

# 水曜會誌

## 第 22 卷 第 6 号

### 目 次

#### 講 座

- チタニウムの製錬の歴史 (III) ..... 森山徐一郎 ..... 335  
ミクロとマクロを結ぶ力学 II. 粘弾性体の均質化理論 ..... 市川 康明 ..... 344

#### 論 文

- 単一地下空間内の気象環境を予測するための簡易計算システム ..... (張 曉明  
水田 義明) ..... 354

#### 資 料

- 湿式ガスリークテストに関する基礎的研究 —“水の泡”の除去について— ..... 駕海 真樹 ..... 359

#### 談 話 室

- タタラ製鉄を見学して ..... 熱田 善男 ..... 366  
MIT 材料学科 ..... 岡部 徹 ..... 372  
日中国際協力事業団技術協力プロジェクト  
—中国鉱物資源探査研究センターの紹介 ..... 常 旭 ..... 377

- 研究速報 ..... 379

- 会 報 ..... 400

- 会 員 消 息 ..... 410

平成 8 年 6 月 30 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

私たちの世界はサイエンス&テクノロジー

Geo'X

KAWASAKI

㊦ 川崎地質株式会社

代表取締役社長 三木 幸藏

常務取締役支社長 砥上 邦生

|      |      |                   |
|------|------|-------------------|
| 本社   | 〒143 | 東京都大田区大森北1丁目11番1号 |
|      | TEL  | 03-3763-7721      |
|      | FAX  | 03-3763-7747      |
| 関西支社 | 〒556 | 大阪市浪速区敷津西2丁目1番12号 |
|      | TEL  | 06-649-2215       |
|      | FAX  | 06-649-2240       |
| 神戸支店 | 〒596 | 神戸市中央区加納町2丁目4番10号 |
|      | TEL  | 078-232-0426      |
|      | FAX  | 078-232-0473      |

ドキドキする  
エナジーが  
好きだ。

しっかりやろうよ  
たのしくやろうよ  
テクノとハートで。

明日に新・呼吸!

鉄鋼を核に、  
エレクトロニクスもシステムも  
バイオ・メディカルも  
みんな住友金属で育っています。

テクノハート・カンパニー  
 住友金属

●住友金属は鹿島アントラーズのメインサポーターです。

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



## 地質調査

### ●地質調査(地下資源)

- ▶金属・非金属鉱床、地熱、地下水・温泉、石油・天然ガス等の地質調査と物理探査、試錐
- ▶鉱物・岩石等の鑑定

### ●地質調査(土木地質)

- ▶鉄道、道路、トンネル、橋梁、ダム、河川砂防・海岸、港湾、建物、上下水道等建設工事のための地質・土質の調査と解析
- ▶海底地質、地すべり、活断層、地下空洞等の調査と解析
- ▶土質・岩石等の試験

### ●資源開発

- ▶採鉱・採石・選鉱・製錬・精製の調査、設計と施工監理
- ▶鉱業権調査

Sumicon



## 建設コンサルタント

### ●土木設計と施工監理

- ▶道路、橋梁、上下水道、河川砂防、海岸港湾、工業団地・宅地、ゴルフ場、トンネル通気・冷却等の設計と施工監理

### ●環境調査と公害防止設計施工監理

- ▶大気、水質、振動、騒音、極微小地震、交通量、重金属、スライム、土砂、ずり堆積等の調査と公害防止対策の設計・施工監理

### ●測量

- ▶地形、都市計画、道路、河川、深淺、用地農地、森林、鉱山等の測量

### ●補償(営業補償・特殊補償部門)

## 住鉱コンサルタント株式会社

代表取締役社長 酒井 九州男

本社／東京都新宿区歌舞伎町2-16-9(新宿TKビル) ☎ 03(3205)6031(代)

支店／札幌・仙台・東京・名古屋・大阪・四国 営業所／水戸・広島・松山・九州 試験室／札幌・千葉



胸すく  
セダンだ。

あなたと創る *Creating Together*  三菱自動車

シートベルトをして、スピードをひかえめに。安全運転は三菱の願いです。

その走り、そのフォルム、想像以上。



PHOTO: MX TOURING 14インチアルミホイールはオプション。

グッドラン ランサー快進  
**LANCER**



## 日本国土開発は、 幸せなんかも建設してしまえ。

【社会の意見】橋やダムや空港やビルや街を、ただ造るんじゃなくて、みんなが幸せになるように建設してほしい。  
【わが社の思い】ハイ、そうします。ひとと社会を快適にする建設会社をめざします。

日本国土開発 株式会社

東京都港区赤坂4-9-9 〒107  
TEL (03) 3403-3311 (大代表)

新・素・材・で・未・来・に・挑・む



日立金属のカミソリ替刃材は、  
今日も、世界中の人々に使われています。  
ふだん、なにげなく使っているカミソリの刃に、日立金属の高級特殊鋼（ヤスキハガネ）が使われていることを存じでしょうか。当社の替刃材は、「蓄積された製鋼技術」、「厚さ0.1ミリにミクロ管理された圧延技術」により、世界の主要メーカーへメジャー・サプライヤーとして貢献しています。この替刃材製造技術は、半導体のリードフレーム材やテレビのシャドウマスク材にと、その応用範囲を広げています。



毎日、あなたと  
お会いしています。

「カミソリを見たら  
思い出してください。」

日立金属株式会社 本社 〒100 東京都千代田区丸の内2-1-2 (千代田ビル) 電話 (03) 3284-4518

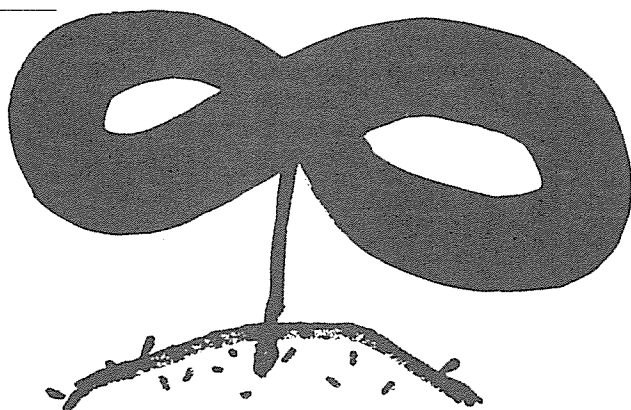
営業品目 高級特殊鋼 金型・切削工具用材料 エレクトロニクス関連製品 マグネット、電子金属材料 自動車用部品 アルミホイール、マレプル鋳物  
配管機器 〇印管継手、精密流体制御機器 機械・建築構造物 ロール、鉄骨構造部品 プラント 環境設備、産業設備



**NKK**

日本鋼管株式会社

360°に多感です。



# 想像力が、創造力。

## 無限大の夢、応援します。

「あったらいいのに」とか「できたらいいのに」とか。ひとが生み出す想像力は、いつも未来を向いています。明日はどこまで広がるだろう。いろんな想いを、いろんなカタチにしていきたい。私たちは、NKKです。

**セメダイン****粘着接着**

**CEMEDINE**  
**SUPER X**  
NO.8008

一 液

無溶剤

弾 性

常温硬化

### 広範な接着性

セメダイン・スーパーXは、接着剤の理想の概念と言われている「粘着接着」と「弾性接着」そして「無溶剤」という三大特長を備えた世界初の画期的な一液常温速硬化形接着剤です。

さらに、最先端技術によって開発されたNEWテクノポリマーにより、現在の接着剤に対するさまざまな社会的ニーズを満足する機能を備えることができました。

代理店 セメダイン(株)・日本ロックタイト(株)・住鋁潤滑剤(株)・信越化学工業(株)・東レ・ダウコーニング・シリコン(株)・積水化学工業(株)・旭硝子(株)・昭和電工(株)・シャープ(株)・ニチバン(株)・ダイキン工業(株)

**株式会社 沢村商会**

代表取締役 澤村行高

本 社 〒601 京都市南区吉祥院西定成町5番地  
TEL (075) 691-7351 (代表)  
FAX (075) 671-8503

久御山(支) 〒613 京都府久世郡久御山町佐山新開地75  
TEL (0774) 45-0351  
FAX (0774) 45-0650



• Main Technology •

PCタンク  
PC橋梁  
推進工法  
シールド工法

地域環境整備と共に歩む

## 機動建設工業株式会社

代表取締役会長 木村 宏一 (昭和26年卒)

代表取締役社長 木村 信彦 (昭和30年卒)

本社 〒553 大阪市福島区福島4丁目6番31号 TEL.06(458) 5461(代)  
東京支社 〒113 東京都文京区向丘1丁目8番12号 TEL.03(3813)3641(代)

JOMO

一度使えばちゃんと割引! 使えば使うほどガソリン割引!

# ガス割<sup>カード</sup>

## JOMOカード新登場!!

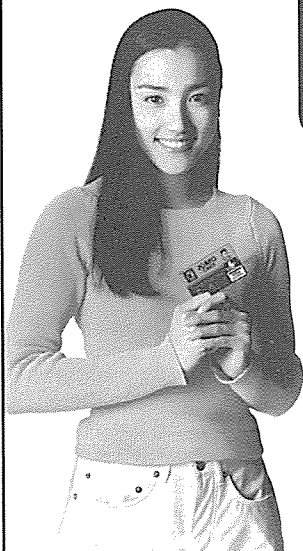
JOMOステーションで1回でも給油すれば、1.5%OFF (レギュラー)

GP-1プラスなら最大 軽油なら最大  
[45%OFF] [15%OFF]  
レギュラーなら最大 灯油なら最大  
[30%OFF] [9%OFF]



「ガス割カード」の方程式

- ① 当月 ▶ JOMOカードを使う!
- ② 翌月 ▶ ポイントが決まる!
- ③ 翌々月 ▶ JOMOカードで給油する!
- ④ ご請求 ▶ ご請求時におトクを実感!



たのしいドライブ、うれしいメリット。

### JOMOステーション

株式会社 ジャパンエナジー



夢を形にする\_\_\_\_\_。

**Ansaku**

営業品目／ロープウェイ  
 ゴンドラリフト  
 チェアーリフト  
 Tバーリフト  
 Jバーリフト  
 プラッターリフト  
 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**  
 本社及び工場：滋賀県甲賀郡水口町荻が丘1番地13 (0748) 62-8001  
 東京本店：東京都中央区日本橋本町3-2-12 (03) 3241-2361

ミケランジェロやラファエロに代表されるフレスコ画。石灰しっくい、作家の吐く息や空気中の二酸化炭素と結合し、壁で固まってゆきます。もっと地球規模の石灰の話は、中国、桂林で語ることが出来ます。桂林もかつては海底だったとか。あの大量の石灰の奇岩群が二酸化炭素を閉じ込めてくれたおかげで、人は誕生したのです。人も、芸術も、石灰のおせっかいの賜物。私たち、住友金属鉱山は、地球が営む、こんな自然の大循環を謙虚に受けとめながら物づくりをしていきたいと思えます。気の遠くなるような時の流れの中でたくわえられた地球の財産。十分に敬意を払いつつ、これを有効に生かしていくためには、私たち自身が時を超えて伝えられる心と技術を育んでゆかねばなりません。人も、私たち住友金属鉱山も地球という大自然の一部なのですから。

地球の営みと、  
ひとつでありたい。



**住友金属鉱山株式会社**





# 品質第一 すべての基本

J I S 規格票の販売と取得のためのセミナー及び技術指導

海外規格 ISO・IEC・BS・EN・ASME・ASTM・  
DINその他及び邦訳版の販売と閲覧サービス

品質経営 ISO-9000、-1400、TQM、標準化、TPM、CS、JIT  
PL、TPM、に関する講習会開催とコンサルテーション

## (財)日本規格協会関西支部

事務局長 金谷 宗忠

〒541 大阪市中央区本町3丁目4-10(本町野村ビル) TEL(06)261-8086 FAX(06)261-9114

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



ワールドミニで未来を創る/  
ダイハツ工業株式会社

●スピードは控えめに、シートベルトはしっかりと。

# ワールドミニで 未来を創る。

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。  
私たち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。



**ムーヴ CL**

## 最先端と素敵な出合

データベースでダイナミックプリンティングコミュニケーション

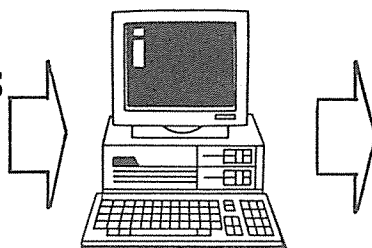
富士通

OASYS

NEC

PC-9801

入力装置  
ドッド文字



富士通 NEC  
9450シリーズ PC-9801

生まれかわるデータベース

写研

美しい  
文字

会員管理・名簿管理・調査票発送・集計・印刷・請求・販売促進・検索

Cコーポレートアイデンティティで企業発展に貢献する

# 日本印刷出版株式会社

■本 社 〒553 大阪市福島区吉野 1 丁目 2 番 7 号 / TEL 06-441-6594(代)

■電算室 〒553 大阪市福島区吉野 1 丁目 3 番18号

金属箔と金属粉の総合メーカー

**FUKUDA**  
FUKUDA METAL FOIL & POWDER CO., LTD.

All-around manufacturer of Metal Foil and Powder

## ニーズから発想、シーズから創造。

硬い塊でしかない金属をミクロン単位の箔や粉に変化させる……。FUKUDAは金属のミクロの世界を演出するメタルスタイリストなのです。

### Idea from needs, and creation from seeds.

Fukuda is a metal stylist as a director for microworld of metal and changes metal of simple hard lump into foil and powder with micron unit.



#### お問合せ先

本社・京都工場 〒607 京都市山科区西野山中臣町20  
TEL075-581-2161 (代表)

営業本部 〒607 京都市山科区西野山中臣町20  
TEL075-593-1590 (代表)

東京支店 〒103 東京都中央区日本橋3丁目9番1号  
TEL03-3271-4411 (代表)

名古屋支店 〒460 名古屋市中区錦3丁目7番9号  
太陽生命名古屋第二ビル3階 TEL052-961-7851 (代表)

大阪支店 〒541 大阪市中央区南本町2丁目2番2号  
明治屋ビル4階 TEL06-271-0051 (代表)

福岡営業所 〒812 福岡市博多区博多駅東2丁目17番5号  
モリメンビル3階 TEL092-451-8751

滋賀工場 〒527-01 滋賀県愛知郡湖東町大字平柳字北浦514  
TEL0749-45-0841 (代表)

#### Head Office/

#### Kyoto Factory:

20, Nakatomi-cho, Nishinoyama, Yamashina-ku, Kyoto, 607  
Japan (phone) 075-581-2161

#### Business

#### Headquarters:

20, Nakatomi-cho, Nishinoyama, Yamashina-ku, Kyoto, 607  
Japan (phone) 075-593-1590

#### Tokyo Branch:

9-1, 3-chome, Nihonbashi, Chuo-ku, Tokyo, 103 Japan  
(phone) 03-271-4411

#### Nagoya Branch:

Taiyo-Seimei Nagoya Daini Bldg. 3rd Floor, 7-9, Nishiki  
3-chome, Naka-ku, Nagoya, 460 Japan (phone) 052-961-7851  
Meijiya Bldg. 4th floor, 2-chome, Minami-Honmachi, Chuo-ku,  
Osaka, 541 Japan (phone) 06-271-0051

#### Osaka Branch:

Fukuoka Sales Office: Morimen Bldg. 3th floor, 17-5 Hakata-eki Higashi 2-chome,  
Hakata-ku Fukuoka, 812 Japan (phone) 092-451-8751

#### Siga Factory:

514, Azakitaura, Oaza Hirayanagi, Koto-cho, Echi-gun, Siga,  
527-01 Japan (phone) 0749-45-0841

## 福田金属箔粉工業株式会社

本社／京都市山科区西野山中臣町20 営業本部／TEL.075-593-1590 FAX.075-501-1895



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

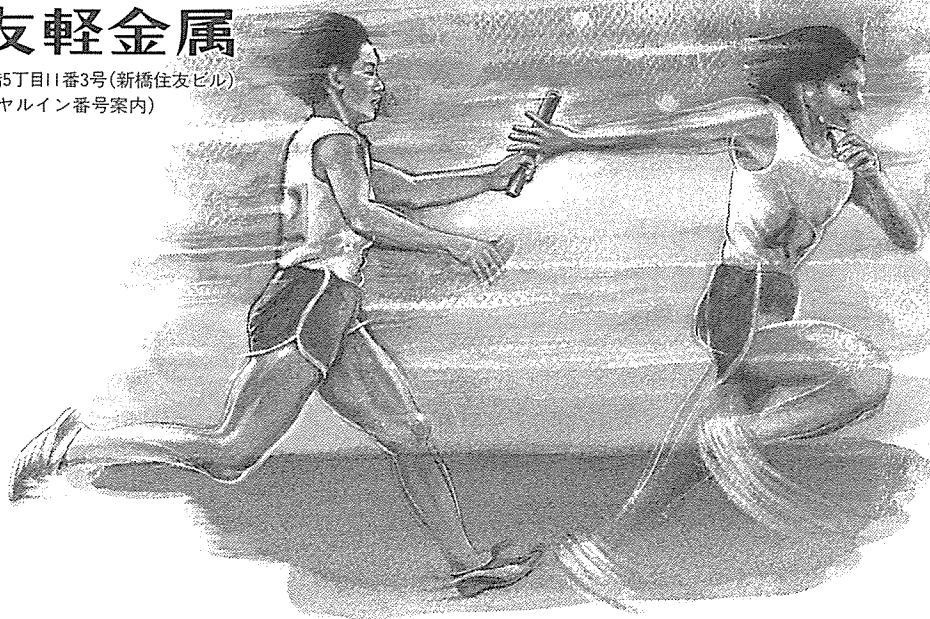
FAX (0775) 65-8118



### 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)



## アルミはリレー 競走が得意です。

みんなが、地球ともっともっと仲良くしていこうという時代にアルミがめざしていること——それは、リサイクルリングがたやすくできる利点を精一杯生かすことです。建築・車両・船舶をはじめ日用品や飲料缶…あっちでもこっちでもアルミはリレー競走やってます。エキサイティングに。

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 | 福井市白方町第45号5番地9   | TEL (0776)85-1811(代) | FAX (0776)85-1313 |
| 大 阪 | 〒567    | 茨木市五日市1丁目2番1号    | TEL (0726)26-1313(代) | FAX (0726)26-1353 |
| 東 京 | 〒104    | 東京都中央区八重洲2丁目6番5号 | TEL (03)3278-1188(代) | FAX (03)3278-1329 |



## 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 場 | 大阪証券取引所<br>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

## 講 座

## チタニウムの製錬の歴史 (III)

森 山 徐 一 郎\*

## Metallurgy of Titanium (III)

## —A Historical Review—

by Joichiro MORIYAMA

## 9. Bureau of Mines における初期のチタニウム製錬の研究(続)

前節で述べたように、米国鉱山局の工業化実験は図 25 の工程図のように四塩化チタニウムのマグネシウム還元について検討せられた。出発材料である四塩化チタニウムはイルメナイトを電気炉中で鉄分を選択還元して除き生じたスラグに炭素を加えて団鉱とし、800°C付近で塩化し製造される。この方法はすでに述べたが、19世紀末に報告せられた化学反応によっている。炭素の添加はジルコニウムの場合と同様に塩化炉雰囲気中の酸素の化学ポテンシャルを下げて塩化反応を生成系の方向に移行するためである。鉱石中の成分も同時に塩化され生成した四塩化チタニウム中に含まれる。表 6 には混入する不純物の塩化物の沸点を示す。この中には四塩化チタニウムの沸点(136°C)に近いもの  $\text{Si}_2\text{Cl}_2$ 、 $\text{VOCl}_3$  もあり、また、沸点の高い塩化物もあり、沸点の低いものでは、 $\text{SiCl}_4$  の他  $\text{Cl}_2$ 、 $\text{COCl}_2$  も含まれる。四塩化チタニウムは大気中の湿度で加水分解しチタン酸、塩酸、オキシ塩化物が生成する。これらの不純物のあるものは、例えば  $\text{S}_2\text{Cl}_2$ 、 $\text{SiCl}_3$ 、 $\text{VOCl}_3$  等はその沸点が四塩化チタニウムの沸点に近いので精溜操作による分離では段数が多くなり生産性に乏しい。そこで、Bureau of Mines ではバナジウム化合物 0.3% を含む四塩化チタニウムの精製について、ナトリウム・アマルガム、脂肪酸、銅粉、硫化水素等による化学処理法が種々検討された。その結果、硫化水素処理によるバナジウムの除去方法が採用され工業化試験で検討された。この方法は現在も工業生産に用いられている。この処理で沸点 138°C のイオウ塩化物は  $\text{SCl}_2$  (沸点 59°C) に分解される。バナジウムは固体の硫化物として

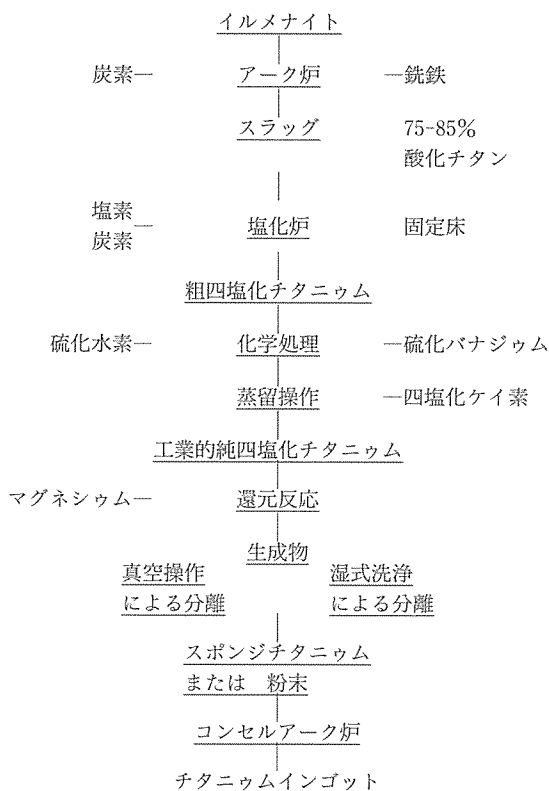


図 25 Bureau of Mines における工業化試験の工程図 (1947-1952)

沈殿し除去することが出来る。吾妻ら<sup>60)</sup>はこの黒色の沈殿物は  $\text{VSCl}_3$  又は  $\text{VOHS} \cdot \text{HCl}$  であると報告している。この場合四塩化チタニウムも一部硫化水素と反応して  $\text{Ti-Sulfo-Chloride}$  が生成し<sup>31)</sup>沈殿すると同時に溶解して四塩化チタニウム溶液は幾分黒色となる。

Bureau of Mines の四塩化チタニウムの精製工程の工業化試験の系統図を図 26 に模式的に示す。四塩化チ

\*京都大学名誉教授

表6 鉍石を塩化する際に混入する不純物の塩化生成物の沸点  
( $\text{TiCl}_4$  136°C, s. g. 1.726)

|                   |                 |                         |                          |                 |                 |                 |
|-------------------|-----------------|-------------------------|--------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| volatile          | $\text{FeCl}_3$ | $\text{SiCl}_4$         | $\text{Si}_2\text{Cl}_6$ | $\text{ZrCl}_4$ | $\text{AlCl}_3$ | $\text{VOCl}_3$ |
| boiling point(°C) | 319             | 57.6                    | 144                      | 331             | 183             | 127             |
| volatile          | $\text{SCl}_2$  | $\text{S}_2\text{Cl}_2$ | $\text{SnCl}_4$          |                 |                 |                 |
| boiling point(°C) | 59              | 138                     | 114                      |                 |                 |                 |
| Nonvolatile       |                 | $\text{FeCl}_2$         | $\text{MgCl}_2$          | $\text{CaCl}_2$ | $\text{NaCl}$   | $\text{KCl}$    |
| boiling point(°C) |                 | 1026                    | 1418                     | 1900            | 1465            | 1407            |

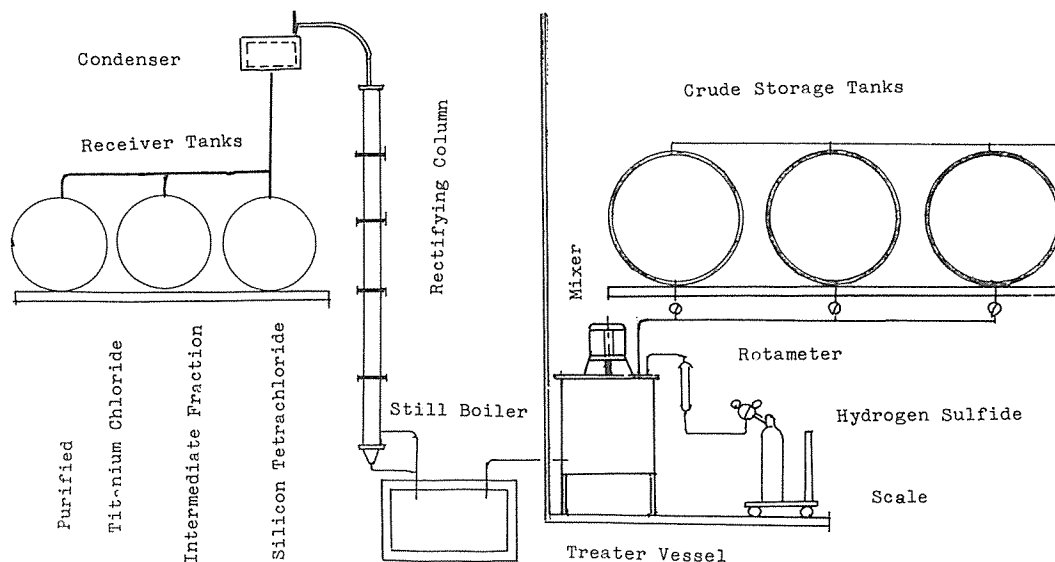


図26 Bureau of Mines の 200 lb チタニウム製造実験のための四塩化物の精製工程  
(1952, Bureau of Mines, Boulder City)

タニウムはイルメナイトを電気炉で還元し鉄分を除いたスラグあるいはルチル鉍石に炭素と粘結剤を加え団鉍とし、さらに焼成したものを固定床で 800°C 付近の温度で塩化し製造する。この製造実験の時代では流動床は硫酸製造に実験的に行われており、塩化物の製造は固定床により行われた。そのために四塩化ケイ素の混入が多い。

図26において粗の四塩化チタニウムは貯槽に蓄えられる。この原液中には 0.3% のバナジウムの塩化物と 0.7% 前後の四塩化ケイ素が含まれる。まず、原液は硫化水素処理装置に送られる。この実験装置は鉄製で径 30 in、深さ 40 in の円筒で 1350~1400 lb の粗四塩化チタニウムが装入される。電熱で 2 時間で 95°C まで加熱する。この間にも、1/2 lb の硫化水素が加えられる。次に 3 時間で 1 1/2~3 1/2 lb の硫化水素が添加される。原液が透明になると蒸溜装置に移送する、この硫化水素処理でバナジウムは前記のように硫化物として沈殿し、また、イオウの塩化物  $\text{S}_2\text{Cl}_2$  は  $\text{SCl}_4$  と  $\text{SCl}_2$  に分離すると報告されている。

精溜管は径 10 cm、長さ 400 cm の鋼管で内部に 1 cm 径のラシヒリングが充填されており、外側はアスベスト、マグネシア等で保温されている。4 回の分溜が行われる。初溜には 120°C 以下の沸点の化合物、塩酸、ホスゲン、四塩化ケイ素と塩素等が含まれる。第 2 回の分溜中には少量の四塩化ケイ素が含まれるので再処理して除去する。これらの蒸溜は高い還流比で行われる。主溜はほぼ純粋な四塩化チタニウムで、残留物中には塩化鉄、塩化アルミニウム、チタニウムのオキシ塩化物が残る。

当然のことではあるが、原料中の四塩化ケイ素の含有量が 1% 以下の場合には初溜及び第 2 分溜は装入原料の 5% 付近にとどまり、従って四塩化チタニウムの採取量が多いが、原料中に 30~40 g/l の四塩化ケイ素を含む場合には主溜としての四塩化チタニウムの収率は 50% 付近まで急速に下降する。

以上が Bureau of Mines で初期に行われた塩化物の製造および精製の概要であるが、現在では流動塩化が行われているので四塩化ケイ素の混入は少ない。しかし硫



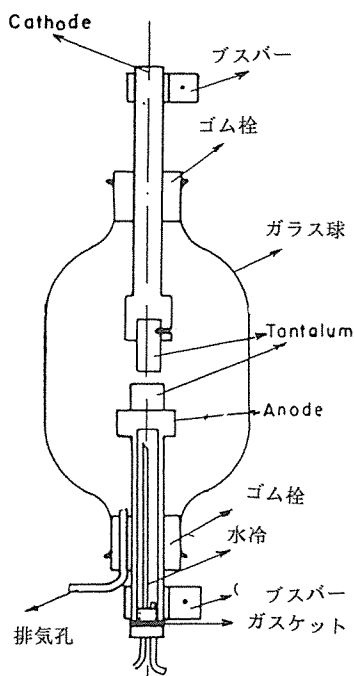


図 27 Bolton の真空アーク炉  
(金属タンタルの溶解)

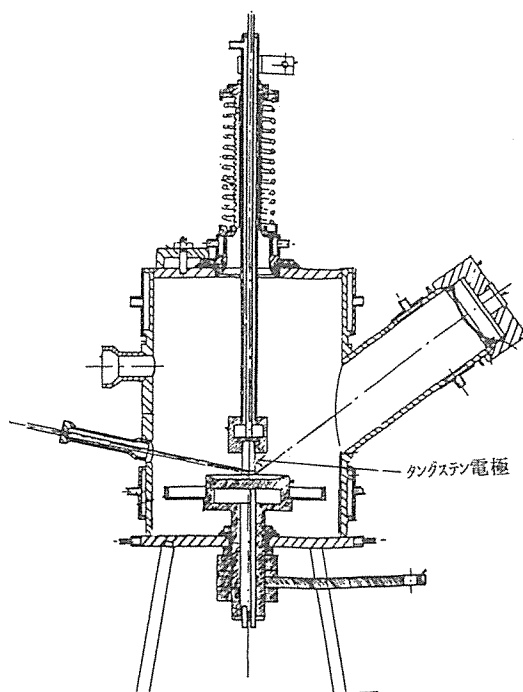


図 28 Kroll により改良された Bolton 型  
真空アーク炉 金属製  
(1940, Kroll)

化水素処理は当時のまま行われている。

この他, Bureau of Mines ではチタニウム金属の溶解法についても検討がなされ, 工業炉の開発が行われた。この当時においても, 最初は高周波炉による溶解法が検討されたが, るつば材として黒鉛以外は使用出来ないことが実証せられた。そこで Kroll の報告による<sup>16)</sup>20 世紀のはじめ von Bolton が考えたアーク炉による実験が行われた。Bolton の真空アーク炉についてはいろいろな文献で引用されているが, 原文を見た人が少ないので図 27 に原図を示して置く。この装置はガラス製で溶解する粉末タンタルの焼結体を負極とし, 水冷銅極の上にまたタンタルの焼結体が置かれ正極となる。図 28 は Bolton の炉を Knoll が改良して製作したものである。この装置は金属製であり, 上部の負の電極にはタングステン棒が用いられている。1930 年頃にはタングステンが工業的に大量に生産された時代である。ただ, タングstenは融点が高いが (3410°C) 再結晶温度は低い (1550~1650°C)。それ故電極として用いる場合はトリアで分散強化した Thoriated Tungsten の使用が望ましい。この他, 電極としては黒鉛も用いられる。このような実験用アーク炉には溶接用の直流変圧器がそのまま使用出来るので便利である。Kroll らのアーク炉は Battelle 研究所で簡素化された(図 24)。30 g 程度のチタニウム試料を作成する実験用アーク炉の概略の諸元を示すと, 寸法として 18 cm

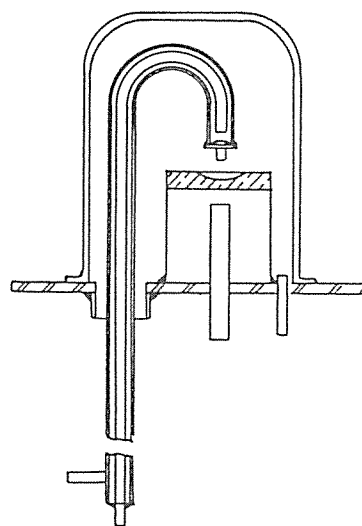


図 29 簡単な実験用アーク炉  
(Monsanto Chem. Co., 1954)

径, 高さ 22 cm の円筒中に 3 mm 径の Thoriated Tungsten の負極と水冷銅の正極を備え, 電源として 50~150 A, 40 V の溶接用変圧器を用い, 10~20 V で溶解を行う。さらに簡単な安価なアーク炉も報告されている。図 29 は Monsanto 化学会社の研究所<sup>61)</sup>で用いられたも

のである。容器は2ℓの樹脂製の“bell jar”で、約1cm厚みの鋼製円板との間はNeopreneのパッキングにより気密が保たれる。電極は不銹鋼管の一端にタングステン棒(径6mm)が溶接され、基盤とはゴムで絶縁される。200A、30Vの溶接用直流電源が用いられる。2~6gのスポンジが2t/cm<sup>2</sup>の圧力で成型され陽極である水冷銅極に置かれ、タングステン極の間に150Aの電流が流され、4~24秒で試料の溶解が終る。容器内には200mmHgのアルゴンが封入され、さらに1mm径、60cmの長さのTi線が20~25Vの電圧で900~1000°Cに加熱されゲッターとして使用される。

これらタングステン極を用いるアーク炉は実験用には便利であるが、試料が電極により幾分汚染される欠点があり、工業的に径の大きいインゴットの製造は困難である。この解決のため原料を連続的に供給し、電極を回転する方法又は磁界による金属浴の攪拌等の方法が行われた<sup>62)</sup>。結局、圧縮成型したチタニウムを電極とするアーク炉が大型のインゴットの作製のため開発されてくる。図30はBureau of Minesの報告による自溶電極を用いる

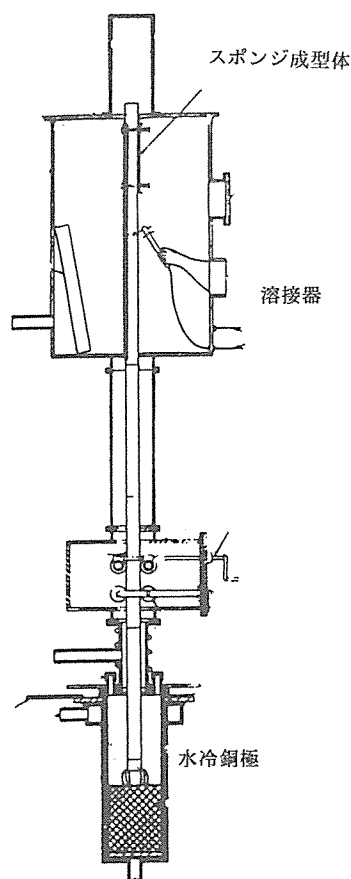


図30 消耗型電極による工業用アーク炉  
(Bureau of Mines, 1947)

アーク溶解炉の概要である。この装置では圧縮成型された棒状の試料が真空あるいは不活性ガス中で次々と溶接され、下方のアーク炉に送られる。ここでは成型体自体が電極となり、水冷銅極中の熔融金属との間のアークにより溶解が行われる。成型体自体が溶解するので自溶電極アーク炉又は消耗型電極アーク炉 (consumable electrode arc furnace) 略してコンセル、アーク炉と呼ばれ、今日ではチタニウム及びその合金の工業的な溶解装置の主流である。これに対してタングステンあるいは黒鉛等の電極を用いるものは非消耗型電極アーク炉 (non-consumable electrode arc furnace) と呼ばれている。

#### 10. 昭和20年代のわが国のチタニウムの研究

1937年の日中戦争の開始による民間の輸入品の制限により欧米からの図書の輸入も極度に少なくなった、1941年末の米英との開戦により、当然ではあるが欧米からの技術情報は完全に杜絶した。1945年に敗戦になるが、日本の都市は焦土と化し、エネルギー、食料をはじめ、あらゆる物資が底をついており、大学における研究もほとんど不可能であった。この様な混乱から少しずつ復旧への努力は行われた。昭和23年、や金学教室でのチタニウムの研究が思わぬ経緯で行われることになった。新日本金属化学の社長であった柳田彦次氏\*が占領軍の科学局の高官から、米国においてはチタニウムの工業生産の研究が本格的に行われているという情報を得たのであった。このことは神戸における西村教授、浅田長平氏との会合で語られ、三者により研究会を行うことになった。

神戸製鋼所から高尾善一郎氏、高橋孝吉氏、阪大理学部から浅田常三郎教授、京大からは西村、久島両教授と筆者が主なメンバーであった。研究テーマとして神鋼が熔融塩電解、阪大浅田研究室がヨウ度法、京大は四塩化チタニウムの活性金属による還元をそれぞれ選択した。

筆者らは、四塩化チタニウムの精製、アルゴン精製のための金属カルシウムの製造等の原料の準備と、装置の設計、組立て等が続いて、予備実験を重ねた後、昭和25年12月はじめに粉末冶金で製造した試料が可撓性を有し、靱性チタニウムの製造に到達したのである<sup>63)</sup>。この実験結果は翌年の金属学会の講演会で報告した。また実験の概要は当時の水曜会誌に記載した<sup>64)</sup>。図31は実験に用いたアルゴンの精製回路及び還元装置の全図である。

この他、大阪大学理学部千谷研究室においてもチタニウム製造の基礎研究が行われた。しかし、この頃の研究は何れも実験室規模のもので工業化試験にはほど遠い

\*柳田氏の父君は関西の大財団鈴木商店の総支配人であり、同氏は戦争前アメリカに留学し知人が多かった。

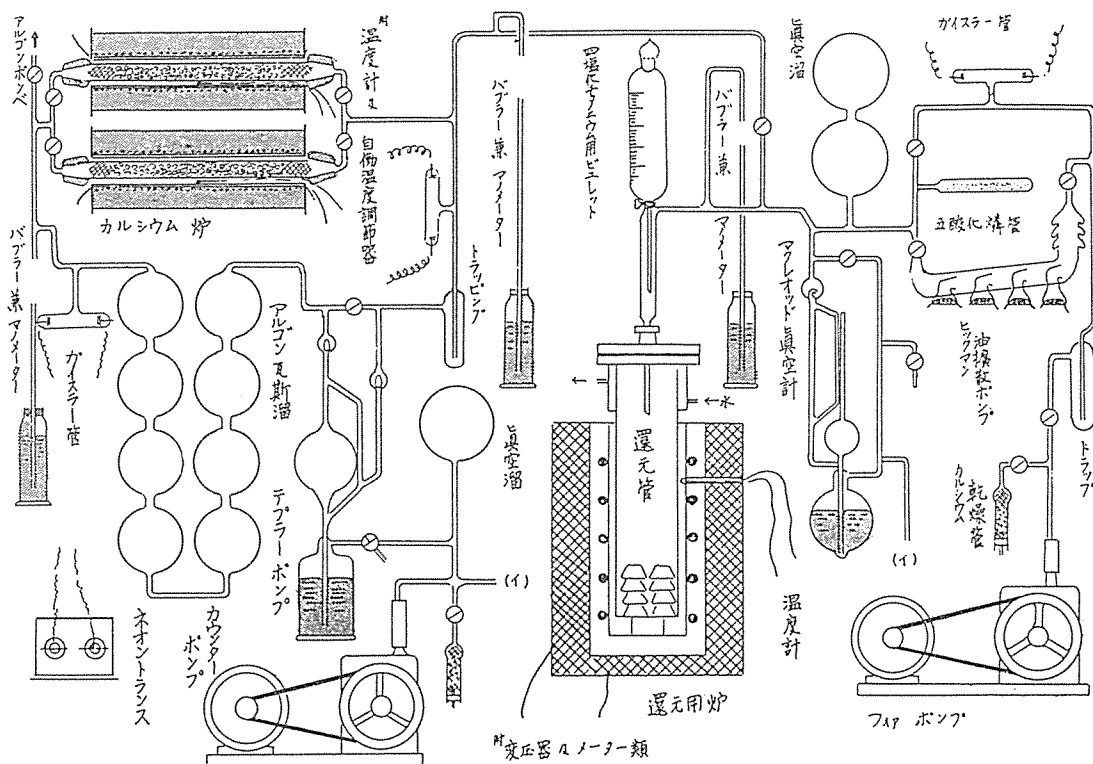


図 31 チタニウム製造実験装置  
(京大, 昭和 25 年)

ものであった。

その後、わが国のチタニウム製造の進展に大きな寄与をなす試みがあった。昭和 27 年末、当時の通産省鉱山局の川上爲治局長を石原広一郎氏が訪問し、Kroll を日本に招待しては如何かと申し出た。これに川上局長も賛同し鉱山局から関係各社に働きかけ、この計画は実現された。昭和 28 年 5 月 1 日から 23 日まで Kroll 氏は日本に滞在し各所で講演及び討論を行った。この間のことはチタニウム懇話会によるクロール博士講演集<sup>65)</sup>に記載されている。その内容を簡単にのべると、この稿の前節で述べた Bureau of Mines の初期の開発研究そのものであった。Kroll による塩化物の還元による靱性金属チタニウムの製造は秀れた実験であったが、金属チタニウム製造工業の成立は当時のアメリカの国力と Bureau of Mines の技術の蓄積と豊富な人材によりはじめて可能となったのである。それ故、この Kroll 氏の招待はわが国チタニウム工業の設立に尽大な寄与をなしたのである。これによって初期のアメリカでの工業化試験の流れが多数の日本の技術者に理解された。当時アメリカからの情報は尚極めて限られていた。

## 11. 四塩化チタニウムの活性金属による還元

### 11.1 チタニウム—塩素系の熱力学

1950 年頃のハロゲン化合物の熱力学数値の集録として Quill<sup>66)</sup>の著作がある。これはアメリカの原子力委員会が Manhattan 計画の一部門としてまとめたもので、多くの NEC 報告が引用され、化学熱力学の研究者が集って集録されている。これに対して冶金熱力学の研究者により検討されたものとしては Kroll の解説<sup>22)</sup>があり、さらに Kellogg による塩素冶金の計算がある<sup>67)</sup>。後者はこれまでの熱力学数値から Kellogg の研究室で計算してまとめたものである。原典としては有名な Bureau of Mines の Kelley<sup>68)</sup>の集録が多く用いられている。Kellogg の計算から、 $\text{TiCl}_4$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{NaCl}$  の標準生成自由エネルギー値を引用すると次の通りである。Kelley の熱力学数値の温度の関係式が複雑で

このような熱力学集録はその後多く報告された。例えば、

O. Kubaschewski and E. Evans: Metallurgical Thermochemistry, Pergamon Press (1958).

A. Glassner; The Thermochemical Properties of the Oxides, Fluorides, and Chlorides to 2500 K, ANL-5750, U. S. Atomic Energy Commission.

あるのでこれらの式も複雑となる。

$$\begin{aligned}\frac{1}{2} \text{Ti(s)} + \text{Cl}_2(\text{g}) &= \frac{1}{2} \text{TiCl}_4(\text{g}) \\ \Delta G^\circ &= -83,830 + 9.60 T + 0.565 T^2 \\ &\quad + 1.13 T \log T - 1.083 \times 10^5 / T \\ \text{Mg(l)} + \text{Cl}_2(\text{g}) &= \text{MgCl}_2(\text{l}) \\ \Delta G^\circ &= -148,380 + 73.85 T - 13.59 T \log T \\ \text{Ca(l)} + \text{Cl}_2(\text{g}) &= \text{CaCl}_2(\text{l}) \\ \Delta G^\circ &= -192,580 + 94.14 T - 19.16 T \log T \\ 2\text{Na(l)} + \text{Cl}_2(\text{g}) &= 2\text{NaCl(l)} \\ \Delta G^\circ &= -189,000 + 91.77 T - 18.17 T \log T\end{aligned}$$

(単位カロリー)

その後、四塩化チタニウムの活性金属による還元反応の熱力学計算は Münster ら<sup>69)</sup>により行われた (図 32)。さらに、図 33 に現在の熱力学数値表による筆者らの計算結果を示す。図では還元反応が進行する液相の範囲を示している。

これらの熱力学値から塩化物の還元では活性金属の違いによる大きな変化は見られない。

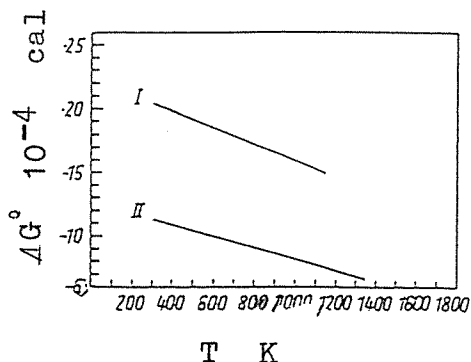
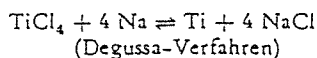
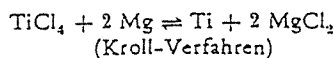


図 32 四塩化チタニウムの活性金属による還元熱力学計算  
(Münster ら, Metallgesellschaft, 1953)



$$\Delta G^\circ = -226,200 + 65.2 T$$



$$\Delta G^\circ = -129,200 + 45.4 T$$

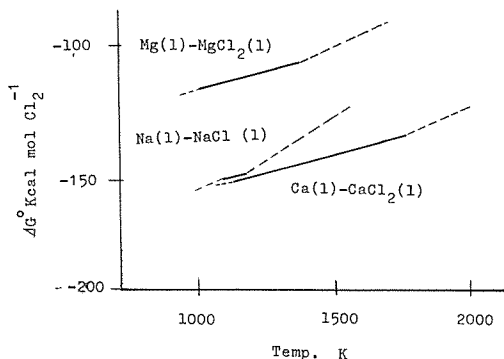


図 33 Mg, Na, Ca-Cl 系の液相範囲の塩素の化学ポテンシャル  
(Barin, Knacke の数値表より計算)

## 11.2 四塩化チタニウムの活性金属による還元

四塩化チタニウムの還元剤として、Mg, Ca, Na が考えられる。これらの活性金属は前節でのべた熱力学的な性質を充すことが必要であるが、Ti と合金をつくらないことも重要な条件である。これらの還元剤によりどのような特徴がえられるかについて考察する。

経済的にマグネシウムとナトリウム (2 倍量が必要である) は余り違いはないが、カルシウムは高価である。また、扱い易さからはマグネシウム、ナトリウム、カルシウムの順である。マグネシウムは固体状態で大気中でとり扱うことが出来るが、ナトリウム、カルシウムは石油中に保存するのが普通である。

還元反応は反応速度を保つために液相範囲で行われる。表 7 で見られるように、還元剤にマグネシウムを用いる場合は塩化マグネシウムの融点 712°C とマグネシウムの沸点 1110°C が選ばれる。カルシウムを用いる場合にはカルシウムの融点 810°C とその沸点 1200°C が還元の温度範囲となる。ナトリウムを用いる場合は食塩の融点 801°C とナトリウムの沸点 880°C がその範囲となる。それ故、初期の Hunter の実験ではボンベ中の反応が行われた。この他の温度の制約として、チタニウムが急速に鉄と合金化する温度 975°C を報告している。一般にマグネシウムによる還元の際の温度は 800~900°C に保たれる。

表 7 活性金属とその塩化物の融点と沸点 (°C)

|          | 融点    | 沸点   |
|----------|-------|------|
| マグネシウム   | 651   | 1110 |
| 塩化マグネシウム | 712   | 1412 |
| ナトリウム    | 97.5  | 880  |
| 食塩       | 800.4 | 1413 |
| カルシウム    | 810   | 1200 |
| 塩化カルシウム  | 772   | 1600 |



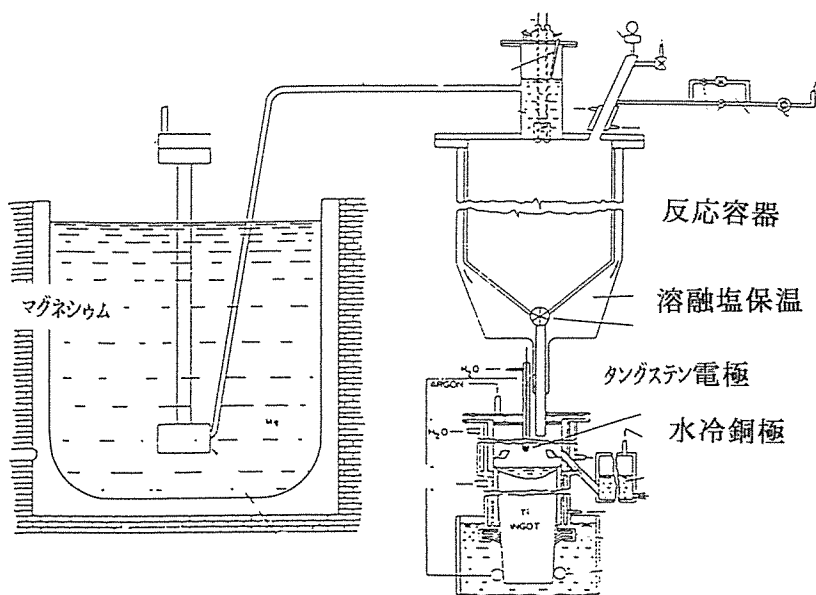


図 34 Maddex の提案 連続化の試み  
(Battelle Lab. 1954)

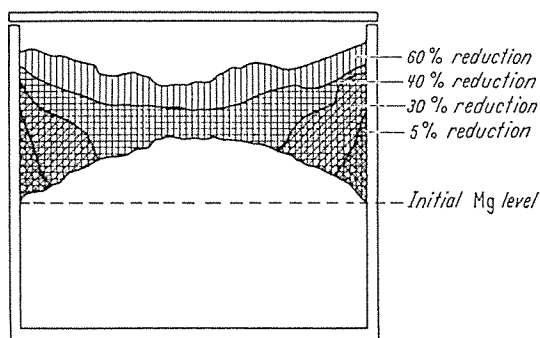


図 35 Wartman の実験  
還元反応の進行について  
(Bureau of Mines, 1954)

### 11.3 Maddex の提案<sup>70)</sup>

Battelle 記念研究所の Maddex は四塩化チタニウムのマグネシウム還元について連続化の試みを提案した。図 34 にその概略を示す。溶融したマグネシウムは溶解槽からポンプで反応容器に送られる。この中に当量の四塩化チタニウムが添加される。生成したチタニウムと塩化マグネシウムは装置内を下降し、アーク炉に達し金属は溶解されインゴットとなり下部に抜きとられ、塩化物は液体状態で系外に除去される。この提案はマグネシウム還元法の連続化を目標としたもので、発表者が Battelle 記念研究所の研究者であり、J. Metals といった著名の学術誌に掲載されたので、Kroll の記録<sup>65)</sup>あるいは Mc Quillan の著作<sup>30)</sup>にも引用されているが、マグ

ネシウムによる塩化物の還元実験にとり組んだものから見て還元反応で生成したスポンジは内壁に強く附着し、下降すること出来ない。

### Bureau of Mines における Wartman の実験<sup>71)</sup>

Wartman らは四塩化チタニウムのマグネシウムによる還元について、その還元管内での反応の機構について観察を行った。反応管は径 25 cm で、5 kg のマグネシウムが装入され、基礎実験としてはかなり大型である。

図 35 は還元に伴って、スポンジ金属が反応管内壁から中心部に向かって成長する様子を示している。実験としては、まず四塩化チタニウムを計算量の 5% 添加し、そこで反応を中断し、生成した塩化マグネシウムおよび残ったマグネシウムを除き、反応管を切断して析出の状態を観察する。図 35 は  $\text{TiCl}_4$  の割合を増やし、この実験を次々に行い、それぞれ観察を重ねその結果を模式的に示したものである。

還元反応では、まづ最初に装入したマグネシウムの液面から上の壁面でスポンジの析出が生じ、一定の還元度から析出は中心に向い塊状のスポンジが出来る。この附着は強固で塩化マグネシウムを抜き去った後も、この形を保つ。この還元反応の形態はクロール法様式のチタニウム製造の連続化を困難にしている。

さらに、Wartman はマグネシウム液面上部の反応が気相反応によるものであるかについて検討している。図 36 の実験ではマグネシウム液面から上部につき出た鉄棒と蓋部から下方にのびる鉄棒がある。後者の先端はマグネシウム液面に達していない。このような状態で四塩

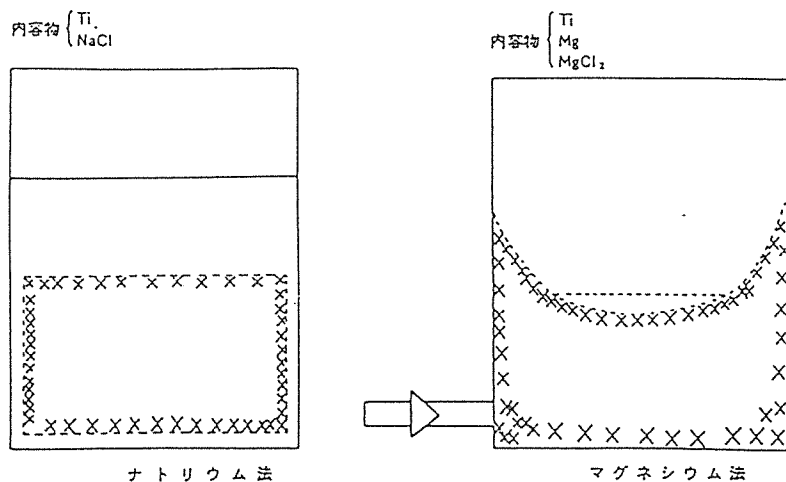


図 38 Na 法と Mg 法のスポンジの形成  
(中尾, 1973)

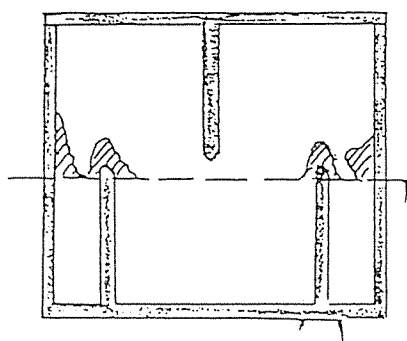
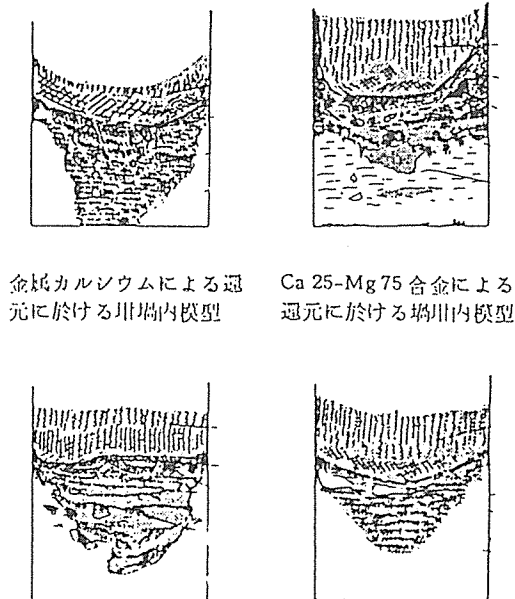


図 36 Wartman の実験  
付着の形成  
(Bureau of Mines, 1954)

化チタニウムを添加すると図のように液面から上部につき出した鉄棒には析出チタニウムが付着するが、液面から離れた鉄棒には付着は生じない。それ故、この反応は気相反応ではなく、マグネシウムのぬれ性が関与することが分る\*。

#### 四塩化チタニウムをカルシウムで還元した場合<sup>73)</sup>

還元剤にカルシウムを用いると析出チタニウムの反応管内壁への付着の状態は変ってくる。図 37 はカルシウムおよびその合金を還元剤として四塩化チタニウムとの反応を行った際の反応管内のスポンジの生成の状態を示している。還元反応温度はマグネシウムの場合にくらべてやや高く 900°Cで行っている。



Ca 50-Mg 50 合金による還元 還元剤に於ける坩埚内模型  
Ca 75-Mg 25 合金による還元 還元剤に於ける坩埚内模型

図 37 Ca および Ca-Mg 合金を還元剤に用いた場合  
(京大, 昭和 29 年)

図 37 のように、カルシウムで還元した場合には付着は少なく容易に剝離できる。Ca25%, Ca50%と Mg との合金の濃度を増すと付着は減少する。英国の特許では Ca18%-Mg 合金により還元を行うと管内壁との付着が防止できると報告している<sup>74)</sup>。

#### 四塩化チタニウムをナトリウムで還元した場合

ナトリウムによる四塩化チタニウムの還元は Hunter

\*ほぼ同様の手法の実験を筆者らも行ったが<sup>72)</sup>、Bureau of Mines の実験は大型の還元装置によるもので、実験室の小型の研究よりも、工業装置内の反応をより適確に推定出来るものであった。

表8 マグネシウム中の不純物  
(Dow 社, Freeport, Texas, 1958)

| Mg 地金中の鉄の含有量 (%) |         |      |      |           |           |
|------------------|---------|------|------|-----------|-----------|
| 炭素法              | Fe-Si 法 | 電解法  | 海水   | 精製<br>塩化物 | 副生<br>塩化物 |
| 0.015            | 0.001   | 0.03 | 0.04 | 0.04      | 0.045     |

が初期に用いたボンベ中の反応以来, 多くの改良法が行われた。これらについては後章で述べることにする。図38は中尾<sup>75)</sup>によるNa還元とMg還元の反応器内での析出について模式的に描写したものである。Naによる還元では析出したチタニウムはNaClと均一な混合状態で存在し, 析出チタニウムの反応容器内壁への付着はない。それ故, Mg還元ではMgCl<sub>2</sub>を融体で抜きとるが, Na還元で内容物を破碎した後, 浸出工程に送る。Na還元ではNaClの融点が801°C, Naの沸点が880°Cであるので, 表面張力などの物性値の他の活性金属と比較出来ない。

#### Na, Ca, Mg 地金中の鉄の含有量

Na中の不純物の溶解度については高速増殖炉の熱媒体としての需要のため各所で検討が行われている。わが国では動力炉核燃料事業団による報告がある<sup>76)</sup>。Na中のFeの溶解度は800°Cで最高100 ppm, 700°Cで30 ppmである。

Caについては昇華法でつくるのでFe含有量は低い。昇華法によるCa中のFe含有量は50 ppmであり, 原子力用では20 ppmのものが市販された<sup>77)</sup>。

Mgについては表8にDow社による地金中のFeの含有量を示す<sup>78)</sup>。製造法により異なっている。Fe-Si法は昇華法であるのでFe含有量は少ないが, 電解法では海水からの塩化物からの採取で0.03—0.04%であり, チタニウム工業の副生塩化物の電解によるものは0.045%である。Naに比べ10倍以上である。

#### 参 考 文 献

- 60) 吾妻 潔, 後藤佐吉: 日本鋳業会誌, 71, 687, 昭和30年。

- 61) M. L. Nielsen, I. B. Johns: Rev. Scientific Instr., 25, 596 (1954).  
 62) S. F. Radke, R. M. Scriven, R. M. Snyder: Trans. Amer. Inst. Min. (Metall.) Engrs. 191, 620 (1951).  
 63) 日本産業経済新聞: 昭和25年12月12日。  
 64) 西村秀雄, 久島亥三雄, 森山徐一郎, 井本立也, 亀井 清, 吉田耕生: 水曜会誌, 12, 191 (昭和28年)。  
 昭和26年4月, 金属学会にて口頭発表。  
 この実験には当時2年生であった松村昭氏と上田喜三郎氏が協力された。  
 65) 金属チタニウム, クロール博士講演集, チタニウム懇話会, 昭和28年10月発行。  
 66) L. L. Quill: The Chemistry and Metallurgy of Miscellaneous Material, Thermodynamic, McGraw-Hill Book Company (1950).  
 67) H. H. Kellogg: Thermodynamic Relationships in Chlorine Metallurgy, Tr. AIME, 188, 862 (1950).  
 68) K. K. Kelley: U. S. Bureau of Mines Bull. 371 (1934), 383 (1935), 393 (1936), 434 (1941), 476 (1949).  
 69) A. Münster, W. Ruppert: Z. Elektrochemie, 57, 558 (1953).  
 70) P. J. Maddex, L. W. Eastwood: Tr. AIME, 188, 634 (1954).  
 71) E. S. Wartman, D. H. Baker, J. R. Nettle, V. E. Homme: J. Electrochem. Soc., 101, 507 (1954).  
 72) 西村秀雄, 久島亥三雄, 森山徐一郎, 松村 昭, 林 清造: 水曜会誌, 12, 303 (昭和29年)。  
 73) 西村秀雄, 久島亥三雄, 森山徐一郎: 水曜会誌, 12, 441 (昭和29年)。  
 74) J. P. Levy, D. H. Pickard, L. Pickard: British Patent, 711, 733 (1954).  
 75) 中尾 峻: チタニウム・ジルコニウム, 21, 15 (1973).  
 76) 二瓶 勲, 丸山 昭, 高荷 智, 厚母栄夫: 原子力工業, 28, 25 (1982).  
 77) Calcium de Haute Pureté, Société Électro-Metallurgique du Planet, (1955).  
 78) E. J. Krezke, J. W. Hays, D. L. Spell: J. Metals, 10, 28 (1958).

## 講

## 座

## ミクロとマクロを結ぶ力学

## II. 粘弾性体の均質化理論

市 川 康 明\*

## Micro/Macro Properties of Materials

## II. A Homogenization Theory for Visco-Elastic Material

by Yasuaki ICHIKAWA

## 3. ミクロ構造を有する物体の力学

変形する物体の力学挙動は、一般に、物体に連続体仮説を導入してひずみと応力を定義し、Newtonの法則によってその運動を記述します。一方、物質はほとんどすべて、ミクロレベルにおける非均質な内部構造を有しています。このミクロな構造はマクロな力学挙動にどのような影響を及ぼすのでしょうか。

このような両者の関連を考える力学の立場を、メソメカニクス (mesomechanics) と称します。ここで、メソ (meso-) とは中間の意を表わすギリシャ語に由来する接頭辞です。すなわち、メソメカニクスとはミクロスケールとマクロスケールを結ぶメソスケールの立場の力学であるわけです (Kafka 1987)。

内部に非均質性を有する物体の応力-ひずみ関係 (構成則) は従来、以下の3つの方法によって取り扱われてきました。

- 1) 現象論的モデル：内部構造の非均質性をすべて、例えば、異方性などのマクロな性質に押し込めたモデルです。その力学定数は、ミクロ構造に比して十分な大きさを有する試料を用いた材料実験によって決定されます。
- 2) 内部変数理論：物理的に意味付けされた内部変数によって内部構造の異方性を表現します。例えば、Valanis (1971, 1980) のエンドクロニック理論 (endochronic theory)、損傷力学理論 (Lemaitre and Chaboche 1990; Murakami and Ohno 1980; Kawamoto, Kyoya and Ichikawa 1988) がこの範疇に属する理論です。

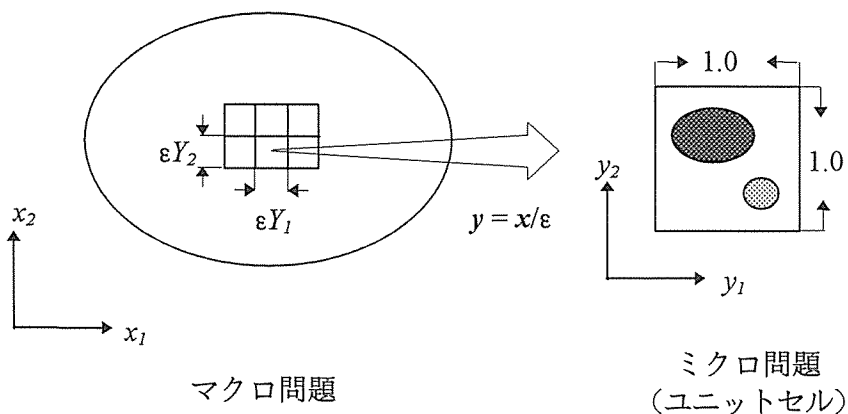
エンドクロニック理論の“endo-”は「内部」を意味するギリシャ語から来ており、“chronic”は「時間」ですから、エンドクロニック理論は「内的時間を履歴として用いた構成則理論」という意味です。物理的な時間の替りに「内的時間」としては通常、ひずみ (の絶対値) を現時点まで積分した値を用います。一般粘弾性体の理論から類推し、「内的時間」を使って応答を Boltzman の履歴積分で表現した理論を Valanis はエンドクロニック理論と呼びました。ただし、履歴積分による応答の表現はエンドクロニック理論の本質とは言えず、Bazan (1980) は塑性理論の増分 (通常は実時間微分と解釈しています) に内的時間を用いています。

損傷力学理論は、内部変数として物体の微視的レベルにおける分布亀裂損傷場を選び、その幾何的な分布特性が応力に与える影響を考慮して構成則を導入します。

- 3) マイクロメカニクス理論：物体内部に分布する非均質部分や空洞を楕円形あるいはその極限としての厚さ零の亀裂として仮定します。楕円を含む物体の解析解は得られていますので、その重ね合わせとしてマクロな応力-ひずみ関係を表現します。マイクロメカニクス理論は Hill (1967) や Hashin (1970) を嚆矢としますが、Mura (1982) はその教科書でマイクロメカニクスの到達点と可能性を示しました。なお、不規則な非均質材料に対する理論が、最近の話題も含んで Torquato (1991) にレビューされています。

これらの理論とは別に、内部の微視的な幾何構造が周期的な繰返し性 (周期条件 periodic condition と呼びます。図1を参照) を有する物体に対して、摂動法の考え

\*名古屋大学工学部地圏環境工学教室助教授  
(昭46・資源卒)



関数  $\phi(x,y)$  の周期条件

$$\phi(x,y) = \phi(x,y+Y)$$

図1 ミクロな周期構造を有する物体

方を導入したミクロとマクロを結ぶ数学理論がフランス (Sanchez-Palencia 1980) とロシア (Bakhvalov and Panasenko 1984) で開発されました。この理論を均質化法 (homogenization method) と呼びます。

**摂動法：**古典的な摂動法は、非線形境界値/初期値問題の近似解を求めるための一手法です。すなわち、解を微小パラメータ  $\varepsilon$  でべき級数展開し、 $\varepsilon = 0$  における解 (標準系と呼ばれ、通常、この解は既知であるとして) をもとに、そのまわりの高次の  $\varepsilon$  に関する微小変動的な解を付加して近似的な解を求めます (Aimes 1965 参照)。なお、例えば境界値問題において、 $\varepsilon = 0$  の時の方程式の階数と境界条件の数が元の方程式と変わらない場合を正則摂動問題、 $\varepsilon = 0$  の時の方程式の階数が低くなり、境界条件を放棄しなければならない場合を、特異摂動問題と呼びます。

非線形波動問題

$$\begin{aligned} \text{支配方程式: } u_{xx} &= u_{tt} + \lambda u_t + \varepsilon u^3, \\ (x,t) &\in [0,\pi] \times [0,\infty) \end{aligned}$$

$$\text{境界条件: } u(0,t) = u(\pi,t) = 0$$

$$\text{初期条件: } u(x,0) = f(x), \quad u_t(x,0) = g(x)$$

を例にして、正則摂動問題を簡単に説明します。なお、上式で  $\lambda \neq 0$  であり、また、 $u_{xx}$ ,  $u_{tt}$ ... はそれぞれ、関数  $u$  の  $x$ ,  $t$  に関する何階かの微分を表わしています。いま、解を

$$u(x,t) = u_0(x,t) + \varepsilon u_1(x,t) + \varepsilon^2 u_2(x,t) + \dots$$

と漸近展開し、これをもとの支配方程式に代入すると

$$\begin{aligned} &\{u_{0,xx} - u_{0,tt} - \lambda u_{0,t} - u_0^3\} \\ &+ \varepsilon \{u_{1,xx} - u_{1,tt} - \lambda u_{1,t} - u_0^2 u_1\} \\ &+ \varepsilon^2 \{u_{2,xx} - u_{2,tt} - \lambda u_{2,t} - 3u_0 u_1^2\} + \dots = 0 \end{aligned}$$

が得られます。この式が常に成立するためには、 $\varepsilon$  に関する各項が零でならないので、結局、

$$\begin{aligned} u_{0,xx} - u_{0,tt} - \lambda u_{0,t} &= 0 \\ u_{1,xx} - u_{1,tt} - \lambda u_{1,t} &= u_0^3 \\ u_{2,xx} - u_{2,tt} - \lambda u_{2,t} &= 3u_0^2 u_1 \\ &\vdots \end{aligned}$$

でなければなりません。この第1式が線形な標準系であり、解は既知です。第2式以降は低次の摂動解を非斉次項 (右辺) に含む問題で、特解が判れば解けます。ただし、これらの解は、つぎの境界・初期条件を満足しなければなりません：

$$\begin{aligned} u_0(0,t) &= u_0(\pi,t) = 0, \quad u_0(x,0) = f(x), \\ u_{0,t}(x,0) &= g(x), \\ u_i(0,t) &= u_i(\pi,t) = u_{i,t}(x,0) = u_{i,tt}(x,0) = 0, \\ i &\geq 1 \end{aligned}$$

古典的な摂動法では  $\varepsilon$  は人為的に導入したパラメータでした。これに対して、均質化法ではマクロ座標系  $\mathbf{x}$  と共に、図1に示すようなミクロな構造が繰り返して現れる物体を考え、このミクロ構造体にミクロ座標系  $\mathbf{y}$  を導入し、マクロ座標系とミクロ座標系を  $\mathbf{y} = \mathbf{x}/\varepsilon$  の関係で結んで、この  $\varepsilon$  で摂動度開することを考えます。

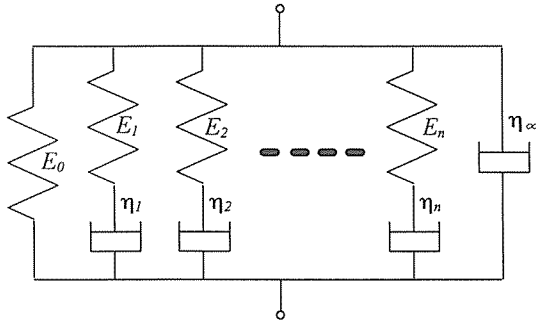
弾性体に対する均質化法は Sanchez-Palencia (1980)



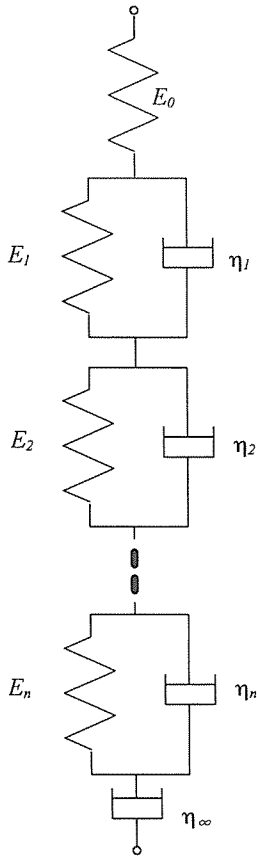
の教科書で詳しく述べられてありますので、以下では粘弾性体に対して適用した均質化法の例について解説します (Ichikawa, Wang, Tsuji and Jeong 1995).

### 3.1 Laplace 変換を用いた粘弾性体の均質化理論

粘弾性体の理論で鍵を握るのは、応力-ひずみ関係式 (構成則) です。Maxwell 体であれ、Voigt 体であれ (山本 1972 を参照：図 2)，粘弾性体の構成則は一般に、離散



(a) 一般化 Maxwell モデル



(b) 一般化 Voigt モデル

図 2 粘弾性体の一般化モデル

形式では多階の時間微分方程式で表わされます。したがって、これを Laplace 変換するとパラメータ  $p$  (Fourier 変換に対応して“周波数”と呼びます) を含んだ代数式が得られますので、これも Laplace 変換を受けた釣合い式に上記関係式を代入してこの擬弾性問題を解けば、周波数  $p$  に依存した解が得られますので、適当な Laplace 逆変換を用いれば実時間領域における解が求まります。この過程の概略を図 3 に示します。

**Laplace 変換：**Laplace 演算子を  $L[\bullet]$  と書くと、関数  $\phi(t)$  の Laplace 変換は

$$L[\phi(t)] = \hat{\phi}(p) = \int_0^\infty \phi(t) \exp(-pt) dt$$

と定義されます。この  $p$  が“周波数”です。

#### (1) Laplace 変換と粘弾性体の方程式

具体的に式を導出してその意味を考えてみます。なお、式の繁雑さを避けるために以下では Einstein の総和規約を用います。

**Einstein の総和規約：**ベクトル変数  $u$  やテンソル変数  $A$  は、基底ベクトル  $\{e_i\}_{i=1}^3$  を用いて

$$u = \sum_{i=1}^3 u_i e_i, \quad A = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 A_{ij} e_i \otimes e_j$$

と書けます。ここで、 $e_i \otimes e_j$  はユークリッド空間のテンソル基底を意味し、係数  $A_{ij}$  が行列となっています ( $\{e_i\}$  が 2 重に組み合わせられたのが 2 階テンソル空間の基底であり、行列はこの空間内の“点”の上記基底に対する係数と考えられます)。この時、総和記号  $\sum_{i=1}^3$  や  $\sum_{j=1}^3$  を省略して、

$$u = u_i e_i, \quad A = A_{ij} e_i \otimes e_j$$

と表わすことにします。すなわち、上式の添字  $i$  や  $j$  は 2 度現れますので、この場合は和をとることを意味します (擬標 dummy index と呼びます)。一方、 $u$  の成分を単に  $u_i$  と書く場合の添字  $i$  はたった 1 度だけ現れますので、この場合は和をとるのではなく、単に、 $i=1$  または 2 または 3 を表わします (自由標 free index と呼びます)。詳しくは Fung (1977) の教科書を参照下さい。

応力を  $\sigma_{ij}^e(x, t)$  (上添字  $e$  は非均質なミクロスケールの領域において変動する関数であることを表わします)、変位を  $u_i^e(x, t)$ 、ひずみを  $\varepsilon_{ij}^e(x, t)$  とします。いま、全体領域  $\Omega^e$  に自重で代表されるような物体力  $f_i^e(x, t)$  があり、境界  $\Gamma_u$  上で変位  $\bar{u}_i(x, t)$ 、境界  $\Gamma_f$  上で荷重  $\bar{f}_i(x, t)$  が与えられるとします。この時、Laplace 空間における粘弾性体の方程式群はつぎのように書かれます。

(支配方程式：釣合い式)

$$\frac{\partial \sigma_{ij}^e}{\partial x_j} + \bar{f}_i^e = 0 \quad \text{in } \Omega^e \quad (1)$$

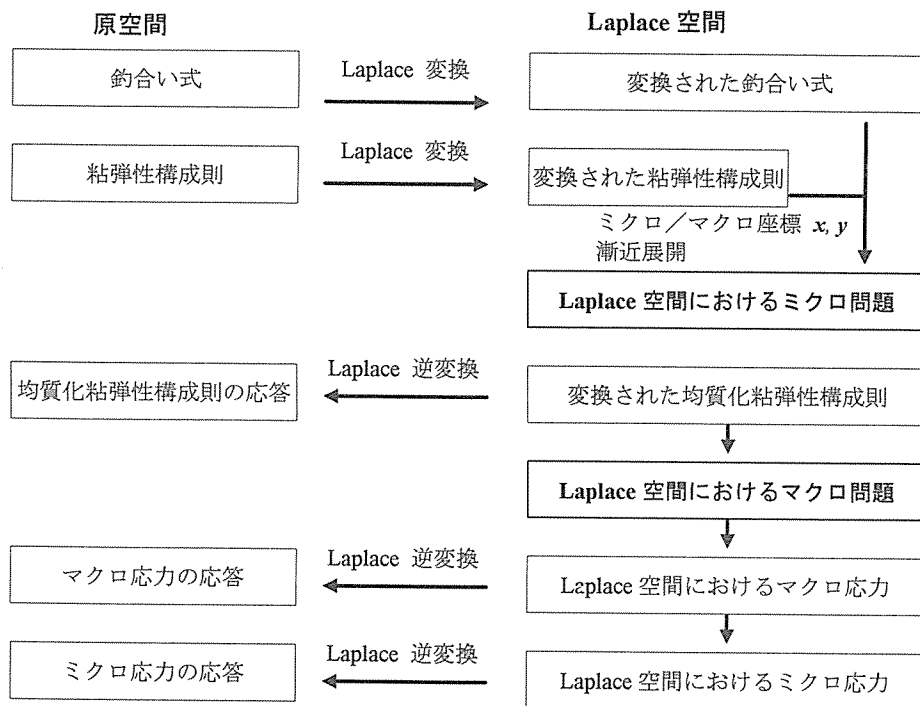


図3 粘弾性体の均質化解析のプロセス

(境界条件)

$$\hat{u}_i^e = \hat{u}_i \quad \text{on } \Gamma_u \quad (2)$$

$$\hat{\sigma}_{ij}^e n_j = \hat{t}_i \quad \text{on } \Gamma_f \quad (3)$$

(初期条件)

$$L[u_i^e(x, t=0)] = \hat{u}_i^0(x) \quad (4)$$

(変位-ひずみ関係)

$$\hat{\varepsilon}_{ij}^e(\hat{u}^e) = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \hat{u}_i^e}{\partial x_j} + \frac{\partial \hat{u}_j^e}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

(粘弾性体構成則)

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_{ij}^e &= p(2\hat{G}\hat{\varepsilon}_{ij}^e + \hat{\lambda}\hat{\varepsilon}_{rs}^e\delta_{rs}\delta_{ij}) \\ &= p\hat{D}_{ijrs}\hat{\varepsilon}_{rs}^e = \hat{M}_{ijrs}\hat{\varepsilon}_{rs}^e \end{aligned} \quad (6)$$

ここで

$$\begin{aligned} \hat{\lambda}(p) &= \hat{K}(p) - \frac{2}{3}\hat{G}(p), \\ \hat{G}(p) &= \frac{G_0}{p} + \sum_{i=1}^n \frac{G_i}{p + (1/\tau_i^g)}, \\ \hat{K}(p) &= \frac{K_0}{p} + \sum_{i=1}^n \frac{K_i}{p + (1/\tau_i^v)} \end{aligned}$$

は Laplace 変換された粘弾性定数であり,  $\tau_i^g$  はせん断成分に関する緩和時間,  $\tau_i^v$  は体積成分に関する緩和時間です。

式(1), (2), (3), (5), (6)は Laplace 変換を除くと丁度、弾性体の式に相当しています。したがって、これを弾性体と粘弾性体の対応原理と呼ぶ場合があります。なお、等方 Maxwell 体の応答は一般に、履歴積分の形で

$$\sigma^e(t) = 2 \int_{-\infty}^t G(t-s) \frac{d\varepsilon^e}{ds} ds + 3 \int_{-\infty}^t \lambda(t-s) \frac{d\varepsilon^e}{ds} ds \quad (7)$$

$$\bar{\varepsilon}_{ij}^e = \frac{1}{3} \varepsilon_{kk}^e \delta_{ij}, \quad e_{ij}^e = \varepsilon_{ij}^e - \bar{\varepsilon}_{ij}^e$$

と書け、式(6)はこれを Laplace 空間において離散表現した形となっています。詳しくは、山本 (1972) 第5章を参照して下さい。因みに、粘弾性体の理論に関する成書としては Christensen (1982) が世界的に有名ですが、山本 (1972) は優るとも劣らない名著です。残念なことに、現在は絶版です。

## (2) Laplace 空間におけるマイクロ/マクロ問題

変位  $\hat{u}_i^e(x, p)$  は飽くまでマクロ座標系  $x$  に関連した関数ですが、ここで、マイクロ座標系  $y$  を導入し、 $\varepsilon = x/y$  という関係の下で変位  $\hat{u}_i^e$  をこの  $\varepsilon$  に関して摂動展開します：

$$\begin{aligned} \hat{u}_a^e(x, p) &= \hat{u}_a^0(x, y, p) \\ &+ \varepsilon \hat{u}_a^1(x, y, p) + \varepsilon^2 \hat{u}_a^2(x, y, p) + \cdots \end{aligned} \quad (8)$$

ここで,

$$\bar{u}_i^a(\mathbf{x}, \mathbf{y}, p) = \bar{u}_i^a(\mathbf{x}, \mathbf{y} + \mathbf{Y}, p) \quad (a=0,1,2,\dots) \quad (9)$$

は  $Y$ -周期関数 ( $Y$ -periodic function) であり, 図1で示したように  $|\varepsilon Y|$  がミクロ構造を表すユニットセルの大きさとなります.

いま,  $\mathbf{y} = \mathbf{x}/\varepsilon$  と設定し, 摂動法では  $\varepsilon \rightarrow 0$  とするの  
で  $\mathbf{x}$  と  $\mathbf{y}$  は独立となり, 式(1)以下で現れる場所  $\mathbf{x}$  に関する微分は, 式(8)の右辺が  $\mathbf{y}$  の関数にもなりますので,

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \Rightarrow \frac{\partial}{\partial x_i} + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial}{\partial y_i} \quad (10)$$

と書き換えられます.

式(8), (10)の関係をひずみの定義式(5)に代入すると,

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ij}^a(\mathbf{x}, p) &= \frac{1}{\varepsilon} \bar{\varepsilon}_{ij}^{0y} + (\bar{\varepsilon}_{ij}^{0x} + \bar{\varepsilon}_{ij}^{1y}) \\ &\quad + \varepsilon(\bar{\varepsilon}_{ij}^{1x} + \bar{\varepsilon}_{ij}^{2y}) + \dots \quad (11) \\ \bar{\varepsilon}_{ij}^{0y} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i^0}{\partial y_j} + \frac{\partial \bar{u}_j^0}{\partial y_i} \right), \quad \bar{\varepsilon}_{ij}^{0x} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i^0}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j^0}{\partial x_i} \right), \\ \bar{\varepsilon}_{ij}^{1y} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i^1}{\partial y_j} + \frac{\partial \bar{u}_j^1}{\partial y_i} \right), \quad \bar{\varepsilon}_{ij}^{1x} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i^1}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j^1}{\partial x_i} \right), \\ \bar{\varepsilon}_{ij}^{2y} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i^2}{\partial y_j} + \frac{\partial \bar{u}_j^2}{\partial y_i} \right) \end{aligned}$$

が得られ, これを式(6)に代入して構成則を

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{ij}^a(\mathbf{x}, \mathbf{y}, p) &= \frac{1}{\varepsilon} \bar{\sigma}_{ij}^0 + \bar{\sigma}_{ij}^1 + \varepsilon \bar{\sigma}_{ij}^2 + \dots \quad (12) \\ \bar{\sigma}_{ij}^0 &= \bar{M}_{ijkl} \bar{\varepsilon}_{kl}^{0y}, \quad \bar{\sigma}_{ij}^1 = \bar{M}_{ijkl} (\bar{\varepsilon}_{kl}^{0x} + \bar{\varepsilon}_{kl}^{1y}), \\ \bar{\sigma}_{ij}^2 &= \bar{M}_{ijkl} (\bar{\varepsilon}_{kl}^{1x} + \bar{\varepsilon}_{kl}^{2y}) \end{aligned}$$

と書き換えます. これより, 釣合い式(1)は

$$\begin{aligned} \frac{1}{\varepsilon^2} \frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}^0}{\partial y_i} + \frac{1}{\varepsilon} \left[ \frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}^0}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}^1}{\partial y_j} \right] + \left[ \frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}^1}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}^2}{\partial y_j} \right] \\ + \dots = -\bar{f}^j(\mathbf{x}, \mathbf{y}, p) \quad (13) \end{aligned}$$

となることが判ります.

式(13)の  $\varepsilon^a$  ( $a=-2, -1, 0, 1, \dots$ ) の各項は  $\varepsilon \rightarrow 0$  とするとき収束の速さが異なるので, 各項が零となる必要があります.

$O(\varepsilon^{-2})$  の項:

$$\frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}^0}{\partial y_j} = 0 \quad (14)$$

この式は  $\bar{\sigma}_{ij}^0(\mathbf{x}, \mathbf{y}, p) = \bar{\sigma}_{ij}^0(\mathbf{x}, p)$ , すなわち, 応力の第1摂動項  $\bar{\sigma}_{ij}^0$  はマクロ座標系  $\mathbf{x}$  (と時間) のみの関数であり, ミクロ座標系  $\mathbf{y}$  には影響されないことを意味しています. しかも, 式(13)の  $O(\varepsilon^{-1})$  項が  $\varepsilon \rightarrow 0$  のときに有界であ

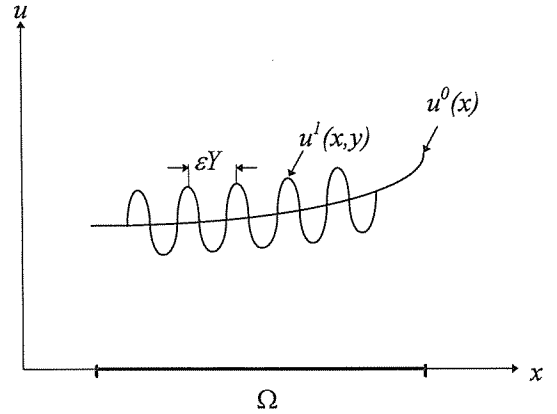


図4 漸近展開における大域変動項と周期的微小変動項

る (すなわち, 発散しない) ためには  $\bar{\sigma}_{ij}^0 = 0$  とする必要があります. これらの結果から,  $\bar{u}_i^a(\mathbf{x}, \mathbf{y}, p) = \bar{u}_i^a(\mathbf{x}, p)$  を得ます. かくして摂動展開(8)は

$$\begin{aligned} \bar{u}_i^a(\mathbf{x}, p) &= \bar{u}_i^0(\mathbf{x}, p) + \varepsilon \bar{u}_i^1(\mathbf{x}, p) \\ &\quad + \varepsilon^2 \bar{u}_i^2(\mathbf{x}, p) + \dots \quad (8)' \end{aligned}$$

と書け, 図4で示すように大域的な変動を表す  $\bar{u}_i^0(\mathbf{x}, p)$  項に周期  $\varepsilon Y$  で変動する  $\bar{u}_i^1(\mathbf{x}, p)$  以下の項が付加されて  $\bar{u}_i^a(\mathbf{x}, p)$  の近似が成り立っていることが判ります. なお, 以上の結果より式(11)のひずみはつぎのように近似することができます.

$$\bar{\varepsilon}_{ij}^a \simeq \bar{\varepsilon}_{ij}^{0x} + \bar{\varepsilon}_{ij}^{1y} \quad (15)$$

$O(\varepsilon^{-1})$  の項 (微視方程式):

上記の条件  $\bar{\sigma}_{ij}^0 = 0$  と併せると式(13)の  $O(\varepsilon^{-1})$  項は

$$\frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}^1}{\partial y_j} = 0$$

と書けます. これに構成則(6)を代入すると

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y_j} \{ [D_{ijrs}^0(\mathbf{y}) + p \bar{D}_{ijrs}^1(\mathbf{y}, p)] [\bar{\varepsilon}_{rs}^{0x}(\mathbf{x}; p) \\ + \bar{\varepsilon}_{rs}^{1y}(\mathbf{x}, \mathbf{y}; p)] \} = 0 \quad (16) \end{aligned}$$

となります. ここで,

$$\begin{aligned} D_{ijrs}^0 &= 2G_0 \delta_{ri} \delta_{sj} + \lambda_0 \delta_{ij} \delta_{rs}, \\ \bar{D}_{ijrs}^1(p) &= 2 \left\{ \sum_{i=1}^n \frac{\hat{G}_i(p)}{p+1/\tau_i^s} \right\} \delta_{ri} \delta_{sj} \\ &\quad + \left\{ \sum_{i=1}^n \frac{\hat{\lambda}_i(p)}{p+1/\tau_i^v} \right\} \delta_{ij} \delta_{rs} \end{aligned}$$

としました. ミクロ場のひずみの定義式(11)と  $D^0$  および  $\bar{D}^1$  の対称性を考慮すると, 式(16)は

$$\frac{\partial}{\partial y_j} \{ [D_{ijrs}^0(\mathbf{y}) + p \hat{D}_{ijrs}(\mathbf{y}, p)] \frac{\partial \hat{u}_i^0}{\partial x_s}(\mathbf{x}; p) + \frac{\partial \hat{u}_i^1}{\partial y_s}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, p) \} = 0 \quad (17)$$

です。項  $\partial \hat{u}_i^0 / \partial x_s$  は  $\mathbf{x}$  のみに関係する項であり、したがって、 $\mathbf{y}$  に関する微分方程式(17)にとってこの項は定数と見なすことができます。さらには、方程式(17)の全体を項  $\partial \hat{u}_i^0 / \partial x_s$  で括ることを考えると、結局、 $\hat{u}_i^1(\mathbf{x}, \mathbf{y}, p)$  について、ユニセットセル内で

$$\hat{u}_i^1(\mathbf{x}, \mathbf{y}, p) = -\chi_k^{il}(\mathbf{y}, p) \frac{\partial \hat{u}_k^0}{\partial x_l} + C_i(\mathbf{x}) \quad (18)$$

となる特性関数  $\chi_k^{il}(\mathbf{y}, p)$  を定義することができて、これを式(17)に代入すると、ユニセットセル内における特性関数  $\chi_k^{il}(\mathbf{y}, p)$  に関する微分方程式

$$\frac{\partial}{\partial y_j} \left\{ [D_{ijrs}^0(\mathbf{y}) + p \hat{D}_{ijrs}(\mathbf{y}, p)] \left( \delta_{rk} \delta_{sl} - \frac{\partial \chi_k^{rs}}{\partial y_l} \right) \right\} = 0 \quad (19)$$

が得られます。これを微視方程式 (Microscale equation) と呼びます。この微分方程式を式(9)と同じ周期境界条件の下で解を求めます。ただし、ミクロスケールにおいても図1のように非均質性を有しているの、これを仮想仕事式

$$\int_Y \hat{M}_{ijkl} \frac{\partial \chi_k^{rs}}{\partial y_l} \frac{\partial v_i}{\partial y_j} dy = \int_Y \hat{M}_{ijrs} \frac{\partial v_i}{\partial y_j} dy, \quad \text{任意の } v_i \text{ に対して (ただし, } v_i = 0 \text{ on } \partial Y) \quad (20)$$

に直し、有限要素法を適用して近似解を求めます。

$O(\varepsilon^0)$  項 (大域方程式):

式(13)の  $O(\varepsilon^0)$  項は

$$\frac{\partial \hat{\sigma}_{ij}^1}{\partial x_j} + \frac{\partial \hat{\sigma}_{ij}^2}{\partial y_j} + \hat{f}_i(\mathbf{x}, \mathbf{y}, p) = 0 \quad (21)$$

です。ここで、ユニットセル  $Y$  の体積を  $|Y|$  として、関数  $\phi$  の平均値を

$$\langle \phi \rangle = \frac{1}{|Y|} \int_Y \phi dy$$

で定義します。この平均演算子を式(21)に適用すると、左辺第2項は発散定理と  $\hat{\sigma}_{ij}^2$  の周期条件より

$$\langle \frac{\partial \hat{\sigma}_{ij}^2}{\partial y_j} \rangle = \frac{1}{|Y|} \int_Y \frac{\partial \hat{\sigma}_{ij}^2}{\partial y_j} dy = \frac{1}{|Y|} \int_{\partial Y} \hat{\sigma}_{ij}^2 n_j d\Gamma = 0$$

となります (第2項から第3項へは発散定理を適用しました。第3項で、例えば図1のユニットセルの左辺では

$n = (-1, 0, 0)$ , 右辺では  $n = (1, 0, 0)$  であり、一方、 $\hat{\sigma}_{ij}^2$  の値は周期条件より左右辺上で等しいので、互いに打ち消し合って零となります)。

かくして、大域方程式 (Macroscale equation)

$$\frac{\partial \langle \hat{\sigma}_{ij}^1 \rangle}{\partial x_j} + \langle \hat{f}_i \rangle = 0 \quad (22)$$

が得られます。また、平均化境界条件ならびに構成則は

$$\langle \hat{u}_i^0 \rangle = \langle \hat{u}_i \rangle \quad \text{on } \Gamma_u \quad (23)$$

$$\langle \hat{\sigma}_{ij}^1 \rangle = \hat{M}_{ijrs}^h \hat{\varepsilon}_{rs}^0(\mathbf{p}) \quad (24)$$

$$\hat{M}_{ijkl}^h = \frac{1}{|Y|} \int_Y \hat{M}_{ijrs} [\delta_{rk} \delta_{ls} - \frac{\partial \chi_k^{rs}}{\partial y_l}] dy$$

となります。式(24)中には、微視方程式の解  $\chi_k^{rs}$  が含まれており、これによって式(24)はミクロ構造の非均質性が考慮されているわけです。

### (3) Laplace 逆変換と Schapery の選点法

粘弾性体に対する応力緩和試験やクリープ試験などは、単調減少あるいは単調増加の現象です。これらはしたがって、指数型関数 ( $\exp(-at)$ ) で表現することができます。Schapery (1961) はこのような関数を Laplace 逆変換する方法を提案しています。

いま、一般的な応答を  $y(t)$  とします。この応答が単調現象である場合、Schapery は

$$y(t) = a_1 + f(t) \\ a_1: \text{初期条件より決定される定数} \\ f(t) = \int_0^\infty F(a) e^{-t/a} da$$

と書き表せるとしました。ここで、 $F(a)$  は分布関数と呼ばれます。この過度応答成分  $f(t)$  はつぎに示す Dirichlet 級数で近似的に表わされます:

$$f_b(t) = \sum_{i=1}^n S_i e^{-t/\tau_i} \quad (25)$$

なお、 $\tau_i > 0$  は予め与える正定数であり、 $S_i$  が決定されるべき未知係数です。

Schapery (1961) はこの係数を決める方法を以下のよう述べています。いま、ある点  $p = 1/\tau_i (i=1, 2, \dots, n)$  で  $\hat{f}(p)$  と  $\hat{f}_b(p)$  の値が一致すると、 $f(t)$  と  $f_b(t)$  の二乗誤差が最少となります。すなわち、二乗誤差を

$$E = \frac{1}{2} \int_0^\infty [f(t) - f_b(t)]^2 dt \quad (26)$$

と定義し、式(25)の離散近似をこれに代入して  $S_i (i=1, 2, \dots, n)$  に関する誤差最少の条件を求めると、

$$\frac{\partial E}{\partial S_i} = - \int_0^\infty [f(t) - f_D(t)] e^{-t/\tau_i} dt = 0 \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (27)$$

となります。これは

$$\tilde{f}\left(\frac{1}{\tau_i}\right) = \tilde{f}_D\left(\frac{1}{\tau_i}\right) \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (28)$$

を意味します。式(28), (25)を式(27)に代入すると、

$$\sum_{j=1}^n \int_0^\infty e^{-t/\tau_j} e^{-t/\tau_i} dt \quad S_j = \tilde{f}\left(\frac{1}{\tau_i}\right) \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (29)$$

となり、この連立方程式を解くことにより係数  $S_j (j=1, 2, \dots, n)$  が決定されます。

#### (4) 実空間における応力等の算定

いま、 $\mathbf{y} = \mathbf{x}/\varepsilon$  で導入された  $\varepsilon$  は十分に小さく、ミクロ構造の時間変動もほとんどないとすると、特性関数  $\chi^{kl}$  は時間非依存と仮定することができます。すなわち、

$$\chi^{kl}(\mathbf{y}; t) \approx \chi^{kl}(\mathbf{y}) \quad (30)$$

です。なお、この仮定の妥当性については詳細な議論が必要ですが、後で示す計算例で検証すると、この場合の誤差は無視できる程度であることが判ります。この仮定の下で、式(24)の Laplace 空間における均質化構成則を書き直すと、

$$\begin{aligned} \langle \hat{\sigma}_{ij}^0 \rangle &= \langle D_{ijkl}^0 \left( \delta_{ik} \delta_{jl} - \frac{\partial \chi_{kl}^{rs}}{\partial y_i} \right) \rangle \varepsilon_{rs}^{0x}(p) \\ &+ \langle p \hat{D}_{ijkl}^1 \left( \delta_{ik} \delta_{jl} - \frac{\partial \chi_{kl}^{rs}}{\partial y_i} \right) \rangle \varepsilon_{kl}^{0x} \end{aligned} \quad (31)$$

となります。これに Laplace 逆変換を導入すると、均質化応力が

$$\begin{aligned} \langle \sigma_{ij}^0 \rangle &= \langle \sigma_{ij}^{10} \rangle + \langle \sigma_{ij}^{11} \rangle \quad (32) \\ \langle \sigma_{ij}^{10} \rangle &= \langle D_{ijkl}^0 \left( \delta_{ik} \delta_{jl} - \frac{\partial \chi_{kl}^{rs}}{\partial y_i} \right) \rangle \varepsilon_{rs}^{0x}(t), \\ \langle \sigma_{ij}^{11} \rangle &= \int_0^t \langle D_{ijkl}^1 (t-s) \left( \delta_{ik} \delta_{jl} - \frac{\partial \chi_{kl}^{rs}}{\partial y_i} \right) \rangle \frac{d\varepsilon_{rs}^{0x}}{ds} ds \end{aligned}$$

と求まります。ここで  $\langle \sigma_{ij}^{10} \rangle$  はマクロ瞬間弾性、 $\langle \sigma_{ij}^{11} \rangle$  はマクロな Maxwell 体を表わす項です。

一方、ミクロレベルにおける応力も、同様に

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}^1 &= D_{ijkl}^0 \left( \delta_{ik} \delta_{jl} - \frac{\partial \chi_{kl}^{rs}}{\partial y_i} \right) \varepsilon_{rs}^{0x}(t) \\ &+ \int_0^t D_{ijkl}^1 (t-s) \left( \delta_{ik} \delta_{jl} - \frac{\partial \chi_{kl}^{rs}}{\partial y_i} \right) \frac{d\varepsilon_{rs}^{0x}}{ds} ds \end{aligned} \quad (33)$$

と計算されます。

ここで、均質化解析における応力緩和問題に対して Schapery の方法を使うと、以下の諸量が計算されます。(均質化粘弾性係数)

$$M^h(t) = \langle D_0 \rangle + \sum_{i=1}^n \langle D_i \rangle \exp(-\tilde{\gamma}_i t) \quad (34)$$

$\langle D_0 \rangle, \langle D_i \rangle$ : 未知係数

(均質化応力)

$$\langle \sigma_D(t) \rangle = \langle \sigma_1(\infty) \rangle + \sum_{i=1}^n \langle S_i \rangle \exp(-\tilde{\gamma}_i t) \quad (35)$$

$\langle S_i \rangle$ : 未知係数

$\langle \sigma_1(\infty) \rangle$ :  $G(\infty)$  と  $K(\infty)$  を用いて計算された  $t = \infty$  における均質化 (平均) 応力

(ミクロ応力)

$$\sigma_D(t) = \sigma_1(\infty) + \sum_{i=1}^n S_i \exp(-\gamma_i t) \quad (36)$$

$S_i$ : 未知係数

$\sigma_1(\infty)$ :  $G(\infty)$  と  $K(\infty)$  を用いて計算された  $t = \infty$  におけるミクロ応力

なお、この応力緩和問題に Schapery の方法を使うに際して、

$$\gamma_i = \tilde{\gamma}_i = \frac{1}{\tau_i}$$

と置くと最も計算効率がよいことが判りました。ここで、 $\tau_i$  はこの複合材料の全ての緩和時間です。

#### (5) 数値計算例

##### i) 計算の妥当性を検証する例題

均質化法の妥当性を検証するために、細かいメッシュを切って従来型の有限要素法で直接計算した結果と均質化法のそれを比較しました。この問題のモデルを図 5(a) に、従来型有限要素法のモデルを図 5(b) に、均質化解析の微視問題におけるユニットセルの有限要素モデル ( $y$ -方向に周期繰返し構造を有します) を図 5(c) に示しました。各材料の性質を以下に示します:

(Material 1)

$$K(t) = 5.98 + 6.11 \exp(-t/10.8) + 2.09 \exp(-t/32.9)$$

$$G(t) = 5.06 + 5.17 \exp(-t/10.8) + 1.77 \exp(-t/32.9)$$

(Material 2)

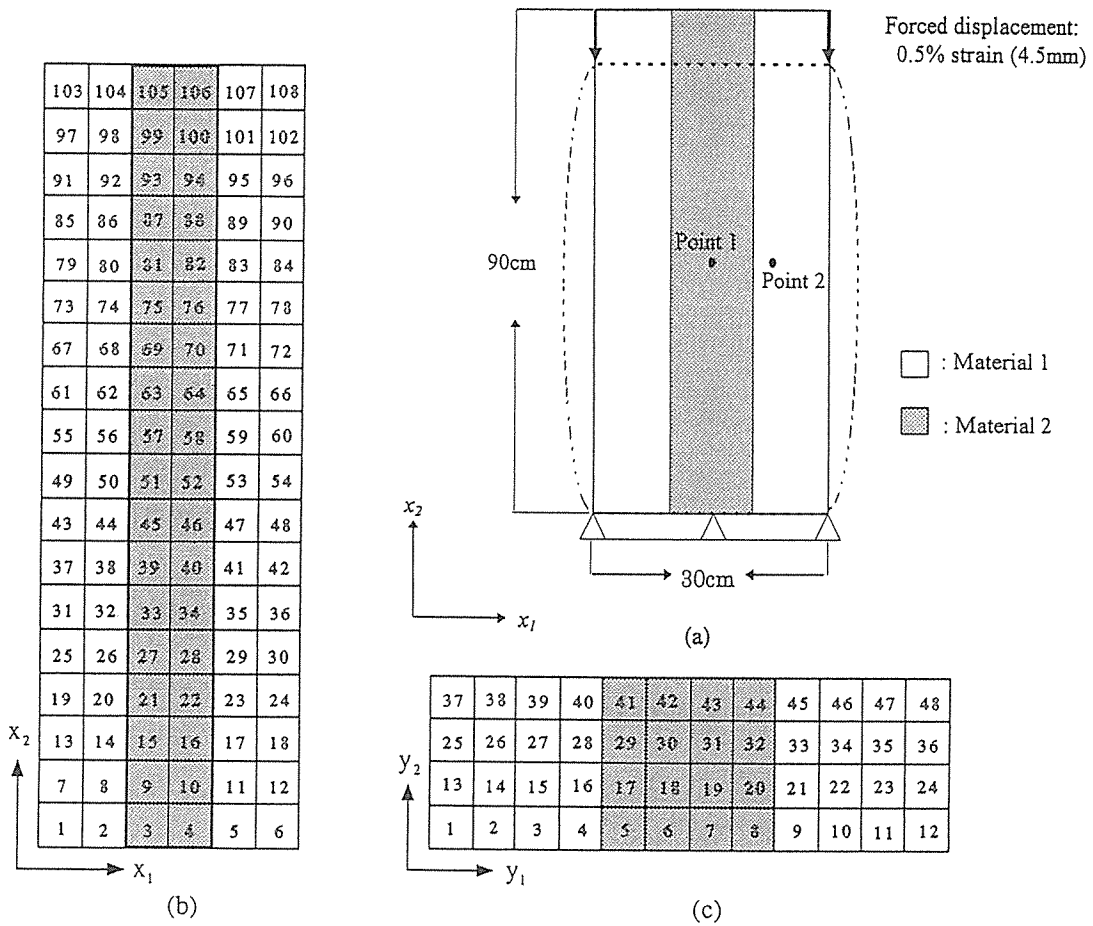


図5 (a)本手法を検証するためのモデル  
(b)従来手法による粘弾性解析の有限要素網と均質化解析の大域問題の有限要素網  
(c)均質化解析の微視問題の有限要素網

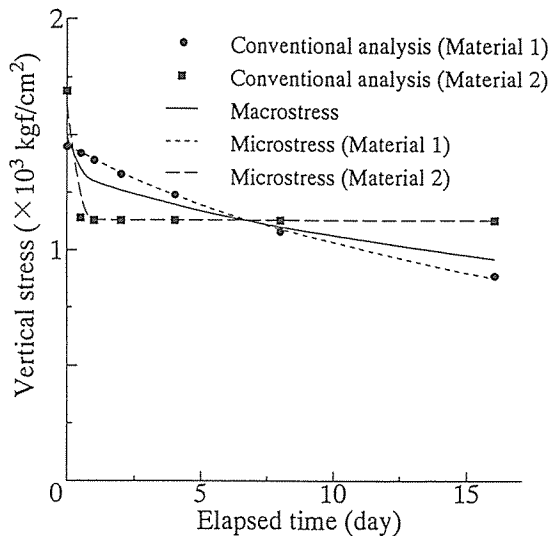


図6 従来手法による粘弾性解析と均質化解析によって求められた解の比較

$$K(t) = 12.0 + 4.0 \exp(-t/0.0735) + 2.0 \exp(-t/0.1685)$$

$$G(t) = 9.0 + 4.0 \exp(-t/0.0735) + 2.0 \exp(-t/0.1685)$$

図6には、図5(a)の中央部の点で求めた各材料中の時間応答が示されており、ここで開発した手法が十分に有効であることが判りました。すなわち、材料1についても材料2についても、在来手法の解析と均質化解析の結果はよく一致しており、しかも大域的な平均応力その間をとって妥当な応答をしていることが理解されます。

ii) モザイク問題：結晶質岩について

つぎに、結晶質岩を念頭において、図7のモデルを考えました。ユニットセルは石英と長石からなり、材料特性は

(Material 1 : 長石)



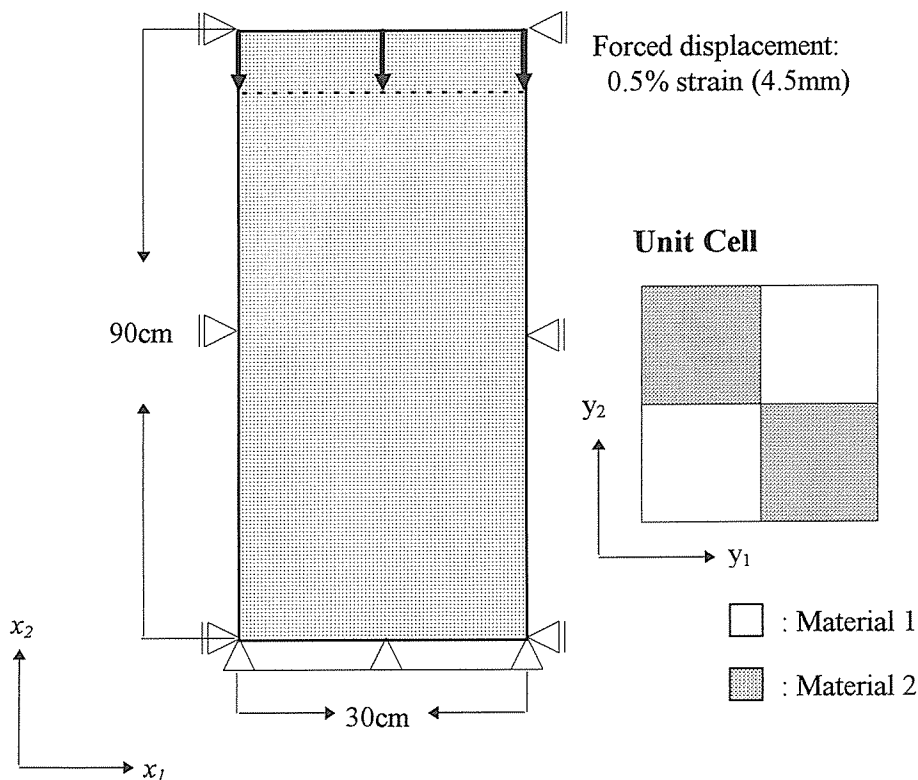


図7 モザイク問題のモデル

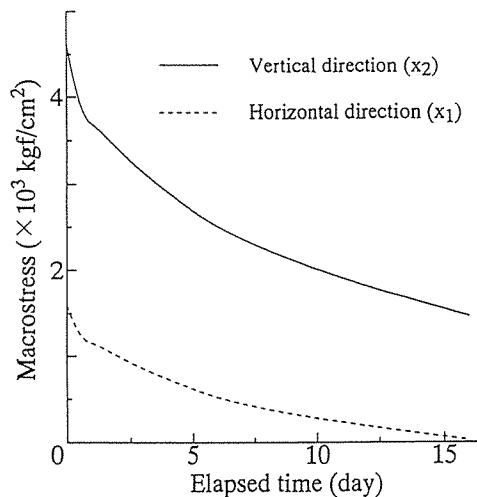


図8 モザイク問題における均質化応力の時間変化

$$K(t) = 6.0 + 6.0\exp(-t/10) + 2.0\exp(-t/30)$$

$$G(t) = 5.0 + 5.0\exp(-t/10) + 2.0\exp(-t/30)$$

(Material 2 : 石英)

$$K(t) = 120 + 20\exp(-t/0.05) + 10\exp(-t/0.15)$$

$$G(t) = 90 + 15\exp(-t/0.05) + 8\exp(-t/0.15)$$

と仮定しています。

図8にこのモデルの中心点における大域的な応力(均質化応力)の時間応答を示します。この図から判るように、大域的なせん断応力はここでは発生しておりません。しかしながら、図9で示したように、このような非均質材料では(大域的なせん断応力が例えなくとも)微視的なせん断応力が、殊に材料の境目で大きく発生していることがよく判ります。

## 参 考 文 献

- 1) Aimes, W. F. (1965), *Non-Linear Partial Differential Equations*, vol. 1, Academic Pr. (邦訳「工学における非線形偏微分方程式 I-1, I-2」, 産業図書, 1978) .
- 2) Bakhvalov, N., and Panasenko, G. (1984), *Homogenization: Averaging Processes in Periodic Media*, Nauka Pub., Warsaw (English translation, Kluwer Academic Pr., Dordrecht, 1989) .
- 3) Bazant, Z. P. (1980), "Work inequalities for

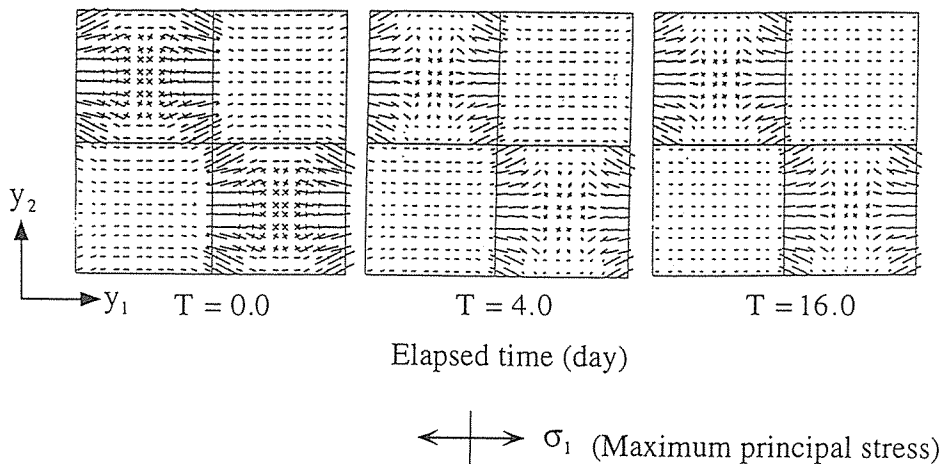


図9 モザイク問題におけるマイクロ応力の時間変化

- plastic fracture materials," *Int. J. Solids Structures*, Vol. 16, pp. 873-901.
- 4) Christensen, R. M. (1982), *Theory of Viscoelasticity*, 2nd ed., Academic Pr., New York.
  - 5) Fung, Y. C. (1977), *A First Course in Continuum Mechanics*, 2nd ed., Printice-Hall (邦訳「連続体の力学入門」, 培風館, 1980).
  - 6) Hashin, Z. (1970), "Theory of composite materials," *Mechanics of Composite Materials*, ed. F. W. Wendt *et al*, Pergamon Pr., pp. 201-242.
  - 7) Hill, R. (1967), "The essential structure of constitutive laws for metal composites and polycrystals," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 15, pp. 79-95.
  - 8) Ichikawa, Y., Wang, J.-G., Tsuji, K., and Jeong, G.-C. (1995), "Micro/macro properties of geomaterials," *Proc. 5th Int. Conf. Education, Practice and Promotion of Comp. Meth. Eng.*, ed. E. R. A. Oliveira, Macau 1995, pp. 95-108.
  - 9) Kafka, V. (1987), *Inelastic Mesomechanics*, World Scientific Pub, Singapore.
  - 10) Kawamoto, T., Kyoya, T., and Ichikawa, Y. (1988), "Deformation and fracturing behaviour of discontinuous rock mass and damage mechanics theory," *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, Vol. 12, pp. 1-30.
  - 11) Lemaitre, J., and Chaboche, J.-L. (1990), *Mechanics of Solid Matetials*, Cambridge Univ. Pr., Chap. 7, pp. 346-450.
  - 12) Mura, T. (1982), *Micromechanics of Defects in Solids*, Multinus Nijhoff Pub., Dordrecht.
  - 13) Murakami, S., and Ohno, N. (1980), "A continuum theory of creep and creep damage," *Proc. 3rd IUTAM Symp. on Creep in Structures*, eds. A. R. S. Ponter and D. R. Hayhurst, Springer-Verlag, Belrin, pp. 422-443.
  - 14) Sanchez-Palencia, E. (1980), *Non-Homogeneous Media and Vibration Theory*, Lec. Note Phys. 127, Springer-Verlag.
  - 15) Schapery, R. A. (1961), "Approximate method of transform inversion for viscoelastic stress analysis," *Proc. 4th U. S. Nat. Cong. Applied Mech.*, pp. 1075-1085.
  - 16) Torquato, S. (1991), "Random heterogeneous media: Microstructure and improved bounds on effective properties," *Appl. Mech. Rev.*, Vol. 44, No. 2 pp. 37-76.
  - 17) Valanis, K. C. (1971), "A theory of viscoplasticity without a yield surface," *Archiv of Mechanics*, Warszawa, Vo. 23, No. 4, pp. 517-533.
  - 18) Valanis, K. C. (1971), "Fundamental consequences of a new intrinsic time measure plasticity as a limit of the endochronic theory," *Archiv of Mechanics*, Warszawa, Vo. 32, No. 2, pp. 171-191.
  - 19) 山本三三三(1972),「物体の変形学」, 誠文堂新光社.

## 論 文

単一地下空間内の気象環境を予測する  
ための簡易計算システム張 曉 明<sup>1)</sup>・水 田 義 明<sup>2)</sup>A Simplified Calculation System for the Evaluation  
of Climatic Conditions in Underground Openings

by Xiaoming ZHANG and Yoshiaki MIZUTA

## ABSTRACT

A simplified calculation system for the evaluation of climatic conditions in underground openings was described in this study. Evaluation and control of climatic condition in underground airways or large openings are quite important since forced convection and natural convection are driving force of ventilation in the underground openings. FEM (Finite Element Method) is commonly used to analyze natural convection in a small scale opening. In a large scale opening, however, due to high Rayleigh's number of natural convection FEM requires mainframe computer and great computational efforts to achieve numerical convergence. In this study, a conventional airway network analysis technic which has been run on personal computer is modified and improved to make it possible to evaluate climatic conditions in large scale openings. The large scale opening is expressed by network of fictitious airways in which airflow velocity and airflow temperature are to be calculated successively. The main features of this calculation system are simplicity of the physical model for the opening and the usage of personal computer for the calculation.

## 1. 緒 言

近年、地下空間の利用は伝統的な観念を遙かに越えて急速に発展している。これは、地下空間に保湿性、遮音性、恒湿性、耐震性などの優れた特徴があるからである。しかし、人間の一般的な社会活動や生活の場所として利用する場合、安全面や環境面では、まだ多くの課題を解決する必要があるが、本研究では地下空間内の気象環境を取り上げる。地下空間内の空気は一般的に強制対流や自然対流によって供給される。これは人間が呼吸に必要な酸素はもちろん、地下空間内温度、湿度の調節や粉塵・ガスの排出など、地下空間内の気象環境の改善にも必要不可欠である。そのため、地下風道や大空間内の流れの状態および気象環境の予測と制御は特に重要である。従

来の通気網解析システムでは風道内の気流の平均速度および混合温度・湿度の計算に限られていた。通常、小さい空間内の流れの解析には有限要素法および差分法が用いられる。しかし、大空間内の自然対流は高い Rayleigh 数を持っているため、大きなメモリと長い計算時間を要するうえ、収束解が得にくい<sup>1,2,3)</sup>という問題がある。

そこで、本研究では大空間を仮想の風道から構成される通気ネットワークとして取り扱うことによって、従来からパソコン上で使用されていた通気網解析の手法が空間内の環境予測に適用できるような簡易計算システムを提案する。

## 2. 仮想風道モデル

ここでは、一辺長さ 9 m の地下空洞のある断面（奥行き 1 m）を 2 次元モデルとして想定し図 1 に示す。この空間全体を等断面の仮想風道で分割し、仮想的な通気網を構成する。図中の各節点は仮想風道の交差点であり、

<sup>1)</sup>山口大学工学研究科博士後期課程<sup>2)</sup>山口大学工学部社会建設工学科 教授

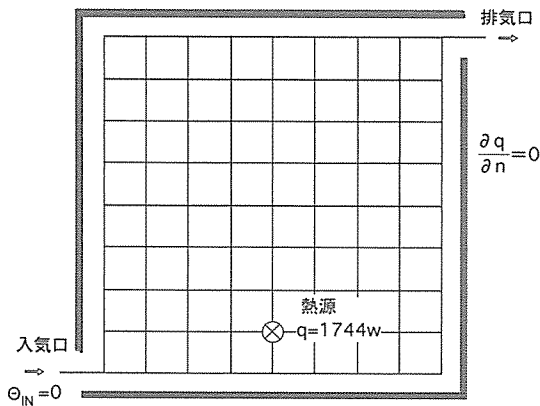


図1 大空間の仮想風道モデル

節点間の線は仮想風道の軸線を表す。空洞の壁面に隣接する節点を除いた空間内部の各節点では4本の仮想風道が交差するので、節点における気流の状態は4つの方向の圧力差によって決められ、また、各風道内の気流状態は風道の両側の節点および仮想風道内部の物理条件によって決められるものとする。本計算モデルでは仮想風道を縦方向と横方向にそれぞれ等間隔に配置するので、各仮想風道は正方形のメッシュに相当する。したがって、ここでは各仮想風道メッシュ内部の温度勾配および速度勾配を無視し、これらの平均値を求めて、メッシュとつながる節点に与えて、各節点の温度・速度を求める。なお、本計算モデルの下部と上部にはそれぞれ入気口と排気口があり、熱源から一定の熱流速で加熱を行う、また、外部温度を一定とし、空洞の壁面では断熱状態とする。

### 3. 網目法による風速分布の解析方法

#### 3.1 各節点における風速の計算

仮想風道内の風速の計算は従来通気網解析に用いられた網目法とほぼ同一の手法を用いる<sup>4)</sup>。仮想風道数を  $NB$ 、節点数を  $NJ$  とすると、通気回路網を構成する独立な網目の数は  $M = NB - NJ + 1$  で与えられる。ここで、任意の独立網目の番号を  $k$ 、独立網目に含まれる各風道の番号を  $i$  で表す。網目  $k$  が  $m$  個の風道で構成されるとすれば、各風道の風量  $q_{ki}$  ( $i = 1 \sim m$ ) ( $m^3/s$ ) は次のように与えられる。

a) 網目  $k$  の風量がほかの網目  $n$  と共通の風道を持っている場合

$$q_{ki} = Q_k + \sum_{n=1}^m \alpha_{kn} \cdot Q_n \quad (1)$$

式中、 $Q_k$  ( $m^3/s$ ) は  $k$  番目の網目の流量、 $Q_n$  ( $m^3/s$ ) は網目  $k$  の風道と共通の風道をもっているほかの網目  $n$  の流量である。 $\alpha_{kn}$  は風向を表す。

b) 風道が  $k$  番目の網目にのみ属している場合

$$q_{ki} = Q_k \quad (2)$$

仮想風道の断面積を  $F$  とすると  $k$  番目の独立網目の  $i$  番目の風道内の流れの平均速度  $\bar{V}_{ki}$  ( $m/s$ ) は次式で与えられる。

$$\bar{V}_{ki} = q_{ki} / F \quad (3)$$

#### 3.2 風道内圧力損失の計算

乱流の場合、風道  $ki$  を通る風量を  $q_{ki}$  ( $m^3/s$ )、圧力損失  $\Delta h_{ki}$  (Pa) とすると次の方程式が成り立つ。

$$\Delta h_{ki} = R_{ki} \cdot |q_{ki}|^2 \quad (4)$$

ここで、 $R_{ki}$  ( $kg \cdot s^2 / m^8$ ) は風道条件によって決定される係数であり、単位風量あたりの流れに生ずる圧力降下を表す比抵抗である。 $k$  番目の網目に対して、キルヒホッフの第2法則（圧力損失量と圧力生成量が等しい）が成り立ち、網目  $k$  を構成する各風道の圧力生成量を  $P_{ki}$  (Pa) とおくと次式が成り立つ。

$$h_k = \sum_{i=1}^m R_{ki} \cdot q_{ki} \cdot |q_{ki}| - P_k = 0 \quad (5)$$

ただし、 $|q_{ki}|^2$  を  $q_{ki} \cdot |q_{ki}|$  としたのは流れの方向を考慮するためである。 $P_k$  (Pa) は温度差によって生じる圧力および局部換気扇の圧力である。

通気回路網の風量の解は式(5)を満足する各独立網目の風量を求めることによって得られる。この式は非線形方程式であるので逐次近似により解を求める。(5)式において  $h_k$  は  $q_{ki}$  の関数である。また、(1)式および(2)式は  $q_{ki}$  が  $Q_k$  の関数であることを示している。このとき  $N+1$  次の網目風量の近似値  $Q_k^{N+1}$  は(6)式によって与えられる。

$$\begin{aligned} Q_k^{N+1} &= Q_k^N - \frac{h_k}{(\partial h_k / \partial Q_k)} \\ &= Q_k^N - \frac{h_k}{(\partial h_k / \partial q_{ki}) \cdot (\partial q_{ki} / \partial Q_k)} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $\partial q_{ki} / \partial Q_k = 1$ 、(5)式を  $q_{ki}$  によって微分すると

$$\frac{\partial h_k}{\partial q_{ki}} = \sum_{i=1}^m 2R_{ki} \cdot |q_{ki}| + \frac{\partial P_k}{\partial q_{ki}} \quad (7)$$

を得る。また(7)式と(5)式を(6)式に代入すると次式が得られる。

$$Q_k^{N+1} = Q_k^N - \frac{\sum_{i=1}^m R_{ki} \cdot q_{ki} |q_{ki}| - P_k}{\sum_{i=1}^m 2R_{ki} \cdot |q_{ki}| + \partial P_k / \partial q_{ki}} \quad (8)$$

(8)式は任意の独立網目に対して  $N+1$  回の修正計算により求めた風量  $Q_k^{N+1}$  を与える。式の右側第1項は  $N$  回目の風量値、第2項は風量の修正項である。上式によ

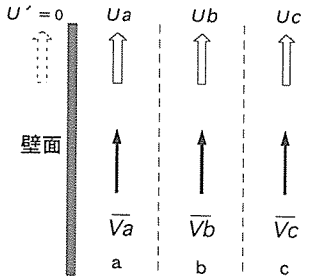


図2 隣接する仮想風道の境界面における粘性抵抗の計算モデル

て求めた風量値を(1)および(4)に代入すれば各風道の風量と圧力差が求められ、これを初期値として(8)式に代入する。このような反復計算を必要な精度が得られるまで繰り返し、風道の風量を求める。本研究では風量の収束誤差を  $0.001(\text{m}^3/\text{s})$  とした。

#### 4. 仮想風道モデルにおける抵抗の算定

一般の通気網解析においては風道内の空気粘性によって発生する摩擦抵抗よりも、長い風道壁面によって発生する摩擦抵抗のほうがはるかに大きいので風道内部の粘性応力は無視できる。一方、本研究の大空間を模した仮想風道モデルでは空気粘性による摩擦抵抗は無視できない。そこで仮想風道を滑面管路とみなし、空気粘性による摩擦の影響は隣接しあう仮想風道の境界面における平均速度の差によって発生すると仮定する。滑面管路壁面における摩擦係数は、乱流の場合、次のように与えられる<sup>9)</sup>。

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.0 \log \left[ \frac{U_0 \cdot D}{\nu} \sqrt{f} \right] - 0.8 \quad (9)$$

ここで、 $f$  は管路壁面の摩擦係数、 $U_0(\text{m/s})$  は管路断面の平均流速、 $D(\text{m})$  は管路の直径、 $\nu(\text{m}^2/\text{s})$  は動粘性係数である。ただし、上式は流速欠損則、管路断面流速の対数分布、および実験の結果に基づいて導かれた。本解析モデルでは、式(9)中の平均速度として、隣接する仮想風道の平均風速の相対値を用いた。また、式中の直径  $D$  については、仮想風道の水力半径の2倍を用いた。仮想風道の粘性抵抗を計算するモデルを図2に示す。いま、仮想風道 a, b, c の絶対風速をそれぞれ  $\bar{V}_a, \bar{V}_b, \bar{V}_c$ 、相対速度を  $U_a, U_b, U_c$  とすると、 $U_0$  はつぎのように与えられる。

$$\begin{aligned} U_{0a} &= [(\bar{V}_b - \bar{V}_a) + (\bar{V}_b - \bar{V}_c)]/2 \\ U_{0a} &= [\bar{V}_a + (\bar{V}_b - \bar{V}_c)]/2 \end{aligned} \quad (10)$$

式(9)の摩擦係数  $f$  は2分法によって求めた。

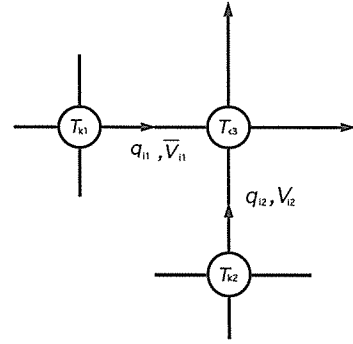


図3 仮想風道節点温度計算モデル

仮想風道内の摩擦抵抗  $\Delta h_{ik}(\text{Pa})$  はアトキンソンの式(11)によって求めた。

$$\Delta h_{ki} = \frac{f_{ki} \cdot \rho \cdot L \cdot S \cdot \bar{V}^2}{8F} \quad (11)$$

ここで、 $f_{ki}$  は仮想風道の摩擦係数、 $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$  は気流の密度、 $L(\text{m})$  は仮想風道の長さ、 $S(\text{m})$  は仮想風道の周長、 $\bar{V}(\text{m/s})$  は仮想風道内の平均流速、 $F(\text{m}^2)$  は仮想風道の断面積である。

なお、各仮想風道の摩擦係数は隣接風道に対する相対速度によって変化するので、通気網の風量、温度を反復計算するたびに摩擦係数も再計算して各仮想風道の圧力損失  $\Delta h_{ki}(\text{Pa})$  を求めなければならない。

#### 5. 気流温度分布の計算

本解析モデルでは、温度解析において、外気の温度、発熱源から気流への熱伝達および高度差による自己圧縮発熱（膨張吸熱）が考慮される。

地下大空間内の熱の移動は理論的に熱伝導と対流の二つの形式がある。とくに、乱流状態における熱の移動は、主に熱対流によるものである<sup>9)</sup>。本研究の対象モデルでは乱流状態を対象としているので、以下に述べるように気流間の熱対流だけを考慮した。

仮想通気網上の任意の節点の温度は、その節点に流れ込むすべての気流の混合温度によって決められる。図3に任意の節点 a の温度計算モデルを示す。ここで、 $q_{i1}, \bar{V}_{i1}$  と  $q_{i2}, \bar{V}_{i2}$  はそれぞれ風道 i1 および風道 i2 の発熱量と流量である。 $c_{pa}(\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K})$  を空気の定圧比熱として、 $T_{k1}, T_{k2}, T_{k3}(\text{°C})$  はそれぞれ節点 k1, k2, k3 の気流温度とすると、節点 k3 の温度は次式によって求められる。

$$T_{k3} = \frac{T_{k1} \cdot \bar{V}_{i1} + T_{k2} \cdot \bar{V}_{i2}}{\bar{V}_{i1} + \bar{V}_{i2}} + \frac{q_{i1} \cdot \bar{V}_{i1} + q_{i2} \cdot \bar{V}_{i2}}{c_{pa} \cdot (\bar{V}_{i1} + \bar{V}_{i2})} \quad (12)$$

上記の各節点の温度を計算する前提条件として、上流

側節点の温度は既知値であるとする。したがって、各節点の温度は入気口から各下流節点へ順次算定する必要がある。通常の計算手法では、流れの各節点に到達する時間上の順位を上流側からきめてから温度の算定を行う。しかし、大空間内の自然対流の場合、鉱山などの通気網と異なり、多数の循環流を含んでいる。これらの循環流の循環ルートおよびルート上の各節点の流れの間の時間関係を把握することは不可能であるため、前述した順次計算の前提条件を満足できるのは一部の節点しかない。そこで、本研究では循環流ルートの各節点に対して修正計算を行った。すなわち、ある節点の  $N+1$  回目の温度を計算するために、必要とする上流側の節点のなかで、一部の節点温度が未知であれば、これらの温度未知の節点に  $N$  回目の値を用いる。このように求めた  $N+1$  回の節点温度値を  $N$  回目の温度値と比較して修正を行った上、風量の計算を実行する。このように、各節点の温度の誤差が十分に小さくなるまで風量と温度の反復計算を続ける。

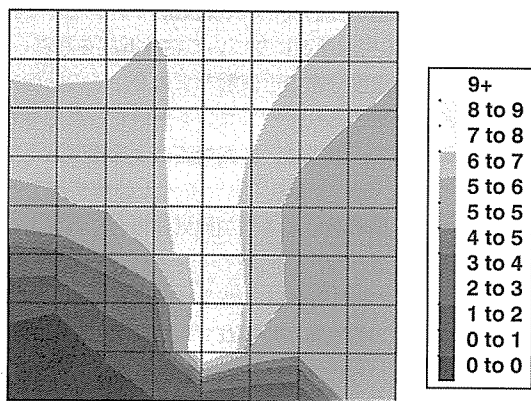


図4(a) 自然換気の地下大空間内温度分布

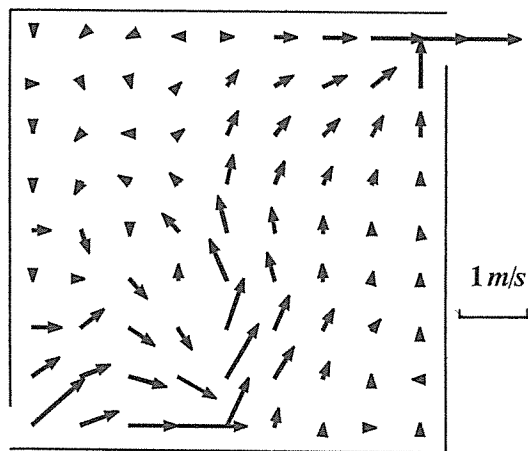
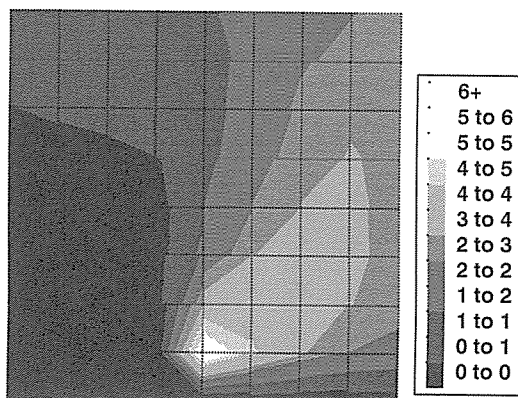
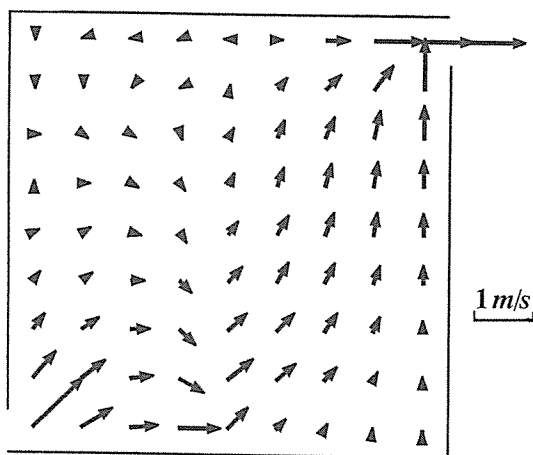
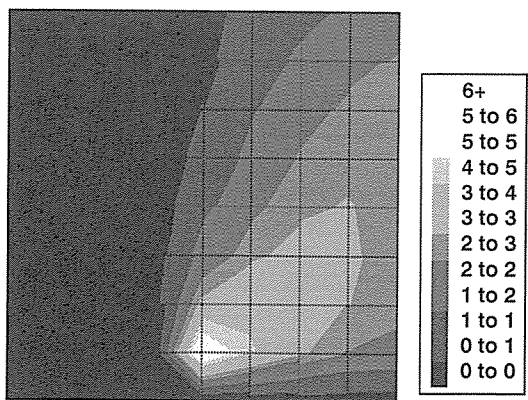


図4(b) 自然換気の地下大空間内速度分布

図5(a) 強制換気の地下大空間内温度分布  
(扇風機負圧=10 mmAq)図5(b) 強制換気の地下大空間内速度分布  
(扇風機負圧=10 mmAq)図6(a) 強制換気の地下大空間内温度分布  
(扇風機負圧=20 mmAq)

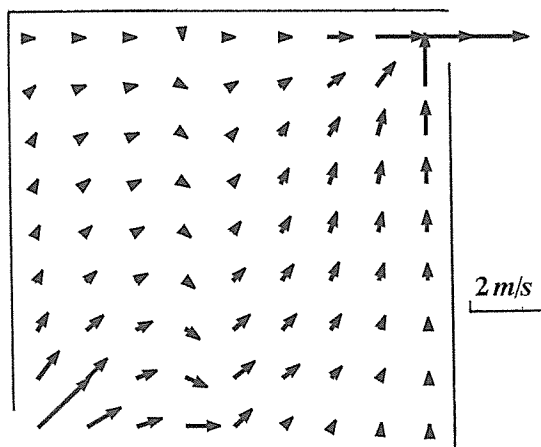


図 6(b) 強制換気の地下大空間内速度分布  
(扇風機負圧 = 20 mmAq)

## 6. 解析の基本的流れ

地下大空間内の風量および温度は互いに影響を及ぼすので、これらを同時に解析しなければならない。この解析の基本的流れは次のようである。

- 1) 大空間を仮想的な風道を用いて等間隔に分割して、仮想的通気網を構築する。
- 2) 仮想通気網の各風道に初期値として一様な摩擦係数を与え、独立網目を選択する。
- 3) 仮想通気網の各節点の温度の初期条件および仮想風道の摩擦係数の初期値を用いて、節点の圧力を求める。
- 4) 上記の条件で網目法を用いて各仮想風道の風量を求める。
- 5) 計算された風量で節点温度を求める。
- 6) 前回の温度計算結果と比較して節点温度を修正し、各仮想風道の風量を再計算する。
- 7) 上記の計算を繰り返し、 $N+1$  回目の温度と  $N$  回目の温度を比較し、すべての風道における温度が収束しなければ 4) に戻り、収束すれば計算を終了とする。

## 7. 解析例

空洞内の流速および温度分布の解析結果をそれぞれ自然換気と強制換気の場合について示せば図 4、図 5 および図 6 のようである。境界条件として温度および外気温度は  $0^{\circ}\text{C}$  とした。空間内部に 1744 W の熱源を設置している。強制換気の場合は空間の上部の出口に換気扇を設置した。図 4(a) と図 4(b) は自然換気の解析結果であり、図 5(a), (b) と図 6(a), (b) はそれぞれ 10 mmAq と 20

mmAq の負圧の換気扇を設置した強制換気の解析結果である。これらの結果から、自然換気の場合は熱源の影響範囲はほとんど空間の全域にわたるのに対して、強制換気の場合は熱源の影響範囲は大空間の排気口側だけである。これは、風速分布図 4(b)、図 5(b) および図 6(b) に示すように、自然換気の場合に循環流が発達して、熱を運んだが、強制換気の場合に、扇風機の負圧によって、大空間内の気流は循環流を形成しにくいからである。また、どの換気方式でも、大空間上部排気口の反対側の空間部分では風速が小さくて換気効果は悪いことがわかる。

本計算の風量の収束条件は  $0.001 \text{ m}^3/\text{s}$ 、温度の収束条件は  $0.1^{\circ}\text{C}$  とした。

## 8. 結 言

単一地下空間内の流れは高い Rayleigh 数の乱流であるため、通常自然対流の解析に用いられる有限要素法あるいは差分法では収束解を得にくい。これに対して、本研究では通気網解析の手法が用いられる。すなわち、地下空間は仮想風道から構成される通気網モデルとして表され、隣接風道の相対速度に基づいて粘性抵抗を計算し、流速分布および温度分布の近似解を求める。この解析方法はモデルが簡単であり、パソコンを用いて計算できる点にも特徴がある。最後に、自然対流による換気および換気扇をつけた強制換気の 2 次元モデルの解析例を示した。ただし、扇風機による強制換気の場合には従来の研究からもこのような節点間隔で十分の精度を確保できるが<sup>9)</sup>、熱源による自然換気の場合は現段階において実験結果および他の数値解が得られていないので、計算精度に関する検討は今後の課題である。

## 参 考 文 献

- 1) 棚橋隆彦：数値流体力学の基礎とその応用，アイシーピー，1993
- 2) 岡永博夫，棚橋隆彦：GSMAC 法有限要素法による高 Rayleigh 数正方形 Cavity 内自然対流の非定常解析，日本機械学会論文集(B 編)，56 巻 530 号，p. 94-101，1990
- 3) 小竹 進，土方邦夫：パソコンで解く熱と流れ，丸善株式会社，1993
- 4) Y. Mizuta and V. S. Vutukuri: Computer Programs for Predicting Ventilation and Conditions in Mines and Tunnels, May, 10, 1990
- 5) 日野幹雄：流体力学，朝倉書店，p. 152-166
- 6) 前田信行：工場内気象環境改善に資するための通気解析，山口大学大学院工学研究科修士論文，1990



## 資 料

湿式ガスリークテストに関する基礎的研究  
—“水の泡”の除去について—

鴛 海 真 樹\*

A Fundamental Study on Wet Type Gas Leak Test  
—On the Removal of Bubbles in the Water—

by Masaki OSHIUMI

## Synopsis

On the development of the wet type automatic gas leak test machine for the small size relays, some experiments on the removal of bubbles in the water were performed.

Bubbles in the water are classified into dissolved air bubbles, bubbles by disturbance, boiling water bubbles, bubbles by electrolysis and so on. In these bubbles, the removal of dissolved air bubbles was most difficult technique.

Theoretical views show that dissolved air in the water is less at the high temperature than the low state. However, from experimental results obtained, it was found that visible bubbles adhering on relay were less at the low temperature water in opposition, and that the bubble didn't adhere at the boiling water at all, but as time goes by, bubbles adhered at the high temperature especially, and that even if in a short time, air dissolved in the water by the disturbance and/or aeration.

As the result of the study, following methods were found to be good for the removal of bubbles in the water.

(1) Gas leak tests should be performed immediately after cooling the boiling water, or conducted by replacing the above-stated test water with the newly boiled one as much as possible.

(2) Test water should be adjusted on lower temperature than higher state comparatively, and relay cases should be kept at a high temperature.

(3) It is desirable to be performed in the water as quiet as possible.

## 1. 緒 言

小型リレーは製作、組立終了後、内部保全の為に  $N_2$  ガスを注入した上で密封している。そしてこの密封状態を確認する為に、従来手作業でリレーを温水中に沈め、目視によりリレーから泡の出るものを封止不完全品 (NG) として除去、泡の出ないものを良品 (GOOD) として次工程に進めている。いわゆる“湿式ガスリークテスト”である。温水の代りに沸点が水より高い液体を用いるこ

ともある。

この程本リークテストの自動化、機械化を行うに当り、泡の実態を基礎的に探る必要を感じた。

自動機ではリレー内部から発生する泡は、例えばレーザセンサで検出されるが、当然検出フィールドに他の要因の泡、又はある程度以上の対流、攪乱が存在すると、検出誤差の原因になるので絶対許されない。

本報告は、泡の本質と、泡の無い温水を作る為のテクニクについて、定性的ながら検討した結果をとりまとめたものである。

\*元(株)セイカハイテックス顧問 (昭26・鉾山卒)

## 2. 泡 の 分 類

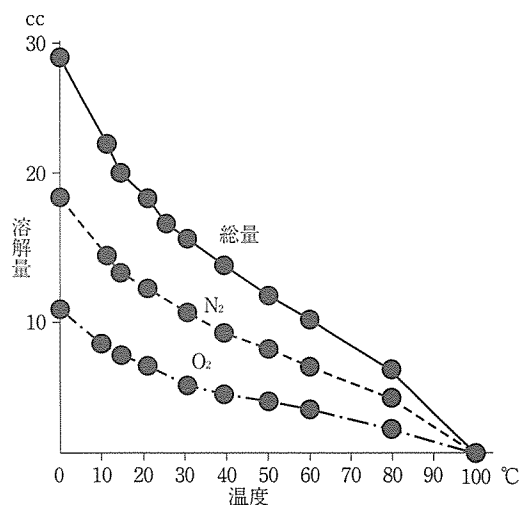
水中に発生する泡には種々のものがある。考えられる泡とその成分を列記すると

- (1) 溶存空気泡 (空気)
- (2) 攪乱によるしぶき ( // )
- (3) 付着空気泡 (空気)
- (4) 沸騰泡 (水)
- (5) 電気分解泡 ( $H_2$ )

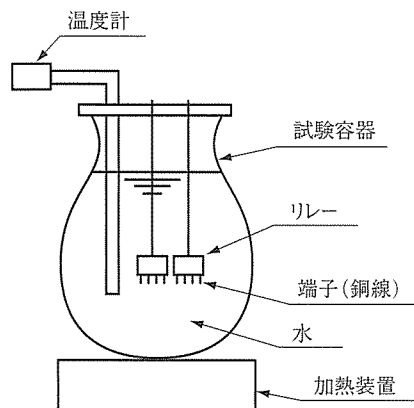
本報告では、特に溶存空気泡について詳しく述べ、他の泡についても実機による試験結果に簡単に触れることにした。

## 3. 溶 存 空 気 泡

### (1) 溶存空気



第1図 水11に対する空気溶解量<sup>1)</sup>  
(溶解量は0°C,  $1.01325 \times 10^5$  Paに換算した値)



第2図 泡の付着試験装置

水中には空気が溶解している。その溶解量は水温と関係があり、低温時に多く、高温時に少なくなり、100°Cでは溶解量皆無となる。第1図は化学便覧<sup>1)</sup>に示されている表をグラフ化したものである。これは一見して、水温の高い方が溶存空気の泡が少なく理想状態に近くなると考えられるので、この点を検証することにした。

### (2) 試験方法

自動機実機の水槽はステンレス製としたが、本試験では第2図の様な耐熱ガラス容器 (1,200 CC) を用いた。耐熱ガラスは気泡核が少なく核沸騰による泡が殆ど発生しないので、溶存空気泡のみの性状を調べるのに適している。又ガラス越しにリレーへの泡付着状況を観察出来るので便利である。

溶存空気は微細な為肉眼では見え難い。従って検出、計量が困難であるが、水中に物体を入れるとこれに可視の泡となって付着する。泡が物体に付着しない場合、一概に溶存空気ゼロとはいえないが、本ガスリークテストの手法は可視泡の有無検出にあるので、泡が付着しないことは、そのこと自体本研究の目的を達したことになる。従ってリレーへの泡付着の有無を本基礎試験の判定基準と考えた。

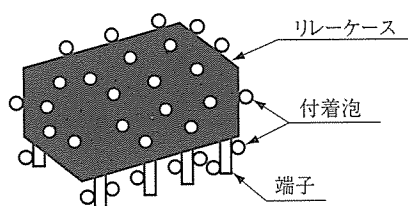
リレーは、本体ケースがプラスチック製、9.5 mm $\times$ 20 mm $\times$ 12 mm $\times$ 、端子が銅線、 $\phi 0.24$  mm $\times$ 4 mm $\times$ 8 本のもので試験用に使った。

本試験では、上記の容器に水を張り、種々の条件に対して、糸で吊るしたりリレーへの泡付着状況を調べた。

泡付着の程度は第1表の通り泡数の多寡を示す符号により表した。そして後記第2表、第4～8図に示す様に泡径を添字にて付記した。ただ泡径は、泡発生後時間と共に変化していくので参考値である。なお泡数はリレー

第1表 リレーへの泡付着の程度

| 符号 | 付着状況   | 付着個数           |
|----|--------|----------------|
| ×  | 付着なし   |                |
| ○  | わずかに付着 | 6面合計 1～10個     |
| ⊙  | 多少付着   | // 11～30個      |
| ⊗  | かなり付着  | // 31～80個      |
| ●  | びっしり付着 | // $\geq 81$ 個 |



第3図 泡の付着状況

の各面毎に目視により計数，集計したもの，又泡径はリレー端子径 0.24 mm との比較により計測したものである。

第3図は泡付着状況の一例をスケッチしたものである。

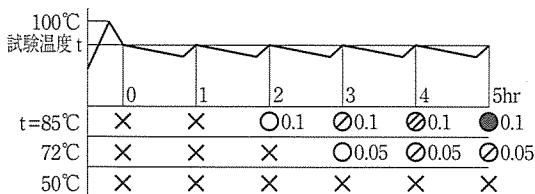
### (3) 試験内容とその結果

詳細な試験を行う前に，傾向把握の為にラフな試験を行った。先ず水を開放容器で充分沸騰した後任意温度まで急冷し，これにリレーを入れた所，泡は全然付着しない。しかし時間が経過すると付着し始める。試みに2日間保存し先の温度まで加熱した場合，大量の付着がおこった。又沸騰水を容器の口まで満水し，これを密封して2日間保存した後開放容器で再加熱した所，少量の泡付着がおこった。これは開放時(水は常温になっている)に急激に空気を溶解したことによるものと考える。次に水を沸点以下の任意温度まで加熱してリレーを入れた所，泡が大量に付着した。

これらの認識を参考にして，試験手順として，先ず沸騰水と未沸騰加熱水の夫々について試験温度まで急冷する。ここに急冷とした理由は試験水の中に空気が溶解する時間的余裕を出来る限りあたえない様にして初期条件を整える為であり，その方法は容器外壁を冷流水で冷却，その時間は各ケース2分以内とした。次にこの試験水を交換無しに時間経過による泡付着の変化について調べた。(i, ii, iii 項)しかしながら実機では使用温水は次第に蒸発し，又自動機に入って来る大量のリレーは夫々が水を付着して機外に出ていくので，これらの水の消耗を補充してやる必要がある。従って次には水を交換しながらの長時間試験を行った。(iv, v 項)更に実機では，使用水の補充等の関係で，水の流動は避けられないので，その際空気を溶解するおそれがある。本基礎試験では，故意に攪拌，エアレーション(空気吹込み)を行った後の泡の付着状況を調べることにした。実機では，流動時に攪拌はあっても，エアレーションまでは考え難いが，念の為両方について調べて見た。(vi 項)

#### i 沸騰後冷却水 水交換なしの長時間試験

沸騰水を試験温度(例えば 85, 72, 50°C)まで急冷して泡付着状況を調べた。その後水を交換することな



第4図 泡の付着状況 (100°C → 85, 72, 50°C)  
添字：泡径 mm

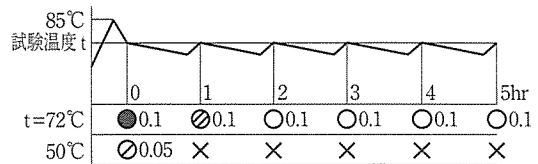
しに自然冷却し，1 hr 後上記温度まで加熱して再び付着状況を調べた。以後同様の手法で計測を行った。第4図参照

その結果，当初は泡が付着しないが，時間が経過すると，水温が高い時は次第に付着していくのに対し，低い時はいつまでも付着しないことがわかった。

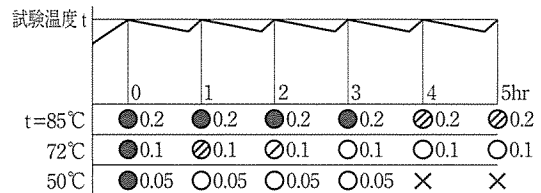
#### ii 加熱後冷却水 水交換なしの長時間試験

水を沸点以下の高温(例えば 85°C)まで加熱し，次いで試験温度(例えば 72, 50°C)まで急冷して計測し，その後前項同様水を交換することなしに放冷と加熱をくり返しながら 1 hr 毎の泡付着状況を調べた。第5図参照

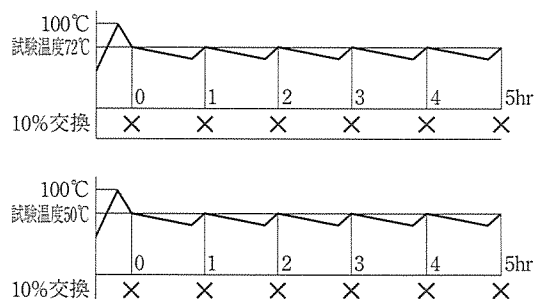
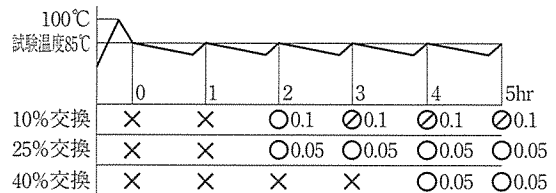
その結果，試験温度が高い時は当初付着がはげしく，その後も無くならないのに対し，低い時は当初より付着



第5図 泡の付着状況 (85°C → 72, 50°C)  
添字：泡径 mm



第6図 泡の付着状況 (85, 72, 50°C) 添字：泡径 mm



第7図 泡の付着状況 (100°C → 85, 72, 50°C)  
添字：泡径 mm

量が少く、しかも間もなく付着しなくなることがわかった。

### iii 加熱水 水交換なしの長時間試験

水を沸点以下の試験温度（例えば 85, 72, 50°C）まで加熱して計測し、その後水を交換することなしに前項同様放冷と加熱をくり返し乍ら 1 hr 毎の泡付着状況を調べた。第 6 図参照

その結果、各温度共当初大量に付着するが、時間経過と共に水温が高い時はやゝ減少していくのに対し、低い時は減少後皆無となることがわかった。

### iv 沸騰後冷却水 水交換しながらの長時間試験

沸騰水を試験温度（例えば 85, 72, 50°C）まで急冷し、1 hr 毎に一定量（例えば 10, 25, 40%）を沸騰した同量の新水と交換した上で、上記試験温度に温度調整し、泡付着状況を調べた。第 7 図参照

その結果、当初泡は付着しないが、時間の経過と共に水温が高い時は次第に付着していくのに対し、低い時

はいつまでも付着しない。水温が高い時でも交換量を多くすると、時間が経過しても付着し難くなること等がわかった。

### v 加熱後冷却水 水交換しながらの長時間試験

加熱水（例えば 85°C）を試験温度（例えば 72, 50°C）まで急冷し、前項同様 1 hr 毎に一定量（例えば 10, 25, 40%）を同量の 85°C 加熱新水と交換し、泡付着状況を調べた。第 8 図参照

その結果、試験温度が高く交換量が少ない時は時間が経過しても泡が付着しているのに対し、交換量を増すと付着しなくなる。試験温度が低い時は泡の付着は最初だけで、間もなく無くなること等がわかった。

### vi 沸騰後冷却水 攪拌、エアレーション後の泡付着状況

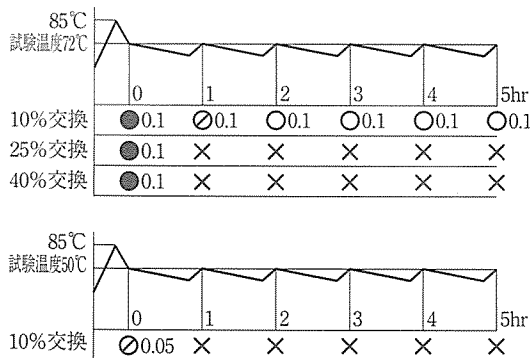
沸騰水を任意温度（例えば 85, 72, 50, 20°C）まで急冷し、泡立機による攪拌、エアレーション（空気吹込み）を行った後、試験温度（例えば 85, 72, 50°C）に温度調整した時の泡付着状況を調べた。第 2 表参照

前述の通り、沸騰すれば水中の溶存空気は皆無となるが、攪拌又はエアレーションを行うと折角の沸騰の効果はなくなり、泡付着をおこす。特に低温で本処理を行った場合、付着がはげしいことがわかった。又試験温度が高い程付着がはげしく、更に攪拌に較べエアレーションは著しく空気を溶解することもわかった。

### (4) 泡の大きさ

前記の各図、各表に泡径を参考として記入したが、泡には次の様な性質がある。

i 水温を一定にした場合、リレーに付着した泡の大きさは時間の経過とともに若干大きくなる。これは泡が微細な溶存空気を吸着合体する為と思われる。一例



第 8 図 泡の付着状況 (85°C→72, 50°C)

添字：泡径 mm

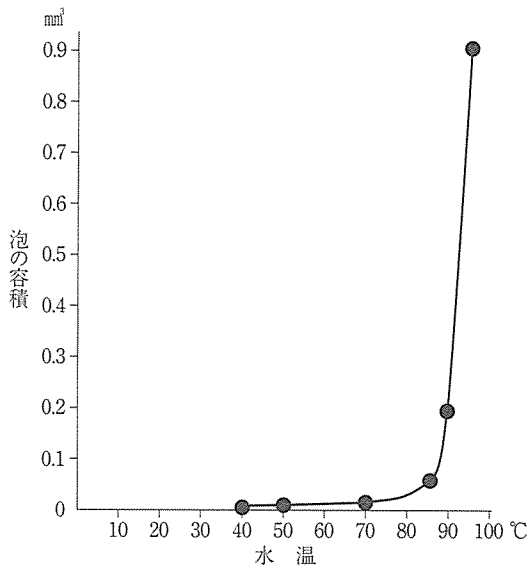
第 2 表 攪拌、エアレーション後の泡付着状況

| 攪拌<br>エアレーション<br>水温 | 試験<br>水温 | 条件                |                    |                         |
|---------------------|----------|-------------------|--------------------|-------------------------|
|                     |          | 攪拌のみ 10 分間        | エアレーションのみ<br>10 分間 | 攪拌、エアレーション<br>同時に 10 分間 |
| 85°C                | 85°C     | ×                 | ○ <sub>0.05</sub>  | ○ <sub>0.05</sub>       |
|                     | 72°C     | ○ <sub>0.05</sub> | ○ <sub>0.2</sub>   | ○ <sub>0.2</sub>        |
| 50°C                | 85°C     | ×                 | ×                  | ×                       |
|                     | 72°C     | ○ <sub>0.1</sub>  | ○ <sub>0.2</sub>   | ○ <sub>0.2</sub>        |
|                     | 50°C     | ×                 | ○ <sub>0.05</sub>  | ○ <sub>0.05</sub>       |
| 20°C                | 85°C     | ×                 | ×                  | ×                       |
|                     | 72°C     | ○ <sub>0.1</sub>  | ○ <sub>0.05</sub>  | ○ <sub>0.05</sub>       |
|                     | 50°C     | ○ <sub>0.05</sub> | ×                  | ×                       |

添字：泡径 mm

第3表 泡の大きさの時間変化の例

|                    | 泡発生時   | 3分後    | 6分後    |
|--------------------|--------|--------|--------|
| 泡径 mm              | 0.1    | 0.24   | 0.24   |
| 容積 mm <sup>3</sup> | 0.0005 | 0.0072 | 0.0072 |



第9図 水温と付着泡の容積の関係

として、水温 72°C の場合の時間による変化を第3表に示す。

この様に泡の大きさは変化するがある大きさで飽和する、又温度が高い時は大きく膨張し、低い時はこれが比較的小さい。

ii 水温を変化させ、例えば昇温すると泡の大きさは大きくなり、特に高温になると著しく大きくなる。第9図にその関係の一例を示す。

例えば、 $t_1 = 40^\circ\text{C}$ 、 $t_2 = 95^\circ\text{C}$  の場合、泡の容積比をシャルルの法則で計算すると

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1} = \frac{95 + 273}{40 + 273} = 1.176$$

これに対し実測値は泡径  $d_1 = 0.06 \text{ mm}$ 、 $d_2 = 1.20 \text{ mm}$  より

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{d_2^3}{d_1^3} = \frac{1.20^3}{0.06^3} = 8000 \gg 1.176$$

これから泡の膨張は、溶存空気吸着、合体によるものであることがわかった。

#### 4. 攪乱によるしぶき

自動機のリレー搬送装置のハンドが水槽に着水又は離

水する時にしぶきを生じ、泡が出来る。

#### 5. 付着空気の泡

この泡は物体表面の状態如何により生ずるもので、常温でも出来る。一般に材質、表面あらさにもよるが、例えば油膜があれば出来易い。試みに多数のリレーを常温の水につけて見ると、その中に気泡が付着するものがある。加熱水の場合も同様である。この泡も、実機ではセンサに検出され、そのリレーは封止不完全品と共に NG となる。本基礎試験では、この様なリレーに更に故意にマシン油を塗布し、気泡を付着し易くしたものを沸騰水（溶存空気ゼロ）で洗浄した所、気泡が簡単に流れ落ちることがわかった。

#### 6. 沸騰泡<sup>2)3)4)</sup>

水を加熱すると容器の気泡核より泡が発生（核沸騰）し、 $100^\circ\text{C}$  で全面的な飽和沸騰をおこす。耐熱ガラスは気泡核が少なく、従って発泡が少ない。沸騰泡は概して付着し難い様で、直接水面まで上昇、もしくは途中で冷却されて消滅する。又沸騰泡は加熱を停止すれば直ちに消滅する。

#### 7. 電気分解泡

自動機で、リレーに DC 電圧をかけてケース内温度を上げ発泡を促進することを試みたが、この場合⊖極に  $\text{H}_2$  泡が発生、電圧を上げると泡量が多くなる。⊕極には  $\text{O}_2$  が発生するが、これは電極酸化に消費されて泡にはならない。

純水、超純水を使ったとしても、これは溶解性が高いので、空気中の  $\text{CO}_2$  を溶解して  $\text{H}_2\text{CO}_3$  となり、電気伝導性がある為電気分解をおこすことになる。

#### 8. 対 流

実機の水槽を加熱するか、又はこれに温水を入れた場合各部の温度差により対流を生ずる。レーザセンサで泡の有無を検出する時、泡と対流の判別がつかず誤作動をおこすことがある。水加熱時の対流状況を観察すると低温時は流動が少ないが、高温時、特に  $100^\circ\text{C}$  に近づくにつれて急速に流動が活発化するので誤作動をおこし易い。

#### 9. リレーよりのガスリーク試験

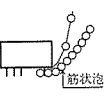
リレーの封止が不完全な場合、孔部よりガスがリークすることは前述した通りである。沸騰水を試験温度まで冷却した水中に NG 孔をもつリレーを吊るして、ガスのリーク状況を次の2ケースについて調べて見た。

(1) NG 孔のあいたリレーを試験温度（例えば 95, 85, 72,  $50^\circ\text{C}$ ）の温水につけた場合 第4表参照

第4表 水温を変えた時のガス泡発生状況

| 水温  | 泡発生状況                                                                                                                           |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 95℃ | リレーを水につけると、直ちに泡浮上 (φ3 mm), 連続                  |
| 85℃ | リレーを水につけると、足元の泡が膨張し1 sec 後浮上 (φ3 mm), 間隔1 sec  |
| 72℃ | リレーを水につけると、足元の泡が膨張し2 sec 後浮上 (φ3 mm), 間隔3 sec  |
| 50℃ | リレーを水につけると、足元の泡が膨張し3 sec 後浮上 (φ3 mm), 間隔5 sec  |

第5表 NG 孔径が異なる時のガス泡発生状況

| 孔の大きさ       | 泡発生状況 (水温 95℃)                                                                                                                                 |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 比較的<br>大きな孔 | リレーを水につけると、直ちに泡浮上 (φ3 mm), 連続                                 |
| 細かい孔        | リレーを水につけると、足元の細泡が10 sec 後浮上 (φ0.5 mm), 間隔5 sec 筋状泡は直ちに浮上, 連続  |

各温度における浮上泡径は大差ない。シャルルの法則から考えても 95℃の泡径は 72℃の 1.02 倍に過ぎない。泡の出方は高温時が低温時より活発、泡の浮上間隔はせばまっている。

## (2) 同一水温 (例えば 95℃) の温水に比較的大きな NG 孔をもつリレーと、細かい NG 孔をもつリレーをつけた場合 第5表参照

孔径が大きいと泡径は大きくなり、連続的に発生し浮上する。孔径が小さいと泡径も小さく、泡の浮上間隔はあいている。

## 10. 検討とまとめ

泡のない温水を作ること为目标としたが、本研究を通して特に手こずったのは溶存空気泡であった。その他の泡はそれなりに何とか排除出来、逃れる方法もあることがわかった。

### (1) 溶存空気泡

溶存空気は原理的には水温と関係があり、低温時に多く高温になれば少なくなることは 3-(1)項に記述した通りである。しかしリレーに付着する可視の泡 (センサで検出される泡) は逆に低温時に少なく、高温時に多くなることがわかった。これはリレーという固体表面に付着した泡が微細な溶存空気を吸着合体して可視の泡粒となるもので、高温時は溶存空気量が少ないけれども、吸着、合体が旺盛に行われる為、見掛け上付着量が多くなったものと考ええる。

付着泡皆無は沸騰水を試験温度まで急冷した直後であ

る。この水を放置すると、それが高温の場合は時間の経過とともに空気を再溶解して泡付着をおこす。逆に低温の時はいつまでも泡は付着しない。水温が高い時でも沸騰した新水を交換補給してやれば泡付着が減少し、特に交換量が多いと効果的である。これは溶存空気皆無の沸騰水との置換により全体的に溶存空気量が少なくなり、泡付着が減少する為と考える。

沸点以下の加熱水の場合も試験温度を出来るだけ低くし、又交換補給量を多くした方が付着し難いが、沸騰水使用時と較べると付着が多い傾向にある。

又短時間でも攪拌又はエアレーションをしてやると、他の対策を行ったとしても、特にエアレーションにより空気を溶解し気泡が付着してしまうので、静水中の検査が理想である。しかし実機の場合、静水といっても実現し難いので、水温を下げることを並用するとよい。但し余り下げ過ぎると空気の溶解が活発となり、泡の付着をおこすので要注意である。

水槽を密閉容器にして真空にすれば空気の溶解はなくなるが、大量のリレーが出入りする自動機としては非常にコスト高となり不向きである。

### (2) その他の泡

自動機の搬送装置のハンドが水槽に着水、又は離水する時におこるしぶきは、外乱がなくなれば消滅するのでセンサによる検出のタイミングをずらし、外乱が収まってから行うとよい。

リレー表面の性状に起因する付着泡は、リレーを水槽に入れる直前に沸騰水で洗浄してやれば消滅する。

自動機水槽中にヒータを設置して水を加熱する方法は、核沸騰をおこし好ましくないので、他で沸騰水を作りこれを水槽に移送するか、又はヒータを出来るだけ小容量とし、沸騰泡はガイドにより誘導してセンサの検出フィールドをはずすとよい。

なお水槽材質は出来るだけ気泡核の少ないもの、例えば耐熱ガラス、ホーロー等が核沸騰が少なくなるのでよいが、コスト高になるし、又前述の水の事前沸騰処理等の手法で充分対処出来るので、通常のステンレス水槽でよいと考える。

電気分解泡を発生させずにリレー内部を加熱する為には AC 電圧をかけるとよいが、振動を発生する難点がある。振動防止の為には、リレーを水中でソケットに挿入する際本体を拘束するとか、60 (50) hz 以下の低周波電圧をかけることが考えられる。

使用水は純水でなく安価な水道水で充分であり、その場合は濾過して使うとよい。

対流と泡は目視では判別出来るが、レーザセンサでは困難である。対流は高温で特に活発となるので出来るだけ低く設定することが望ましい。

リレー内部温度は、小孔よりのガス噴出を助長する為には出来るだけ高くする方がよい。噴出したガス泡は水で冷却されてもシャルルの法則より見て、泡径はそれほど小さくはならない。

リレーにより噴出したガス泡を効果的に離脱、浮上させる為に、水槽内ソケット部に水流を下方より吹き上げることが考えられるが、これは乱流を助長し、センサ誤作動の原因となるので最少限に止めた方がよい。経験上、水温は低い方が流動が不活発となり、誤作動が少なくなる。従って前記の溶存空気泡の項で述べた低温水使用の勧めはこの場合にも適合出来ることになる。

#### 謝 辞

本研究を行うに当たり、京都大学名誉教授（工学部資源

工学教室）若松貴英先生、大分大学工学部生産システム工学科教授時田雄次先生、福岡県工業技術センター機械電子研究所中村裕章主任研究員、同所末松影明専門研究員、㈱セイカハイテクス中川清文社長の皆様から多大のご教示を賜わった。厚く御礼申し上げる。

#### 参 考 文 献

- 1) 化学便覧基礎編, p. II-158
- 2) 内田秀雄: 伝熱工学, p. 227
- 3) 北方直方: 伝熱工学の学び方, p. 133
- 4) 西川兼康, 藤田恭伸: 伝熱学, p. 210



## 談 話 室

## タタラ製鉄を見学して

熱 田 善 男\*

**Tatara Steel Making**  
**The Japanese traditional method originated in ancient year**  
**and disappeared in consequence of modern iron and steel making,**  
**which has been revived in 1977 at the site of the Myth**

by Yoshio ATSUTA

平成8年(1996年)1月19日(金)夕刻, 17人は、奥出雲(山陰・島根県)横田町の《タタラ》製鉄の現場に着いた。木造の工場、ヘルメットが工場のくぐり戸にぶつからないように、少し背を丸めて中へ入ると、薄暗い、天井の高い、高殿(たかどの)と呼ばれる工場の中、前方斜め上方向に視線を走らせると、中央の、空中に、大きい炎の塊が、空間を燃え尽くすように、めらめらと、燃え上がっている。一瞬立ちすくんで、「アッ」、皆、口の中で、同時に、小さく叫んだ。

タタラの火、覆い被さるような大きい炎の塊は、一瞬、皆の度胆を抜いた。やがて、火の温もりが頬に当たるのに気がつき、その暖かさに安堵した。火の神に対する畏敬から親愛に切り替わるのに時間はいらなかった。

タタラ製鉄とは日本古来の製鉄法である。古墳時代、6世紀の頃には、全国各地でタタラ製鉄が行われていたが、時代とともに、原料になる良質の砂鉄と燃料の森林資源に恵まれた山陰地方にタタラ炉が集中し、最盛期にはこの地方に数100ヵ所はあったと言われている。明治の中頃までは日本の鉄の大部分を供給していたタタラだが、洋鉄の輸入と国産洋式製鉄所による生産がはじまり、大量生産による洋鉄に負けて、大正の末には1,300年続いた火が完全に消えた。

日本刀はタタラ炉で生産された玉鋼(たまはがね)を素材にして鍛練される。現在の最新鋭の製鉄所でも日本刀用の素材はできない。これではいけないので、その古来の方法を復元して昭和52年から毎年厳寒の時期だけ

タタラ炉の操業を行い、全国の刀匠約250名に玉鋼を供給している工場が出雲横田にある。

このタタラ製鉄見学の話は、水曜会・冶金・34年卒の同期会で、突然飛び込んできた。

住友金属の専務で和歌山製鉄所長をしていた杉田宏君が、系列の中央電気工業の社長になって、東京へ赴任してきたので、関東に住んでいる仲間が集まり、平成7年(1995年)9月末日、土曜日の昼に、豪州から一時帰国中の1人も加わり12名、銀座のクラブさいせりあ、で同期の会を持った。わざわざ四国の四万十川から運んだ清らかな水で調理した名水懷石を囲んで。

その時、参加者の1人、日立金属社長の枝徹也君から、来年1~2月に、タタラ製鉄の見学を兼ねて、山陰旅行を企画しては、と、勧められた。(財)日本美術刀剣保存協会が国庫補助事業としてタタラ製鉄による玉鋼の生産とタタラ技術者の養成をしているのだが、この事業に全面的に協力しているのが横田町にある日立金属の子会社である。

このタタラを、(財)日本美術刀剣保存協会の名称にちなみ《日刀保たたら》と呼んでいる。

冶金屋にとっては、古来から伝わってきた、タタラの現場を見るのは、すごいロマンである。「還暦を迎えて、一桁繰り上がって生まれかわった我々に相応しいイベントではないか」と、幹事の小生(熱田)は、ワクワクした気持ちで、全国に散らばっている同期の仲間を声をかけたところが、16人が、この企画に参加することになった。

京大(工)で冶金の同期生は、26名。物故者3名、増

\*21世紀を考える会・代表幹事/元・新日鉄  
(昭34・冶金卒)



タタラの火 (1996. 1. 19)

田正明君（商社員）、和田達明君（新日鉄）、高橋英治君（元・神戸製鋼）。不参加は、田村秀明君（参議院議員/公務多忙）、田村英二郎君（元・住友金属/多忙）、村上雅昭君（東京製鋼スチールコード・取締役/元・新日鉄/ISO受審準備のため多忙）、星野義夫君（オーストラリア在住）、山田隆三君（元・日本鋁業/私用）の5人。

参加者、明田莞君（明田特許事務所長/元・神戸製鋼）、伊藤久雄君（工博・日立協和工業・取締役/元・日立製作所）、江見敏夫君（愛鋼・専務/元・愛知製鋼）、小野弘路君（神戸企業・社長/元・川崎製鉄）、尾野均君（工博・関西製鋼・常務/元・新日鉄）、斉藤晟君（日本検査キューエイ・取締役/元・新日鉄）、田原正明君（トピーメタリ常務/元・新日鉄）、林明夫君（元・住友電工）、松井正治君（NDパウダー社長/元・日本鋼管）、南浦基二君（住友化学・常務）、森孝夫君（日本鉛亜鉛需給研究会・専務理事/元・三井金属）、森田有彦君（日新製鋼・顧問）、山本龍太郎君（大紀アルミニウム常務/元・昭和電工）、それに、前出の枝徹也君、杉田宏君、それに、小生（熱田）。

他に、連絡しても返事のない人、2名。

2年下の小松伸也君（関西大学・工・教授/作家・小松左京氏の令弟）が特別参加したので、結局、17名になった。

そんな経緯の奥出雲横田訪問であった。

同じ時に大学を卒業して、36年経てみると世俗的には差がついても、何かが一つの心につながっているのだろう。企業社会の中で階段を上がって行くうちに、現実の流れに初心が押し流されて挫折を繰り返して来たのが、小生（熱田）の心の遍歴である。技術者としての真面目な気持ちでだけでは生きていけなかった。人間の営みは純粋なだけでは成り立たないのも知っている。必要悪も認める。しかし、企業の中で、それが当たり前になって、「免疫ばかりが出来てしまい、自浄能力が退化してしまうのがほんとうに無念である」。技術者の良心を傷めながら努めてきたのではないのか。

平成7年は戦後50年。還暦を過ぎた小生（熱田）は、戦後50年間の日本民主主義の実験は失敗だったと思う。きちんと機能しない民主政治。信頼されていない国会議員。市場経済の美名で行われたバブル経済とその崩壊。政治家や役人のお金にかかわるスキャンダル。役人に私物化された官庁。力を失った民主勢力や労働組合。企業のリストラ、会社を首になった親と会社に入れない娘や息子達。学校でのいじめによる自殺。分を忘れた大量生産と大量販売は世界中の市場で衝突を起こし、その廃棄物の影響で環境は病んでいる。生産と流通と販売とを支える無人化、駅の改札や自動販売機、対面販売のないスーパー。これらは人間同士の温もりを切り捨ててし

まう。初心の理念に程遠い現実の姿にあきれかえっている。しかし、現実主義の中では、この社会は自浄作用のない後戻りはできないシステムになってしまっている。

学生時代の、純な気持ち、汚れなき四万十川、そんな気持ちが同期会の核になっているように思う。それが、横田訪問に対する小生（熱田）のワクワクする気持ちの原因だろう。

当日、平成8年1月19日（土）、新幹線・のぞみ7号、8時56分・東京駅発、出発時刻に合わせて、関東組の6人、松井君、杉田君、田原君、伊藤君、斉藤君と小生（熱田）が「やあやあ」「お久しぶり」と、参集する。発車と同時に同期会が始まってしまう。ワクワクする気持ちがつい饒舌をさそう。初老のグループの大きい声に同乗の客が戸惑っている。あつという間に、10時36分、名古屋。江見君が乗り込んでくる。ちゃんと隣席が用意されている。「やあ、やあ」と挨拶していると、もう京都、11時22分。京都からは山本君が合流。すぐに11時28分・新大阪。尾野君、小松君、幹事の森田君と林君。全て、隣席に座れて、12名。大グループになった。かたまって座れたのは、林幹事のお蔭。「最初、全12名の申込みを、東京発でするのだよ」「取れてから、区間変更をする」。からくりを聞いてなるほど、と皆、感心した。

岡山、12時11分着。伯備線に乗換、やくも9号、12時20分発。僅か9分間の乗換時間。乗り込むと、小野君と明田君、出張先からの南浦君が、中で待っていた。列車は田園地帯から、やがて山間部に入り、窓外の景色は変化していくが、全員、外には無関心で、男の癖に良く喋るもんだと呆れるぐらい、楽しい時間を過ごす。約1時間半、13時49分には、生山（しょうやま）に着いた。中国山脈の懐の中、静かな田舎町。日立金属から社長の枝君とマイクロバスのお迎え、出張先から森君も、ここで合流。全員17名が揃った。

山中の、しかし舗装の行き届いた路を1時間までかからず、快適なドライブ、奥出雲・横田町の宿舎（ヴィラ船通山斐乃上荘）につく、チェックインを終え、ヘルメットと安全靴、作業着を貰い、再度マイクロへ。山中の日は沈むのは早い。薄暮の中、約20分、17人は、日立金属の子会社の木炭銃工場に入った。ここにタタラの現場があった。東京から奥出雲・横田まで、一つの流れを作り、各地に住んでいる同期生17名が最寄りの駅から、この流れに合流して、今、やっと、タタラの現場に着いた。タタラの火、凄炎、覆い被さってくるようだ。火炎の舞。生命ある者のように炎は躍動する。感嘆の声。火の神に対する畏敬と親愛。



突然、タタラの炎に、記憶の奥から火の塊が飛び出してきて、重なり、二重映しになる。半世紀も前の少年時代。京都・一条寺狸谷の不動様。小生（熱田）は祖母に連れられて、毎月命日の16日に、吉田中阿達町の家から歩いて川端通りに出て、鴨川に沿って北上、約20分、出町柳まで歩く。出町柳駅から叡電に乗って、一条寺駅で降り、田舎道を歩き、宮本武蔵ゆかりの一条寺下がりの松の脇を通り、山道にさしかかる。急な山道を懸命に登り、やっと不動様の洞窟に着く。薄暗い洞窟の中の不動様、めらめらと燃え上がる高く積み上げた護摩木。この炎の色と動き、子供心に強く焼きついていて、朝からの旅の興奮と目のタタラの火、これが引き金になって、50年以上も前の情景が昨日の事のように眼前に浮かび上がってきたのだった。

タタラの炉の大きさは、長さ約3.1m、巾約約1.3m、高さ約約1.2m、意外にこぶりな感じだった。炉の長辺の両側下部に蛸足のように送風筒が出ており、短辺側の両側に2箇所づつノロ孔があいている。砂鉄と木炭を40分間隔で開放されている炉の上部より人手で装入する。3日間3晩操業を続け、4日目の未明に火を止め、炉を壊し、炉底部に凝固しているインゴットを取り出す。

現在は、毎年、4回、この時期に、引き続いて、このような生産活動を行っているとのこと。

操業の総監督兼主任技術者を村下（むらげ）と呼ぶ、村下が炉の状況に応じて、砂鉄の入れ方を加減し、木炭の装入の指示をする。計器といっても送風本管にマノメータを付けている位で、村下が自分の目で見て炉況を判断するようだ。現在の高炉でも、装入物の下がりを制御し、装入態様や堆積状況を制御するが、村下のお話を聞くと、目と計測器の違いはあるが、操業の基本は全く同じようだと思う。昔は、連続して2回、操業ミスをして、ペケを作ると、村下は降格されたと伝えられているが、実際に操業を見て村下の責任を実感した。

宿舎へ帰り、夕食。17名、旧交を温めながら会食をする。

一同17名、翌朝（1月20日・土）早朝に起きる。タタラの時期は、厳寒の季節で、「凍てつく寒さを覚悟してください」と言われて、来たが、日頃の精進のお蔭か、寒気も緩んで、我々を歓迎してくれたようだ。炉の吹き止めを見学するため、マイクロに乗り工場入り、17名が到着するのを待って、作業が始まる。

送風ストップ。工人が駆け寄り、送風筒などを撤去して、炉を壊し始める。大勢掛かって、外から、棒で突き崩していく。原始的な作業。難行苦行。余熱に炙られな

がらの格闘。簡単にはいかない。突く向きを変える。なんと言うか、本当に力仕事、人間の労働の原点。汗と油の結晶を生む作業。やがて、火の神は人の努力を認めてくれたのか、炉は崩れ、炉底に凝固しているインゴットが顔を見せてきた。見ていて、自分の腕の筋肉が強張るような気がした。

7時半ごろ、作業は一段落、インゴットの冷却待ち。ここで見学終了、現場を後にする。宿に戻り、入浴、朝食。

後は、チャーターバスで、山陰めぐりをし、夜は、松江温泉に乗り込んで、大宴会の予定。

いざ、出発。ところが、皆、「もう一度、工場へ入って、ケラを見たい」と言い出した。ケラとはインゴットのこと。鋳と書く。回り道をして工場へ着くと、ケラはもう屋外へ引き出されていた。偏平なでこぼこした不細工な鉄の塊だった。これを別棟の破碎室へ入れ、重錘を落させて割るそうだ。さらに小割して、目で見て選別するそうだ。最高級品は刀剣用、ランクにより用途が違うとのこと。鋤鉄、鍋釜、いろいろの用途に使い分ける。

駆け足の見学で、詳細な報告はできないが、古代の製鉄技術に完全に圧倒されたことが何よりの収穫だ。

原料の砂鉄の話。昔は、《かんな流し》と呼ばれる方法でやっていた。この地方特有の風化した軟質花崗岩の山肌を鉄で崩して、水流の強い水路に落とす。花崗岩は落下途中に相互に衝突したり、流路の岸や底の岩にぶつかり、粉化し、砂鉄と粉化した脈石は、比重差で、分かれる。下流にいくつかの溜め池を掘っておくと、比重の重い鉄分が沈殿していく。重力選鉱の1種である。その沈殿物を最後は樋に導いて洗って砂鉄を採集する。山奥へ入るとこのかんな流しの溝跡が今も残っているそうだ。花崗岩の中に分散している砂鉄の量は微量で、数字で0.5~2%、両手1杯のものからキセルの雁首に1杯の砂鉄が採ればよいと言い伝えられている。

この方法は河川公害を起こすので、昭和47年に廃止されて、現在は工場の中で磁力選鉱で選鉱したものを使っている。

話は前後するが、この地方には、原料になる良質の砂鉄が賦存していたので、タタラ製鉄が発展したのだが、この良質の砂鉄は、《真砂（まさ）砂鉄》と呼ばれて、不純物が非常に少なく、ほぼ純粋なマグネタイト（磁鉄鉱）で、還元温度も高く、精錬技術的な苦労があったが、その技術の成果として、日本刀の原料鉄の産地としての、この地方の長期間の繁栄があったのである。全国的に分

布している砂鉄は《赤目砂鉄》で、閃緑岩などが崩壊してできた塩基性土壌から採取されるが、砂鉄含有量は5～10%と多いが、チタンやリン、硫黄が含まれており、還元温度は低く精錬は容易であるが、鋳物用にしか向かなかった。有名な南部鉄がその代表であるが、江戸時代の鉄鋼生産は、8割が中国地方、その大部分が山陰、それに対して、南部鉄の奥羽地方は1.5割だった。

南部から出雲に、産業スパイが潜入したり、技術者がスカウトされたりして、南部も頑張ったが、結局、原料良さに守られて、洋鉄の進出まで、出雲の優位は不動のものだったようだ。

話を元に戻す。冷えたケラを見たあと、バスでドライブと観光、奥出雲おろちループ、足立博物館、金屋子神社(鍛冶屋の守り神)、和鋼美術館を経由して、松江温泉・グランドホテル水天閣へ入る。前日に引き続き、懇親会。学生時代に返り、飲み、唄い、本当に楽しい時間を過ごした。詳細は紙数の制限で割愛するが、すばらしい宴会だった。翌朝(21日)、朝食後、ホテルにて解散。2泊3日の旅程を終えて、各人帰路につく。

当初は、厳寒の時期、寒さと雪をたいへん心配していたのですが、3日間、天候に恵まれ、気温も下がらず、本当に良かった。良い同期会ができて心から喜んでおります。

最後に、同行した、36年卒の関西大・小松教授から、我々(昭和34年卒先輩各位宛)宛の手紙を引用させていただきます。

拝啓。先日 Tata 見学では真にお世話になりました。諸先輩のいきとどいた御配慮、和気暖々として30数年前を髣髴とさせる対話の数々、わずか2年の差でも、5年に1度しか寄り合いを持てなかった世代としては羨ましい限りでした。

なかでもチーピン先生のお名前は、私共の世代でも各自の意識を一気に学生時代にひきもどす魔法の名前でありまして、分析化学のドイツ語でしごかれた世代は感謝祭でもやらねばならないかと思わせました。

学生に教える立場になって、チーピンこと舟阪先生は夢にも忘れられず、むしろ厳しい御指導の意義を評価しております。

最終日、解散の後、阪大時代の年長の同僚の教官で、現在松江高等専門学校教授の豊田勝行さんと、鬼の舌震い見に行きました。(中略)ここはTataの現場と10kmほどでしたので、豊田さんともう一度Tataを見に行きました。私は3日間連続になりますが、日曜の昼時で人

気もなく、ケラはトタンの波板で覆われて、下床を乾燥する火の煙だけが高殿の屋根の煙出しから立ち昇っていました。(中略)

今年は私共も卒業後満35年を迎えます。九州にも北海道にも同期はおらず、西は山口、東は日立、鹿島程度で、水曜会大会の前後に集まることになろうかと思いますが、先輩方ほど出席率が確保できるかどうか、少々心配です。また機会がありましたら御同席の榮にあずかりたいと存じます。その節は何卒よろしくお願い申し上げます。敬具。

注記。そこで、小松伸也君は、昭和34年卒冶金の同期会の総意で、客員として待遇させていただくことになり、名簿にも載せ、今後は昭和34年卒の催しには必ずご案内することになりました。

後日談。平成8年(1996年)3月15日(金)、東京水曜会。新橋にある住友金属鉱山の本社、1Fの大ホール。そこで、Tata製鉄の見学報告をさせてもらった。Tataの火のスライド。真っ暗な会場の大きいスクリーンに映るTataの火は、奥出雲の現場に立った錯覚を起こさせるものだった。Tataの炎のスライドを10枚、これでもか、これでもか、と、火責めのスライド作戦を展開した。時間も7～8分に抑えて、口の説明を控えて、Tataの炎の凄さを目に訴えてた。スライドが訴えるTataの火は、満場の水曜会員の固唾をのませた。

大へん好評だった。後日、世話役の住友金属鉱山顧問の植田正明さんから次の礼状をいただきました。

拝啓。梅も満開が過ぎ、代わって沈丁花が良い香りになってただよわせる様になって参りました。

さて、東京水曜会には、お忙しい中をお越しいただき、貴重なお話を賜り厚く御礼を申し上げます。

大変迫力のあるスライドで、古代の製鉄のすさまじさを実感しました。

おかげで、出席された会員各位もあとの懇親会で聞きしました処大変喜んでおられました。同窓の皆様で、このような良い旅行をされた親密さをうらやましくおもいます。下手な俳句ですが、

実千両 熔炉の火花 飛びしごと

先ずは、とりあえず御礼まで。敬具。

以上。文責・熱田善男。

タタラ製鉄に関する資料を列記しておきます。

---

[たたら製鉄と金属学]

清水欣吾氏—まてりあ・第33巻・12号(1994)

[対談：岸田民也(和鋼博物館長)—山根一眞]

週間ポスト・95.10.27号/95.11.3号

連載・「メタルカラー」の時代

[新技術史の旅14・奥出雲たたら昨今1]

復元された鉄穴流し 一飯塚一雄氏

[新技術史の旅15・奥出雲たたら昨今2]

たたらは滅びなかった—飯塚一雄氏

・[日立](日立グループの社内報)号数不明

---

余談. 奥出雲の横田は、古事記の八岐大蛇(やまたのオロチ)退治の神話の地であった。

高天原から追放されたスサノオ(素盞鳴命)は、出雲の国、肥の川の鳥上の地に降った。川上より箸が流れて来たので訪ねていくと、老いた夫婦が娘を中にして泣いている。「眼は丸く真っ赤で恐ろしく、頭と尾が8つ、

体長は8つの谷を越えて渡ほど大きいやまたのオロチが、毎年やってきて、娘を略奪して行き、8人目のこの娘の番にあたっています」。そこで、ご存知の泥酔作戦で、見事退治して、めでたく、その娘を妃にしたという神話。

オロチの尾を割いたとき出てきたのが剣であった、と言うのは、この地が、製鉄や利器の製造の地であったことを想像させる。オロチの血で肥の川が赤く濁ったと記述されているが、かんな流しによる砂鉄採取のときの河川汚濁を象徴しているのではないかと、こんな事を言う人も地元には多いようである。スサノオの妃(稲田姫)を祀った稲田神社もここに存在する。

最後にお節介を。水曜会の先輩、後輩の方へ。是非、タタラ見学をされることをお勧めします。日立金属本社へご相談されるなり、現地(YSS 鳥上木炭銃工場)へ申し込むなりしてください。17名が見学した時も、女性も交えて、幾つかのグループが、見学に来ていました。又、TVの取材班も入っていたので、聞いてみたら、地元の局のクルーでした。タタラはこの地方では有名なイベントの1つようです。以上。

## 談 話 室

## MIT 材料学科

岡 部 徹\*

## Study and Research in Materials Science and Engineering at MIT

by Toru H. OKABE

## 1. は じ め に

1993年5月から2年半に渡り、筆者はポスドク(博士研究員)として米国東海岸のボストンにあるマサチューセッツ工科大学(MIT)に留学する機会を得た。最初の二年間は日本学術振興会の海外特別研究員(Postdoctoral Fellow)として、最後の半年はMIT 雇い上げのポスドク(Postdoctoral Associate)としてサドウェー教授の指導の下、高温電気化学に関する基礎研究に従事した。研究生活を通して多くのことを学ぶことが出来た。学生との親交や授業への参加を通じ、大学院における研究教育文化やメンタリティの違いにも触れることができ貴重な経験が出来た。

北米の大学や研究機関への留学記は多くの学会誌にしばしば掲載され、MITの材料学科の概略についても著者が最近、記事にして紹介している<sup>1)</sup>。また、最近はインターネット通じてワールド・ワイド・ウェブ(WWW)のホームページをみる事が出来るため、世界中の大学・研究機関の表面的な情報は手軽に入手できるようになった<sup>2)</sup>。MITの材料学科の教授やスタッフのプロファイルに興味のある方は、MIT材料学科のホームページを参照にされたい<sup>3,4)</sup>。

拙筆ながら、ここではMIT材料学科と題して、日本ではあまり目にする事の出来ない統計情報をいくつか紹介し、私が感じた研究と教育環境の日米の差異について簡単に紹介したい。

## 2. MITの材料学科

素材産業の衰退や航空・宇宙・軍事関係の研究予算の

大幅な削減に伴い、米国における材料の研究はかつての勢いはなくなっており、近年はバイオや情報の分野に研究フロンティアのお株の多くを奪われている感がある。このような背景から米国における材料研究の地盤沈下がささやかれて久しいが、早期に大学院大学への脱皮を計ったMITの材料学科は、北米における材料研究教育機関の中核の一つとして現在も確固たる地位を保っている。今後もこの状況は変化しないと思われるが、その主な理由は、MITにおける人的資源の流動性が非常に高いことに加え、優秀な教官と学生を国内外から引きつける効果的なシステムを確立しているためと著者は考えている。

MIT材料学科の教官の経歴を見ればわかるように<sup>3)</sup>、研究者を世界的視野で随時募集・採用しているため、多彩でかつアクティビティに富んでいる。教官採用の公正さと情報の公開に裏打ちされた人事システムは、テニュア(在職権)を取得するまでの教官には厳しくまた夢あるものであるが、多くの若くて優秀な教官が大学を去らなくてはならない現状を目の当たりにすると、現在の日本の大学には馴染まないシステムであることを実感する。若いうちから研究だけでなく教育についても評価の対象になるところも日本の大学の教官と大きく異なる環境であろう。

教官として、研究者として、生き残っていくことが極めて困難な環境でも、世界中の研究者を引きつける要因は、スタッフの活力によって潤沢な研究資金を獲得し(表1参照)、それに基づいて優秀な大学院生を比較的容易に集められる研究環境が整っているからであろう。このことについては以下に統計資料を用いて具体的に紹介する。

\*東北大学素材工学研究所助手  
(昭63・冶金卒)



表1 U.S. News and World Report による 1995 年の米国の工学系の大学院のランキング表の一部<sup>(3)</sup>

# GRADUATE SCHOOLS OF ENGINEERING

## WITH THE HIGHEST SCORES IN THE U.S. NEWS SURVEY

| Rank/School                                    | Overall score | Reputation rank by academics | Rep. rank by practicing engineers | Student selectivity rank | Research activity rank | Faculty resources rank | '94 total enrollment | '94 engineering research | '94 doctoral student/faculty ratio | '94 acceptance rate |
|------------------------------------------------|---------------|------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|----------------------|--------------------------|------------------------------------|---------------------|
| 1. Massachusetts Institute of Technology       | 100.0         | 1                            | 1                                 | 12                       | 1                      | 5                      | 2,364                | \$143,325,000            | 2.51                               | 25.4%               |
| 2. University of California at Berkeley        | 99.0          | 1                            | 4                                 | 8                        | 12                     | 1                      | 1,549                | \$61,415,643             | 5.08                               | 27.4%               |
| 3. University of Illinois at Urbana-Champaign  | 98.8          | 1                            | 7                                 | 6                        | 10                     | 3                      | 2,243                | \$85,502,400             | 3.20                               | 27.3%               |
| 4. Stanford University                         | 98.6          | 1                            | 9                                 | 20                       | 6                      | 2                      | 2,700                | \$65,983,747             | 4.95                               | 42.1%               |
| 5. California Institute of Technology          | 97.9          | 1                            | 2                                 | 3                        | 22                     | 4                      | 463                  | \$29,386,000             | 3.89                               | 10.2%               |
| 6. Cornell University (N.Y.)                   | 97.2          | 7                            | 14                                | 23                       | 3                      | 6                      | 1,064                | \$69,320,042             | 3.24                               | 24.1%               |
| 7. Carnegie Mellon University (Pa.)            | 97.1          | 10                           | 12                                | 5                        | 7                      | 9                      | 809                  | \$75,200,000             | 3.83                               | 12.6%               |
| 8. University of Michigan at Ann Arbor         | 97.0          | 6                            | 6                                 | 25                       | 4                      | 13                     | 1,782                | \$80,479,744             | 2.90                               | 46.8%               |
| 8. University of Texas at Austin               | 97.0          | 10                           | 10                                | 11                       | 9                      | 7                      | 2,017                | \$70,066,450             | 3.38                               | 39.3%               |
| 10. Purdue University at West Lafayette (Ind.) | 96.5          | 7                            | 4                                 | 17                       | 11                     | 14                     | 2,133                | \$64,459,707             | 2.66                               | 29.2%               |

### 3. MIT の材料学科・大学院

米国では毎年、各学科別の大学院の詳細なランキング表が幾つかの大手統計ニュース会社により公表されている<sup>5)</sup>。参考までに、U.S. News & World Report による 1995 年の大学院の Engineering School (工学系学科) の集計結果の総合表の一部を表 1 に、学科別のランキング表を表 2 に示す。専門性が高く比較が非常に困難な大学院の質を統計的に解析し公表すること自体に問題もあろうが、研究者の評価システムを長年にわたり検討している北米においては当然の試みと言える。

なぜこのようなランキング表が存在するかというと、北米では就職時の給料や処遇が専攻や学位取得大学によって大きく異なるからである。したがって優秀な学生は大学院に進学する時も、よりランクの高い大学に移動していく。受け入れに対しても外部にオープンであるため、MIT やパークレーをはじめとする上位にランクされている大学院は優秀な学生を全米のみならず世界中から集め研究の原動力とすることができる。その結果、大学院の構成員は極めて多国籍であり、北米の大学とは思えないような雰囲気を感じることもある。

社会の価値基準が、給料に大きく傾斜しているアメリカ社会のあり方に著者はいささかの嫌悪感を感じるが、学生の獲得に関しては MIT の材料学科はこうしたシステムをうまく利用している。多量の Advanced Degree (主として博士号) を授与することによって教育研究機関の地位を築いているといえよう。

MIT 材料学科の大学院の 1995 年の志望状況と入学状況を表 3 に示す。9 月入学以外の学生が五人程度毎年いるので、大学院の 1 学年の人数は約 40 人である。採用担当のスタッフによると、この数は過去五年間殆ど変化がなく、今後も変化が予想されないとのことである。外国人の志願者数の内、国籍別にみると中国とインド人が圧倒的に多く、優秀な者は全て合格させているが、財源(高額の授業料や生活費)が確保できないため渡航ビザが取得できない外国人合格者が多い。結果として、毎年 10 人程度の外国人しか入学できないのが現状である。ちなみに、日本からの留学生はその殆どが企業派遣であり、留学に係わる費用は企業が保証してくれるため、合格すなわち入学となる。企業が全面的に支援する留学制度は、韓国の企業にもみられるが、他の国からの学生はほとんどは国費または私費留学生である。私が材料学科に滞在した約 3 年間も私以外の日本人は全て企業派遣の留学生もしくは研究員であった。

MIT の材料学科の大学院生は優秀で勤勉であるが、根性主義で猛烈に働くタイプの学生は一部の学生を除いて一般に少なく、研究以外のライフワークも楽しんでマ

分の給料に回すことが出来る場合もあるので、企業受ける教授はかなり稼ぐという。

給料のばらつきに関する公式な資料は入手できなかったが、米国では各大学の研究予算の獲得総額のみならず、教官の役職別平均給与まで公表されている。参考までに、表6に1995年のMITの教官の平均給与を示した。一見すると日本の給与水準とさほど差がないが、米国における物価が日本のそれに対して半分以下であることを考えると、実にうらやましい限りである。しかし、MITの材料系の学科長によれば、同程度の人材が企業に就職すればその倍近くもらえるため、今後、優秀な人材をいかにアカデミアに引きつけるかが、深刻な課題であるとのことであった。

## 6. お わ り に

MITの材料学科は常に研究者・教育者の評価・育成・確保に多大な努力をはらっている。採用に当たっては外部から広く意見を求め、研究業績も多角的に分析・評価している。教官の採用候補者を公表し、大学院生に対してセミナーを開く試みも行っている。ごく最近の話題としては、日系の女性研究者が行ったセミナーについて、大学院生が電子メールを使った伝言システムで活発に議論をしている。論文数のみを重要視せずに、研究内容や学会における評価をもとに研究業績を判断する試みも、

現在の日本の傾向と大きく異なる点ではないであろうか？

日本の大学の教官や研究機関の研究員の採用・評価システムも良いところが沢山あると思うが、米国のシステムからも学ぶべきところも少なくないと筆者は感じている。

## 参 考 文 献

- 1) 岡部 徹：「ポストドクからみたマサチューセッツ工科大学の材料学科」，まてりあ，第34巻第1号（1995）p.77.
- 2) The MIT Home Page, <http://web.mit.edu/>
- 3) MIT Department of Materials Science and Engineering, <http://tantalum.mit.edu/>
- 4) Okabe's Home page, <http://web.mit.edu/toru/www/home.html>
- 5) U.S. News and World Report: "America's Best Graduate Schools", March 20 (1995) pp. 102-103.
- 6) MIT Profile, "Class of 1998 Profile", Office of Admissions MIT (1995).
- 7) The MIT Report, "MIT Professors' Salaries Rank 8th highest in U.S.", edited by MIT Industrial Liaison Program, Vol. 8, May (1995) p.9.

## 談 話 室

日中国際協力事業団技術協力プロジェクト  
—中国鉱物資源探査研究センターの紹介

常

旭\*

Japan International Cooperation Agency Technical Cooperation Project  
—the Introduction of the Research Center of Mineral Resources  
Exploration in the People's Republic of China

by Xu CHANG

1994年8月、中、日両国政府の認可により、日本国際協力事業団（以下「JICA」という）の事前調査及び長期調査に基づき、中国科学院とJICA実施協議調査団とは中国鉱物資源探査研究センタープロジェクトの有効な実施のため、とるべき必要な措置に関して意見を交換し、一連の討議を行い、協議議事録を作成した。

上記プロジェクトを実施するための実体としての中国科学院の中国鉱物資源探査研究センターが1994年8月11日に北京で成立した。中国国家科学技術委員会の惠永正副主任、中国科学院の周光召院長、許智宏副院長、中国国家自然科学基金委員会の胡兆森副主任らも上記研究センターの開会式に出席した。

その後1年余り、鉱物資源探査研究センターは中国科学院と日本国際協力事業団の支持のもと、中国側首席専門家と専門家指導委員会、日本側チーフアドバイザーと長期専門家グループ、JICAの調整員との指導を受け、日本側専門家と中国側カウンターパートとの努力により、協議に基づいた活動を順調に進展してきた。以下に、中国鉱物資源探査研究センターの基本状況について簡単に紹介する。

鉱物資源探査センターの主任：黄鼎成（地質学教授）、副主任：孫世華（岩石、地球化学教授）。中国側プロジェクト専門家指導委員会的首席専門家：涂光熾院士、委員：葉連俊院士、孫枢院士、刘光鼎院士、欧陽自遠院士、譚順道教授。日本側専門家チーフアドバイザー：黒田吉益教授（信州大学）、長期専門家：小倉義雄教授（三重大学）、志賀美英教授（鹿児島大学）、日本側調整員：藤森一

雄（JICAから派遣）。中国側職員とカウンターパート：14名。

JICAの技術移転は中国への専門家派遣、研究機材の供与と中国からの研究員の受け入れにより実現される。

中国鉱物資源探査研究センターの研究目的は鉱物資源（特に銅、金、銀、希金属、希土類）の地球化学的方法を主体とした探査研究である。中国国内で鉱物資源（特に銅、金、銀、希金属、希土類）が発見されることをプロジェクトの上位目標としている。この目標を目指して努力するために、地質学、岩石学、鉱物学、鉱床学、地球化学、鉱物資源学、それぞれの研究分野の基礎研究と技術を把握する必要がある。鉱床を形成する液体、同位体の特徴、鉱床形成の年代、鉱物の種類等についての研究方法の能力をつける必要がある。

JICAの技術移転を実施中、鉱物資源探査研究センターで地球化学的方法を主体とした必要な機材を整備する他には、中国国内で、中日双方専門家の野外調査、共同研究と中国側のカウンターパートの日本へ研修も行っている。上に述べた各研究分野で鉱物資源探査研究に必要な理論、方法と技術を習得し、この若い研究組織に鉱床を形成する過程の研究、地球化学的手法での埋蔵量の推定、探査適切区域を指摘する能力がつけられる。

中日双方の専門家達はプロジェクトの実施中、共同研究地域としては中国華北北部及びその周辺をあげている。この区域は中部アジア—東アジアの鉱床を形成する区域の一部分である。（中部アジア—東アジアの鉱床を形成する区域は西のカザフスタンとウラルから中国の新疆、内蒙古、大興安嶺山脈を経てロシア領内へ延びる。）

この区域は広域地質が複雑、鉱物資源の埋蔵量も多い。

有名な白雲鄂博超大型ニオブ、希土、鉄鉱がこの区域

\*中国科学院地球物理研究所

（平成元年・資源工学専攻博士課程修了）

で発見された。一方、この区域は中国国内では東部と南部に対する研究程度と比べると、研究不足の現状である。したがって、鉱物資源探査研究センターはこの区域を選び、基礎研究理論、研究方法と技術を発展の上、鉱物資源探査事業に効果的な貢献を上げたい。

1年余り、中国科学院は協議議事録に基づいてプロジェクト実施中の必要な予算を投入し、実施体制を整備しつつある。日本側は企画通り専門家を派遣し、機材を提供し、中国からの研究員を受け入れ等のことを実施した。現在、鉱物資源探査研究センターでは、実験室と機材の整備を行っている。JICAからの供与機材が組み立てられ、その一部は運転され始めた。1995年の6月から9月まで、中日双方の専門家は中国華北北部で野外調査と共同研究を行った。この区域の複雑な地質に対して、より深く認識が得られた。特に、中国河北東部の原生代露頭地域と中生代火成岩の中でAu, Ag, Cu, Coの鉱化現象が始めて発見された。また、ある鉱床に対して、

Pb, Zn 鉱床を形成する成因問題について、新しい考え方が提出された。現在在日中の中国研修員達も有益な研究成果を得つつある。以上の研究活動は今後より深い研究を行うために、良い基礎がつくられた。

鉱物資源探査センターでは、研究課題に基いて、小型学術研究会も開いた。中、日双方の専門家は今年北京で開く第30回万国地質学会議へ8篇の論文を提出した。他の学会誌にも学術論文を多数発表した。

中、日両国の専門家は手をつなぎ、中国鉱物資源探査研究センターを成功させたい。中国鉱物資源探査研究センターの研究方向と近代国体地球科学発展の先端とは一致している。鉱物資源探査センタープロジェクトは中国経済発展に必要な鉱物資源需要量の上昇に対しても重要である。中国鉱物資源探査センターはこれから中、日両国専門家の共同研究に対して良い場所になると信じている。

## 研究速報

### 応用地質学講座

応用地質学講座では、確率ブロック理論による大規模地下空洞の情報化施工、グラウチングによる原位置岩盤の力学的改良効果、グラウチングによる節理のせん断強度の改良効果、節理性岩盤におけるグラウト充填メカニズムに関する研究を行っている。

#### 確率ブロック理論による情報化施工

大規模地下空洞壁面や大規模岩盤斜面の安定性を確保するためには、掘削により移動可能となるブロックをできる限り早く探索し、何らかの崩壊防止工を施す必要がある。しかしながら、従来のブロック理論では、壁面にブロック全体が露出して移動可能になった時点でのみ移動可能性の探索が可能であり、換言すれば、ブロックが移動可能となる前に移動可能性を評価することは不可能である。このような実状を踏まえ、本研究では、これまでに移動可能ブロックとして存在する可能性を有するブロックが一部露出した時点で、そのブロックの抜け出し確率を求める手法（確率ブロック理論）を構築した。本手法は、抜け出しブロックの探索手法に、確率統計学的なアプローチを加えた新たな手法であり、従来より定性的な検討にのみ用いられていた壁面の不連続面情報を十分に活かす情報化施工の実現を意図するものである。今回は、種々の掘削様式に対応できるように理論を一般化するとともに、理論の妥当性を検証するために確率モデルを用いた検討ならびに実際の現場のデータを用いた検討を行った。その結果、予測と実測が良く対応し、手法の妥当性が確認された。

#### グラウチングによる原位置岩盤の力学的改良効果

土木・岩盤構造物基礎岩盤において実施されるグラウチング工は、岩盤の割れ目内に注入材料を填充させることによってその力学的性状ならびに透水性性状を改良することを目的として実施されるが、その力学的な改良効果（変形性・強度）については現在のところ数値的に把握されていないのが現状である。本研究では、いくつかのダム建設現場（①新鮮花崗岩、②風化花崗岩、③輝緑凝灰岩、④カンラン岩、⑤砂岩頁岩互層、⑥軟質砂岩頁岩互層、⑦凝灰角礫岩）において、グラウチングの前後に孔内打撃応答試験および孔内載荷試験を実施し、その力学的な改良効果（変形性・強度）に関する検討を行った。その結果、①グラウチング前後で変形係数、静弾性係数および降伏点応力等の物性が上昇している、②グラウチング前後で物性の分布のバラツキが減少している、③不連続面が改良されている、という知見が得られた。これらのことは、ダムの基礎処理の所期の目的である岩盤の「固密化」・「均質化」・「一体化」がグラウチングによってなされていることを示したものであると思われる。

#### グラウチングによる節理のせん断強度の改良効果

本研究においては、これまでにグラウチングによる岩盤のせん断強度の改良効果を把握するための基礎的な検討として、種々の粗さをもった単一節理を有する供試体にグラウトを注入し、節理のせん断強度の改良効果を把握することを目的とした一面せん断試験を行い、グラウチングにより節理面の粘着力が増加することを確認できた。この試験においては、初期的に粘着力が存在しない場合を想定して実施したが、今回は、これまでの供試体と同様の供試体において、初期的な粘着力を節理面に与えて改良効果の検討を行った。その結果、初期的に粘着力が存在している場合の方がグラウチングによる粘着力の改良度合いが高いことが判明した。また、初期的な粘着力の値が高いほど改良度合いが高くなることが判明した。

#### 節理性岩盤におけるグラウト充填メカニズム

効率的なグラウチングを実施することは、ダム基礎岩盤の安定性の確保ならびに施工の経済性の観点で非常に重要である。しかしながら、グラウトの配合、注入圧力、ステージ長などの施工パラメータの決定の際には多くを経験に頼っているのが現状である。これらのパラメータを決定するにあたっては、グラウトの充填メカニズムに根底をおく解析的アプローチによる評価・検討が必要であると考えられる。本研究においては、これまでに室内実験結果を基にグラウトミルクの流れ挙動から閉塞・充填過程に至るまでのグラウチングに関わる様々な考察を行い、その充填・閉塞過程を説明するモデルとして、①吸着モード、②沈降モード、③凝結モードの3種類を考察した。室内試験により、これらの有意性を再確認するとともに、岩盤供試体を用いた現場実験およびそのシミュレーションを実施した。

教 授 菊地 宏吉

助 手 楠田 啓、水戸 義忠

## 探査工学講座

本講座では、物理探査の高精度化とその資源探査及び地盤・岩盤評価への利用に重点を置いて研究を推進している。

### 地下レーダによる埋設管探査に関する研究

急増する地中埋設管の新設・補修工事を低コストで合理的に行うためには、既設埋設管の位置を掘削せずに確認する方法が要求されている。そのための方法のなかで、地下レーダ法は最も分解能が高いとされている。本研究では、この地下レーダ法により得られたデータを、反射法地震探査のデータ処理で解析を行った。その結果、バンドパスフィルターやマイグレーション処理技術に関しては、データの S/N 比が向上し地下レーダ探査に十分適用することが確認された。今後は、他の反射法地震探査のデータ処理法の適応や、3 次元的な解析も必要となるであろう。

### 弾性波を用いたトンネル切羽前方探査に関する研究

トンネル掘削時における切羽崩壊等の事故を未然に防ぐために、掘削前にトンネル切羽前方の地質状況を調べる研究を行った。その方法として、VSP を水平方向に応用した HSP を適用した。また、その深度変換法としては、反射点が震源と受振点を焦点とする楕円の軌跡上にあることから、複数の震源と受振点に組による楕円群の共通接線を描くことにより反射面を求めるアルゴリズムを開発した。測定は、トンネル口元から切羽方向に受振器 48 個を等間隔に設置し、はじめに受振器を端から 24 個だけ接続して、発破ごとに 1 個間隔でずらしていき合計 25 回の発破を行った。その結果、掘削後に判明した切羽前方の弱層部の位置と比較して、全ての発破点での深度変換後の結果をたしあわせると、実際の弱層部の位置と反射面の位置がほぼ一致した。

### 格子点法を用いた弾性波トモグラフィ

従来のセルを用いて地下構造（速度分布）を離散化する方法では急傾斜の構造や複雑な構造は十分に表現されない。そこで、地下の速度分布を格子点を用いて離散化し、各点の速度はスプライン補間を用いて計算することによって、構造に対する柔軟性を高め、トモグラフィ解析の精度を向上させる研究を行った。変分法を用いたレイトレーシング法により、従来の点波源法より高精度かつ高速に波線追跡が可能となった。また、ラグランジュ乗数を用いた最小二乗法により安定かつ拘束条件を組み込み可能な逆解析を行った。その結果、従来のセルによる分割を用いた方法と比較して解析精度が向上し、セルによる分割では精度のよい解析が困難な構造においても精度のよい結果が得られた。

### 気体の圧入による弾性波の亀裂検出能力の向上

亀裂内に気体を圧入して亀裂内部の物理的性質を変化

させ、弾性波伝播特性の変化を観測することにより、亀裂の検出精度を向上させる手法のモデル実験を行った。2 個の樹脂ブロック間に設けた隙間を岩盤内の亀裂のモデルとして、亀裂を平行平板状の水の層としたモデルと、亀裂面の凹凸及び接触を考慮したモデルを作成した。水で充填している亀裂に気体（気泡）を注入し、弾性波伝播特性の変化を測定した。その結果、流体層内に気体が存在すると透過 P 波の振幅が減少し反射 P 波の振幅が増加すること、気体の存在範囲の拡大に伴って観測波形に影響を受ける受振点の位置も拡大していくことが明らかになった。また、数値シミュレーションによっても同様の現象が確認された。従って、亀裂内に気体を圧入することによって弾性波による亀裂の探査・モニタリングを行うことが可能である。

### 時間領域電磁探査法に関する基礎的研究

2 次元有限要素モデリングプログラムを開発し、時間領域電磁法の測定値に対する地下の 2 次元構造に起因する影響を詳しく考察した。また、非線形最小二乗法に基づく 1 次元解析結果の評価も行い、FEM2D 解析による多くの構造モデルに対する地表面での電界応答と各時間におけるスナップショット断面画像化を行い、不均質環境効果を明かにした。

### 電気探査比抵抗トモグラフィに関する基礎的研究

有限要素法 2D-3D アルゴリズムによる直流電位法データの比抵抗トモグラフィ解析の検討で、地表電極配列法専用の要素分割と立体電極配列法専用の要素分割によって、モデル構造の解析を行った。ポール・ポール 2 極法データによる比抵抗トモグラフィ結果の特徴を詳細に調べた結果、その長短と今後予測設計に重点におくべきことが明かになった。

### 比抵抗トモグラフィにおける地表一ボーリング孔間電極配列データの解析

有限要素法 2D-3D アルゴリズムによる直流電位法データの立体電極配列法専用の要素分割による多くのモデル構造の解析を行った。ポール・ポール 2 極法データ解析結果の特徴を詳細に調べ、さらに鮮明画像化のための予測設計情報を獲得した。新しく地下不均質環境モニタリングとその有効利用では、上記 3 課題と合わせて研究推進の方針を確立した。

教授 佐々 宏一  
助教授 芦田 譲  
講師 菅野 強  
助手 渡辺 俊樹

## 開発工学講座

開発工学研究室では、主として岩盤構造物の安定性評価に係る岩盤ならびに岩盤不連続面の力学特性の定量化と数値解析に関する研究を実施するとともに、蛍光法を適用したボアホールテレビジョンシステムによる割れ目の抽出に関する研究等を実施している。

### 岩石の三軸圧縮試験における破壊後領域での横方向変形に関する研究

岩盤中に開削された空間の安定性を評価する場合、空間周辺に生じる緩み域といわれる領域の変形挙動が重要な要因となってくる。この緩み域における岩盤の変形挙動は、岩石の三軸圧縮試験における破壊後領域での変形挙動に対応し、特に横方向の変形挙動は岩盤の空間への押し出し挙動と対応するため重要である。本研究では、この破壊後領域での横方向変形にスポットをあてて研究を実施している。岩石の三軸圧縮試験では、高圧環境下で高圧セル内という限られたスペースにおいて計測を実施しなければならない、その方法もおのずと限定される。特に、破壊後の大きな変形挙動を捉えるためには、従来の歪みゲージを用いる方法は適用できない。また、普通よく用いられているチェーン式の周歪み計では、平均的な周歪みしか計測できず、異方性を含めた複雑な変形挙動を捉えるには不十分である。このことから、新たに6本のカンチレバー式変位計を試料の周囲に60度毎に取り付け、試料の中央部における横方向変位を直接計測することを試みた。その結果、独立な6つの横方向変位に対し精度良い測定を行うことができ、異方性を含めた変形挙動の解析が可能となった。そこで、フーリエ解析により横方向の変形モードを等方性モード、平行移動モード、異方性モード、破断面に沿う滑りモードに分解し、変形過程においてこれらのモードがどのように変化していくのかを解析した。その結果、載荷直後からピーク強度を超え、破断が生じる直前まで等方性モードが卓越し、その後、異方性モードが現れてくること、平行移動モードは、載荷直後から発生していることが明らかとなった。

### 岩盤不連続面の表面特性による力学特性の評価法に関する研究

岩盤内に存在する不連続面の剛性は岩質部に比べて著しく低い。岩盤全体の力学特性に対して不連続面の力学特性が支配的な要素となる。本研究では、この不連続面の力学特性が表面粗さに代表される表面特性に大きく依存することから、岩盤不連続面の力学特性と表面特性の関係を明らかにし、データの取得が比較的簡単な表面特性から力学特性を評価する方法の確立を目指して研究を実施している。不連続面の表面特性と力学特性の関係を明らかにするため、X-Yロボットにレーザー式変位計を取り付けた高精度岩盤表面形状計測システムを構築し、岩石の圧裂破面を不連続面モデルとして、せん断試験前後における表面形状を詳細に測定し、せん断によ

る表面特性の変化を調べた。表面特性の評価には、従来用いていたパワースペクトル密度関数の他に表面の凹凸の勾配を表す関数を適用した。その結果、せん断により破壊した領域は他の領域に比べ勾配の大きい凹凸が存在する領域であることが定量的に評価できるようになった。また、不連続面の開口幅に対してパワースペクトル密度を求めると、かみ合わせの程度に従ってコーナー周波数が変化することが判明し、かみ合わせの定量評価に利用できることが分かった。一方、岩盤不連続面の表面粗さを客観的かつ正確に評価するため、フラクタルモデルに基づいたスティープネスと呼ぶ指標を新たに定義し、一般的に用いられている指標(JRC)との相関を調べた。その結果、スティープネスとJRCの間にきれいな相関関係が成立し、JRCに代わる指標としてスティープネスが適用可能であることが分かった。

### 蛍光法を適用したボアホールテレビジョンシステムによる割れ目の抽出に関する研究

従来のボアホールテレビジョンシステムでは、ボーリング孔壁面においてフラクチャーとその周辺の岩盤との間に顕著な相違が見られず、かつ類似した色調を呈している場合、フラクチャーの識別が困難であった。しかしながら、蛍光法を適用すれば、フラクチャーに浸透した蛍光剤が紫外線照射により発光し、微細なフラクチャーに至るまで詳細にフラクチャーを抽出することが可能である。この方法をトンネル掘削現場において適用し、掘削によるトンネル周辺岩盤の緩みの観察を試みた。その結果、従来のボアホールテレビジョンシステムでは捉えられなかった既存フラクチャーを捉えることができた。また、トンネル掘削により周辺岩盤内に新たに発生したフラクチャーを捉えることもでき、緩みの観察が可能となった。さらに、グラウチングにおけるグラウト剤の浸透状況を観察するための予備実験を行い、蛍光法を適用したボアホールテレビジョンシステムが従来法に比べ有効であることを確認した。

教 授 西山 孝

助教授 斎藤 敏明

助 手 松本 義雄, 村田 澄彦



## 応用計測学講座

応用計測学講座では、材料劣化の非破壊評価や種々の応用的な計測技法に関して、新しい検査・計測法の開発、画像処理などを用いた計測結果の可視化、逆問題的アプローチによる計測結果の評価などの研究を行っている。

### 平面材漏洩磁束探傷への画像復元技法の適用

鋼板などの平面材に対する漏洩磁束探傷において、画像処理の復元フィルタの理論を応用し、計測された漏洩磁束の2次元分布を、検査材表面の欠陥分布や欠陥形状とより密接な関係にある表面磁荷分布に変換することに関して、これまでに行ってきた理論的な検討を踏まえ、そのような変換機構を内包するリアルタイム・センシングヘッドの開発を行った。センシングヘッドは、多数のホール素子を格子状に配列したものである。上述の表面磁荷分布への変換は、漏洩磁束密度分布と復元フィルタとのコンボリューションによって実現できる。そこで、ホール素子が漏洩磁束密度と駆動電流との積を出力としていることを利用し、各素子にフィルタ係数に対応する電流を通电し、すべての素子出力の和をとるような回路構成とすることで、センシングヘッド中央直下の位置の表面磁荷がリアルタイムに求まるようにしている。適用実験の結果、従来の1素子による漏洩磁束分布の2次元記録に比べ、その分解能がかなり高まることが示された。

### 渦流探傷信号のニューラル・ネットによる認識

渦流探傷信号をもとに、欠陥の形状や大きさをニューラル・ネットワークによって判定することについて検討した。欠陥に対して得られる渦流探傷信号のインピーダンス軌跡を表現する方法として、閉曲線の解析的表現法の1つであるフーリエ・ディスクリプタを採用している。平面材の線状欠陥の長さや方位角を識別する問題に対して、このフーリエ・ディスクリプターの係数を入力とするニューラル・ネットを構築した。いくつかの段階的な大きさの欠陥に対する探傷記録を学習信号として、任意の長さや方位角を持つ欠陥が識別できるか否かについて検討し、比較的低次までの係数でも、欠陥のおおまかな分類分けが可能であることが示された。

### 長大斜坑巻上げロープの総合監視システムの構築

長大斜坑の巻上げ設備の安全性確保の観点から、それに使われているワイヤロープの経年劣化や運転時の異常を常時監視するシステムの開発を行った。監視システムは、漏洩磁束探傷と全磁束検査を組み合わせた磁気検査装置、レーザー式のロープ直径計測装置、ロープ張力測定装置からなっている。また、これらの計測項目を統括し、常時監視、データの解析、保存、参照等を随時行えるコンピュータシステムと、その統合監視ソフトウェアを構築した。現在、太平洋炭礦釧路鉱業所の7000 m級の斜坑巻上げ設備において、このシステムによる常時監視が行われている。これまでに、運行時のロープ張力変動

の激しい箇所とロープ直径のばらつきが大きい箇所が対応していることや、ロープ直径値の分布の経時変化が明らかになるなど、時間的にも空間的にも低密度であった従来の監視法では得られなかった新しい知見がもたらされている。

### 大型吊構造ケーブルの磁気検査装置の開発

直径300 mmをこえる大型吊構造物用のケーブルに対して、その腐食による経年劣化の程度を定量的に評価する磁気検査装置を開発した。ケーブルを近飽和状態に磁化したときの磁束量をもとに、腐食などによる断面積減少量を求めるものである。装置は、ケーブルを磁化するための同軸コイルと、磁界測定のためのホール素子と磁束測定のための2分割コイルからなる検出器で構成されている。磁化用のコイルは、測定地点ごと巻線するもので、少ない巻数で所定の励磁能力を確保できるように、その励磁電源は500 Aまでと、かなり大きくなっている。検出部は、磁界測定と磁束量測定を同時に行えるもので、一定の磁界の強さでの磁束量を求めることで、再現性のよい断面積測定を実現している。実物大試料における模擬実験の結果、断面積測定の精度は約1%であった。また、磁束量測定へのケーブル張力の影響について検討し、近飽和状態では、張力と磁束減少量の間にほぼ比例関係があることが明らかとなった。

### 円筒孔内圧分布推定に関する逆問題解析

静的破砕材は、その水和反応によって発現される膨張圧を利用して、岩石を破砕するものであるが、そのなかで、速効型ものが近年注目されている。しかし、このタイプのものは、円孔内に充填された際の発現圧力の分布が、反応が速いゆえに均一ではなく、また、その時間的な変化の様相も明らかにされていない。そこで、アルミパイプを試料として、この速効型静的破砕材の円孔内における発現圧力の分布とその時間変化を求める実験を行った。パイプ外周に貼ったひずみゲージによって、周方向ひずみ分布を計測し、弾性理論にもとづいて、作用しているであろう内圧分布とその時間変化を、逆問題的に解析する方法を採用している。実験の結果、その圧力が発現されるのは、わずか30秒程度で、しかも円孔のごく限られた範囲（底から1/4程度の深さのところ）のみであることが明らかとなった。

教授 花崎 紘一

助教授 塚田 和彦

**精製工学講座****液一液抽出法による酸化物微粒子の回収に及ぼす金属塩添加の影響**

粉体精製工学分野においては、資源の有効利用、地球環境保全などという観点から、従来の技術では処理不可能で廃棄、放置あるいは埋立処分されている微粒選鉱廃滓や微粉末状都市・産業廃棄物から有用成分微粒子のみを高度に分離精製する技術の開発が望まれている。この目的のため、エマルジョン系を利用する分離法が、従来技術の泡沫分離法よりも微粒子捕収に優位であることが確認されるに及んで、その注目度は年々増してきている。本研究では、前述のような油—水系を利用した微粒子精製法を確立するための基礎的研究の一環として、自然親水性のシリカ（石英）及び自然疎水性のタルク（滑石）の微粒子を対象とし、界面活性剤等の捕収剤無添加のイソオクタン—水系を用いて、各微粒子の油滴への捕収現象に及ぼす金属塩添加の影響について油滴—粒子間相互作用の観点から考察を試みた。

金属塩無添加の系では、全 pH 域でシリカは 20% 前後、タルクはほぼ 100% の一定回収率を示し、シリカは親水性粒子、タルクは親油性粒子であることを確認した。シリカ懸濁系に硝酸クロム(III)、硝酸アルミニウム(III)などの金属塩を添加すると、pH の増加と共に回収率がある pH 値で著しく増加しそして減少する傾向を認めた。また、タルク懸濁系に同様の金属塩を添加すると、ある pH 域で本来の親油性が失われることを確認した。金属塩の化学種濃度の計算と、併せて液一液抽出試験と同じ条件下におけるシリカ、タルクおよびイソオクタンの電気泳動移動度測定を行ったところ、金属水酸化物錯体濃度、ゼータ電位並びに回収率の変化とがそれぞれ対応していることから、金属水酸化物化学種の粒子表面への吸着・付着により、微粒子と油滴の凝集あるいは粒子表面の濡れ性などが影響を受けることを考察した。

**浮選法による人工ダイヤモンド中の未燃焼グラファイトの除去に関する基礎的研究**

自然界には、グラファイト、ダイヤモンド、コークスなどの炭素単体をはじめ、自然疎水性の大なる固体物質が存在する。これら疎水性固体物質の粉末は水に濡れにくいいため大きな自然浮遊度を有し、金属酸化物などの親水性固体物質との相互分離を目的とする場合、泡沫分離法（浮遊選鉱法）を適用することにより無極性油等の捕収剤や起泡剤の添加のみで比較的簡単に分離することが可能となる。実際、製鉄所高炉ガス中の黒鉛の回収などにこの浮選技術が適用されている。しかしながら、疎水性固体物質相互の分離精製を目的とする場合、それぞれの表面が疎水性が強く、ある種疎水性固体物質に選択的に作用する抑制剤を開発することなど克服すべき問題が多い。

本研究では、人工ダイヤモンド製造工程から得られる

ダイヤモンド産物中に含まれる未反応物グラファイトを浮選法により除去することを目的に、人工ダイヤモンド及びグラファイトのそれぞれの浮選挙動に及ぼす無機抑制剤の効果について検討を行った。抑制剤としてケイ酸ナトリウムあるいはピロリン酸ナトリウムを用いると人工ダイヤモンドを選択的に抑制し、沈降産物として回収できることを確認した。これら抑制機構を解明することを目的に、抑制効果の差異が認められた pH 値において各種抑制剤の吸着量測定を行ったところ、これら無機抑制剤イオン種が人工ダイヤモンドの極性吸着サイトに特異的に作用することを見出した。一方、グラファイトはこのようなサイトを有していないので、これら無機抑制剤を添加しても浮遊率に何ら影響を及ぼさないことを考察した。

**Sm 含有有機相からのシュウ酸による晶析—逆抽出への超音波の利用—**

近年、溶媒抽出した有機相から目的金属を直接微粒子として回収する晶析逆抽出法が盛んに研究され、またこの方法は金属微粒子を生成する方法としても期待されている。本研究では、晶析逆抽出に超音波を用い、晶析したシュウ酸サマリウム微粒子の形態がどのように変化するか検討した。その結果、超音波を使用しない場合、その形状は常に針状を示したが、超音波を利用した場合、粒子形状は有機相中のサマリウム濃度、超音波出力、水相中の塩酸濃度などの条件により、針状から板状さらに球状への変化が観察された。また、その粒径は、シュウ酸サマリウムの析出速度が速くなるほど小さくなる傾向が観察された。

教 授 中廣 吉孝  
助教授 福中 康博  
助 手 新苗 正和、日下 英史

## 加工設備学講座

### 高温平板に衝突する液滴の変形過程の理論解析

ライデンフロスト温度を超える高温金属表面に無数の微小液滴を衝突させて、表面温度を下げるミスト冷却やスプレー冷却の冷却能を厳密に評価するには、個々の液滴の変形のプロセスを把握することが不可欠である。

高温表面に液滴が衝突するとき、約 20°C の常温の表面に液滴が当たるときの大きな相異は、前者の場合には固液界面に蒸気膜が形成されるのに対して、後者の場合は固液界面が直接接触することである。前者の場合でも、ウェーバ数が大きいと、最初は必ず濡れ現象が起こる。そして、液滴底部が沸騰し、蒸気膜が形成されて、固液界面の直接接触が消える。その結果、液滴は蒸気膜の上に浮かんだような形態をとる。それでも、ウェーバ数がある値より小さいと、固液が直接接触した状態で、軸対称の変形が起こるが、やがて蒸気膜が形成され、その上で変形が続く。円形の膜状になり、それが最大径に達すると、粘性応力と表面張力の効果によって収縮が起こる。そして、ボーリングのピンに似た縦長の形態をとり、最後に高温平板から飛び跳ねる。その後、空中で液滴の上部と下部に分裂するが、またひとついて一体となる。このようなプロセスをナビエ・ストークスの運動方程式を MAC 法によって数値解析し、その結果を高速ビデオによって撮影した写真と比較し、両者は良好に一致することを確認している。ここで得られた結果は米国の ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 117(1995) および Vol. 118(1996) に掲載されている。

### エアリフト方式による深海底鉱物資源の揚鉱理論

陸上資源の枯渇に呼応し、資源の安定供給を維持するためには、深海底鉱物資源の開発が切り札と考えられて以後、かなり長い年月が経過している。事実、1981 年度から通産省の大型プロジェクトとして、揚鉱技術の研究開発が推進されてきている。しかし、今までに行われた揚鉱管内の流動に関する解析手法はドリフトフラックスモデルに基づいている。このモデルは実験によってしか得られない式を必要とするので、そこから得られた数値解はその式を得た実験条件のときのみ正しい結果が保証される。したがって、海面下 5,000 m もある長距離流動をドリフトフラックスモデルによって解析することは実際に役に立つとは考えられない。

そこで、液相、固相および気相の 3 相に対する 3 組の保存式の 1 組を混相流体全体に対する保存式によって置き換える手法を導入した。そうすると、作用と反作用の関係が自動的に満たされ、方程式系は閉じた形になる。エアリフトポンプでは、揚鉱管の途中から空気注入が行われる。したがって、支配方程式系は固液 2 相流領域、遷移域及び固気液 3 相流領域に分けて構築した。本研究においては、この方程式系に基づき、揚鉱管内の非平衡流動特性を把握するための数値解析の手順を示し、同時

にいくつかの重要な結果を得ている。この研究成果は和文誌では、資源・素材学会誌, Vol. 111(1995) に第 1 報と第 2 報が、Vol. 112(1996) に第 3 報が掲載され、欧文誌では、Int. J. Multiphase Flow に掲載予定である。

### 延性破壊を考慮した再絞り加工の成形限界予測

板材成形の有限要素シミュレーションに延性破壊条件式を導入し、局所くびれの発生の有無によらない再絞りの成形限界の予測モデルを構築した。有限要素シミュレーションから計算された応力-ひずみ分布を用いて、延性破壊条件式の積分値を求め、それが一定値を越えると破断したものとして、それを成形限界とする。延性の大きい材料は局所くびれが生じた後に破断するが、このような材料においても、最終的には延性破壊で破断するので、延性破壊条件式による予測が可能である。本研究では、この方法を導入することにより、高い延性を有するアルミニウム合金板の再絞りによる成形限界を予測した。

### モールド内溶鋼の流れ場の非定常挙動

この研究は、モールド内の溶鋼の流れ場を、自由表面形状と速度変動に焦点を置いて、数値解析したものである。本数値解析において、計算領域の最上部の境界面が物理空間における自由表面と一致するように、非定常物体適合座標を採用している。よって、各時間ステップごとに自由表面の変化に応じて、格子系が更新される。また、計算値と比較するために、水モデルを用いて、自由表面での流速分布を計測した。その結果、両者は比較的良好に一致することが確認できた。本研究によって得られた解析結果によると、自由表面と速度を含めて、モールド内の流れ場はほぼ周期的に揺動していることが示された。この成果は、鉄と鋼, vol. 82(1996), No. 4 に掲載されている。

### 水平に運動している平板上における水膜流の干渉

スリットラミナー冷却において、ノズル間で板上の液膜流が衝突して形成される干渉流れの不安定挙動が大きな冷却むらの原因になっている。本研究においては、この干渉流れの挙動を厳密に把握するために、その流れ場を SOLA-VOF 法によって数値解析した。まず、単一ラミナー流が可動平板と衝突する場合には、衝突点近傍の下流付近に渦度の大きい領域が存在することが確認された。また、2 つのラミナー流によって形成される水膜は、上流と下流の相互の衝突によって、上流(板の進行方向)へ向かう水膜が下流へ向かう水膜の下へ潜り込み、下流へ向かう水膜を持ち上げるような流れ場が干渉領域に起こっていることが確認された。今後、熱移動現象も含めて、本研究をさらに促進させていきたいと考えている。

教 授 八 田 夏 夫  
助教授 宅 田 裕 彦  
助 手 藤 本 仁

**材料設計工学講座****「究極の分析」：高空間分解能 EELS 法による局所化学結合状態の解明**

近年、電子線損失エネルギー分光 (EELS) の吸収端近傍の微細構造 (ELNES) を用いて、オングストローム・スケールで材料の化学状態分析を行うことが、電子顕微鏡の空間分解能の増大とともに可能となってきた。これにより、電子顕微鏡は、原子を見る時代から、電子を見る時代にまさに突入しようとしている。しかしながら、これまで ELNES や X 線吸収スペクトル (XANES) など励起状態への電子遷移は、物質内での多重散乱に由来する多体効果を反映すると考えられており、標準的な理論的解析方法が確立されていなかった。我々は DV-X $\alpha$  分子軌道法による、モデルクラスターについての第一原理計算によって、様々な固体試料からの ELNES が定量的に再現できることを世界で初めて示した。さらに国内外の実験グループと共同して、この計算手法を、粒界や超微細析出物から得られた ELNES スペクトルの解釈に適用し、現在までに、SrTiO<sub>3</sub>の界面や Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>セラミックスの粒界ガラス相の構造について重要な知見を得た。

**オプト・セラミック素子の材料設計**

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>や SiO<sub>2</sub>など典型元素の単純酸化物中に遷移金属元素や希土類元素が固溶した物質には、固体レーザー、非線形光学素子、光ファイバー、光メモリーなど、高度通信社会を支える重要な材料が数多くある。我々は、これら光学素子の材料設計の指針を得る目的で、第一原理計算に基づく不純物の電子状態計算を行っている。

本年は酸化物中の遷移金属元素について、多重項分裂を第一原理から計算することに成功した。この手法により、様々な材料系での光学遷移が定量的に計算でき、材料設計が可能となることが期待できる。

**金属・セラミックス異相界面の電子状態**

セラミックス・金属異相界面は、半導体デバイスや構造部材において極めて重要な役割を持つ。しかし界面での化学結合の詳細については未解明の部分が多い。我々は、高分解能電子顕微鏡観察 (HREM) などでの実験結果が多い MgO (001) // V (001) 界面について、DV-X $\alpha$  分子軌道法によるクラスター計算を行い、理論計算としては初めて、Mg-V の金属結合が界面結合を決める上で重要な役割を示すことを明らかにした。この結果は、HREM で報告された実験結果と良く一致する。さらに、高空間分解能の電子線損失エネルギー分光 (EELS) の吸収端近傍の微細構造 (ELNES) を理論的に予測し、共同研究者の実験グループでその確認を現在行っている。

**セラミックスの機能フロンティアでの電子状態**

触媒材料やバリスター等の機能性セラミックスとして用いられる酸化亜鉛は、その表面や界面における電子状

態が重要であると考えられている。しかし表面での吸着現象や界面における化学結合状態については実験、理論的にも未解明の点が多い。今後、酸化亜鉛に特有な機能的性質を利用した材料を設計・開発するためには表面・界面での化学結合状態を理解することが不可欠となる。本年度は、第一原理に基づくクラスター計算から酸化亜鉛表面の電子状態を調べた。その結果、実験による分光スペクトルは酸化亜鉛表面に特有の電子状態を反映したものであり、バルクの電子状態とは異なることを示した。また表面近傍に酸素空孔の存在を想定することにより実験スペクトルを良く再現できることが判明し、酸化亜鉛表面では酸素空孔等の点欠陥の存在が重要であることを示した。

**原子、イオンの硬さに関する電子論的考察**

無機固体、ガラスなどの物質系の持つ構造やマクロな物性に関する研究に用いられる分子動力学 (MD) 計算においては、その構成原子やイオンの大きさや硬さに関するパラメーターが必要とされる。しかし通常、経験的にこれらのパラメーターを決定する方法が採られてきた。そこで本研究では第一原理計算から原子やイオンの大きさや硬さを非経験的に評価することを試みた。まず、アルカリ金属、ハロゲンの孤立イオンについてピリアル定理に基づき圧力-体積関係を求めた。さらにこの関係を用いイオン間の力の釣り合いを考慮して、アルカリハライド結晶中の 2 体間斥力ポテンシャルを求めた。これらの結果を MD 計算に応用した結果、実験の圧力-モル体積関係を良く再現した。また、アルカリハライド結晶の平衡イオン間距離および構成イオンの半径は実験値と 7% 以内の精度で一致し、今回の非経験的な方法が MD 計算に十分応用出来ることを示した。

**遷移金属炭化物の化学結合に及ぼす固溶元素の影響**

鉄鋼材料中の遷移金属炭化物は、多くの場合、鉄鋼材料に含まれる合金元素が固溶しており、その析出挙動や物性に大きな影響を及ぼしている。しかし、遷移金属炭化物に関する理論計算による研究は複雑な結晶構造を持つ Cr や Fe の炭化物に関するものは非常に少ない。

本研究では DV-X $\alpha$  分子軌道計算により固溶元素を含んだ遷移金属炭化物の電子状態計算を行ない、化学結合に及ぼす固溶元素の影響を系統的に議論した。その結果、まず、3d 遷移金属内では、原子番号が増加するとともに、炭化物中の金属-金属間の結合が強くなり、また、固溶元素は炭化物中の金属-炭素間の結合よりも、金属-金属間の結合に大きな影響を及ぼすことが判明し、固溶元素の影響を考える上では金属-炭素間の結合だけでなく炭化物中の金属-金属間の結合の変化が重要であることを示した。

教 授 足立 裕彦

助 手 田中 功

## 表面処理工学講座

### 2 価クロム浴を用いる Fe-Cr-Ni 合金電析

古くから Fe-Cr-Ni 合金めっき, すなわちステンレス鋼に近い組成の合金電析皮膜を得る試みは行われている。従来の研究では 6 価クロム浴あるいは 3 価クロム浴が用いられてきたが, 6 価クロムイオン, 3 価クロムイオンともに合金電析が困難な金属イオンである。したがって 3 価クロムイオンをいったん 2 価クロムイオンに還元し, その後, 他の 2 価の金属イオンとともに建浴し合金電析を行うことにより Fe-Cr-Ni 合金の性状の改善が期待される。本研究では 2 価クロム浴からの Fe-Cr-Ni 合金電析におけるめっき層の組成, 性状, 電析挙動などに及ぼす浴温度, 添加剤濃度, パルス電解等の電解条件の影響を検討し, さらに電析機構の検討を試みた。

同条件において 2 価クロム浴と 3 価クロム浴を用いた定電位電解を行い, 得られた電析物の比較を行ったところ, 2 価クロム浴から得られた電析物の方が Cr 含有率, 電流効率とも高かった。様々な温度で定電位電解を行ったところ, 温度の上昇とともに Cr 含有率は減少し, Ni 含有率は増大する傾向が認められた。電流効率は温度 310 K あたりで最大となった。また, Fe(II), Cr(II), Ni(II) のうち一種または二種のイオンを含む KCl-ギ酸浴からの各金属の電析を行い, Fe-Cr-Ni 合金電析時の析出挙動との比較をしたところ Fe-Cr-Ni 合金電析において Cr の析出は他の金属の存在により誘起され, Ni の析出は抑制されていることが示唆された。

電解液中のギ酸濃度を増大させること, 定電流パルス電解において Duty-cycle を減少させることにより, Cr 含有率, 電流効率は減少した。このことより Cr の析出はカソード電極近傍の pH に強く依存していることが明らかになった。

### 湿式法による CdTe 薄膜の作製に関する研究

CdTe は最も高い太陽光エネルギー変換効率を持つ太陽電池材料の 1 つである。等研究室では, 従来の電析法で用いられる酸性浴より  $\text{TeO}_2$  の溶解度が大きく, 組成変化が容易なアンモニア-アルカリ性水溶液からの電析により, CdTe 結晶が得られることを見いだした。本研究では, アンモニア-アルカリ性水溶液からの CdTe 結晶電析の条件を確立するため, 電解浴組成, 電解電位を変化させた実験を行った。

電解浴のアンモニア濃度を一定にし  $\text{Te(IV)}$  濃度および  $\text{Cd(II)}$  濃度を変化させ電析を行ったところ,  $\text{Cd(II)}$  濃度が  $\text{Te(IV)}$  濃度より高いときには結晶性の CdTe が析出し, 特に  $\text{Cd(II)}/\text{Te(IV)}$  濃度比が 3 に近い場合に高い結晶性の CdTe が析出した。また, 電解液組成および電析電位を変化させることにより n 型 CdTe と p 型 CdTe の両方が電析可能であった。

### 3 価クロムイオンを含む水溶液からの耐食性皮膜の作製

従来, クロメート処理は各種素材に裸耐食性の向上と塗料密着性を確保するために塗装鋼板の下地処理として古くから行われてきた。特に, 電解型クロメート処理では,  $\text{CrO}_3\text{-SO}_4^{2-}$  系酸性浴が最も詳しく研究され, 実用化もされている。しかし最近の公害問題など社会情勢の変化により毒性の大きな 6 価クロムイオンを用いないクロメート処理の開発が望まれている。そこで, 本研究では毒性の少ない 3 価のクロムイオンを主成分とする電解浴を用いる耐食性皮膜の作製に取り組んだ。具体的には 3 価のクロムイオンを含むアルカリ性浴中で, 処理を行う鋼板をアノードとして電解を行い, 鋼板表面では 6 価クロムを生成させ皮膜を作製することを試みた。

電流-電位曲線を測定したところ, Cr イオンの酸化, Fe の溶出, および酸素の発生による電流が認められたことからこの 3 つの反応が合わさって皮膜が形成されることが判明した。また電解処理で得られた皮膜を XPS で分析した結果, 皮膜の主成分は Fe と Cr の酸化物であった。また耐食性を評価するために, 食塩水中で腐食試験を行ったところ, 従来のクロメート処理には及ばないものの鋼板の耐食性の向上が認められた。

### 非硫酸発生型の新しい銅資源処理技術の開発

硫化銅精鉱の臭化物を含む塩化第二銅水溶液による浸出反応を利用し, 硫黄を元素状硫黄として回収する新しい銅の湿式製錬法の開発に取り組んでいる。この方法の特徴は浸出液に臭素ガスあるいは塩素ガスというポテンシャルの高い酸化剤を含ませることにより, 従来の湿式製錬法では困難とされている金や銀などの貴金属の回収を目指す点にある。しかしながら, 臭素ガス, 塩素ガス及び臭化物イオンを含む反応液による黄銅鉱の浸出反応, あるいは塩化第二銅による浸出によって生成した元素状硫黄の臭素ガス, 塩素ガスによる  $\text{SO}_4^{2-}$  への酸化反応, 浸出液の電解酸化による酸化剤の再生等の詳細については不明な点が多く, 現在精力的に研究を行っている。

教 授 栗倉 泰弘

助教授 平藤 哲司

**プロセス設計学講座****固気トップインジェクションにおける移動現象**

融体表面上から吹きつける固気トップインジェクションは、MI プロセス・鋼の精製に使われている他、DIOS やスクラップ処理などへの適用性も検討されている。本研究では、固気トップインジェクション操作における反応工学の体系の構築を目的として、NaOH 水溶液にアクリル樹脂粉体を  $\text{CO}_2$ - $\text{N}_2$  混合ガスとともに吹き込むコールドモデルの実験を行った。 $\text{CO}_2$  の吸収速度から物質移動パラメータ  $Ak_i$  ( $A$ : 気液界面積,  $k_i$ : 物質移動係数) を求めた。この  $Ak_i$  から無次式  $Sh = 2.5 (\text{ReSc})^{0.8}$  が得られた。なお、ランス出口での固気噴流のもつ運動量が等しい場合には、固体のガスに対する質量比を上げると結果としてガス流速が小さくなるため、物質移動パラメータは小さくなる。

**ISP 焼結鉍の還元反応速度の解析**

ISP 溶鉍炉の炉内反応の解析の基礎データを得るために、焼結鉍の CO による還元反応速度を 1100 K ないし 1400 K の温度で測定し、その反応機構を検討した。その結果、PbO の還元は ZnO のそれよりはるかに速く、焼結鉍内に液体 Pb として存在する。一方、ZnO の還元はトボケミカルに進行し、還元された Zn はガス状となって焼結鉍から拡散によって出て行き、焼結鉍外部分には  $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO}$  系スラグが残る。なお、 $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$  は焼結鉍内の反応界内部で徐々に ZnO と Fe 酸化物に分解した。これらの結果を用いて溶鉍炉の炉内反応の解析を行う予定である。

**還元拡散法による水素吸蔵合金の生成機構**

$\text{La}_2\text{O}_3$ , Ni に還元剤として  $\text{CaH}_2$  を混合し、ブリケットにして Ar 中で加熱すると、まず  $\text{NiCa}_5$  が生成し、その後 Ca が La と置換して  $\text{LaNi}_5$  が生成する。そこで、Ni ルツボで Ca 量が 5% と少ない La-Ni-Ca 系混合物を溶融し、これに Ni 線を浸漬したところ、上と同様に Ni 線上に  $\text{CaNi}_5$  が生成し、その外側に  $\text{LaNi}_5$  が生成した。Ca の方が La より fccNi に反応し易いことは DV-X $\alpha$  法によって計算できるが、 $\text{LaNi}_5$  より熱力学的に不安定な hexagonal  $\text{CaNi}_5$  層がかなりの厚さまで成長する理由は未だ説明できていない。

**無鉛はんだの開発**

従来使われている Sn-Pb 系はんだの Pb の毒性が問題になっている。そこで、共晶組成の Sn-58Bi の銅板、銅合金板への濡れ性をメニスコメータによって測定したところ、従来の Sn-Pb 系と同程度の値を得た。

**X 線を用いた材料評価法の開発**

X 線による電子の励起、電子線による X 線の励起などの現象を材料評価に応用したり、新しい方法を開発した。

列挙すると

- (1) イオンブレーティング法により作製した C-BN 薄膜の高分解能 EPMA スペクトルにより、様々の作製条件による薄の変化を観察した。
- (2) 全反射 X 線によって励起された光電子を検出する事により、数 Å ~ 100 Å の表面の多層膜のキャラクタリゼーションを行なった。
- (3) 石炭フライアッシュ中の硫黄の化学状態とフライアッシュ粒子中での分布を X 線吸収分光法により測定した。炭田の相違や、フライアッシュ粒径の相違により、硫黄の化学状態とその粒子内分布に違いのある事を示した。
- (4) ボールミルで粉砕した h-BN 結晶粉末の共鳴 X 線散乱を測定し、共鳴 X 線散乱強度が微結晶中のダングリングボンド数密度の増大につれ強くなる事を示した。
- (5) CuL $\alpha$ X 線発光スペクトルのサテライトが、従来の定説であった Auger 遷移に起因するものではなく、d 電子と価電子帯空孔との電子相関効果によるものであることを示した。

教 授 朝木善次郎

助教授 河合 潤

助 手 田辺 晃生

## マイクロ材料学講座

### RFスパッタリング法による熱安定性に優れたn型GaAsに対する低抵抗 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ オーミック・コンタクトの形成機構

n型GaAsに対して熱安定性に優れた $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{Ni}/\text{W}_2\text{N}/\text{W}$ オーミック・コンタクトの開発に成功した。RFスパッタリング法を用いて蒸着した $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ とGaAs基板を短時間の熱処理で反応させると界面には $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ が形成され、W電極とGaAs基板間の電気的障壁高さが低下し、接触抵抗が低下する。また $\text{W}_2\text{N}$ 拡散バリアの導入により、表面形状や再現性が向上した。

### n型GaAsにおけるNiGe系オーミック・コンタクト材の形成

当研究室で開発したNiGeコンタクトにドーピング元素(Sn, Te)及びドーピング促進元素(Pb, Au, Ag, Pt)を添加することにより、 $0.3\ \Omega\text{mm}$ 以下という低い接触抵抗が得られた。これらのコンタクト材についてその電気伝導機構及びコンタクト形成機構を微細構造解析(XRD, TEM, EDS)により調べた。さらにNiGe(In)コンタクトでは、積層構造をNi/(In)/Ni/Geと変化させることにより、 $0.2\ \Omega\text{mm}$ と低い接触抵抗が得られ、 $400^\circ\text{C}$ 、10 hrという高い耐熱性を得ることに成功した。

### 半導体Si上のCu薄膜に対する拡散バリア材の熱安定性に関する研究

ULSIの高集積化・高速化には素子間の配線部材に低抵抗のCuを用いることが不可欠であり、その際には間に拡散バリア層を挿入する必要がある。この拡散バリア層としてスパッタによりTaC薄膜を作製したところ、従来の約1/5の薄さで実用上十分な $750^\circ\text{C}$ という高温でCuの拡散を抑制できた。また、薄膜中の拡散機構についても、粒界近傍の格子の乱れが拡散抑制に大きく寄与していることが微細構造解析から示された。

### p型GaN化合物半導体の種々の仕事関数を持つ金属電極に対するエネルギー障壁

近年、GaN系化合物半導体を用いた青色発光ダイオードが製品化され、現在はその青色レーザー・ダイオードへの応用が期待されている。しかし、その実現には数多くの課題が残されている。本研究は、その課題の一つである、p型GaNに対する低抵抗オーミック・コンタクト材の開発を目的としている。本年度は、種々の仕事関数を持つ金属コンタクトに対する電気特性を調べ、ショットキー障壁の仕事関数依存性を調べた。その結果、ショットキー障壁は、仕事関数依存性を持ち、1.6から0.9 eVまで変化した。これらの結果より、p型コンタクト材としては、仕事関数の大きな元素を選定する必要があることがわかった。

### GaN化合物半導体表面における不純物層の評価

空気中に保持したGaN表面には不純物層が成長しており、デバイスへの応用の際にGaN/電極界面での電流輸送機構や反応に大きな影響を与えると考えられる。本研究ではGaN表面での不純物層をXPSを用いて分析した。不純物として酸化物、炭化物が存在し、酸化物は化学エッチングにより約30%程度除去されることが分かった。また炭化物は不純物層の最表面に存在していることが明らかになった。

### 金属/p型ダイヤモンド界面の電気伝導機構

特殊環境用デバイスとしての利用が期待されているダイヤモンド半導体に対して高温環境での電極特性を評価するために、Pt, Pd, Ti, Mo, Cr電極を用いてダイヤモンド/電極界面に生じる電気的接触抵抗値( $\rho_c$ )の温度依存性やアクセプタ濃度依存性を調べた。この結果、ショットキー障壁は、アニール後に0.5 eV程度に減少し、その大きさは金属の種類に依存しないことが分かった。これらの実験結果をもとに、新しいモデルを提案し、金属/ダイヤモンド界面の本質を明らかにした。

### ZnSe II-VI族化合物半導体のオーミック・コンタクト材の開発

近年、光エレクトロニクス分野においては、ZnSe系のII-VI族化合物半導体の青色レーザーダイオードが実現され、現在その実用化に向けて活発な研究が行われている。しかしながら現段階においては、レーザーダイオードの発光寿命は1時間程度であり、実用化にはほど遠い段階にある。発光素子の寿命が短い最も大きな原因は、金属とp型ZnSeとの接触抵抗が非常に高くオーム性を示さないことにある。本研究は、低い接触電気抵抗を持ち、信頼性の高いオーミック・コンタクト材を開発することを目的としている。

本年度は、(1)種々の金属(In, Cd, W, Nb, Cu, Ag, Au, Ni, Pt, Se)の電気的特性及び界面微細構造を調べた結果、表面の清浄かを行うことおよび仕事関数の大きなCu, Ag, Ni, Seを用いることにより立ち上がり電圧を2~3 Vまで減少させることに成功した。(2)低障壁半導体中間層を形成すると期待されるCdを用いて、その電気的特性および界面微細構造を調べた結果、 $250^\circ\text{C}$ 以上のアニールにより立ち上がり電圧は5~6 Vまで減少し、界面にはCdリッチな $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Se}$  ( $x \geq 0.9$ )層が形成されることがわかった。

教授 村上 正紀  
助教授 小出 康夫  
助手 奥 健夫



**量子材料学講座**

量子材料学講座では、金属合金・化合物の磁性に関する研究を行っている。

学内では、磁化率、比熱、電気伝導性などの巨視的物性や NMR による微視的磁性の研究を行い、他方学外では超強磁場磁化測定や中性子散乱実験などの共同研究を推進している。本年度は次のような研究を行った。

**1. フラストレートした 3d 遍歴電子系の磁性**

ラーベス相化合物  $Y(Sc)Mn_2$  は常磁性であるにも関わらず、低温でも大きなスピンの揺らぎを示す化合物である。昨年までの研究で、われわれはこの物質の基底状態がフラストレーション効果によって生じるスピン液体状態であることを確認した。ところで、この Mn を非磁性原子である Al で置換するとフラストレーションが壊れてスピングラス状態になることが、磁化や NMR の結果から示唆されている。本年度はこの  $Y(Sc)(Mn_{0.9}Al_{0.1})_2$  の中性子散乱の実験を行いスピンドायナミクスを測定した。その結果、各温度でのスペクトルには有限の Q のところに強い散乱が観測され反強磁性相関が存在すること、その散乱強度は、非置換系と逆に温度低下とともに強く増加することを見いだした。また、スピングラス状態では短距離反強磁性磁気秩序が存在している。

ところで母相の  $YMn_2$  は反強磁性を示すが、この反強磁性は約 400 Å の長周期のヘリカル変調があることが知られている。この長周期磁性と反強磁性による結晶歪みの相関を調べるための共同研究も原研の中性子グループとの間で進行している。

**2. Eu 化合物の磁場誘起価数転移**

希土類化合物の中には温度によって価数が大きく変化する物質が知られている。いずれの場合も基底状態は非磁性的で、高温では局在モーメントを持った状態であるので、基底状態に磁場をかけることによって、局在モーメントを発生させる可能性がある。われわれは Eu の場合は磁場によるゼーマンエネルギーの変化が大きいことに着目して、価数が 170 K 付近で急激に変化する  $EuPd_2Si_2$  の強磁場磁化過程を調べた。その結果、この物質が 5 K で磁場 95 T のもとで、メタ磁性を起こすことを見いだした。転移磁場より上での磁気モーメントは約  $7 \mu_B/Eu$  となることから、このメタ磁性は磁場によって誘起された価数転移であると結論される。また、この転移はヒステリシスを伴った一次転移である。さらに、メタ磁性転移磁場  $H_v$  と転移温度  $T_v$  の相関を調べる目的で、Pd を Pt で置換した  $Eu(Pd_{1-x}Pt_x)_2Si_2$  の試料を作製し、その磁化過程を調べた。この系の価数転移温度  $T_v$  は x の増加とともに単調に減少する。いずれの試料においてもシャープなメタ磁性転移が観測されその価数転移磁場  $H_v$  は  $x=0.15$  では 60 T 程度にまで減少する。さらに、この  $H_v$  は  $T_v$  と直線的な関係にあることを見いだした。

た。

**3. 3d-カルコゲナイド化合物の電子相関と比熱**

NiS は 260 K 付近で金属絶縁体転移を起こす物質であるが最近光電子分光の結果などから、強相関伝導系であると考えられるようになってきた。S を Se で置換した  $NiS_{1-y}Se_y$  では  $y \geq 0.1$  で金属となる。これは Se 置換によって電荷移動ギャップが小さくなったためと理解されている。われわれはこの系の金属相に着目し、金属-絶縁体境界付近にいわゆる異常金属相が見られるかどうかを、電子比熱係数  $\gamma$  や磁化率  $\chi$  を測定して調べた。その結果、この系の金属相では  $\chi$  や  $\gamma$  は組成によらずに一定値をとり、発散的な傾向は見られない。ウイルソン比もだいたい 2 程度で一定である。 $\gamma$  の値は NiSe のバンド計算から求められる値とだいたい一致していることが明らかになった。これらの結果は  $NiS_{1-y}Se_y$  では、いわゆる異常金属相は存在せず、他の強相関電子系とは異なっていることを示している。

**4. NMR による  $RCu_2$  の研究**

$RCu_2$  系は、その異方的な結晶構造のために大きな磁気異方性を示し、さらに R に依存する様々な異常物性を示す。我々はこの系の測定を通じて NMR の測定精度の向上と解析手法の確立をめざしている。NMR によって局所対称性の悪い位置に存在する核位置での内部磁場を調べ、その方向を議論することにより、複雑な磁気構造でもスピンの向きを特定することが可能であるが、この手法を  $CeCu_2$  に適用した。その結果、通常の中性子回折では決まらず、偏極度を解析してかろうじて議論されてきた Ce のスピンの向きを NMR から同定することに成功した。また、NMR ではナイトシフトの異方性を通して波動関数の異方的混成や磁性原子と配位子との相互作用についての微視的な情報を得ることができる。 $PrCu_2$  では Pr の四重極モーメントが転移を起こすと考えられており、この系について微視的超微細相互作用の異方性に関する測定を行った。その他に核スピン格子緩和時間  $T_1$  の測定を通して  $NdCu_2$  や  $CeCu_2$  のスピンドायナミクスを議論した。

教授 志賀 正幸

助教授 和田 裕文

助手 中村 裕之

## 結晶物性学講座

エネルギー選別型  $\beta^+$ - $\gamma$  同時計測陽電子寿命測定装置の開発

陽電子寿命法は格子欠陥の研究において極めて有用な手法である。しかし、従来の  $\gamma$ - $\gamma$  同時計測法では試料と線源を密着させる必要から、高温下、応力下での寿命測定は困難であった。 $\beta^+$ - $\gamma$  同時計測法では、陽電子線源から放出された陽電子をシンチレーターにより直接検出しスタート信号とし、ストップ信号として試料中での電子との対消滅の際に放出される消滅  $\gamma$  線を検出して、その時間差より陽電子寿命スペクトルを得るため、線源と試料を分離できるという利点がある。しかし、線源で生成された白色陽電子線をそのまま用いると、スタート・シンチレーターから試料までの空間を陽電子が飛行するのに要する時間に陽電子間で差が生じるため、システム全体としての時間分解能は従来法に比べ劣化する。そこで本研究では、磁界レンズを用いた白色陽電子線のエネルギー選別を考案し、その方法を採用した  $\beta^+$ - $\gamma$  陽電子寿命スペクトロメータを作製した。その結果以下のことが分かった。

- (1) 白色陽電子線中の特定のエネルギー領域の陽電子の選別は確実に行われる。
- (2) 得られる寿命値はほぼ従来法に近い値となる。
- (3) スタート・シンチレーターの蛍光の強度などが大きく時間分解能を左右する。

## TiAl PST 双結晶の作製と塑性変形

軽量耐熱構造材料として実用化が期待されている TiAl/Ti<sub>3</sub>Al 二相化合物は、通常の凝固条件では特殊な層状組織を形成する。本研究ではそのような層状組織粒よりなる多結晶体がなぜ脆いのかを理解するために、PST 単結晶の拡散接合により、TiAl PST 双結晶を作製し、室温で引張変形挙動を調べた。双結晶の方位の組み合わせは、A<sub>1</sub>-B<sub>1</sub>、A<sub>1</sub>-A<sub>2</sub>、B<sub>1</sub>-B<sub>1</sub> 及び B<sub>1</sub>-C<sub>1</sub> の 4 種類で、A、B、C は層状組織境界面と荷重軸のなす角度それぞれ 0、31、51 であることを示し、添え字の 1 および 2 は、引張試験片板面方向がそれぞれ  $\langle 11\bar{2} \rangle$  方向および  $\langle \bar{1}10 \rangle$  方向を向いていることを示す。得られた結果を以下に示す。

(1) 拡散接合の最適条件は、800°C、24 時間であり、これより高温に保持したり長時間保持すると、接合界面に等軸  $\gamma$  再結晶粒が現われた。(2) 拡散接合後、1350°C で 1 時間焼鈍を行なうと、B<sub>1</sub>-B<sub>1</sub> PST 双結晶を除き、結晶粒界に等軸  $\gamma$  粒が現われた。(3) TiAl PST 双結晶の降伏応力は、A<sub>1</sub>-B<sub>1</sub> PST 双結晶では構成 PST 単結晶の中間の値を、その他の双結晶では構成 PST 単結晶とほぼ同じ値を示した。(4) TiAl PST 双結晶の引張伸びは、B<sub>1</sub>-B<sub>1</sub> PST 双結晶では B<sub>1</sub> 方位の TiAl PST 単結晶のそれとほぼ同じで、その他の PST 双結晶では構成 PST 単結晶の伸びより低かった。(5) すべての TiAl PST 双

結晶の破断は結晶粒界より起こっていた。

## 格子欠陥深さ分布測定のための低速陽電子ビーム装置の開発と応用

格子欠陥の研究において陽電子消滅法は極めて有用な方法である。従来法では、白色陽電子線を試料に密着させて測定し、試料全体で平均化した情報を検出していた。この白色陽電子線をいったん減速材（モデレーター）と呼ばれる金属薄膜に入射させ、低速、単色化し再加速時のエネルギーを制御すると格子欠陥の深さ方向分布を得ることができる。本研究では、Ni 薄膜をモデレーターとして (1) 1 対の屈曲部によるドリフト運動の相殺、(2) 磁場勾配によるビーム径の収束という特長を有する装置の開発を試みた。低速陽電子を 2, 8, 18 kV で加速し、十分焼鈍した Si に入射させ、S パラメーターを求めると、それぞれ 0.486, 0.497, 0.503 となり、加速電圧が大きいほど S パラメーターは大きくなった。18 kV での S パラメーターはバルクの値と考えられるため、2, 8 kV での S パラメーターは表面の自然酸化膜の影響で小さくなったものと考えられる。この低速陽電子法を利用した装置は、表面欠陥が特に重要である半導体関連の材料への応用が期待される。

## 単相および複相遷移金属 disilicides の組織と力学特性

遷移金属 disilicide (MoSi<sub>2</sub>) は、超高温耐熱材料の有望な候補材料の一つであるが、低い常温靱性および高温での急激な強度の低下が問題である。本研究では、これらを同時に改善することを目的とし、MoSi<sub>2</sub> の SiC との複相化を試みた。複相化には、MoSi<sub>2</sub>-SiC の擬二元共晶反応を利用して一方を熔融凝固法にて行なった。この複相材の破壊靱性値ならびに高温強度を凝固速度の関数として測定した。また MoSi<sub>2</sub> と同じ C<sub>11</sub>b 型構造を有し、MoSi<sub>2</sub> との合金化も考えられている WSi<sub>2</sub> の単相単結晶の機械的性質も調べた。得られた結果は以下のようにまとめられる。

(1) MoSi<sub>2</sub>-SiC 共晶組織中の SiC 相は板状で、複相材の破壊では、亀裂進展の抵抗となっていたが、破壊靱性値に大きな改善はなかった。(2) 複相材の高温強度は、MoSi<sub>2</sub> 単結晶よりも高く、その比は 1200°C から 1500°C で 2 倍から 3 倍へと増加した。(3) WSi<sub>2</sub> 単結晶は 1100°C 以上の高温でのみ変形可能で、MoSi<sub>2</sub> 単結晶と同様の  $\{110\} \langle 111 \rangle$ ,  $\{011\} \langle 100 \rangle$ ,  $\{023\} \langle 100 \rangle$  すべり以外に  $\{001\} \langle 100 \rangle$  すべりが観察された。(5) 共通のすべり系で CRSS を比較すると、WSi<sub>2</sub> の値は MoSi<sub>2</sub> と比較して数倍大きい。(6) WSi<sub>2</sub> は、結晶育成直後ですら (011) 面上に多数の積層欠陥を含み、CRSS の増大と関連していると考えられる。

教 授 山口 正治

助 手 西谷 滋人, 乾 晴行

## 格子欠陥物性学講座

結晶中の原子の拡散機構、遷移金属中における軽元素不純物原子の存在状態と拡散・析出挙動、種々の新材料の弾性定数の測定、純金属の再結晶集合組織の形成機構など、材料物性の基礎研究を理論および実験の両面から行っている。

最近の研究内容の紹介として、以下に1995年度の修士論文の概要を記す。

### 池田輝之： $Li_2$ 型 Ni 基金属間化合物における相互拡散

$Li_2$ 型構造をとる金属間化合物である  $Ni_3Al$  および  $Ni_3Ga$  における相互拡散係数をそれぞれの単相拡散対を用いて測定した。 $Ni_3Al$  中では相互拡散係数は Al の濃度上昇に伴い上昇する。 $Ni_3Ga$  においては相互拡散係数の組成依存性に熱力学的因子の効果であると考えられるピークが見られる。また、得られた  $Ni_3Al$  中の相互拡散係数の値と  $Ni_3Al$  中の Ni の自己拡散係数の報告値から、Darken-Manning 解析により Al の自己拡散係数を評価したところ、Ni と Al の自己拡散係数は同程度であることが分かった。さらに、Gyuk, Chang らによる熱力学モデルと Bragg-Williams 近似により計算した antisite defect 濃度や報告されている空孔濃度の計算値から、 $Li_2$ 型化合物における拡散機構を考察した。

### 柏崎和久：内部摩擦法および磁気余効法によるニッケル中の炭素の挙動に関する研究

Ni 中に固溶した炭素は近接対を形成することが知られている。本研究では、まず単結晶の内部摩擦を測定することにより、C-C ペアの幾何学的配置を決定した。実験結果から、固溶炭素は tetragonal 対称をもつ第二近接の  $\langle 100 \rangle$  ペアを形成していると考えられる。この配置は弾性相互作用の観点からは安定である。C-C ペアの再配向のカイネティクスを、擬弾性緩和の理論に基づいて解析した。また、Ni-Fe、Ni-Mn などの Ni 希薄合金中では、C-C ペアに加えて第三元素 X と C とのペア (X-C ペア) も形成されていることを示唆する結果が得られた。

### 福井詔一：銅合金の弾性率に関する研究

Cu-Co 合金の時効による弾性定数の変化を直方体共振法により測定した。時効初期、弾性率はほとんど変化せず、ある時期に急激に上昇する。その後はほぼ一定の値となり、最後に低下する。時効初期、Cu マトリックスに整合な Co 粒が析出し、ある時効時間から Co 粒の体積率一定のオストワルド成長を始める。この時期が弾性率が上昇した後に一定となる状態に対応している。その後、析出粒が粗大化してゆきマトリックスと非整合になると、弾性率は低下する。Co は本来常温では hcp 構造をとるが、X 線回折および電子顕微鏡観察の結果、Co 粒はいずれの時効段階においても fcc 構造であった。Cu 中に析

出する fcc Fe 粒子は非整合になると直ちに bcc 構造になるが、これと比べると fcc Co はかなり安定である。弾性率がマトリックスと析出物の体積平均で表されると仮定して、実験で得られた合金の弾性率と報告されている純銅の弾性率の値から fcc Co の弾性率を評価したが、妥当な値とはならなかった。

### 八木博史：純銅における立方体方位集合組織の形成に関する研究

立方体方位集合組織を持つ銅箔を同じ方位を持つ二つの銅単結晶の間にはさんで接合した試料を用いることにより、変形組織中に立方体方位成分を導入した。このとき、単結晶の方位として FCC 金属の強圧延後の圧延集合組織にみられる方位を選ぶことにより、立方体方位成分とその隣接部分との間の方位関係をあらかじめ設定した。このような試料を用いて、その圧延変形後の再結晶挙動を調べた。立方体方位が現れたのは、単結晶の方位が立方体方位と共通の  $\langle 111 \rangle$  軸まわりの回転関係を有し、かつ圧延組織中に立方体方位成分が導入されている場合のみであった。また、このような条件を満たすとき、再結晶過程の初期から立方体方位粒の急速な成長が見られた。これらの結果から、立方体方位核の生成のためには、変形組織中に立方体方位成分が存在し、かつその隣接部分に立方体方位と共通の  $\langle 111 \rangle$  軸まわりの回転関係を有する方位成分が存在することが必要であると考えられる。

教授 小岩 昌宏  
助教授 沼倉 宏  
助手 田中 克志

## 材料物理学講座

当研究室では、超伝導材料における実用化のための超伝導特性の向上、また磁束の侵入に関する理論的研究と、メゾ構造制御による高強度 Al 合金の開発、および、合金の相分解現象についての研究を行っている。以下に、昨年度の当研究室における成果を紹介する。

### Bi 系酸化物超伝導線材の臨界電流密度の向上

酸化物超伝導体を実用化するためには線材での特性（臨界電流密度）の向上が必要である。銀シース Bi2223 テープ材における臨界電流密度は微細組織、特に 2223 相の析出量に影響を受ける。そこで、セラミックの仮焼温度を従来より 40 から 60 度低い 1023 K 付近にすることで 2223 相の析出量が増し、不純物相が減少した。これは、仮焼直後には 3430 と呼ばれる相が最も多く析出しており、そのため、2223 相の形成速度が速いことがわかった。このことは、2223 相の形成には 2212 相の増加と 2212 相から 2223 相への変化という二つの過程があり、それぞれの反応速度の違いより説明できる。また最終熱処理における酸素分圧を変化させ、7.8%と低圧にしたところ 2223 相が多く析出した。これらの結果、臨界電流密度を従来の 2 から 3 倍向上させることに成功した。

### 走査ホールプローブの開発と磁場分布の観測

超伝導線材は、材料内部の空間的不均一性が特性に大きく影響を与える。そこで、ホールセンサーを試料表面上を走査させることで、磁場分布像を得ることのできる走査ホールプローブを開発し、Bi2223 銀シーステープ材を用いて磁場分布を観察、その不均一性について調べた。その結果、磁場分布から算出した臨界電流密度は試料のエッジに沿って分布しており、試料内部で一定の電流密度を仮定する Bean モデルとは一致しなかった。また、試料個別に磁場不均一性が観察され組織が不均一であることがわかった。

### Nb 基多層超伝導体のピンニング特性

超伝導材の臨界電流密度 ( $J_c$ ) の向上に重要な役割を果たす、磁束ピンニングについての研究を行っている。ピンニングセンターの導入方法は多種知られているが、そのうち、複合加工法により人工ピンニングを導入し数十 nm のメゾスコピックスケールの微細な組織を形成させることでピンニングセンターをつくる方法をとった。そこで第二種超伝導体の Nb に対しピンニングセンターとして常伝導の Cu を利用した人工ピンニング導入により超伝導特性の向上を計った。材料は箔から出発し、Jelly-Roll 法により得た多層材を熱間押し出し、溝ロール圧延、線引き等により線材に加工し、組織観察および臨界電流、臨界温度 ( $T_c$ ) を測定した。その結果、層間隔が小さくなるにつれ、 $J_c$  は高くなるが、小さすぎるとかえって  $J_c$  は小さくなり、 $T_c$  は低くなることが分かった。

### 第二種超伝導体における磁束格子の観測と理論との対応

第二種超伝導体の混合状態では、磁束は量子化される。ある特殊な過程のもとで GL 方程式の解を求めると磁束は三角格子を組むことがわかる。そこで、磁束格子の周期的変調を中性子を用いた Bragg 散乱によって観測した。その結果、三角格子ではあるが初期の理論より予測される 6 回対称性ではなく 2 回対称性をもつ歪んだ格子が観測された。また、外部磁場と結晶方向の相対的な関係を変えて調べることで、磁束線が結晶の対称性の高い方向に沿う傾向にあることがわかった。

### 高強度 Al 基合金のメゾスケール構造における材料設計

従来より当研究室ではメゾスケールの構造を制御し Al 合金の高強度化はかっている。今までに析出強化型の Al-Zn-Mg-Cu 合金のアトマイズ粉に微量元素として Mn を添加し熱間押し出した合金で高強度が得られている。今回、構造解析をした結果 Mn 金属間化合物が押し出し方向に繊維状に析出し、強化されていることがわかった。また、Mn の添加により析出相の体積率が増加していることもわかった。今後、これらの結果より合金設計を行い、引張強度 1 MPa を目指す。

### Al 基、Fe 基合金の相分解における構造変化

合金の過飽和固溶体は原子の拡散を介し相分解する。この現象を調べることは、材料科学のみならず非平衡統計物理学にとっても、きわめて意義がある。当研究室では Al-Zn、Fe-Cr 合金のスピンノーダル分解過程における構造変化を、X 線もしくは中性子小角散乱法を用いて調べた。その結果、Fe-Cr 合金では初期は濃度揺らぎの振幅が大きくなることで説明される Cahn らによる線形スピンノーダル理論に従い、やがて、クラスターの拡散や反応によって説明される Binder らの理論に従うことがわかった。また、また、等温時効に従う硬さの変化を調べたところ、小角散乱の結果と対応し、濃度揺らぎによる内部応力に関係していることがわかった。

教 授 長村 光造

助 手 奥田 浩司

**材料構造物性講座****1. 非周期系物質の局所構造解析と物性**

非晶質金属、酸化物ガラス、水溶液などの非周期系物質の局所構造を、ある特定元素の周りの局所構造を決定することができる X 線異常散乱法、EXAFS 法などを使い解析し、物性との関係を検討し新しい知見を提供している。この分野での研究の1つは、これまで報告されている非晶質金属とは異なり、非常に熱的に安定なまったく新しい種類の非晶質金属である金属ガラスに着目し、これら金属ガラスの熱的安定性発現の機構を構造の立場から考察することである。特に本年は、これまで行ってきた Zr-Al-Ni 系金属ガラスに加え、最近特に注目されている磁性を示す Nd 基金属ガラスに注目し、局所構造と熱的安定性、磁気的特性の関連について考察する。また、いろいろと不明な点が多い合金メッキに注目し、メッキ膜ばかりでなく、メッキ浴中の金属カチオンの周りの局所構造解析も行い、これらの情報をもとに、合金メッキの機構について考察する。この研究では、表面処理工学講座と共同で、昨年行ってきた Ni-Mo 合金誘起共析メッキ中の金属イオンの局所構造と電析挙動の関係を明らかにすると共に、本年度は Zn-Cd, Cd-Te 合金メッキの機構を構造の立場から考察する。

**2. X 線全反射法による非晶質合金薄膜の構造解析**

半導体産業などを中心に、保護膜や絶縁膜としてますます数10ナノメートル以下の厚さの非晶質薄膜の役割が重要になってきている。しかし、このような薄い非晶質薄膜の構造に関する情報は、構造解析の手法が確立していないこともあり、非常に不足している。そこで、昨年より X 線の試料への侵入深さを数ナノメートルから数10ナノメートルに限定することができる X 線全反射法を用いて、これら非晶質薄膜の構造解析を試みてきた。今年度は昨年度手掛けて一様の成果をあげることができた SiO<sub>2</sub> ガラス薄膜の結果をふまえ、窒化珪素薄膜、さらには酸化・窒化珪素薄膜の構造解析を行う。そして、これら薄膜の電気的特性と局所構造との関係についての知見を得る。

**3. 新しいタイプの位置敏感型蛍光分析装置の開発**

現在、民間企業との共同開発で進めている湾曲型グラフアイト結晶の作製及び X 線光学素子への応用に関する研究の延長として、この新しいグラフアイト結晶を使って、位置敏感型の蛍光 X 線分析装置の試作を行う。蛍光 X 線装置自体は取りたてて新しいものではないが、本装置の特徴は 0.1 mm 程度の位置分解能を備えた2次元的な蛍光 X 線分布を測定することができる装置を試作することである。したがって、EPMA に比べれば位置分解能は劣るものの、空気中で行えることや定量性に優れていることなど、いくつかの利点も存在する。

**4. Zn-Al 合金における加工軟化に及ぼす熱機械処理の影響**

本研究では、Zn-Al 合金において加工軟化が起こるための条件を、合金の組成、加工と熱処理について調べた。その結果、前処理の条件に関係なく、Al-rich 合金では加工硬化が、Zn-rich 合金では加工軟化が起こることが確認された。加工軟化を起こす合金では硬度測定と組織観察により回復再結晶が起こっていることが確認された。さらに、冷間加工により固溶していた Al 原子の析出が起こり、再結晶温度が室温以下にまで低下して、加工した合金の回復再結晶が室温で進行することが示唆された。Al-rich 合金では加工軟化は抑制される。これは Zn 原子の析出が相対的に抑制され、G.P.ゾーンの生成された状態で留まるために回復再結晶が進行しないためである。

**5. Zn-Al 合金における加工中の析出、回復再結晶と加工軟化**

Zn-Al 合金において、Al-rich 合金では加工硬化が、Zn-rich 合金では加工軟化が起こる。加工軟化した合金を溶体化処理すると硬度値は増大し、加工硬化した合金を溶体化処理すると硬度値は減少する。電気抵抗は溶体化処理すると加工軟化した合金でも加工硬化した合金でも増大する。組織観察をすると、加工軟化した合金では回復再結晶の進行中の組織が、加工硬化した合金では圧延集合組織が認められる。X 線回折によると、Al-rich 相の格子定数は純 Al のそれ、Zn-rich 相の格子定数は純 Zn のそれに一致することが確認された。Al-rich 合金では室温時効中に硬化し、電気抵抗は増大する。Zn-rich 合金では室温時効中に軟化し、電気抵抗は減少する。これらの実験結果は加工中に析出、回復再結晶が起こることの証拠となっている。こうして、加工軟化の機構はつぎのようになる。冷間加工によって Al の析出が起こり、再結晶温度が低下して、室温で回復再結晶が起こることにより、加工軟化が起こる。

助教授 松原英一郎

助手 山本 悟

## 材質制御学講座

本研究室では、鉄鋼およびチタン合金を中心とした構造金属材料の組織・材質の制御に関する基礎研究として、相変態・析出・再結晶についての組織学的・結晶学的研究を行っている。同時にこれらと密接に関係する現象（例えば超塑性変形や形状記憶効果など）の機構解明や特性改善に関する研究も行っている。

以下に、最近の研究成果の概要を示す。

### 鉄合金の圧延・再結晶に関する研究

再結晶粒は加工により導入された不均一変形部より優先的に生成するため、再結晶機構の解明及び再結晶集合組織の制御には不均一変形部の詳細な観察が不可欠である。試料として Fe-19Cr フェライト合金を用い、(111)板面方位の単結晶材および双結晶材を作製して、圧延および再結晶組織の観察を行った。その結果、(1) (111) [112] 単結晶では、種々の方向からの透過電子顕微鏡観察を行うことによって、圧延により導入される剪断帯の組織学・結晶学的特徴を明らかにして Goss 方位 ((101) [010]) 再結晶粒の剪断帯からの優先生成機構に関する知見を得た。(2) (111) <110>- (111) <112> 双結晶材では、接合界面近傍とそれより離れた領域での変形組織と結晶方位の違いを明らかにした。さらに、粒界近傍では単結晶試料では観察されない {111} 板面方位を持つ再結晶粒が多数生成することを見いだした。

### 極低炭素鋼の $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態組織に関する研究

近年注目されている一般構造用極低炭素鋼の熱処理と組織制御に関する知見を得るため、炭素量 0.01 mass% 以下の極低炭素 3%Mn 鋼における各種相変態組織について詳細な観察を行った。その結果、(1) ラスマルテンサイトは低炭素鋼の場合と比べると、ラス幅が大きいことしか違いがない。(2) 極低炭素鋼では、変態温度の低下に伴うベイナイトからマルテンサイトへの組織変化は連続的であり、組織の上で両者を明瞭に区別するのは困難である。(3) 3%Mn-40 ppmC 鋼では変態温度の低下に伴い  $\alpha$  相の形態は塊状から針状へと変化した。これらの  $\alpha$  相の生成に際しては、Mn の分配は見られず、その変態率および変態温度は NPLe (negligible-partitioning local equilibrium) モードでの変態によって説明できる、ことが明らかとなった。

### $\beta$ 型チタン合金の組織制御に関する研究

$\beta$  型チタン合金における新たな  $\alpha$  相析出組織制御として、2 相分離を利用する熱処理法の有用性と析出相の組織学的・結晶学的特徴を明らかにする研究を行った。試料として Ti-Mo 二元合金を取りあげ広い温度範囲で等温変態組織を調べた結果、(1) Ti-(10-30) mass% Mo 合金では  $\alpha$  相の析出は粒界から起こりその後粒内へと進行する。一方、Ti-40 mass% Mo 合金では 823 K 以上では  $\alpha$  相は粒界や転位上に不均一析出するのに対して、

823 K 以下では  $\beta$  相の 2 相分離で生じた  $\beta'$  相をサイトとして微細に析出する。(2)  $\alpha$  相の界面は整合性が良く、変態に際して格子位置の対応が存在する。(3) Ti-(10-30) Mo と Ti-40 Mo 合金において  $\alpha$  相の形態および結晶学的特徴（晶癖面、方位関係）が大きく異なる原因が、変態歪の緩和様式および度合が両合金で異なるためである、ことを見出した。

### 鉄鋼における B1 型介在物の結晶学および界面構造に関する研究

鉄鋼材料のオキシドメトラジーでは B1 型介在物が  $\alpha$  相の核生成サイトとして重要な働きをするが、介在物の結晶学的特徴が不明のため介在物の効果に関する統一的理解がなされていない。本研究では、 $\gamma$  相が室温で残存する合金を設計した上で鉄鋼において析出する B1 型介在物の形態・結晶学・界面構造を詳細に調べた。その結果、(1) オーステナイトより析出した VC、TiC は母相との間に Cube-Cube の方位関係を満たし {111} で囲まれた八面体の形態を示すのに対して、MnS は Cube-on-Edge の関係を満たし、{001} 面を晶壁面とする板状形態を示す。フェライトより析出した MnS は母相に対して Cube-Cube の関係を満たす。(2) 析出物界面は規則的に配列したミスフィット転位を含んでおり、半整合構造を示す。(3) 方位関係の変化は、格子定数の差より生じる歪みエネルギーを最小にするような格子対応関係を選ばれるために起こる。(4) 析出物/母相界面エネルギーの計算に基づいて、VC、TiC はフェライトの核生成サイトとして高い能力を持つが、MnS の能力は粒界よりも低い、ことを見出した。

教授 牧 正志

助教授 津崎 兼彰

助手 古原 忠

**材料評価学研究室講座****固体におけるクラックと動的欠陥の相互作用**

クラック進展力に及ぼす易動性侵入型原子の影響に注目して、クラック先端近傍の弾性欠陥による力学状態変化が、2D、3D解析関数を用いて調べられた。クラックを含む固体に引張荷重を負荷すると、それによって誘起される  $K_I$  場はクラック先端近傍へ侵入型欠陥を集中させる役割を担う。この  $K_I$  場のみによる欠陥の再配列は、局所応力拡大係数  $k_I$  の変化に直接的な影響を与えない。しかし、クラック面の存在による鏡像力によって欠陥同士に相互作用力が生じ、欠陥の配列を変化させて局所  $K_I$  場を強めるように働くため、間接的にクラック進展力の増大をもたらす。欠陥の再配列は、欠陥の正方歪みによっても強く影響される。欠陥の大きな正方歪みはクラック前方への板状析出を促進し、局所応力拡大係数  $k_I$  の値を増大させる。この欠陥再配列のクラック進展に及ぼす効果は、脆性破壊の時間依存性の対する実験結果と関連させて考察された。

**NaCl 結晶の脆性一延性遷移**

NaCl 結晶を用いて、脆性一延性遷移に及ぼす活動すべり系や転位組織の影響が調べられた。NaCl 結晶の靱性値は 400 K 付近から急激に増大し、この 400 K の温度は交差すべりの活動開始温度と一致している。この交差すべりの活動面は、主すべり面  $\{10\bar{1}\}$  とのなす角が  $45^\circ$  以下の面に分布し、その中で  $\{2\bar{1}2\}$  への交差すべりが最も多く観察される。初期の亜粒界密度を変化させて破壊靱性値を測定した結果、遷移温度より低い温度での靱性値は亜粒界密度の高いほど大きくなるが、亜粒界密度は脆性一延性遷移温度に影響を与えない。また、同様に初期転位密度を変化させた場合にも、脆性一延性遷移温度は変化しない。このことは NaCl 結晶の脆性一延性遷移がシリコンのような転位の易動度律速ではないことを示している。以上の実験結果をもとに、交差すべりによる応力緩和機構が遷移温度近傍における靱性値増大に果たす役割について考察を加えた。

**DC アークプラズマジェット法による機能材料の合成反応の解明**

DC アークプラズマジェットは、いわゆる気相合成法 CVD の一種であるが、他のプラズマ CVD 法に比べて著しく、生成（反応）速度が高く、既存材料の表面改質には最適である。しかしながら、プラズマ反応は非平衡で、種々の反応が複雑に重量しており、合成反応機構の解明は容易ではない。

ここでは、基板にチタンの厚板を用い窒素-水素混合プラズマ中での TiN の生成機構が、プラズマ炎からの分光によるラディカルイオン種の検出・同定および二次元分布同定によって調べられた。反応温度は 1200 から 1400°C で雰囲気圧力は 100 から 300 torr. であった。

分光同定の結果から、このプラズマ中での反応活性種のラディカルは NH であることが判明した。NH ラディカルは水素が化学量論的に過剰な場合には窒素ガスの解離度に依存することが明らかにされた。

適当な条件の下では、TiN 皮膜の生成速度は、50~100  $\mu\text{m/hr}$  に達し、皮膜と基板との密着性は強固で、傾斜的な硬度分布を示し表面改質皮膜として有望であることが示された。

助教授 成田 舒孝

講師 富井 洋一



## エネルギー社会工学講座

## 繰返し圧延によるナノスケール積層合金の作製

人工格子と呼ばれるような、層の厚みを原子レベルで制御して積層された多層膜がバルクとは異なる特異な物性を示すことがある。巨大磁気抵抗効果はそのような例の一つにあげられる。この現象は強磁性金属と非磁性金属からなる多層膜において、層厚がナノメートルのオーダーにまで小さい場合に生じる磁化配列が原因となって起こる。一般に、このようなナノスケールの多層膜は蒸着という手段、すなわち原子スケールからのアプローチにより作製される。本研究ではこれとは全く異なり、バルク材料からのアプローチ、具体的には一軸圧縮もしくは圧延で繰返し塑性変形を施すことによりナノスケールの多層体を作製した。そしてその多層体の磁気抵抗効果について調べた。

本研究ではFe/AgとNi/Agの2種類の多層体を作製した。方法としては厚さ30 $\mu\text{m}$ のAg、50 $\mu\text{m}$ のFe、10 $\mu\text{m}$ のNiをFeとAgもしくはNiとAgを交互にそれぞれ100枚ずつ重ねたものを出発材料として、300°Cでのプレスまたは圧延により塑性変形し、さらにそれを切断して重ね、再び塑性変形を施す、という操作を繰返すことによって試料全体としての厚みを減らし、極めて薄い多層構造を有する合金を作製した。なお各塑性変形を施す前には873 Kでの真空焼鈍を行った。

Fig. 1 は試料全体の厚さを1/2770まで減らしたFe/Ag多層合金の断面をTEM観察したものである。この



Fig. 1 Fe/Ag多層体の断面 (1/2770)

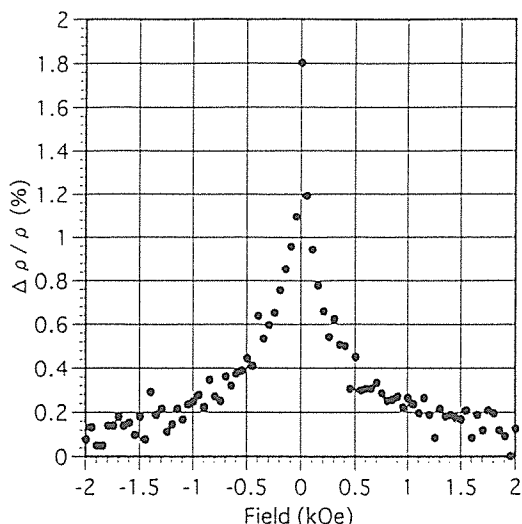


Fig. 2 Fe/Ag多層体のMR

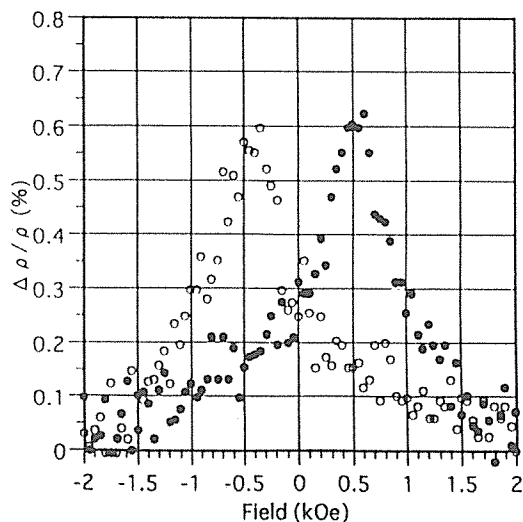


Fig. 3 Ni/Ag多層体のMR

全体の圧縮率で各層も薄くなっているとするとAg層は11 nmである。実際にこの写真より得られるAgの層厚は平均して約50 nmである。Fig. 2, Fig. 3はFe/Ag, Ni/Agにおいてそれぞれ1/52800, 1/11236まで加工した試料の磁気抵抗測定結果である。Fe/Agにおいて1.8%, Ni/Agにおいては0.6%の磁気抵抗変化( $\Delta\rho/\rho$ )を示した。この結果からこれらの多層合金の層厚はナノメートルのオーダーまで達していることがわかる。

教授 新宮 秀夫  
助教授 石原 慶一  
助手 大槻 徹

## 材料プロセス物理化学講座

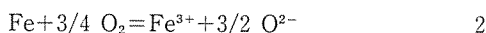
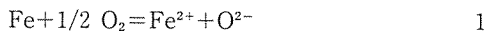
当分野では金属精錬に関する熱力学、材料の精製・リサイクルプロセスに関する物理化学を研究分野とし、溶融スラグ中の酸化鉄の活量、ガラス中の炭酸ガス溶解度、シリコン期合金と溶融フラックス間の成分分配係数などの測定や、製鋼用スラグの水和反応のメカニズムの解明などのテーマで研究活動をおこなっている。ここでは、1つのテーマを例にとり、その研究内容を紹介する。

【テーマ】希薄な酸化鉄を含む酸化物融体中での酸化鉄の活量

【目的】これまで溶鉄と平衡するスラグ中の  $\text{Fe}_x\text{O}$  の活量に関して多くの報告が有るが、酸素分圧の制御又は測定が困難であるなどの理由により、1873 K において  $\text{Fe}_x\text{O}$  の希薄領域での測定値はほとんど報告がない。しかし、純鉄が共存しない条件下では鉄の活量と酸素分圧、酸化鉄濃度との相互の関係は比較的容易に実測可能である。

本研究では  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$  に  $\text{Fe}_x\text{O}$  を加えた酸化物系スラグを測定対象として酸素分圧既知の雰囲気下での鉄+白金合金とスラグ間の鉄、並びに、スラグ中の  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$  の分配を実験的に調査し、独自の手法を適用して、得られた実測値からの溶鉄と平衡するときの酸化鉄の活量の算出を試みた。

【原理】白金中の鉄、酸素分圧、フラックス中の  $\text{Fe}^{2+}$  または  $\text{Fe}^{3+}$  との間には次式



の平衡関係が成立する。 $\text{Fe}^{2+}$  または  $\text{Fe}^{3+}$  のキャパシティーを次2式で定義する。

$$\begin{aligned} C\text{Fe}^{2+} &= (\% \text{Fe}^{2+}) / (a_{\text{Fe}} \times p_{\text{O}_2}^{1/2}) \\ &= K_1 / (\gamma_{\text{Fe}^{2+}} \times a_{\text{O}^{2-}}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C\text{Fe}^{3+} &= (\% \text{Fe}^{3+}) / (a_{\text{Fe}} \times p_{\text{O}_2}^{3/4}) \\ &= K_2 / (\gamma_{\text{Fe}^{3+}} \times a_{\text{O}^{2-}}^{3/2}) \end{aligned}$$

キャパシティーは、希薄融体に適用できるスラグ固有の物性値であり、酸化鉄を除くスラグ中の成分組成と温度のみの関数で与えられる。

溶鉄と平衡するとき、 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$  イオン濃度はそれぞれ、 $C\text{Fe}^{2+} \times p_{\text{O}_2}^{1/2}$ 、 $C\text{Fe}^{3+} \times p_{\text{O}_2}^{1/2}$  で与えられるので、次式で定義される酸化鉄濃度、

$$X\text{Fe}_x\text{O} = \frac{(\% \text{Fe}^{2+}) + 1.5(\% \text{Fe}^{3+})}{(\% \text{Fe}^{2+}) + 1.5(\% \text{Fe}^{3+}) + \text{const.}}$$

および、溶鉄と平衡する酸化鉄を基準にした酸化鉄の活量係数、

$$\log \gamma_{\text{Fe}_x\text{O}} = \log \frac{p_{\text{O}_2}^{1/2}}{X_{\text{Fe}_x\text{O}}} - \frac{\Delta G_{\text{Fe}_x\text{O}}}{2.303 RT}$$

は、ともに酸素分圧の関数で与えられる。すなわち、酸

素分圧を媒介変数として、酸化鉄濃度と活量係数の関係を定量的に記述できる。

【手法】るつぼとして使用する白金と酸化鉄含有スラグおよび  $\text{CO}/\text{CO}_2$  混合ガス ( $p_{\text{O}_2} = 10^{-6.3} \sim 10^{-3.7}$ ) を 1873 K にて平衡させ、急冷後、白金鉄合金およびスラグを中の Fe を化学分析により定量する。

【結果】 $\text{Fe}^{2+}$  または  $\text{Fe}^{3+}$  のキャパシティーは測定の対象とした酸素分圧、鉄の活量の範囲内において一定値を示すことが確認できた。

これらのキャパシティーの値を元に算出した活量係数は酸化鉄濃度に依存すること、 $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  に対する依存性が少ないこと、活量係数は 0 以上でありラウルより正に偏位していることがわかった。

教 授 岩瀬 正則

助教授 藤原 弘康

## エネルギー材料学講座

### 低温用ゼーベック素子の製造と評価

自然界に恒久的に存在する温度差を利用して、ゼーベック効果により電力を取り出すシステムを探索している。熱機関では電気に変換することが難しい、例えば地表温度と気温、あるいは水温とのわずかの温度差から発電することを目標に必要な基礎項目を検討している。大量生産が可能で、資源的制約の少ない鉄合金に現在その可能性を求め、実用化されている金属熱電対と同程度の熱電性能を有する Fe-Si, Fe-Al 合金を実験的に見出した。素子の最適形状を計算機シミュレーションで設計後、これらの合金を使用してゼーベック素子を実際に組み立て、その特性や発電量を評価している。また本合金系の素子の大量生産プロセスを種々検討し提案している。

### 溶融塩を用いたシリサイドコーティング

鉄の表面にシリサイドを形成させると、耐食性、高温耐酸化性が改善される。機械的性質を劣化させることなくシリサイドを被覆する技術が望まれている。本研究室では簡便でかつ材料形状を選ばない溶融塩を用いた方法により、コーティングを試みている。KCl-NaCl-NaF-Na<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>を成分とする溶融塩に Si 粉末を加えた塩は、不均化反応により鉄基板上にシリサイドを形成した。溶融塩にさらに SiO<sub>2</sub>を添加すれば、塩の組成の経時変化を抑制し、安定したシリサイド皮膜形成が可能となった。皮膜は食塩水に対する耐食性がステンレスを上回る金属間化合物 Fe<sub>3</sub>Si からなり、浸漬温度が高く、浸漬時間が長いほど、平滑な皮膜表面が得られた。鉄基板から Fe が拡散するので皮膜下層は多孔質となるが、Fe 以外の金属にも被覆可能である。

### 溶融金属とアンモニアガスとの反応

高温アンモニアガスと溶融金属との相互作用を実験的に調査している。種々の溶融金属にアンモニアガスを作用させたところ、Cu, Ge, Sn において著しい蒸発現象が確認されたが、Ag, Au, Ni, Mn, Al, Zn, Si, Pb については認められない。現在、Cu, Ge, Sn の蒸発速度に焦点を絞り、吹き付けガス中の窒素ポテンシャルや、溶湯温度などの効果について実験を行っている。例えば、アンモニア-水素混合ガスを使用し、窒素ポテンシャルを制御したところ、少量の水素を混合した高窒素分圧側で蒸発速度が顕著に上昇したことなどから、Cu, Ge については不安定な窒化物ガスを生成して蒸発しているものと考えている。

高温で不安定なアンモニアガス単体の性質についてガス分析より平衡論的、速度論的見地からも解析を行っているが、エンジンの燃焼解析用のレーザー光により溶銅からたなびく煙状の真球状微粒子の流れを可視化したり、分光学的手法で溶銅とアンモニアガスとの反応生成

物を調査するなど、他研究室とも共同研究を進めている。

### 溶銅の NH<sub>3</sub>ガス上吹減圧脱銅・脱錫精錬

品質劣化したスクラップをいかに高級鋼種に再利用するか、その技術やシステムの開発が求められている。この研究はトランプ・エレメントの除去に対する技術開発であり、特に問題とされる Cu, Sn の溶銅からの除去を目的としている。NH<sub>3</sub>ガス吹き付けが Cu の蒸発を著しく促進することに着目した脱銅方法である「NH<sub>3</sub>ガス吹き付け脱銅法」を本研究室では開発している。本法は溶銅への NH<sub>3</sub>ガス吹き付けと同時に連続排気が有効であるので、工業的に達成可能な雰囲気圧(約 100Pa 前後)にて溶銅に NH<sub>3</sub>ガスを吹き付ける基礎実験を行い、溶銅中 Cu, Sn の除去に関する実験、および溶銅中酸素レベルと窒素溶解量の関係等について調べている。

0.3 kg 溶銅並びに 0.6 g 溶銅液滴からの脱銅速度は時間に対して一次の速度式で整理され、静止溶銅表面からの脱銅速度定数は、同一条件下での真空脱銅速度の十倍程度に相当する。NH<sub>3</sub>ガス吹き付けにより窒素溶解量が急激に増加するが、溶銅中の酸素により抑制しうること、さらに単なる減圧下での Sn の蒸発と比較して 2 倍程度の脱 Sn 促進効果があることなどを見出している。また精錬処理装置として環流式真空脱ガス装置 RH の適用を検討し、NH<sub>3</sub>ガスによる沸騰現象の積極的活用の必要性を指摘している。

### 溶融塩を用いたチタンの製造方法の開発

現在工業的に生産されているチタンは全量が TiCl<sub>4</sub>を金属 Mg で還元する Kroll 法により製造されている。本研究では Kroll 法の原理を踏襲するが、スポンジチタンではなく、粉末 Ti の連続的製造を目的として溶融塩を利用する方法を試行錯誤している。

現在開発中のプロセスは、MgCl<sub>2</sub>を含む溶融塩の上部に溶融 Mg をおき、下部よりガスとして TiCl<sub>4</sub>を吹き込み、二液相界面で還元反応を生じさせる方法である。この場合、還元生成物である Ti は 10 mm 程度の粉末状であり、溶融塩中を懸濁しながらも沈降し堆積する。もう一方の生成物 MgCl<sub>2</sub>は溶融塩にとけ込む。金属 Mg や溶融塩の循環により連続還元が可能なプロセスと考えている。ガス吹き込み方法、二液相分離を生じる溶融塩の組成、温度コントロールなどの難点を実験的に克服しつつあり、粉末チタンの製造に成功している。

そのほか、電子ビーム溶解精錬、超伝導酸化物の熱力学、非平衡ガスと無機物との反応、等の研究も行っている。最新情報はインターネットで研究室のホームページ URL: <http://marilyn.mtl.kyoto-u.ac.jp/meibo.html> をご覧下さい。

教授 小野 勝敏  
助教授 鈴木 亮輔  
助手 植田 幸富

## メゾ材料基礎工学講座

### STM 接合容量の研究

STM の探針と試料の間の容量の異常な距離依存性について、昨年度より研究を継続している。今年度は半導体表面の空間電荷層の寄与を調べるために、接合容量の C-V 特性を中心に研究を行った。その結果、半導体清浄表面における接合容量は全く C-V 特性を示さず、また試料の n 型・p 型にも依存しないことが明らかになった。

この結果は、清浄表面の表面状態によってフェルミ準位が強くピンニングされているためであるとして説明される。酸素吸着によって表面状態を取り除く実験を行ったが、酸素吸着表面でも C-V 特性は現れず、まだ Fermi 準位のピンニングが十分に解除されていないことが示唆される。

### Si 表面のバリアハイトイメージング

Si (111) の清浄表面および酸素吸着面、ならびに Si (001) のカリウム吸着面について、バリアハイトイメージング法により表面における局所的なトンネル障壁の分布の観察を行った。清浄表面ではトンネル障壁の像においても原子のコントラストが現れており、これは表面の波動関数の減衰の変動による効果である。酸素吸着面では、トンネル障壁が局所的に高くなる原子サイズの大きさのスポットがいくつか観察されているが、このスポットの成因については、まだ説明が得られていない。Si (001) のカリウム吸着面では、カリウムの吸着箇所においてトンネル障壁が低下していることが観察され、アルカリ吸着による仕事関数の低下が局所的に起きていることが理解される。

### 走査トンネル分光 (STS) の高速化

通常の走査トンネル分光測定では、STM のバイアス電圧をスweepしてトンネル電流の I-V 特性を測定するが、STM 接合の浮遊容量による容量性電流の寄与が大きくなるために、余り高速にバイアス電圧をスweepすることができない。そこでこの容量性電流を打ち消すための回路を付加し、走査トンネル分光の高速化を試みた。

測定は Si (111) および Si (001) 清浄表面で行い、2.5 V / msec のバイアス電圧スweepでも I-V 特性の測定が可能であることが明らかとなった。しかし電流増幅器の帯域による制限があるため、今後の高速化はむしろ電流増幅器の性能に依存することになる。

### ポーラス Si の発光に関する研究

ポーラス Si の発光スペクトルの強度分布、減衰特性、およびそれらの温度依存性を測定し、多くの興味深い結果を得ている (工・電子物性・藤田研究室から多大の便宜を頂戴している)。特に発光の減衰の温度依存性は通常の半導体のものと異なっており、現在その機構について

検討を進めている。またポーラス Si に対する走査トンネル分光 (STS) を行い、発光のピーク位置と STS によるバンドギャップが対応して変化していることが見出されている。さらに、空気中に放置したポーラス Si からは青色発光が新たに発見されており、この青色発光はポーラス Si の薄い酸化皮膜に関連しているものと考えられる。

### 電界放射に対する表面偏析の研究

電界放射エミッタに金を蒸着すると、仕事関数が実質的に低下し、エミッション電流が安定化されることが知られている。我々は同様の効果が表面偏析によって得られることを期待して、金が強く偏析する Ni-0.8% Au 合金のエミッタを作製して、加熱前後での電界放射特性を測定した。その結果、加熱後は同じ電圧でのエミッション電流が増加し、仕事関数は約 0.6 eV も低下することが明らかになった。電界イオン顕微鏡によるエミッタの観察では、加熱によるエミッタ先端の形状変化は小さく、仕事関数の低下は金の表面偏析によるものであると考えられる。(大阪府立大学坂田研究室との共同研究)。

### 合金クラスターの表面偏析

バルク合金と合金クラスターとの偏析挙動の違いを調べるために、Cu-Ni 合金クラスターの表面偏析を、拡張ヒュッケル法により調べた。拡張ヒュッケル法では合金原子の入れ替えに対するエネルギーの計算結果の変動が大きく、偏析エネルギーを直接評価することが困難であるため、クラスター表面の合金組成を変えたときのエネルギー変化の傾向のみを調べることとなった。計算されたクラスターエネルギーは表面組成に対してほぼ直線的に変化しているが、まだ変動が大きく今後の改良が必要であると考えられる。

教 授 酒 井 明

講 師 諸 岡 明

## 会 報

## 「会員の声」の欄の投稿募集

編集委員会ではこのたび水曜会誌に「会員の声」の欄を設けることにいたしました。毎年、水曜会大会はがきの通信欄には数多くの近況報告が寄せられますが、なかには大学に対する意見や提言も見受けられます。「会員の声」はこのような会員のみなさまの幅広い意見を募集して掲載しようというものです。内容は大学や研究、水曜会に関係することであればなんでも結構です。とくに最近の大学の改組についての意見、企業サイドから見た大学教育への注文、水曜会の将来像などについては意見をお持ちの方も多いのではないのでしょうか。奮ってご投稿下さい。なお、「会員の声」の欄の投稿につきましては電子メールによる投稿を推進いたします。電子メール原稿の宛先は下記の通りです。もちろん、郵便による投稿（はがきも可）でも結構です。その場合は巻末の水曜会誌投稿規定にある原稿送付先までお送り下さい。みなさまからのご意見、提言をお待ちしています。

電子メールによる宛先

suiyoukai@mtl.kyoto-u.ac.jp

平成 8 年 3 月 卒 業 者 名 簿  
資 源 工 学 教 室

## 学部卒業

| 氏 名     | 研 究 論 文 題 目                                                 | 就 職 先    |
|---------|-------------------------------------------------------------|----------|
| 応用地質学講座 |                                                             |          |
| 上 原 芳 久 | 北海道サンルダム基礎岩盤の不連続面分布性状の確率統計学的評価に関する研究                        | 京都大学大学院  |
| 加 藤 大 樹 | カンラン岩岩盤のグラウチングによる変形性の改良効果に関する研究—水資源開発公団富郷ダム基礎を対象として—        | (株)地崎工業  |
| 小 浦 隆 志 | 東京電力(株)早川連絡水路トンネル経過地周辺地域の地質工学的調査・検討                         | 三井建設(株)  |
| 近 藤 聡 史 | グラウチングによる節理のせん断強度の改良効果に関する研究—挟在物の影響—                        | 京都大学大学院  |
| 住 吉 貴 文 | 建設省宮ヶ瀬ダムにおけるコンソリデーショングラウチングによる力学的改良効果に関する研究                 | 伊藤忠商事(株) |
| 永 田 光 敏 | 北海道滝里ダム並びに浦河ダム基礎岩盤におけるコンソリデーショングラウチングによる岩盤変形性の改良効果に関する研究    | (株)ハザマ   |
| 馬 場 正 弘 | 新第三紀栗原川溶結凝灰岩類の凍結融解作用による劣化特性に関する研究                           | 京都大学大学院  |
| 藤 田 士 郎 | 岩盤斜面を対象とした確率ブロック理論の適用に関する研究—比奈知ダム原石山及び富郷ダム基礎を対象として—         | 京都大学大学院  |
| 吉 田 眞 教 | 花崗岩岩盤のグラウチングによる変形性の改良効果に関する研究—水資源開発公団比奈知ダム基礎及び山口ダム基礎を対象として— | 京都大学大学院  |

| 氏 名                 | 研 究 論 文 題 目                                                 | 就 職 先          |
|---------------------|-------------------------------------------------------------|----------------|
| <b>探査工学講座</b>       |                                                             |                |
| 栗 原 正 樹             | 比抵抗トモグラフィにおける地表—ボーリング孔間電極配列データの解析                           | 京都大学大学院        |
| 野 田 英 宏             | Days-2 コードを用いた不均質媒質の破壊現象に関する研究                              | 旭化成工業(株)       |
| 宮 本 賢 治             | 地表電極配列データによる比抵抗逆解析                                          | 京都大学大学院        |
| 矢 野 達 也             | 弾性波を用いた亀裂探査のモデルシミュレーション                                     | 三和銀行(株)        |
| 山 下 彰               | 地下レーダによる埋設管探査に関する研究                                         | 京都大学大学院        |
| 横 井 康 真             | Time-Temperature-Index を用いた炭化水素の熟成度解析に関する研究                 | 特許庁            |
| 菊 池 善 則             | 反射法地震探査データの分解能の限界の検証に関する研究                                  | 京都大学大学院        |
| 式 森 孝 好             | 弾性波を用いたトンネル切羽前方探査に関する研究                                     | 京都大学大学院        |
| <b>開発工学講座</b>       |                                                             |                |
| 今 村 雅 弘             | 岩石の三軸圧縮試験における破壊後領域を含めた横方向変形の計測について                          | 京都大学大学院        |
| 小 川 浩 司             | 岩石不連続面のせん断による表面形状特性の変化について                                  | 京都大学大学院        |
| 丹 羽 愛 深             | 岩盤不連続面のスティーブネスによる表面特性評価について                                 | (株)クボタ         |
| <b>応用計測学講座</b>      |                                                             |                |
| 石 崎 重 隆             | フーリエ・ディスクリプター表現を用いた渦流探傷記録の認識に関する研究                          | 大阪ガス(株)        |
| 大久保 元 裕             | 長大斜坑巻上げロープの総合監視システムの構築                                      | NTT 関西移動通信網(株) |
| 加 藤 大 輔             | 静的破砕剤によって発現される円孔内圧分布の推定に関する研究                               | 京都大学大学院        |
| 黒 子 知 洋             | 交流磁界漏洩磁束探傷の基本特性に関する実験的研究                                    | 京都大学大学院        |
| 戸 田 和 人             | 坑内人車高速化のための車両動揺監視に関する研究                                     | (株)朝日新聞社       |
| 前 田 博 昭             | 大型吊構造ケーブルの腐食劣化の磁気検査に関する研究                                   | 三井火災海上保険(株)    |
| <b>精製工学講座</b>       |                                                             |                |
| 平成7年6月卒業<br>糸 田 賢 孝 | アンモニア性アルカリ溶液によるコバルトリッチクラストの浸出、—Cuの浸出性の改善—                   | 日本重化学工業(株)     |
| 平成8年3月卒業<br>入 谷 晃 弘 | H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 水溶液への SO <sub>2</sub> ガスの吸収速度 | 京都大学大学院        |
| 小 川 淑 子             | 都市廃棄物処理における重金属対策について                                        | 京都大学大学院        |
| 間 中 恵 子             | 無電解コバルトめっき廃液からの溶媒抽出法によるコバルトの回収に関する研究                        | 京都大学大学院        |
| 小 西 陽 子             | 微小重力下における電気化学的界面現象                                          | 京都大学大学院        |
| 田 中 秀 憲             | 廃家電製品のリサイクリングに関する研究                                         | 京セラ(株)         |
| 中 西 英 夫             | 超音波照射法によるサマリウム含有有機相からのシュウ酸サマリウム微粒子の生成に関する研究                 | 京都大学大学院        |
| 前 川 幸 司             | キレート試薬を用いた液—液抽出法による金属酸化物粒子の回収に関する研究                         | 京都大学大学院        |
| 別 所 昌 彦             | 超硬工具加工切削屑のリサイクリングに関する研究                                     | 京都大学大学院        |

| 氏 名                   | 研 究 論 文 題 目                                                                                                     | 就 職 先          |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| <b>加工設備学講座</b>        |                                                                                                                 |                |
| 面 高 正 明               | 変形を伴う気泡まわりの流れ場の数値解析                                                                                             | 京都大学大学院        |
| 木 村 雅 喜               | 平板に衝突するラミナー流により形成される水膜流の流れ場                                                                                     | 京都大学大学院        |
| 田 中 義 実               | 延性破壊を考慮した有限要素シミュレーションによる再絞り加工の成形限界予測                                                                            | 京都大学大学院        |
| 山 本 英 生               | 単一気泡を含む流れ場の VOF 法による数値解析                                                                                        | 京都大学大学院        |
| 横 谷 虎 彦               | 高温平板上に衝突する単一液滴の変形挙動に関する実験的研究                                                                                    | 京都大学大学院        |
| <b>大学院修士課程 資料工学専攻</b> |                                                                                                                 |                |
| 氏 名                   | 研 究 論 文 題 目                                                                                                     | 就 職 先          |
| <b>応用地質学講座</b>        |                                                                                                                 |                |
| 堤 直 己                 | 大規模地下空洞における情報化施工を目的とした確率ブロック理論の提案と検証                                                                            | 東京電力(株)        |
| 宮 本 健 也               | コンソリデーショングラウチングによる堆積岩岩盤の変形性の改良効果の検討ーダム基礎岩盤における検討ー                                                               | 建設省            |
| <b>探査工学講座</b>         |                                                                                                                 |                |
| 片 山 弘 行               | 時間領域電磁探査法に関する基礎的研究                                                                                              | 金属鉱業事業団        |
| 岸 田 隆 行               | 電気探査比抵抗トモグラフィに関する基礎的研究                                                                                          | (株)クボタ         |
| 高 見 康                 | 気体圧入による弾性波亀裂探査の高精度化に関する研究                                                                                       | NTT (株)        |
| 平 井 俊 之               | 格子点法による弾性波トモグラフィの高精度化に関する研究                                                                                     | (株)ニュージェック     |
| <b>開発工学講座</b>         |                                                                                                                 |                |
| 岡 本 繁 樹               | 岩石の三軸圧縮試験における破壊後領域での横方向変形に関する研究                                                                                 | 通商産業省          |
| 陳 友 晴                 | 蛍光法を適用したボアホールテレビジョンシステムによる割れ目の抽出                                                                                | 京都大学大学院(博士課程)  |
| 仲 井 幹 雄               | 岩石不連続面の2次元表面特性変化に基づいたせん断機構の解明に関する研究                                                                             | 前田建設工業(株)      |
| <b>応用計測学講座</b>        |                                                                                                                 |                |
| 神 谷 岳                 | 漏洩磁束探傷に及ぼす磁気ヒステリシスの影響に関する非線形解析                                                                                  | (株)村田製作所       |
| 原 田 昌 寛               | 復元フィルタを用いた漏洩磁束探傷画像の処理とそのシステム開発                                                                                  | 光洋精工(株)        |
| <b>加工設備学講座</b>        |                                                                                                                 |                |
| 岡 秀 行                 | Numerical Analysis of Flow Fields around a Deformable Gas Bubble Rising through an Incompressible Viscous Fluid | 名古屋大学工学研究科博士課程 |
| 木 下 健 治               | Deformation Behavior of Water Droplets Impinging on a Solid Surface Heated Above the Leidenfrost Temperature    | 東レ(株)          |
| 神 野 晶 弘               | Predictable Modelling of Forming Limit in Re-drawing of Aluminium Alloy Sheets Using Ductile Fracture Criterion | 新日本製鉄(株)       |
| 高 橋 雄一郎               | Numerical Analysis of Deformation Process of Gas Bubble by Using the VOF Method                                 | (株)日本総合研究所     |
| 福 本 学                 | Interferential Flow of Films Generated by Two Laminar Water Curtains Impinging on a Moving Plate Surface        | 住友金属工業(株)      |



## 大学院修士課程 環境地球工学専攻

| 氏 名                     | 研 究 論 文 題 目                                                                                                         | 就 職 先         |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| 資源循環工学講座                |                                                                                                                     |               |
| 天 野 則 之                 | 液一液抽出法による金属酸化物微粒子の回収に及ぼす金属イオンの影響                                                                                    | 日立造船(株)       |
| 石 田 尚 之                 | 疎水性鉱物表面への無機抑制剤の吸着に関する研究                                                                                             | 京都大学研究生       |
| 葛 谷 俊 博                 | 希土類磁石スクラップの湿式処理—Sm含有有機相からのシュウ酸による晶析逆抽出への超音波の利用—                                                                     | 京都大学大学院博士後期課程 |
| Danford Palick Mwaipopo | A fundamental study on the flotation separation of synthesized diamond and graphite (人工ダイヤモンドとグラファイトの浮選分離に関する基礎的研究) | 京都大学大学院博士後期課程 |
| Nelson Sembiring        | Synthesis of artificial zeolite from coal fly ash in power plant (火力発電フライアッシュからの人工ゼオライトの製造に関する研究)                   | 帰国            |

## 大学院博士後期課程 資源工学専攻

| 氏 名                  | 研 究 論 文 題 目                                                         | 就 職 先                           |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| 探査工学講座               |                                                                     |                                 |
| Teuku Abdullah Sanny | Improvement in the accuracy of shallow survey by seismic tomography | Bandung Institute of Technology |

## 材料工学・エネルギー応用工学教室

## 学部卒業

| 氏 名        | 研 究 論 文 題 目                                            | 就 職 先   |
|------------|--------------------------------------------------------|---------|
| 材料設計工学講座   |                                                        |         |
| 青 木 大 輔    | クラスター法による ZnO 表面の電子状態計算                                | 住友銀行    |
| 伊 藤 彰      | 金属クラスター中の不純物原子の電子状態計算                                  | 東京大学大学院 |
| 伊 藤 真 二    | MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> における正スピネルと乱れスピネルの電子状態 | 富士銀行    |
| 大 場 史 康    | チタン化合物の結合様式と X線吸収スペクトルとの関係                             | 京都大学大学院 |
| 川 島 紀 之    | MgO/遷移金属界面の化学結合状態                                      | 東京大学大学院 |
| 表面処理工学講座   |                                                        |         |
| 梅 中 靖 之    | アンモニア-アルカリ性水溶液からの ZnTe の電析                             | 東京大学大学院 |
| 岡 本 博 昭    | 弱酸水溶液からの水素発生の限界電流と電極表面の pH                             | 京都大学研究生 |
| 神 吉 剛 司    | ハロゲン化物水溶液のアノード酸化                                       | 京都大学大学院 |
| 京 屋 貴 則    | パルス電解法を用いる金属表面の合金化处理                                   | 東京大学大学院 |
| 砂 田 祐 之    | 塩化物浴からのニッケル電解採取の電流効率                                   | (株)コマツ  |
| 山 本 裕 基    | 臭化物を含む塩化第二銅水溶液による黄銅鉱の浸出                                | 京都大学大学院 |
| プロセス設計工学講座 |                                                        |         |
| 出 尾 晋 一    | CdTe の電析に関する研究                                         | 京都大学大学院 |
| 岩 崎 宗 之    | 固気インジェクションにおける物質移動                                     | 東京大学大学院 |
| 谷 澤 淳 也    | コバルト複合酸化物の合成とその電子状態に関する研究                              | ローム(株)  |
| 向 直 人      | グラファイト様 B-C 化合物の物性予測                                   | 東海銀行    |
| 山 崎 健太郎    | 還元拡散法による Nd-Ni 系金属間化合物の生成挙動                            | 凸版印刷(株) |
| 渡 部 裕 司    | 無機化合物の水中への溶解度に関する電子論的研究                                | 東京三菱銀行  |

| 氏 名              | 研 究 論 文 題 目                                                               | 就 職 先     |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>マイクロ材料学講座</b> |                                                                           |           |
| 青 山 智 胤          | p 型 GaN に対する電極材の電気特性における表面洗浄の効果                                           | 東京大学大学院   |
| 太 田 道 春          | スパッタ蒸着された InGaAs と n 型 GaAs 基板の界面反応                                       | 京都大学大学院   |
| 岡 田 毅            | 半導体 Si 上の Cu 薄膜配線における TiN 及び TiC 拡散バリアメタルに関する研究                           | 京都大学大学院   |
| 遠 山 隆 之          | p 型ダイアモンド半導体に対するグラファイト相蒸着によるオーミック電極の形成                                    | 京都大学大学院   |
| 福 水 裕 之          | p 型 ZnSe 半導体に対する表面処理による電気特性の変化                                            | 京都大学大学院   |
| 藤 田 聡            | GaN/Ta 界面における反応の解析                                                        | 京都大学大学院   |
| 堀 江 聡 寧          | 金属-半導体界面のコンタクト抵抗に関する理論的考察                                                 | 住友商事      |
| 村 尾 和 哉          | n 型 GaAs における NiGe(In)系オーミックコンタクト材の形成                                     | 京都大学大学院   |
| 森 岡 秀 夫          | p 型 ZnSe 半導体への CdSe 基コンタクト材の電気特性                                          | 東京大学大学院   |
| <b>量子材料学講座</b>   |                                                                           |           |
| 井 上 智 之          | YMn <sub>2</sub> の中性子回折                                                   | 東京大学大学院   |
| 神 田 英 之          | 金属-絶縁体転移を起こす BaVS <sub>3</sub> の置換効果                                      | 京都大学大学院   |
| 高 柿 和 典          | Dy <sub>1-x</sub> La <sub>x</sub> Mn <sub>2</sub> Ge <sub>2</sub> の磁気的性質  | 神鋼鋼線工業(株) |
| 谷 口 好 正          | Y(Mn <sub>1-x</sub> M <sub>x</sub> ) <sub>2</sub> (M=Sn, Ge, Si) の結晶構造と物性 | 東京大学大学院   |
| 谷 林 慧            | UPdCu <sub>4</sub> の核磁気緩和                                                 | 東京大学大学院   |
| 留 河 悟            | R <sub>2</sub> In の二重磁気転移 (R=Gd, Tb, Sm)                                  | 京都大学大学院   |
| 中 辻 知            | PrCu <sub>2</sub> の NMR                                                   | 京都大学大学院   |
| 萩 原 和 弘          | La-Mn-Sn 系における物質探索                                                        | 京都大学大学院   |
| <b>結晶物性工学講座</b>  |                                                                           |           |
| 梅 田 秀 俊          | TiAl・PST 結晶の強度と延性に及ぼす組成と純度の影響                                             | 京都大学大学院   |
| 中 原 敏 典          | TiAl・PST 結晶の変形挙動に及ぼす Ti <sub>3</sub> Al ( $\alpha$ 2) 層の影響                | 京都大学大学院   |
| 藤 居 俊 介          | Al, Pb のフォノン分散の理論計算                                                       | 京都大学大学院   |
| 増 田 喜 裕          | TiAl 合金の一方方向性凝固法によるラメラ組織制御                                                | 京都大学大学院   |
| 森 卓 史            | C11b 型遷移金属ダイシリサイド中の面欠陥                                                    | (株)ダイキン工業 |
| 森 脇 雅 也          | C40 型構造を有する Mo(Si, Al) <sub>2</sub> 単結晶の塑性変形                              | 京都大学大学院   |
| 山 本 篤史郎          | La-Ni 系二元合金の水素吸蔵特性に及ぼす合金組成の影響                                             | 京都大学大学院   |
| 渡 辺 寛 人          | TiAl 単結晶における<011>すべりの CRSS の方位依存性                                         | 京都大学大学院   |
| <b>格子欠陥物性学講座</b> |                                                                           |           |
| 足 立 大 樹          | $\alpha$ 鉄中の炭素とバナジウムの相互作用                                                 | 京都大学大学院   |
| 板 倉 克 裕          | ニッケル中の C-H 複合体形成                                                          | 京都大学大学院   |
| 小 野 目 寛 久        | MoSi <sub>2</sub> 弾性率の温度依存性                                               | 京都大学大学院   |
| 川 原 晃            | TiAl の弾性率の濃度依存性                                                           | 京都大学大学院   |
| 栗 田 信 明          | 金属間化合物における拡散機構                                                            | 京都大学大学院   |
| 横 山 英 樹          | パラジウム中の炭素の長距離/短距離拡散                                                       | 京都大学大学院   |

| 氏 名                 | 研 究 論 文 題 目                                                              | 就 職 先          |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------|----------------|
| <b>材料物理学講座</b>      |                                                                          |                |
| 大 竹 康一郎             | Fe-Cr 合金におけるスピノーダル分解構造と硬さの相関                                             | 京都大学大学院        |
| 角 野 孝 史             | 第二種超伝導体の量子化磁束の不均質構造の解明                                                   | 東京大学大学院        |
| 勝 村 義 輝             | Ag/Bi2223 テープ材の超伝導特性に及ぼす酸素分圧の影響                                          |                |
| 河 野 和 秀             | アルミニウム基メゾ材料の高強度化                                                         |                |
| 松 野 健 一             | 走査ホールプローブによる Ag/Bi2223 テープ材の磁場分布解析                                       | ㈱虹技<br>京都大学大学院 |
| <b>材料構造物性講座</b>     |                                                                          |                |
| 伊 藤 栄 基             | X線による Zn 基 Pb, In, Ti 合金融体の構造解析                                          | 京都大学大学院        |
| 植 川 英 治             | 吸光分光分析法による Ni-Mo 誘起共析メッキ浴の局所構造解析                                         | 京都大学大学院        |
| 垣 内 良 二             | 拡張ヒュッケル法による Cu 合金の固溶性と安定性の評価                                             | 京都大学大学院        |
| <b>材質制御学講座</b>      |                                                                          |                |
| 石 垣 一               | Ti-Mo2 元系平衡状態図の電気抵抗測定による検討                                               | 京都大学大学院        |
| 堺 健 次               | パーライト鋼の冷間圧延による加工硬化と組織変化                                                  | 東京大学大学院        |
| 佐 藤 亘               | Ni-43Cr 合金における FCC 柱状晶粒界からの BCC 析出の結晶学                                   | ㈱東芝            |
| 富 田 洋 祐             | フェライト系ステンレス鋼凝固柱状晶の熱間圧延材の再結晶挙動                                            | 東京大学大学院        |
| 中 城 伸 介             | Fe-19%Cr フェライト合金(001)[100]単結晶の冷間圧延組織                                     | 京都大学大学院        |
| 匹 田 和 夫             | Fe-Ni-Mn 合金のマルテンサイト変態の核生成サイトとして働いた結晶粒界の性格                                | 京都大学大学院        |
| 満 園 将 行             | Fe-19%Cr フェライト合金(001)[110]:(111)[110]双結晶の冷間圧延組織                          | 京都大学大学院        |
| 山 口 純               | 鉄鋼の粒内フェライト変態におよぼす MnS の役割                                                | 京都大学大学院        |
| <b>材料評価学講座</b>      |                                                                          |                |
| 柏 原 雅 之             | DC アークプラズマを用いた TiN の合成                                                   | 三宝伸銅工業㈱        |
| 川 添 敏               | NaCl 結晶の脆性-延性遷移                                                          | 東京大学大学院        |
| 河 本 孝 富             | イオン結晶の高温変形とその組織                                                          | 大和高田市職員        |
| <b>エネルギー社会工学講座</b>  |                                                                          |                |
| 香 川 崇               | 非平衡合金中の Cu の活量評価                                                         | 京都大学大学院        |
| 金 暢 大               | MA で作製した Cu-Co 合金の微細組織と超常磁性                                              | 京都大学大学院        |
| 小 林 敏 樹             | MA(繰返しプレス)による金属/樹脂人工格子の作製                                                | 京都大学大学院        |
| 長 曾 洋 一             | MA および PHIP 法による $Al_2Ti_4C_2$ /Ti-Al 複合材料の作製と評価                         | 京都大学大学院        |
| 永 田 佳 彦             | アークを熱源とする CVD 法によるダイヤモンドの作製                                              | 京都大学大学院        |
| 萩 原 優 幸             | 繰返し圧縮による Ni-Ag 多層体の作製                                                    | 京都大学大学院        |
| 森 史 成               | TiO <sub>2</sub> 光電極の作製と印加電圧による影響                                        | 京都大学大学院        |
| 張 欣                 | 一貫製鉄所におけるエネルギーバランスについて                                                   | 京都大学大学院        |
| <b>材料プロセス物理化学講座</b> |                                                                          |                |
| 竹 内 更太郎             | CaO+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +SiO <sub>2</sub> 系フラックス-Si 基合金間のリン分配 | 京都大学大学院        |
| 速 石 正 和             | 製鋼スラグの水和反応                                                               | 京都大学大学院        |

| 氏 名                   | 研 究 論 文 題 目                                                                                    | 就 職 先       |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>エネルギー材料学講座</b>     |                                                                                                |             |
| 相 澤 正 幸               | EB 蒸着 Ti による Nb 中酸素の極低化                                                                        | 京都大学大学院     |
| 安 藝 弘                 | 溶鋼からの脱 Sn                                                                                      | 京都大学大学院     |
| 石 川 正 純               | 溶融塩による高融点金属のシリサイドコーティング                                                                        | 京都大学大学院     |
| 奥 野 雅 弘               | NH <sub>3</sub> ガスによる溶融 Cu, Ge, Sn の蒸発                                                         | 京都大学大学院     |
| 加 藤 隆                 | 常温ゼーベック効果発電素子の形状最適化に関する研究                                                                      | 京都大学大学院     |
| 門 昌 輝                 | Fe-Al 合金のゼーベック係数, 熱伝導率, 比抵抗の測定                                                                 | 京都大学大学院     |
| 橋 村 一 誠               | Mg-MgCl <sub>2</sub> 浴中への TiCl <sub>4</sub> ガス吹き込みによる Ti 粉末の製造                                 | 京都大学大学院     |
| <b>メゾ材料基礎工学講座</b>     |                                                                                                |             |
| 井 口 堅                 | TiN 薄膜の STM 観察                                                                                 | 平井精密工業      |
| 佐 野 一 弥               | 表面偏析を利用した電界放出電子源に関する研究                                                                         | 日光化成        |
| 内 藤 英 臣               | 合金クラスターの表面偏析                                                                                   | 富士電機        |
| <b>大学院修士課程 材料工学専攻</b> |                                                                                                |             |
| 氏 名                   | 研 究 論 文 題 目                                                                                    | 就 職 先       |
| <b>材料設計工学講座</b>       |                                                                                                |             |
| 桑 原 浩 史               | 原子, イオンの硬さに関する電子論的考察                                                                           | 関西電力(株)     |
| 高 尾 直 樹               | 遷移金属ダイシリサイドの化学結合状態                                                                             | シャープ(株)     |
| 中 島 崇 之               | チタン酸化物の励起状態における電子構造                                                                            | 三菱自動車工業(株)  |
| <b>表面処理工学講座</b>       |                                                                                                |             |
| 佐 藤 彰 洋               | 2 価クロム浴を用いる Fe-Cr-Ni 合金電析                                                                      | 石川島播磨重工業    |
| 二 井 一 志               | 電析により得られた CdTe の光電気化学特性                                                                        | 松下電器産業      |
| 三 宅 孝 司               | 3 価クロムイオンを含むアルカリ性水溶液からの耐食性皮膜の作製                                                                | 三菱重工業       |
| <b>プロセス設計学講座</b>      |                                                                                                |             |
| 五十嵐 正 樹               | Zn-Pb 酸化焼結鉍の CO ガスによる還元速度                                                                      | INAX        |
| 久 保 和 造               | 二次イオン質料分析法 (SIMS) の定量性についての電子論的研究                                                              | 関西電力        |
| 中 岡 範 行               | 微小重力環境における銅の電析形態                                                                               | 日立金属        |
| <b>マイクロ材料学講座</b>      |                                                                                                |             |
| 石 川 英 憲               | The effects of surface treatments on the electrical properties of contact metals to p-type GaN | ソニー         |
| 小 林 節 子               | Interfacial reaction between p-type GaN and metal contacts                                     | 東芝          |
| 古 米 正 樹               | The effects of addition of third elements to NiGe ohmic contacts to n-type GaAs                | 住友電工        |
| 横 場 幹 人               | The formation mechanisms and the electrical properties of metal contacts to p-type diamond     | NTT         |
| <b>量子材料学講座</b>        |                                                                                                |             |
| 高 橋 晴 美               | Nuclear magnetic resonance study of RCu <sub>2</sub>                                           | (株)タモツ工業    |
| 光 田 暁 弘               | EuPd <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> の磁場誘起価数転移と置換効果                                               | 京都大学大学院博士課程 |
| 森 豪                   | 強相関電子系 Ni <sub>1-x</sub> S <sub>1-y</sub> Se <sub>y</sub> の低温比熱                                | シャープ(株)     |

| 氏 名                        | 研 究 論 文 題 目                                                                                                                                                           | 就 職 先       |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>結晶物性工学講座</b>            |                                                                                                                                                                       |             |
| 穴 戸 逸 朗                    | エネルギー選別型 $\beta^+-\gamma$ 同時計測陽電子寿命測定装置の開発                                                                                                                            | 日本 IBM      |
| 島 田 裕                      | TiAl PST 双結晶の作製と塑性変形                                                                                                                                                  | 三菱電機        |
| 三 浦 浩 之                    | 格子欠陥深さ分布測定のための、低速陽電子ビーム装置の開発と応用                                                                                                                                       | 京セラ         |
| 矢 野 尊 之                    | 单相および複相遷移金属 disilicides の組織と力学特性                                                                                                                                      | 三洋電機        |
| <b>格子欠陥物性学講座</b>           |                                                                                                                                                                       |             |
| 池 田 輝 之                    | L1 <sub>2</sub> 型 Ni 基金属間化合物における相互拡散                                                                                                                                  | 京都大学大学院博士課程 |
| 柏 崎 和 久                    | 内部摩擦法および磁気余効法によるニッケル中の炭素の挙動に関する研究                                                                                                                                     | 古河電工(株)     |
| 福 井 詔 一                    | 銅合金の弾性率に関する研究                                                                                                                                                         | 神戸製鋼所       |
| 八 木 博 史                    | 純銅における立方体方位集合組織の形成に関する研究                                                                                                                                              | クボタ         |
| <b>材料物理学講座</b>             |                                                                                                                                                                       |             |
| 野 中 荘 平                    | Bi2223 超伝導体の微細組織制御と臨界電流密度に関する研究                                                                                                                                       | 三菱マテリアル(株)  |
| 宮 田 成 紀                    | 第二種超伝導体における量子化磁束の構造とピンニング機構の解明                                                                                                                                        | 京都大学大学院博士課程 |
| <b>材料構造物性講座</b>            |                                                                                                                                                                       |             |
| 宇 田 哲 也                    | 拡張ヒュッケル法による安定性の評価と合金への応用                                                                                                                                              | 東北大学大学院博士課程 |
| 加 藤 邦 興                    | X線全反射回折法による SiO <sub>x</sub> 非晶質薄膜の局所構造解析                                                                                                                             | NTT         |
| <b>材質制御学講座</b>             |                                                                                                                                                                       |             |
| 有 岡 照 晃                    | 極低炭素 3%Mn 鋼の $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態に関する組織学的研究                                                                                                                 | 住友金属(株)     |
| 出 井 康 博                    | Ti-Mo2 元合金における析出 $\alpha$ 相の形態と結晶学                                                                                                                                    | 三菱電線工業(株)   |
| 小 林 英 之                    | Fe-19%Cr 合金の {111} 板面方位単結晶および双結晶の圧延・再結晶                                                                                                                               | 新日本製鐵(株)    |
| 杉 田 憲 彦                    | 鉄鋼における B1 型析出物の結晶学と界面構造                                                                                                                                               | (株)日立製作所    |
| <b>大学院修士課程 エネルギー応用工学専攻</b> |                                                                                                                                                                       |             |
| 氏 名                        | 研 究 論 文 題 目                                                                                                                                                           | 就 職 先       |
| <b>エネルギー社会工学講座</b>         |                                                                                                                                                                       |             |
| 中 田 充 浩                    | Reaction Milling および Psevdo HIP による TiAl 基複合材料の作製                                                                                                                     | 川崎重工業       |
| 迫 間 保 弘                    | メカニカルアロイングを利用した金属/ガラス多層膜組織の作製                                                                                                                                         | 大同特殊鋼       |
| 松 本 隆                      | RF スパッタリングによる TiO <sub>2</sub> 光電極の作製とその表面状態の改善の評価                                                                                                                    | 日立製作所       |
| <b>材料プロセス物理化学講座</b>        |                                                                                                                                                                       |             |
| 五十嵐 昌 夫                    | 溶融ボロシリケート中への炭酸ガス溶解度                                                                                                                                                   | 新日本製鉄       |
| 川 畑 涼                      | 溶融 Sn-Ru 合金の熱力学                                                                                                                                                       | NKK         |
| 松 井 敬 之                    | CaO+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +SiO <sub>2</sub> +Fe <sub>x</sub> O 系 および CaO+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +MgO+Fe <sub>x</sub> O 系スラグ中の Fe <sub>x</sub> O の熱力学 | 川崎製鉄        |

| 氏 名                | 研 究 論 文 題 目                             | 就 職 先       |
|--------------------|-----------------------------------------|-------------|
| <b>エネルギー材料工学講座</b> |                                         |             |
| 竹 村 康 司            | 溶融金属とアンモニアガスとの反応                        | 松下電器産業(株)   |
| 中 橋 良 一            | 低温用ゼーベック素子の製造と評価                        | NTT (株)     |
| 西 畑 敏 伸            | 溶融塩を用いた鉄のシリサイドコーティング                    | 住友金属工業(株)   |
| 日 谷 知 嗣            | 溶鋼の NH <sub>3</sub> ガス上吹減圧脱銅・脱錫精錬の基礎的研究 | 石川島播磨重工業(株) |
| <b>メゾ材料基礎工学講座</b>  |                                         |             |
| 江 川 元 雄            | 走査トンネル分光による材料評価                         | 山陽特殊鋼       |
| 黒 川 修              | STM 接合の静電容量に関する研究                       | 京都大学大学院博士課程 |
| 湯 浅 光 博            | Si 清浄表面および吸着面のトンネル障壁の空間分布観察             | 東京エレクトロン    |

## 大学院博士後期課程 材料工学専攻

| 氏 名               | 研 究 論 文 題 目                                                                                                                   | 就 職 先                                     |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| <b>マイクロ材料工学講座</b> |                                                                                                                               |                                           |
| 内 堀 千 尋           | Development of In <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As-based Ohmic contact to n-type GaAs prepared by radio frequency sputtering | 富士通                                       |
| <b>結晶物性工学講座</b>   |                                                                                                                               |                                           |
| 伊 藤 和 博           | 遷移金属 disilicides の結晶塑性                                                                                                        | Univ. of Pennsylvania<br>(日本学術振興会海外特別研究員) |
| 横 島 重 信           | チタニウム・アルミナイド (TiAl) 金属間化合物 PST 結晶の破壊挙動                                                                                        | サムコ・インターナショナル                             |

## 大学院博士後期課程 エネルギー応用工学専攻

| 氏 名                | 研 究 論 文 題 目                                          | 就 職 先            |
|--------------------|------------------------------------------------------|------------------|
| <b>エネルギー社会工学講座</b> |                                                      |                  |
| ラデンカ・マリチ           | Combustion Synthesis of NiAl Intermetallic Compounds | 日本ファインセラミックスセンター |

## 平成7年度博士学位授与者 (論文博士)

| 氏 名                   | 研 究 論 文 題 目                                  | 主 査     | 取 得 年 月 日  | 備 考                                                                         |
|-----------------------|----------------------------------------------|---------|------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| 平 野 勇<br>(水資源開発公団)    | 軟岩のスレーキング特性と評価試験法に関する地質工学的研究                 | 菊 地 宏 吉 | 平成8年3月23日  |                                                                             |
| 黒 川 孝 一<br>(日本油脂(株))  | 爆薬の諸特性が地盤振動、発破音および岩石破壊効果に及ぼす影響に関する研究         | 佐 々 宏 一 | 平成8年1月23日  | 京 都 大 学<br>昭 和 52 年 卒                                                       |
| 島 裕 雅<br>(応用地質(株))    | 地表および孔間電位データを用いた二次元・三次元比抵抗探査法に関する研究          | 佐 々 宏 一 | 平成8年1月23日  | 京 都 大 学<br>昭 和 57 年 卒                                                       |
| 鈴 木 浩 一<br>(勸電力中央研究所) | 3次元比抵抗法と断層および亀裂性岩盤への物理探査法の適用性に関する研究          | 佐 々 宏 一 | 平成8年1月23日  | 京 都 大 学<br>昭 和 57 年 卒                                                       |
| 渡 辺 雅 英<br>(富士電機(株))  | 電力用半導体素子の Al, 及び Ga イオン注入による P ベース層形成法に関する研究 | 村 上 正 紀 | 平成6年11月24日 | 京 都 大 学 工 学 部<br>金 属 加 工 学 科<br>昭 和 55 年 卒                                  |
| 土 田 豊<br>(新日本製鉄(株))   | 高 Cr フェライト鋼のクリープ強度に関する研究                     | 長 村 光 造 | 平成7年9月18日  | 京 都 大 学 大 学 院<br>工 学 研 究 科<br>修 士 課 程<br>昭 和 46 年                           |
| 森 本 啓 之<br>(神戸製鋼)     | ウィスカおよび粒子強化アルミニウム複合材料の製造と材料特性向上に関する研究        | 牧 正 志   | 平成7年11月24日 | 昭 和 53 年 3 月<br>京 都 大 学 大 学 院<br>工 学 研 究 科<br>金 属 加 工 学 科<br>修 士 課 程<br>修 了 |

## 平成7年度博士学位授与者（課程博士）

| 氏 名                  | 研 究 論 文 題 目                                                         | 主 査  | 取 得 年 月 日 | 備 考 |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------|------|-----------|-----|
| Teuku Abdullah Sanny | Improvement in the accuracy of shallow survey by seismic tomography | 佐々宏一 | 平成7年7月23日 |     |
| 伊藤和博                 | 遷移金属 disilicides の結晶塑性                                              | 山口正治 | 平成8年3月23日 |     |
| 横島重信                 | チタニウム・アルミナイド (TiAl) 金属間化合物 PST 結晶の破壊挙動                              | 山口正治 | 平成8年3月23日 |     |
| 牧野武彦                 | $\beta$ 型チタン合金における析出 $\alpha$ 相の形態および結晶学に関する研究                      | 牧正志  | 平成7年9月25日 |     |
| ラデンカ・マリチ             | Combustion Synthesis of NiAl Intermetallic Compounds                | 新宮秀夫 | 平成8年3月23日 |     |

## 逝 去 会 員

平成6年6月 高野 大陸 昭16・鋁  
 平成6年11月9日 古藤 数馬 昭4・採  
 平成7年9月9日 高木 誠一 昭18・冶  
 平成7年9月17日 黒田 幸雄 昭25・鋁  
 平成8年2月7日 中島 道文 昭4・採  
 平成8年2月15日 鈴木 譲二 昭16・採  
 平成8年8月6日 加藤 清 昭11・冶  
 平成8年4月27日 伊賀崎敏夫 昭22・冶  
 平成8年5月13日 尾崎 太 昭44・冶  
 ご逝去を悼み、ご冥福をお祈り申し上げます。

## 教 室 報 告

## 教官人事

## 資源工学教室

平成8年4月1日 菅野 強講師は助教授に昇任された。

平成8年4月1日 塚田和彦講師は助教授に昇任された。

平成8年5月11日 楠田 啓助手は京都大学大学院エネルギー科学研究科助教授に昇任された。

## 材料工学教室

平成8年2月1日 白井泰治助教授は大阪大学工学部材料物性工学科教授に昇任された。

平成8年3月1日 沼倉 宏助手は助教授に昇任された。

平成8年4月1日 成田舒孝助教授は九州工業大学工学部物資工学科教授に昇任された。

平成8年5月11日 田中 功助手は京都大学大学院エネルギー科学研究科助教授に昇任された。

平成8年6月1日 乾 晴行助手は助教授に昇任された。

平成8年6月1日 小笠原禎君と森 英嗣君は助手に任官された。

平成8年6月16日 David Ray Johnson 君は助手に任官された。

平成8年6月30日 奥 健夫助手は辞職した。

## エネルギー応用工学教室

平成8年2月1日 岩瀬正則助教授は教授に昇任された。

平成8年3月1日 藤原弘康助手は助教授に昇任された。

## 会 員 消 息

### 東 京 水 曜 会

東京水曜会は、昭和63年から年1回開催をしており、今年で9年目になる。大学から水曜会会長と鉾山または金属系の先生に来ていただき、先生のご講演と懇親会を開いている。東京地区に在住の会員は1520名で全会員4700名の32%であり、地域的には最も集中している。

今年の東京水曜会は、平成8年3月15日(金)に新橋住友ビルで開催された。出席の申込者は125名であったが、当日は雨であったためか実際の出席者は92名であった。

出席者の卒業年次別分布は、

昭和10年～19年 6名

20年～29年 23名

30年～39年 39名

40年～49年 20名

50年～59年 4名

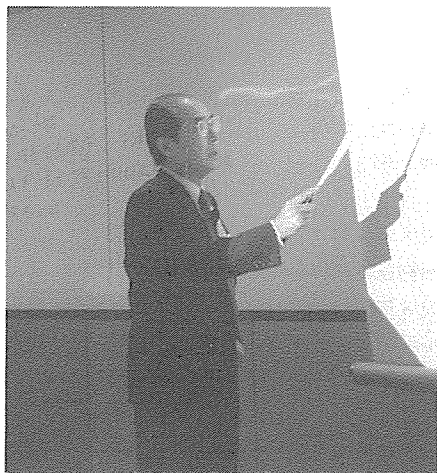
午後4時に開会し、まず水曜会会長の中廣吉孝先生から「大学および水曜会の現状」についてお話があった。工学部の改組は、高度の専門能力のある人材を教育・養成することと高い研究水準を維持・向上することを目指す

に、大学院重点化を計り専攻の再編成と専任講座の導入、大講座制の導入、大学院生の増員、大学科、大学科目制の採用、社会人の受入れ、留学生の受入れ等を実施されたとのことである。また実際の専攻と講座、担当教授について分かりやすくご説明いただいた。

つぎに材料工学専攻の足立裕彦教授より「量子力学と材料工学」の題目でご講演があった。先生のご研究されている量子論にもとづく新機能材料の設計と開発、金属・半導体・セラミックス材料の電子状態理論と物性、界面/表面や格子欠陥の電子状態と機能発現のメカニズム、材料の電子分光の理論的解釈などのお話があった。これによって勘と経験に頼る材料開発から、量子材料設計への新しい流れ、すなわち21世紀に向けた幅広い分野での材料設計について展望が開けつつあるとのユニークなお話であった。

続いて34年冶金の熱田善男氏の「たたら吹き」のスライド映写と説明があった。冶金の同期会で安来市に行かれた際のたたら吹きの実際の熔練作業を写されたもので、火花飛び散る迫力十分な映像であった。

その後懇親会に移り、先生方との久しぶりの挨拶や、日頃異業種で付き合いのない方々とも、同じ水曜会員とし





会 水 曜 会  
平成八年三月十五日  
新橋住友ビル

水村貞治 松下弘 岩鶴勇 村主周治 橋端祥尚  
津田伊三郎 田畑精二 青木信美 石井孝郎 野津能成  
佐藤史郎 加藤三郎 矢野晴也 飯田秀雄 太田奨  
松平靖 山本剛男 龍口喜 中川弘昭 久賀俊正  
橋爪清 安達秀男 山田範保 中島恒 神山真澄  
中廣吉孝 中尾智三郎 工藤壽美生 鈴木公明 後藤裕規  
明田義男 植野泰治 真砂野暁 福武剛 和田俊  
森孝大 蒔田敏昭 笠原大四郎 榎本修造 米田元昭  
高橋堅之 後藤重夫 榎本修造 田中和明 藤井清文  
植田正明 松本洋祐 山之内種彦 菊池俊次  
孫政義 木村隆義 山口進 成瀬宏  
白川幸夫 岩橋俊之 池田拓夫 和田光仕  
松本善文 田中莊一 村田輝史 浅川良男  
窪田穰 宮川一男 熱田善男 阿部光延 寛正  
南光宣和 太田豊彦 松井正治 上田喜三郎 志田芳久  
野村悦二 荒木修 村上嗣郎 田原正明 今井英雄  
龜谷道夫 千原學 福井利安 鬼頭信弘 伊藤三郎  
糸川冬郎 北川正男 岩崎滋 伊賀崎敏夫 松田好史  
河野一清 田辺精三 小原邦夫

て打解けて話が出来、名刺や情報の交換など約2時間活発に話が続き、午後7時半解散となった。

出席者は(敬称略) 17 治・中尾智三郎, 18 治・明田義男, 19 治・安達秀男, 池田拓夫, 加藤三郎, 窪田穰, 20 治・荒木修, 太田豊彦, 千原學, 中川弘昭, 山本剛男, 22 治・伊賀崎敏夫, 田辺精三, 23 治・安藤元雄, 24 治・青木信美, 25 治・宮川一男, 26 治・石井小太郎, 27 治・上田喜三郎, 28 鉢・蒔田敏昭, 矢野晴也, 龜谷道夫, 28 治・津田伊三郎, 水村貞治, 植田正明, 29 治・岩鶴勇, 岩橋俊之, 榎本修造, 河野一清, 山之内種彦, 30 鉢・神山真澄, 30 治・太田奨, 佐藤史郎, 31 鉢・糸川冬郎, 南光宣和, 31 治・田畑精二, 野村悦二, 村上嗣郎, 32 鉢・寛正, 永澤正幸, 村田輝史, 33 鉢・飯田秀雄, 花岡菖, 33 治・堀啓一, 松本洋祐, 松本善文, 34 鉢・浅川良男, 松田好史, 34 治・熱田善男, 田原正明, 松井正治, 森孝夫, 35 鉢, 久賀俊正, 成瀬宏, 松下弘, 米田元昭, 35 治・阿部光延, 和田光仕, 36 鉢・笠原大四郎, 菊池俊次, 36 治・岩崎滋, 彼島秀雄, 37 鉢・植野泰治, 後藤重夫, 志

田芳久, 真砂野暁, 丸岡政彦, 38 鉢・梅津善徳, 吉田秀隆, 38 治・角南英八郎, 福井利安, 39 治・小原邦夫, 澤田進, 福武剛, 三浦一良, 40 資・高橋堅之, 40 治・下荒地勝治, 中島恒, 和田俊, 40 金・江村信之, 鈴木公明, 松平靖, 41 資・小川輝繁, 41 治・伊藤紘一, 42 資・村主周治, 野津能成, 42 治・上田忠雄, 43 資・田中莊一, 43 治・安藤健次, 今村義宏, 木村隆義, 43 金・世良隆知, 45 資・山本秀治, 46 資・北川正男, 水落洋一, 山田範保, 46 治・森政義, 46 金・鬼頭信弘, 47 治・内貴治三, 47 金・藤井清文, 48 資・久留島守広, 白川幸夫, 50 資・若松正, 52 資・工藤壽美生, 龍口喜, 53 金・谷村晶夫, 54 資・室崎宏治, 55 資・田中和明, 55 金・金豊, 58 金・江澤弘和,

今回幹事として、会員への連絡、会場設営、当日の世話等をしたのは、28 治・水村貞治, 植田正明, 37 資・植野泰治, 38 資・吉田秀隆, 43 治・木村隆義, 46 資・水落洋一, 46 治・森政義, 48 資・白川幸夫, 52 資・工藤壽美生である。(植田正明記)

## 編 集 後 記

日本印刷出版株式会社の会長 小林積造氏がさる2月8日92歳で逝去されました。

小林氏には多年にわたり水曜会誌の印刷でお世話になりました。水曜会誌にはじめて小林氏のお名前が印刷者としてみられるのは昭和11年10月発行の第9巻第2号で、このころの出版社は大石堂印刷所となっています。おそらくそれ以前から水曜会誌出版の実務を行っておられたようで、このことは前号の談話室で和邇氏も思い出として述べられています。その後、昭和12年6月発行の第9巻第4号から出版社も小林印刷所となり、戦後の昭和23年に水曜会誌が復刊されてからは社名は日本印刷出版株式会社に変わりましたが、現在に至るまで60年にわたって奥書の印刷者の欄には小林積造氏のお名前が記載されてまいりました。ここに氏の水曜会への多大なる貢献を偲び、謹んで哀悼の意を表します。

## 平 成 7 年 度 水 曜 会 誌 編 集 委 員

|     |         |         |         |         |  |  |  |
|-----|---------|---------|---------|---------|--|--|--|
| 委員長 | 栗 倉 泰 弘 |         |         |         |  |  |  |
| 幹 事 | 和 田 裕 文 | 菅 野 強   |         |         |  |  |  |
| 委 員 | 斎 藤 敏 明 | 森 茂 昭   | 勝 山 邦 久 | 西 川 信 康 |  |  |  |
|     | 山 口 正 治 | 岩 瀬 正 則 | 高 崎 誠   | 中 島 義 夫 |  |  |  |
|     | 結 城 勇   | 鈴 木 昌 也 | 小 林 幹 男 | 廣 口 貴 敏 |  |  |  |
|     | 大 石 敏 雄 | 岡 田 康 孝 | 高 橋 明   | (順 不 同) |  |  |  |

平成8年6月20日 印刷 平成8年6月30日 発行

編集兼  
発行者  
印刷者

中 廣 吉 孝  
小 林 生 男  
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 01090-8-26568 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。

# Suiyōkwai-Shi

TRANSACTIONS OF THE MINING AND METALLURGICAL  
ASSOCIATION  
KYOTO

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                               |                                              |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| <b>Lectures</b>                                                                                                                                                                               |                                              |
| Metallurgy of Titanium (III) —A Historical Review— .....                                                                                                                                      | Joichiro MORIYAMA..... 335                   |
| Micro/Macro Properties of Materials                                                                                                                                                           |                                              |
| II. A Homogenization Theory for Visco-Elastic Material .....                                                                                                                                  | Yasuaki ICHIKAWA..... 344                    |
| <b>Original Paper</b>                                                                                                                                                                         |                                              |
| A Simplified Calculation System for the Evaluation of<br>Climatic Conditions in Underground Openings .....                                                                                    | {Xiaoming ZHANG<br>Yoshiaki MIZUTA}..... 354 |
| <b>Column</b>                                                                                                                                                                                 |                                              |
| A Fundamental Study on Wet Type Gas Leak Test<br>—On the Removal of Bubbles in the Water— .....                                                                                               | Masaki OSHIUMI..... 359                      |
| <b>Forum</b>                                                                                                                                                                                  |                                              |
| Tatara Steel Making .....                                                                                                                                                                     | Yoshio ATSUTA..... 366                       |
| Study and Research in Materials Science and Engineering at MIT ...                                                                                                                            | Toru H. OKABE..... 372                       |
| Japan International Cooperation Agency Technical Cooperation Project<br>—the Introduction of the Research Center of Mineral<br>Resources Explonation in the People's Republic of China— ..... | Xu CHANG..... 377                            |
| <b>Current Studies in Laboratories</b> .....                                                                                                                                                  | 379                                          |
| <b>Suiyōkwai Information</b> .....                                                                                                                                                            | 400                                          |
| <b>Letters to Editor</b> .....                                                                                                                                                                | 410                                          |

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