研究科　エネルギー社会・環境科学専攻

社会エネルギー科学講座
エネルギー社会工学分野

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

■材料科学からのアプローチ■

「機能性材料・新素材(エコマテリアル)の開発」と「新しいプロセス(エコプロセス)の開発」の2つを軸とし，材料という観点から地球環境に優しい資源の有効利用を研究しています．

主な研究テーマ
- 高機能（光）触媒材料の開発
- 高効率エネルギー利用を目指した窒素吸蔵・吸収合金の開発
- 磁場を利用した材料およびプロセスの高機能・高効率化
- 太陽光と酸化鉄を用いた二酸化炭素固定プロセスの開発

Q 脱酸素剤というのはあるが、脱空気剤はなぜないの？
A 窒素を効率よく吸収する材料が今までなかったから。
Q じゃあ作ればいい。
A できました！画期的な材料。ついでに酸素も吸って、真空が作れます。用途はいろいろとありそうです。

■社会分析・評価からのアプローチ■

LCAや産業連関分析法によって既存もしくは新しい製品，プロセスおよびシステムの環境影響評価を行い，地球環境との調和について研究しています．

主な研究テーマ
- リサイクルを含めた環境影響評価指標の開発
- 旅客機のタキシングにおける環境負荷物質排出量の解析
- 家庭用照明機器の消費電力量予測
- 家電製品構成素材の社会蓄積と拡散

Q このあいだ、飛行機に乗ったけど飛び立つまでに随分と時間がかかった。自動車のアイドリングストップ運動はあるけれど飛行機はどうなの？
A 飛行機のアイドリング時間を調べました。結構あります。それに伴う、エネルギー消費や排気ガスも問題です。

■教育からのアプローチ■

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

主な研究テーマ
- エネルギー・環境教育が生徒の環境行動に与える影響の分析
- エネルギー・環境教育の波及効果の検討
- レジ袋削減行動の分析
- 効果的な環境情報の提示方法に関する検討
- 効果的な省エネ行動の促進に関する検討

Q 環境教育って最近盛んですよね。電気消しましょう。水止めましょう。買い物袋持っていきましょう。ところで実際どれくらい効果があるのでしょうか？
A 調べてみました。教育直後なら効果があります。でも社会全体が動かないとなかなかみんな動かないですね。

教　授　石原　慶一
助教授　奥村　英之
助　手　山末　英嗣
技　官　藤本　正治

エネルギー科学研究科　エネルギー応用科学専攻

材料プロセシング分野講座

塩化アンモニウムによる亜鉛ドロスの分離

1. 緒言　電気炉排ガス中へアルミナボールを落下させて亜鉛蒸気を急冷・液化し，回収するプロセスが考えられている．アルミナボールは溶融亜鉛中へ懸濁して亜鉛回収の支障となるが，NH_4Clを投入すると懸濁していたアルミナボールが分離される．本研究では亜鉛表面に生成するZnOに注目して，アルミナボールの懸濁と分離の原因を解明し，アルミナボールの回収率を増加させることを目的とした．

2. 実験方法　実験装置をFigure 1に示す．N_2-20%O_2ガス気流中，450℃にて亜鉛を溶解した．ここへアルミナボール（亜鉛溶解量の10%相当分）を投下し，亜鉛浴中に懸濁させた．NH_4Clを投入したのち炉冷し，アルミナボール回収率とNH_4Clの投入量との関係を求めた．アルミナボール回収率は，投入したアルミナボールの重量に対する回収されたアルミナボールの重量比で定義した．

3. 実験結果・考察　アルミナボール回収率とNH_4Cl投入量の関係をFigure 2に示す．アルミナボール回収率は，NH_4Cl投入量の増加とともに上昇した．$<ZnO>+2(NH_4Cl)=2(NH_3)+\{ZnCl_2\}+H_2O$の反応により，固体ZnOが液体$ZnCl_2$へ変換され（液体$ZnCl_2$へ変換される量は$NH_4Cl$の投入量の増大とともに増大する），アルミナボールに固着していた固体ZnOが分離し，アルミナボールの亜鉛浴中への懸濁が解消されたためであると考えられる．

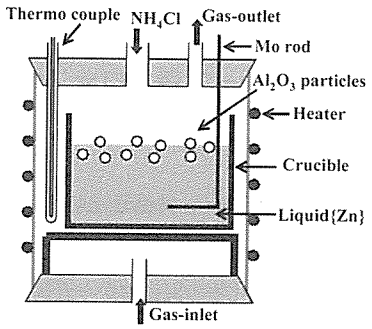


Fig.1　実験装置

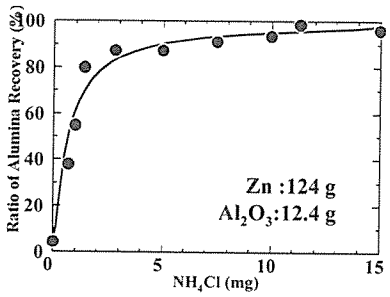


Fig.2　アルミナボール回収率とNH_4Cl投入量の関係

$CaO-Al_2O_3-CaF_2$-Nepheline系スラグのSulfide Capacity

1. 緒言　製鋼スラグ副原料のCaF_2代替材料として，Nephelineに注目した．その融点はCaF_2に近く，滓化促進剤として有効である．本研究では$CaO-Al_2O_3-CaF_2$-Nepheline系スラグのSulfide Capacity, Csを測定した．以下CaO: C, Al_2O_3: A, CaF_2：F, Nepheline: Nと略す．

2. 実験方法　スラグ試料の組成は$(\%C)/(\%A)$=60/40一定とし，これにCaF_2とNephelineを添加した（$(\%F)/(\%N)$=100/0, 75/25, 50/50, 0/100），$(\%F)+(\%N)$=0, 7.5, 15, 30）．Ar-CO-CO_2-SO_2混合ガスを流してP_{O_2}, P_{S_2}を一定にした反応管内でスラグ試料を溶解した．1773Kで6時間保持した後，急冷凝固し，硫黄濃度$(\%S)$を求めた．$Cs=(\%S)(P_{O_2}/P_{S_2})^{1/2}$で定義される．

3. 実験結果と考察　Figure 3に実験結果を示す．

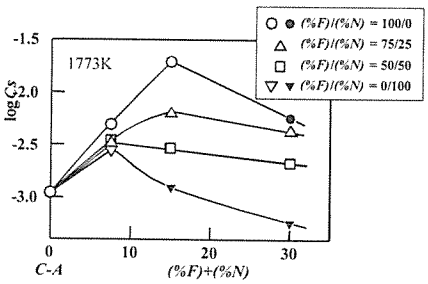


Fig.3　$CaO-Al_2O_3-CaF_2$-Nepheline系スラグのSulfide Capacity

$(\%C)/(\%A)$=60/40では，スラグは一部が固液共存となる．図中open markは固液共存，solid markは均一液相に対応する．本来Csは均一相スラグに対してのみ定義され，固液共存領域のスラグについての本結果は見掛けのCsとなる．注目すべき点は，固液共存領域である$60CaO-40Al_2O_3$にNephelineを7.5%添加するとCsが上昇することである．Nephelineを使用するに際には，CaO濃度が高く，Nephelineを添加してもなお固液共存となるようにフラックス組成を制御することが有効と考えられる．

教　授　岩瀬　正則
助教授　藤原　弘康
助　手　長谷川将克

エネルギー科学研究科　エネルギー基礎科学専攻

エネルギー応用プロセス学講座 高温プロセス分野

酸化物混合体のCa共還元法によるT-Cr-V三元系合金粉末の合成

本研究では，酸化物の混合物から直接水素吸蔵合金を製造する方法を提案した．Ca共還元法と呼ばれるこの方法では金属Caによる還元と，副生成物のCaOを溶融$CaCl_2$に溶解除去する方法を組み合わせたものである．混合された酸化物は溶融$CaCl_2$中でCaにより還元され粉末状の合金が製造される．本研究ではCa共還元法によってTi-Cr-V三元系BCC合金を合成することを試み，その有効性を検討した．

得られた粉末はBCC合金のほかに$TiCr_2$，少量の合金化していない単体金属からなっており，不均一な合金であった．その不均一性のために従来の製造法による合金に比べて水素吸蔵特性が大きく劣っていた．1473Kで7.2ksの熱処理を施すことにより，BCC単相を得ることができ，そのことにより水素吸蔵特性が良化した．金属系材料の熱電特性と熱電発電システム設計 Co_3AlCペロブスカイト構造の熱電能に注目し，実験を行った．Co-Al-C, Co-Fe-Al-C およびCo-Ni-Al-C 系の炭化物$(Co,M)_3AlC$(M=Fe or Ni)近傍において相平衡とゼーベック係数を測定した．1473 Kで充分焼鈍した試料をX線回折測定，エネルギー分散X線分析及び炭素分析により検討した．ペロブスカイト構造のCo_3AlCはその化学量論組成では存在せず，$Co_3AlC_{0.63}$に近い狭い組成領域に存在した．ゼーベック係数の最大値は$Co_3AlC_{0.63}$で873 Kで23.3 μV/Kであった．Coを少量のFeで置換すると$(Co,Fe)_3AlCx$の単相領域は拡大し，単相のゼーベック係数はCo-Fe-Al-C四元系において$Co_{3.506}Fe_{0.025}AlC_{0.77}$で873 Kのとき最大値32.6 μV/K を示した．Niの添加はこの炭化物を安定化せず，Co-Ni-Al-C 四元系で最大のゼーベック係数は873 Kのとき26.9 μV/Kであった．

珪酸塩電解質を用いた起電力法による金属シリサイドの標準生成自由エネルギー測定

本研究では鉄シリサイド，特に$\beta FeSi_2$の標準生成自由エネルギーを珪酸塩電解質を用いた起電力法で測定することを目的として実験を行った．Fe-Si系は不変系反応が1300K以下で多く存在しており，その温度範囲での測定が必要である．電解質は測定温度範囲で液相とSiO_2の2相共存の状態が必要であるが，珪酸リチウムでは1300K以下での測定が不可能であり，新しい測定方法が必要となった．本研究では適用温度範囲が1060K付近まで広がっている珪酸ナトリウムを新規電解質として用いた．

1173K付近で測定を行った結果，安定した起電力が得られなかった．実験後の観察から物理的，電気的な接触や中間化合物の生成による問題ではなく，$Na^+ + e^- = Na$の電池反応が成立していない，もしくは電解質と電極との界面で$Si+O_2=SiO_2$，$2Na+1/2O_2=Na_2O$の平衡が成立していないことが理由であると考えられる．

本研究室では他にも，溶融塩化カルシウム電解による$TiCl_4$の還元，$Zn_xCu_{2-x}V_2O_7$の熱電特性の研究などを精力的に行っている．

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

教　授　冨井　洋一
助　手　植田　幸富

エネルギー科学研究科　エネルギー基礎科学専攻

エネルギー反応学講座
量子エネルギープロセス分野

－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エネルギー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や光機能ガラスを対象とした光学物性の探求を研究を主目的としている．

光/エネルギー機能材料の光学物性のテーマとしては，時効によるイットリア安定化ジルコニアの導電率低下に伴う局在電子構造からの発光変化に関する研究を遂行中である．固体酸化物型燃料電池（SOFC）は高温作動による電力変換効率の高い燃料電池であり，イットリア安定化ジルコニア（YSZ）はSOFCの高い動作温度での熱力学・化学的安定性などのきびしい諸条件を満たすもっとも代表的な固体電解質材料であるが，時効によるイオン伝導度の低下という問題を抱えている．酸素イオン伝導体であるYSZにおけるイオン伝導は，酸素空孔によって左右され，これまでのEXAFS, TEM観察と電子回折, 内部摩擦等による結果からも，時効に伴って空孔の作る複合構造が大きく変化することが確かめられている．一方，YSZをはじめとするイオン性結晶の光物性研究から，酸素空孔は局所構造に対応した多様な発光ピークを示すことが知られている．本研究では，He-Cdレーザーを用いたフォトルミネッセンス測定によるバンドギャップ内準位からの発光の解析により，時効に伴う局所構造変化を解析した．従来，導電率低下の原因として議論のあった母体/ドーパント・カチオンによる空孔トラップ効果は実は副次的であり，電子構造の変化による発光の大きな変化を生じるような歪みの異方性の緩和に伴う欠陥複合構造の変化が主であることが示唆された．現在はおもに同手法を，時効による導電率低下を示さないSc_2O_3またはIn_2O_3を添加したイットリア安定化ジルコニアに応用し，Sc-8YSZの試料においては新しい酸素空孔を含む局在構造の出現が時効による導電率低下と連動している一方，In-8YSZの試料においてはYSZと同様の異方性歪みの緩和の効果が時効による緩和の効果を上回り，時効後も異方性歪みが持続するという観点から説明できることがわかった．In-8YSZの試料における4 mol% In_2O_3添加付近でのIn-8YSZの試料の突出した導電率の低下領域と発光ピーク強度の増大領域の一致を手がかりとして，このIn_2O_3の特定の添加量における，時効による緩和の影響を受けず導電率の低下を抑制する特異な歪みの存在することがわかった．

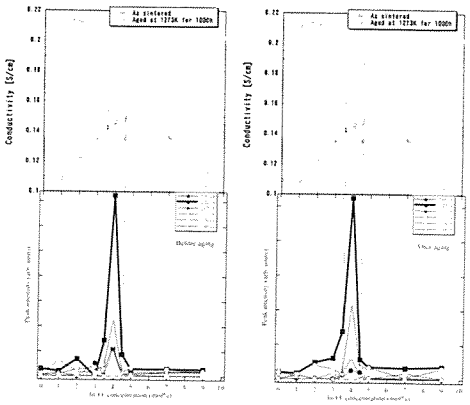


図　In_2O_3の添加量に対する導電率の変化と各ピーク強度の添加量に対する変化との関係（上図：J. Kondohほか、J. Electrochem. Soc., 149, J59 (2002)より引用）

また，光誘起構造変化ガラスにおける発光疲労-回復現象に関するテーマでも成果を上げている．非晶質カルコゲナイドは，光誘起相変化現象を活かした記憶材料への応用が既に行われ，特有の光学特性を生かした光機能材料への応用が検討されている．特に，電子構造と局所的構造との相関により，多重安定性をもつ自由エネルギー面の光励起による変化が多彩な光誘起現象を引き起こす．中でも当分野では，光照射による発光疲労現象メカニズムの解明にあたって，硫化物ガラスに注目し，新たな疲労-回復競合現象を見出し，光誘起による励起状態での安定/準安定構造のスイッチと熱励起による基底状態での逆方向のスイッチの競合により，特異な現象が可能であることを示しており，現在はとくにこの光-熱構造変化の温度依存性に焦点を当てて実験を進めている．

さらに，光通信における優れた機能材料としての硫化物ガラスに関するテーマとして，希土類ドープ硫化物ガラスにおける母体構造による光学特性の変化に関する研究も行っている．

固体高分子型燃料電池触媒，新規中高温型プロトン伝導体の開発に関する共同研究も進行中である一方，新たなテーマの一つとして電気化学的手法により作成された薄膜の光学特性の評価にも着手しており，これまでに金属珪化物，窒化物薄膜において成果を上げている．

助　手　蜂谷　寛

国際融合創造センター

エレクトロニクス分野

STMによる材料表面の原子レベル評価

(1)半導体表面でのLBH（局所トンネル障壁高さ）測定

GaAs(110)表面を用いて半導体表面でのLBH測定を行っている．LBH測定はSTM接合を流れるトンネル電流の接合距離依存性からSTMの探針-試料間の真空層のトンネル障壁高さを測定する手法である．このトンネル電流の距離依存性から求められるトンネル障壁高さは一般に見かけのトンネル障壁高さと呼ばれている．みかけのトンネル障壁高さは近似的には表面ポテンシャルあるいは表面の局所仕事関数に関連した値となることが期待される．本研究ではこのLBH測定による表面ポテンシャルの評価を半導体中のドーパント分布観測に応用することを目標として研究を勧めている．LBH測定はSTMと同等の高い空間分解能を比較的簡便に得ることができるため，ナノスケールの電子デバイスの評価への応用が考えられる．

GaAs(110)表面近傍にLBH測定を応用した結果，ドーパントサイトでのLBHは測定条件を変化させることにより変化することが明らかになった．この表面は表面状態によるフェルミレベルのピンニングが無いため，LBHを評価する場合には注意が必要であるが，単純な1次元モデルを適用すると，観測されるLBHはやはり表面ポテンシャルの高低に応じて増減するはずであり，結果を説明できない．同様の現象はGaAs中のZnでも観測されている．

このようなLBHの複雑な挙動はLBHの評価にはドナー，アクセプタの具体的な波動関数を考慮に入れた解釈を行う必要があることを示唆していると思われるが，探針先端への表面原子の吸着の影響なども排除できないため，現在解析を進めている．

(2)シリコン-シリサイド界面での電圧降下の直接測定

シリコンへの電流注入を行う電極は実用的に非常に重要でありこれまで非常に多くの研究がなされている．一般に熱処理した金属-シリコン界面にはシリサイドが形成されるが，形成される相は多くの場合一つではなく，どの相が電気伝導に寄与しているのか不明である．STMを用いたポテンショメトリー法を用いればナノスケールでの電圧降下を測定することが可能である．本研究ではSTMを用いて実際に電流を流した状態で電極-シリコン間の電圧降下測定を試みた．電極としてはタンタルシリサイドを使用した．タンタルシリサイドは実デバイスの電極としては一般的ではないが，表面状態の電子伝導測定の際に使用された例がある．試料はマスクを使用して金属Ta電極を形成し，続いてUHV中で加熱することで作成した．加熱によってタンタルシリサイドが形成される．電極-シリコン清浄表面界面は加熱によってかなり凹凸の大きなものとなるため，界面の同定は困難であるが，うまく界面へ探針を誘導できた場合にはナノスケールでの電圧降下を検出することが可能なことが示された．

原子・分子サイズ接点の研究

(1)　原子サイズ金属接点の電流誘起破断

高バイアス下で金属接点を破断すると，接点が小さくなるにつれて電流密度が増加し，電流密度がある閾値を越えると接点が不安定になり破断してしまう．我々の研究室では貴金属およびAlについて研究を行ってきたが．2005年度はZn原子サイズ接点の破断電流密度の測定を行った．その結果，電流密度と融点の間にほぼ直線的な相関があることが判明し，この結果は金属の融解が接点破断の機構であることを示唆している．

(2)　原子サイズ金属接点の温度評価

MCBJと呼ばれる破断接合を利用して原子サイズAu接点を作製し，コンダクタンスの2準位揺らぎ（TLF）の周波数から接点の実効温度を評価する実験を行った．77 Kでは高バイアスによる接点温度上昇を確認できなかったが，4.2 Kでは実効温度は周囲温度よりも高くなっており，そのバイアス依存性は理論と良い一致を示している．

(3)　Au単原子接点の寿命分布

Au単原子接点は$1G_0$（G_0はコンダクタンスの量子化単位）の位置にプラトーを示し，このプラトーの長さは単原子接点の寿命に相当している，今回我々は室温・超高真空中でこのプラトー長さを調べ，分布が指数～－1のベキ乗分布であることを明らかにした．なぜ単原子接点の寿命分布がこのように裾の長い特殊な分布を示すのか，その理由は明らかではない，

(4)　MWNTの電流誘起破断

MCBJの接合間に1本の多層カーボンナノチューブ（MWNT）を架橋し，MWNTが電流誘起破断する高バイアス域でのコンダクタンス特性を詳細に調べた．その結果，～50nm以下の非常に短いMWNTでは，破断直前にコンダクタンスが急激に増加する非可逆的で過渡的な振る舞いが観測された．短いMWNTでは電子伝導がquasi-ballisticであるため，MWNTと電極の接触部分で発熱が加速度的に進行し，破断が起きているのではないかと推定される．また別個に架橋したMWNTの交流インピーダンス測定を行い，200kHzまでの周波数域でリアクタンス部分のバイアス依存性・周波数依存性を明らかにしている．

(5)　BDT単分子のコンダクタンス

MCBJの接合電極間に1-4ベンゼンジチオール（BDT）の単分子を架橋してそのコンダクタンスを測定し，架橋分子の安定配置に対応するいくつかのコンダクタンス状態を見出した．特に$0.1G_0$付近の高コンダクタンス状態は，これまでに報告されていない状態であり，おそらくBDT分子が金電極表面のhollowサイトに結合した状態ではないかと推定される．

エレクトロニクス研究室

教　授　酒井　明
助教授　黒川　修

国際融合創造センター

材料デザイン分野

複数の相が内在する「複合系材料」について，微細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) SiC/SiC複合材料の高温大気暴露による強度および破壊形態変化

SiC/SiC複合材料の高温大気暴露による強度低下は，形成された酸化膜(SiO_2)が変形初期過程で破壊し，その結果形成される微視き裂（クラック）が繊維に進展するメカニズムで生じることを明らかにした．ついで，このメカニズムを組み込んで，繊維破壊を表現できる破壊力学モデル，これまで開発してきた繊維破断間の力学的相互作用を定量計算できるシェアラグアナリシス法，および酸化膜，繊維，マトリックスの強度のばらつきおよび試料内空間分布を表現できるモンテカルロ法を組み合わせて，高温酸化による複合材強度および破壊形態の変化を計算機シミュレーションで再現することに成功した．

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

融液から成長させたアルミナ/YAG共晶複合材料の強度および破壊靱性の変形温度・変形速度依存性の定量化を目指し，高温変形構成式と有限要素法を用いてモデル化した．これにより，き裂先端の変形速度分布および変形速度に依存する降伏域を明確に捉えることができ，また，切欠試料における降伏域サイズの温度・負荷変形速度依存性を求めることができた．

(3)金属にコーティングした硬質層の破壊・剥落

自動車材，建築材，工具材など多彩な分野で使用されている金属に硬質層をコーティングした複合金属では，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広く用いられている溶融亜鉛めっき鋼板について，熱残留応力および負荷応力により生じるコーティング層の多重破断とその後生じる剥落について，実験と有限要素法援用応力解析を行い，多重破断に及ぼすコーティング層厚さや基材鋼の影響，引張軸の垂直方法に生じる圧縮応力による座屈で誘発される界面剥離プロセスを明らかにした．

(4) 超伝導Bi2223フィラメントの損傷プロセスと臨界電流

Bi2223系超伝導複合材中の超伝導電流輸送を担うBi2223フィラメントは，負荷応力下ではc面に平行に壊れる横割れ，垂直に壊れる縦割れが生じ，臨界電流を低下させる．この現象について，これまで複合材料研究で開発してきたモンテカルローシェアラグシミュレーション法をベースに，シミュレーション法を考案した．これにより，実験で観測されたBi2223の破壊挙動および臨界電流の引張負荷ひずみ依存性を精度良く記述できるようになった．

(5) Zr基金属ガラス中ならびに結晶化初期の構造変化

Zr基ガラスならびにその結晶化過程における組成の揺らぎの発展過程を異常分散を利用した小角散乱強度と高角の回折の同時測定によって進めている．　安定なZr基の金属ガラスの結晶化においてはごく初期から比較的粗大な結晶が晶出する場合が多いため，小角散乱と高角との同時測定を利用した議論は困難であった．

しかしZrCuAlNi 4元合金の電子ビーム溶接材料の熱影響部を位置走査小角・高角同時測定にによって検討した結果，明確な結晶化初期に対応する小角散乱を得た．結晶化に伴う小角散乱は吸収端直下の条件でコントラストが消失するという特徴的な振る舞いをすることがわかった．

また，位置走査による小角領域と高角領域の対応により，この小角散乱成分は高角の回折ピークが出現する場合に限って認められることがわかった．特徴的なサイズを小角領域と高角領域で比較したところ，高角から推定されるサイズは小角データから導かれるサイズよりも一桁大きく，また，異常分散を利用した解析から得られる組成揺らぎの方向は結晶相の形成される方向とは必ずしも一致しない．結晶化が進行する段階での小角散乱が結晶/非晶界面領域由来であることを示唆している．

(6) Geナノドット構造の熱処理効果

Si基板上に成長されたSi被覆Geナノドットの組織安定性をIsochronalアニールに対するGI-SAXS測定によって調べた．　成長温度より50K程度高い温度での900sの熱処理では界面での相互拡散効果が認められた一方，それより高温での熱処理過程ではGI-SAXS強度が完全に消失していることが明らかとなった．

一方，フォトルミネッセンス測定では成長温度よりも100Kあるいは150K高温での熱処理においても系統的な発光波長のブルーシフトが観察された．これは熱処理の進行とともにナノドットの3次元構造が崩れ，成長温度より100K以上高温ではナノドットとしての構造はすでに失われているものの，合金化の進行による「組成変化によるPLシフト」効果によって構造が連続的に変化し続けているように見えているためである．　微小なナノドットの場合，通常では考えられないような低温，短時間の熱処理によって構造が失われていることがTEMのPost-mortem観察によって判明する例が多いが，今回の解析により，特性制御に重要なナノ構造の安定性をGI-SAXSによって非破壊的に検討することが可能であることが明らかになった．ナノ構造の安定性をより定量的に評価するため，Isothermal条件での熱処理によるGeナノドット/Siキャップ層の界面安定性評価を進めている．

教　授　落合庄治郎
助教授　奥田　浩司

会　　報

京都大学名誉教授　斎藤敏明先生は定年退職されました．



斎藤敏明先生の御略歴

斎藤敏明先生は，昭和40年3月京都大学工学部鉱山学科をご卒業後，同年4月に京都大学大学院工学研究科修士課程鉱山学専攻に入学，昭和42年4月に博士課程に進学され，昭和45年3月に所定の単位を取得後退学されました．昭和45年5月に名古屋大学工学部助手に任官となり，昭和48年4月に東海大学海洋学部講師，昭和50年4月に同大学助教授に昇任されました．その後，昭和52年4月に京都大学工学部助手に任官となり，昭和59年4月に同講師，昭和63年4月に同助教授に昇任されました．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，平成8年11月に京都大学工学研究科教授に昇任され，工学研究科資源工学専攻資源高度利用工学講座を担当されました．その後，改組に伴い平成15年4月より京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻地殻工学講座地殻開発工学分野を担当されました．平成18年3月に定年により京都大学を退職され，京都大学名誉教授の称号を受けられるとともに，同年4月から福井工業大学建設工学科教授として教育研究活動を継続されておられます．

斎藤先生は，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るとともに，学内においては，平成11年4月より平成12年3月まで京都大学工学部地球工学科長を務められました．学外においては，（社）資源・素材学会理事，同関西支部長，同露天採掘部門委員会委員長，岩の力学連合会理事，骨材資源工学会理事，（社）材料学会岩石力学部門委員会委員長などを歴任し，学術行政に尽力されました．また，中央鉱山保安協議会委員，中部近畿地区鉱山保安協議会委員，（独）石油天然ガス・金属鉱物資源機構鉱害防止技術指導委員会委員などを務められ，鉱山保安行政にも貢献されておられます．さらに先生は，学術交流活動として，多くの国際会議にわが国を代表して出席され，平成15年3月には第一回地下環境に関する京都国際シンポジウムにおいては，組織委員長として会議を主宰されました．研究面では，岩盤内初期地圧状態に関する研究，岩盤の破壊後特性に関する研究，岩盤不連続面の力学特性に関する研究，資源開発技術の高度化に関する研究など，先生は，地殻開発工学におけるわが国の開拓者の一

人として，基礎的研究から応用的研究に至るまで多くの秀れた研究を推し進めて来られました．特に，岩盤内初期地圧状態に関する研究では，従来のボアホール孔底ひずみ法を改良し一本のボアホールで3次元的な応力状態を決定できる測定法を開発され，同方法を用いて多くの地点で計測を行い，わが国の地下岩盤内の初期地圧状態を明らかにするとともに，地震予知研究にも重要な資料を提供されました．この測定法は，その後の初期地圧測定法開発の先駆となったものであり，これらの成果は高く評価されています．このように齋藤先生は，約40年にわたる地殻開発工学の専門分野において，斯学の進歩に大きく貢献され，特に，資源開発工学や岩盤工学においては指導的役割を果たして来られました．

（村田澄彦）

齋藤先生と平松研究室懇談会

日比野　敏

齋藤先生は昭和40年卒業で私は37年卒なので学生時代には直接のつながりはなかったのですが，卒業後は平松研懇談会，学会関係やシンポジウムなどでいつもお会いし，先生が水曜会の会長をされた時には水曜会関係でお世話になりました．

平松研懇談会は平松研究室を出て研究関連の仕事に就いている者の集まりで，いつが最初のスタートだったかはっきりしないが，これまで30年以上も続いている．メンバーは平松先生，岡先生と卒業生9名の計11名が主であったが，岡先生が亡くなられてから10名となった．

年に1度程度一晩泊まりで集まり，一杯飲んでワイワイガヤガヤ，研究の話，近辺雑事など，議論に花が咲いて夜の更けるのも知らない（ただし私だけは夜遅いのが苦手で，零時近くなると寝てしまっていた）集まりである．韓国の李喜根（元ソウル大教授）さんが昭和51年頃平松研に留学で来ていて，李さんも加わったり，場所も夏は貴船に行ったり，平松先生のなじみの河原町四条近くの飲み屋に押しかけたりと，楽しい集いであった．この懇談会は京都が中心となるので，いつも齋藤先生にアレンジしていただき，これまで続いているのも先生のお陰である．

開催場所も京都に限らず，ある時は鹿児島の指宿で開いたり，菅原勝彦さんがロックストレスの国際会議を平成9（1997）年に熊本で主催したときは熊本の阿蘇で開いた．写真はそのときのもので，5名の奥様方にも御参加いただいた．

参加者を紹介すると後列右から木山英郎（昭和38年卒，元鳥取大学），菅原勝彦（昭和43年卒，熊本大学），日比野敏（昭和37年卒，元電力中央研究所），齋藤敏明（昭和40年卒，福井工業大学，元京都大学）そして平松先生．つづいて厨川道雄（昭和41年卒，（株）つくば研究支援センター，元資源環境技術総合研究所），棚橋由彦（昭和45年卒，長崎大学），中列右から水田義明（昭和40年卒，崇城大学，元山口大学），亀岡美友（昭和48年卒，日本機械化協会施工技術総合研究所），石田毅（昭和52年卒，京都大学，元山口大学）．前列右から水田夫人，木山夫人，平松夫人，菅原夫人，棚橋夫人である．

研究や授業，学生の指導などお忙しいにも拘わらず，齋藤先生はつねににこやかな顔で平松研の面倒を見ていただきほんとにありがとうございました．

今後はさらに福井工業大学で研究と学生の指導に当たられますが，どうか健康にはくれぐれも気をつけて，ますますのご活躍を祈っています．

（元電力中央研究所，昭和37年卒）



齋藤敏明先生のご退職に寄せて

西　村　正　夫

齋藤先生のご退職にあたり，今まで私の人生の節目節目で公私ともにお世話になった者として，記憶をたどりながら，その思い出をお話したいと思います．

まず，先生との出会いは昭和45年平松研究室に配属された4回生の春，当時の研究室は教授・平松先生，助教授・岡先生，助手・松本先生および水田先生といった先生方に加えて，博士課程に菅原先生，研究生として棚橋先生がおられました．そこに博士課程を終えて名古屋大学に赴任されたばかりの齋藤先生が頻繁に出張して来校されていました．今思い返すと個性的な豪華メンバーの若手研究者に遭遇しており，知的な刺激を受けた初めての機会でした．出張中の齋藤先生を交えて水田先生と菅原先生がいつも何かと議論されていたのを覚えています．エネルギッシュで魅力的な新進気鋭の研究者が三人

三様，それぞれ役割が決まっているような会話の進展具合であり，その当時の私には分からないままにも密かに聞き耳を立てていたのでしょう．その楽しげなアカデミズムに触れ，岩の力学·工学といった未知の研究分野の面白さを実感しました．このような研究室の雰囲気に呑み込まれて研究室に足繁く通うようになり，夜遅くまで居残っていたように思います．お酒とタバコもこの頃に覚え，現在に至っています．

卒業後，総合建設業の（株）奥村組に就職して，数年のち，山岳トンネル·地下発電所工事に係わる技術開発分野に携わるようになり，岡先生の指導を仰ぐべく，実家が近いこともあり，京大へたびたび出張していました．その間に，名古屋大学から東海大学に移っておられた齋藤先生の京大赴任が決まり，土木構造物の有限要素法解析を手掛けていた私は，土木分野にも明るい齋藤先生に幸いにも再会できることになりました．一方，当時日本アイ·ビー·エム（株）に在籍中の淺井先生が研究生として，岡先生のご指導による学位取得のため，京大に通われており，私も時々その仲間に入れていただき，ゼミ形式の勉強の場に参加しておりました．そこに齋藤先生も加わられたことで，話題がますます多様になり，技術開発上興味深い，刺激的な出会いに恵まれました．初期地圧と地震，岩盤の破壊機構，剛性試験機とひずみ軟化，ロックボルトや支保の作用機構など，岡先生・齋藤先生から拝借した最新の文献資料を学生時代以上に熱心に読破していたように思います．そのような折，岡先生が急逝されたことで，その後，齋藤先生はいろいろな意味でご多忙な時代を過ごされたのではないかと拝察いたしております．

私も職場が大阪からつくばへ移り，そののち次第に先生にお会いする機会は減りましたが，思いがけなく齋藤先生から声をかけていただき，寺田先生のご指導を仰いで学位取得の機会も作っていただきました．現在の宮城高専への転職時には，土木施工分野から情報分野への転進について相談にのっていただいたり，教員公募案内等の資料を送っていただいたり，推薦人にも一つ返事で了解していただきました．今振り返ると，随分自己中心的なお願いをしており，ご多忙な時期にもかかわらず，齋藤先生の人情味あふれる，懐の大きさに甘えていたようです．身勝手を反省しつつ改めて感謝致しております．

齋藤先生は常に人の意見に耳を傾け，途中で話を遮らず，最後まで話の趣旨を理解しようとされていたように思います．また，人に対する非難，悪口など今までに伺ったことはありません．高専に勤務してから，私自身も含め，自己主張が強く，個性的な方が多いと思われる学校という世界では，先生のように聞き上手であることは非常に大切な素養であると実感しています．特に現在，15歳から22歳までの多感な若人（学生）と接する際，自分の全人格で付き合っていくことになり，ごまかしがききません．齋藤先生ならどのように対応されるだろうか，と自問自答しながらの毎日，いろいろ迷ったときの人生の道しるべとさせていただいております．

最後に，齋藤先生の新しい研究·教育現場である福井工業大学でのご活躍を心からお祈り申し上げますとともに，今までに何かとお世話になっている水曜会会員の諸先輩，同僚·後輩の皆様にも感謝を申し上げ，ご健康·ご発展をお祈り申し上げる次第です．ありがとうございました．　（宮城高専情報デザイン学科，昭和46年卒）

齋藤敏明先生のご退職に寄せて

笹　尾　春　夫

私がはじめて齋藤先生にお会いしましたのは昭和52年，資源工学科修士2回生の時でした．東海大学より母校へ戻ってこられた新進気鋭の研究者，と言う第一印象でした．場所は，工学部一号館，当時の研究室の場所は記憶の彼方で定かではありませんが，齋藤先生のお部屋になぜか私一人がいた覚えがあります．わずか一年間でしたが，修士論文の指導など，いろいろとお世話になりました．生意気な学生で何かとご迷惑もおかけしたと反省しております．当時は，その齋藤先生に将来博士論文の指導をいただくことになるとは夢にも思いませんでした．

翌年に私が卒業し，建設会社に就職してからしばらくは齋藤先生と大学にはご無沙汰しておりました．その後，昭和60年頃でしょうか，私がトンネル施工の仕事に従事していることから地下発電所の放水路トンネルの現場で岩盤力学に関します難しい問題を抱えており，齋藤先生にお願いしまして工事現場へお越しいただきご指導いただくことになりました．現場では施工に携わっている技術者を集め，岩石力学，岩盤力学に関します講義をしていただき，また，現場の問題解決に際しまして非常に有益な助言をいただきました．夜は現場の担当者を交え，懇親会の場では昼間の続きでトンネル技術の議論に付き合っていただき，とても有意義な時間を過ごさせていただきました．その後も機会ある毎に齋藤先生にトンネルの施工現場へ来ていただき，はるばる鹿児島までお越し願ったこともありました．それぞれの現場では貴重な助言をいただき，また，お酒を飲みながら夜まで延々と議論に付き合っていただくことがたびたびでした．

そうこうするうちに，私が社会人として資源工学専攻博士後期課程に入学し，齋藤先生に学生としてあらためてお世話になることになりました．論文のテーマは仕事柄，山岳トンネルの設計に関するもので，齋藤先生の本

来のご研究テーマとは異なるものでしたが快く指導をお引き受けいただきました．

入学後，月に1回程度ですが大学に通うようになりました．部屋こそ違いましたが同じ1号館の学生時代の懐かしい思い出がある研究室で学生時代に戻ったような気分に浸ったものでした．しかしながら，社会人になりましてもできの悪い学生で，論文の作成が遅々として進まず，齋藤先生にはご迷惑をかけ続けましたが，最後まで熱心にご指導を賜り，なんとか修了することができました．その間，ご自宅にお招きいただきまして，奥様の手料理と，おいしいお酒をごちそうになりました．先生のご自宅は松ヶ崎の閑静な場所にありまして，裏山は大黒天の境内で，四季折々の美しい風景が楽しめる，大変自然に恵まれた所です．楽しい時間をすごさせていただき，夜遅くお暇するとき，玄関脇に流れています小川に酔っぱらった笹尾が落ちると大変だ，ということで奥様に通りまで送っていただいたことも懐かしい思い出の一つです．

博士課程終了後も，岩石力学関係の委員会などで京大へおじゃましましたおり，また，資源・素材学会などでお会いしましたときには私が担当しているトンネル現場の状況を報告し，それに対してご指導，助言いただくということは以前どおりでした．齋藤先生にご指導いただきましたおかげで，私が今も続けて研究開発の業務に携わることができまして，大いに感謝しております．

今回，京都大学のご退職を迎えられ，研究指導の場が福井へ移りましたが，依然と変わらずご指導を仰ぎたいと考えております．齋藤先生，どうもおつかれさまでした．また，これからもどうぞよろしくお願い申し上げます．

（鉄建建設株式会社，昭和51年卒）

齋藤敏明先生のご退職に寄せて

玉　井　昭　雄

5月の齋藤先生退職記念行事，参加させていただきました．ここ数年，お会いする機会がなかったのですが，何にびっくりしたかというと，まず齋藤先生がぜんぜん変わっていないこと．そのあと奥様とも話をさせていただきましたが，これがまた，顔も言うことも昔のまま．相変わらず2ショットの似合うご夫妻でした．

私にとって齋藤先生が何かと聞かれたとき，やっぱり「恩師」が一番適切な言葉かと思います．現在，建設業の仕事（最近は研究室からその方面への就職が少ないと聞いていますが）に携わっていますが，今の私を考えた時，一番影響を受けたのはやはり学生時代の研究室の同僚，先輩，後輩の方々の考え方，そして何よりも齋藤先生の存在であったかと思います．

私が4回生で研究室に入った昭和54年（1979年）は，いろいろなことがあった年でした．平松先生が退職された直後で，岡先生がさあこれから，というときに急逝されました．その後を助手である齋藤先生が一人で切り廻しせざるをえなくなり，研究室に居ながらも「どうなるのかな」というのが当時の想いでした（今考えてみると，平松研出身者のそうそうたるメンバーによる陰日向のバックアップはすごかったことと思います）．そんな中で，当時の研究室のテーマであった岩石の3軸試験・せん断試験，ロックボルトの作用効果，岩盤内応力測定の研究等を着々と進められ，確実に成果を挙げていかれました．そのときのご苦労は並大抵ではなかったものと思います．

齋藤先生の偉いところは専門外のことに関しても必ずご意見を言ってくださったことで，その幅広い知識にはよく感心させられたものです．また，学問の話題だけではなく，社会問題や人生などについてもいろいろと話を聞かせていただきました．さすが平松研ということでお酒にも強く，飲んでも乱れずあの温厚な笑顔で話をされていた姿は今でも思い出します．学生時代，私も岩盤内応力測定で各地の鉱山，炭鉱，建設現場などに行かせていただきましたが，往き帰りの旅行中や宿での会話が楽しかったことを覚えております．幸いだったことに，今の石田教授，塚田助教授が研究室の先輩，同級であり，齋藤先生を中心に刺激を受け続けた実のある研究室生活でした．

私にとって齋藤先生の話をするときには必ず奥様が出てまいります．学生の頃から齋藤先生のお宅にはみんなでよくお邪魔させていただきましたが，奥様もいやな顔もせずに迎えてくださり，いろいろな話をしたのはよい思い出です．また，齋藤先生ご夫妻にご媒酌の労をとっていただいたこともあり，家族でもご自宅に伺わせていただいたこともありました．下の子がまだ小さい頃で，齋藤先生を「じいじ，じいじ．」と呼んで遊んでいただきました．今考えると恐れ多いことです．

現在単身赴任中とお聞きしておりますが，今後ともご健康に留意され，ご活躍されますとともに，ご指導よろしくお願い申し上げます．

（株式会社大林組，昭和55年卒）

齋藤敏明先生のご退職によせて

有　川　　究

昭和60年，当時資源工学科の3回生となった私は，迷うことなく，齋藤先生が指導教官でおられた開発講座（第3講座）を選択し，昭和62年に，同講座の修士課程に進んだ．当時は，バブルの絶頂であり，岩盤力学や掘

削工学といった比較的コンベンショナルな印象の強かった開発講座の人気は今一つで，開発講座の同期で修士課程に進んだのは私一人という時代であった．この様な中で，私が同講座を選択した理由は，研究内容に興味があったことは勿論であるが，担当教官である齋藤先生の紳士的なお人柄に惹かれたことも，かなりのウエイトを占めていた．

実際，齋藤先生には，大学での講義や講座内での勉強会，学生論文の指導，全てにわたり,優しく且つ厳しくご指導頂いた．私も，修士論文で，坑底ひずみからトンネル3次元変形を推定する内容について取り組み，齋藤先生から直接ご指導を頂くことができた．FEM解析を主体とした研究テーマであり,研究室の端末パソコンから電話を使って大学の情報センターへアクセスして，今では考えられないような時間をかけて，プログラムの変更や解析をした覚えがある．

結果としては，修士論文のテーマ選定からまとめまで，そのほとんどを齋藤先生に決めて頂いたようなものであるが，この修士論文をまとめるにあたり，齋藤先生から様々なご指導を頂けた．特に記憶にあるのは，研究に対する真摯な姿勢であり，自分なりに最後まで考えるという考え方である．私のような不出来な学生にも係わらず，中途半端に済まそうとすると，優しいながらも厳しく，「自分で考えなくては駄目だ．君はどうまとめたいのか．」とおっしゃって，私が頭を悩ましながらデータ整理している傍で，私の発表用OHPのロットリングをせっせとして頂いていた先生の姿が思い出される．今になって考えると，失礼なことをして頂いたものだと，恥ずかしい限りである．私が社会人になった後，不十分ではあるが自分なりに考えて，物事に真剣に取り組む努力ができるようになったのも，この時の先生のご指導の賜物であると，今更ながら感謝する次第である．

大学を卒業し，三菱重工に就職した後も，新しいトンネル掘削法の検討，海底資源の開発，土壌浄化技術など，少し行き詰ると，先生の迷惑も顧みずに，大学にご相談に押しかけたものである．先生は，私のような不肖な教え子に対しても，嫌な顔ひとつされずに，これまでの研究成果をご教授頂いたり，適切な方をご紹介頂いたりと，直接あるいは間接的に助けて頂いたものである．

このように齋藤先生には，研究あるいは仕事で優しく且つ厳しくご指導頂いてきたが,一方で，学生の飲み会に付き合って頂いたり，ご自宅にお招き頂いたりと，学生とのコミュニケーションも大切にされる方であった．今年のワールドカップでは，日本が無残な負け方をしたが，私が学生の頃は日本がワールドカップに出ること自体が夢の時代で，アルゼンチンがあのマラドーナの「神の手」で優勝をした年でもある．私も含めて，決して上品とはいえない学生が大挙して先生のお宅にお伺いし，奥様の手料理をいただきながら，ご子息とワールドカップを観戦していたことを思いだす．酔った学生の好き勝手な言動に対して，先生は暖かく笑いながら相手をして頂き，それが我々にとって，共通のいい思い出となっている．この様な先生の暖かさのおかげで，我々の講座はアットホームで連帯感のある研究室であり，各学生とも，研究室を本拠地として有意義な学生時代を過ごすことができた．このような暖かさや和の大切さといったものも，齋藤先生から頂いた貴重な財産であると考えている．

齋藤先生との思い出をとりとめもなく記してきたが，お世話になったことばかりで，本当に感謝の気持ちで一杯である．この度，京都大学を退職されるにあたり，不肖の教え子代表として，感謝の意を表すとともに，今後とも引き続きご指導頂けますように,よろしくお願いいたします．最後になりましたが，先生のご健康と今後のご発展をお祈り申し上げます．

（三菱重工業株式会社，昭和62年卒）

今の私

岡 本 繁 樹

私は齋藤先生の元で，岩盤力学を学んだ一学生である．地下の実験室で実験を繰り返した．本当にお世話になった．

社会人になって一つ驚いたことがある．「自分は元々薬学部だったが，担当教官との仲が悪くなって，転部した．」「修士論文の提出間際になって，担当教官から論文をつき返され，結局提出できなかった．」同僚は厳しい中で卒業してきたことを知った．目からうろこであった．

思い出が私をつつむ．

卒業論文が終わった3月のゼミ旅行，学生へのつきあい旅行ではないことを感じさせる牌を握る真剣な目つき，弘法大師を髣髴とさせるホワイトボードに繰り広げられる書体．

「岡本をあそこ（私の就職先）に入れておけば，みんなにとって都合が良い」とのお言葉，私には応援の言葉であった．

今私は香川にいる．香川大学の農・医・工の先生方，そして多くの企業の方と地域経済の活性化に向けて議論を重ねている．

皆さんはご存知であろうか，「希少糖」を．理論上存在する単糖のうち，実際に地球上に大量に存在するのは数種類．多くの単糖はほんのわずかしか存在しない．そのほんのわずかしか存在しない単糖を，大量に生産する酵素を作り出す微生物が，香川の地の地中から発見され

た．希少糖は夢の糖なのである．
（参考：http://rs.kagawa.com/c.html）

大学の先生方との議論は弾む．

これからの日本は，「人口減少」が進むと言われている．地球レベルでは，「温暖化」「砂漠化」が進むとも．この香川の地も同様に，人口が減少しつつある．某自動車会社のような兆のオーダーを売り上げる産業はない．そして，「水」．県民の脳裏のどこかに「水」が常につきまとう．

しかしこの香川の地は，考えようによっては，世界の最先端の地であると思っている．世界中の多くの都市が，10年，50年，100年，500年，さらにはそれ以上経てば，香川のようになる確率は高い．

今の香川の問題をクリアーできれば，「香川モデル」として世界に発信できるはず．そんなことを考えている．今の私はそんな私だ．

今の私の形成に，齋藤先生は少なからず関わっていると信じる．だから，責任をもってこれからも見守って頂きたい．末永くそうなることを願っている．

（香川県商工労働部，平成6年卒）

齋藤先生のご退職によせて

小田（旧姓青木）由貴子

齋藤先生，この度は御退職おめでとうございます．先日の記念祝賀会へは是非お祝いに馳せ参じたかったのですが，出席できずに大変失礼致しました．

私は平成2年に『資源工学科』であった時代に入学し，4回生の1年間 齋藤先生の研究室（開発工学講座）に所属してご指導頂いたのですが，実は講座始まって以来初の女生徒だったそうで，先生をはじめ周囲の皆様にはかなり気を使っていただいていたと記憶しております．

当研究室を選んだのも，研究内容に興味があったのは“もちろん”のことですが，本音のところは齋藤先生の温かいお人柄に惹かれてのことであり（同じように先生のもとを訪れた生徒も大勢いるに違いないと私は確信しております），専門課程に入ってすぐのころから 齋藤先生のいらっしゃる研究室にしよう！と決めていました．その選択は正しく，大学院には進まなかったため短い研究室生活ではありましたが，とても充実した楽しい1年間を過ごさせて頂きました．

研究室の皆で夏に神岡鉱山に研修＆温泉（飛騨高山）旅行に行ったこともありましたが，「鉱山には女の神様がいるから女性は入鉱禁止」と断られかけたところを先生がなんとか説得して下さり，地下巨大空洞の掘削最先端現場を見学するという貴重な体験もさせて頂きました．そんな中で今でも一番に思い出されるのは卒論のことでしょうか．卒業研究のテーマは確か，石灰岩露天掘りの岩盤内不連続面のすべりについて有限要素法を用いた解析を行うようなものでした．ところがプログラミングが“超”がつくほど不得手だった私は，発表間近になってもどうしても解析用のプログラムができあがらず，何度計算を廻してもエラー続き．心配して下さった先生は夜中にも関らず何度も研究室へ出てこられ，相談に乗って頂きました．ただ当時のパソコンは想像を絶するくらい計算が遅く，朝計算をスタートさせても夕方になってようやく結果が出る，といったような具合．連日徹夜でプログラムと格闘していた結果，情けないことに発表リハーサルの場で貧血を起こし，座り込んでしまいました．見かねた齋藤先生はプログラムを修正して下さり，未完成のスライドも先輩方が手分けして手伝って下さった，というなんとも苦い思い出があります．この場で披露するのも情けなく大変恥かしい思い出ではありますが，無事卒業ができ今の自分があるのは齋藤先生のおかげ（もちろん同研究室の方々も）と言っても過言ではありません．月並みな言葉で恐縮ですが，心から感謝しております．本当にありがとうございました．

4月から新しい場所でご活躍されているとのこと，先生の益々のご健康とご多幸を心よりお祈り申し上げます．

（東京ガス株式会社，平成6年卒）

齋藤先生のご退職に寄せて

小　川　浩　司

齋藤先生には，1995年に研究室に配属されてからの3年の在籍の間だけでなく，その後も公私にわたりお世話になっております．齋藤先生，ありがとうございます．

当時，「3講」あるいは「開発」と呼ばれていた，齋藤先生の研究室に，私が望んで入った理由の一つは，学部2回生の時に受講した弾性学の講義がとても丁寧でわかりやすかったことでした．応力とは何か，ひずみとは何か，モールの応力円とは・・・，応力とひずみの関係は・・・，といった基礎の部分について時間をかけて説明していただいたことで，私の弾性学への興味は大きくなっていったと思います．その後の岩石力学の講義でも，破壊包絡線など非常に丁寧に教えていただいたことを思い出します．

あの頃のノートは今でも手元にあります．弾性学や岩石力学に関して考え方や式を確認したいときにまず開くのは，教科書ではなく当時のノートやプリントです．基本に立ち返りたいときは非常に役立っております．大学にいた頃の私は将来このノートを開くことなどまったく想像していませんでしたが．

齋藤先生のおかげで，私は社会人になっても岩石力学に携わることができています．非常に忙しくともおもしろい仕事ができていると，自分で思うことができています．現在の会社に就職するきっかけも齋藤先生につくっていただきました．

会社に入ってからは地圧測定の仕事を多く経験しました．恥ずかしいことに大学時代の私は知らなかったのですが，地圧測定における先生の業績について，上司から知らされ，はじめて認識いたしました．もちろん，応力解放法の原理を理解するときにも，人にそれを説明するときや，測定手法について検討するときにも，先生から教わった弾性学や岩石力学の知識が役立ちました．

研究室に配属されてから，地下の実験室に置いてあった不思議な形状の岩石を見たり（コアディスキングについて研究室に入った頃の私は知りませんでした），一軸圧縮試験で岩石が破壊する瞬間を見たりする中で，岩石力学への興味が深まっていきました．研究室で得た経験はすべて，今も私の中で生きています．あの地下の部屋は今はどうなっているのでしょうか．

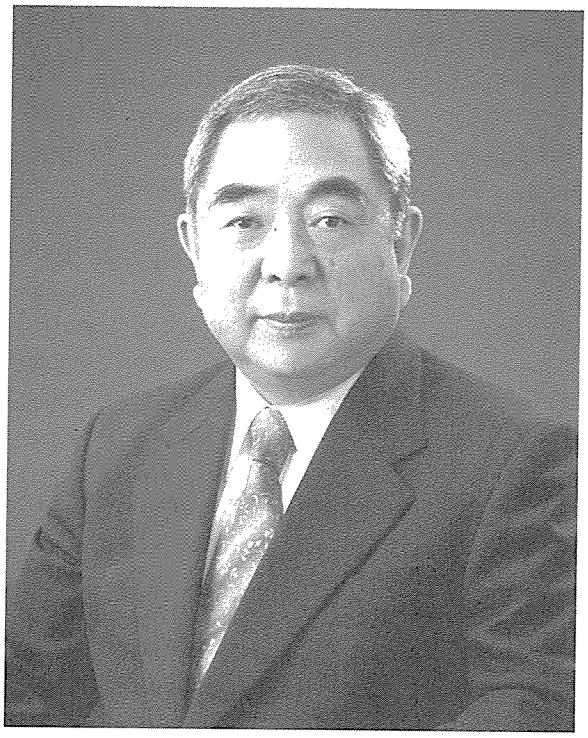
大学時代を思い出すとき，ゼミ旅行のことが必ず頭に浮かびます．学部4回生のときは平木鉱山へ，修士1回生では神岡鉱山へ，修士2回生のときは伊吹鉱山へ連れて行っていただきました．初体験の鉱山のスケールの大きさにとても驚いたのを覚えています．神岡には最近でも仕事で行っています．

学部，修士と，実験は主に不連続面の一面せん断試験を行っていましたが，その実験の進め方，また，学位論文や修士論文の取りまとめの際は，齋藤先生の柔和な表情での落ち着いたアドバイスに助けられました．発表の際に，もっと大きな声で話せとご指導いただいたことは，今でも常に発表の時に思い出します．

齋藤先生，これまでのご指導まことにありがとうございました．今後ともわれわれ卒業生に対しましてご指導ご鞭撻いただきますようお願い申し上げます．またいずれ，あの頃のメンバーとともに先生の所へお伺いし，お酒を飲みながらお話しできればいいなあと思っております．先生のますますのご健勝を心よりお祈り申し上げます．

（応用地質株式会社，平成8年）

京都大学名誉教授　長村光造先生は定年退職されました．



長村光造先生の御略歴

長村光造先生は，昭和40年3月京都大学工学部冶金学科をご卒業，昭和42年3月同大学院修士課程を修了，昭和45年3月同大学院工学研究科博士課程を単位取得退学後，京都大学工学部に勤務され，昭和51年1月より同大学工学部助教授を勤められました．そして，昭和60年1月より京都大学工学部金属系学科金属材料学講座の教授となられ，その後，大学院重点化に伴い，京都大学大学院工学研究科に配置換，材料工学専攻材料機能学講座を担当してこられました．この間，現在のナノテクノロジーのさきがけとなる京都大学工学部附属メゾ材料研究センター（現，国際融合創造センター）のセンター長としてその発展にご尽力されました．

先生はまた35年間にわたり材料科学に関して多くの業績を挙げてこられ，イジングモデルや非線形微分方程式による理論的研究や，小角散乱法，AP-FIM法によりAl合金等におけるナノクラスターのサイズ・空間分布の時間変化，粗大化過程での相分解構造の成立過程を解明されました．また非線形スピノーダル分解についてLanger, Bar-on, Miller理論を拡張し運動方程式の定式化を行い，正しく組成の確率分布のピークの分離が進行する理論を世界で初めて構築されました．Al-Zn(-Mg)合金の開発においては，Mn化合物の繊維強化を利用して1GPaに達する超高強度Al合金（Mesoalite）の実用化にも成功されました．さらに実用超伝導材料の特性向上の研究にも長年の間取り組まれ，特に近年は高温超伝導材料の臨界電流密度と微細組織との関連の解明に大きく貢献され，世界的指導者としてもご活躍されました．現在もNEDO国際共同研究や，「複合超伝導体における機械的・電磁気的特性国際ワークショップ」の設立，および国際標準化に関するIEC/TC90（超伝導）の国内委員長等々としてご活躍され，そのご研究は広がりを見せております．

このような中で，日本金属学会功績賞，日本金属学会増本量賞，軽金属学会50周年記念功労賞，超伝導科学技術特別賞，経済産業大臣表彰（工業標準化事業）など多数の賞を受賞されております．このように先生は軽金属や超伝導材料をはじめとする材料科学に関わる研究と教育に多大な貢献をされ，国内外を問わず多くの人材を育成されました．

（松本　要）

長村光造先生のご退職に寄せて

落　合　庄治郎

長村光造先生に初めてお目にかかったのは，私が4回生になって村上陽太郎先生の研究室に配属になった昭和45年4月でした．先生は博士課程を出られてすぐ助手

に就任され，研究者・教育者としての道を歩み始められたところでした．以来35年が経ちますが，その間ずっと，お世話になりっぱなしで，退職された実感がわかないというのが正直なところです．ここでは，元長村研スタッフとしての感謝の気持ちとご業績を述べさせていただき，最後に先生の意外な一面を紹介させていただきます．

最初の印象は，とにかく一生懸命仕事をされる先生ということでした．ご結婚後間もなかった時期でしたが，昼夜を問わず，日曜日も休まず常に仕事をしておられました．いつ休まれるのだろうと不思議に思い，生意気に「このような生活を続けて，しんどくないですか？」と尋ねたことがあります．「しんどいに決まっている．けど，楽しい．」と苦笑いしながら答えられました．ずっと後になって，研究室スタッフに加えていただいて先生の真摯な研究姿勢を目の当たりにし，また私自身も，研究で失敗を重ね，何度も試行錯誤の末なんとか正解らしきものにたどり着く経験をして，「しんどい思いをするぐらい打ち込まなければ自然は本当の顔を見せてくれない．苦労して法則性を見出し，材料創製へ繋げる喜びは何事にも代えられない．」の意味とわかりました．研究の苦労もその先の楽しみも知った上で，寸暇を惜しんで「徹底的に実験し，徹底的に考察する」を実践されている先生に，実験をやったこともない4回生の若輩が「しんどくないですかー」などと暢気な質問をしてしまったわけです．赤面の至りです．この場を借りて，失礼をお詫びします．

長村研では，教授室で，定期的に先生とスタッフ・学生が議論する場を設けていただいていました．「徹底的に実験し，徹底的に考察する」先生との議論ですから，実験方法が適切であったか，データは信頼できるか，考察は合理的か，もっと良い知恵はないかなど，先生が納得されるか，時間切れになるまで，妥協のない議論が続きました．ときにはエンドレスで議論したこと，光明が見えたときは喜びを分かち合えたこと，先端的な成果を得たときには本当にうれしそうな顔をされたことなど，昨日のことのように思い出します．このような環境で，研究の厳しさと楽しさを共有させていただいたことは，私にとって大きな財産となりました．また，学生にとっても，研究の在り方・進め方，プレゼンテーションの仕方，議論の進め方など，講義では学べない勉強の場となり，学生時代の卒論・修論・学会などでの発表だけでなく，職に就いてから研究者・技術者さらには指導者として仕事を遂行する上で，役に立ったことと思います．

先生は，半導体の状態図・熱力学的研究，金属・合金の相分解に関する実験と理論解析，新合金の開発，超伝導材料の相形成過程解析，超伝導物性と微視構造との相関評価・モデリング，高性能超伝導（高臨界電流，高強度，低ACロス）複合線材の開発など，多彩な分野で研究を展開されました．いずれの研究でも，大きな功績をあげられ，それぞれの分野の発展に貢献されてきました．これらの業績が世に認められ，数多くの賞を受賞されましたことは，大変嬉しく，また関係者の一人として誇りに思っております．先生のご業績の詳細は本特集の他頁でも紹介されていますので，ここでは，私が現在もお世話になっている超伝導材料研究について，研究者としてだけでなく，世界的指導者としてもご活躍されていることを紹介させていただきます．

まず，機械的・電磁気的特性のメカニズム解明や評価法の確立を目指し「複合超伝導体における機械的・電磁気的特性国際ワークショップ」を設立されました．2003，2005年は京都で，2006年はイギリスDurhamで開催され，関連分野の著名研究者が一同に会する議論の場として，また，最先端情報の発信の場として，大きな成功を収めました．また，臨界電流や強度の向上，ACロス低減等の飛躍的向上を目指して，日，米，欧，アジアの主要研究者が参加しているNEDO国際共同研究の代表研究者を務めておられます．さらに，超伝導材料の電磁気学的特性や機械的特性評価のための標準手法はまだ確立されておらず，その整備が急務となっていることから，国際標準化に関するIEC/TC90（超伝導）の日本委員長としてもご活躍中です．

最後に，研究以外の思い出を．ある日突然，先生から「研究会の懇親会でカラオケが始まったが，歌ったことがないということで，パスした．しかし，これではだめだ．これからの研究者はカラオケぐらいこなさなければ．ついては，次のコンパではカラオケをやるから全員歌うように．」と指令が出ました．コンパでは，山本先生も私も，一部の学生も，カラオケは大の苦手でしたが，なんとか歌いました．そこで先生の出番となったわけですが，これが意外や意外，（歌えないとおっしゃっていたのですが），実に手慣れた歌い方なのです．どんな顔して歌っておられるのかと，のぞき見ますと，なんと陶酔して歌の世界に入り込んでおられるではありませんか．普段の先生を知っている我々にとって，unbelievableでした．後で伺いますと，コンパでやると宣言してから，練習してきたとのこと，これにもびっくりです．さらにしつこく伺いますと，ぼそぼそと小声で，相当研鑽を積んだ旨，告白．なにごとにも生真面目に取り組む先生らしいエピソードです．

ご退職に当たり，35年にわたるご指導・ご鞭撻に改めて感謝申し上げますとともに，新たな出発をお祝い申し上げます．これからも，応用科学研究所で多くのプロジェクトを率いていかれると伺っております．ますます

お元気で，ご活躍されますよう，また，ときには奥様ともゆっくりくつろげる時間を持つことができますよう，祈念申し上げます．

（京都大学国際融合創造センター）

長村光造先生のご退職に寄せて

渋　江　和　久

1977年春，冶金学科金属材料学講座（村上研究室）に配属となり，私の研究人生が始まりました．そのころドイツから帰国された長村先生の指導にもとに卒業研究を実施することになりました．それ以来30年近く，長村先生には公私ともお世話になっております．

材料研究のイロハも分からない頃，長村先生から「Fe-P-C非晶質合金の結晶化過程」および「非晶質合金の構造と結晶化過程に関する研究」をいただいた．試料作製，熱処理から始まり，X線小角散乱，熱分析，電気抵抗測定，TEMなどの解析・観察を通して，非晶質状態から結晶化の初期過程を追及していました．当時，非晶質研究は活発で，最新の材料研究に関わっている実感がありました．また，自分で試料を作製し，それを使って実験・解析していくことにわくわくしたことが昨日のように思い出されます．

研究の中心はX線小角散乱測定で，測定データの微妙な変化を見落とすことが多かったのですが，長村先生が変化しているはずだと信念を持った解析を示され，少々強引かなと思っていました．しかし，熱分析，電気抵抗測定，TEM観察など多面的に初期過程を観察するにつれて，微妙な変化がみえるようになってきました．ある時，非晶質合金（Pd-Au-Si）がガラス状態－構造緩和－過冷却液体の状態変化を可逆的にたどることが判明したときは望外の喜びでした．長村先生から構造緩和，構造緩和と呪文のように聞いていた現象が自作の非晶質でも起こっていることが明らかとなったのでした．このときの経験から，現象を理解するには多面的に観察する必要があることを教わり，これは就職後，企業での研究開発においても，また，普段の生活においても常に気に留めながら行動するようにしてきております．

1980年，住友軽金属工業に就職後，アルミ系新素材の研究開発に従事することになり，長村先生には現在に至るまで，急冷凝固アルミ合金，スーパアルミなどの研究開発などでご指導をいただくことになりました．現在は，相変わらず研究に携わっているもの，研究管理をする立場となっており，新しいものを直接発見する感動を得ることはできなくなっており，残念ではあります．

長村先生はご退職後も研究を続けられていると聞いております．これからも，ますます，ご活躍され続けられると思いますが，我々に，引き続きご指導ご鞭撻をお願いいたします．

（住友軽金属工学㈱）

長村先生のご退職おめでとうございます

菅　野　未知央

平成10年，材料工学専攻修士課程に進学とともに研究室を移り長村研究室に在籍させていただいてから，早9年が経ちます．修士，博士課程の合計5年間，長村研に在籍させていただき，その後も現在に至るまで公私ともに先生には大変お世話になっております．学部のときに半導体関係の研究室に在籍していた私は，修士進学に当たり，どのような分野に進むのが良いか悩んでおりました．当時は，8月に実施される大学院入試の時点で修士からの研究室を選択しなければならないため，4回生で配属された研究室の具体的な研究内容は全く理解できていないままの状態でしたが，漠然と違う研究室で学んでみたいという希望を持っておりました．いくつかの研究室の紹介記事などを読んだ結果，長村研究室で複合材料に関する研究成果に関する論文に行きあたり，これに興味を持ったのが長村研を進学先に選んだきっかけでした．

いざ修士に進学し，研究テーマを考える段階になりましたが，当時私が予想していたようにテーマが先生から天下り的に与えられるようなことはありませんでした．複合材料の研究に関しても，どちらかというと過去の研究テーマのひとつで当時のメインの研究テーマでは無いということも徐々にわかってきて，どのようなテーマを設定したら良いか思い悩むまま数ヶ月が過ぎていきました．その間，長村先生とは何度も何度もご相談させていただき，段々テーマの具体像が描けるようになっていったことを思い出します．結局，当時研究室で力を入れておられたBi系の超伝導線材の機械的特性に関する評価を行うことがテーマとして決定しました．これは，私が当初描いていた研究テーマのイメージとは必ずしも一致するものではありませんでしたが，材料科学，機械工学，電磁気学のちょうど境界にあたる学際的な研究であり，実際に研究を始めてみますと面白みがわかって参りました．

長村研の特徴は，とにかくいろいろなテーマを同時並行で進めているという点であったと思います．研究室名が「材料物理学研究室」であったことが物語る通り，材料の物理的性質について面白いと思ったことはなんでもやる，という雰囲気がありました．私が異動してきた当時の博士課程の先輩のテーマにしても，スピノーダル分解に関する新たなモデル構築や超伝導体内の磁束構造の中性子散乱を用いた観察といった基礎的研究から，アル

ミ合金の高強度化といった実用に近い研究まで幅広く手がけられており，「何だかよくわからんけど，すごそうなところやなあ」と圧倒されたのを覚えております．

長村先生は研究に関してはとにかく厳しい姿勢であったと記憶しております．いい加減なこと言うと，すぐに「なんでや？」という質問が返ってきて，しどろもどろになったことも多々ありました．とにかく，どういうデータが出たかということよりも，なぜそうなるのかということを常に考えて研究に取り組むことを強調されていたのだと思います．一方，「できません」というのも先生とディスカッションする上で禁句の一つでした．実際に手を動かす前に安易に結論を予想して，「こういう理由でどうせやってもうまくいかないと思います．」というようなことを言おうものなら，「そんなもんやってみんとわからんやろ！」という叱責が即座に返ってきたものでした．さらに，直ちに先生自ら手を動かして問題を解決され，できない理由が我々の思慮不足によるものであることを身をもって証明されたものでした．これは，まさに先生から教えていただいた研究に対する取り組み方についての重要な点の一つであり，未だに実験がうまくいかなくなると先生のお言葉を思い出します．以来，「できない理由を探す暇があったら，どうやったらうまくいくかを考える．」ということを常に肝に銘じて研究に取り組んでいます．

また，私が長村研に在籍させていただいて有難かったと思うことは，たくさんの国内外の研究者の方と触れ合う機会を与えていただいたことです．私が在籍している間だけでも，韓国，インド，アメリカからの留学生，ポスドクの方が在籍されており，その他にも年間何度も海外の著名な研究者の方がご訪問されて，講演を拝聴させていただく機会に恵まれました．講演の後は大抵先生の“おごり”で食事の席にお招きいただくチャンスもあり，今思えば一流の研究者の方の学問的な部分だけではなく，研究者としての姿勢に触れる貴重な機会を与えてくださったと感謝申し上げております．また，先生は超伝導線材の電磁機械特性に関する国際ワークショップを主催され，既に国内外で4回開催されておりますが，幸いにもその全てに参加させていただく機会を与えていただきました．このような場で発表，ディスカッションさせていただくことによって，国内外の多くの研究者の方々と接する機会を与えていただきましたことが，私にとって研究者としての大きな財産になっています．

また，長村先生ご夫妻には私が学生結婚した際の仲人も務めていただきました．結婚するに際しては，まだ学生の身で研究と生活の両立に不安をもっておりましたので，先生にご相談させていただきました．そのときにかけていただいたお言葉は次のようなものでした．「人生はこうしないといけないということはない．それで，研究にもさらに精が出るのであれば良いのではないか．」「学生の身で」という不安を持っていた私はこの先生のお言葉で，「どうなるかは自分の努力次第であり，目先の不安にとらわれず自分のやるべきことをやっていこう．」，と心に誓った次第でした．また，仲人をお願いするに際してたびたび妻ともども先生のご自宅にお邪魔して，奥様の手料理をご馳走になりました．ここに改めて感謝申し上げたいと存じます．

長村先生からは研究だけでなく，研究に対する姿勢，目先のことにとらわれず自分の信念に基づいて行動することの大切さを教えていただきました．先生は，ご退職後もますますアクティブに研究を続けられております．どうぞお体に気をつけていただき，“たまには”学生時代と同様の厳しいご指導を賜れば幸いです．そして，少しでも先生に近づけるよう私自身努力して参りたいと存じます．

（京都大学大学院工学研究科電子工学専攻）

長村先生の御退職に寄せて

村 上 浩 二

1999年3月に修士課程を終えて社会人になった時には，再びこの様な形で母校に接する機会を持つとは考えてもおりませんでしたが，長村先生の御退職にあたって水曜会誌に記事を書かせて頂くことに対して，関係者の方々に深くお礼申し上げます．退職記事となると，長村先生との出会いから始まる訳ですが，私の記憶＋記録では，2回生の1994年度後期に受けた「材料基礎学Ⅰ」という講義に始まっている様です．現在でも，仕事中にふと疑問に思った事について学生の頃にとったノートを見返すことがしばしばあり，本記事を書くにあたってその時のノートを開いてみますと，最初に物質の三態についての説明，熱力学変数の導入，相律，相転移，混合によるエントロピー・エンタルピー変化を経て，不変系反応と二元系状態図の描き方が導かれていました．ノートの最後には3元状態図の等温断面や垂直断面の描き方を練習した跡があり，既に10年以上前のことながら，試験前にこれらをパズル感覚で描いていたことが思い出されます．当時の私の印象は「長村先生＝状態図の先生」だったのですが，その印象は現在でもそのままで，2002年4月から2005年3月にかけて，私が社会人ドクターとしてお世話になっている間も，常に状態図を用いながらの議論をして頂きました．現在，仕事の関係で機械加工が専門の方々と関わりを持つことが多い中で，長村先生から教えて頂いた状態図・相変態・析出をはじめとする，材料の基礎的性質に基いた議論は，この方面の方々

には新鮮に聞こえる様です．先日の長村先生の退職記念行事において，細胞の機能についても相分離の考え方が適用できるという宇治原先生のお話があった様に，材料学を学んだ我々としては，その基礎的見地から現象を定量的に解釈する姿勢を独自性の礎として大切にしたいと感じる今日この頃です．

博士課程では，鉄鋼材料の表面からアルミニウムを浸透させ，その後にプラズマ窒化を行うという表面改質について，主に組織解析と改質層成長過程の速度論を扱っておりました．約1ヶ月に1回の頻度で実験結果・考察についての議論を長村先生にお付き合い頂いたのですが，「ここは十分理解出来ていないから，突っ込まれると返答に窮するなぁ」と内心思っていた点については必ず先生から質問を受け，「まだまだだなぁ」と思いながら職場に戻っては勉強し直す，ということの繰り返しだった様に思います．そんな中で，学生の頃に学習した内容を見返し，現在の自分の頭で考え直してしてみると，当時はあやふやな理解だったことについても，その頃とは少し違った解釈ですんなりと理解出来る様な場合があり，その度に「時が経つと，ものの見方も変わるもんだなぁ」と感じました．実験データが出揃った後，考察の内容がまとまるまで，長村先生が常に厳しい姿勢で御指導下さった甲斐あって，論文を投稿した際には実験データやその解釈について査読者から異議を受けることなく，何とか無事卒業することが出来ました．私が長村先生にとって満足出来る水準の仕事を成し遂げて卒業したかどうかについては，いまだに疑問は残りますが，先生の「君の研究成果の良否は，後世の研究者が決めるものだ」というお言葉を思い出しては，これまでより少しでも良い成果を残すべく，博士課程で得たものをこれからの業務に役立てたいと考えています．

全くの私事で恐縮ですが，最も印象に残っている先生との思い出を書き記すことを御容赦頂きたいと思います．2005年6月に熱処理に関する国際会議がイタリアで開催され，私は初めて国外の国際会議としてこれに参加したのですが，それは同時に私にとって初めての海外旅行，しかも終始一人旅ということで，不安が高まる一方で旅立ちの日を迎えました．関空で搭乗手続の列に並んでいる時，「よう」という声と同時に私の肩が誰かに叩かれ，そこには（私にとって）居るはずのない長村先生の姿があり，にわかには状況を理解出来なかった私は「あれ，私を見送りに来て下さったのかな？」「いやいや，旅程までは申し上げていなかったはず…」としばらくの間混乱してしまいました．結局は，関空からフランクフルトへの便が同じだったということで，こんな偶然があるものだなぁと驚きながら，搭乗手続を済ませたことが思い出されます．飛行機の出発前に，長村先生の旅程と私のそれを見比べてみると，私がイタリアでの発表を終えた後，ドイツ観光のためにミュンヘンを訪れる期間が，長村先生の同都市滞在予定と1日一致していたため，図々しくも長村先生の共同研究者の皆様とその日の夕食を御一緒させて頂き，初の海外旅行を楽しい思い出で締め括ることが出来ました．この話のみならず，そもそも私が社会人ドクターとして長村先生のお世話になり始めたのも，ふとしたきっかけによるもので，偶然だけでは片付けられない何かが，長村先生と私の間にあるのかなぁと感じられる今日この頃です．先生にとっては，御迷惑にお感じの点も多々ありそうですが・・・

最後に，約30年にのぼる教員生活に一区切りをお付けになった長村先生に，まずは「御苦労様でした」と申し上げたいところではありますが，これからも私達を材料学の基本に立ち返らせ，材料学的視点から正確かつ新たな理解・解釈を導く上での指導者として，厳しい御指摘・御鞭撻をお願い致します．

（岡山県工業技術センター）

平成18年度水曜会大会

●日　時　平成18年6月10日（土曜）11：00－17：15
●会　場　京大会館

平成18年度水曜会大会は6月10日（土）に京大会館にて開催され，総会，懇親会・研究室紹介ポスター展示，記念撮影，特別講演，会長卓話が行なわれた．当日は，梅雨のどんよりした曇り空ながら，雨は降らず，昨年度なみの約80名の参加者があった．

総会は，杉村博之教授の司会で進められ，先ず芦田譲会長から平成18年度の事業報告ならびに教室の人事異動などの近況報告があった．ついで，宅田裕彦会計幹事から会計報告，田村剛三郎会計幹事から監査報告がなされ，いずれも承認された．続いて，次期役員の推挙がなされ，新会長に冨井洋一教授，新副会長に粟倉泰弘教授が選出された．冨井新会長から水曜会の変遷を交えた就任の挨拶と抱負が語られ，総会は終了した．

場所を101・102号室に移し，懇親会・研究室紹介ポスター展示が約1時間半開催された．研究室紹介ポスター展示は本年度の新規な取り組みであり，盛況のうちに懇親会が始まった．松原英一郎教授の司会のもと，まず芦田会長の開会の挨拶があり，ついで村上陽太郎名誉教授の音頭で乾杯が行なわれた．会は立食形式で和洋折衷料理を楽しみつつ，和やかな雰囲気のうちに終了した．その後，京大会館玄関前にて記念撮影となった．撮影は吉田神社前の中尾写真場にお願いした．

再び，会場を210号室に移し，特別講演会が開催された．本年度は以下の2件の特別講演が行なわれた．

「自動車と特殊鋼」

愛知製鋼株式会社　代表取締役社長　森田　章義　氏

「循環型社会のおける『資源開発』の役割」

株式会社つくば研究支援センター　常務取締役　厨川　道雄　氏

引続き，同会場で下記の会長卓話が行われた．

「21世紀は資源争奪の時代」

平成17年度水曜会会長　芦田　譲　教授

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るが，森田氏の講演では，自動車と特殊鋼の関係，愛知製鋼の製品と地球環境との関係が紹介された．厨川氏の講演では，金属資源の枯渇と国際的な需給関係について統計的な解説があった．芦田会長の卓話では，エネルギーに関するナショナルセキュリティーの解説があった．いずれの講演も説得力のあるもので，参加者は熱心に傾聴した．平成18年度水曜会は2件の講演と1件の会長卓話が終了した後，午後5時半に散会した．

平成17年度水曜会会計報告

平成18年3月31日現在

収　入		支　出	
前年度繰越金	8,535,844円	会誌印刷代（製版・郵送料込）	
会　費	3,733,730	23巻8号	2,034,428円
会誌広告掲載料（製版代込）		印刷代（封筒他）	34,335
23巻8号	694,805	水曜会大会経費（17年6月11日）	1,269,499
会誌論文別刷代	0	名簿発行費（二重振込み返金分）	3,540
名簿広告掲載料（平成16年版の未収分）	46,575	編集委員会経費	264,161
名簿売上	27,440	会誌原稿料	135,000
会誌売上	1,500	新入生歓迎行事援助	16,330
水曜会大会懇親会費	320,000	通　信　費	40,890
水曜会大会写真申込金	22,000	事務人件費	648,760
水曜会大会写真焼き増し申込金	1,120	文具，コピー代等	290,587
預金利息	1,052	水曜大会写真焼き増し代	1,000
収入合計	13,384,066円	小　計	4,738,530円
		次年度への繰越金	8,645,536円
		内訳　銀行普通預金	1,329,495
		銀行定期預金	6,500,000
		郵便振替預金	617,185
		手持現金	198,856
		支出合計	13,384,066円

上記の通り会計中間報告致します．

平成18年6月10日

会計幹事　宮田裕彦

以上の通り相違ございません．

会計監事　田村剛三郎

会員消息

昭和21年冶金学科卒業生同窓会（平成17年11月9日開催）

我々も卒業して約50年になり，歳も80を超えた．この際久しぶりに京都に集まる計画をした．しかし，老齢などのため集まったのは6名に過ぎなかったが，色々の思い出に話は尽きなかった．

参加者は写真（白沙村荘にて）左から，相原和穂・吉田幹夫・竹田睦夫・今井一彦・日野谷一郎・池田　保である．

1) 京大・玄関の時計台下に12時に集合して展示室をみる．冶金学教室は無くなっているが，往時の食料不足で芋などを栽培したこと，薬品・器具類の不足で十分な実験が出来なかったことなどが思い出された．

現在は，孫の様な男女の学生で校内が賑わっているのには隔世の感がした．

2) その後場所を銀閣寺の近くの「橋本関雪記念館内の白沙村荘」に移し，その庭園を見ながら会食をした．

食後，紅葉に色づいた庭園を散策してから，今後の健勝を期待して4時前に散会した．

散会後，夫々に銀閣寺へ行ったり，哲学の道を歩いたりして楽しく一日を過した．

（文責　池田　保）



二八会旅情記（S28年冶金学科卒）

二八会は毎年日本各地を巡回するのが恒例となっていたが，昨年横浜会の時京都と各地を隔年毎に行う事に決り，平成17年は京都開催となった．11月25日京都は錦秋の真只中，観光客で雑沓と喧噪に充ち溢れていた．会場の京都センチュリーホテル2階“嵐亭”は京都驛の東側にあって，大きくはないが洗練された瀟洒な建物である．西村山治君の盡力による所が大きい．

午後6時11名が参集する．今まででは一番少ない人数で一抹の淋しさは禁じ得ない．常連の欠席のためである．梅田，町田両君は体調不良との事で速やかな回復をお祈りする．田山君は伴侶に不幸があった由，心情察す

るに余りある．渡辺君は数少ない現役の一人で，石油事業に関与し世界中を股にかけ東奔西走している．結構な事である．原油が高騰し巨利を得ている事だろう．来年の同窓会では「会費は全部俺がもつ」と言ってくれる事を期待している．久方振りに出席した車谷君を含め全員元気で，川島夫人は紅一点の存在感を示す．姚君より倉知君宛の手紙が披露される．同君は文化大革命の時には大分苦労されたらしいが，職務を充分に果たし現在北京で余生を送っている．

宴酣になると大学時代の青春に回帰し，学友達の話題に花が咲き森田君から大高の寮歌が飛び出したり，一段と殷やかになる．卒業前の記念写真のコピーが配布されると，教授は全員他界されており，助教授，学友の中にも逝去された人が散見されるし，又学友の中には名前を失念する人もあって，時の流れの非情にして冷厳さが痛切に感じられる．しかし学友の生存率は70％と良好の部類に入る．これも学生時代に培われた友情とバイタリティと心の余裕がその後の社会生活を生き抜く原動力になっているためと思う．全員で寄せ書きをしたが，その内容は再会を喜ぶと共に，今後も二八会が強く太い友情の絆で結ばれ末長く続けられる想いがこめられていた．青春は若さと情熱に彩られた軌跡であり，青春が素晴らしければ素晴らしい程老いは一段と輝ける光芒を発散するものと思う．

来年の二八会は藤田君にお世話して戴き名古屋で行われる事に決定した．東京と京都の中間点という地の利もあり今から楽しみにしている．

（松浦記）



平成17年度京都大学工学部冶金学科（旧制）二八会クラス会
於　京都センチュリーホテル2F　嵐亭
（2005）平成17年11月25日（金）18時～
（前列左より）　藤田，車谷，松村，川島夫人
（後列左より）　松浦，津田，浅井，倉知，川島，西村，森田

昭31冶　卒業50周年記念同窓会

去る6月7～8日卒業50周年を記念し青森県にて同窓会を開催した．

JR八戸駅に集合した一行は途中三沢空港での合流者を含め総勢10人，マイクロバスで東北の名湯酸ヶ湯温泉に到着，早速旅館自慢の総ヒバ造りの千人風呂（もちろん混浴）で汗を流した後懇親会に移った，全員70歳を過ぎ今尚現役で社会に奉仕している者，多彩な趣味で年金生活を謳歌する者，又病苦に悩まされている者など

現況報告に時の経つのを忘れて歓談.

翌朝宿を発ち残雪の八甲田山系を眺めながら山を下り，奥入瀬渓流に到着，数個所のビューポイントで下車，散策を繰り返し，美しい新緑を満喫しつつ薫風の十和田湖へ，湖畔に立つ高村光太郎作の乙女の像の前で記念撮影.

帰路はカワヨグリーン牧場のレストランでやわらかい極上のステーキの昼食に舌鼓を打ち，来秋の再開を期し，JR八戸駅で解散した.

（文責　倉井）



十和田湖畔にて　平成18年6月8日
左から　野村，荒木，長澤，土川，石井，木村，菊川，武智，倉井，藤田

昭和33年卒冶金学科同窓会（伊豆旅行）

秋はるる天城を越えてゆく旅にほのと華やぐ老いの連れ立ち　　松本岳舟（洋祐）

恒例の年1回の同窓会．今年平成18年は10月11日・12日の一泊二日の伊豆旅行を行い，旧交を温めた.

出席は，例年より少々淋しく9名．今年の幹事は関東組の当番で．梶川脩二，堀啓一の両君が務め，伊豆高原の豪華なリゾートホテル「エクシブ伊豆」に，石部浩，上仲俊行，大谷四聰，川口宜人，田中孝一，馬場義雄，堀啓一，松本洋祐，松本善文の9名が元気な顔を揃えた.

残念ながら，幹事役として堀君とともに日程などにきめ細かい計画を立ててくれた梶川君が，直前風邪をこじらせて体調不良で急な欠席となったが，堀君の行き届いた心遣いで，夜遅くまで教養時代から学部時代のさまざまな思い出話やこのところの世相についてなど，話が弾み，ひとときの青春回帰の気分を味わった.

なお，堀幹事から，欠席者のほとんどから寄せられた近況が紹介されたが，それぞれ特段の変わりようもないようで，嬉しいことである.

酌む酒はいたくも減りてつつむとも変若ちかへりくる伊豆の宿かな　　松本岳舟（洋祐）

注）つつむ；つつしむ（身のことを考えて）
変若ちかへり；「をちかへり」と読む．若返る
（筆者訳　年を取ると体のことを考えて酒を控えるようになってしまう．だが少しでも酒が入ると皆元気が出て，気分は若返り，大いに話が弾んだことだ）

かつての酒豪連も，年とともに酒量は減ったが，口は昔と変わらず，大いに談論風発．いささか淋しい話だが，近年，認知症予防などに「回想法」なる療法があると聞く．思い出話は脳の衰退防止にも役立つようだ.

翌日は，バスで河津から河津七滝の一つを眺め，天城

を越え，浄蓮の滝を訪れてから（急な階段の降りと登りで息を弾ませた者もいたようだ）修善寺に出て修善寺物語の昔を偲ぶというルートを辿り，絶好の旅日和のなか秋の一日を楽しんだ．散会は三島駅．来年を約して東西に別れた．

来年は，馬場義雄君が幹事で場所は幹事一任だが，北陸辺りはどうだろうかという声が挙がっていた．

（報告　松本善文）



伊豆「浄蓮の滝」にて

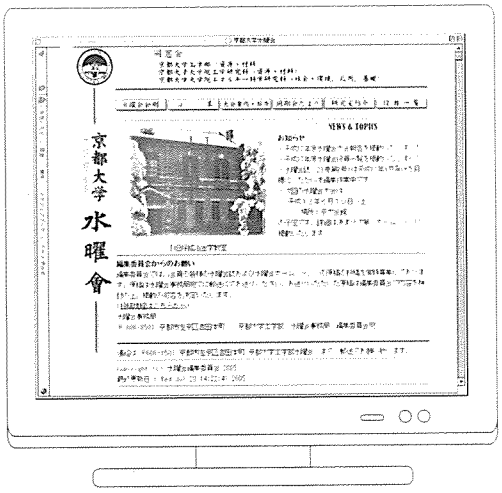
川口，石部，上仲，松本（洋），大谷
堀
田中，馬場，松本（善）

水曜会からのお知らせ

京都大学水曜会のweb siteを開設しております．

http://www.suiyokwai.jp/

ご覧下さい．



・振込口座変更のお知らせ

平成18年9月19日（火）よりみずほ銀行（旧 第一勧業銀行）の百万遍支店は，出町支店と店舗統合されました．それに伴い，水曜会および水曜会名簿関係の口座は以下のとおり変更になりましたのでお知らせいたします．

水曜会

みずほ銀行出町支店（店番号587）普通 1242526

水曜会（名簿）

みずほ銀行出町支店（店番号587）普通 1687927

・このたび本会所属の5分野（いずれも旧資源系）を含む工学研究科地球系は，桂キャンパスCクラスターへ移転となり，住所並びに電話番号が以下のように変更になりました．

住所：〒615-8540

京都市西京区京都大学桂Cクラスター

電話番号：

社会基盤工学専攻 ジオフィジクス分野

教　授　芦田　　譲　075-383-3195

助教授　三ヶ田　均　075-383-3196

助　手　真田　佳典　075-383-7476

社会基盤工学専攻 地質工学分野

教　授　松岡　俊文　075-383-3201

助教授　山田　泰広　075-383-3204

助　手　尾西　恭亮　075-383-3205

社会基盤工学専攻 地殻開発工学分野

教　授　石田　　毅　075-383-3209

助教授　村田　澄彦　075-383-3210

社会基盤工学専攻 ジオメカトロニクス分野

教　授　朝倉　俊弘　075-383-3215

助教授　塚田　和彦　075-383-3216

都市社会工学専攻 地殻環境工学講座

教　授　青木　謙治　075-383-3314

助教授　新苗　正和　075-383-3315

助　手　水戸　義忠　075-383-3319

なお，吉田キャンパスからの内線電話は15-○○○○（○○○○は上記電話番号の下4桁）となります．

会　員　通　信　欄

平成18年度水曜会への返信はがきには，会員の方々から多くのお言葉や近況報告を頂きました．ここにその一部を掲載致します．なお，文章を損なわない程度に表現を変えた部分もあることをお断りいたします．

公荘　惟成（採冶，昭13）御陰様でなんとか生きのびています．友人が他界するのでさびしいです．

髙嶋　　宏（採冶，昭15）水曜会大会のご案内ありがとうございました，本年も出席は出来ませんが益々盛大な催しとなることを心から祝福いたします．

成瀬　一郎（採冶，昭16）老齢化のため，歩行困難で無為徒食の不本意の毎日です．諸兄のご健康を祈ります．

久我　正芳（採冶，昭16）2km位散歩が出来る程度です．

柳澤　雅勇（採冶，昭16）独居で頑張っています，娘の居る「ナイロビ」に1月行って来ました．自然の美しさに感動しました．日本の酷寒に参り，避寒の為再度ナイロビ行きを計画しています．

成瀬　光芳（冶金，昭17）病気療養中

河合　　彌（鉱山，昭17）宿痾（肺気腫，病名確定後60年）により気息奄々と生き伸びて居ります．苦しい毎日です．（諸兄のご健勝を祈ります）

久芳　正義（冶金，昭18）御陰様で元気に過ごしております．

斎藤　　康（冶金，昭18）高齢で身体に様々な故障が出て不自由をしています．真摯なリハビリテーションを受けて感謝しています．秋には初曾祖父になります．

三宅　敏夫（冶金，昭18）年齢相応の元気さで毎日過ごしています．同期の友人も故障者多くクラス会もこの二，三年開催していません．現在は柄にもなく俳句にのめり込んでいます．

小平　　博（冶金，昭18）平成17年4月に「ロール・メーキング」なる拙著を自費出版しましたが，ご希望の方に謹呈いたしたく，御しらせ下さい．

菅沼　常生（冶金，昭19）終戦後方向転換したままで56年間教育一筋です．戦時中は飛燕の軸受メタル（ケルメット合金の製造）をやっていました，水曜会には勤務校から卒業生が何名か進学しています．

奥村　昌洋（冶金，昭19）最近は囲碁研究中．

竹内　正勝（鉱山，昭20）いつもお世話になりましてありがとうございます．

西原　　守（冶金，昭20）体調がすぐれず，遠出が出来ませんので欠席します．

山本　剛男（冶金，昭20）今春永年の勤めをやめました．

山本　禎一（冶金，昭20）身体不調にて欠席致します．

佐伯　博蔵（鉱山，昭21）卒業したのは終戦まもない昭和21年9月，最初の任地は原爆のあとの広島でした，多くの友と努力し，日本の復興，発展に一翼を担うことが出来ました．卒後60年，今後はまず健康に気をつけ，趣味などいかしつつ，心ゆたかな人生を送りたいと思います．

武中　俊三（鉱山，昭21）毎日元気に暮らしています．昨年11月，ウラン鉱発見50周年記念式典参加のため20年振りに岡山県人形峠まで出かけました．役目を終了した転換工場や濃縮工場を巡回して，国際社会，特に米国を説得して転換や濃縮技術の開発に邁進していた往時を思い出し感無量のものがありました．

池田　　保（冶金，昭21）次第に仲間が減ってゆくのは残念です．小生何とか元気に過しています．テニスも健康を保つために若い人達についてゆくべく続けています．

野村　　勲（冶金，昭21）無事生活しております．

水田　善博（冶金，昭21）長距離の出席は歩行困難の為残念乍出席出来ません．しかし元気で生活しております．盛会を祈ります．

粟根　司郎（冶金，昭22）脳梗塞で半身不随となり，悪戦苦闘中．

下瀬　高明（冶金，昭22）小生体調すぐれず今後共参加できかねますので以後ご連絡はご無用に願い度く案内一覧より消去をよろしくお願い申し上げます．

水内　　通（冶金，昭22）元気にしております．

三谷　文夫（鉱山，昭23）加齢に伴う若干の故障を抱えていますが，まずは元気で過ごしています．ボケ防止を兼ねて，外歩き，バードウオッチング，パソコン，デジカメ等を楽しんでいます．

山本　和男（鉱山，昭23）何とか元気で地域の高齢者と色々のサークルで楽しく遊んでおります．

岡田　　明（冶金，昭23）82才になり，何とか生きています．昭和23年冶金卒の同窓会「金友会」は毎年開催して盛会です．昨年京大入学60周年記念大会を大津びわこホテルで開催しました．39人入学し，現在28名生存しています．

谷口　利廣（冶金，昭23）相変わらず週3日近所のデイハウスでお年寄りに「デジカメ」「パソコン」の指導をしています．

神保健二郎（鉱山，昭24）おかげ様で元気にしております．科学技術振興機構・情報事業本部の下部機関から石油鉱業関係の外国・国内の技術文献の抄録作成などを行っています．

永野　　啓（鉱山，昭24）足が弱って車椅子生活になってしまいました．

石田　　巖（冶金，昭24）脳疾患がありますが幸い元気にはしております．遠方への一人歩きは避けております．

鹿取　精一（冶金，昭24）一応健康で余生を過ごしております．

鷹取　正六（冶金，昭24）卒業後半世紀以上が過ぎ，80才になってしまいましたが，取り敢えず元気にしています．我々の学生時代から観れば現在の文明，社会通念などはすべて未来そのものです．それでも出来る限り理解したいと思いながら日々を過ごしています．

木村　　茂（鉱山，昭25）都市土木工事用ビット製造に専念しております，死ぬまで現役．

加藤　明徳（冶金，昭25）病気療養中ですので欠席致します．皆様によろしく．

佐光日出海（冶金，昭25）何とか元気で相変らずの日々を送って居ります．

小川　昌平（鉱山，昭26）今のところテニスを続けています．

木村　　治（鉱山，昭26）只今病身です．皆様にどうぞお幸せに．

二宮　　脩（鉱山，昭26）免役の身になって免疫力がおとろえ歩行が困難になって思考力がおとろえました．しかし，与えられた時間はしっかりと守って行く心算りです．水曜会の皆様のご活躍をお祈り致します．

小池　伸吉（冶金，昭26）体調不良により欠席します．

田中　誠一（冶金，昭26）元気に過ごしております．御盛会をお祈りします．

田辺　定男（冶金，昭26）整形外科にリハビリで通っていますがお蔭様で日常生活に支障はありません．

森　　嘉紀（冶金，昭26）まづは元気で毎日を楽しんでいます．83才になりました．

大西　　格（鉱山，昭27）元気です．時々ゴルフをやっております．

中永　久光（鉱山，昭27）幸い元気に，旅行，趣味の会を楽しんでいます．ご盛会を祈っています．

松岡　秀夫（鉱山，昭27）心身ともに老いが目立ってきました．ご盛会をお祈りします．

田中　晃三（冶金，昭27）東京都議会議員を平成17年7月22日に辞任致しました．現在，冷間圧延用多段式圧延機用ロールの製造販売を行っております．

前波　　力（冶金，昭27）喜寿を迎えましたが，地域福祉の仕事は現役並みで元気でこなしています．

笹栗　弘喬（鉱山，昭28）お蔭様で元気でおります．

浅井　浩実（冶金，昭28）喜寿を迎えたが，いまだ枯れず，月一のMGセットを楽しんでいます．

岩田　徳重（冶金，昭28）家内他界のため服喪中です．八十八箇寺等巡拝の旅に参加しております．

西村　義雄（冶金，昭28）白内障が進行して来たので，そろそろ手術をしなければと思っています．緑内障も併発しているので，点眼薬で抑えており，何とも不便なことです．

川島　喜一（冶金，昭29）現在毎週火，木，土の3日は人口透析を受けていますので出席が困難です．なお，昭和29年冶金科卒のメンバーで「にくまれ会」を結成し毎月29日に「代々木クラブ」（新日鉄）で会合を持っています．

菅野　　齋（冶金，昭29）気楽な勤務で余生を楽しんでいます．

田中　　功（冶金，昭29）まずは元気にしております．同期会を嵐山で開催しますので桂キャンパス見学を楽しみにしています．ご盛会を祈念いたします．

福田　龍二（冶金，昭29）お陰さまにて元気に過ごしております．

松岡　英夫（冶金，昭29）良く生きることを心掛けて毎日を暮らしています．御盛会を祈っています．

三浦　　精（冶金，昭29）平成17年3月崇城大学を定年退職し非常勤講師としてつづいて勤務して居りますが来年度は京都の自宅へ引揚げる予定にして居ります．

渡辺　洋一（冶金，昭29）体調不良のため歩行困難，欠席します．

佐藤　史郎（冶金，昭30）アルミ圧延業，神鋼業に関する調査を続けています．最近のチタン産業の盛況をみるにつけ，53年前（学部2回生）に進路に迷っていた時のことを思い出しています．

西山　幸夫（冶金，昭30）毎朝約5kmウオーキング，テレビゲーム将棋（毎日）

江藤　隆義（冶金，昭31）明石市・神戸学院大学関連の仕事を元気に続けています．

武智　　弘（冶金，昭31）福岡工業大学の理事・評議員と東京に於いて技術コンサルティング事務所を開いて居ります．

長澤　元夫（冶金，昭31）6月7日，8日と同期の水曜会卒業後50年の会で東北地方を旅行そのあとも2～3日東北におります．

野村　悦二（冶金，昭31）今年は卒業50周年を迎え，

学友と楽しいひと時をもつ事ができました．また昨年は，非鉄技術の発表の機会を与えられ，緊張したひと時をすごさせていただきました，元気で過ごしています．

弘田　昇（冶金，昭31）盛会でありますことを祈ります．

田村　敬二（冶金，昭32）世田谷区で卓球連盟参事としてラケットを振り廻しています．

本間　良治（鉱山，昭33）10年1日の如く相変わらずこつこつと物作りにはげんでいます．

里見　祥明（冶金，昭33）お蔭様で元気で快適さをモットーに過ごしております．欲張らず，頑張らず，自然に学ぶことを大切にしたいものです．

松本　善文（冶金，昭33）元気です，在京の同期諸君と時々顔を合わせ旧交を暖めています．

児玉　幸夫（鉱山，昭34）73才になっても若い女がすきだ，近況は若い人のをのせてください．

明田　莞（冶金，昭34）現役で頑張っています．

熱田　善男（冶金，昭34）元気です．約70名の孫たちに算数を教えています．

西田　米治（鉱山，昭35）構想・実行・吟味．相対的に吟味不足のため，自分中心になったり独りよがりになりやすい．なかなか素直になれないでいます．

柳沢　恒雄（鉱山，昭35）「秋田県鉱山誌」の第3版の石油編に私は3年要しましたが発行になりました．県内157鉱山4精錬所，47油田19製油所，4地熱発電所の個別史を主に概要・統計等708頁．問い合わせ先秋田県資源エネルギー課（電018-860-2281）今は楽々しています．

朝木善次郎（冶金，昭35）盛会をお祈り致します

植田　義（鉱山，昭36）なんとか元気にしています．

佐藤　健（鉱山，昭36）2006年6月に全国生コンクリート工業組合連合会（常務理事）を引退し，現在はフリーでボランタリー活動中です．

赤井　愼一（冶金，昭36）車にのらず冷暖房も出来るだけスイッチを入れず，自然のリズムに合わせてエコライフを心がけています．体重も新婚時代のそれに戻り，幸い元気です．

石原　和雄（冶金，昭36）旅行予定のため欠席いたします．

岩崎　滋（冶金，昭36）会社経営13年，相変わらずです．

恩田　怜（冶金，昭36）盛会を祈念します．

山本　隆造（冶金，昭36）9年前に帰省後自治会・地区コミセン・ボランティア協会等で大童です．この3～4月は合併後の会合編成で一寸時間が取れません．来年度は自治会から身を引くつもりですが知的障害者施設後援を仰せつかりそうです．

井出　謙三（鉱山，昭37）昨年末膀胱ガンの手術の為入院しました，現在治療も完了し元気に過ごしています．

秦　瑛（冶金，昭37）昨秋，久し振りに南東ドイツを娘と旅して「ノイシュバンシュタイン城」「ライン河クルーズ」等を楽しんできました．地域自治会の三役勤めも9年目を迎えてますが，相変わらず元気にやっております．

田村　祥（鉱山，昭38）南山教会にて洗礼を受け信仰の道を歩き始めました．第二の人生スタートです．

武藤　明男（資源，昭40）自営の国際医療コンサルタントとして台湾と日本，半々の生活をしています

江村　信之（金属，昭40）ご盛会を祈る．

横山　美泰（資源，昭41）11月末までアフリカ・マラウイに勤務しております．

森　邦彦（冶金，昭41）樹脂加工の会社で，常勤監査役をやっております．

白井　秀明（金属，昭41）創業130年の古い会社ですが，医療・薬業・分析・バイオ分野の器械の販売・技術に務めております．

加藤　雅典（冶金，昭42）本年6月末を以って37年間の会社生活に終止符を打ちました．今後は細やかな社会奉仕と趣味に余生を送りたいと思っています．

野瀬　正照（冶金，昭42）電子回路材料や液晶，有機EL等電子材料関係の事業を担当致して居ります．学生時代習ったことが今頃になって役に立っています．

水野　昭宏（冶金，昭42）2年半の台湾新幹線建設から4月に帰国しました．

岩坂　光富（金属，昭42）この三月末で日本鉱業協会を退任しました．四月からは（財）金属鉱山会の嘱託として機関紙「鉱山」の編集業務に携わっております．

黒木　正純（冶金，昭43）現役として老化防止に努めながらポンプ並びに蒸気タービンの生産に励んでいます．

南　一彦（金属，昭43）盛会をお祈りします．

浅井　達雄（資源，昭44）2006年度，新たに技術経営研究科システム安全専攻を開設，技術経営論，情報セキュリティ管理論を担当することになりました．（兼任）

池田　辰雄（冶金，昭44）三年度に優良企業の仲間入り出来るように組織力作りに力を入れています．母校の躍進を期待しています．（当日は関東にて所用があり欠席します，ご盛会を祈ります．）

棚橋　由彦（資源，昭45）元気にしています．

北川　正男（資源，昭46）ダムを担当，ダム工学会やダム工事総括管理技術者会でダム広報に力を入れています．

中村　元（資源，昭46）秋田に転勤して早一年半になります．新聞やテレビでは日本の景気回復が最近急に言われ出していますが，秋田ではまだそんな実感はありません．雇用創出を望む声を毎日のように耳にします．

土井　育郎（資源，昭47）東京JR神田駅3分ですので，

特許に関係のある人で近くに居る人はぜひ来てください．

郷　　文明（冶金，昭47）御連絡ありがとうございます．大会当日は海外出張予定のためお伺いできず申し訳ありません．相変わらず毎日忙しく仕事をしています．

朝日　　格（冶金，昭48）アルミ板営業をやっています．

川嵜　一博（金属，昭48）鉄鋼材料の高周波熱処理という狭い分野でドップリ浸かっていると，京大はじめ大学でのご研究が益々，高く遠く見えますので，水曜会に参加できず残念です．鉄鋼熱処理研究もまだまだ奥が深く，よろしくご指導をお願いいたします．

加納　雅彦（資源，昭49）ゼネコンとしては新分野の環境関連工事の入手に向けての業務を行っています．

安井　正和（資源，昭49）京セラ㈱の蒲生工場から上記（京セラSLCコンポーネンツ㈱）会社に出向中です．

服部　　寿（冶金，昭49）人材紹介を半導体分野を中心として行っております．景気の向上で，人手不足となっており，忙しくしております．

日下部雅行（金属，昭49）世界規模での建材需要の伸びに支えられて，超繁忙です．新機種投入及び生産性改善支援を世界のキャタピラー工場行っており，6月はヨーロッパに出張します．愛知製鋼の社長の基調講演は残念ですがどなたかメモでもE-mailでも送って下さい．

楠井　　潤（金属，昭51）自動車用メタリック塗料を中心にアルミフレークの開発を担当しています．

井口　義朗（資源，昭52）三次元物理探査船導入のプロジェクトで忙しくしております．

武　幸太郎（金属，昭52）当日，所用があり欠席させていただきます．元気にやっております．

西井　　理（資源，昭53）アルジェリア，ニカラグアでJICAが実施している地震防災プロジェクトに参加しています．

宮脇　新也（金属，昭53）全く相も変わらず神戸の製鉄所で線材・条鋼類の品質管理を担当しています．

北村　公亮（資源，昭55）京大キャンパスの変化には驚かされます．学生の気質はどんなものか，我が子を見ながら考えさせられる今頃です．

道本　龍彦（冶金，昭55）今年から鉛の製錬に加えて超硬合金の担当も兼任になりました．

楠野　春彦（金属，昭57）本人はベルギーに勤めております．

田中　　晶（金属，昭58）NTT未来ねっと研究所に勤務しております．

湊　万寿男（金属，昭58）加古川製鉄所で元気にやっております．長男が高校生，長女が中学生になりました．

梅津　泰久（資源，昭59）現在，米国赴任中の為欠席致します．

竹岡　広信（資源，昭59）畑ちがいではありますが理系のスピリットは保ちつつ頑張っております．

北河　久和（金属，昭59）省エネ社会に貢献すべく電磁鋼板の開発に励んでおります．

土井　健司（冶金，昭60）昨年，18年9ヶ月勤めた新日鉄を退職し，特許翻訳の世界にトラバーユしました．燃料電池，通信関連の明細書翻訳（主に英→日，たまに仏→日）を行っています．

内山　兼治（金属，昭60）ハードディスクドライブ用薄膜ヘッドを製造する旧千曲川第2テクニカルセンターが「浅間テクノ工場」と名称を改め，益々競争力の強い組織へと生まれ変わりました．

森本　　聡（冶金，昭61）いつもご案内ありがとうございます，当日都合が悪く出席できません．

田中　章夫（金属，昭61）Z会数学の作問をしています，おもしろい問題が多いと受講生に好評です．

長谷川玉絵（資源，昭63）オーストラリア　シドニーに平成4年から現在まで滞在中．

燕　　閔民（資源，昭63）会社の合併で名称変更されました．

岡部　　徹（金属，昭63）東大に移って早5年が経ちました．元気にレアルメタルの研究を続けております．

中島　俊明（金属，昭63）相変わらずです．

大屋　昌之（資源，平1）引越したり長女が生まれたりでバタバタです．

植田　雅基（金属，平1）海外勤務中

中森　英行（金属，平1）最近マンホールにもセキュリティ機能を付与する需要が多くなっています．日本の安全神話もなくなって久しいですがこういうところにも波及しております．

山本　健一（金属，平1）開発部門から調達部門に異動になりました．

黒川八寿男（金属，平2）元気でがんばっています．なかなか大学へは顔を出せませんが，時計台をはじめ，京大の施設の変わり様には驚ろかされます．

藤田　修司（金属，平3）みなさんお元気ですか？

山﨑　信彦（資源，平4）アルミニウムにかかわる技術から知的財産権に職を移し2年になります．「技術（＝発明）の本質」を見抜き法律に照らし形あるものにするという仕事に日々奮闘しております．皆様方にもよろしくお伝えください．

木下　健治（資源，平6）今回は参加できず残念です．

石賀　琢也（資源，平7）異分野に就職して，早9年たちましたが，どうにかこうにか元気にやっております．

西　　孝文（資源，平7）平成18年5月1日よりソニー株式会社より2年間の予定で出向となりました．新天地，福岡で新しいイメージセンサーを立ち上げて行きます．

池尻　孝（資源，平10）トヨタ自動車に就職しました．慣れない職種で苦労しているようです．（親）

高瀬　嗣郎（資源，平10）本年度より，勤務先が再びつくば市内になりました．心機一転，頑張りたいと思います．

河副　貴之（物理工，平10）昨年10月29日に結婚しました．

安井　雅人（物理工，平10）昨年よりIEソリューション室に異動しました．モノづくりの奥深さをかんじつつ，まだまだ諸問題が山ほど残されているのだなと感じながら，仕事をしている毎日です．

上山　正樹（物理工，平14）社会人3年目となりましたが，まだまだ不慣れなところが多く，日々忙しくすごしております．

園部　太郎（物理工，平14）4月に結婚，バンコクで新生活がスタートしました．

波多野浩司（地球工，平17）もうすぐ卒業のM2です．よろしくお願いします．

嶋本　敬介（地球工，平17）平成19年度より（財）鉄道総合技術研究所に入社予定です．

鹿子　悟史（物理工，平17）長かった学生生活も終わりに近付き，寂しさを感じます．残り一年弱，悔いの残らないように研究にはげみたいと思います．

磯井　卓哉（地球工，平18）日々，元気に授業・研究を中心に頑張っています．

平成18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		
石田悠人	AVOインバージョンによるフリーガス上のメタンハイドレートの存否の解析	京都大学経営管理大学院
前島裕一	浅層反射法地震探査を用いた鉄塔基礎調査の検討	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
丸本大介	3次元粗密波シミュレーションとその波源特性の解析	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
地質工学分野		
宮川歩夢	付加体の発達過程における透水性の変化に関する研究	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
鳥居健太郎	バーチャルソース法による坑井間波形記録の合成	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
高橋功治	帯水層における残留ガスの挙動に関する実験的研究	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
池田紘幸	格子ボルツマン法を用いた過飽和溶液中の結晶成長シミュレーション	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
田中秀憲	個別要素法を用いた南海トラフ付加体形成における海山の影響に関する研究	京都大学医学部保健学科
地殻開発工学分野		
赤井崇嗣	数値多孔質体モデルを用いた岩石の浸透率テンソル評価	京都大学大学院（修士課程進学）
小畑明広	数値多孔質体モデルを用いた2次元弾性テンソルの評価	京都大学大学院（修士課程進学）
冨井将允	ケーシングセメントに及ぼす超臨界CO_2の影響	京都大学大学院（修士課程進学）
吉國征紀	岩盤の異方性を考慮した露天掘り採掘斜面周辺の3次元応力変形解析	野村證券(株)
ジオメカトロニクス分野		
磯井卓哉	低土被り低固結地山における山岳工法トンネルの耐震性検討	京都大学大学院（修士課程進学）
妹尾尚宜	全磁束法による吊橋ハンガーロープ端末部非破壊評価について	京都大学大学院（修士課程進学）
中野亮	不良地山におけるトンネルの地震時変形挙動	京都大学大学院（修士課程進学）
福間淳史	円筒ガイド波における超音波の入射条件の変位モードへの影響について	京都大学大学院（修士課程進学）
地殻環境工学講座		
栗田雅史	トンネル切羽前方地質の高精度予測システムに関する検討	NTTコミュニケーションズ(株)
清水靖	LPG岩盤タンクにおける岩盤水理特性の評価方法について	京都大学大学院（修士課程進学）
田尾拓也	高圧ガス貯蔵岩盤タンクに対する3次元応力－浸透流連成解析手法の構築	京都大学大学院（修士課程進学）
藤原崇行	粒状体個別要素法による動的グラウト充填機構の検討	京都大学大学院（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		
浅尾祐基	ポーラス銅の圧縮特性に及ぼす気孔率の影響	京都大学大学院（修士課程進学）
木村克也	AZ31マグネシウム合金押出材の引張・圧縮特性における双晶の影響	京都大学大学院（修士課程進学）
小林庸浩	温度上昇による花崗岩中の間隙構造の変化	京都大学大学院（修士課程進学）
住川敢	CO2ハイドレート膜の成長挙動	東京大学大学院（修士課程）
中本圭昭	電析法による微細粒純銅薄膜の作製	京都大学大学院（修士課程進学）
資源エネルギープロセス学分野		
板津正明	チューブハイドロフォーミングにおける圧力振動成形法の有限要素シミュレーション	京都大学大学院（修士課程進学）
伊吹和也	スリットノズルから噴出するシート流の実験及び数値解析	京都大学大学院（修士課程進学）
櫻田優貴	マグネシウム合金の室温から温間への加工性変化	京都大学大学院（修士課程進学）
芝辻悠太	管内脈動上昇流中の固体粒子の非定常挙動	京都大学大学院（修士課程進学）
宇宙資源エネルギー学分野		
稲荷博文	TaN基板上のCuの電析核発生現象に及ぼす重力レベルの影響	京都大学大学院（修士課程進学）
正野由美	微小重力環境下の水電解操作に関する基礎的研究	京都大学大学院（修士課程進学）
福田勝彦	超微粒子のアミン浮選に関する基礎的研究	京都大学大学院（修士課程進学）
宮谷佳孝	光触媒粒子の浮選による分離回収に関する基礎的研究	京都大学大学院（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		
安井利尚	個別要素法を用いた溝による地盤振動減衰効果のシミュレーション	東邦ガス(株)
加覧武志	三次元浅層反射法地震探査と地中レーダを用いた送電線鉄塔基礎のイメージング	東京電力(株)
徳永裕之	分散関係式を用いたP,S波分離とイメージング	国際石油開発(株)
毛利昂彦	電磁波の放射特性を考慮した地中レーダ探査データのイメージング	双日(株)
地質工学分野		
石川慶彦	CO_2圧入による貯留岩試料の比抵抗変化測定とCO_2置換率の推定	四国電力(株)
兼田心	PSInSARデータとモデル実験を用いた新潟県中越地方の地表変状解析	西日本電信電話(株)
堀内悠	流線アプローチを用いた貯留層特性分布のインバージョン	(株)博報堂
南陽輔	メタンハイドレート層弾性波速度モデルの構築及び地震波属性に関する研究	三井住友海上火災保険(株)

氏名	研究論文題目	就職先
地殻開発工学分野		
田中洋行	3次元FEM解析による露天掘り斜面の安定性評価に関する研究	特許庁
谷 健吾	格子ボルツマン法を用いた貯留層岩石の残留流体飽和率評価に関する研究	国際石油開発(株)
地殻環境工学講座		
井上祐輔	動的注入によるグラウト充填機構に関する解析的研究	(株)アサツーディ・ケイ
岡村 武	堆積軟岩の破壊過程におけるAE挙動の評価に関する研究	伊藤忠商事(株)
近藤大介	高圧ガス貯蔵岩盤タンクに対する水封機構の設計システム構築に関する研究	(株)NTTデータ
辰巳剛規	多変量統計解析を用いた岩盤水理モデルの構築法に関する研究	東海旅客鉄道(株)
山本健太	地球統計手法を用いた地下構造物の3次元水理地質モデルの構築に関する研究	中国電力(株)
資源エネルギーシステム学分野		
古田哲晴	Mechanical Properties of AZ31 Mg Alloy Recycled by Solid-state Process (固体リサイクル法により再生されたAZ31 Mg合金の機械的性質)	McKinsey & Company
吉井宗太	Study on Methane Hydrate Reformation after Dissociation by Relsasing Pressure (圧力開放により分解したメタンハイドレートの再生成に関する研究)	三菱重工業(株)
資源エネルギープロセス学分野		
小林啓之	Change in Formability of Magnesium Alloys from Room to Elevated Temperatures	住友電気工業(株)
永谷卓也	Unsteady Motion of Solid Particles in Pulsatile Upward Liquid Flows along a Vertical Pipe	マツダ(株)
堀端裕司	Numerical and Experimental Study of a Free Water Jet Issued from a Slit Nozzle	松下電器産業(株)
丸山寿徳	Finite Element Simulation of Stretch Forming of High-Strength Steel Sheets Combined with Ductile Fracture Criterion	トヨタ自動車(株)
宇宙資源エネルギー学分野		
飯田孝美	Magnetic Field Effects on Water Electrolysis	シャープ(株)
川合俊輔	Numerical Analysis of Ion Transport and Hydrodynamics in Electrochemical Deposition & Dissolution (ECD) of Metal	京都大学大学院 (博士後期課程進学)
羽田圭寛	Photocatalytic Degradation of Surfactants in Aqueous Suspension of Titanium Dioxide	住友ゴム工業(株)
馬島 渉	Three-Phase Interfacial Phenomena in Alkaline Fuel Cell/Water Electrolysis	富士写真フイルム(株)
若月孝夫	Electrodeposition of Metals under Various Gravitational Levels	宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

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		
Bui Thi Thanh Huyen	Hydrocarbon Potential of the Song Hong Basin, Vietnam Insights from Numerical Simulation and Seismic Interpretation	ペトロベトナム (ベトナム国営石油公社)

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				
Bui Thi Thanh Huyen	Hydrocarbon Potential of the Song Hong Basin, Vietnam Insights from Numerical Simulation and Seismic Interpretation	松岡俊文	平成18年3月23日	

博士学位授与者　論文博士

氏　名	研究論文題目	主　査	取得年月日	備　考
ジオフィジクス分野				
中内啓雅	地中レーダによる配管工事用探査システムの開発	芦田譲	平成18年3月23日	京都大学大学院工学研究科修了 平成5年3月
地殻開発工学分野				
伊東佳彦	ダム基礎岩盤における力学特性の総合的評価手法に関する研究	齋藤敏明	平成17年9月26日	昭和59年3月 京都大学大学院理学研究科修士課程修了
小山俊博	大規模地下発電所空洞の時間依存性変形挙動に関する研究	齋藤敏明	平成18年1月23日	昭和53年3月 早稲田大学理工部卒業

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		
上田侑正	巨大ひずみ加工材料の構造と機械特性	京都大学大学院（修士課程進学）
内原武志	FeCu薄膜の相分離を利用した形態制御	京都大学大学院（修士課程進学）
関本英弘	高エネルギーX線回折によるZr基金属ガラスの構造と熱安定性	京都大学大学院（修士課程進学）
中川朋輝	鉛フリーSnZnはんだの銅基板界面に及ぼす添加元素の影響	京都大学大学院（修士課程進学）
表面処理工学分野		
橋本祐助	濃厚ハロゲン化ナトリウム水溶液への塩化第一銅の溶解度	サミー株式会社
渡辺大輔	イオン液体を用いた接触めっきによる電気化学的銅－亜鉛合金皮膜形成	京都大学大学院（修士課程進学）
川上彬	パルス電解法によるニッケル基板表面のNi-Mo合金化	京都大学大学院（修士課程進学）
塩井亮介	酸化チタンの水素還元による金属チタン合金の作製	京都大学大学院（修士課程進学）
稲盛弘毅	ジメチルスルホン浴からのアルミニウム電析に及ぼす電解浴組成の影響	京都大学大学院（修士課程進学）

氏 名	研究論文題目	就職先
プロセス設計学分野		
深澤優哉	EXEFS法を用いたシリコン化合物のX線吸収スペクトルの研究	京都大学大学院（修士課程進学）
松田亘司	有害元素の簡易分析法の研究	京都大学大学院（修士課程進学）
酒井俊文	X線導波路の研究	京都大学大学院（修士課程進学）
佐々木宣治	臭素蛍光X線化学シフトに関する研究	京都大学大学院（修士課程進学）
清水健太	プラズモン発生経路の研究	京都大学大学院（修士課程進学）
マイクロ材料学分野		
植洸太	Cu薄膜中の結晶粒異常成長機構のモデル化	(株)リクルート
笠原大爾	p型GaNの活性化に及ぼす転位密度の影響	京都大学大学院（修士課程進学）
西崎ゆい	SiCパワーデバイス用p, n型オーミック電極同時形成プロセスの開発	京都大学大学院（修士課程進学）
藤田啓一	GaN結晶成長用導電性基板の開発－Si基板上のTiNバッファ層－	京都大学大学院（修士課程進学）
李相陳	TiNバッファ層に成長したGaNにおける結晶欠陥と成長メカニズムの関係	京都大学大学院（修士課程進学）
量子材料学分野		
足立耕作	MgO及びZnOにおける点欠陥形成エネルギーの理論計算	京都大学大学院（修士課程進学）
岡本憲和	$BaCeO_3$における格子間プロトンの形成及び拡散挙動	エムオーテックス(株)
佐々木怜	第一原理計算による水酸アパタイトの結晶構造と点欠陥	京都大学大学院（修士課程進学）
下村育生	Cr添加Ga_2O_3薄膜の磁性	京都大学大学院（修士課程進学）
高橋裕二	PLD法によるMn添加$ZnGa_2O_4$薄膜の合成	東京大学大学院（修士課程）
結晶物性工学分野		
井上暢	Ni基超合金のラフト構造崩壊に伴う結晶方位分布の変化	京都大学大学院（修士課程進学）
工藤智行	p型伝導を示すBa-Ge系クラスレート化合物の作製	京都大学大学院（修士課程進学）
原田俊太	$ReSi_{1.75}$の構造と熱電特性の及ぼすP添加効果	京都大学大学院（修士課程進学）
山口裕司	Nb-NiTi合金の微細組織と水素透過特性	京都大学大学院（修士課程進学）
構造物性学分野		
尾崎祐輔	イオウにおけるレーザー誘起巨大高分子生成と自己秩序化	京都大学大学院（修士課程進学）
成瀬聖	低密度液体セシウムのX線小角散乱実験	京都大学大学院（修士課程進学）
林健太郎	液体Se-Te混合系のX線小角散乱実験	京都大学大学院（修士課程進学）
前田頼宣	巨大磁歪合金$Fe_{50}Co_{50}$の弾性・擬弾性	京都大学大学院（修士課程進学）
松本章史	Pd-Cu-Ni-Pバルク金属ガラスの動的粘弾性	京都大学大学院（修士課程進学）

氏　名	研究論文題目	就職先
材料物理学分野		
奥野良和	ナノ加工によるYBCO薄膜への結晶粒界導入と超伝導特性制御	京都大学大学院（修士課程進学）
川崎啓太	Al-Ca-Si金属間化合物の超伝導特性について	全日本空輸（株）
仲村健一	RABiTS法を用いたYBCO薄膜超伝導線材の作製と評価	京都大学大学院（修士課程進学）
山本裕介	ZrとMnの複合添加が超高強度P/Mアルミニウム合金の微細組織に及ぼす影響	京都大学大学院（修士課程進学）
材質制御学分野		
小木曽裕紀	鉄系マルテンサイトの形態変化に及ぼす諸因子の影響	京都大学大学院（修士課程進学）
桂　翔生	レンズマルテンサイトおよびバタフライマルテンサイトの界面構造	京都大学大学院（修士課程進学）
機能構築学分野		
岡本　剛	ダイヤモンド薄膜表面の分子修飾	東京大学大学院（修士課程）
北島啓子	SPMによるシリコン直接結合型SAMのナノパターニング	住友電気工業（株）
六門直哉	ポリカーボネートのアミノ基修飾	ローム（株）
森口隆広	アミノシラン系自己集積化分子膜の気相成長	京都大学大学院（修士課程進学）
八木良志夫	シリコン直接結合型SAMのVUVデグラデーション	未定
エネルギー社会工学分野		
伊藤亮太	RFスパッタリングで作製したSiC薄膜のNOx吸着分解	京都大学大学院（修士課程進学）
沼田　健	種々のゼオライトによる気体吸着に関する研究	京都大学大学院（修士課程進学）
花田大明	ポリエチレンのメカニカルミリングに関する研究	京都大学大学院（修士課程進学）
原　康祐	Li-CaO系のメカニカルミリングおよび窒素との反応性に関する研究	京都大学大学院（修士課程進学）
材料プロセシング分野		
竹下裕晃	塩化アンモニウムによる電気炉ダスト処理用鉛クーラーにおける亜鉛ドロスの分離	京都大学大学院（修士課程進学）
林　竜也	CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO-Fe_xO系の熱力学	京都大学大学院（修士課程進学）
藤田　彰	溶銑用リンセンサー	京都大学大学院（修士課程進学）
古河直樹	有機系廃棄物の燃焼性	京都大学大学院（修士課程進学）
高温プロセス分野		
石川博之	溶融塩電解によるバナジウムの製造	京都大学大学院（修士課程進学）
加納慶達	酸化物混合体からのTi-Cr-V合金の合成と水素吸蔵特性	京都大学大学院（修士課程進学）
上西隆文	VC分散Fe_2VAl合金を用いた熱電発電	京都大学大学院（修士課程進学）
白坂翔平	流体を用いる熱電発電における出力の時間変化	京都大学大学院（修士課程進学）
鈴木成嘉	添加物使用によるα-$FeSi_2$及びβ-$FeSi_2$の製造方法	ソラン（株）

氏名	研究論文題目	就職先
エレクトロニクス分野		
久野啓志	多層カーボンナノチューブの交流インピーダンス	京都大学大学院(修士課程進学)
堀口和孝	MCBJ-STM 装置の開発	京都大学大学院(修士課程進学)
三浦大輔	高温における Au 単原子接点の生成確率と寿命	京都大学大学院(修士課程進学)
向井康博	Zn 原子サイズ接点の高バイアスコンダクタンス	京都大学大学院(修士課程進学)
材料デザイン分野		
酒井康明	Fe-Pd 系ナノドットの GI-SAXS を用いた構造評価	工学研究科材料工学専攻(修士課程進学)
中島宏	Bi2223/Ag/Ag-Mg 超伝導テープ材の曲げ損傷の不均一性と臨界電流の関係	−
福本武文	PFZ 生成機構のモンテカルロシミュレーションにおける空孔効果の検討	京都大学大学院(修士課程進学)
松本翼	非晶質 SiC 繊維の破壊じん性に及ぼす高温大気暴露による内部構造変化の影響	京都大学大学院(修士課程進学)

修士課程修了者

氏名	研究論文題目	就職先
表面処理工学分野		
今宿晋	金属イオンを含む疎水性イオン液体の諸性質	京都大学大学院(博士後期課程進学)
黒崎良一	イオン液体を用いた銅素地の電気化学的銅－スズ合金化	西日本電信電話(株)
萩原壮一	オートクレーブを用いた CdTe 薄膜の電気化学的形成	同和鉱業(株)
プロセス設計学分野		
武田匡史	マグネシウム合金の水素吸蔵特性に関する研究	日揮(株)
松本諭	XAFS を用いた環境中硫黄の分布及び化学状態分析	日産自動車(株)
三ツ谷翔太	焦電式 X 線源による X 線吸収分光	アーサー・D・リトル(ジャパン)(株)
マイクロ材料学分野		
大西利武	p, n 型 SiC 半導体に対するオーミックコンタクト材の同時形成とその解析	本田技研工業(株)
可部達也	自己組織化バリア材形成を利用した Si-ULSI 向け新規 Cu 配線作製プロセスの開発	松下電器産業(株)
浜口達史	Sb 化合物半導体を用いた p 型 GaN に対するオーミックコンタクト形成に関する研究	日亜化学工業(株)
量子材料学分野		
宇杉健一	第一原理格子動力学計算によるシリコン中の熱平衡欠陥の定量的評価	(株)日立グローバルテクノロジーズ
二宮健生	Theoretical Analysis for the Formation and Diffusion of Point Defects in Proton-conductive Perovskite Oxides	松下電器産業(株)

氏　名	研究論文題目	就職先
結晶物性工学分野		
寺田英司	Alを添加した$ReSi_{1.75}$基シリサイドの欠陥構造と熱電特性	トヨタ自動車(株)
藤尾論志	電子回折による対掌性，極性識別法の開発と有機結晶への応用	関西電力(株)
和田直之	$LiCoO_2$正極のサイクル特性に及ぼす(Li, La) TiO_3固体電解質表面状態の影響	松下電器産業(株)
構造物性学分野		
石本学	巨大磁歪Fe-Ga固溶体合金の弾性および擬弾性	トヨタ自動車(株)
丹羽創	低密度アルカリ金属液体の局所構造とゆらぎ	トヨタ自動車(株)
北條美穂	Zr-Al-Ni-Cu金属ガラスの動的粘弾性と構造変化過程	シャープ(株)
材料物理学分野		
小川哲平	内部酸化によりMgOバリア層を導入した低交流損失(Bi, Pb)2223超伝導テープ線材の開発	富士写真フイルム(株)
高原大樹	微細組織制御した$GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$薄膜の磁場中超伝導特性	丸紅(株)
名古秀徳	3D-APを用いたMesoalite合金中の準安定析出物の研究	(株)神戸製鋼所
材質制御学分野		
富尾悠索	β型チタン合金の超弾性特性に及ぼす冷却速度の影響	東北大学大学院(博士後期課程)
溝谷健太郎	極低炭素鋼オーステナイト系ステンレス鋼の時効析出挙動	(株)ブリヂストン
山口拓人	低炭素鋼の変態組織におよぼすNb添加の影響	東海旅客鉄道(株)
機能構築学分野		
佐野光	水素終端化シリコン基板上への1-ヘキサデシルSAM形成	京都大学大学院(博士後期課程進学)
多治見直雅	シリコン(111)表面上へのフェロセン誘導体分子の固定化	三井物産(株)
米澤裕之	カルボン酸－Zr(IV)系自己集積化多層膜	富士写真フイルム(株)
エネルギー社会工学分野		
入江耕平	Al-Li系およびCu-Li系合金のメカニカルアロイングとその窒素吸収特性	中外炉工業(株)
梅田紗野香	旅客機のタキシングにおける環境負荷物質排出量の解析	(株)日立製作所
川瀬修重	貿易依存度における時系列変動量の周期変動に関する研究	レンゴー(株)
久保文枝	Fe-Li系のメカニカルアロイングによるLiの微細化及び固溶体形成に関する研究	松下電器産業(株)
寶達宏美	水・エネルギー利用から見たライフスタイルの変化に関する研究	家事手伝
諸富芳徳	各種統計を用いた照明用電力消費量の解析	ゴールドマン・サックス証券会社
材料プロセシング分野		
池村亮吉	燃焼ガス併産型有機系廃棄物処理法	丸紅(株)
中嶋剛司	$CeCl_3$-KCl系溶融塩からのCeの除去	新日本製鐵(株)
平野慎一郎	CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO-Fe_xO系の熱力学	住友金属工業(株)
松田樹人	廃棄物利用，H_2・COガス併産型CO_2レス製鉄法	JFEスチール(株)

氏名	研究論文題目	就職先
高温プロセス分野		
有井一哉	珪酸塩電解質を用いた起電力法による金属シリサイドの標準生成自由エネルギー測定	(株)豊田自動織機
松岡良憲	酸化物混合体のCa共還元法によるT-Cr-V三元系合金粉末の合成	(株)神戸製鋼所
丸岡龍也	金属系材料の熱電特性と熱電発電システム設計	トヨタ自動車(株)
量子エネルギープロセス分野		
上利祐嗣	希土類メタリン酸塩を母体とした新規中高温型プロトン伝導体の開発	日鉱金属(株)
井村大介	固体高分子型燃料電池触媒PtRu/Cの調製法と調製条件がもたらす粒子径·分散·担持量等への影響に関する研究	日本写真印刷(株)
須崎孝一	Sc_2O_3またはIn_2O_3添加イットリア安定化ジルコニアにおける時効に伴う導電率の変化と局在構造の関係	三宝伸銅工業(株)
エレクトロニクス分野		
鈴木良	金単原子接点の寿命分布とそのバイアス依存性	キヤノン(株)
高元美紗子	TiO_2(110)表面欠陥のバリアハイトイメージング	プロクター・アンド・ギャンブル・ジャパン(株)
中野貴博	STMによる電極近傍のポテンシャル計測	シャープ(株)
材料デザイン分野		
岩本壮平	有限要素法によるGA鋼板コーティング層の多重破断・はく離解析	京都大学大学院(博士後期課程進学)
村瀬功	X線異常小角散乱法によるZr基金属ガラスの微細組織の検討	石川島播磨重工業(株)
六角広介	Bi2223超伝導フィラメントの破壊挙動とその臨界電流に及ぼす影響のモンテカルロ・シェアラグシミュレーション	東邦チタニウム(株)

博士後期課程修了者

氏名	研究論文題目	就職先
表面処理工学分野		
荒井健太郎	Electrochemistry of CdTe Layers in Ammoniacal Basic Aqueous Electrolytes	同和鉱業(株)
片瀬琢磨	Properties of Aliphatic Quaternary Ammonium Imide Type Ionic Liquid and Its Application to Metal Electrodeposition	三菱マテリアル(株)
量子材料学分野		
国須正洋	Structure and Function of Solute Atoms in ZnO	東レ(株)
藤平哲也	Phonon and Related Properties of Double Oxides by First Principles Calculations	日本学術振興会特別研究員(PD)
結晶物性工学分野		
岡本範彦	Ba-Ga-Ge系クラスレート化合物の結晶構造と熱電変換特性の相関	日本学術振興会特別研究員PD(大阪大学大学院／米国カリフォルニア大学デイビス校)
林泰輔	Mo基5-3シリサイド単結晶の高温材料としての基礎物性	日本学術振興会海外特別研究員(米国オハイオ州立大学)

氏 名	研 究 論 文 題 目	就 職 先
材料物理学分野		
小 川 一 啓	Correlation between Microscopic Inhomogeneities and Macroscopic Current Transport Properties of Ag/Bi2223 Tapes（Ag/Bi2223 テープ材の微視的不均一性と巨視的電流輸送特性の相関）	駒場東邦中高等学校
亀 谷 文 健	Phase Formation in Ag-sheathed (Bi, Pb) 2223 Tapes（銀シース (Bi, Pb) 2223 テープ内における相形成）	ウィスコンシン大学
材質制御学分野		
宮 本 吾 郎	鉄合金における炭窒化物析出の kinetics および結晶学に関する研究	学振特別研究員（京都大学）
エレクトロニクス分野		
筒 井 真 楠	Study of Electron Transport in Atomic and Molecular Conductors using MCBJ Technique	日本学術振興会特別研究員 PD（大阪大学）

博士学位授与者 課程博士

氏 名	研 究 論 文 題 目	主 査	取得年月日	備 考
表面処理工学分野				
荒 井 健 太 郎	Electrochemistry of CdTe Layers in Ammoniacal Basic Aqueous Electrolytes	粟 倉 泰 弘	平成18年 3 月23日	
片 瀬 琢 磨	Properties of Aliphatic Quaternary Ammonium Imide Type Ionic Liquid and Its Application to Metal Electrodeposition	粟 倉 泰 弘	平成18年 5 月23日	
量子材料学分野				
国 須 正 洋	Structure and Function of Solute Atoms in ZnO	田 中 功	平成18年 3 月23日	
藤 平 哲 也	Phonon and Related Properties of Double Oxides by First Principles Calculations	田 中 功	平成18年 3 月23日	
結晶物性工学分野				
岡 本 範 彦	Ba-Ga-Ge 系クラスレート化合物の結晶構造と熱電変換特性の相関	乾 晴 行	平成18年 3 月23日	
林 泰 輔	Mo 基 5-3 シリサイド単結晶の高温材料としての基礎物性	乾 晴 行	平成18年 3 月23日	
材料物理学分野				
小 川 一 啓	Correlation between Microscopic Inhomogeneities and Macroscopic Current Transport Properties of Ag/Bi2223 Tapes（Ag/Bi2223 テープ材の微視的不均一性と巨視的電流輸送特性の相関）	長 村 光 造	平成18年 3 月23日	
亀 谷 文 健	Phase Formation in Ag-sheathed (Bi, Pb) 2223 Tapes（銀シース (Bi, Pb) 2223 テープ内における相形成）	長 村 光 造	平成18年 3 月23日	
材質制御学分野				
宮 本 吾 郎	鉄合金における炭窒化物析出の kinetics および結晶学に関する研究	牧 正 志	平成18年 3 月23日	
エレクトロニクス分野				
筒 井 真 楠	Study of Electron Transport in Atomic and Molecular Conductors using MCBJ Technique	酒 井 明	平成18年 3 月23日	

博士学位授与者　論文博士

氏　名	研究論文題目	主　査	取得年月日	備　考
表面処理工学分野				
品川　勉	Studies on ZnO based Magnetic Semiconductor Films Prepared By Soft Solution Processes	粟倉泰弘	平成18年3月23日	大阪市立工業研究所
材料物理学分野				
佐藤謙一	ビスマス系超電導線と応用製品開発の研究	長村光造	平成18年3月23日	京都大学理学部1971年卒
材質制御学分野				
種池正樹	高Crフェライト系耐熱鋼の析出強化機構とクリープ強度向上に関する研究	牧　正志	平成17年11月24日	京都大学大学院工学研究科材料工学専攻修士課程平成9年3月修了

水曜会誌卒業年次幹事制について

水曜会では，下記のような付則にもとづき卒業年次幹事を委嘱しております．年次幹事には卒業の年次ごとに金属系，資源系より各１名の年次幹事を定め，各系同年次会員の連絡先の掌握や同年次会員を代表して水曜会運営へのご協力をお願いすることになります．年次幹事にご就任頂く会員の方々には，水曜会の活動をより充実したものとするため，何卒ご協力の程お願いいたします．

水曜会年次幹事に関する付則

（目　　的）

第１条　水曜会の円滑な運営のため年次幹事を定め，水曜会会長は次の任務を依頼する．

1. 同年次会員の連絡先の掌握，
2. 同年次会員を代表して水曜会運営への協力

（定　　員）

第２条　年次幹事を各卒業年次ごとに旧資源系（鉱山）１名，旧金属系（冶金）１名を定めるものとする．

（任　　期）

第３条　任期は２年とし，重任は妨げないものとする．

（委　　嘱）

第４条　年次幹事の選任は，同年次会員の推薦により会長が委嘱するものとする．

この付則は平成15年６月14日より施行する．

逝　去　会　員

平成17年５月	清水　　正	昭21・鉱
平成17年６月25日	村田　　信	昭16・冶
平成17年７月３日	上山　勝美	昭22・冶
平成17年11月11日	広瀬　輝夫	昭16・採
平成17年11月10日	吉村　　博	昭19・冶
平成18年４月10日	大森　照夫	昭17・鉱
平成17年５月	駒屋　謙二	昭15・採
平成18年３月５日	鈴木　公明	昭40・金
平成18年５月27日	向井　　滋	昭12・採
平成18年７月20日	斉藤　研二	昭48・資
平成18年６月11日	加藤　高尚	昭16・採
平成18年３月24日	足立　正雄	昭17・冶
平成17年６月25日	小柳　一吉	昭18・鉱
平成17年10月	佐藤　隆介	昭34・鉱
平成17年12月９日	山本　勝司	昭22・冶
平成17年６月12日	多田猶三郎	昭14・採
平成17年７月27日	村上　　薫	昭20・冶
平成18年２月21日	町田　　朗	昭28・冶
平成18年２月２日	神島　豊一	昭22・鉱
平成17年12月27日	手塚　光明	昭21・鉱
平成17年８月17日	中尾　勁三	昭18・鉱
平成18年２月19日	福島　愛彦	昭21・鉱
平成18年７月７日	松原　正和	昭28・鉱
平成18年９月２日	梶谷弥寿男	昭17・冶

教　室　報　告

教員人事

＜旧資源系＞

平成18年３月31日	齋藤　敏明	定年退職
平成18年３月31日	菅野　　強	辞職
平成18年３月31日	李　　令琦	辞職（転任）
平成18年４月１日	三ヶ田　均	助教授に昇任
平成18年６月１日	石田　　毅	教授に採用
平成18年７月１日	福中　康博	教授に昇任

＜旧金属系＞

平成18年２月１日	冨井　洋一	教授に昇任
平成18年２月28日	鈴木　亮輔	辞職（転任）
平成18年３月31日	長村　光造	定年退職
平成18年３月31日	平藤　哲司	辞職（転任）
平成18年４月30日	石井　秀司	辞職
平成18年４月30日	李　　庚晃	辞職
平成18年８月１日	市坪　　哲	助教授に昇任
平成18年８月１日	宇田　哲也	助教授に昇任
平成18年９月１日	一井　　崇	助手に採用
平成18年10月１日	山本　　孝	助手に採用

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．

平成18年度水曜会誌編集委員

委員長	松原英一郎			
幹事	邑瀬邦明（会誌）	藤本　仁（広告）		
委員	朝倉俊弘	田邊晃生	松永克之	澁江和宏
	久保田耕平	平藤哲司	廣内鐵也	安田　健
	朝日　格	中内啓雅	兼田　心	酒井俊英
	石田尚之	中山雅博	福本　学	

平成18年10月25日　印刷　　平成18年10月30日　発行

編集兼発行者　冨井洋一

印刷者　小林生男

日本印刷出版株式会社

553-0006　大阪市福島区吉野1丁目2番7号
電話　大阪（6441）6594（代）
FAX　大阪（6443）5815

発行所　京都大学工学部　水曜会

606-8501　京都市左京区吉田本町

振替口座　京都 01090-8-26568 電話 (075) 753-5930
銀行口座　みずほ銀行出町支店
普通 587-1242526　水曜会

水曜会誌投稿規定（昭和62年4月23日改訂）

1．投稿要領

(1) 投稿原稿の著者（連名の場合は1名以上）は水曜会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致しております．

投稿原稿は．論文，報告，総説，講座，資料，各種記事（談話室，会員消息，会員の声，会員通信欄など）に分類されております．投稿方法につきましては投稿規定をご参照ください．

(1) 論文：他の刊行物に未発表のもので，独創性をもつ著者の基礎研究または応用研究の成果，技術の開発改良などを内容とするものを対象としております．

(2) 報告：現場の操業報告などに類するもので，学術的に価値があると認められるものを対象としております．

(3) 総説：特定の問題について普遍的に広い視野から解説し，その推移を知るうえに役立つものを対象としております．

(4) 講座：特定の問題について掘り下げて解説し，会員の啓蒙，再教育に役立つものを対象としております．

(5) 資料：学問的あるいは技術的に価値のある内容を含み，会員の参考資料として役立つものを対象としております．

(6) 談話室：会員の皆様の近況や展望など幅広い内容記事を紹介する「談話室」を設けております．「談話室」は，会員各位の意見・情報交換の場としてご利用頂くことを目的としたものです．次のようなものを対象にしております．

○第一線で活躍中の会員の幅広い展望・随想
○各企業の研究所の紹介（特殊機器や意外な研究内容など）
○研究についてのトピックス（形式は問わない）
○国際会議や海外出張の紹介・こぼれ話
○種々の分野でご活躍の会員の特異な体験記事
○新教官の自己紹介や抱負など
○水曜会の活動における歴史的こぼれ話

(7) 会員の声：会員の皆様の幅広い意見・提言を募集する「会員の声」を設けております．

(8) 会員通信欄：水曜会大会返信葉書の通信欄を始め様々な形で寄せられておりますお便りを掲載致しております．

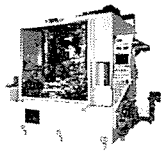
(9) その他：(6)〜(8)の何れかに区分させて頂くことになると思いますが，“同窓会誌”的な肩の凝らない気楽な記事（…の思い出，…の頃，等々）についても，“学会誌”としての体裁維持も念頭におきながら，積極的に掲載したいと存じます．

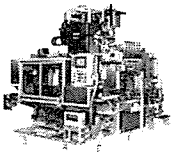
また，このほかに取り上げるべき企画や記事などご提案がございましたら編集委員会までお知らせ下さい．

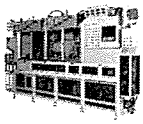
ネツレン　誘導加熱のパイオニア

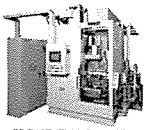
各種高周波焼入・焼戻装置

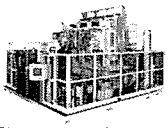
ネツレンは、創業以来50余年誘導加熱のパイオニアとして常に最先端技術の研究・開発に力を注いでまいりました。これからも顧客のニーズに対応した小型・省エネ・高信頼性で生産性の高い高周波焼入装置を提供してまいります。

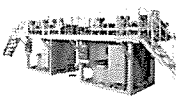

等速ジョイント焼入焼戻装置

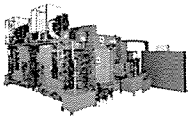

ドライブシャフト焼入焼戻装置


カムシャフト焼入焼戻装置


盤型汎用焼入装置


大型シュー/レース/ギア焼入装置


チェーン焼入焼戻装置


クランクシャフト焼入焼戻装置

NETUREN　http://www.k-neturen.co.jp

ネツレン
高周波熱錬株式会社

●本　社　〒141-8639　東京都品川区東五反田2-17-1 オーバルコート大崎マークウエスト　TEL 03(3443)5441　FAX 03(3449)3969
●営業部　〒254-0013　神奈川県平塚市田村七丁目4番10号　TEL 0463(55)1552　FAX 0463(55)4238
●名古屋営業所　〒470-1101　愛知県豊明市沓掛町八幡前77-41　TEL 0562(92)8338　FAX 0562(92)8666

NLM
日本軽金属株式会社
〒140-8628 東京都品川区東品川2-2-20 天王洲郵船ビル
TEL.03-5461-9333 URL http://www.nikkeikin.co.jp

ほら、未来が見えてきた。



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

October 2006

CODEN : SUIYAA
Vol. XXIII, No. 9

Suiyōkwai-Shi

TRANSACTIONS OF THE MINING AND METALLURGICAL ASSOCIATION
KYOTO

CONTENTS

Retirement Memorial Lectures

Dynamics of Phase Decomposition ····· Kozo OSAMURA ····· 981

Memorial Lecture in the Annal Meeting of Suiyokwai

Automotive Industry and Specialty Steel ····· Akiyoshi MORITA ····· 989

Role of Resources Development for Recycle Based Society ····· Michio KURIYAGAWA ····· 996

Lecture

Progress in Metal Science and Its Research Technology
—Look Back upon My Research Life [V] ····· Yotaro MURAKAMI ····· 1007

Forum

Memories of Yubari ····· Takahisa KATO ····· 1015

Dr. William Smith Clark before and after in Japan ····· Yoshio ATSUTA ····· 1022

Stress Measurements and Acoustic Emission Monitoring in Rock ····· Tsuyoshi ISHIDA ····· 1028

Theoretical study of atomic structures and bonding
at metal/oxide interfaces ····· Katsuyuki MATSUNAGA ····· 1032

Influence of Microstructures of the $LiCoO_2$ Cathode /
$La_{2/3-x}Li_{3x}TiO_3$ Solid Electrolyte interface on the Electrochemical
Properties of All Solid-State Lithium Secondary Batteries ····· Kyosuke KISHIDA ····· 1037

Essay on California Institute of Technology ····· Tetsuya UDA ····· 1041

My Previous Studies and Future Works ····· Tetsu ICHITSUBO ····· 1047

Current Studies in Laboratories ····· 1052

Suiyokwai Information ····· 1076

Letters to Editor ····· 1090

Kyoto University

Japan