

# 水曜會誌

第 22 卷 第 1 号

## 目 次

### 大会記念講演

- 一貫製鉄所の運営の現状……………杉田 宏………… 1  
わが国の工学系高等教育について……………小門 純一………… 9

### 総 説

- 走査トンネル顕微鏡 (STM) による表面・界面の微視的研究……………長谷川幸雄………… 13  
高分解能電子顕微鏡で見たナノ・スペース……………奥 健夫………… 20

### 談 話 室

- 金属系教室若手研究会……………西谷 滋人………… 29  
「第 10 回 固体の内部摩擦と超音波吸収に関する国際会議」に参加して……………沼倉 宏………… 31

### 会 報

- …………… 34

### 会 員 消 息

- …………… 36

平成 5 年 12 月 20 日 発行

## 京 都 大 学

工学部 資源工学教室

冶金学教室

金属加工学教室

水 曜 会

### 一般写真部門

- ▶ カメラ・ビデオ・視聴覚機器販売
- ▶ カラープリント
- ▶ モノクロ写真
- ▶ ビデオ編集コピー

### I M 部門

- ▶ マイクロフィルムシステム
- ▶ 電子ファイルシステム

### コピー・印刷部門

- ▶ カラーコピーサービス
- ▶ 印刷
- ▶ 製本

### 特殊撮影部門

- ▶ 古文書マイクログ
- ▶ 貴重重文資料撮影
- ▶ スタジオ撮影
- ▶ 大型出張記念撮影

### プレゼンテーション部門

- ▶ 学会発表用スライド
- ▶ 医学用スライド
- ▶ OHP
- ▶ コンピュータースライド
- ▶ パネル製作ポスター



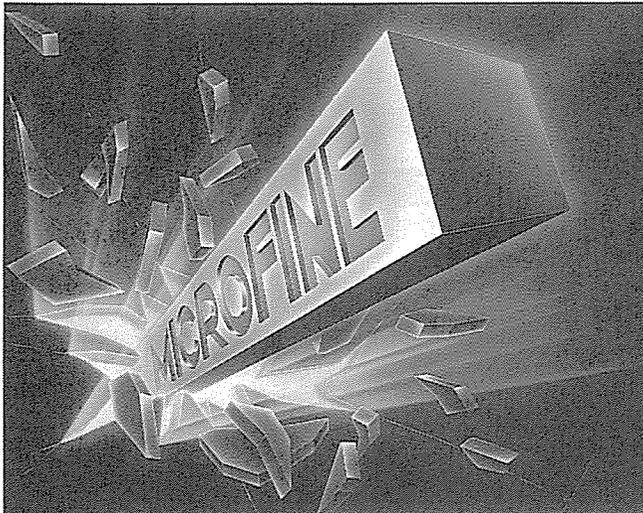
株式会社

光楽堂

本店

〒606 京都市左京区北白川西町82  
TEL (075) 711-2131  
FAX (075) 721-1558

## 新しい何かが誕生する。



技術革新の波のなか、これまでの常識を打ち破るより高度な素材が、次々に生まれてきます。時代に先進した製品を産業界に送り出し続ける…。日本高周波鋼業は、これからもしっかりと未来を支え続けてまいります。

### 概要

設立 昭和25年5月(創業昭和11年1月)  
資本金 88億5,000万円  
従業員数 1,200名  
上場 東証、大証一部上場

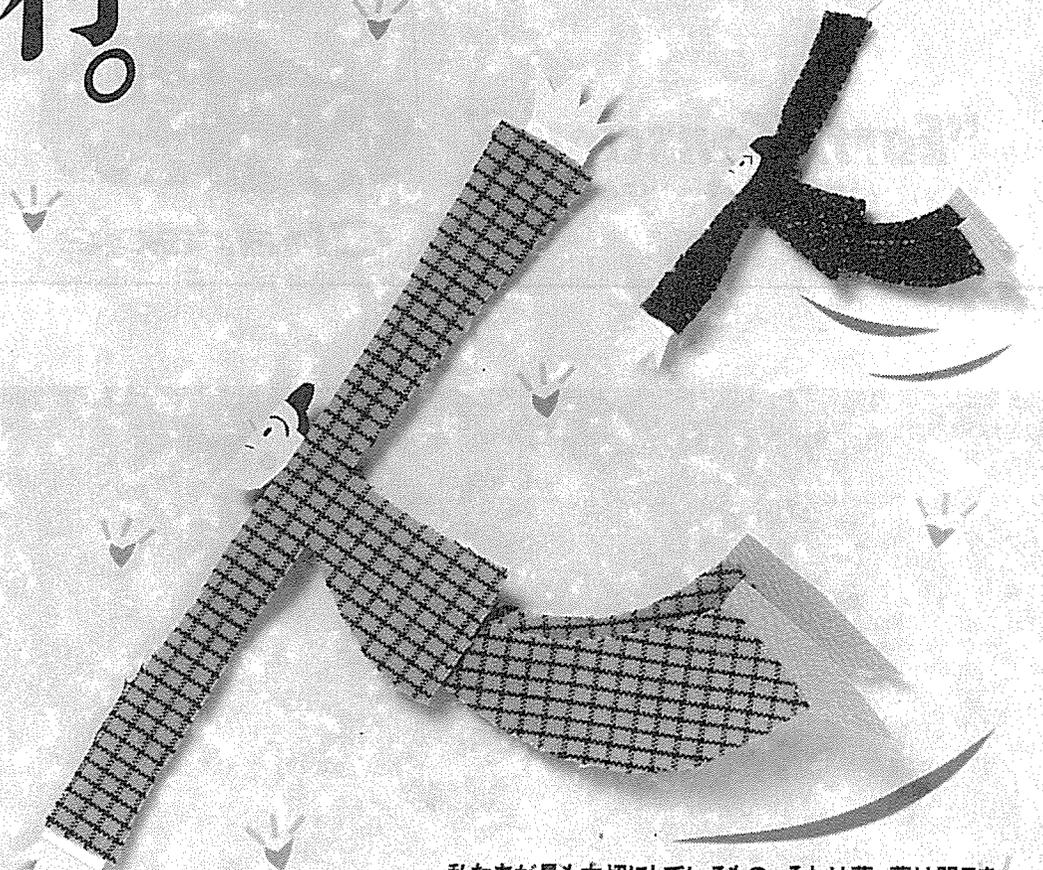


日本高周波鋼業株式会社

本社 〒100 東京都千代田区大手町1丁目7番2号(サンケイビル別館) ☎東 京03(3231)6771(代)  
大阪支社 〒530 大阪府北区西天満2丁目6番8号(堂ビル) ☎大 阪06(364)1661(代)

# 夢飛行。

NIPPON STEEL  
新日本製鐵株式會社



私たちが最も大切にしているもの、それは夢。夢は明日を想像する源、そして今日を創る情熱。新日鐵は、常にそんな夢を集め、大いなる創造力と限らない努力で数々の夢を突らせてきました。いま、その一つ一つは、ニュースチール開発、新素材、エレクトロニクス・情報通信、バイオテクノロジー、レジャー産業といった、さまざまな分野で大きく花開いています。こういった実績とノウハウを基にこれからも新日鐵は、さらに新しい夢を描き未来に向かってチャレンジし続けます。



ワールドミニで未来を創る!

●スピードは控えめに、シートベルトはしっかりと。

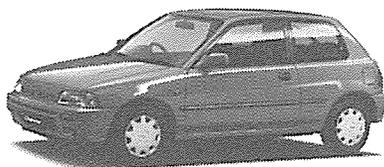
ダイハツ工業株式会社

# ワールドミニで 未来を創る。

'90年代はエコノミーからエコロジーへ。  
クルマも人と社会と環境との調和が大きなテーマになっています。  
21世紀へ向けて、ダイハツは地球やエネルギーや社会を考えたクルマづくりを目指したいと思います。  
小さなクルマをきちんとつくるダイハツです。

## "Earth Conscious"

人と地球にやさしいワールド・ミニ。



## Charade

興味津々  
メタルミステリー



金属に触れ 金属を愛する…… そんなおつきあいで  
まもなく90年になるうとしています。でも  
金属にはまだまだ秘密がいっぱい…… いつかきも目が離せません。  
金属の神秘にとりつかれて わたしたちの情熱も  
とどまることはないので。

日鉱金属株式会社

〒105 東京都港区虎ノ門2-10-1 電話03-5573-7200(案内)

日鉱金属は、日本鉱業の金属資源開発・金属製錬・金属加工の各事業を譲り受け、11月1日、営業を開始いたしました。

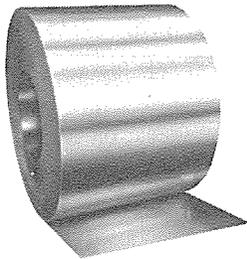
## 技術のヨドコウが 今技術とセンスのヨドコウを 目指しています。

製品評価のマトリックスに「美意識」の一項目を加える。  
つまり鋼板製造技術のセンスです。  
印刷文化のありようにも目を配る、つまり製紙ロール製造技術のセンスです。  
生活を見つめる建材やエクステリアではなおさらのこと。  
時代は今、センシブルな新しい技術を求めています。

### 主な事業内容

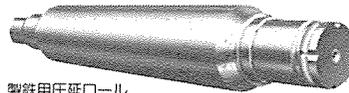
#### 鋼板

- 家電・AV機器用PCM鋼板
- ガルバリウム鋼板
- カラー鋼板
- 帯鋼

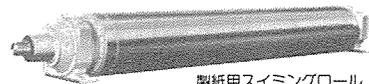


#### ロール

- 製鉄用圧延ロール
- 製紙用スィミングロール



製鉄用圧延ロール

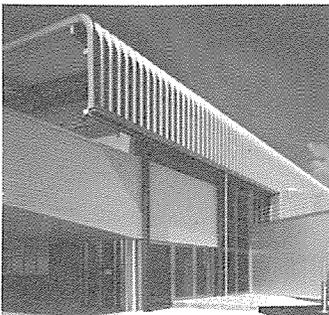


製紙用スィミングロール

#### 建材

##### ■ 建築材料

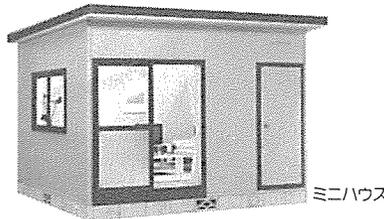
- 鋼板製屋根材
- 鋼板製サイディング材



ルーフ

##### ■ エクステリア

- 物置
- ミニハウス
- ガレージ



ミニハウス



連棟カーポート

##### ■ 家庭用品

- 各種収納用品



キッチンシステ

● ビレット ● グレーチング ● 鋼板製屋根壁材施工 ● 鋼板製造加工エンジニアリング ● 西脇カントリークラブ ● ホテルプラザ宮崎

ものには技術 人にはこころ

## 淀川製鋼

本 社 大阪市中央区南本町4丁目1番1号 〒541 ☎(06)245-1111  
東京支社 東京都中央区新富1丁目3番地7号(ヨドコウビル) 〒104 ☎(03)3551-1171  
工 場 市川 ☎(0473)28-1231/福井 ☎(0776)82-2021/大阪 ☎(06)472-1251/泉大津 ☎(0725)32-5681/呉 ☎(0823)25-1111

# 絶え間のなしく研究と開発

## 鋼線部門

スタバライズドワイヤ及びストランド  
Low Relaxation

PC鋼線  
PC鋼より線  
PC鋼棒  
裸鋼線  
ピアノ線  
めっき鋼線  
被覆鋼線  
ビードワイヤ  
オイルテンパー線  
鋼線加工品

## ロープ部門

ユニロープ  
ユニバランスロープ  
産業機械用  
非自転性ロープ

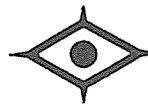
一般ロープ  
特殊ロープ  
鋼より線  
ワイヤロープ加工品

## 特殊線部門

高級バネ用線  
SWICシリーズ  
ステンレス鋼線  
ステンレスロープ  
ステンレス鋼線加工品  
チタン線  
その他特殊金属線

## エンジニアリング部門他

HiAm  
アンカーケーブル  
耐疲労性斜張橋用ケーブル  
イエティ スノーネット  
アンボンド工法  
架設・緊張用  
部材・機器  
線材3次加工製品  
エンジニアリング  
アルポラス

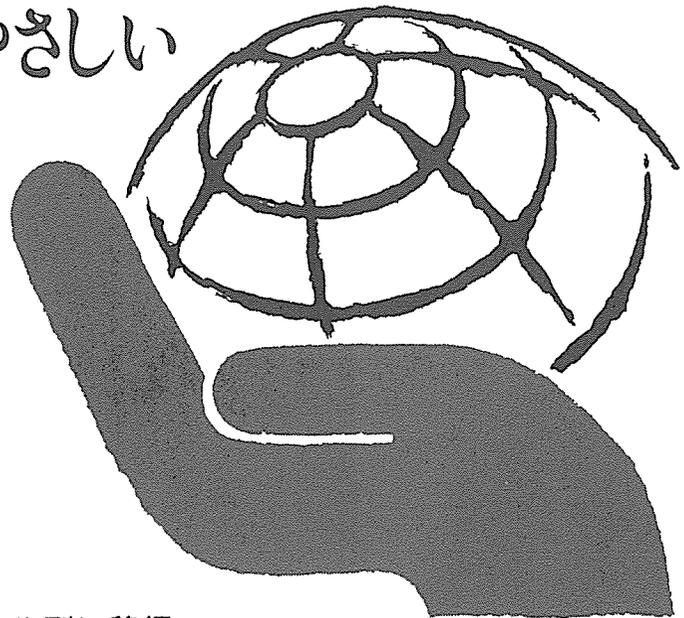


**神鋼鋼線工業株式会社**

取締役社長 小島 勢一

(本社) 〒660 尼崎市中浜町10-1  
電話 (06) 411-1051 代  
(工場) 尼崎・尾上・泉佐野  
(支店) 大阪・東京  
(出張所) 札幌・広島・福岡

人と地球にやさしい  
モノづくり



社会のしくみはリサイクル型に移行しています。車両に、船舶に、建材に、飲料缶に、アルミは何度でも生まれ変わって働きます。ご期待ください。

**住友軽金属**

〒105 東京都港区新橋5丁目11番3号(新橋住友ビル)  
☎03(3436)9700(ダイヤルイン番号案内)

# 天国の恵み。



◎天国に一番近い島といわれるニューカレドニア。気候・地形すべてに恵まれたこの島でこそ、  
 硅ニッケル鉱が採れる。まさに天国からの幸運な贈り物なのだ。

「天国に一番近い島」といわれるニューカレドニア。雨期、乾期を繰り返す熱帯気候のもとで、この島を構成するカンラン岩が、酸化・風化・分解され、ニッケルが溶け出し、下部で濃集されニッケル鉱床となる。ニューカレドニアの場合、更に、島全体の隆起と地下水面の低下による再度の濃集により、高品位の硅ニッケル鉱となった。気候・隆起・浸蝕が絶妙に合った素敵な幸運。天国の恵みだ。私たちは、ニッケルをはじめとして、様々な素材を鉱物から採ります。世界的な総合非鉄金属メーカーです。これからも、生活に欠かせない、銅・ニッケル・亜鉛・鉛・金などの非鉄金属と共に、歩き続けていきます。

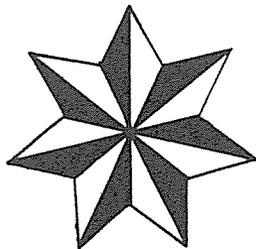
※この広告について、あなたの声をお聞かせください。住友金属鉱山株式会社 総務部  
 広報室 〒105 東京都港区新橋5丁目11番3号  
 ☎03(3436)7701へ。



地球に夢中  住友金属鉱山株式会社

## 銅 及 銅 合 金

鑄 造 卜 加 工



# 光 金 属 株 式 会 社

社 長 広 本 照 夫

〒555 大阪市西淀川区歌島2丁目4番39号

電 話 大 阪 (06) 474-1636 (代表)

真空の  
極限を



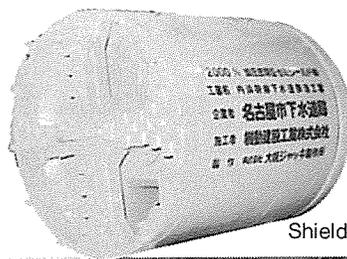
目ざして…

ULVACグループ代理店

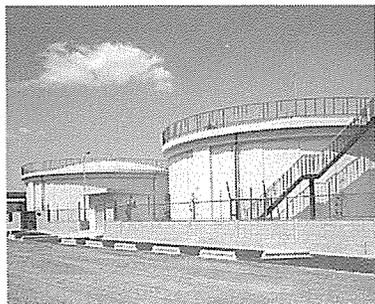
## 株式会社 京都タカオシン

本 社 〒606 京都市左京区川端丸太町東入ル (075) 751-7755(代)  
FAX (075) 751-0294  
滋賀営業所 〒525 滋賀県草津市大路2丁目13番27号(辻第3ビル) (0775) 65-8008  
FAX (0775) 65-8118

自然と共存  
『技術』で造る新天地



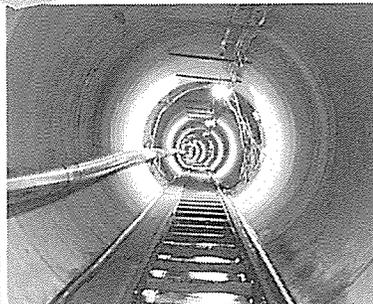
Shield Method



PC TANK



Prestressed Concrete Bridge



Pipe Jacking Method

### 機動建設工業株式会社

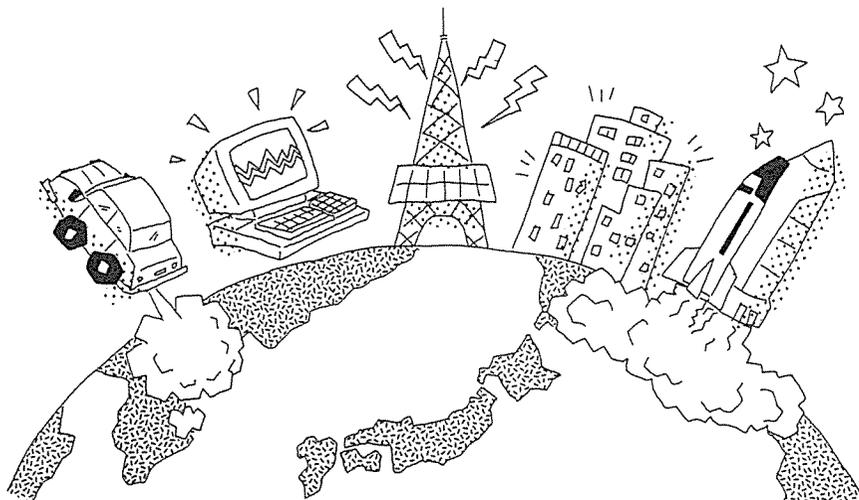
取締役会長 木村 宏一 (S.26年卒)

取締役社長 木村 信彦

本 社 / 大阪市福島区福島4丁目6番31号 (〒553) ☎(06) 458-5461(代)  
東京本部 / 東京都文京区向丘1丁目8番12号 (〒113) ☎(03) 3813-3641(代)

# 地球にはアルミニウムがいっぱい。

地球上でもっとも埋蔵量の多い金属資源——それはアルミニウム。  
このアルミニウムを、豊かな創造力と確かな技術力で、もっと楽しく、もっと便利な金属へと変身させることが、  
私たち東洋アルミニウムの仕事です。



主要製品 アルミニウム箔・アルミニウム板・アルミペースト(アルミペイント用原料)・アルミパウダー・フロンズ粉・高純度窒化アルミニウム

## **Toyol** 東洋アルミニウム株式会社

本社(東京) 〒100 東京都千代田区丸の内三丁目2番3号(富士ビル) TEL.(03)9211-7511(代表)  
本社(大阪) 〒541 大阪府中央区久太郎町三丁目6番8号(御堂筋タワービル) TEL.(06)271-3151(代表)

君の美しさは僕の元気です。

かたいものからやわらかいものまで、  
なんでもつくっています。  
たとえば、女性の肌の上なんかにも、  
私たちの元気が息づいています。  
気づかないけど、いつも身近に。  
H<sub>2</sub>Oのようにしなやかな大同特殊鋼です。



ロマンを技術にする大同特殊鋼のトレンド。

- 自動車用材料 ●家電用材料 ●溶接用材料 ●工具材料 ●刃物材料 ●家庭食器材料 ●磁性材料 ●電子材料 ●粉末材料 ●化学プラント材料 ●電力関係材料 ●原子力関係材料 ●造船関係材料 ●航空機関係材料 ●鉱山機械関係材料 ●石油機器関係材料 ●建築・構造物材料 ●自動車部品 ●帯製品 ●工業炉 ●特殊溶解炉 ●機械装置 ●環境保護装置 ●自動化機器 ●メカトロニクス ●計測機器 ●半導体 ●複合材料 ●機能材料 ●磁石材料



本 社 〒460 名古屋市中区錦1丁目11-18(興銀ビル)  
TEL.(052)201-5111  
東京本社 〒105 東京都港区西新橋1丁目7-13(大同ビル)  
TEL.(03)3501-5261  
大阪支店 〒541 大阪府中央区高麗橋4丁目1-1(興銀ビル)  
TEL.(06)203-1251



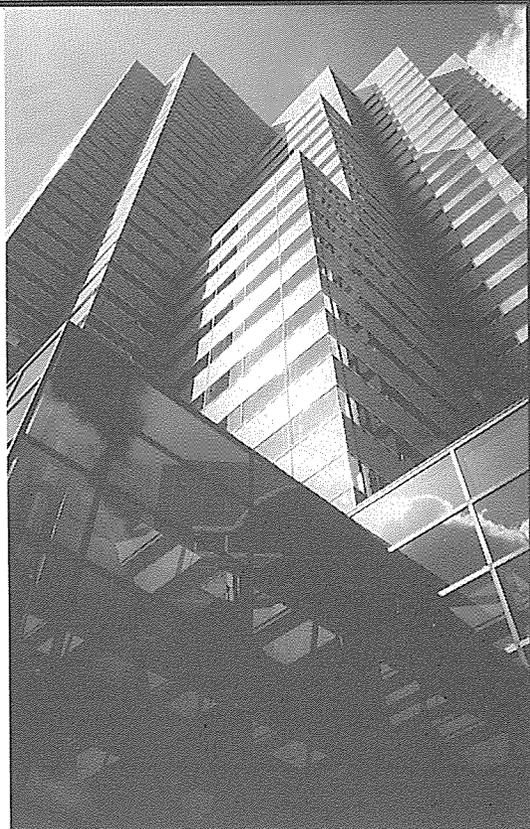
# 人・間・空・間 たいせつに

INAXが提唱する「環境美」は、都市空間を再構成する都市美、  
 高質の住まいづくりを推進する生活美、  
 そして企業イメージを建築物で高める企業美——  
 この3つが柱となっています。  
 そしてここに共通する基盤は、「セラミック技術」です。  
 台所、浴室、トイレなど水まわりはもとより、  
 門、庭園、玄関まわりなどのエクステリアをカバーし、  
 さらに建築の内外装から街の広場づくりへと、  
 INAX商品の世界は大きく未来をひろげつつあります。

株式会社 INAX

本社 〒479 愛知県常滑市鯉江本町5丁目1番地 ☎0569-35-2700

東京本部 〒103 東京都新宿区西新宿二丁目3番1号 新宿モノリス ☎03-3343-1700



テクノハート・カンパニー  
 **住友金属**

事業内容／鉄鋼、システム技術、エレクトロニクス、  
 新素材、地域開発、バイオ・メデイカル、  
 ソフトサービスなど。

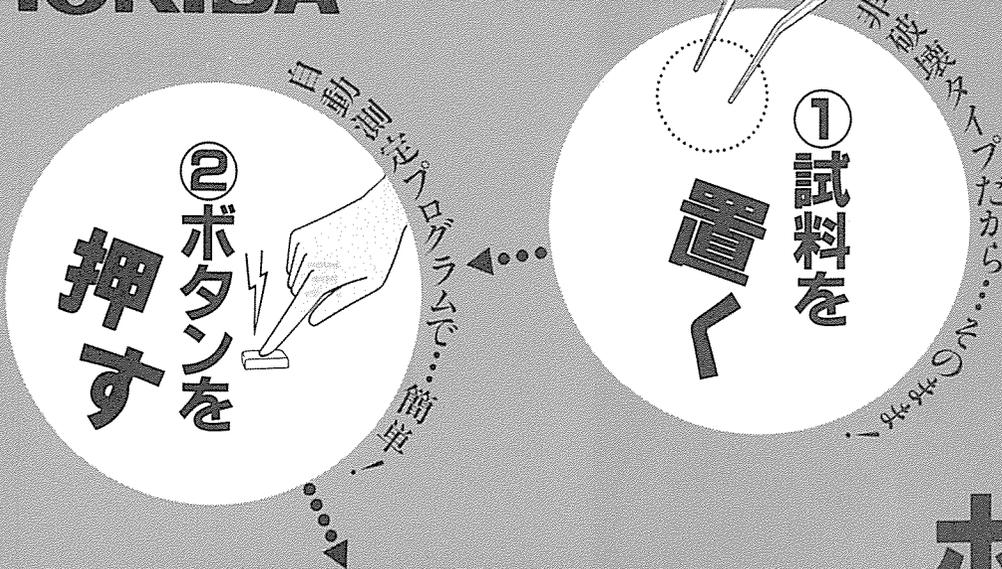
# 満ちて。



# 感動と 情熱に

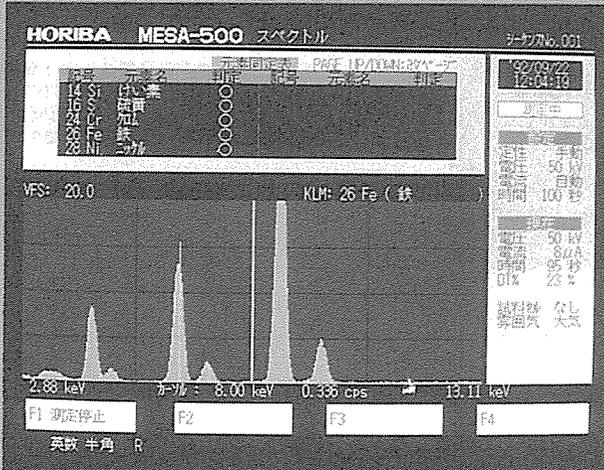
*Handwritten signature*  
 鹿島アントラーズFC / ジーコ

東京本社 〒100 東京都千代田区大手町1-1-3 TEL.03-3282-6111 大阪本社 〒541 大阪市中央区北浜4-5-33 TEL.06-220-5111



## 高度な元素分析が

## ボタンひとつ!!



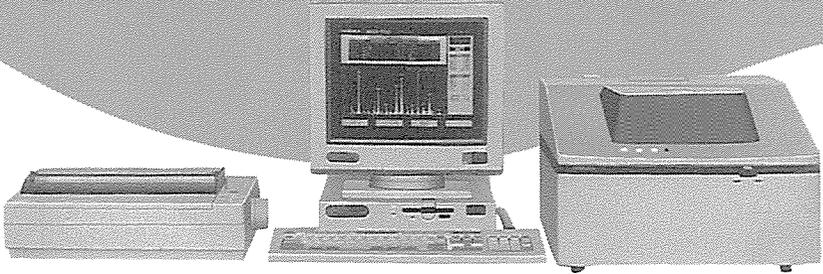
● 元素同定結果(例)

Na ~ U まで...2つのX線管電圧で

## ③ 高精度の分析

ホリバ独自の2つのX線管電圧自動切換方式の採用で、軽元素から重元素まで高精度な定量分析が可能。未知試料の場合でも簡単に高精度なデータが得られます。

低価格、メンテナンスフリーでさらに身近になりました。  
検出器は、使うときだけ液体窒素を入れればOKの高純度シリコン結晶(ゼロフィー)タイプを採用、メンテナンスも楽になりました。



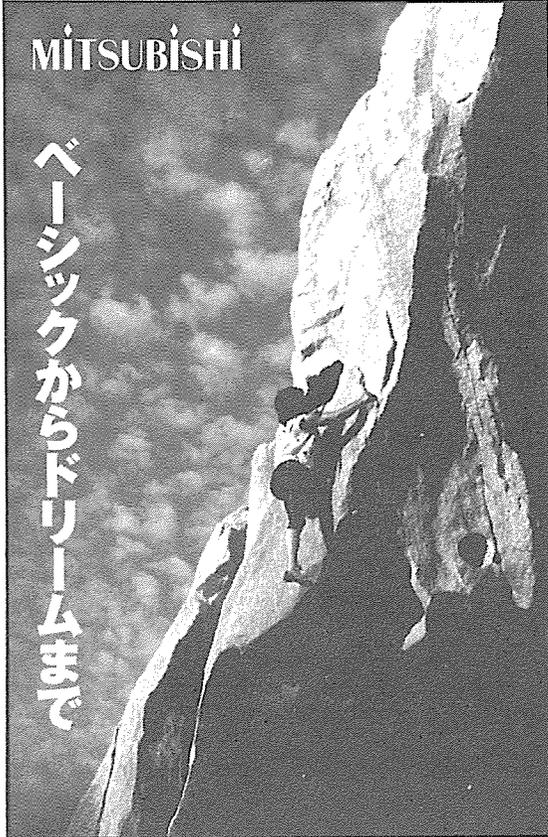
# 非破壊 蛍光X線元素分析装置MESA-500

日製産業株式会社 ●東京(03)3504-7211 ●札幌(011)221-7241 ●仙台(022)264-2211 ●埼玉(048)653-2341 ●筑波(0298)23-7391 ●千葉(043)247-4151 ●八王子(0426)43-0080 ●横浜(045)451-5151 ●厚木(0462)96-6831 ●新潟(025)241-3011 ●富山(0764)24-3386 ●豊田(0565)28-5191 ●名古屋(052)583-5854 ●京都(075)241-1591 ●大阪(06)366-2551 ●岡山(086)425-1316 ●広島(082)221-4514 ●高松(0878)62-3391 ●福岡(092)721-3501 ●沖縄(098)878-1311

堀場製作所 本社〒601京都市南区吉祥院宮の東町2 tel.(075)313-8121 ●東京セールスオフィス〒101東京都千代田区岩本町2-12-5 tel.(03)3861-8231 ●名古屋セールスオフィス〒461名古屋市東区築3-15-31 tel.(052)936-5781 ●大阪セールスオフィス〒532大阪市淀川区西中島7-4-17 tel.(06)390-8011 ●九州営業所〒812福岡市博多区博多駅前2-6-26 tel.(092)472-5041

MITSUBISHI

ベーシックからドリームまで



さまざまな

「モノづくり」を通して

三菱マテリアルは

人と地球に貢献します

- 非鉄金属 ●セメント ●金属加工部門
- アルミ缶製造 ●シリコン・新素材・ファインケミカル
- セラミックス ●資源開発 ●石炭・石油
- 建材部門 ●原子燃料サイクル ●エンジニアリング

三菱マテリアル  
TEL.03(5252)5206

SHARP

ビジネスに必要な道具を一台に凝縮。

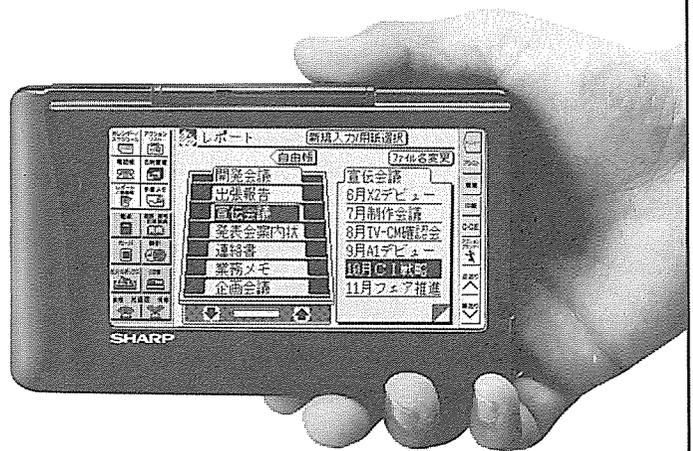
覚えることはザウルスにまかせ人間は考える。  
仕事に、ザウルスひとつ。あとは、いらん。

- レポート機能/議事録など8種類の(レポート)用紙からフォームを選び、手書き感覚で入力。書院ワープロや市販のプリンタで印字すれば完了です。
- 通信機能/光通信を使ってザウルス同士はもちろん、書院ワープロやパソコンとのデータ共有も可能です。
- ファイリング機能/文書やデータを項目別に分類管理できるので、情報が素早く呼び出せ便利です。
- 秘書機能/次にすべき仕事を優先順に並べ換えて教えます。また、今仕事に必要な関連データも一覧表示。
- 辞典機能/国語・英和・和英の3つの辞典を内蔵しました。

新携帯情報ツール 液晶ペンコム

**ZAURUS**

ポケットサイズで新発売  
PI-3000 標準価格85,000円(税別)  
外形寸法:幅157×奥行94.6×高さ17.3mm



シャープ株式会社

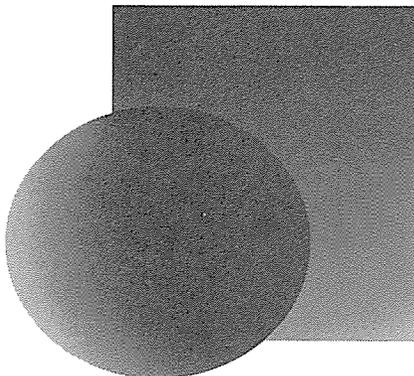
●この商品に関するお問い合わせは…… 西日本相談室 〒545 大阪市阿倍野区長池町22番22号 ☎(06) 621-1221(大代表)  
東日本相談室 〒261 千葉市美浜区中瀬1丁目9番2号 ☎(043) 297-1221(大代表)

※対応機種に制限があります。また、ソフトや周辺機器が必要な場合もあります。●ご購入の際は購入年月日・販売店名など所定の事項を記入した保証書を必ずお受けとください。●消費税及び配送・設置・付帯工事費、使用済み商品の引き取り費等は、標準価格には含まれておりません。

株式会社 ジャパンエナジー

〒105 東京都港区虎ノ門2丁目10番1号 TEL.03-5573-0000

12月1日、日鉱共石は  
ジャパンエナジーに変わりました。

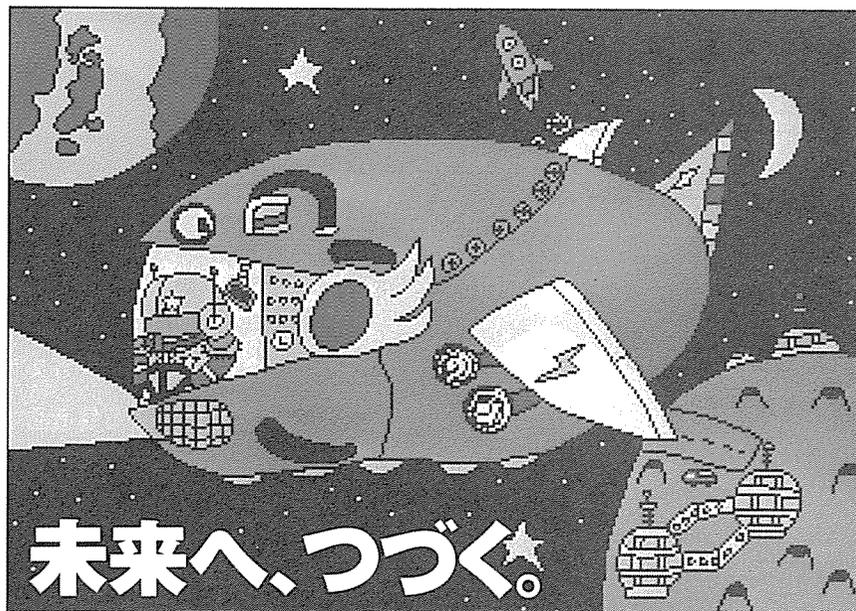


21世紀の地球に貢献するエネルギー企業をめざします。  
新しいわたしたちのエナジーに、ご期待ください。



**JOMO** 共石マークのサービスステーションは、来春からJOMO(ジョモ)が変わってゆきます。新しいJOMOをよろしくお願いします。

軽油引取税は、12月1日から1リットル当たり7円80銭増税され、32円10銭となりました。



HITACHI

未来へ、つづく。

小学6年生の瀧本大介くんが、コンピュータを使って描いてくれた「宇宙旅行」の絵。  
もういつ寝ると、行けるようになるのかな——。  
夢を見る力。夢を叶える力。未来へ、つづく。日立です。

人と技術の理想をめざす

**Interface**

© 株式会社 日立製作所 〒101-10 東京都千代田区神田駿河台四丁目6番地 TEL.(03)3258-1111(大代)



# 丸尾カルシウム株式会社

原料石灰石

鉱山採掘から製品まで

— 膠質炭酸カルシウム (MSK)

— 軽質炭酸カルシウム

— 重質炭酸カルシウム

炭酸カルシウムの総合メーカー

創業 大正15年10月1日

取締役社長 丸尾 儀兵衛

資本金 5億3千5百万円

専務取締役 青山 三樹男 (鉱27)

株式上市 大阪証券取引所  
市場第二部

粉体研究所 江原 昭次 (資52)

本社・中央研究所  
粉体研究所

明石市魚住町西岡1455番地 ☎674 ☎078 (942) 2112(代)

工場

本社工場・土山・土浦・長野・岡山・九州

営業所

東京・大阪・神戸・名古屋・九州

創業以来50余年

私たちは合金生産技術の可能性を  
追求しています。

## 非鉄 中間合金

りん銅、マンガン銅、けい素銅、  
ボロン銅、鉄銅等

## 銅合金 鑄造加工

HZ合金CE、各種青銅、真空脱ガス  
処理による鑄造品



株式会社 大阪合金工業所

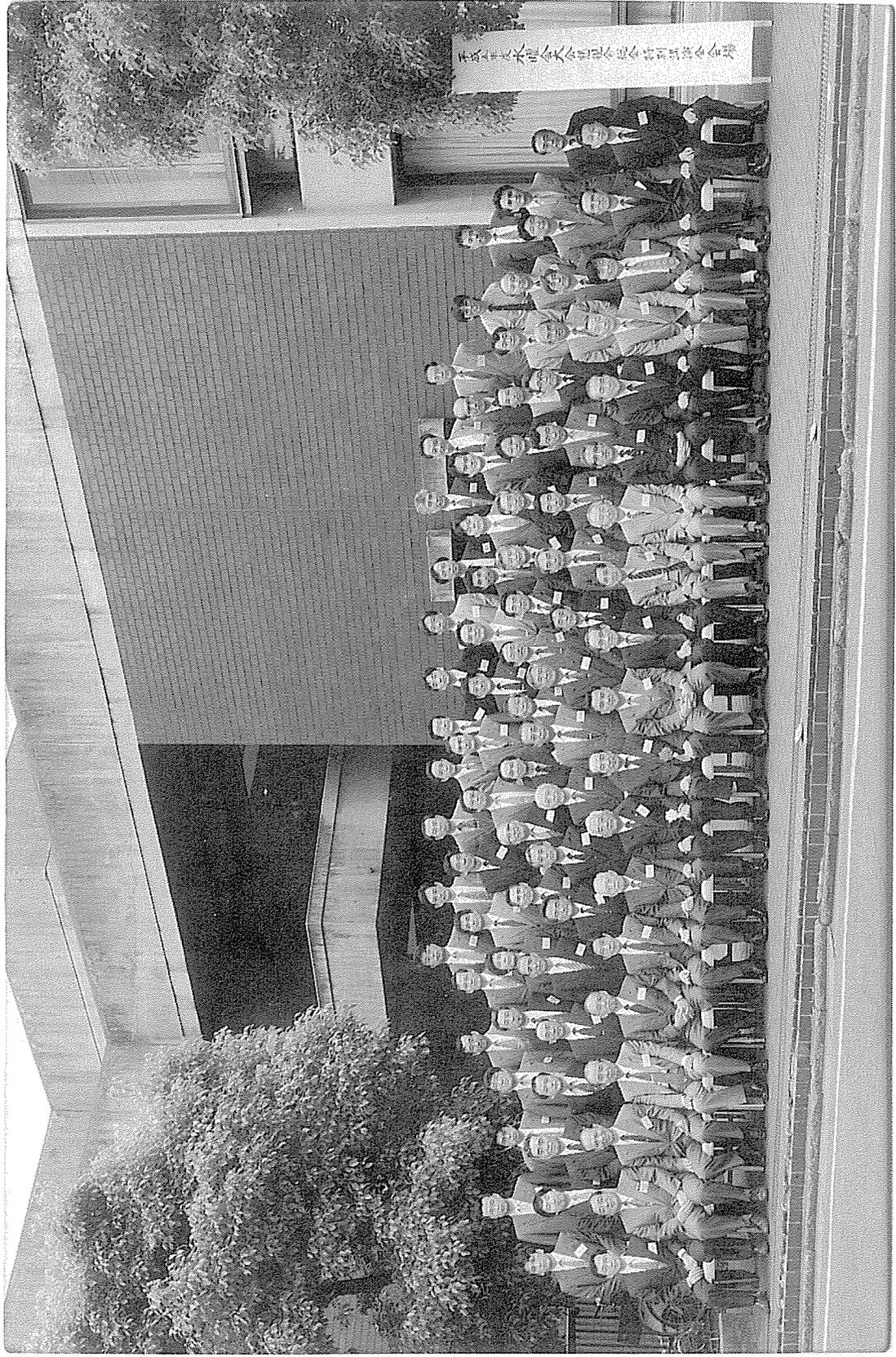
代表取締役社長 水田 泰次

本社 〒910-31  
大阪 〒567  
東京 〒104

福井市白方町第45号5番地9  
茨木市五日市1丁目2番1号  
東京都中央区八重洲2丁目6番5号

TEL (0776)85-1811(代)  
TEL (0726)26-1313(代)  
TEL (03)3278-1188(代)

FAX (0776)85-1313  
FAX (0726)26-1353  
FAX (03)3278-1329



平成5年度 水曜会大会 記念写真 (平成5年6月5日 京大会館にて)



## 大会記念講演

## 一貫製鉄所の運営の現状

杉 田 宏\*

## The Stature of Managing a Steel Plant

by Hiroshi SUGITA

## 1. はじめに

わが国は第二次世界大戦後、驚異的経済発展を遂げてきたが、鉄鋼業においても、その時代、時代の社会的要求に即した対応をおこない、土木、建設、造船、自動車、電気をはじめとする多くの産業の発展成長を支える基盤産業として大きな貢献を果たしてきた。

しかし、近年の高度経済成長指向から豊かな社会生活（ハイクオリティライフ）指向へと社会意識の変革が進む中で、鉄鋼業を取り巻く諸要因も大きく変化をはじめている。

また、世界のトップレベルを維持してきた鉄鋼技術、そしてそれを基盤として発展を続けてきた日本の鉄鋼業自身も今や成熟の域に達したりとはいえ、それに伴ってその発展指向も20世紀後半以降の量的拡大から、21世紀に向けての社会情勢の変化を見据えた質的拡大へと移行しつつある。この様な背景をふまえて一貫製鉄所の運営の現状をまとめた。

## 2. 鉄鋼業を取り巻く社会情勢の変化

## 2.1 地球環境保全・エネルギー問題

近年、環境問題は単に被害が一国内に止まらなくなっており、地球的規模で影響を及ぼす課題として扱われる必要性が高まっている。これら地球環境問題の主な項目について整理すると表1の様になる。

例えば、これらの環境問題の一つ、酸性雨問題については1974年のSO<sub>x</sub>総量規制、次いでNO<sub>x</sub>規制が導入され、さらにはモントリオール議定書採択以降、各種規制が続々と制定されている。日本鉄鋼連盟でも、1992年の国連環境開発会議（UNCED）の“気候変動枠組み条約”

\*住友金属工業株式会社常務取締役

への署名が行われたことから、「地球環境問題対策委員会」で、基本方針が明示された<sup>2)</sup>。これには「鉄鋼業は環境保全と調和した持続可能な経済発展の実現に寄与する」との基本方針のもとに、環境保全、省エネルギー、社会との共生など10項目からなる具体策が挙げられている。

一方、エネルギー問題は今や地球的視点、すなわち資源制約の顕在化と地球環境保全の観点から捉えると同時に、使用者の視点からも捉える必要がある。これは民生用エネルギーや都市部エネルギー需要の増大といった使用者のニーズの変化に伴って、地域へのエネルギー施設の分散化、エネルギー発生源の多様化への取り組みといった観点で見据える必要性を意味する。このエネルギー問題を供給と利用という立場から整理すると、供給はエネルギー発生、貯蔵方法の多様化に対する取り組みであり、一方、利用は高効率化に対する取り組みであろう。エネルギー需要は人口の増大、発展途上国の進歩に伴って増大する一方であり、エネルギー関連の新たな課題が山積しているといえる。

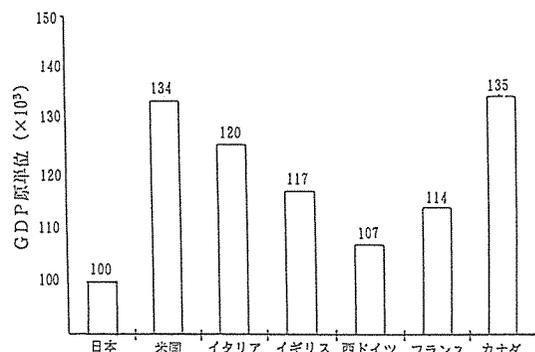


図1 主要製鉄国のエネルギー原単位比較（1989年）

表1 地球環境問題

No.	環境問題	影 響
1	オゾン層の破壊	・オゾンホール の出現による有害紫外線の直接照射は皮膚ガンの発生、食物連鎖システムや生態系の崩壊。
2	地球温暖化	・CO <sub>2</sub> 、フロン、メタン、亜鉛化窒素、オゾン等による温室効果は海面の上昇、気候の異変、生態系の変化を招く。とくにCO <sub>2</sub> は2030年には、345ppm→500ppmに達するといわれている。
3	酸性雨	・化石燃料の燃焼にともなうSO <sub>x</sub> 、NO <sub>x</sub> に起因し既に、西独の森林の枯死、湖の魚類の死滅を招いている。
4	熱帯雨林の減少	・伐採や焼畑のような人為的要因によるものであるが、毎年、1130万ヘクタールの速度で進行している。
5	砂漠化	・焼畑など的人為的要因と気候変動により、毎年600万ヘクタールの速度で砂漠化が進行中。
6	野性生物の絶滅	・環境汚染、環境破壊による生態系のバランス崩壊。
7	海洋汚染	・工業化の進行により増加する有害産業廃棄物、油脂等による汚染は、海洋資源の減少、正常な水循環機能を破壊。

表2 ハイコオリティライフの実現

項 目	事 例
都市過密・再構築	・ビル再生・工業地域再生・首都圏都市整備 ・大深度地下・ウォーターフロント・ビル高層化
環境・調和	・廃棄物処理・地球環境・色彩、意匠性・防音
安全・衛生	・耐火建築・排水、空調施設・耐震
労働力不足への対応	・女子の進出拡大・高齢労働力の活用 ・外人労働力の活用
クリーン、エネルギー	・地域冷暖房・コージェネ・ソーラー、地熱、風力利用発電
ハイコオリティ住システム	・レジャー施設の充実・高齢者機能住宅 ・シルバータウン・広空間居室
バイオメディカル	・海洋牧場・栽培プラントシステム・砂漠緑化事業

高効率化すなわち省エネルギーについて、日本は化石エネルギーの97%以上を輸入に依存し、他の先進国に比較して進歩しているといえる。日本の鉄鋼業についても図1<sup>3)</sup>に示す如く、そのエネルギー効率が極めて高いことから、今後世界の鉄鋼業へこれら省エネルギー技術を移転することによって、世界的エネルギー節減に対して大きく貢献することができるであろう。

## 2.2 ハイコオリティライフへの貢献

貧富の差を縮めようとする社会化現象が世界的に進行しており、日本を始めとする主要先進国に対し、経済覇権主義の払拭、公平なる自由貿易システムの確立、地球環境保全への貢献、等が強く求められている。一方、量

的成長指向、シェア第一主義を追い続けてきた日本経済もここにきて成長拡大を続けてきた市場の吸収力低下、金融資本市場の構造変化による資本コストの上昇という課題を抱え、戦後はじめての構造転換に直面している。

さらにこのような構造転換は単に経済事象に留まらず、社会事象とりわけ社会資本の充実と生活に対する意識変革にまで及んでいる。この様な社会事象の中で、21世紀に向けた豊かな社会生活（ハイコオリティライフ）実現のための多岐にわたる検討項目と事例を表2にまとめた。昨今、メセナ（文化支援活動）や、フィランソロピイ（社会的貢献）という類の言葉を日常会話の中で耳にするようになったが、表2に示すようにハイコオリ

ティライフの実現を目指して、製鉄業あるいは製鉄所の果たす役割は一層重要でかつ拡大して行くものと言える。

### 2.3 労働力不足への対応

これまで、わが国の鉄鋼業は豊富で優秀な労働力を背景に大きな発展を遂げてきた。しかしながら、わが国での15才以上の労働者人口は2000年の6697万人をピークとして減少する。これを構成年齢別にみると、30才未満の若年層は減少するが55才以上の高齢層は大幅な増加を続け、この比率は2010年で約27%に達すると推定される<sup>4)</sup>。

このような21世紀に直面する労働力人口の減少、産業別労働力構成の変化に対して、今から労働力供給制約に対応した経済社会システムの構築に向けた準備を進めていくことが要求されており、鉄鋼業に対しても同様のことが必要不可欠といえる。

### 3. 一貫製鉄所の運営の現状

これまで述べてきたような社会情勢の変化に対して、日本の製鉄業は重厚長大産業、成熟産業といわれながら着実に対応してきた。さらに裾野の広い技術力を駆使して、世界が抱える諸問題にグローバルに貢献していく努力を払っている。

すなわち、世界最高水準にある鉄鋼プロセス技術、資源リサイクル技術、省エネルギー技術の移転、展開を通じての国際的技術協力や、各種エンジニアリングを通じての地球環境保全への貢献が今まさに望まれているのである。

以下この様な製鉄業が有する技術を背景にした、資源のリサイクル、省エネルギーへの対応、地域社会との調和を目指した都市型製鉄所づくり、マーケットイン指向

による新しい社会への要請に対応するための新機能材料の開発について述べていきたい。

#### 3.1 資源のリサイクル

1991年10月に「再生資源の利用の促進に関する法律(リサイクル法)」が施行され、鉄鋼業については製鉄スラグが政令指定副産物に指定された。鉄鋼業は表3<sup>5)</sup>に示すように1989年時点で既に全体として94%に達しており、資源のリサイクル化が進んでいる分野といえる。特に高炉スラグについては100%再利用されており、セメント用に60%と最も多く、次いで道路用の22%、土木・コンクリート用の14%、残りは肥料、土壌改良に使用されている。また、弊社小倉製鉄所における高炉スラグと転炉スラグの利用状況は1991年時点で高炉スラグ、転炉スラグとも図2に示す通り100%に達している。

また、当該製鉄所の工業用水の循環率(循環量/使用量)は92%に達し、これは蒸発量8%を含めると100%循環されていることになる。

さらに電力については、コークス炉を保有しない小倉製鉄所の購入電力は全エネルギーの6.2%であり、エネルギー外販率(外販cal/純使用cal)は3.6%である。また、コークス炉を保有する大型一貫製鉄所の購入電力13~20%であり、エネルギー外販比率は25~37%に達し、電力として購入するエネルギーより外販エネルギーの方が1.1倍~1.8倍と多い。なお、外販エネルギーのほとんどは共同火力発電所向けの燃焼性の副生ガスである。

鉄鋼材料自体のリサイクルに関しては、鉄がリサイクルに適した金属であるため世界的にみても鉄源の38%は鉄スクラップで占められている。表4<sup>6)</sup>に鉄スクラップ供給の推移と鉄鋼全備蓄量の推移を示す。鉄スクラップの中で今後注目すべき点は市中を経て回収されるいわゆる老廃スクラップの動向であり、これはわが国の現在の

表3 鉄鋼業における排出物の種類とリサイクル状況(1989年)<sup>5)</sup>

種 類	発生量	リサイ クル量	リサイ クル比	用 途
高炉スラグ	25.224	25.224	100%	セメント用、コンクリート用、 道路・鉄道用、肥料・土壌改 良用
転炉スラグ	9.945	8.528	86	再利用、道路・鉄道用、 港湾工事・土木用
電炉スラグ	2.418	1.598	66	道路・鉄道用、地盤改良用、 港湾工事・土木用
ダスト類	5.384	5.120	95	焼結原料、セメント原料、亜 鉛回収
その他	610	363	60	焼結原料、セメント原料
合 計	43.581	40.833	94%	

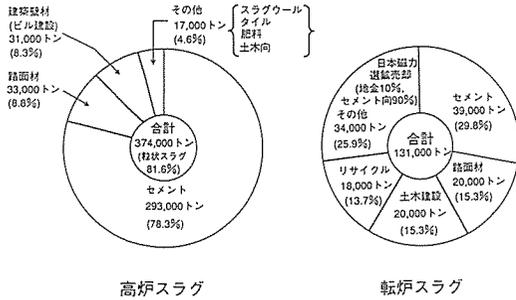


図2 住友金属工業(株)小倉製鉄所における高炉スラグおよび転炉スラグの利用状況(1991年)

鉄鋼備蓄量(2500万トン/’90年)の2.7%に相当する量となっている。増加の主な内容は自動車、耐久年数の長い建築、土木等の建材、産業機器によるものである。近年の表面処理鋼板やエレクトロニクス製品の増加はこれら老廃スクラップの不純物含有量の増加を進行させるため、これらの再利用の妨げとなる危険性を有している。この様な事態に対応して、平成1年3月から通産省の指導下で「新製鋼プロセス・フォーラム」が発足され、基礎研究、応用研究、技術調査を開始しており、現在特に分離が困難であることが知られている銅、錫の分離除去技術を中心としたスクラップ回生プロセスの研究に着手している。

3.2 省エネルギー

日本の鉄鋼業における省エネルギー化は既に1970年代前半より進められている。図3<sup>6)</sup>に粗鋼t当たりの省エネルギー率および量の変化を示す。第1次石油ショックの始まった1973年をベースとすると、1990年では省エネルギー量1269Mcal/t、省エネルギー率として18.3%まで延びてきている。

次に、図4に排エネルギー回収量の増加の様子と内訳を示す。図に示したように排エネルギー回収率は年々着実に向上している。この内訳は高炉炉頂圧発電設備

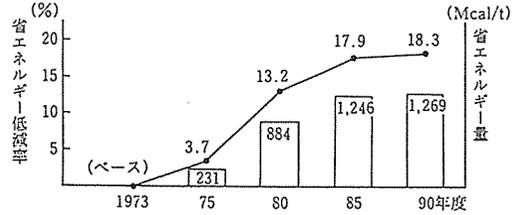


図3 省エネルギー率の変化(粗鋼ベース)<sup>7)</sup>

(TRT)、コークス乾式消火設備(CDQ)、転炉ガス回収等の設備によるところが大きい。図5には、現在の排エネルギー回収利用状況と今後の活用ポテンシャルを示した。粗鋼排熱は現在粗鋼エネルギー原単位に対して38.5%(2208Mcal/t)に達する。今後、一層の省エネルギー技術の進歩と排熱回収対策が講じられたとして、その時の最終排熱は26.0%(12.5%改善)と予想されている。

3.3 都市型製鉄所づくり(小倉製鉄所の例)

わが国の鉄鋼業は戦後の高度経済成長期を通じて、各産業の基盤となり、日本の国際競争力を支えてきた。この間、鉄鋼材料の生産効率化を再重点課題として取り組み、経済成長をリードしてきたが、近年の産業構造の転換期に直面し、産業構造についても従来の量的拡大から質的拡大への移行を迫られている。さらに、この構造転換は単に物質的だけでなく、精神的「ゆとり」と「豊かさ」を求める社会意識の変化に対応した鉄鋼業自身の変化をも意味している。この様な社会環境の変化の中、当社小倉製鉄所の目指す「都市型製鉄所づくり」活動を、一つの事例としてここで紹介する。

この活動の基本理念を模式化し図6に示す。これはいままでの「企業内個人」といった考え方を離れ、企業と個人の対等な関係の上に地域社会との交わりを確保しようというものである。小倉製鉄所では具体的には北九州市を21世紀のテクノロジー都市の中核として、高度な

表4 鉄スクラップ供給の推移と鉄鋼蓄積量<sup>6)</sup>

(単位:千トン)

年 度	1980	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1995 (見通し)	
供 給	自家発生スクラップ	14,990	11,846	10,712	11,545	12,414	12,781	13,466	12,430
	加工スクラップ	7,427	6,800	6,585	7,126	7,902	8,430	8,973	8,355
	老廃スクラップ	16,585	21,860	19,882	21,045	22,712	24,713	25,941	30,070
	計	24,012	28,660	26,467	28,171	30,614	33,143	34,914	38,425
給	輸入スクラップ	2,625	3,168	2,427	2,270	885	983	696	500
合 計	41,628	43,674	39,606	41,986	43,913	46,907	49,359	51,355	
鉄 鋼 蓄 積 量	656,613	774,564	797,794	827,817	866,365	907,730	954,191	—	
老廃スクラップ比率(%)	2.5	2.8	2.5	2.5	2.6	2.7	2.7	—	

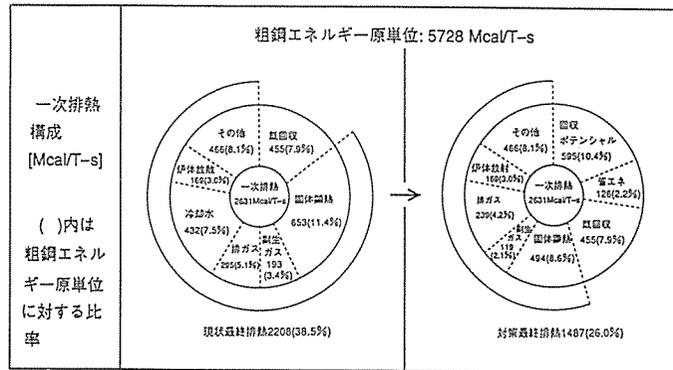


図4 排エネルギーの回収利用状況と今後の活用ポテンシャル<sup>7)</sup>

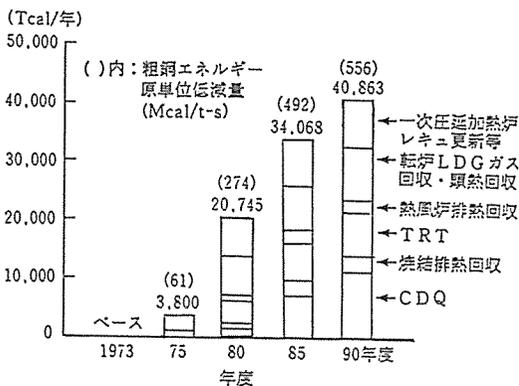


図5 排エネルギー回収の増加<sup>7)</sup>

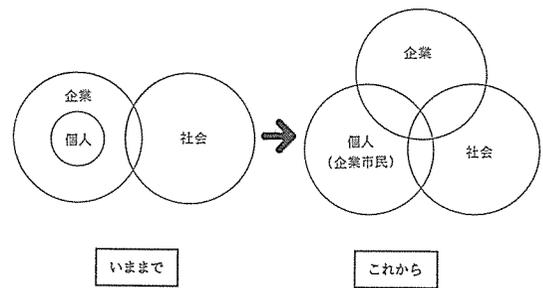


図6 基本理念

技術に裏付けされた事業活動をこの地で営むものとして行動計画を立てている。すなわち、製鉄所の環境保全・基盤整備をさらに促進し、市が提唱する「水辺と緑とふれあいの国際テクノロジー都市」づくりに積極的に参加し、写真1に示すような「所景観の整備」と、地域社会における「良き社会人」として親しまれる企業人の育成を確立し、製鉄所・人共にニューファクトリーとしての「都市型製鉄所づくり」に取り組んでいる。推進体制については、平成5年3月に都市型製鉄所づくり推進委員会を設置し、当面5年間の取り組み組織としている(図7)。具体的には、景観整備委員会、環境保全委員会、基盤整備委員会からなり、それぞれの取り組み項目を設けている。

### 3.4 鉄鋼のつくり込み技術の進歩と鉄鋼材料の高機能化

わが国鉄鋼業が世界に冠たる地位を確保してきた背景には、原材料購入、製造、品質保証、出荷管理、さらには需要家先でのプロセス、要求機能まで考慮した一貫製造・管理システムを支える高度な技術水準、すなわち鉄鋼のつくり込み技術の進歩と鉄鋼材料の高機能化にある。

この鉄鋼材料の高機能化を支える主要技術としては、

炉外精錬プロセス、加工熱処理技術、種々の鉄鋼材料特性を評価する評価技術、単なる品質保証ではなく機能向上を意図した保証技術などがあり、これら各種技術を包括する総合開発力が鉄鋼材料の高機能化と多様化を促進する原動力となってきた。ここでは鉄鋼のつくり込み技術の進歩と鉄鋼材料の高機能化に関するいくつかの事例について簡単に紹介する。

#### A. 石油生産関連鋼管

石油生産に関連する鉄鋼材料には、石油・天然ガスの掘削・生産に使用される油井管材料と、地上、地中あるいは海底での石油・天然ガスの輸送に使用されるラインパイプにわけることができる。いずれの材料でも地中、海底、寒冷地などの過酷な環境で使用されるので、そのような環境下での強度はもちろんのこと靱性、破壊性能、溶接性が考慮されなくてはならない。特に硫化水素や炭酸ガスのような腐食性ガスによって引き起こされる水素誘起割れ(HIC)や応力腐食割れ(SCC)等に対する抵抗力が多く要求される。

#### B. 鉄鋼製品へのTMCPの適用

線材や棒鋼の材質への制御圧延と加速冷却を組み合わせた加工熱処理、いわゆるTMCP(Thermal-Mechanical Control Process)が行われており、新機能の付与と需要家先での熱処理工程の省略、あるいは冷間加工性向上に寄与している。図8には、鉄鋼製品におけるこれらTMCPの適用例をまとめて示す。この様な開発事例



写真1 都市景観との調和をめざす小倉製鉄所



図7 都市型製鉄所づくり推進委員会組織

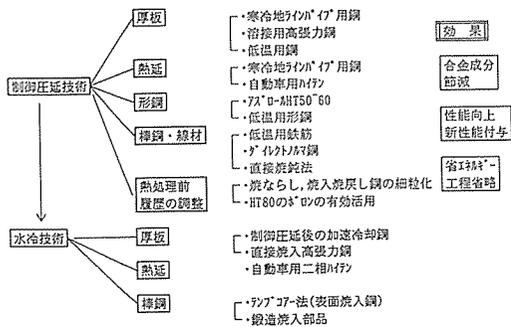


図8 鉄鋼製品における加工熱処理の適用例<sup>8)</sup>

	1975	1980	1985	1990
溶融めっき系	合金化溶融Znめっき (45g/m <sup>2</sup> )			'89 厚目付合金化溶融Znめっき (60g/m <sup>2</sup> )
電気めっき系		'81 Zn-Ni合金めっき (20g/m <sup>2</sup> )	'83 Zn-Fe合金めっき (20g/m <sup>2</sup> )	'89 合金めっき (30g/m <sup>2</sup> )
塗膜系	ジクロリチン塗膜鋼板 (15μm)			有機溶剤系Zn-Ni合金めっき (30g/m <sup>2</sup> +1μm)

図9 日本国内における自動車用防錆鋼板の主要動向<sup>9)</sup>

は新技術によって鉄鋼材料に新機能を創出されることにより、新鋼種の開発、新用途への適用、あるいは工程省略を生み出している一例といえる。

C. 自動車用鋼板

自動車用鋼板は近年の自動車産業の進歩と共に高機能

化を果たしてきた鉄鋼材料の代表例である。自動車用鋼板は用途と加工プロセスに応じて多様な材料特性を要求される材料であるが、ここでは防錆鋼板と高炭素黒鉛化冷延鋼板の事例について述べる。

自動車用防錆鋼板は1975年頃から表面化してきた路面凍結防止のための融雪塩使用による腐食対策として研究開発が行われてきた材料である。現在、孔食に対して10年、外面錆については5年を目処として自動車メーカーが自主的に開発を行っている。しかし、防錆鋼板は単に防錆だけでなく、自動車鋼板に要求されるプレス成形性、スポット溶接性、経済性も要求される。図9には、このような要求に応える防錆鋼板開発の主要動向についてまとめた。大きくは溶融メッキ系、電気メッキ系、塗膜系に分類されるが、1975年以来、防錆規制の変化と共に防錆処理技術も変遷していることがわかる。例えば、Fe-Zn系メッキは1983年頃に一旦溶融メッキからFe-Zn合金の電気メッキへ切り替わったものの、防錆ニーズの高まりと母材鋼板の極低炭素鋼製造技術の確立とが相まって、現在は溶融メッキが再び主流となり、電気メッキによるFe-Zn合金メッキは消えていく運命にある。

高炭素黒鉛化冷延鋼板は合金成分を低P低Mn化し、冷延後の焼鈍プロセス中パーライト組織の黒鉛化処理を行うことによって、冷間加工性の向上と成形後の焼き入れ・焼き戻し処理により高強度化を図ることができる材料である。加工性の向上によって高成形性が得られることから、従来別々に成形・溶接していた部材を一体成形することにより、コストダウンと高強度化を期待することができる。

D. 建材の多様化

従来から使用されてきた鋼管、鋼板、棒鋼および形鋼といった基礎建材に加えて、景観・重防食鋼矢板、鏡面

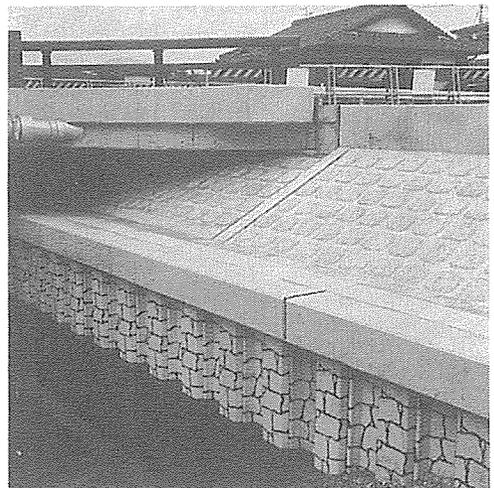


写真2 景観重防食鋼矢板（滋賀県琵琶湖、護岸）

ステンレス鋼板，セラミックタイルといった機械的強度と美観を考慮した建材が開発されている。それぞれの材料の使用例を写真2,3,4に示すが，いずれも鉄鋼材料に新しい付加価値を与えた物といえる。

E. 材料評価技術

鉄鋼材料の高機能化が進むにつれ，材料の基本特性を評価するのみでは，もはや最終製品に要求される機能，信頼性，または安全性を評価するまでには至らなくなってきている。さらには，鉄鋼材料を高機能化することは，そのための新しい評価技術の必要性をもたらしている。



写真3 鏡面ステンレス鋼板 (JR 横浜地下街)

そのため材料のみならず，評価技術自体にも試験・解析等の範囲が広がり，結果として新材料の開発期間が長くなる傾向にある。このような背景から鉄鋼メーカー側が必要家の加工工程や，さらには最終製品に近づく，いわゆるデザイン・インを指向しようとする試みもなされている。図10に鉄鋼材料の高機能化に対応した最近の評価技術の分類についてまとめた。

4. おわりに

わが国鉄鋼業はその時代，時代の社会的要求に即した対応を行い，多くの産業の発展成長を支える基盤産業として大きな貢献を果たしてきた。しかし，近年の豊かな社会生活（ハイクオリティライフ）指向へと社会意識の变革が進む中で，鉄鋼業を取り巻く諸要因も大きく変化



写真4 セラミックタイルを敷いた歩道橋 (福岡市)

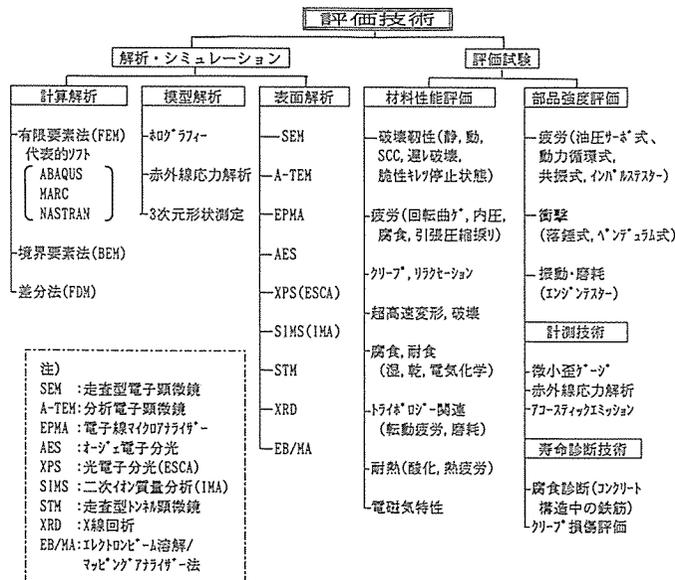


図10 鉄鋼関係の最近の評価試験

をしはじめている。

また、世界のトップレベルを維持してきた鉄鋼技術、そしてそれを基盤として発展を続けてきた日本の鉄鋼業自身も今や成熟の域に達し、その発展指向も 21 世紀に向けての社会情勢を見据えた質的拡大への変化が必要である。このような背景の中で、本稿では、一貫製鉄所の運営の現状について述べてきたが、未だ社会のニーズに対して取り組むべき課題は山積しているといえる。

それは、経済と技術が独立して議論されてきた時代から、本稿で述べてきたようなグローバルな視点に立った経済と技術がコンパラブルに発展するテクノ・エコノミー時代を迎えて、一貫製鉄所がさらに広い総合力を発揮していくことがますます重要になってくることを意味していると考えられる。

## 参 考 文 献

- 1) IISI, レポート (1992)
- 2) 「地球環境問題対策委員会資料」、日本鉄鋼連盟 (1992)
- 3) 中島：地球環境・エネルギー問題と材料 (第 42 回 湯川正夫記念講演), p 14.
- 4) 労働力人口の推移と見通し：労働者雇用政策研究会資料
- 5) 鉄鋼業のスラグ等の発生及び利用・埋立状況報告書：日本鉄鋼連盟 (1989)
- 6) 鉄鋼界：日本鉄鋼連盟 (1991) 3 月号
- 7) 鉄鋼界：日本鉄鋼連盟 (1993) 3 月号
- 8) 竹内, 他：住友金属, 37, 1 (1985) P. 12
- 9) 秦, 他：鉛と亜鉛 137 (1987) P. 16

## 大会記念講演

## わが国の工学系高等教育について\*

小 門 純 —\*\*

## Technological Higher Education in Japan

by Jun-ichi KOKADO

## 1. わが国の工学系高等教育制度の変遷

わが国の工学系の高等教育機関としては、明治5年に発布された「学制」により発足した工部学校が最初のものである。この学校は当時の工部省の技術担当官吏の養成機関として設立されたが、合計213名の卒業生を出した後、米国の大学よりも水準が高く、ドイツの大学に匹敵する教育を理想とした森有礼の考えに基づき、明治19年に配布された帝国大学令により設立された東京帝国大学の工学部となった。その後、京都、九州、東北、北海道、大阪および名古屋の各帝国大学に設けられた工学部は、昭和24年に新制大学に移行するまで、わが国の工学に関する教育及び研究の中心的役割を果たしていた。また、明治36年には専門学校令が発布され、各地に国・公・私立の高等工業学校、後の工業専門学校が設立され、多くの有為の技術者を世に送り出した。このことにより、主として学理の探究と研究能力の養成とに重点を置いた大学と、生産技術の修得と工学的センスの養成とを目的とし、実験・実習を重視した教育を行なう専門学校とによる複線型の工学系高等教育制度が整った。その後、大正7年に大学令が公布され、帝国大学その他官立のもの外、公立及び私立の文科系及び医学系の大学が多数誕生したが、工学部を有する大学は少なかった。

このように長年に亘る整備により一応完成の域に達していたわが国の学校制度は、戦後占領軍の強い勧告により、根本的に改変されることになった。すなわち、学の蘊奥を攻究するエリートや、高級官僚の教育機関として

の認識が強かった大学は、一般大衆が職業上の基礎学力を修得するための大学へと変質させられることになった。これを受けて、昭和24年、旧制度の下での大学が新制大学になるとともに、専門学校、高等学校、高等師範学校や師範学校を中核として、国立のもの66、公立のもの18、私立のもの92の新制大学が一挙に誕生することになった。その後も主として多くの私立大学が創設され、現在のわが国の新制大学数は約500を数え、それらの内、工学部を有する大学は約140大学に達している。また、昭和37年には旧制の工業専門学校に対応する工業高等専門学校が創設され、現在国立のもの54校、公立及び私立のもの8校、計62校が存在している。

## 2. わが国の工学系高等教育制度の現状

新制大学においては、旧制時代3年間の理科室基礎教育機関であった旧制高等学校と3年間の専門的知識の教育機関であった旧制大学とにおける教育内容が、2年間の教養課程と2年間の専門教育課程とで行われることになった。また、旧制時代2時間の講義は120分で行われていたが、新制になった現在では90分に短縮されている。さらに、卒業に必要な専門科目の履修条件も緩和されたため、新制大学における専門教育時間は旧制時代の約1/3に圧縮されることになった。表1は、工学部の代表的な学科である機械工学科の履修科目とその受講時間とを、旧制大学と新制大学とで比較して示したものである。この表から分かるように、旧制大学にあって約2,900時間を要した受講時間が新制大学では約950時間でよいことになり、特に実験・実習時間が大幅に削減されることになった。このような条件の下では、社会の期待する工学技術者の養成はできないとの考えの下で、京都大学工学部では、機械工学科を中心として、修学年限を1年延長した5年制の教育を提唱し、昭和30年から

\*この総説は、放送教育開発センター研究紀要8号「わが国の工学系高等教育について」に準拠して行われた平成5年6月開催の水曜会大会における特別講演会の原稿である。

\*\*京都大学名誉教授

表1 機械工学学科における履修科目、単位及び受講延実時間数の比較

旧制大学				4年制大学				高等専門学校			
科目名	単位	授業時間数	延時間数	科目名	単位	授業時間数	延時間数	科目名	単位	授業時間数	延時間数
機械工学実験	21	252.0	552.0	機械製作実習	1	45.0	315.0	工作実習	9	270.0	585.0
機械製作実習	9	108.0		機械工学実験	2	90.0		工学実験	4.5	135.0	
機械製作法	8	96.0		機械製作	4	180.0		機械工学演習	2.0	60.0	
工作機械	4	48.0						機械工作法	4.0	120.0	
精密機器	4	48.0						設計製図 *	17.0	510.0	
設計製図	69	828.0	996.0	設計製図	4	60.0	150.0	設計製図	17.0	510.0	630.0
機械力学	4	48.0		設計工学	4	60.0		工作法特論	4.0	120.0	
機械構造学	10	120.0		機械要素	2	30.0					
数学解析	14	168.0	168.0	工業数学	6	90.0	150.0	応用数学	4.0	120.0	210.0
				計算機数学	2	30.0		数値計算	1.0	30.0	
				応力解析	2	30.0		情報処理	2.0	60.0	
材料力学	12	144.0	264.0	材料力学	2	30.0	120.0	材料力学	7.0	210.0	270.0
構造力学	4	48.0		弾性力学	2	30.0		工業力学	1.0	30.0	
工業力学	6	72.0		構造力学	2	30.0		機械力学	1.0	30.0	
				工業力学	2	30.0					
金属学	6	72.0	72.0	機械材料学	4	60.0	90.0	材料学	2.0	60.0	90.0
				金属材料学	2	30.0		金属物理学	1.0	30.0	
水力学	6	72.0	216.0	流体力学	4	60.0	120.0	水力学	2.0	60.0	150.0
伝熱学	4	48.0		流体工学	2	30.0		流体力学	1.0	30.0	
水力機械	6	72.0		伝熱学	2	30.0		流体機械	1.0	30.0	
送風機	2	24.0						伝熱工学	1.0	30.0	
応用熱力学	4	48.0	288.0	熱力学	4	60.0	120.0	熱力学	2.0	60.0	150.0
内燃機関	10	120.0		内燃機関	2	30.0		熱機関	2.0	60.0	
蒸気罐	4	48.0		応用熱力学	2	30.0		熱工学特論	1.0	30.0	
蒸気原動機	6	72.0									
測定法	6	72.0	144.0	制御工学	4	60.0	90.0	自動制御	1.0	30.0	90.0
材料試験法	2	24.0		計測制御	2	30.0		計測制御	2.0	60.0	
応用電気測定法	4	48.0									
振動学	6	72.0	192.0	生産工学	4	60.0	150.0	生産工学	1.0	30.0	270.0
電気工学	10	120.0		振動学	4	60.0		機械学	2.0	60.0	
				一般電子工学	2	30.0		電気工学概論	2.0	60.0	
								科学機器特論	1.0	30.0	
						化学工学概論	2.0	60.0			
						環境工学	1.0	30.0			
合計	241	2892.0	2892.0	合計	73	1305.0	1305.0	合計	81.5	2445.0	2445.0
実験・実習			(41.5%) 1188.0	実験・実習	7		(24.1%) 315.0				(36.2%) 885.0
講義			(58.9%) 1704.0	講義	66		(75.9%) 990.0				(63.8%) 1560.0
卒業に必要な単位	230			61.0			74.0				
延実時間数	2892.0			延実時間数 (1305.0×45/60)			978.8	延実時間数 (2445.0×50/60)			2037.5

\* 設計製図のうち7単位分は講義である。  
また、この中には、CADに関する講義も含まれている。

その実施に踏み切った。しかし、終身雇用制を取るわが国の企業は、即戦力としての専門的能力よりも本人の資質と潜在的な能力とに期待し、社内教育によって専門技術

者に育てればよいとする傾向が強いこと、またこの提唱に追従する大学がなかったことなどにより、この制度は昭和36年頃に打ち切られた。しかし、学部教育だけでは

十分な専門教育は不可能であるとの認識は変わらず、京都大学工学部は全国の大学に先駆けて修士課程の定員を1.5倍に改め、大学院の整備・充実本格的に取り組むことにより、工学技術者の完成教育を目指すことになった。

一方、企業においては、旧制時代のテクノロジーに重点を置いた専門学校教育に相当する、学理に基づいた実践的技術者の養成機関の創設に対する要望が高まり、昭和37年に5年間の一貫工業教育を行う工業高等専門学校が生まれた。その教育内容は、表1が示すように、専門科目の受講時間が約2,000時間に達する実験・実習にかなりの重点を置いたものとなっており、一応工学技術者の完成教育機関となっている。しかし、工業技術の急速な発展に対処するためには、さらに高度な教育が必要であるとの認識から、平成3年に学校教育法の一部が改正され、平成4年から高等専門学校の課程の上に工学士の学位取得可能な2年間の専攻科の設置が認められることになった。このことにより、わが国の工学系技術者の教育方法は、大学の(学部+修士)という制度と、高等専門学校の(本科+専攻科)という制度との下で、再び複線化されることになった。

### 3. わが国の工学系高等教育内容に対する検討

米国における大学の学部課程の教育目的は、人文社会に関する素養を深めるとともに、専門に係わる基礎学力を養うこととされており、高級技術者や研究者となるために必要な専門的知識や研究能力の修得は、大学院・修士課程の教育目的とされている。このような理念に立てば、新制大学の4年間の修学期間の内、専門課程は2年間でよいことにもなる。しかし、高度な技術者・研究者の養成を目的としていた旧制大学が新制大学になったからといって、急にその理念を変えることは難しく、また、その後創設された多くの新制大学も旧制大学系の方針を見倣ったため、新制大学における技術者教育は理念と実際との間に多くの矛盾を含んだまま量的に拡大され、現在では18才人口の約23%、工学部門のみでは約5%の者が大学へ進学している。

旧制時代の大学進学率が約5%であったことを考えれば、戦後の学制改革はいわゆる技術者層のボトム・アップには大いに有効ではあった。しかし、全ての旧制大学も新制大学に移行したことにより、トップ・ダウンがもたらされたことも事実で、現在のわが国の大学は、知識創造型の技術者・研究者の養成機関とはなっていない。

上述のように、わが国の大学の工学部を卒業するのに必要な専門科目の単位修得のための総受講時間は950時間程度でよいことになっている。わが国と同様4年間の修学年限を持つ米国やドイツにおけるこの受講時間は、大学により幾分の差はあるものの、いずれも2400時

間を越えている。特にドイツでは、1年間の工場実習が義務付けられているので、これを加算すれば、卒業のための専門科目の履修時間は3000時間を越えるものとなっている。

京都大学の場合、授業は通常午前2こま、午後2こまで行われているので週20こま、1こま90分であるから1週間の授業時間は30時間となる。授業は1年間に30週行われるから、年間授業実時間は900時間となる。講義は45分×15=11.25時間、実験・実習はその3倍の時間でそれぞれ1単位であるが、表1から判るように、授業の大部分は講義科目であるから、1年間で大体70単位の修得が可能である。この値は特別研究を含む卒業に必要な66単位を上廻るものとなっている。従って、学生はあくせく勉強をする必要はなく、大学は受験戦争での疲れを癒すための憩いの場となっている。

日本国政府は紀元2000年迄に海外からの留学生を年間10万人受け入れられるようにすることを国際的に公約している。これが実現すれば、工学部へ毎年入学する留学生の数は約2万人と見込まれる。これらの留学生の大部分は4年後900時間の専門教育を受けて帰国するので、当然それら帰国学生の学力の比較が行われることになる。授業時間の多寡はかならずしも学力の優劣に直接比例するものではないが、大きな要因であることは確かである。そのため、わが国で工学を学んだ学生の学力が米国やドイツで学んだ学生のそれと比較して劣っていることは、特に発展途上国において顕著に立証されつつある。そのため、わが国へ留学した者が帰国後、他の先進国へ留学した者より低い評価しか得られないことも稀ではなく、それらの者はわが国に対し良い感情を抱けなくなる。すなわち、現状の大学のままで留学生を引受けることは、多大の労力と費用をかけて、対日感情の悪化を助長するだけのことになりかねない。

上述のように1年間で900時間の授業が可能であるので、2年間では1800時間、大学の設置基準が大綱化されたことを利用して、専門教育時間を2年半にすればアメリカ並みの2400時間の専門教育も不可能ではない。そのためには、1単位を取得するに要する授業時間が現在の2倍以上に変更されなければならない。このことは現在でも建築系学科で実施されている。このようにすれば、教官1人当たりの授業時間が2倍以上になるため、なかなか賛同が得られない。しかし、大学の学部は教育機関であることを大学人は改めて強く認識すべきである。例えば、ベルリン工科大学の授業は朝8時から2時間きざみで夕方6時迄、週に1日は9時迄行われていて、教官1人当たりの1週間の授業担当時間は、講義と実験・実習を併せ約16時間になっている。

現在の学部教育が十分なものでないことは、教官は勿論のこと、学生も暗に認めており、大学院の整備・充実が盛んに進められている。確かに新制大学設立の理念に従えば、高度な技術者や創造的な研究者の養成は大学院で行われることになっていて、大学院を立派なものにすることは工学教育上必要なことである。しかし、このことは学部教育が完全に行われてはじめて実効が挙がることである。わが国の工学教育の現状は、学部教育の不足分を大学院教育で補っている感がいなめない。また、大学院を充実させることにより、研究面での国際化を計ろうとするのであれば、その前に、学部における教育の質と水準の国際化が計られねばならない。

米国では各大学間の教育内容の均質化を計るため、工学系資格認定協会 ABET (Accreditation Board for Engineering and Technology) が 1932 年に設立され、この協会が 6 年毎に各大学の教育内容を査察し、その査察に合格しない大学は学位授与権を失うことになっている。1990 年には、370 校がこの査察を受け、約 40% が無条件合格、約 25% の大学には改善条項が示され、3 年後にレポートで改善結果の報告が求められ、約 25% は 3 年後に再査察、約 7% の大学は不合格になった。もし、わが国の大学がこの ABET の査察を受けたならば、合格する大学は皆無であろう。わが国にはこのような制度はなく、教育内容の設立は教授会の自治権にゆだねられているが、その構成員は易きに流れることのないよう十分な自戒が必要である。

#### 4. 工学系高等教育制度の改善

科学技術研究調査報告(総務庁統計局)によれば、現在、わが国の工学部門における研究・開発費には年間約 10 兆円弱が支出されている。この内、企業による支出は約 8 兆 5 千億円、研究機関が約 7 千億円で、大学等の研究費は約 5 千億円に過ぎない。わが国の理工学系大学等の研究機能を強化するためには、現行の科学技術予算、高等教育予算を 5 年間で倍増し、さらにその配分に当っては重点配分が必要であると経済団体連合会が提言している(1992 年 4 月 28 日)。また、ネイチャー誌(1992 年 10 月 15 日号)は、わが国の大学等の研究環境を国際水準まで高めるためには現行の 3 倍の予算が不可欠であると指摘している。これらのことが実現されれば、確かに大学等における研究のための直接費は欧米の大学に準ずるものとなるであろうが、研究室の面積と容積、研究・実験設備の保守点検体制、研究者・教育者や研究補助者の社会的地位と処遇、研究成果の評価基準等の研究環境の整備が同時に行われなければ、期待されているような結果は生まれまいであろう。しかし、わが国の国家予算を考えれば、たとえ予算の傾斜配分を行うとしても、現

存する工学系の約 140 大学と約 60 校の高等専門学校の全てを対象とすることはできない。

この問題を解決するための一つの方法は、これらの工学系高等教育機関の中から優れたいくつかの機関を選抜し、それらの機関を工学教育のトップ・アップを図るためのエリート校とすることである。

高度な高等教育を受けるにふさわしいエリートとしての素質を有する者の割合は、いずれの民族においても高々 2% に過ぎず、この内工学を志す者は統計的に見て約 1/5 である。18 才人口を 200 万人とすれば、そのような素質を持つ者の数は約 4 万人、工学部門については約 8,000 人程度となる。したがって、国際社会に通用する技術者・研究者・教育者を養成し、併せて知的貢献につながる研究を行い得る高等教育機関の年間受け入れ学生定員は 8,000 人となる。大学院修士課程の一専攻科当たりの入学定員を 650 人とすれば 12 専攻科、500 人とすれば 16 専攻科を選び、これらの工学専攻科を持つ大学は学部課程を持たない大学院大学とすることが、下記の理由から好ましい。すなわち、これらの大学院大学の教員は、既に専門的基礎学力を持つ学部卒業生に対し、最新の研究成果を盛り込んだ技術者教育と研究指導を行うことができるようになる。また、入学生は、当然、全国の高等教育機関から募集されることになり、進学を希望する学部卒業生は、卒業時に本人の在籍する大学の修士課程か、あるいは大学院大学の修士課程かを選ぶことになる。すなわち、どの大学に在籍していても、卒業時には対等の立場で大学院大学を受験できることになる。このことは、本人の適性や希望にかかわらず、単に高等学校卒業時の偏差値により進学する大学が決められる傾向が強い、いわゆる大学の輪切り現象の解消にもつながり、同時に大学学部の教育内容の高度化と均質化とを実現する上にも有効なものとなるであろう。

以上のように、一部の大学を改組して研究を主体とする高等教育機関に、他の大学及び専攻科を持つ高等専門学校を高度な技術者教育に重点を置いた高等教育機関とすることに対しては、多くの大学人は異を唱えるものと思われる。大学の在り方に対する国際情勢は、サッチャー政権によって断行された英国の大学の 5 段階格付けの例を挙げるまでもなく、温室的雰囲気強いわが国の状況からは想像できない程厳しいものであることを、大学人はよく認識すべきである。

# 総 説

## 走査トンネル顕微鏡 (STM) による 表面・界面の微視的研究\*

長谷川 幸 雄\*\*

Microscopic investigation of surfaces and interfaces  
by scanning tunneling microscopy (STM)

by Yukio HASEGAWA

### 1. はじめに

走査トンネル顕微鏡 (scanning tunneling microscopy; STM) は、原子を直接観察することのできる顕微鏡として注目されておりさまざまな研究分野に応用されている。実際の応用例では、ほとんどの場合、表面の像を観察するのみに使われているが、STMには、表面の像観察のみではなく他にもいろいろなユニークな機能が存在する。こうした機能については案外知られていないように思われるので、この総説では、STMの表面像観察以外の機能のうち、筆者がこれまで携わってきた手法について紹介していきたいと考えている。これが契機となって何か新しいSTMの使用法・応用のアイデアが生まれればと期待している。

まず、STMについての簡単な説明、特に、STM像が何を意味するのかについて述べたあと、表面の電子状態を高空間分解能で調べることのできる走査トンネル分光 (scanning tunneling spectroscopy; STS)、および最近流行しているSTMによる超微細加工について簡単に述べ、最後にSTMを用いた界面の研究手法の一つであるバリスティック電子放射顕微鏡 (ballistic electron emission microscopy; BEEM) について詳しく説明することにする。

### 2. 走査トンネル顕微鏡 (scanning tunneling microscopy; STM)<sup>1)</sup>

STMでは探針と試料表面との間に流れるトンネル電流を利用して表面の凹凸を検出している(図1)。トンネル電流は探針・試料表面間の距離の変動に対して極めて

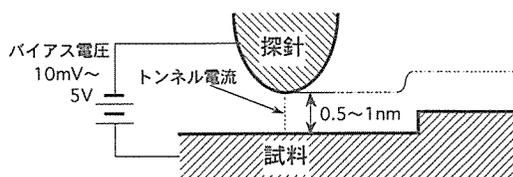


図1 STMの原理図

敏感であり、例えば距離0.1 nmの変化に対してトンネル電流は1桁変化する。したがって表面の原子による極めて微小な凹凸もトンネル電流の変化として十分に検出できるので、トンネル電流をモニターしながら探針を試料表面上で走査することによって試料表面の原子像も得ることができる。

原子像と言えば、高分解能電子顕微鏡による像を思い浮かべる方も多いと思うが、両者の本質的な違いは、高分解能電子顕微鏡の場合、試料の深さ方向には平均化された像であるのに対し、STMでは表面最外層の原子のみによる像であるという点である。物質の表面では、再構成構造と呼ばれる物質内部とは異なる表面特有の原子配列を持つことが多いが、STMではこの表面特有に配列した原子による像が観察されているのであり、逆に物質内部の構造はSTMの通常の方法では観察することはできない。

STMでは、試料表面の場所によるトンネル電流の流れやすさの違いが像のコントラストとして現われる。図2に示す通り、トンネル電流は試料表面のフェルミ準位付近の電子状態密度を強く反映するので、STM像では、フェルミ準位付近の電子状態密度が大きい領域が高く(明るく)見え、そうでない領域は低く(暗く)見える。したがって、STM像は、フェルミ準位付近の電子状態の等密度面像であると言うことができる。STM像は、試料

\*平成5年9月24日受付

\*\*京都大学工学部附属メゾ材料研究センター助手

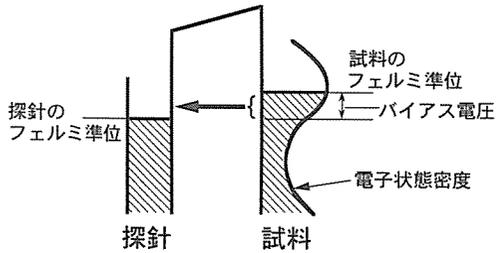


図2 トンネル電流が流れる際のポテンシャル図

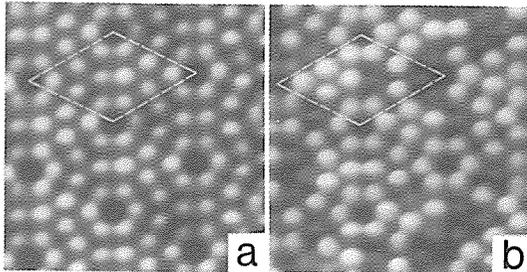


図3 Si(111) 7×7構造のSTM像 (a) 清浄表面。図中の菱形は7×7構造の単位格子；一辺の長さは2.7 nm (b) 水素原子を吸着させた表面。水素原子と結合した表面原子は暗くコントラストされている<sup>2)</sup>

表面全体の電子のうち、そのエネルギーレベルがフェルミ準位付近にあるごく限られた電子の濃度分布に相当するので、このことはSTM像が必ずしも表面の原子像に対応しているとは限らないことを意味している。金属表面の場合、STM像は比較的良好に表面の原子位置に対応しているが、半導体表面やグラファイトなど層状物質の表面では、両者が異なることは珍しくない。例えば、半導体表面では、ダングリングボンドを持つ原子がフェルミ準位付近に電子状態を持つため、そうでない原子に比べてたとえ原子の高さが同じであっても、明るくコントラストされる。また、このような表面に水素原子を導入すると、ダングリングボンドを持つ原子は水素原子と結合し準位が満たされフェルミ準位付近の電子状態は少なくなるため、STM像では暗くコントラストされる。原子構造だけ考えれば、この場合、水素原子が表面原子と結合しその上に乗っているから高くなるはずであるが、STMでは、電子状態を反映しているので、逆に低く(暗く)観察される(図3)。この点も原子核の位置が像として現われる電子顕微鏡とは異なっている。

先に、トンネル電流は試料表面のフェルミ準位付近の電子状態密度を反映していると述べたが、もう少し丁寧に言えば、トンネル電流にはフェルミ準位からバイアス電圧分のエネルギー範囲内の電子が寄与している。非常に粗い近似では、トンネル電流は

$$\text{トンネル電流} \approx \int_{\text{フェルミ準位}}^{\text{フェルミ準位+バイアス電圧}} \text{試料の電子状態密度}$$

のように電子状態密度の積分の形で書くことができる。このことから逆に、バイアス電圧を変えたときのトンネル電流を測定し、トンネル電流値のバイアス電圧での微分値(微分コンダクタンス)を求めることによって、試料表面の電子状態密度を求めることができる。このトンネル電流特性の測定を試料表面を走査しながら行い、試料表面の電子状態密度の分布像を求める手法が、次に述べる走査トンネル分光(scanning tunneling spectroscopy; STS)である。

### 3. 走査トンネル分光 (scanning tunneling spectroscopy; STS)<sup>3)</sup>

STMのトンネル電流が流れている状態で、トンネル電流・バイアス電圧特性(I-V曲線)を測定すると、その微分値 $dI/dV$ (実際には正規化した微分値 $(dI/dV)/(I/V)$ を用いることが多い)からその場所における表面電子状態密度を求められる。図4のように、試料表面上で探針を走査しながら各点でこのトンネル電流・電圧特性の測定を行えば、電子状態密度の空間分布をSTMと同様の空間分解能で測定することができる。

この測定から、ある特定の電圧での微分値を白黒の濃淡にして像にすれば、その像はその電圧値に相当するエネルギー準位における表面電子状態の分布像に相当する。例えば+0.8 Vでの $dI/dV$ の各点での値(あるいは $(dI/dV)/(I/V)$ の値)を像にすると、それはフェルミ準位から+0.8 eVのエネルギー値における表面の電子状態密度分布像となる。これらの表面電子密度像と同時に測定されたSTM像と比較することによって、例えば光電子分光によって調べられた表面電子状態のピークが、表面原子のどれに起因しているか容易に見てとることができる(図5)。STSによって測定できるエネルギー準位の幅はせいぜいフェルミ準位を中心として±5 eVとそれほど大きくはないが、エネルギー分解能も比較的

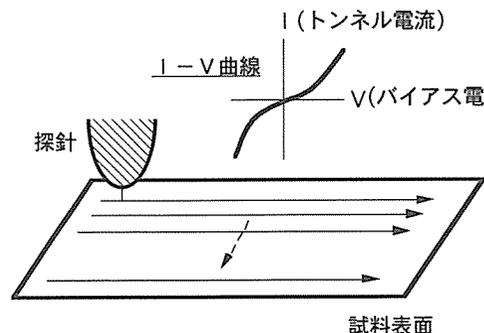


図4 走査トンネル分光 (STS)

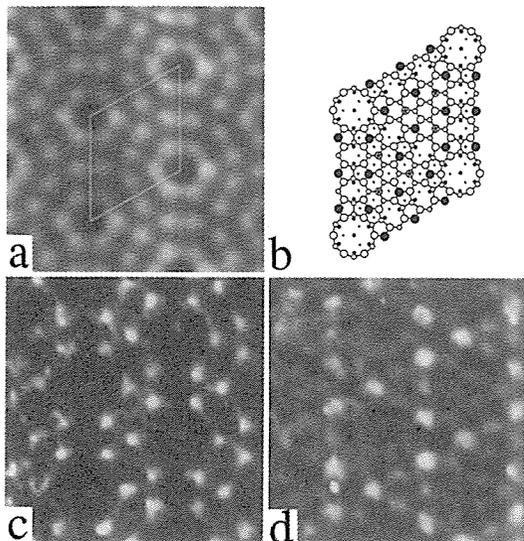


図5 走査トンネル分光の実験例：Si (111) 7×7 構造 (a) STM 像、図中の菱形は 7×7 構造の単位格子を示す (一辺：2.7 nm) (b) 7×7 構造のモデル (c) -0.8 eV での電子状態密度像 (d) -0.4eV での電子状態密度像、-0.4 eV では構造モデル中の黒丸の原子位置で状態密度が高くなっているのに対し、-0.8 eV では星印の原子位置で状態密度が高くなっていることがわかる<sup>4)</sup>

よく、また通常的手法では測定が難しい非占有準位の電子状態も占有準位の電子状態と同様に測定できる特徴もある。

さらに、STS では、その空間分解能を生かして、表面の局所的な構造に対する電子状態の測定を行うことができる。例えば、表面上のステップ (レッジ) や再構成構造の位相境界、吸着粒子、超伝導体中の磁束量子、転位芯、粒界など、局所的に存在しておりしかもその密度が小さい構造物に起因する電子状態の測定も可能となる。Au (111) 表面のステップに局在した電子状態 (定在波) の観察例を図 6 に示す。

#### 4. STM による超微細加工

STM では探針は試料表面に非常に近接しており、しかも探針の位置を試料表面に対してサブナノメートルの精度で制御することができる。このことを利用して最近、STM による超微細加工への応用が注目されている。研究例も数多くなり、原子をつまんだ・のせた・動かしたという話もさほど珍しくはなくなってきた。

原子を“つまみあげる”にもいろいろな方法があるが、電界蒸発 (表面の原子が高電界のためイオン化され表面から飛び出していく現象；電界イオン顕微鏡で実現されている現象である。) による方法が比較的よく用いられている。STM で探針と試料表面との間に印加される電圧

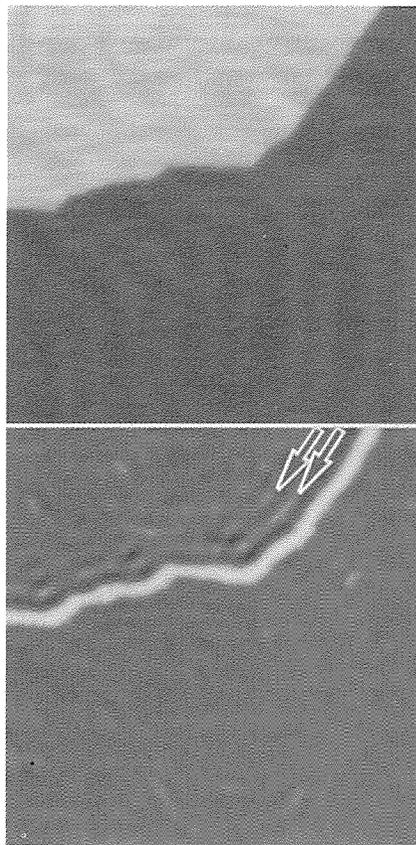


図6 Au (111) 表面のステップに局在した定在波の観察<sup>5)</sup> 上：Au (111) 表面の STM 像。下：エネルギー準位 +0.15 eV (非占有準位) での電子状態密度像。表面電子波がステップにより散乱されることにより生成された定在波 (2つの矢印で示されている) が観察されている。(観察されている領域の大きさ：32 nm×32 nm)

はせいぜい 5 V 程度でそれほど高くないが、探針と試料表面が非常に接近しているため (0.5~1 nm)、1 V/nm 以下の電界が生じている。これは原子を動かすほど強いものではなく、通常 STM ではこの電界の影響はないとされている。しかし、なんらかの方法でこの電界を高くし、数 10 V/nm 程度の電界が実現できれば、電界蒸発によって原子を探針から試料へあるいは逆方向に移動させることが可能となる。高電界を実現するためには、探針を試料表面に近づけたり、瞬間的に高電圧パルス (10 V 程度) を印加したりすればよく、このようにして表面の原子を取り除いて表面にナノメートルサイズの穴をあけることができる (図 7)。電界蒸発法の場合、電圧パルスの極性によって原子を移動させる方向をスイッチすることができるので、いったんつまみあげた原子を他の位置に置くといった芸当も可能である。

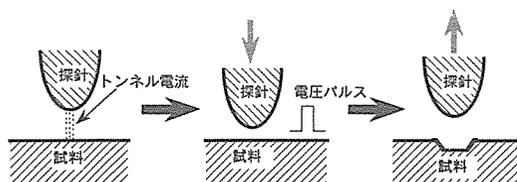


図7 STMによる表面微細加工。探針を若干(0.1~0.2 nm)近づけたのち、電圧パルス(試料に正)を加えることによって試料表面の原子を探針に移動させる<sup>6)</sup>

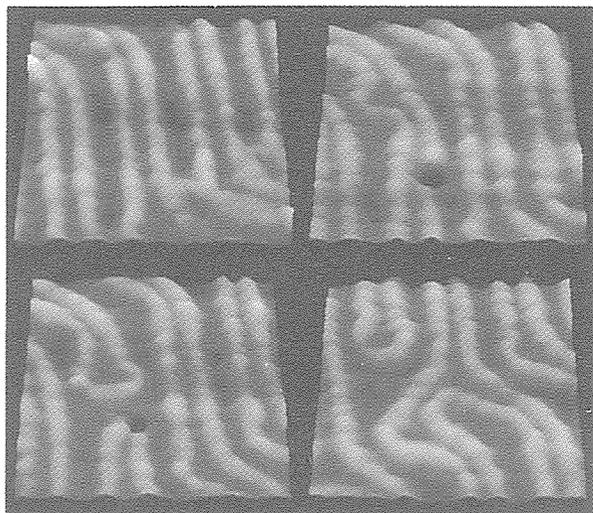


図8 Au(111)表面の再構成構造である $22 \times \sqrt{3}$ 構造(図中白いラインとして現われている)を加工した例<sup>7)</sup>。左上:加工前;この表面に図7の方法で直径 $\sim 1$  nmの穴を作成した。右上:穴を開けた直後。左下:穴を開けて9分後;ラインが上下に分かれループ状になっている。右下:15分後;穴が消滅しそれに伴い1組のライン対が隣の対と接合しフォーク状のパターンが形成されている。(像の大きさ:20 nm $\times$ 20 nm)

## 5. STMによる界面の研究

STMは表面の構造・電子状態に敏感な顕微鏡であり、その像は表面最外層の原子のみに依るものである。(もっとも、表面第二層以下の原子が表面最外層の電子状態に影響を与え、それがSTM像に間接的に現われることはあるが)この点が表面物性の研究にとっては非常に都合がよく、STMが表面物性の分野でもっともよく使われる最大の理由である。しかし、実際のデバイス・材料の評価に当たっては、表面と同様、物質間の界面のキャラクター化が重要となることが多く、STMを用いてSTMと同様の空間分解能で、界面を調べることはできればという期待は大きい。STMによる界面研究としてこれまで成果が得られているものの一つとして、バリスティック電子放射顕微鏡(ballistic electron emis-

sion microscope: BEEM)と呼ばれる手法があり最近注目されている。ここではこの手法について説明し、その実例として整合な金属・半導体界面の1つであるニッケルシリサイド/シリコン界面(NiSi<sub>2</sub>/Si(111)界面)に関する研究(注:NiSi<sub>2</sub>は電気的には金属的性質を持つ。)について述べていきたい。

### 5.1 バリスティック電子放射顕微鏡(BEEM)<sup>8)</sup>

バリスティック電子放射顕微鏡(BEEM)は、STMを基に開発された界面観察用の顕微鏡であり、特に金属・半導体界面の研究に用いられる。金属・半導体界面にはショットキー障壁と呼ばれるポテンシャルの障壁が存在し、この高さがその界面における電気伝導を支配するため半導体デバイスの配線を考える上でも重要であり、ショットキー障壁の性質・生成過程を明らかにしようとする研究は現在なお盛んに進められている。BEEMはこのショットキー障壁の高さや界面における電子の透過確率を高空間分解能で測定することのできる顕微鏡である。

BEEMの原理図を図9に載せている。試料には、半導体基板上に厚さ10 nm以下の金属薄膜を蒸着させたものを用いる。図にもあるように、探針と金属薄膜部分はSTMと同じ構成になっており、したがって、BEEMでもSTM同様に、金属薄膜表面のSTM像を撮ることができる。薄膜が十分薄いと、トンネル電流として探針から薄膜中に入射された電子の一部は、界面でのポテンシャル障壁(ショットキー障壁)を乗り越え、半導体基板中に流れ込む。この電子を、基板に付けられた電極を通して、電流(BEEM電流と呼ばれる)として検出する。BEEM電流は界面を通過した電子から成ることから界面の性質・電気的な特性に依存すると考えられる。このBEEM電流を測定することによって界面の特性を調べるのがBEEMの原理である。トンネル電流として金属薄膜中に入射される電子は非常に絞られているので、BEEMでは界面のごく狭い領域の情報を得ることができ、またSTM同様に薄膜上で走査を行いながらBEEM電流を測定すれば、界面の特性を反映した像

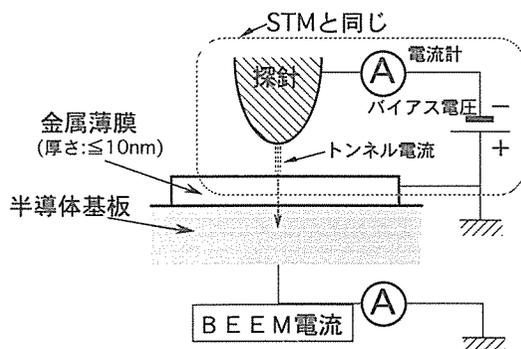


図9 BEEMの原理図

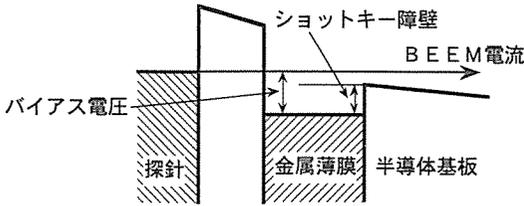
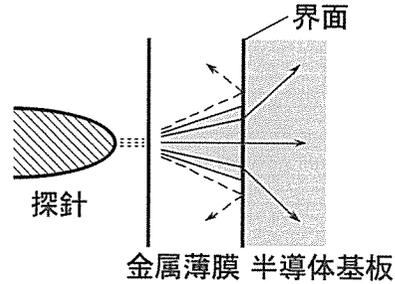


図 10 BEEM のエネルギーダイアグラム



臨界角内の電子のみBEEM電流として検出される。

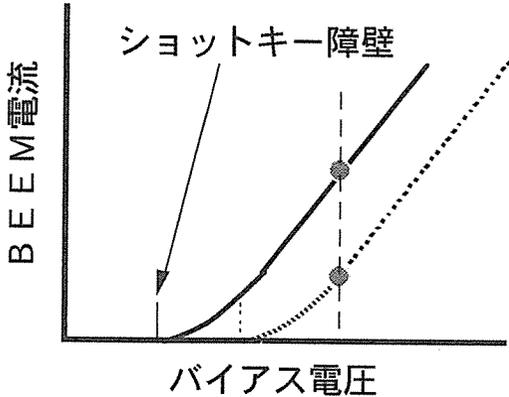


図 11 BEEM 電流・バイアス電圧特性

(BEEM 電流像) を、金属薄膜表面の STM 像と同時に、撮ることができる。

BEEM における電子のエネルギーダイアグラムは図 10 のようになる。図に示されるように、探針から入射される電子が界面を超え BEEM 電流が検出されるためには、探針に印加されるバイアス電圧が金属・半導体界面のショットキー障壁の高さより高くなければならない。もしバイアス電圧がショットキー障壁の高さより低い場合には、界面に入射される電子はそのエネルギーが低いため界面を越えられず BEEM 電流は流れない。バイアス電圧を増やしていき、ちょうどショットキー障壁の高さより大きくなったところで、電子は界面を越えるだけのエネルギーを持ちうるので、BEEM 電流は流れ始める。したがって、バイアス電圧を変えて BEEM 電流を測定することにより、BEEM 電流の立上りからその界面のショットキー障壁の高さを測定することができる(図 11)。またショットキー障壁の高さが異なっていれば、ある一定のバイアス電圧での BEEM 電流値も異なるので、このバイアス電圧に固定した状態で BEEM 電流像を撮れば、その差がコントラストの差となって BEEM 電流像中で現われる。(図 11 丸印)

BEEM の空間分解能(界面に平行方向の分解能)は、金属薄膜層中での電子の広がり具合によるので、金属薄膜の厚さに比例すると考えられる。また、金属・半導体界面のようにポテンシャルが界面で増加する場合には、界面での屈折現象(図 12)のため、臨界角内に入射された電子しか界面を透過しえなくなるので、分解能が高く

なる。例えば  $\text{NiSi}_2/\text{Si}(111)$  界面の場合、臨界角は約 5 度となり、したがって 5nm の厚さのシリサイド層に対して、分解能は 1 nm 程度となる。

### 5.2 BEEM による $\text{NiSi}_2/\text{Si}(111)$ 界面の研究<sup>9)</sup>

$\text{NiSi}_2$  と Si は、その格子定数の差が 0.4% と極めて小さいことから、整合な界面を形成することが知られており、その界面は整合な金属・半導体界面の一つとして注目されている。(111) 界面の場合、 $\text{NiSi}_2$  と Si の方位関係から 2 種類の界面、すなわち、 $\text{NiSi}_2$  と Si の方位が同じ方向を向いている type A と、180 度回転して反対方向を向いている type B の 2 つの種類界面が存在する<sup>10)</sup>。興味深い点はこの 2 種類の界面でショットキー障壁の高さが異なることであり(type A は 0.65eV、type B は 0.79eV)<sup>11)</sup>、したがって、界面の type によって BEEM 電流の特性が異なることが期待される。

実際、type A の界面のみからなる試料あるいは type B の界面のみを持つ試料を用いて BEEM の測定を行ったところ、図 13 のような BEEM 電流・バイアス電圧特性が得られた。BEEM 電流は、いずれもそれぞれの type のショットキー障壁の高さに相当する電圧で立ち上がっており、その立上りの電圧が異なることから、type A と type B では明らかに異なる BEEM 電流特性が得られる。例えば 1.5 V での BEEM 電流値をみてもかなり差があることがわかる。したがってこの測定から、BEEM によって確かに  $\text{NiSi}_2/\text{Si}(111)$  の 2 種類の type A と type B の界面を識別でき、もしバイアス電圧を 1.5V に設定した状態で BEEM 電流像を取れば両者の差を BEEM 電流の差として検出できることが期待される。

そこで、我々は、このショットキー障壁の高さの異なる 2 種類の界面が混在する試料を用い、その境界部分でショットキー障壁の高さがどのように変化するか一例えば、ショットキー障壁の高さが境界近傍で急激に変化するのか、徐々に変化するかを BEEM で調べることを試みた。type A と type B の界面が混在した試料を用いてその両者の界面の境界部分を見つけるには、STM で観察されるそれぞれのドメインがどの type の界面を

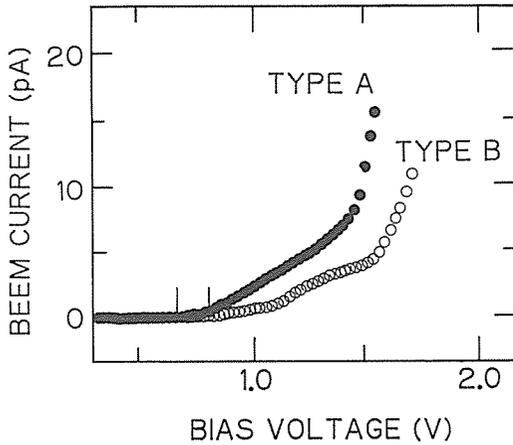


図 13 type A のみ, type B のみの界面を持つ  $\text{NiSi}_2/\text{Si}$  (111) 界面で測定された BEEM 電流・バイアス電圧特性

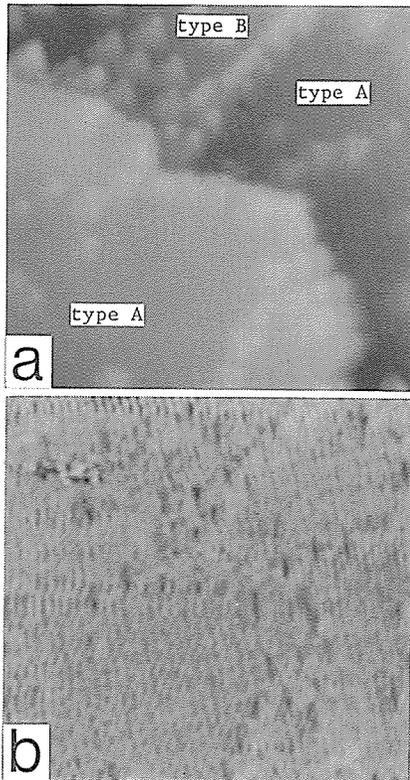


図 14 バイアス電圧 0.15 V での  $\text{NiSi}_2$  (111) 表面の STM 像(a)と  $\text{NiSi}_2/\text{Si}$  (111) 界面の BEEM 電流像(b)両者は同時に測定されている (サイズ: 12 nm×10 nm)

持っているかを識別する必要がある。都合の良いことに、 $\text{NiSi}_2$  (111) 表面上には Si による三量体が存在しており、詳しくはここでは述べないが、 $\text{NiSi}_2$  (111) 表面の STM 像からこの三量体の向きを目印として各ドメインの type を決定できることがわかっている。

type A と type B の界面が混在した試料を用いて、

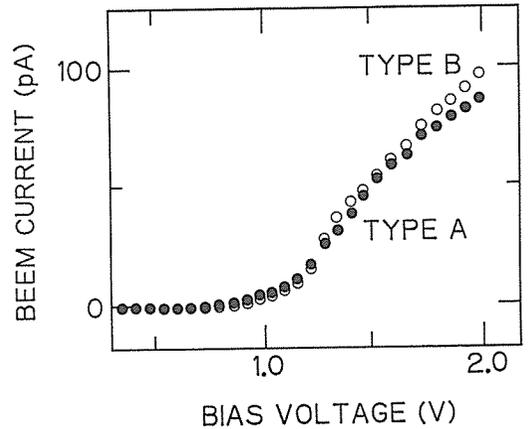


図 15 type A と type B のドメインの境界部分で測定された BEEM 電流・バイアス電圧特性

STM 像から界面の type を同定した上で type A と type B の界面を持つドメインの境界部分を見つけ、その近傍での BEEM の測定を行ったところ、図 14 のようなデータが得られた。(a)は  $\text{NiSi}_2$  (111) 表面の STM 像であり、(b)はそれと同時に測定されたバイアス電圧 0.15 V での BEEM 電流像である。STM 像の左上のドメインは type B の界面を持ち、他のドメインでは type A の界面を持っているが (表面上に存在している三量体の向きが type A と type B の界面を持つドメインで異なっていることに注目されたい。これは、type B のドメインの  $\text{NiSi}_2$  層の方位が type A のそれに対して 180 度回転していることによる。type B のドメインでは三量体は上向きであり、type A のドメインでは下向きである。)、(b)の BEEM 電流像を見ると両 type の間にはほとんど差が見られない。境界近傍 (境界から 5 nm 以内) で BEEM 電流・バイアス電圧特性も測定しているが (図 15)、やはり両 type の界面でその特性にさほど違いは観察されず、その立上りの電圧は図 13 で測定された type A と type B の界面で測定された値のほぼ中間となっている。これらの実験事実は、type A と type B の界面を持つドメインの境界部分では、ショットキー障壁が平滑化され、その高さが両者の中間の値となっていることを意味している。そしてこのことは、境界近傍では半導体基板内部のポテンシャルが平滑化されるためであると考えられる。

ショットキー障壁の高さが異なる 2 つのドメインを近接させた場合、境界部分で半導体内部のポテンシャルにステップが生じる (図 16 実線)。しかし半導体内部の電荷密度は限られているので、急峻にそのポテンシャルを変化させることはできず、平滑化されてしまう (図 16 点線)。その結果、ショットキー障壁の高さも平均化され、境界近傍では type A と type B のドメインでの BEEM 電流の差が小さくなると考えられる。境界近傍でのポテ

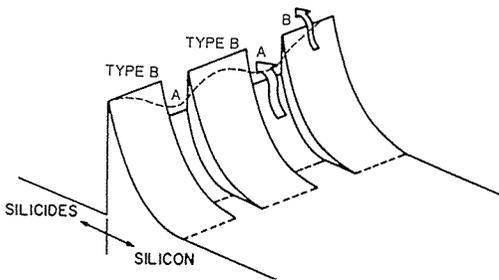


図 16 異なるショットキー障壁を持つドメインを持つ金属・半導体界面における電子のポテンシャルダイアグラム. type A と type B の境界部分ではポテンシャルが平滑化され (図中点線), ショットキー障壁の高さが徐々に変化していることを示している.

ンシャル分布をポアソン方程式を解くことによって計算したところ (我々の用いた試料のデバイ長は約 60 nm), 確かに, 境界近傍ではポテンシャルが平滑化され, 5 nm 以内の領域では type A と type B でほとんど差がなくなるという結果が得られており, 実験結果をうまく説明している.

このようなショットキー障壁の微視的・局所的な測定はこれまでの測定法, 例えば I-V 法や C-V 法では空間分解能がないため不可能であり, ここで示された平滑化現象は BEEM によって初めて実験的に立証されたものである.

## 6. おわりに

これまで, STM による表面像観察以外の機能のいくつかについて述べてきたが, もちろんこの他にも多くの機能・応用が知られている. トンネル電流の代わりに原子間力をプローブとした原子間力顕微鏡 (atomic force microscope; AFM) は, 絶縁体表面でも観察可能なことから幅広い分野で用いられており, また磁気力をプローブとした磁気力顕微鏡 (magnetic force microscope) も磁区観察などに用いられている. まだ信頼性が十分あるとは言えないが, 表面原子のスピンの状態の分布を測定した例や, 表面に局在した電子スピンの共鳴を検出した例なども報告されており, さらに, 磁気力顕微鏡による核磁気スピン共鳴検出の可能性も議論されている.

他の一般的な表面分析手法とは異なり, STM や AFM は超高真空を必要とせず大気中や液体中でも測定可能であることから, STM や AFM は, 液晶などの有機物質や DNA など生体物質の観察にも用いられている. 液体中の研究では特に電気化学の分野に盛んに用いられており, 反応液中での金属表面の原子像も観察されている.

現在の段階ではまだ具体的に材料科学の研究で

STM・AFM が活用された例は少ないが, 今後, さらに材料研究にも応用されその開発に活用されるようになると思われる. また, 近い将来, STM による超微細加工・原子マニピュレーションの技術を使って原子を 1 つ 1 つ動かし, 新しい機能を持つ材料が構築されるのではないかと期待している.

## 7. 謝 辞

ここに紹介した研究は, メゾ材料研究センターの酒井明教授をはじめとして, 東北大学金属材料研究所の桜井利夫教授・橋詰富博助教授, ソウル国立大学の Young Kuk 教授, IBM ワトソン研究所の Phaeton Avouris 博士の御指導・御協力により行われたものです. ここで謝意を表したいと思います.

## 参 考 文 献

- 1) G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber, and E. Weibel, Phys. Rev. Lett., 49, 57 (1982). STM に関する解説記事は多数ある. 1 例として次のもの挙げておく. 桜井利夫・橋詰富博・酒井明, 「表面を見る—走査トンネル顕微鏡の最近の話題」大槻義彦編, 物理学最前線 29, p. 123, (共立出版, 1992 年). また最近, 日本結晶学会誌に STM の特集号が出されている (35 巻 2 号 (1993 年)) ので, 興味ある方は参照されたい.
- 2) T. Sakurai, Y. Hasegawa, T. Hashizume, I. Kamiya, T. Ide, I. Sumita, H. W. Pickering, and S. Hyodo, J. Vac. Sci. Technol. A8, 259 (1990).
- 3) R. J. Hamers, R. M. Tromp, and J. E. Demuth, Phys. Rev. Lett. 56, 1972 (1986).
- 4) 桜井利夫・長谷川幸雄, 金属, 61, No. 5, 11 (1991).
- 5) Y. Hasegawa and Ph. Avouris, Phys. Rev. Lett., 71, 1071 (1993).
- 6) I-W. Lyo and Ph. Avouris, Science, 253, 173 (1991).
- 7) Y. Hasegawa and Ph. Avouris, Science, 258, 1763 (1992).
- 8) W. J. Kaiser and L. D. Bell, Phys. Rev. Lett. 60, 1460 (1988). 日本語による解説として次のものを挙げておく. 長谷川幸雄・桜井利夫, 表面科学, 12, 424 (1991).
- 9) Y. Hasegawa, Y. Kuk, R. T. Tung, P. J. Siverman, and T. Sakurai, J. Vac. Sci. Technol. B9, 578 (1991).
- 10) R. T. Tung, J. M. Gibson and J. M. Poate, Phys. Rev. Lett. 50, 429 (1983).
- 11) R. T. Tung, Phys. Rev. Lett. 52, 462 (1984).

# 総 説

## 高分解能電子顕微鏡で見たナノ・スペース\*

奥 健 夫\*\*

Nano-Space Observation by High-Resolution Electron Microscopy

by Takeo OKU

### I. はじめに

今時の裕福な人々といえば、学生、OLであり、彼らは気軽に海外旅行に行く。当研究室の学生もかなり行っているようだが、筆者の大学時代の友人で給料、ボーナスすべて海外旅行につぎこんでいる人物がいる。彼は古代の遺跡に非常に興味を持っておりメキシコ、ネパール、パキスタン、イラン、チリ、インド、ロシアなど様々なところに行っているが、その中でもエジプトのピラミッドは巨大で非常に印象深かったそうである。図1はそのエジプトのピラミッドの写真であるが、これは今から4600年前、クフ、カウラー、メンカウラー3人の王様のピラミッドである。このピラミッドは2.5トンの石を280万個、毎年10万人の労働者を使い、20年がかりで高さ150メートル積み上げたものである<sup>1,2)</sup>。

ここで問題を出してみよう。このような巨大なピラミッドを作れと言われたらあなたならどうするであろうか？

①そこら辺にある石ころをひろってきていきなり適当に

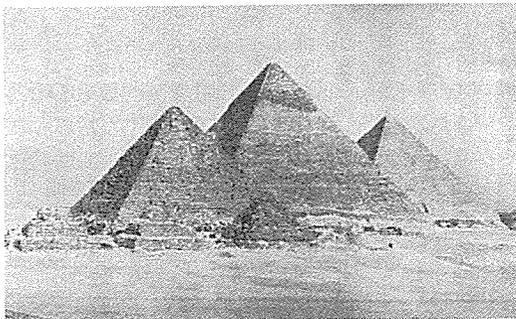


図1 右からクフ、カウラー、メンカウラーのピラミッド<sup>2)</sup>。

積み上げる (いきあたりばったり)

②文明の進んだ宇宙人を呼び寄せ作ってもらおう (他力本願)

③あきらめる (人間あきらめが肝心)

④じっくり考え、積み上げる石の性質、積みあげる方法、全体の構造を考え、実際の工事にとりかかる

もちろん優秀な読者の方々は④を選ぶと思われるが、筆者は今までの自分の人生を振り返ってみると①～③までの結果に終わりそうである。

さて、近年の産業をささえる材料開発は、この巨大なピラミッドの建設と同様、材料の性質、材料の組み合わせ方、全体の構造を熟考して行われる。この中でも、材料の性質や材料の組み合わせ方、つまり原子配列や微細構造はナノ・スペースに対応しており、このナノ・スペースの情報を得ることは、材料設計の指針となり、さらに新たな材料開発へとつながる。そのため最近の材料開発においては、ナノ・スペースの情報を得ることが必要不可欠となっている。

ここでは、最近発見され、従来の超伝導材料をはるかに上回る超伝導転移温度及び臨界磁場をもつため、リニア・モーターカーや核融合炉超伝導マグネットなど様々な分野で大きなインパクトを与えるものとして多大な期待がよせられている高温超伝導酸化物をとりあげてみる。この超伝導体の理論的解明及び高性能材料の開発のためには、超伝導体の結晶構造及び微細構造を明らかにすることが非常に重要となってくる。そこでここでは、構造解析の手段として、世界最高級の分解能をもつ超高分解能電子顕微鏡を用いて、ナノ・スペースにおける超伝導体の構造、欠陥、組織の観察を行い、その結晶構造及び微細構造を明らかにし、高分解能電子顕微鏡がナノ・スペースの情報を直接的に得るのに非常に有力な手段であることを示すことを目的とした。

\*平成5年10月27日受付

\*\*京都大学工学部金属加工学科 助手

## II. 高分解能電子顕微鏡観察

高分解能電子顕微鏡を用いた構造解析の利点を挙げてみると次のようになる。

### ①未知の物質の直接的な解析

物質の原子配列、単位胞の配列を直接見ることができ、そのため X 線回折や中性子回折では解析できない複雑な構造も、直接的に解析できる。

### ②原子配列の局所的な乱れの解析

X 線や中性子線を用いた放射線回折法は、逆空間の情報量を測定するため平均的な原子配列に関する情報を得るには最適だが、欠陥構造、表面構造といった、原子配列の局所的な乱れに関する情報を得るには、高分解能電子顕微鏡の方がはるかに強力である。

### ③少量の試料、混相の試料の解析

新しい物質を合成する際、単相のものが得にくい場合が多いので、多量の単相の試料を必要とする X 線、中性子回折より解析しやすい。

これらの特長を見れば、高分解能電子顕微鏡が超伝導酸化物の構造解析に最適であることがわかる。また他の手段では解析困難である 5 回対称構造や半導体界面の構造解析にも非常に役立つ<sup>3-6)</sup>。実際の電子顕微鏡用試料作製は、粉碎法及びイオンミリング法を用いて行い、電子顕微鏡観察は、トップエントリー型ゴニオメーターを装備し、世界最高級の点分解能 (0.17 nm) をもつ JEM-4000 EX を用いて行った。またシミュレーション、画像処理、イメージングプレート解析は、大型計算機 (ACOS-2020) を用いて行った。

## III. 結晶構造像の撮影条件及び得られる情報

### III-1 結晶構造像の撮影条件

高分解能像は 2 つ以上の波の干渉によって生じる位相コントラストであり、位相コントラストを作る波の配置や状況によって、種々の高分解能像が得られる<sup>7-9)</sup>。

図 2 は現在、Hg 系につづいて世界最高クラスの超伝導転移温度をもつ ( $T_c = 123 \text{ K}$ )  $\text{TlBa}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_{11}$ <sup>10,11)</sup> の高分解能像である。3 つの像はいずれも全く同じ試料を全く同じ倍率で撮影したものであるが、撮影条件が異なるためにとっても同一の試料には見えない。図 2 (A) は、200 kV 電子顕微鏡によって撮影した一次元の格子像であり、電子線を c 軸に垂直に入射して撮影した像である。Tl, Ba 層の区別はできないが、規則的な酸素空孔の存在する Ca 層は、明るく白い直線として写っている。図 2 (B) は、200 kV 電子顕微鏡によって撮影した二次元の格子像であり、電子線を a 軸に平行に入射して撮影したものである。動力学的回折効果のために、酸素空孔の存在する位置は明るく強調された白丸として写っている。

しかし結晶中のポテンシャルを正確に反映した像にはなっていない。図 2 (C) は、400 kV 電子顕微鏡によって撮影された結晶構造像であり、電子線を a 軸に平行に入射して撮影したものである。この像は多種類の波の干渉により結像された像で、結晶中のポテンシャルを直接的に写しだしている。

超伝導酸化物の原子配列を議論する際には、図 2 (C) のような多種類の波を用いた結晶中のポテンシャルの直接的な投影を示す結晶構造像が必要になる。また、図 2 (A), (B) のような格子像は単位胞スケールの議論をするとき (例えば、欠陥構造、微細構造、変調構造など) に有効である。

結晶構造解析に適した、結晶中の原子配列を直接的に反映した像 (結晶構造像) は、ある特定の非常に限られた条件のもとで撮影される。ここでは結晶構造像の撮影条件として、対物レンズのデフォーカス量  $\Delta f$  及び結晶の厚さ  $t$  をパラメーターとしシミュレーションを行い、結晶構造像を撮影できる厚さ及びデフォーカス量を明らかにする。

図 3 は、 $\text{TlBa}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_{11}$  の厚さによる像変化を計算したものである。対物レンズのデフォーカス量 ( $\Delta f$ )

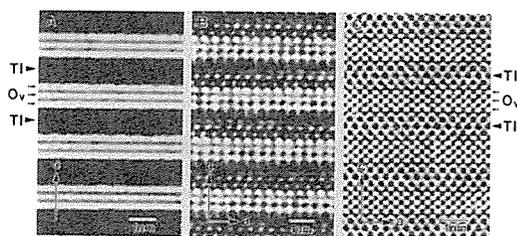


図 2  $\text{TlBa}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_{11}$  の高分解能像。  
(A) 200 kV 電子顕微鏡によって撮影された一次元の格子像。  
(B) 200 kV 電子顕微鏡によって撮影された二次元の格子像。  
(C) 400 kV 電子顕微鏡によって撮影された結晶構造像。

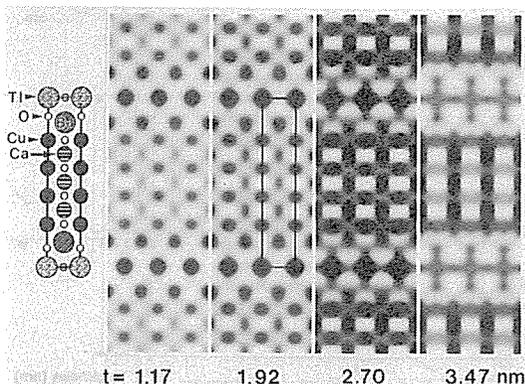


図 3  $\text{TlBa}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_{11}$  の計算像の厚さ変化。  
 $\Delta f = 45 \text{ nm}$ 。

は 45 nm とした。結晶の厚さが 2 nm を越えると像が大きく変化し、結晶中のポテンシャルの直接的な投影と一致しなくなってくる。

図 3 の様な結晶構造像は多数の電子波の干渉によって形成される。図 4 は、 $\text{TiBa}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_{11}$  の、結像に寄与する波の振幅の試料厚さ依存性を示したものである。一般に、構造解析に適した、結晶中のポテンシャルの直接的な投影を表す構造像が観察されるのは、結像に寄与する波のうち最も強い波が極大となる前までの厚さである。図 4 で見ると、結像に寄与する波の振幅が結晶の厚さに対してほぼニアに増加していく厚さ、例えば 102, 103, 200, 008 反射が極大をとる約 2 nm までが、構造解析に適した構造像であるのがわかる。

以上の結果から、超伝導酸化物の構造解析に適した、結晶中のポテンシャルの直接的な投影を表す構造像が観察される厚さは、約 2 nm までであるということがわかる。

構造像に大きな影響を与えるもう一つの因子として、対物レンズのディフォーカス量がある。理論的には、装置の条件より結晶中のポテンシャルの投影を表す構造像が計算できる。この時のディフォーカス量を Scherzer's optimum defocus ( $\epsilon_s$ ) と呼んでいる。しかし実際の結晶で構造像が得られる最適焦点は、 $\epsilon_s$  より正焦点側にずれる。このずれ量は、結晶の種類及び厚みによって異なる。

図 5 は、 $\text{TiBa}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_{11}$  の計算像の対物レンズのディフォーカス量変化を示したものである。結晶の厚さ ( $t$ ) は 1.924 nm とした。アンダーフォーカス側に 35

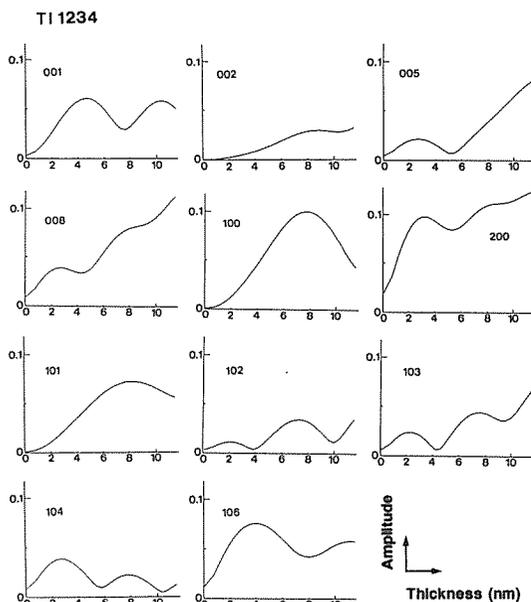


図 4  $\text{TiBa}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_{11}$  の結像に寄与する波の振幅の試料厚さ依存性。

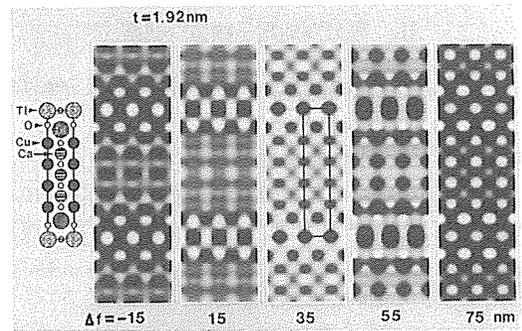


図 5  $\text{TiBa}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_{11}$  の計算像のディフォーカス量変化。試料厚さ  $t = 1.92 \text{ nm}$ 。

nm の位置で、結晶中のポテンシャルの直接的な投影を表す構造像が得られており、そこからわずか 20 nm ずれただけでも大きく像が変化することがわかる。

図 5 や他の超伝導酸化物の像計算の結果から、対物レンズのディフォーカス量 ( $\Delta f$ ) が 35~45 nm の範囲で、超伝導酸化物の構造解析に適した、結晶中のポテンシャルの投影を表す構造像が得られることがわかる。

以上の結果をまとめると超伝導酸化物の結晶構造像の撮影条件は次のようになる。

結晶構造像の撮影条件

- ・結晶の厚さ  $t \leq 2 \text{ nm}$
- ・対物レンズのディフォーカス量  $\Delta f = 35\text{--}45 \text{ nm}$

実際の撮影時には次のことも要求される。

- ・完全な非点収差補正
- ・電子線の正確な結晶主軸上照射
- ・試料のダメージを避けるための最小限の電子線照射量
- ・電子顕微鏡の鏡体は人間の声にも共振するため最小限の振動

この様にこれらの非常に厳しい条件をクリアして得られた構造像が、ようやく結晶構造解析に適用できるわけである。

### III-2 結晶構造像から得られる情報

結晶の厚さが非常に薄い場合、構造像の像強度  $I(r)$  は

$$I(r) \approx 1 - 2\sigma\phi_p(r)$$

で表される。ここで  $\sigma$  は電子顕微鏡の加速電圧で表される相互作用係数であり、 $\phi_p(r)$  は結晶ポテンシャルの入射電子線方向への投影を表している。これより像中には  $\phi_p(r)$  が反映されることになる。この近似によると、 $\phi_p(r)$  の値が大きい位置は暗いコントラスト(黒点)を、一方、 $\phi_p(r)$  の値が小さい位置は明るいコントラスト(白点)を呈する。つまり、結晶内のポテンシャルの高い部分=原子番号の大きい重原子位置は、黒さが濃く大きいコントラストを示すわけである。実際に観察した構造像において(例えば図 2 (C))、重原子が存在する位置は、

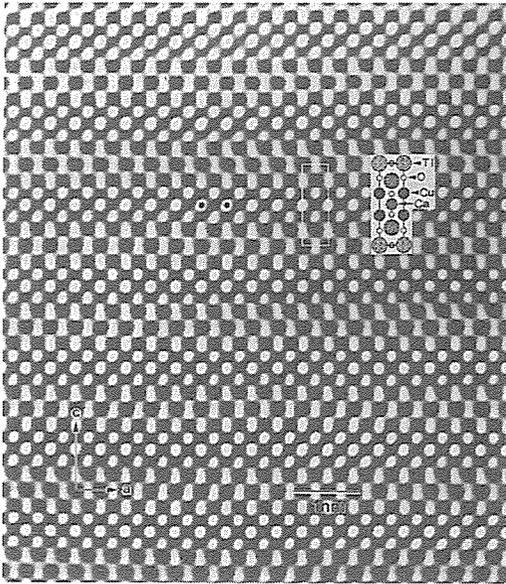


図6 TlBa<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>7</sub> の a 軸入射高分解能像.

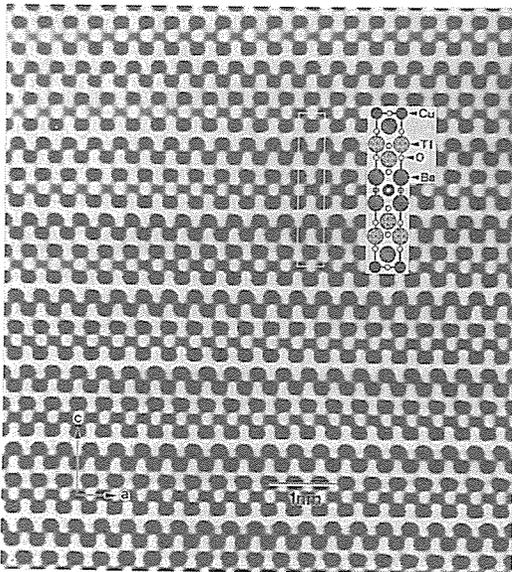


図7 Tl<sub>2</sub>Ba<sub>2</sub>CuO<sub>6</sub> の a 軸入射高分解能像.

黒さが濃く大きく写っていることがわかる。以上のように、実際の観察像のコントラストの黒化度から、金属原子の種類に関する情報を得ることができる。また、次節で述べるように、構造像及びシミュレーション像との対応から、原子番号の小さい酸素原子位置も決定できる。

金属原子の種類が明らかになったところで、もう一つ知りたい情報がある。それは金属原子の位置である。

ここでは、構造像中に現れる黒点の中心、つまり、重原子の存在する位置の測定によって、金属原子の座標決定をどの位の精度で決定できるかを検討してみる。TlBa<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>7</sub> (図6)<sup>12)</sup>及び Tl<sub>2</sub>Ba<sub>2</sub>CuO<sub>6</sub> (図7)<sup>13)</sup>の構造像から、金属原子の z 座標を読みとり、X 線回折法

表1 構造像と X 線回折法により測定された金属原子の z 座標の比較.

TlBa <sub>2</sub> CaCu <sub>2</sub> O <sub>7</sub>		
	構造像	X 線回折法
Tl	0.0	0.0
Ba	0.207	0.213
Cu	0.371	0.370
Ca	0.5	0.5

Tl <sub>2</sub> Ba <sub>2</sub> CuO <sub>6</sub>		
	構造像	X 線回折法
Tl	0.206	0.2027
Ba	0.084	0.0830
Cu	0.0	0.0

表2 構造像から測定した金属原子の z 座標の値と X 線回折(精度~0.0001 nm)による値との誤差.

	最大誤差
TlBa <sub>2</sub> CaCu <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	0.0076 nm
Tl <sub>2</sub> Ba <sub>2</sub> CuO <sub>6</sub>	0.0078 nm

(精度~0.0001 nm)により測定されている値 (TlBa<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>14)</sup>, Tl<sub>2</sub>Ba<sub>2</sub>CuO<sub>6</sub><sup>15)</sup>)と比較して、表1に示した。

表1を見ると、構造像から測定された金属原子の z 座標の値と、X 線回折による値が非常に一致を示しているのがわかる。わずかながら誤差がみられるので、その誤差を表2に示した。これより金属原子の位置が~0.01 nmの精度で決定できることがわかる。

#### IV. 構造像による結晶構造解析

厳密な条件をクリアして得られた構造像から、金属原子の種類及び位置を直接的に得ることができることを前節で示した。

ここではこれらの結果を利用して、実際に高分解能電子顕微鏡を用いて原子配列直視による直接的な構造解析を行った例を紹介する。

図8は、常盤らにより合成された新しい構造をもつ PbBa<sub>0.7</sub>Sr<sub>1.3</sub>EuCeCu<sub>3</sub>O<sub>9</sub> の a 軸入射高分解能像である<sup>16)</sup>。この像は、非常に薄い領域で(約 2 nm)、Scherzer defocus 近傍で撮影したものであり、投影ポテンシャルを正確に表わし、陽イオンの位置が黒く写っている。試料の組成及びこの構造像から、図に挿入した構造モデルを導きだした。重原子である Pb 原子(原子番号 82), Eu 原子(原子番号 63), Ce 原子(原子番号 58) 位置は特に

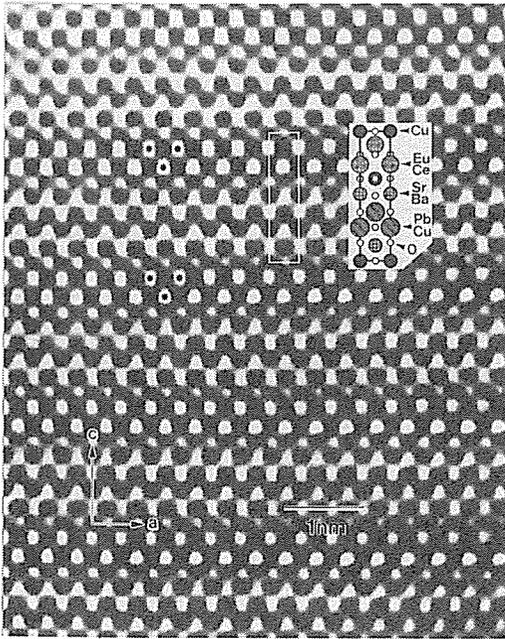


図8  $\text{PbBa}_{0.7}\text{Sr}_{1.3}\text{EuCeCu}_3\text{O}_9$  の a 軸入射高分解能像と構造モデル。

濃く大きい黒丸として写っている。次に大きいのが、Ba 原子 (原子番号 56), Sr 原子 (原子番号 38) であり, 原子番号の小さい Cu 原子 (原子番号 29) は一番小さい黒丸として写っている。また (Eu, Ce) 層に, 明るい白丸 (図中星印) が見られる。

図8から得られた原子座標を表3に示す。なお Cu 層の酸素位置は, 同じ z 座標とした。(Pb, Cu) 層においても同じ z 座標を用いたが, 酸素量測定の結果及び (Pb, Cu) 層の Cu は 1 価であると考えられるので, 酸素の存在確率を 0.5 にした。また, Sr 層の酸素は他の Pb 系酸

化物の結果<sup>17-19</sup>)から, c 軸にそって Pb 方向に 0.03 nm の位置に存在しているものとした。(Ce, Eu) 層の酸素は (Ce, Eu) 層の中間に位置するものとした。

この (Eu, Ce) 層における酸素原子 (表 3  $\text{O}_1$ ) の配列が正しいかどうかを調べるために, 像計算を行った。図9は,  $\text{PbBa}_{0.7}\text{Sr}_{1.3}\text{EuCeCu}_3\text{O}_9$  の計算像である。対物レンズのディフォーカス量 ( $\Delta f$ ) は 35 nm, 試料厚さ (t) は 1.927 nm とした。(Eu, Ce) 層における酸素原子の配置は, (Ce, Eu) 層の中間に位置する場合 (図9 (A)) と, (Ce, Eu) 層に位置する場合 (図9 (B)) の2種類考えられ, それぞれの構造モデルに対して計算像を示した。(A) 及び (B) で矢印で示した (Eu, Ce) 層のコントラストは明らかに異なる。(A) においては, (Eu, Ce) 原子が互いにつながった像コントラストを示し, (Eu, Ce) 原子の隣の位置は明るい像コントラストを示している (星印) のに対し, (B) においては, (Eu, Ce) 原子が明らかに分離した像コントラストを示している。実際に観察した像 (図8) を見ると, (Eu, Ce) 原子は互いにつながった像コントラストを示し, (Eu, Ce) 原子の隣の位置は明るい白丸となっている (図8中星印)。このことから, (Eu, Ce) 層における酸素原子は, 図9 (A) に示したように, (Eu, Ce) 層の中間に位置することが明らかになった。

また, ごく最近開発されたイメージングプレートを用いて,  $\text{PbBa}_{0.7}\text{Sr}_{1.3}\text{EuCeCu}_3\text{O}_9$  の結晶構造像の定量的な解析を行った<sup>16,20</sup>。イメージングプレートは従来のフィルムと異なり, 高感度, 広いダイナミックレンジ, 入射電子線量と出力シグナルの直線性, レーザー光による読みだしなどの特徴をもつ<sup>21-23</sup>。得られた構造像は光磁気ディスクにデジタルデータとして保存されるため, 画像

表3  $\text{PbBa}_{1.3}\text{Sr}_{0.7}\text{EuCeCu}_3\text{O}_9$  の原子座標。a=0.3854nm, c=1.6374nm, 空間群  $\text{P4/nmm}$ , g は Site の占有率。

Atom	Site	x	y	z	g
Pb	2c	0.25	0.25	0.443	0.5
Ba	2c	0.25	0.25	0.696	0.65
Sr	2c	0.25	0.25	0.696	0.35
Eu	2c	0.25	0.25	0.926	0.5
Ce	2c	0.25	0.25	0.926	0.5
$\text{Cu}_1$	2c	0.25	0.25	0.443	0.5
$\text{Cu}_2$	2c	0.25	0.25	0.183	1
$\text{O}_1$	2a	0.25	0.75	0	1
$\text{O}_2$	4f	0.25	0.75	0.183	1
$\text{O}_3$	2c	0.25	0.25	0.322	1
$\text{O}_4$	2c	0.25	0.25	0.557	0.5

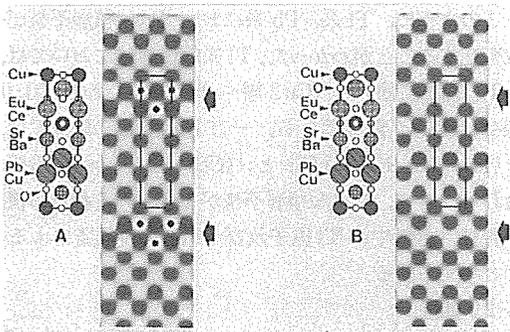


図9 PbBa<sub>0.7</sub>Sr<sub>1.3</sub>EuCeCu<sub>3</sub>O<sub>9</sub> の計算像, Δf=35 nm, t=1.927 nm, (A), (B) で酸素位置が異なる。

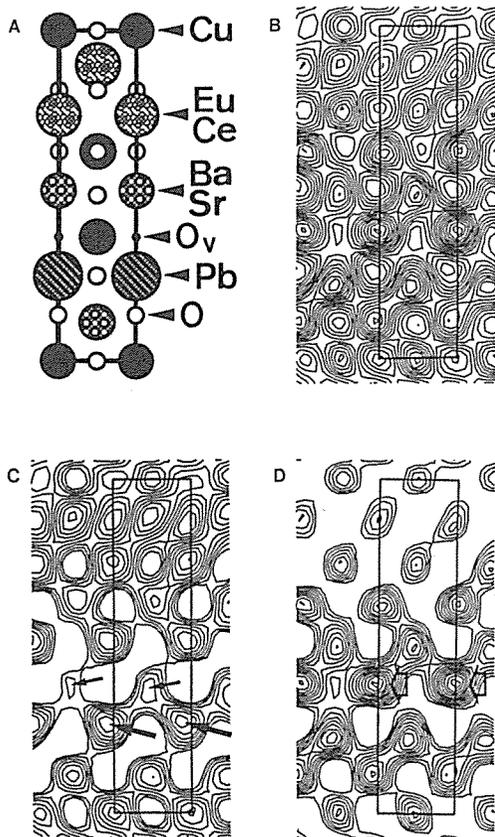


図10 (A) イメージングプレートにより明らかにされたPbBa<sub>0.7</sub>Sr<sub>1.3</sub>EuCeCu<sub>3</sub>O<sub>9</sub> の結晶構造モデル。Pb層とCu層が分離している。  
 (B) 撮影像を等高線表示した図 (contour map)。  
 (C) (B) の電子線強度の弱い部分のみを等高線で表示した図。重原子であるPb原子はより密な等高線 (大きい矢印) となり, 比較的軽いCuの原子位置 (小さい矢印) と明確に区別できる。  
 (D) (B) の電子線強度の強い部分のみを等高線で表示した図。等高線の最も密な部分が酸素欠損位置を示している (矢印)。

処理を行うことが非常に容易である。

イメージングプレートを用いて撮影した構造像を, 等高線表示した図 (contour map) が図10である。この物質の構成原子数は多く, その結晶ポテンシャルが複雑なため, 図10 (C, D) に, 図10 (B) の電子線強度の弱い部分と強い部分に分けて定量的に等高線で表示している。(C) ではより重い原子位置で等高線が密になっており, 逆に (D) では, 原子の存在しないポテンシャルの低い部分で等高線が密になっている。(C) では, Pbの原子位置 (大きな黒の矢印) がより密な等高線となって現れ, 比較的軽いCuの原子位置 (小さい矢印) と明確に区別することができる。また (D) では, 矢印で示した等高線の最も密な部分が酸素欠損位置を示している。このような定量的な測定から出された構造モデルが (A) である。図8に示した構造モデルと比較すると, (Pb, Cu) の2重層構造と考えられていた構造が, Pb層とCu層に分離して存在していることがわかる。またCu層の酸素は存在せず, 酸素空孔となっている。以上のように, イメージングプレートを使用することにより, 基本構造に加え, Pb原子層と, 酸素欠損を含むCu原子層の局所的な積層構造を明らかにすることができる。また最近では, 分析電子顕微鏡を組み合わせた解析や<sup>24)</sup>, 計算像との対応において reliability factor を設定することにより<sup>25)</sup>, さらに定量的な議論ができるようになっている。

### V. 構造像による微細構造解析

超伝導酸化物を実用材料として考える場合, その微細構造を知ることは非常に重要である。例えば, ジョセフソン素子などの微細な領域を議論するうえでは, 表面近傍の微細構造に関する情報は欠かせない。また, 超伝導電流の経路はCu-O面であるとされているが, 実際の結晶中には, 様々な境界構造, 欠陥構造, 析出物が存在するため, その情報も必要とされる。このような微細構造が超伝導の特性に与える影響は非常に大きい, 微細構造の研究には, 高分解能電子顕微鏡が非常に有力な手段となり, 実際, 様々な系において, 欠陥構造が詳しく調べられている<sup>10,26)</sup>。この他にも超伝導酸化物特有の変調構造<sup>13,27,28)</sup>や粒界<sup>29)</sup>の解析にも非常に大きな威力を発揮している。

ここでは, Tl系, Pb系超伝導体中の積層不整, 転位及び表面近傍の原子配列を観察した例を紹介する。

#### V-1 積層不整

図11は, TlBa<sub>2</sub>Ca<sub>3</sub>Cu<sub>4</sub>O<sub>11</sub> のa軸入射高分解能像である。この像中には, Tl層が1及び2層, そしてCu層が3, 4及び5層の積層不整が観察される。

図12は, (Pb, Cu)2層構造をもつPbBa<sub>0.7</sub>Sr<sub>1.3</sub>YCe<sub>3</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>13</sub> のa軸入射高分解能像である<sup>30)</sup>。(Ce, Y)層が,

3, 4, 5, 11, 12, 13層の積層不整が多数観察される。また、矢印で示した領域では (Pb, Cu) 層が途中で消失している。

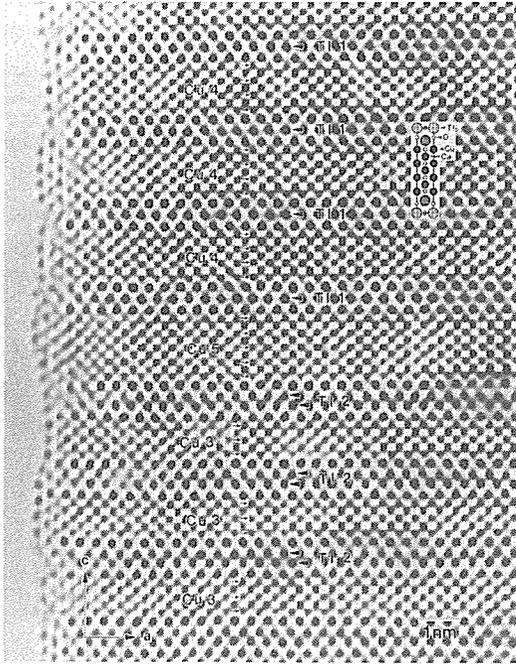


図 11  $\text{TlBa}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_{11}$  の a 軸入射高分解能像。Tl 層が 1 及び 2 層, Cu 層が 3, 4 及び 5 層の積層不整が観察される。

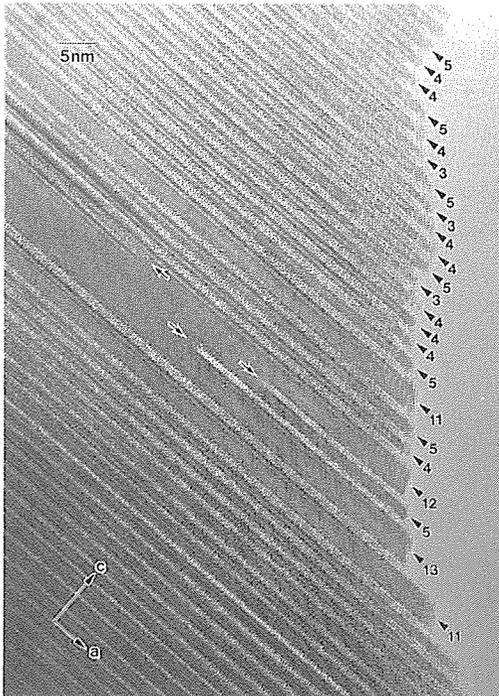


図 12  $\text{PbBa}_{0.7}\text{Sr}_{1.3}\text{YCe}_3\text{Cu}_3\text{O}_{13}$  の a 軸入射高分解能像。(Ce, Y)層が, 3, 4, 5, 11, 12, 13 層の積層不整が多数観察される。

このように, Tl系, Pb系においては, 積層不整が多数存在することがわかった。Tl系超伝導体においては, {Tl1層, 2層}と{Cu2層~}の組み合わせにより, 様々な積層不整ができる。一方Pb系超伝導体では, {(Pb, Cu)1層~3層}と{(Ce, Y)1層~}の組み合わせにより, 様々な積層不整ができる。これらの積層不整は, 合成中のTl原子及びPb原子の蒸発によるものと考えられる。

## V-2 転位

図 13 は,  $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{CuO}_6$  超伝導体の  $[\bar{1}\bar{1}0]$  入射高分解能像である。図の矢印で示した位置に転位が edge-on で観察される。転位の周辺には, 歪コントラストが観察される。図 13 の矢印で示した転位を拡大し, TV モニタを用いて, 大型計算機に入力し, フーリエ変換を行い,

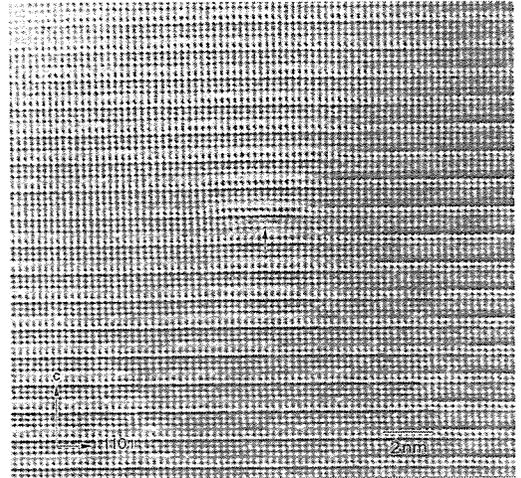


図 13  $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{CuO}_6$  超伝導体の  $[\bar{1}\bar{1}0]$  入射高分解能像。矢印で示した所に転位が edge-on で観察される。

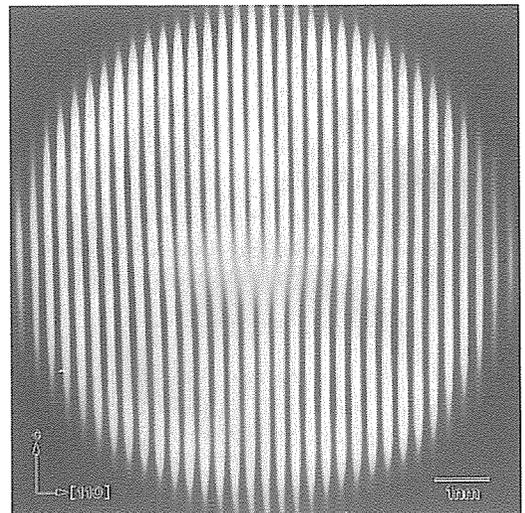


図 14  $110, \bar{1}\bar{1}0$  反射による逆フーリエ変換像。転位の周囲に格子歪が生じている。

110,  $\bar{1}\bar{1}0$  反射のみを用いて逆フーリエ変換を行った像が、図 14 である。(110)面が1枚増えているのが明らかにわかる。また転位が存在する約 5 nm の範囲では、格子の歪みが生じている。同様の転位が、Pb 系及び Nd 系いずれの系においても、 $[\bar{1}\bar{1}0]$ 入射で転位が edge-on で観察され、転位の周囲約 5 nm の範囲で格子歪が存在することがわかった。

### V-3 表面構造

まず c 面に平行にへきかいした場合を観察する。図 15 は、 $TlBa_2CaCu_2O_7$  の a 軸入射高分解能像である。結晶が矢印で示した位置でへきかいしているのがわかる。この割れる位置は、図 15 に挿入したモデルに示したよう

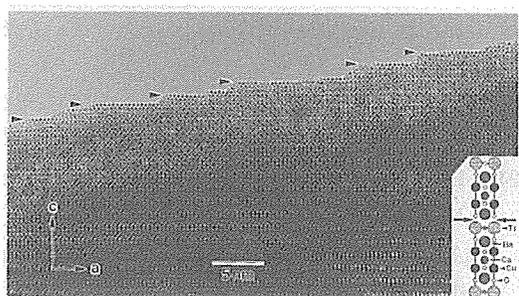


図 15  $TlBa_2CaCu_2O_7$  の a 軸入射高分解能像。Tl 原子と Ba 原子の間でへきかいする。

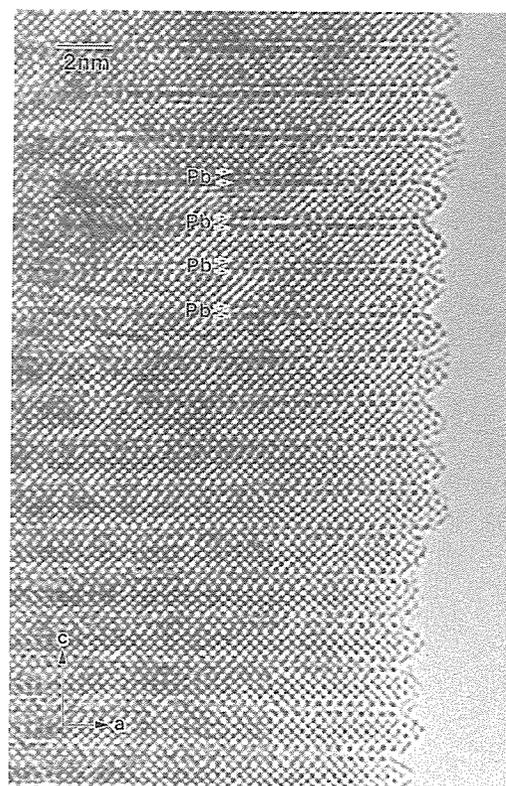


図 16  $Pb_2Sr_2Y_{0.5}Ca_{0.5}Cu_3O_8$  の a 軸入射高分解能像。結晶端近傍で Pb-Cu-Pb 層が崩壊し、表面原子の再配列が生じている。

に、Tl 原子と Ba 原子の間であることがこの像よりわかる。c 軸方向にみた場合、Tl-Ba 原子間が最も距離があるため、Tl-Ba 原子間の結合が最も弱く、へきかいしやすいものと考えられる。また結晶表面はもとの結晶構造を維持する。Pb 系でも同様の表面構造が観察される。

次に a 軸に平行にへきかいした場合を観察する。図 16 は、 $Pb_2Sr_2Y_{0.5}Ca_{0.5}Cu_3O_8$  の a 軸入射高分解能像である。Pb 原子層を矢印で示した。結晶端近傍で、Pb-Cu-Pb 層が崩壊し、(Y, Ca)層が突出し、原子の再配列が生じている。Tl 系でも表面原子の再配列が生じる。

この様に、層状酸化物系超伝導体では、a 面は不安定で表面原子の再配列が生じるが、c 面は安定で特定の原子面が表面に現れることが明らかになった<sup>31)</sup>。

## VI. おわりに

ここでは、最近発見され、従来の超伝導材料をはるかに上回る超伝導転移温度をもつため、様々な分野で大きなインパクトを与えるものとして多大な期待がよせられている高温超伝導酸化物を例に、世界最高級の分解能をもつ超高分解能電子顕微鏡を用いて、ナノ・スペースにおける超伝導体の観察を行い、その結晶構造及び微細構造を明らかにし、高分解能電子顕微鏡がナノ・スペースの情報を直接的に得るのに非常に有力な手段であることを示した。これらの情報を得ることは材料設計の指針となり、さらに新たな材料開発へとつながる。

この様に数多くの研究者がピラミッドのほんの一部分の研究を積み重ねていけば、数十年後に巨大なピラミッドが完成することは確実である。

### 謝辞

本研究において、多大な御援助をいただきました東北大学金属材料研究所、平賀賢二教授、進藤大輔助教授（現・東北大素材工学研）に深く感謝致します。また試料は、カシオ計算機の中島理博士（現東北大金研）、金属材料研究所の常盤文子博士（現・超伝導工学研究所）、菊地昌枝助教授、庄野安彦教授により作製されたものでありここに深く感謝致します。

### 参考文献

- 1) 岸本通夫他：世界の歴史 2 古代オリエント，河出書房（1989）205.
- 2) 三笠宮崇仁：生活の世界歴史 1 古代オリエントの生活，河出書房新社（1991）171.
- 3) 平賀賢二：Boundary 3 No. 3（1987）21.
- 4) 奥 健夫，平賀賢二：Boundary 5 No. 2（1989）34.

- 5) K. Hiraga, T. Oku, M. Hirabayashi, T. Matsuda and T. Hirai: *J. Mater. Sci. Lett.* 8 (1989) 130.
- 6) T. Oku, H. R. Kawata, A. Otsuki and M. Murakami: *Proc. 1st Int. Symp. Control of Semiconductor Interfaces* (1993) in press.
- 7) 堀内繁雄, 松井良夫: *日本結晶学会誌* 25 (1983) 3.
- 8) 堀内繁雄: *応用物理* 59 (1990) 358.
- 9) 堀内繁雄: *高分解能電子顕微鏡—原理と利用法* (共立出版, 1988)
- 10) S. Nakajima, M. Kikuchi, Y. Syono, T. Oku, D. Shindo, K. Hiraga, N. Kobayashi, H. Iwasaki and Y. Muto: *Physica C* 158 (1989) 471.
- 11) S. Nakajima, M. Kikuchi, Y. Syono, T. Oku, K. Nagase, N. Kobayashi, D. Shindo and K. Hiraga: *Physica C* 182 (1991) 89.
- 12) S. Nakajima, M. Kikuchi, Y. Syono, K. Nagase, T. Oku, N. Kobayashi, D. Shindo and K. Hiraga: *Physica C* 170 (1990) 443.
- 13) T. Oku, K. Hiraga, D. Shindo, M. Kikuchi, S. Nakajima and Y. Syono: *Advances in Superconductivity III* (1991) 367.
- 14) M. Hervieu, A. Maignan, C. Martin, C. Michel, J. Provost and B. RAVEAU: *J. Solid State Chem.* 75 (1988) 212.
- 15) C. C. Torardi, M. A. Subramanian, J. C. Calabrese, J. Gopalakrishnan, E. M. McCarron, K. J. Morrissey, T. R. Askew, R. B. Flippen, U. Chowdhry and A. W. Sleight: *Phys. Rev. B* 38 (1988) 225.
- 16) A. Tokiwa, T. Oku, M. Nagoshi, D. Shindo, M. Kikuchi, T. Oikawa, K. Hiraga and Y. Syono: *Physica C* 172 (1990) 155.
- 17) R. J. Cava, B. Batlogg, J. J. Krajewski, L. W. Rupp, L. F. Schneemeyer, T. Siegrist, R. B. van Dover, P. Marsh, W. F. Peck, Jr, P. K. Gallagher, S. H. Glarum, J. H. Marshall, R. C. Farrow, J. V. Waszczac, R. Hull and P. Trevor: *Nature* 336 (1988) 211.
- 18) C. Chaillout, O. Chmaisssen, J. J. Capponi, T. Fournier, G. J. Mc Intyre and M. Marezio: *Physica C* 175 (1991) 293.
- 19) T. Mochiku, M. Osawa and H. Asano: *Jpn. J. Appl. Phys.* 29 (1990) L 1406.
- 20) D. Shindo, K. Hiraga, T. Oku and T. Oikawa: *Ultramicroscopy* 39 (1991) 50.
- 21) S. Ichihara, S. Hayakawa, S. Suga, M. Hashino, S. Sakuma, M. Ikeda, H. Yamaguchi, T. Hanaichi and Y. Kamiya: *J. Electron Microscopy* 33 (1984) 255.
- 22) N. Mori, T. Oikawa, T. Katoh, J. Miyahara and Y. Harada: *Ultramicroscopy*, 25 (1988) 195.
- 23) T. Oikawa, N. Mori, N. Takano and M. Ohnishi: *J. Electron Microscopy* 39 (1990) 437.
- 24) D. Shindo, K. Hiraga, T. Oku, A. Tokiwa, S. Nakajima, M. Kikuchi and Y. Syono: *Jap. J. Appl. Phys. Series 7 Mechanisms of Superconductivity* (1992) 51.
- 25) D. Shindo, T. Oku, J. Kudoh and T. Oikawa: *Ultramicroscopy* (1993) in press.
- 26) K. Hiraga, T. Oku, D. Shindo and M. Hirabayashi: *J. Electron Microscopy Technique* 12 (1989) 228.
- 27) T. Oku, T. Kajitani, K. Hiraga, S. Hosoya and D. Shindo: *Physica C* 185-189 (1991) 619.
- 28) S. Nakajima, T. Oku, R. Suzuki, M. Kikuchi, K. Hiraga and Y. Syono: *Physica C* 214 (1993) 80.
- 29) H. Yamane, S. Takagi, T. Oku, N. Ohnishi, K. Hiraga, S. Awaji, K. Watanabe, N. Kobayashi and T. Hirai: *J. Mater. Sci. Lett* 12 (1993) 1430.
- 30) A. Tokiwa, T. Oku, M. Nagoshi, Y. Syono: *Physica C* 181 (1991) 311.
- 31) 奥 健夫, 平賀賢二, 中島理, 菊地昌枝, 庄野安彦: *Ceramics* 27 (1992) 883.

## 談 話 室

## 金属系教室若手研究会

西 谷 滋 人\*

## Novice Meeting in Our Departments

by S. R. NISHITANI

金曜日の5時を過ぎると4階の演習室へ三三五金属系の教官が集まってきます。今は、土日が休みですので、一週間の仕事が終わって皆穏やかな気持ちでいることでしょう。入り口でビールを買って隣の教官とわいわいと一週間の研究内容の進展やお互いの雑務の打ち合わせなどを行っています。しばらくすると司会の簡単な発表者の紹介の後、発表者もビールで喉を潤しながらOHPシートを乗せて話始めます。これが若手研究会の始まりです。

題材は発表者が今取り組んでいる研究分野について自分の研究成果を中心に紹介していきます。この研究会では、少しでもその分野をかじったことのある研究者なら決してしないような基本的なtermや概念に関する質問や、発表者が思いもしないようなコメント・脱線を経ながら発表が進んでいきます。あらゆる質問やコメントに対して、発表者あるいは横にいる教官が研究室に配属されたばかりの学生に教え諭すがごとく説明を加えます。ときには発表者と質問者の二人にしか理解できないような議論へ進んでしまうこともあります。ビールのほろ酔いも手伝ってか、OHP20枚程度の材料で約2時間にわたって旦那・女房・子供(彼女・彼氏)を忘れて議論が続きます。これが、金属系の若手研究会です。

若手研究会の始まりは88年に、採用されて2・3年目の助手が集まって飲んでいたとき、“おれは金属に居てるけど金属のことよう知らん。何とかならんけ”という当時としては大胆な意見がきっかけです。たしかに、他の研究室で何をしているのかを理解するのはなかなか難しいことです。そこで、せめて修士論文の研究発表がわかる程度の基礎的な知識を得ようということで始まりまし

た。以来、5年間にわたって断続的に研究会を開いています。91年には学外で50名程度の研究者を集めて初の全国規模の若手研究会を開きました<sup>1)</sup>。

ご存じのように、京都大学工学部は現在大幅な改組を行ないつつあります。それだけの所為ではないと思いますが、金属系2教室で行なわれている研究内容が非常に多様化してきています。例えば金属系全教官44名のうちここ2、3年で新しく来られた教官が4分の一以上居られ、その研究分野は従来の金属材料や金属学の手法だけでなくセラミックスや半導体も含めた無機材料全般に渡って広い分野をカバーしているようです。隣の研究室は何をしているのかわからないという状況が加速度的に増大しているわけです。一方、新しい研究課題・手段は工学・理学の加速度的な発展と共に、近年ますます多様化・先進化してきています。一人の研究者が最先端の材料研究に必要なある程度の基礎知識すら、学外で盛んに開かれている研究会や勉強会で吸収するということが到底不可能になりつつあります。

そういった観点から若手研究会は、範囲が限られているとはいえ色々な分野の研究状況をわずかの時間で身近に接することができるいい機会を与えているのではないのでしょうか。具体的な内容は以下の発表題目を見て下さい。これは今春(93年春)に開いた若手研究会のプログラムです。

5/28 窒化ケイ素基セラミックスの材料設計  
—第一原理からのパンの焼き方—

田中 功 助手 (21)

6/4 角度依存多体ポテンシャル  
—固体物理への量子力学のある応用法—

西谷滋人 助手 (17)

\*京都大学・工学部金属加工学科助手

- 6/11 STMによる表面・界面の微視的研究  
 ー百聞は一見に如かずー  
 長谷川幸雄 工学部付属  
 メゾ材料センター助手 (15)
- 6/25 X線を用いた材料評価法に関する3つの話題  
 河合 潤 助手 (14)
- 7/2 CGステレオグラムの作り方, 楽しみ方  
 石原慶一 助教授 (15)
- 7/16 電顕で見る原子の世界  
 奥 健夫 助手 (15)

新任および海外で研究してきた教官がたくさんおられ、話の内容も教室内では耳新しい為か、今春のシーズンは例年に比べても特に盛況でした。研究会にどのくらいの方が参加しているかはちゃんと数えているわけではありません。括弧内の数字は売れたビールの数です。中には一人で2本も3本も飲む人やジュースを持参する人もいます。毎回20名前後の若手助手・司書を中心に、教授・助教授といった気分的に若手の方々に参加しています。残念なのは、2,3年前に比べて今年は本当の若手である学生諸君に積極的な参加が余り多くなかったことです。学生にしてみれば全てのことが目新しいことなので、与えられた研究課題に関する知識を吸収するだけで手一杯なのでしょうか。

若手研究会に参加されている聴衆のメリット・発表者のメリットを前述の内容と重複しますが列挙すると、

- 1) 興味はあるが具体的な内容や研究の現状がよくわからない分野についての大雑把な理解ができる。
- 2) 一般の講演会や学会では話が専門過ぎてなかなか質問できないことについてとことん解説が聞ける。
- 3) 自分が行っている研究手法とは違ったアプローチの仕方をどこが難しいかといった裏の苦労話つきで接することができる。うまくすると、その手法を自分の研究に応用できる。
- 4) 何がわかっていて何がわからないかとか、何がその分野で問題になっているかということについての知識を得ることができる。うまくすると、自分の持っている研究成果や装置でその分野に寄与することができる。

- できる。
- 5) バックグラウンドが違う門外漢による思いもかけない質問をされ、仲間内の研究者グループで話しているときは全く違う視点を得ることができる。
  - 6) 何が共通の知識で、どの部分を丁寧に説明すれば聴衆に理解してもらえるかという予行演習ができる。
  - 7) 専門領域ではないが、面白い話があるときに、それを皆と議論できる。
  - 8) 誰に何を聞けばいいかがわかる。
- というところでしょうか。

海外や民間の研究所では、活発な討論や異分野間の交流が行なわれていると思います。今までの金属系教室内では、目新しい研究に接する機会や突っ込んだ討論をするという場がなかなかありませんでした。従来の金属材料に限られた研究を行ってきた教官の集合体では、研究分野・基礎知識・手法さらには発想までもが限られていたかも知れません。しかし、今の金属系教室は出身分野が違い、でも材料研究をしていくという共通の目的を持った研究者が集まって、材料研究がどういう方向へ向かっていくのかとか、何が学生に教えるべき研究の基礎知識なのかといったことを暗中模索しています。少しばかりのアルコールの力を借りながらも活発に討論する場があるというので参加者の皆さんには好評のようです。

今は話でしか伺知ることができませんが水曜会も若手研究会と同じようにして始まったのでしょうか。若手研究会もOBや教室外の研究者の方々の参加を歓迎いたします。ここで紹介した研究会に参加してみたいという方は御連絡下さい。すぐにそのシーズンのプログラム等をお送り致します。なにかの用事で京都に立ち寄るといの方も覗いてみてください(やってない週もありますのであしからず)。参加費は、ビール代と積極的な発言です。

#### 参 考 文 献

- 1) 沼倉宏 バウンダリー 7(1991), No.10, p.24.
- 2) 砥山人 水曜会誌 21(1993), No.10, p.727.

## 談 話 室

「第10回 固体の内部摩擦と超音波  
吸収に関する国際会議」に参加して

沼 倉 宏\*

Report on “The 10th International Conference on  
Internal Friction and Ultrasonic Attenuation in Solids”

by Hiroshi NUMAKURA

1993年9月6-9日、ローマ大学で開催された標題の国際会議に参加した。固体の内部摩擦と超音波吸収は、力学的振動や波動の減衰、すなわち弾性エネルギーが損失する現象であり、材料中の種々の欠陥の挙動を応力に対する応答を見ることによって調べる有用な実験手法である。1950-70年代には金属結晶中の点欠陥や転位の性質を解明するために内部摩擦の理論、実験の研究が欧米を中心に世界各国で精力的におこなわれたが、80年代以降は、特に米国などではこの分野の研究が以前ほど活発ではなくなってきている。しかしヨーロッパでは、依然として多くのグループが固体中の不純物、点欠陥、転位や界面などに関する研究を進めている。

この国際会議は1956年米国のプロヴィデンスに始ま

り、以後ほぼ4年ごとにおこなわれてきた。前回の第9回は1989年7月北京で開催されたが、このときは直前の6月に天安門事件が起き、日本人をはじめいわゆる西側諸国の研究者はほとんど参加することができなかった。このように前回はモスクワオリンピックのようになってしまったので、世界各国の研究者が集うのは前回(1985年)の米国イリノイでの会議以来8年ぶりということになった。また筆者にとっては今回が初めての参加なので、大いに期待してローマへ向かった。

今回の組織委員長はローマ大学(Universita di Roma “La Sapienza”) エネルギー学科のRosario Cantelli教授である。参加者は29か国から170余名で、国別には開催国のイタリアが26、つづいてドイツ25、日本20、旧ソ

表1 トピックスと研究発表件数

トピックス	口頭	ポスター	計
1. 点欠陥	5	16	21
2. 転位、転位と他の欠陥の相互作用	10	42	52
3. 相変態	4	17	21
4. 金属、半導体中の水素	3	14	17
5. 酸化物超伝導体とフューラレン	7	38	45
6. 非晶質物質と超イオン伝導体	6	13	19
7. 強誘電体とセラミックス	4	6	10
8. 複合材料と高分子	5	18	23
9. 薄膜	4	4	8
10. 電子、フォノン緩和	3	5	8
11. 粒界、ドメイン壁、界面	6	13	19
12. 擬弾性、力学的性質全般	3	7	10
13. 磁気弾性相互作用	4	11	15
14. 実験技術、非破壊検査、工業的応用	8	23	31
計	72	227	299

\*京都大学工学部金属加工学科助手

連 15, フランス 13, 中国 12, スイス 11, 米国 10 などが主なところであった。4 日間にわたり、表 1 に示した 14 のトピックスについて、72 の口頭発表と 220 あまりのポスター発表がおこなわれた。なお、ローマ大学の物理学科は Enrico Fermi が 1927 年から 1938 年米国に去るまで教授として活躍していたところで、エントランスホールには彼の肖像写真や使っていた実験装置などが展示されていた (写真 1)。

初日はまず大ホールで開会の式辞のあと、Alfred Seeger 教授(シュトゥットガルト、マックスプランク金属研究所)が「ボルドーニ緩和の転位解積の 40 年」と題する総合講演をおこなった。ボルドーニ緩和とは、1949 年当地ローマの P. G. Bordoni により見出された、加工した fcc 金属の内部摩擦が室温以下で極大を示す現象のことである。1955 年 Seeger 教授は、この現象は転位が転位線の上にキンク対を作ってパイエルスポテンシャルの山を乗り越える過程によるものであるという理論を提案した。(これらの実験と理論は、1956 年の電子顕微鏡による転位の直接観察よりも前に世に出ている。)その後現在に至るまで、このような緩和過程は転位の基本的かつ重要な性質としてさまざまな結晶について研究がなされてきた。この講演では、Seeger 教授はまず 1950 年代当時の状況、教授自身が他の研究者との議論の中でキンク対形成のアイデアに至った経緯などを紹介し、後半ではそののち 40 年の研究を経た現在、定性的にはこの解釈が正しいとしてよいものの定量的にはまだ未解決の問題が多く残されていることを指摘し、さらなる研究の発展

を促した。

初日の午後以降は、口頭発表のセッションが物理学科の二つの大講義室で進められた。また、ポスターセッションは初日と第三日の午後の後半に、講演会場での 3 分間ずつの簡単な発表に引き続いて、物理学科の廊下でおこなわれた。口頭発表は 2 会場での並行セッションだったためいくつかの講演を聴き逃してしまったが、初日の水素のセッションでの、H. -R. Sinnig (ブラウンシュヴァイク工科大学) の金属間化合物中の水素による緩和についての講演、M. Ege ら(シュトゥットガルト、マックスプランク金属研究所) の fcc 金属中の水素と不純物の複合体についての講演、F. Cordero ら(ローマ、コルビーノ音響研究所) の bcc 金属中で不純物にトラップされた水素のトンネリング拡散についての講演の三つは、筆者も同様な研究をおこなっていることもあり、興味深く聴いた。H. -R. Sinnig は、CoZr<sub>2</sub>などの金属間化合物中の水素の応力誘起短範囲拡散にもとづく内部摩擦を非晶質、ナノ結晶、結晶について測定し、水素の存在状態や拡散挙動がマトリックスの構造により異なってくることを示した。さらに、この現象を利用して固溶水素の挙動からマトリックスの構造についての情報を得ることができることを指摘した。これまで金属中の水素の存在状態を調べるのに内部摩擦の実験は重要な役割を果たしてしてきたが、逆に水素をプローブとして使ってマトリックスの性質を調べるというのは、適用できる例は限られるとは思いますが、おもしろいアイデアである。

この他には、転位のセッションで小杉俊男さん(広島大学)が、超高純度アルミニウムを試料として用いて従来ボルドーニ緩和と考えられていた内部摩擦ピークよりも低い温度に新たにピークを見出し、こちらが真のボルドーニピークである可能性が高いことを示したのが注目を集めた。擬弾性緩和の一般論のセッションでは、A. V. Granato(イリノイ大学)が、磁性における diamagnetic effect (反磁性) に類似した diaelastic effect という新しい概念を紹介した。応力に対して欠陥が運動することにより内部摩擦や超音波吸収がおこる機構としては緩和と共鳴があるが、既存の欠陥が再配向や移動をするのではなく、新たに欠陥の複合体ができるなどして弾性ひずみ双極子が形成されるのが diaelastic effect である。Granato は、照射した鉄および銅中の自己格子間原子についての実験結果を例にとってこれを説明し、またこの現象に対する彼の理論を発表した。また、残念ながら講演を聴くことはできなかったが、酸化物超伝導体のセッションでは、YBaCuO 系酸化物の相変態および酸素拡散に関する興味深い内部摩擦や超音波吸収の研究報告が数多くなされた。

筆者自身は、転位のセッションで「Cu-Ge 固溶体合金



写真 1 会場のローマ大学物理学科の Enrico Fermi を記念する展示物。右は筆者。

中の双晶転位による内部摩擦」と題する講演、また点欠陥および水素のポスターセッションで、それぞれ「三元bcc合金におけるスネーク緩和の強度の計算機シミュレーション」、「ニッケル中の水素と溶質原子複合体の力学緩和」という題の発表をおこなった。ポスターセッションの時間は実質1時間足らずで、また筆者の二つのポスターは同じ時間帯に割り当てられたこともあり、ポスターについてはあまり議論することはできなかったが、講演のほうは幸い好評で興味深いコメントも受け、何人かと詳しく議論することもできた。

今回は第10回ということで、これまでの歩みを振り返る Historical Reviews “Physics of Anelasticity-The Early Days” という特別セッションが第2日目の夜に開かれた。当初の予定では、この分野の生みの親とも言える、ツェナーダイオードなどでも有名な Clarence Zener 教授がこのセッションの司会をすることになっていたが、残念なことに7月初めに亡くなられた。当日は K. Lüke (アーヘン工科大学) の司会で、まず C. Wert (イリノイ大学) が Clarence Zener の思い出を紹介した。続いて A. S. Nowick (コロンビア大学) が転位と点欠陥に関する初期の研究の頃を、T. S. Ke (中国科学院固体物理研究所) がねじり振子型内部摩擦装置の開発とそれを用いた結晶粒界緩和の研究の日々を、最後に P. G. Bordoni (ローマ、コルビーノ音響研究所) が先に述べた転位による緩和の発見について述べた。

ここで、素晴らしかった Social Programme について少し述べておきたい。初日の晩にはカピトリノの丘の市立博物館の緑豊かな中庭でレセプションパーティが開かれた。パーティに先立って博物館の中の絵画を見て回

り、また眼下にフォーロロマーノが広がるテラスから、夕暮れのローマ市内の眺めを満喫することができた。また二日目の午後には古代都市オスティアアンティカの遺跡へのバスツアー、夜には上述の Historical Reviews セッションのあとに大ホールでピアノとメゾソプラノの素晴らしいデュオコンサートが開かれた。三日目の晩はアッピア街道の一隅の大きな別荘で特別夕食会があり、深夜まで賑やかに食事、音楽、お喋りを楽しみ、ラテンの国の人々の人生の楽しみ方の一端を味わわせていただいた。

今回の会議の会議録は、Journal of Alloys and Compounds の定期の一冊として刊行される。また、次回第11回は定例の4年後ではなく3年後、すなわち1996年、フランスのポワティエで開催されることになった。組織委員長は URA CNRS の A. Riviere の予定である。ヨーロッパ諸国はこれまで、4年ごとの国際会議のまん中の年に「内部摩擦と超音波吸収に関するヨーロッパ会議」を開いていたが、次回からはこれら二つの会議を一つにし、3年ごとに開催することになるらしい。

日本でも米国と同様に以前と比べると内部摩擦を主要な実験手段としている研究者は減っており、内部摩擦というと「まだそんな古くさいことをやっているんですか?」といったことを言われることもある。しかし、結晶中の欠陥を調べるのにたいへん有用な実験手段であることには変わりはないし、今後、例えば化合物半導体中の不純物のキャラクタリゼーションなど新しい研究主題が現れてくる可能性は多々ある。次回の会議にも、この手法がいかに材料研究に威力を発揮するかを示す新しい研究結果が世界各国から数多く集まることを期待したい。

## 会 報

## 平成 5 年 度 水 曜 会 大 会

●日 時 平成 5 年 6 月 5 日 (土)

●会 場 京都大学工学部 1 号館及び 6 号館並びに京大会館

平成 5 年度水曜会大会は、6 月 5 日 (土) 資源工学教室および金属系教室並びに京大会館において、会員 90 名以上の参加のもとに開催された。

本大会は昨年度に引き続き水曜会あり方委員会の報告を受け、例年のプログラムを一部修正して開催された。すなわち、一般講演の代わりに研究室を会員の皆様に解放見学していただく機会が設けられた。旧態然とした、あるいは最新鋭の設備、機器を前に大学の研究、企業の研究について話の花が咲いたようである。

午後は従来通り会場を京大会館に移し、懇親会、記念撮影、総会、特別講演が行われた。懇親会は正午より小岩教授の司会のもとに、朝木教授の開会の辞に引き続き、向井名誉教授の音頭で乾杯が行われた。和やかな歓談の内に会は進められ、植田正明氏 (冶金 S 28 年卒)、佐々木賢治氏 (鉱山 S 28 年卒)、阿部征三郎氏 (冶金 S 37 年卒)、一伊達 稔氏 (鉱山 S 38 年卒) にスピーチを頂いた。最後に水曜会あり方委員会委員長の新宮教授から水曜会の今後について、会員の親睦を計り、我々の今後をなお一層盛り上げるためにも、会員の皆様の物心両面からの支持を賜りたい旨のコメントがあり、水曜会万歳の発声があった。一同は拍手となった。

総会は、出席者 90 名のもと朝木教授の総合司会により 13 時 40 分より開かれた。まず若松会長から平成 4 年度の事業報告があり、続いて志賀会計幹事より会計報告が、山口会計監事から会計監査報告があつていずれも承認された。次いで次期役員 の 推 挙 が 行 わ れ、会 長 に 佐 々 教 授 (資 源)、副会長に小岩教授 (金属加工) が選出された。佐々新会長の挨拶の後、特別講演会に移った。

特別講演会では新宮教授、八田教授の司会のもと、次の二つの講演が行われ参加者一同熱心に傾聴した。本年度水曜会は特別講演終了後 16 時過ぎに閉会した。

1. 「一貫製鉄所の運営の現状」

住友金属工業株式会社常務取締役 杉田 宏氏 (S 34 冶金卒)

2. 「日本における工業教育」

京都大学名誉教授 小門 純一氏 (S 22 鉱山卒)

## 平成4年度水曜会会計報告

平成5年3月31日現在

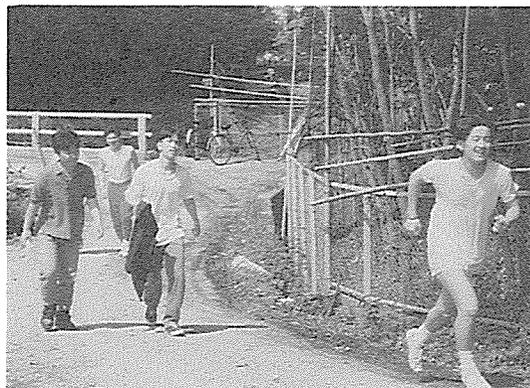
収 入	支 出		
前年度繰越金	7,233,333 円	会誌印刷代(製版郵送料込)	
会 費	4,212,180	21巻8号	2,452,713 円
会誌広告掲載料(製版代込)		21巻9号	1,823,851
21巻8号	1,907,346	印刷代(封筒他)	264,111
21巻9号	1,453,088	水曜会大会経費 (平成4年6月6日)	472,320
会誌論文別刷代	9,000	名簿発行費	4,060,330
名簿広告掲載料	2,308,215	新入生歓迎会補助 (比叡山登山)	207,691
名簿売上	3,050,480	編集委員会旅費(旅費他)	207,453
会誌売上	24,000	会誌原稿料	128,000
水曜会大会懇親会 より寄付	66,385	通 信 費	175,197
預 金 利 息	188,604	事 務 人 件 費	399,200
		文 具, コ ピ ー 代 等	32,606
		弔 慰 費 (高村氏)	10,000
収 入 合 計	20,452,631 円	小 計	10,233,472 円
上記の通り会計報告致します。 平成5年6月5日 会計幹事 志賀正幸 以上の通り相違ございません。 会計監事 山口正治		次年度への繰越金	10,219,159 円
		内訳 銀行普通預金	4,600,388 円
		定期預金	5,500,000
		郵便振替預金	57,260
		手持現金	61,511
		支 出 合 計	20,452,631 円

## 平成5年度新入生歓迎比叡山登山競争

恒例の資源工学、冶金学、金属加工学3教室主催による新入生歓迎比叡山登山競争が約240名の参加を得て5月15日(土)に行われた。当日は好天に恵まれ、また土曜日の開催ということで競争参加者も125名と過去10年間では最高を数えた。競技は9時30分金属系玄関前をスタートし、比叡山人工スキー場(蛇ヶ池)までのコースで行われ健脚を競い合った。全員到着後、正午より山頂での参加者も加えて、スキー場横の芝生の上で昼食をとりながら歓迎会、表彰式を行ない親睦を深めた後、午後2時頃散会した。

表彰式では50位までの入賞者に賞品が、また完走者全員に完走証書が渡された。個人優勝の西原杯を獲得したのは冶金学教室の足立裕彦教授でハンディを考慮したタイムは41分38秒という驚異的な記録となった。冶金学教室は昨年の小野教授に続いて2年連続教室主任が西原杯を獲得したことになる。足立教授を含めてベスト

テンのうち5人が40代後半から50代前半の方で熟年パワーの健在ぶりを示した大会となった。なお実走時間の1位は平野克幸君(資源4回生)でタイムは56分45秒である。また新人賞は金属系の大垣和信君が獲得した。団体優勝の三雲杯は金属加工学教室が4年連続で獲得した。詳しい記録は以下の通りである(タイムはハンディを考慮している)。



個人成績

順位	氏名	所属	修正時間
1.	足立 裕彦	冶金教官	41分 38秒
2.	園田 義次	金属職員	49分 25秒
3.	大槻 徹	金加教官	51分 59秒
4.	川野 晴雄	金属家族	53分 13秒
5.	平野 克幸	資源4年	56分 45秒
6.	仲田 勝	金属職員	56分 52秒
7.	光田 晁弘	金加4年	58分 39秒

8.	奥 健夫	金加教官	59分 40秒
9.	大垣 和信	金属1年	59分 47秒
10.	天野 則之	資源4年	60分 16秒

(以下略)

団体成績 (1位 50点~50位 1点)

金属加工学教室	650点	三雲杯
資源工学教室	322点	
冶金学教室	303点	

(係 朝木, 宅田, 和田)

### 会員消息

#### 治 21 卒業 50 周年クラス会

21年卒業の我々は入学してから50周年を迎え、6月12日に同窓会を開催しました。遠く大分から野村、松山から浅野、そして川西から河井と川島、宝塚から池田、地元の京都から相原と6名が参加しました。久しぶりの京都を楽しんだ人もあり、夕方6時に円山公園の「いそべ」に集合しました。話は学生時代の下宿や動員の事でしたが、苦しい事よりも楽しかった事の方が印象的でした。時間のたつのも忘れ、話は尽きなかったが、元気な間に何回も会ってと、再開を約して祇園さんを後にしました。



池田 河井  
相原 浅野 野村 川島

## 21年京大冶金会

H5.6.12 円山公園「いそべ」にて

池田 保  
河井 保  
浅野 保  
野村 保  
川島 保  
相原 保

21年卒業の我々は入学してから50周年を迎え、6月12日に同窓会を開催しました。遠く大分から野村、松山から浅野、そして川西から河井と川島、宝塚から池田、地元の京都から相原と6名が参加しました。久しぶりの京都を楽しんだ人もあり、夕方6時に円山公園の「いそべ」に集合しました。話は学生時代の下宿や動員の事でしたが、苦しい事よりも楽しかった事の方が印象的でした。時間のたつのも忘れ、話は尽きなかったが、元気な間に何回も会ってと、再開を約して祇園さんを後にしました。

世目の学生時代の話を花が咲き  
ました。同窓会皆様の御健勝  
をお祈り致します。  
相原和徳

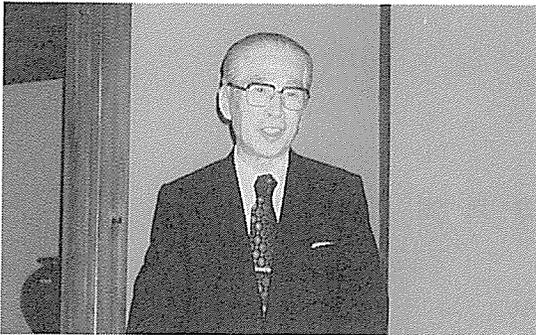
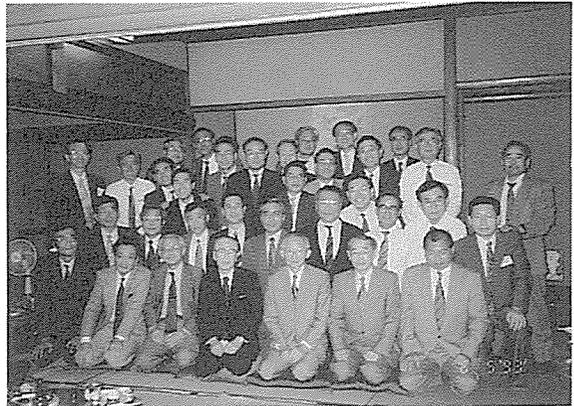
池田 保  
河井 保  
浅野 保  
野村 保  
川島 保  
相原 保

治 38 卒業 30 周年クラス会

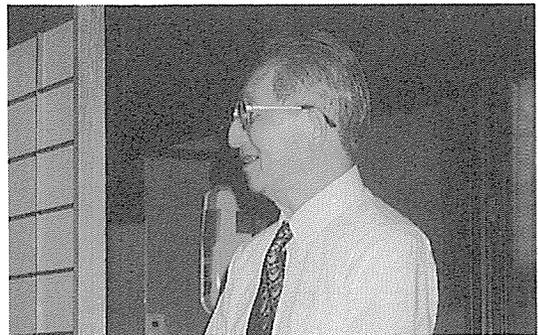
平成 5 年 6 月 5 日、京都祇園「富乃井」にて、冶金学科昭和 38 年卒業生の 30 周年同窓会を催した。当日は、卒業生 43 名中 27 名が出席し、又村上、盛先生をはじめとして川野、一瀬、新宮、小野先生、そして飛び入りで三浦先生にもご参加をいただき、総勢 34 名の大宴会となった。

村上先生のご発声で乾杯の後、なつかしい顔ぶれが 30 年前に戻ったような中で歓談した。各先生の近況のお話の後、卒業生各自のスピーチを行ったが、さすが社会の第一線で活躍している者ばかりのためか口角泡を飛ばして自社の PR あるいは仕事の紹介等があり、盛り上がった。そして最後に逍遙の歌（三高寮歌）を合唱し、3 年後の再会を約して解散した。

(吉澤 記)



(村上先生)



(盛先生)

三八水曜会

平成五年六月五日

於京都 富乃井

川野	三浦	村上	盛	小野	一瀬	新宮	三浦
豊	利	陽	利	昭	英	秀	英
野	真	太郎	貞	敏	爾	天	太郎
村	石	竹	石	南	中	吉	大
本	崎	田	崎	英	村	澤	塚
固	守	敦	寿	八	俊	謙	良
夫	夫	夫	夫	郎	三	一	達

## 逝 去 会 員

過去半年間にご逝去の連絡はいただいております。  
 会員各位のご健勝をお祈りいたします。

## 教 室 報 告

## 教官人事

資源工学教室 なし

## 金属系教室

平 5. 7. 16

津久井克幸 金属加工学教室助手に採用  
 (早稲田大学理工学部より)

平 5. 8. 1

栗倉 泰弘 冶金学教室教授に昇任

平 5. 11. 1

鈴木 亮輔 冶金学教室助教授に昇任

## 平 成 5 年 度 水 曜 会 誌 編 集 委 員

委員長  
 幹事  
 委員

小 野 勝 敏  
 芦 田 讓 津 崎 兼 彰  
 八 田 夏 夫 関 順 一 北 田 紀 芳 則 竹 和 光  
 斉 藤 修 二 高 橋 克 侑 竹 本 裕 楠 井 潤  
 川 崎 実 山 口 進 富 井 洋 一 尾 野 均  
 天 野 宗 幸 長 尾 護 松 原 英 一 郎 (順 不 同)

平成 5 年 12 月 15 日 印刷 平成 5 年 12 月 20 日 発行

編 集 兼  
 発 行 者  
 印 刷 者

若 松 貴 英  
 小 林 積 造  
 日本印刷出版株式会社

553 大阪市福島区吉野 1 丁目 2 番 7 号  
 電 話 大阪 (441) 6594~7  
 FAX 大阪 (443) 5815

発 行 所 京 都 大 学 工 学 部  
 資 源 工 学 教 室 ・ 冶 金 学 教 室  
 金 属 加 工 学 教 室

水 曜 会

606 京都市左京区吉田本町

振替口座 京都 9-26568 電話 (075) 753-7531 (大代表)

銀行口座 第一勧業銀行百万辺支店

普通 476-1242526 水曜会

## 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』を前号より設け、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（次頁に掲載）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。

会誌発行は現在のところ6月、12月の年2回行っており、各号の原稿締切は3カ月前となっております。また、編集委員会は1月末、7月末に開催しておりますので、皆様からのご意見、ご投稿をお待ちしております。

## 水曜会誌投稿規定 (昭和 62 年 4 月 23 日改訂)

### 1. 投稿要領

- (1) 投稿原稿の著者（連名の場合は 1 名以上）は水曜会会員でなければならない。ただし、水曜会誌編集委員会（以下編集委員会という）で認めた場合はこの限りではない。
- (2) 投稿原稿は論文、報告、総説、講座、資料、会員消息などとし、分類指定がない場合には編集委員会が判定する。
- (3) 投稿原稿の分類はつぎの基準にしたがうものとする。
  - a. 論文 他の刊行物の未発表のもので、独創性をもつ著者の基礎研究または応用研究の成果、技術の開発改良などを内容とするもの。
  - b. 報告 現場の操業報告などに類するもので、学術的に価値があると認められるもの。
  - c. 総説 特定の問題について普遍的に広い視野から解説し、その推移を知るうえで役立つもの。
  - 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 語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、これを越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。  
〒 606-01 京都市左京区吉田本町  
京都大学工学部資源工学・金属系教室内

### 水曜会誌編集委員会宛

- (8) 原稿は水曜会誌編集委員会が受理した日をもって受理日とする。
  - (9) 投稿原稿に対し、編集委員会は査読を行って掲載の可否を決定する。また、査読結果に基づき編集委員会は投稿原稿に対して問合わせ、または内容の修正を求めることがある。
  - (10) 編集委員会は、用語ならびに体裁統一のため編集係によって文意を変えない程度に投稿原稿の字句の修正をすることがある。
  - (11) 初校は著者にて行ない、第 2 校以降は編集委員が行う。初校における原文訂正の必要のないようとくに留意されたい。
  - (12) 別刷については実費を負担されたい。著者は、著者校正と同時に別刷必要部数を申し出るものとする。
- ### 2. 原稿の書き方
- (1) 章・節などの区分はポイント・システムによる。すなわち、章に相当する 1・緒言などは中央に 2 行分をとり、節に相当する 1・1 実験方法などは左端に書き、つぎの行より本文を書くようにする。また、項や目に相当する(1)試料などは左端に書き、2 字分あけて本文をつづける。
  - (2) 図面は鮮明なものであること。刷上り図面の大きさは横幅でもって指定するものとするが、横幅は 1 段（65 mm 以内）または 2 段通し（140 mm 以内）のいずれかとなることを考慮されたい。原図は刷上り図面の少なくとも 2 倍に書かれたい。この際図面の縮尺を考慮して作図し、とくに図中の文字の大きさについては十分に注意を払われたい。また、原図の左下隅に著者名、論文名、図表番号などを必ず明記されたい。
  - (3) 単位は国際単位系（SI 単位系）によることが望ましい。
  - (4) 参考のため文献を記す場合には本文の肩に 1). 2) などを付し、論文末尾につぎほ形式で書き加えること。
    - 1) 大塚一雄, 宮越 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。

Kubota  
美しい日本をつくろう。

生命の見る夢。  
地球の見る夢。

LOVE  
THE EARTH  
MORE

株式会社クボタ

「ラフ・ハース・モア」水や土などの環境と人間の  
共生に取り組むクボタからの呼びかけです。

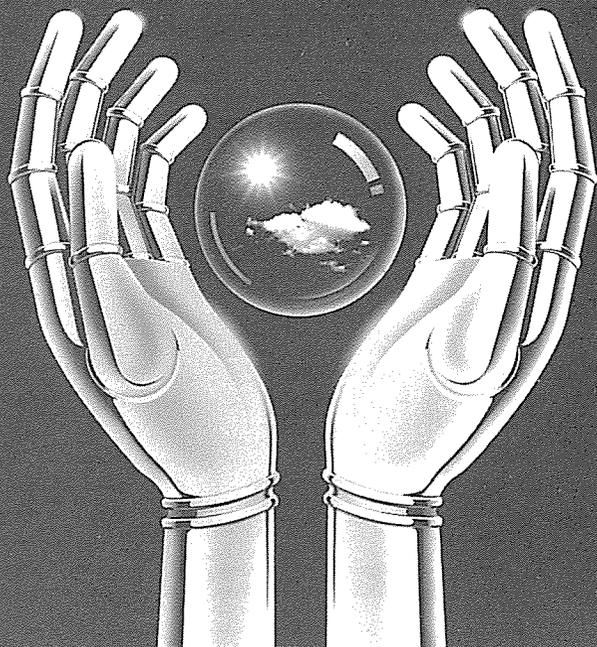
87年度ノーベル医学・生理学賞受賞 利根川 進

スピードはひかえめに。シートベルトは忘れずに。



Mark, the MARK II 人へ。社会へ。地球へ。  TOYOTA

# 資源を活かした未来づくり



私たちは  
人とのふれあいを深め  
アルミニウムを基軸として  
地球の未来づくりに  
貢献します。

## ■ ELECTRONICS

電子機器産業用アルミ製品、ポリゴンミラー、  
アモルファスシリコン感光ドラム、  
電磁波シールド、メモリーディスク

## ■ MOTORIZATION

自動車・二輪車用熱交換器、自動車専用AIM、  
軽量化部品

## ■ SPORTS

ハンダライダー、バット、スキーストック等

## ■ ENERGY

アルソーラー、サントルーフ、サントホイル、  
サーモコイル、トリスタン計画用超高真空材

## ■ FAMILY

食品医薬品包装材、容器、アルミ缶、家庭日用品等



東京都千代田区飯田橋3丁目6番5号 ☎102 ☎03 (3239) 5321

**昭和アルミニウム株式会社**



夢を形にする。

**Ansaku**

営業品目 / ロープウェイ  
ゴンドラリフト  
チェアリフト  
Tバーリフト  
Jバーリフト  
プラットーリフト  
スーパースライダー  
ウォータースライド  
トランスモービル  
人工造雪機  
各種ゴルフ場機器

**安全索道株式会社**  
本社及工場：滋賀県甲賀郡水口町笹が丘1番地13 (0748) 62-8001  
東京本店：東京都中央区日本橋本石町3-2-12 (03) 3241-2361

# 規格をリードする モービルオイル。



新・超高性能規格  
**API SH**

SHは、ますます高まる地球環境保護と、高性能化するエンジンという時代の要請に対応するために、新たに設けられたオイルの世界規格です。Mobil 1は、発表当初から将来の厳しい諸条件を想定し、時代の流れを先取りして開発された100%化学合成オイルです。生まれたときから、既にSHの基準をクリアーする高品質を実現しています。

## Mobil

モービル石油株式会社

〒100 東京都千代田区大手町1-7-2(サンケイビル新館) ☎03(3244)4336

# Suiyōkwai-Shi

TRANSACTIONS OF THE MINING AND METALLURGICAL

ASSOCIATION

KYOTO

## CONTENTS

### Memorial lectures in the Annual Meeting of Suiyōkwai

- The Stature of Managing a Steel Plant ..... Hiroshi SUGITA ..... 1  
Technological Higher Education in Japan ..... Jun-ichi KOKADO ..... 9

### Reviews

- Microscopic investigation of surfaces and interfaces by scanning  
tunneling microscopy (STM) ..... Yukio HASEGAWA ..... 13  
Nano-Space Observation by High-Resolution Electron Microscopy ..... Takeo OKU ..... 20

### Forum

- Novice Meeting in Our Departments ..... S. R. NISHITANI ..... 29  
Report on "The 10th International Conference on Internal Friction  
and Ultrasonic Attenuation in Solids" ..... Hiroshi NUMAKURA ..... 31

- Suiyōkwai Information** ..... 34

- Letters to Editor** ..... 36

Department of Mineral Science and Technology  
Department of Metallurgy  
Department of Metal Science and Technology  
Kyoto University  
Japan