

平成8年5月1日発行(毎月1回1日発行)

ISSN 1341-688X

Volume 1
No.5 1996

(社)日本鉄鋼協会会報

ふえらむ

Bulletin of

The Iron and Steel

Institute of Japan

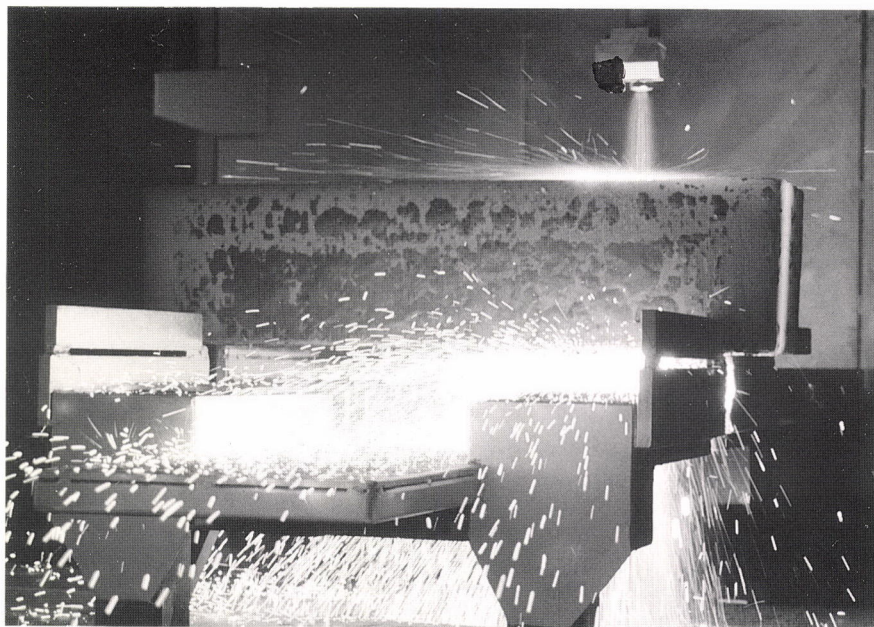


社団法人 日本鉄鋼協会
The Iron and Steel Institute of Japan

ゲガ社が開発した、 画期的で実用性に優れた酸素切断技術!!

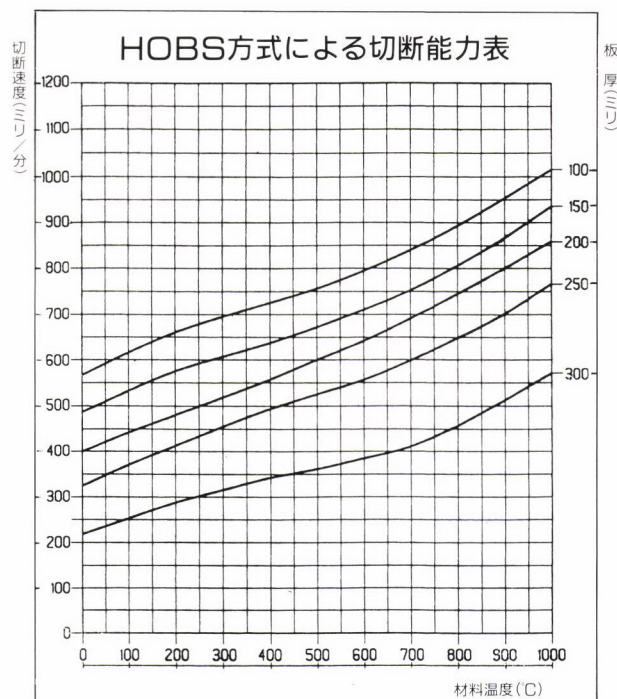
長年の経験と技術により開発されたこの〈高速〉高圧酸素切断方式(HOBS)は、従来の切断速度に比べ、約40~60%以上の高速化を実現することができました。

GeGa



〈適正な設定条件例〉

- 切断酸素圧力 (KG/CM²) : 28.5
- 切断酸素消費量 (NM³/時) : 95~115
- 加熱酸素圧力 (KG/CM²) : 3.2
- 加熱酸素消費量 (NM³/時) : 26
- 燃料ガス圧力 (KG/CM²) : 0.7~1.5
- 燃料ガス消費量 (NM³/時) : 26~28
- 平均切断幅 (MM) : 約5.5~6.5



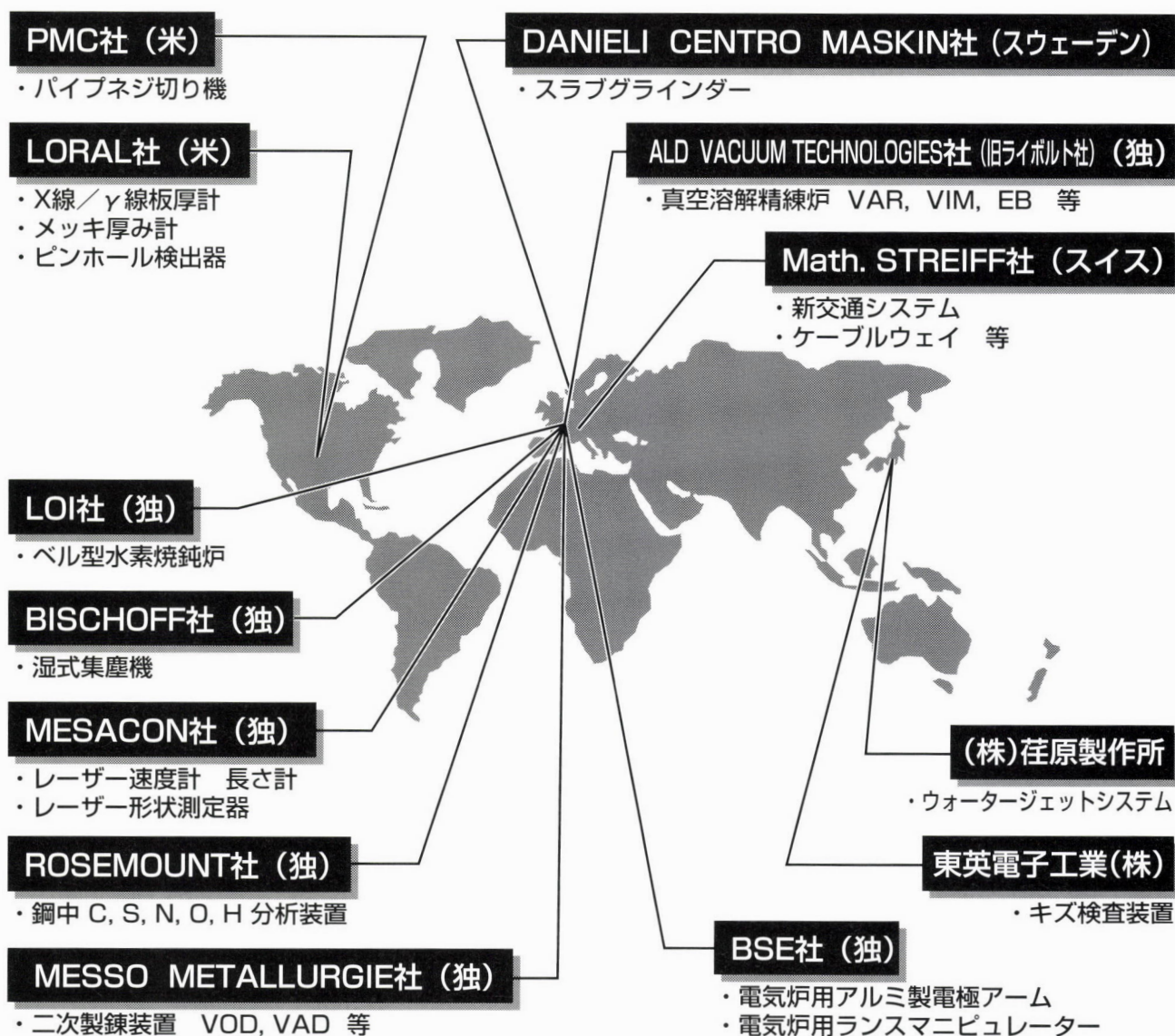
GeGa製品についてのお問い合わせは：

株式会社 トライメート

〒194 東京都町田市旭町1-6-11 コスモ・ミツイ
PHONE:0427-27-2813 TELEFAX:0427-23-0803

21世紀に向かって 株式会社 マツボー に生まれ変わりました。(旧 松坂貿易)

重工業グループ取扱商品



これからも世界の先進技術をご紹介します。

株式会社 **マツボー**

プラント2部

〒105 東京都港区虎ノ門3丁目8番21号

TEL.03-5472-1746 FAX.5472-1740

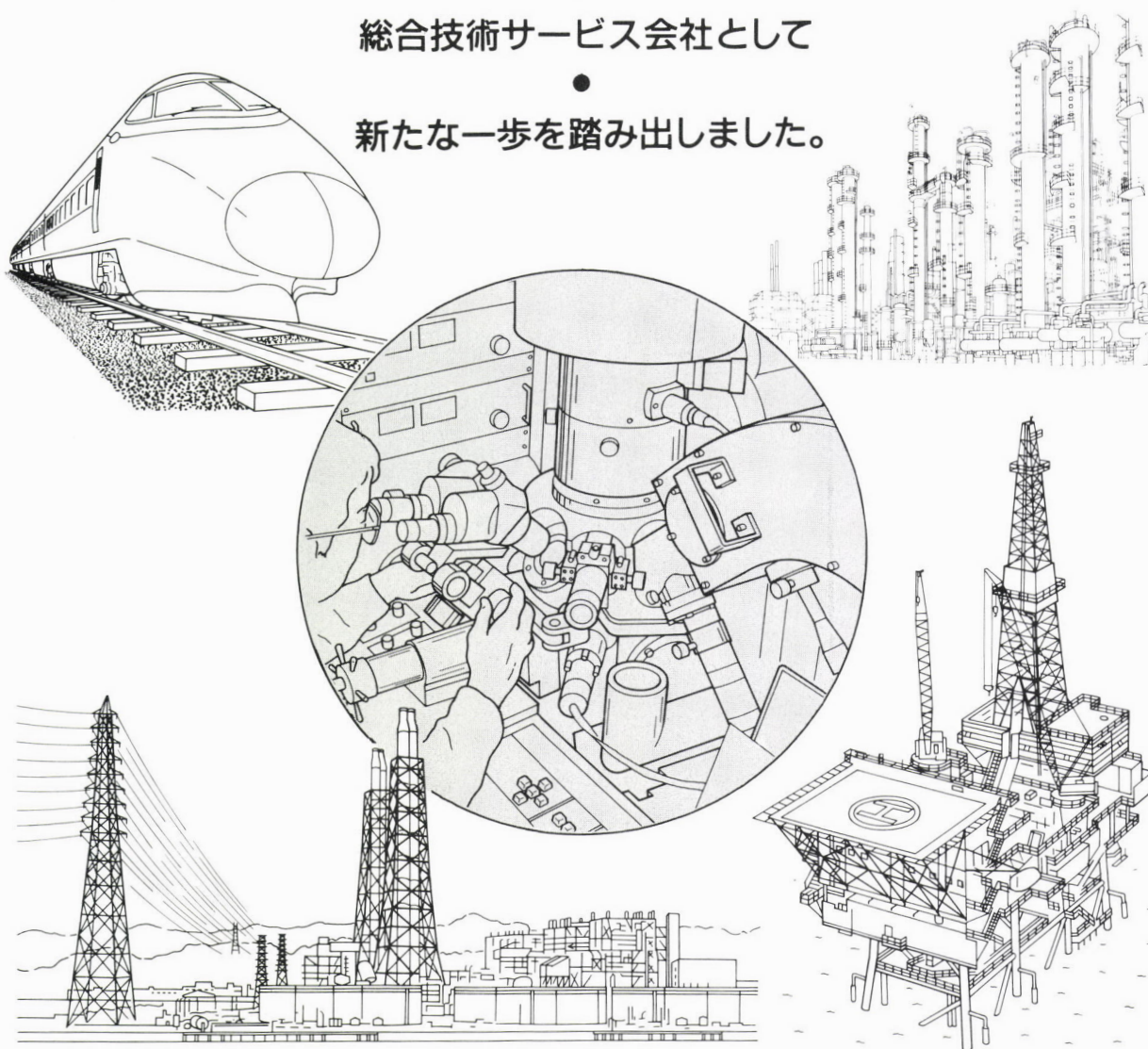
まだまだ広がる

テクノロジーの未来

住友金属工業(株)の永年の技術と経験の蓄積をバックにした

●
総合技術サービス会社として

●
新たな一歩を踏み出しました。



住友金属テクノロジー株式会社

(受託研究事業部)
(評価試験事業部)
(分析技術部)
(鹿島事業部)
(鉄道産機事業部)
(OCTG事業部)

本 社 〒660 尼 崎 市 扶 桑 町 1 番 8 号 TEL.06-489-5779
(尼崎) 〒660 尼 崎 市 東 向 島 西 之 町 1 番 地 TEL.06-411-7683
(大阪) 〒554 大 阪 市 此 花 区 島 屋 5 丁 目 1 番 109 号 TEL.06-466-6153
〒314 茨 城 県 鹿 島 郡 鹿 島 町 大 字 光 3 番 地 TEL.0299-84-2557
〒554 大 阪 市 此 花 区 島 屋 5 丁 目 1 番 109 号 TEL.06-466-6176
〒660 尼 崎 市 東 海 岸 町 21 番 地 1 号 TEL.06-409-1121

SHIMADZU

Solutions for Science
since 1875

使いやすい 高性能デジタルEPMA

島津電子線マイクロアナライザ

EPMA-1600

New



- 新世代のデジタルEPMAです。すべての機能をマウスで操作します。

新開発の「DDSC」が、EPMAとしてのすべての機能をデジタル化しました。これによってオペレーションはデスクトップワークステーションからマウスひとつで行うことができます。

- 大型試料の高感度多元素同時分析が可能です。

100mm角の大型試料について、新開発のローランド円径4インチの高感度分光器を用いて、最大5元素同時測定を実現しました。

- 基本性能を大切にしたEPMAです。

52.5°の高いX線取り出し角度によって、高いX線感度を有するとともに試料形状の影響を最小限に抑え、信頼性の高いデータを保証します。

すべてのビーム条件で、絞り交換を行う必要がありませんので、優れた操作性と安定性を発揮します。

かんたんな操作でスピーディー観察

New

島津原子間力顕微鏡

SPM-9500

金属や半導体をはじめとして、セラミックス、有機物、高分子、生体試料等もコーティングなどの前処理をせずに観察が可能で、数百万倍という高倍率の試料表面凹凸像が得られます。大気中で使用でき、試料のセットから像観察までが簡単にすばやく行えます。



⊕ 島津製作所

本社 京都市中京区西ノ京桑原町1

第二分析事業部 (0463) 88-8701

お問合せはもよりの営業所へ

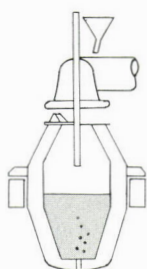
●東京 3219-5730 ●大阪 373-6561 ●札幌 205-5500
●仙台 221-6231 ●つくば 51-8515 ●大宮 646-0095
●横浜 311-4106 ●静岡 272-5600 ●名古屋 565-7611
●京都 811-8153 ●神戸 331-9662 ●岡山 221-2511
●高松 34-3031 ●広島 248-4316 ●福岡 271-0332

炉外精錬装置

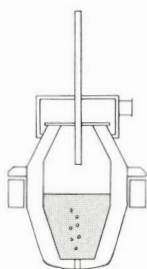
小容量装置(DETEM)から大容量熔鋼処理まで 品質改善と精錬費合理化に役立ちます

テクノメタル社は、我が国鉄鋼界に数々の実績を残したドイツ人技師 Mr. Luven, Mr. Holtermannらが中心になって経営している各種炉外精錬装置のエンジニアリング会社です。VODの開発で著名なDr. Bauerも冶金顧問の一員として活躍しており、皆様のご計画をお手伝い致します。

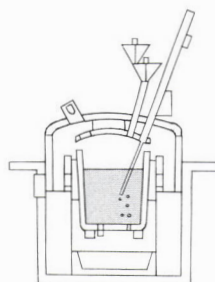
貴社の状況、ご希望等に応じて各種の炉外精錬装置を、お見積もり致します。お気軽にご相談ください。



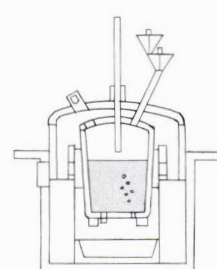
Inertgas Oxygen Converter



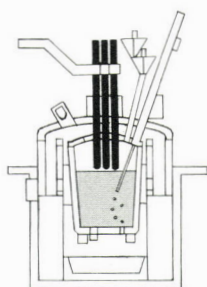
Vacuum Oxygen Decarburization Converter



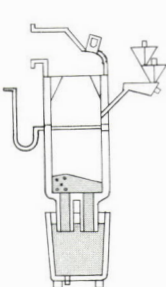
Vacuum Degassing



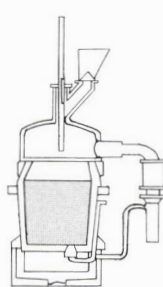
Vacuum Oxygen Decarburization



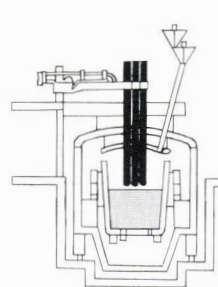
Vacuum Arc Degassing



Vacuum Circulation Process



Detem



Ladle Furnace

総代理店



株式会社 テクノヨコハマ

代表取締役社長 中村道生

本社 〒225 横浜市青葉区市ヶ尾町1161番地14
アーバンプラザA-2号室

TEL:045-972-1066 FAX:045-972-1065

東京事務所 〒101 東京都千代田区岩本町2-1-16 千代田技研工業株内
TEL:03-3861-3623 FAX:03-3863-3075



TECHNOMETAL

Gesellschaft für Metalltechnologie mbH

Königstrasse 53 Postfach 101319

D-47051 Duisburg 1

Telephone (0203) 30503-0

Telefax (0203) 3050380

Telex 8551369

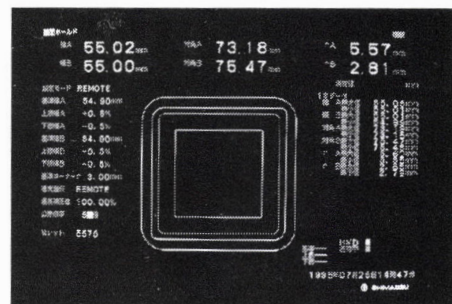
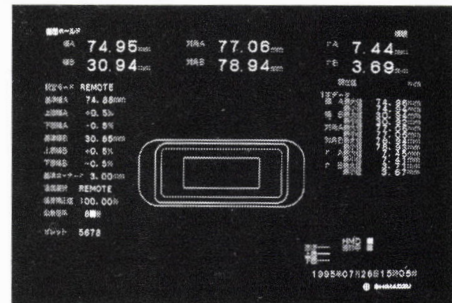
SHIMADZU

角鋼(四角, 六角, 平鋼)の圧延 工程中の省力化

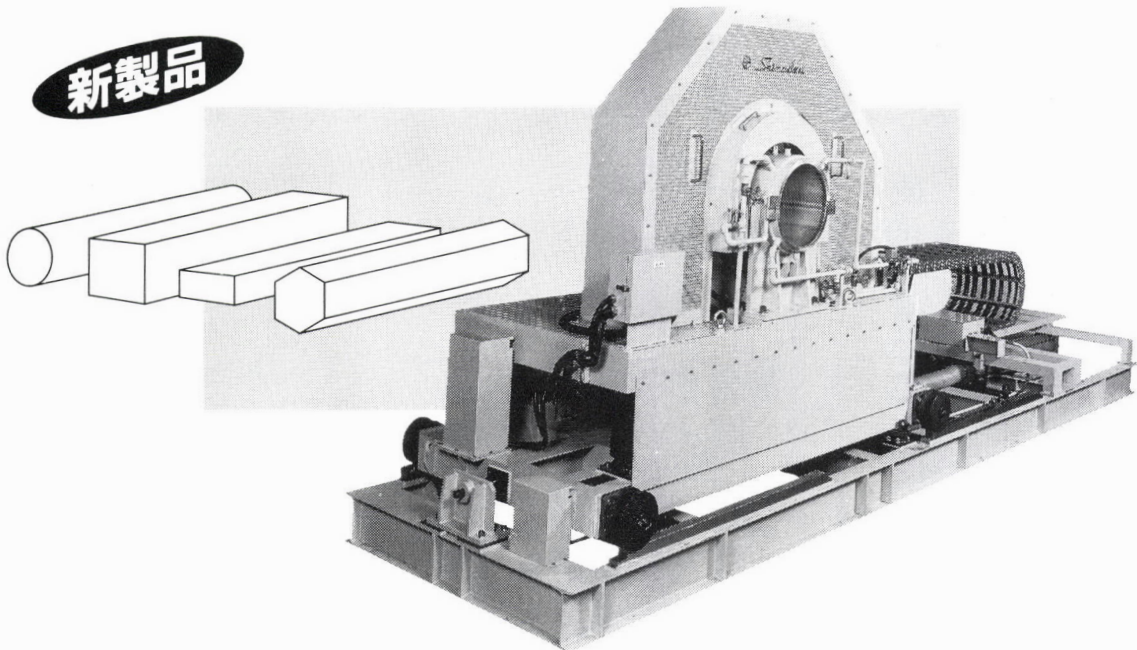
島津回転式寸法測定装置

SMSシリーズ

1. 角鋼(四角, 六角, 平鋼)の対辺, 対角, コーナ
R等の寸法を圧延工程中に計測できます。
2. 熱間圧延中および冷間精整ラインに使用できます。
3. 回転方式であるため, 全長にわたり計測ができます。
4. 非接触測定のため, 被測定物に傷をつけません。



新製品



販売元

⊕ 島津メクテム株式会社

本社 〒520-21 滋賀県大津市月輪一丁目8番1号
東京支店 〒101 東京都千代田区神田錦町二丁目9番地 大新ビル5階
大阪支店 〒532 大阪市淀川区西中島5丁目2番5号 中島第二ビル4階
名古屋営業所 〒468 名古屋市天白区塩釜口二丁目1501番地 フェイム塩釜3階

TEL. (0775) 45-8565 FAX. (0775) 45-8277
TEL. (03) 3219-5858 FAX. (03) 3293-5408
TEL. (06) 300-0017 FAX. (06) 300-0073
TEL. (052) 836-8121 FAX. (052) 836-8122

JIS '96年版41冊 全61冊

ハンドブック

《1996年版の特色》

- ★ 鉱工業の各業態別JISを厳選・収録。
- ★ 新規制定規格と改正規格を網羅した最新のJIS規格集として一層充実。
- ★ 情報処理[OSI編・データ通信編・プログラム言語編・追補版]を新たに刊行。
- ★ ISO 9000(品質システム審査登録制度)関連JISを当該ハンドブックに収録。
- ★ 利用の便を配慮した“参考・付録”がさらに充実。

0 JIS 総目録 ¥ 3,900	10 * 環境測定 ¥ 9,200	21 安全 ¥ 6,100	30 工作機械 ¥ 9,600	40 金属分析 (鉄鋼編) ¥ 8,000	54 繊維 ¥ 5,700
1-1 ** 鉄鋼 I (用語/検査/試験/特殊用) ¥ 3,900	11 * プラスチック ¥ 9,100	22 油圧・空圧 ¥ 6,500	31 化学分析-95 ¥ 5,500	41 金属分析 (非鉄編) ¥ 8,700	55 情報処理 (ハードウェア編) ¥ 9,000
1-2 ** 鉄鋼 II (棒・形・板・帯・鋼管/線・二次製品) ¥ 4,100	12 石油-95 ¥ 6,500	23 放射線(能) ¥ 6,600	32 ポンプ-94 ¥ 6,200	42 ** 電気計測 ¥ 7,400	56 情報処理 (ソフトウェア編) ¥ 7,000
2 ** 非鉄 ¥ 6,000	13 試薬 (7月刊) ¥ 8,400	24-1 建築-95 (材料編) ¥ 6,600	33 色彩 ¥ 5,000	43 熱処理 ¥ 7,800	57 情報処理-95 (データ通信・OSI下位層・テキスト変換編) ¥ 8,800
3 ** ねじ ¥ 6,000	14 * 品質管理 ¥ 5,500	24-2 建築-95 (試験・設備編) ¥ 6,600	34 ** 金属塗料 ¥ 6,200	44 ガラス-93 ¥ 4,900	58 情報処理 (用語・符号編・データコード編) ¥ 6,400
4 * 工具 ¥ 7,600	15 製図 ¥ 5,800	25 缶・コン ¥ 4,100	35 標準化 ¥ 7,100	45 耐火物-93 ¥ 4,900	59 情報処理-94 (プログラム言語編) ¥ 8,900
5 * 機械要素 ¥ 6,600	16 * 溶接 ¥ 6,500	26 土木-95 ¥ 7,300	36 * セラミックス-94 ¥ 6,800	46 計測標準-95 ¥ 4,300	60 情報処理-95 (OSI上位層編) ¥ 8,800
6 ** 配管 ¥ 7,700	17 物流・包装-95 ¥ 8,200	27 * 自動車-95 ¥ 9,500	37 ロボット・FAシステム-94 ¥ 6,500	47 ボイラ・圧力容器 (試験/検査/法規編) ¥ 8,200	61 非破壊検査 ¥ 5,500
7 ** 電気 ¥ 9,000	18 図記号 ¥ 6,100	28 ** 機械計測 ¥ 5,800	38 紙・パルプ-94 ¥ 4,700	48 ボイラ・圧力容器 (構造/部品編) ¥ 8,800	62 コンクリート製品 (土木関係)-95 ¥ 5,600
8 * 電子 (試験方法/オプトエレクトロニクス編) ¥ 8,900	19 ゴム ¥ 8,300	29 ** 塗料 ¥ 6,700	39 光学-94 ¥ 6,600	53 クリーンルーム-95 ¥ 4,400	63 情報処理 (追補版) ¥ 4,400
9 * 電子 (部品編) ¥ 7,700	20 接着 ¥ 6,000				

* □ (アミ) のかかった既刊本は1996年版が出ませんので、続刊として発売中です。
 * 価格には消費税が含まれております。
 * ★印は英訳版('96年版)刊行予定 ★印は英訳版発売中
 * No.49、50、51、52は欠番です。 * 価格は税込です。 **カタログ進呈**

財団法人 **日本規格協会**

〒107 東京都港区赤坂4丁目1-24
 TEL.03(3583)8002 FAX.03(3583)0462

ふえらむ

Vol.1 (1996) No.5

C O N T E N T S

目 次

情報を記録する IRON & STEEL

- マルチメディア化と歩むデータ記録メディアの変遷 2
高密度記録のニーズにこたえる酸化鉄磁性材 7

話題のプロダクツ

- 移動体通信システム 10

鉄の絶景

- 旅景色の鉄ー静岡編 14

展 望

- これからの科学技術行政ー科学技術基本法の目指すところー

- 科学技術庁科学技術政策局政策課 野崎雅稔 17

入門講座

- 鉄鋼材料編ー5 鉄の物性と機能ー物理的性質ー

- 静岡理科大学理工学部教授 藤田英一 23

鉄の歴史 ④

- 朽ち果てぬ鉄に魅せられて、古代鉄を探る

- 東北大学名誉教授 井垣謙三 29

解説

- 製鋼プロセスへの数値解析技術の適用

- (株)神戸製鋼所機械研究所流熱技術研究室主任研究員 三宅俊也 36

- 薄鋼板圧延の歴史と技術の現状

- NKK総合材料技術研究所プロセス研究センター主幹研究員 藤田文夫 44

現場技術報告

- コークス炉ガス液の高度処理技術

- 新日本製鐵(株)名古屋製鐵所 山口彰一・菊池勇人・嵯峨弘

- 東忠幸 51

- 製鋼使用済耐火物リサイクル技術の開発

- 大同特殊鋼(株)知多工場 中坪修一・天野肇・立石亨・新貝元 53

懸賞作文入賞作品紹介 ⑤

- 第1部(中学・高校生の部)3等賞 「カイロにみる鉄の未来」

- 水野亜紀 57

- 第1部(中学・高校生の部)3等賞 「鉄への夢」

- 森 宏文 58

- 第2部(大学生・一般の部)3等賞 「西暦2045年秋ー夢のあとさき」

- 遠山 晃 59

- 第2部(大学生・一般の部)3等賞 「日本鉄鋼業の行方」

- 簗手 徹 63

本会情報

- 67



情報を記録する



1946年、18,000本の真空管を使った世界初のコンピュータENIACが誕生した。それから50年。街にパソコンショップが並び、新しいソフトウェアが社会ニュースとなる時代が到来。「情報」は私たちの生活の中に瞬く間に入り込んだのだ。一度手に入れた情報は、それを記録することで、さらに有効に生かすことができる。17世紀、グーテンベルグの活版印刷は、科学や文化の進歩に大きく寄与した。そして、現代を生きる私たちのために数々の記録媒体が開発されている。多くの情報を「使える情報」とするために、情報記録の高密度化への挑戦はとどまるところを知らない。

マルチメディア化と歩むデータ記録メディアの変遷

パソコンを取り巻く環境は、Windowsに代表される大型OS（オペレーティングシステム）の発表、パーソナルDTPの普及、デジタルデータの一元化など日進月歩で動いている。しかし、地味な存在ながら今や欠かせないのが記録メディアの存在である。

現在、パソコンの国内生産高約400万台に対し、最も普及している記録媒体であるフロッピーディスクの需要は、実に年間約5億枚。この値が持つ意味をさぐってみたい。

急速に発展する情報化社会の影の立役者

記憶装置や記録媒体（メディア）というと、ハードウェアやアプリケーション（ソフトウェア）などに比べどうしても二の次に思われがちである。しかし、日本のパーソナルコンピュータ（パソコン）ブームの先駆けである16ビットパソコン登場と時同じくして（1982年）、現在最も多く使用されている3.5インチサイズのフロッピーディスク（FD）が誕生するなど、そこには当初から密接な関係があったことはいうまでもない。

その後もハードの技術開発と並行して、FDを初めとした記録メディアは、磁気、光、光磁気、半導体等による原理を用いてハードディスク、CD-ROM、MO（光磁気ディスク）などが登場し、それぞれが独自の性格を持ち多彩な形で普及した。情報産業はもちろん、日常生活に至るまで幅広い分野で利用度は拡大している。

現在、全世界で年間40億枚近い需要があるデータ用メディア。さらなる大容量化、高速化、小型化が図られ、最近ではマルチメディア時代のニーズに応えるべく、DVD（デジタル・ビデオ・ディスク）など新しい媒体の製品化をはじめこれまで同様、激しい技術開発が続けられている。

普及度ナンバーワンのFD、大容量記憶を経済的に実現させるハードディスク、光技術を取り入れ音楽とデータの保存を現実化させたCDとMO、マルチメディアの本格化に拍車をかけるPD（相変化型記録光ディスク）。データメディア普及の

歴史をたどることで、成長を続ける情報化社会のダイナミズムが見えてきそう。

不可欠度ナンバーワンのフロッピーディスク（FD）

磁気メディアの中で、抜群のシェアを占めているのがFDである。その出荷数は、世界需要で年間36億枚（1995年現在）にのぼる。

- FDが普及してきた理由として、
- ①ランダムアクセスが可能のため読み書きがしやすい
 - ②携帯性に優れている
 - ③安価である
 - ④早くから標準化され、パソコンやワープロにドライブが多く装備された

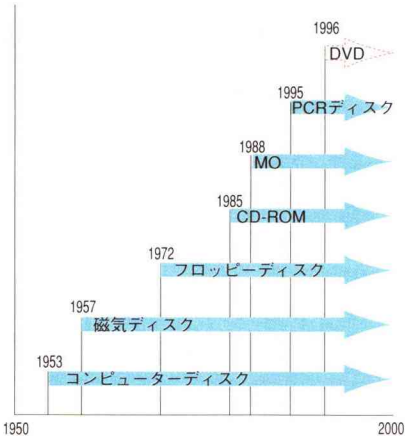
などがあげられる。このようにFDは、それまで唯一の記憶媒体であったマグネットテープにはなかった「使いやすさ」を実現したのである。

FDの歴史は、1972年（昭和47年）8インチサイズ（記憶容量0.4MB）が初めて商品化されたことに始まる。このころは、コンピュータ機器自体の一般社会への普及がほとんどない時代であり、FDの用途は、研究目的以外には大型汎用コンピュータへのデータ供給手段として使用される程度にとどまっていた。

8インチサイズのFDはこの後5年間に、記録方式の両面化（FDの記録面をディスクの表裏共にする）、記録密度の倍密度化（磁化反転密度を維持したまま情報記録ビットの密度を倍

■データ用記録メディアの性能特徴と主な用途

メディア名	略称	主な用途
フロッピーディスク	FD	パソコン・ワープロを中心としたソフト供給及びデータ保存・供給用
ハードディスク	HD	ワークステーション・パソコンの文書・図形ファイル用 FAXの文書・図形ファイル用 業務用カラオケ用
光磁気ディスク	MO	ワークステーション・パソコンのデータ保存・交換用 文書・図形のファイル用 印刷物の保管
ミニディスク	MDデータ	パソコンのデータ保存・交換用 文書・図形のファイル用 印刷物の保管
コンパクトディスク	CD-R	CD-ROMのテストサンプル版作成 オリジナルCDの作成 データベースの大容量ファイル フォトCD
相変化型光磁気ディスク	PCR	ワークステーション・パソコンのデータ保存・交換用 文書・図形のファイル用 印刷物の保管



データ用記録メディアの発表年度

増させる-Double Density)を図って、その結果、当初の4倍の記憶容量である1.6MBまでの大容量化を達成した。しかしながら、操作環境(ディスクドライブの需要など)の問題から一般に普及しなかった。

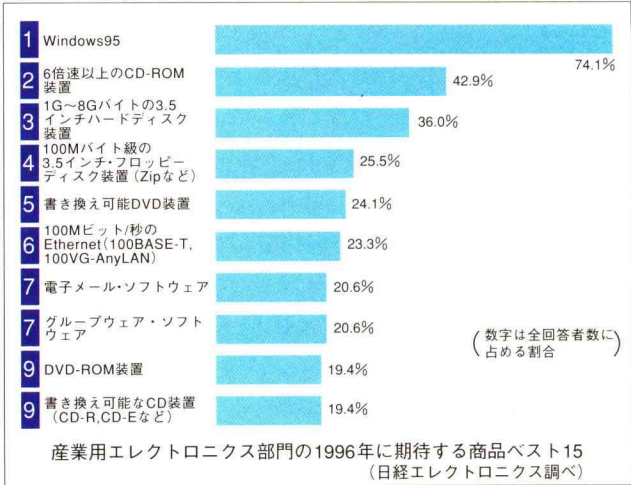
その4年後、「小型化」という大きな一歩が踏み出された。1976年(昭和51年)、パソコンの原型「ワンボードマイコン」が産声を上げる一方で、5.25サイズFDが商品化、FDにおける初のダウンサイジング化がされたのである。

5.25インチFDは8インチ同様、片面単密度の記録方式でのスタートであったが、後に両面化、記録密度の倍密度化が加えられ、さらにトラック密度を倍化された製品が登場しそれまでの48TPI(1インチあたり48トラック)から96TPIへと飛躍的な高密度化が図られた。こうした技術開発の結果、ワープロ用などをはじめとした個人レベルでのメディア使用が浸透し始めたのである。

ポケットに入る記録媒体—3.5インチFD

現在最も普及している3.5インチサイズのFDは、1982年に登場した。日本の国内メーカーの商品開発コンセプトは、「Yシャツのポケットに入る磁気メディアを作ろう」だったという。また早くから業界内での標準化が見込まれていたことが功を奏し、爆発的普及を見せた。また磁性材は、それまでのガンマ酸化鉄に代えて保磁力(磁性体に外部から磁化をかけたとき、磁化がそれに対抗する力)の高いコバルト被着型酸化鉄を採用したため、小型ながら高品質の記録を実現した。

3.5インチFDが登場した1982年は、メディアだけでなく、パソコンを取り巻く環境全体が大きく変わった年でもある。最も大きな出来事は、前年に世界で初めて発売された16ビットパソコンが日本国内で開発、製品化されたことである。16ビットパソコンは、それまで難しかった日本語での操作や、アプリケーションソフトウェアの充実、プログラム作成の必要性がなくなるなど、従来にはない特長を持っていた。そのため、一部の愛好家ユーザーだけでなく、パソコンはだれでも使用できる存在へと大きく変化し、携帯性のちょうどよい



3.5インチFDドライブが標準装備(内蔵)されるようになっていった。

パソコンユーザーの増加とともに、FDそのものに対する品質向上のニーズが高まり、FDメーカーは急ピッチな製品開発、商品化を迫られた。そこで完成したのが両面倍密度倍トラック化、両面高密度倍トラック化された、現在の普及タイプ2DD(記憶容量1MB)、2HD(記憶容量2MB)である。時期を同じくして、1985年前後には日本語ワープロソフト「一太郎」など良質のアプリケーションソフトが発売され、3.5インチFDドライブの普及が急速に加速していった。

高まるFD大容量化ニーズ

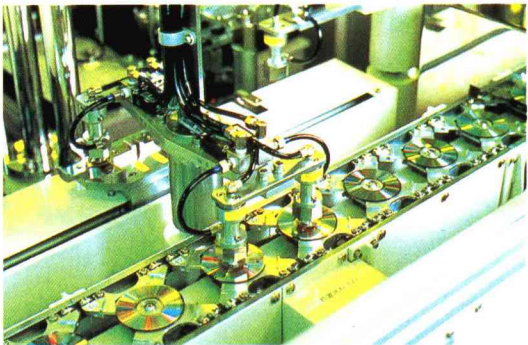
ワープロソフトにはじまるコンピュータのためのアプリケーションソフトの充実、パソコンの操作環境をさらに進化させた。そのひとつが共通のオペレーティングシステム(OS)において、データの共有、相互交換の可能を実現させたMS-DOSなどである。1986年は、ラップトップコンピュータ発売が発売され、パソコンの年間生産台数が200万台を超えた。

メディアメーカーもこの点を十分踏まえ、ソフトの大型化や画像データ等の記録に応えるため2DD、2HDを超えるさらに大容量のFDの開発、製品化を目指していた。その最大の手段として、それまでより高い性能の磁性粉の開発が行われ

■3.5インチFDの技術動向 (FDD含む)

	1D	2D	1DD	2DD	2HD
記録面	片面	両面	片面	両面	両面
記録密度	倍密	倍密	倍密	倍密	高密
最大線記録密度 (KBPI)	8.1	8.7	8.2	8.7	17.4
トラック密度 (TPI)	67.5	67.5	135	135	135
アンフォーマット記録容量 (MB)	0.25	0.50	0.50	1.00	2.00
発表年 (西暦)	1982	1983	1983	1983	1985

(資料: (社)日本記録メディア工業会)



FD並みのサイズを維持し、大容量化を達成したMOの生産ライン

たことがあげられる。これは、線記録密度の向上や、サーボ・トラッキング方式の採用により、記憶容量の数倍から数十倍化を可能にするものである。

このようにして採用された磁性材が、垂直配向性のある「バリウム・フェライト六方晶粒子磁性体」と、保磁力や飽和磁化が高く電磁変換特性に優れた「メタル針状粒子磁性体(長手方向磁化)」である。この技術を応用し、90年代にはいってからは20MBを超える容量のFDが誕生した。

最先端の磁性材を駆使し、大容量化を実現したFD。しかしFD自体の市場価格、規格化・ハード供給などの環境からくる使いやすさなどの点から、現在の主流は普及型の2DD、2HDである。また、大容量FDは、発売当時のハードディスクや新しい媒体(MOなど)との大容量化の競合関係などから、パーソナルユーザーへの普及に向けてはまだまだ時間がかかるものと見られている。

「手軽な大容量記憶」を実現したHD

大容量記憶のためのパソコン周辺機器として、パソコンユーザーに最も支持されているのがハードディスク(HD)である。簡単にいうとHDは、FDの集合体のようなもので、そのメカニズムは磁性体を塗布した複数のアルミ製円板を同一軸で高速回転させ、磁気ヘッドにより読み書きする。

HDは、アクセスタイム(読み書き用の磁気ヘッドが目的場所まで移動するための時間)の速さに優れ、大容量かつ低価格で入手できるという点が特長である。ただFDと決定的に違うのは、FDが小型・軽量で持ち運びにしやすいのに対し、HDは常に収納され、外界に出ることはないということである。したがってHDは、通常パソコンに内蔵されるか、「外付け」という形でパソコン本体のそばに置かれる。

HDの普及もFDと同様で、内蔵型パソコンの登場に負うところが大きい。これ以降日本で発売されたマッキントッシュやウィンドウズなど、パソコンによるグラフィック環境が整うとともに、HDは大容量の情報を収納するメディアの第一人者としての地位を確固たるものにしていった。またこうし

た陰には、デスクトップ型だけでなく、ラップトップ、ノート型パソコンに対応するHDのディスクサイズの小型化などの技術開発があった。

HDの定着は、それまで欧米に比べてなじみにくかった「データ保存」という習慣を日本にもたらした。現在あたり前となっている、データを一度HDにインストールしてからアクセスする方法は、アクセスタイムの速さを活用する以外に、こういった習慣の定着を表す最たる例だといえる。その後のニーズの広がりもあってハードディスク自体の大容量化、低価格化が進み、1990年代に入ってから、もっともメロしやすい周辺機器の一つとなった。

ハードディスクはその後、大容量化と高転送レート化、小型化の3ポイントを柱に技術的開発が進められ、低価格化が進んでいる。現在、記憶容量500MB~1GB程度のものが多く流通し、今世紀中には数GBのものが主流になると見込まれるほど将来的にも有望視されている。

CD-ROM・MO、光・光磁気の利用で新時代へ

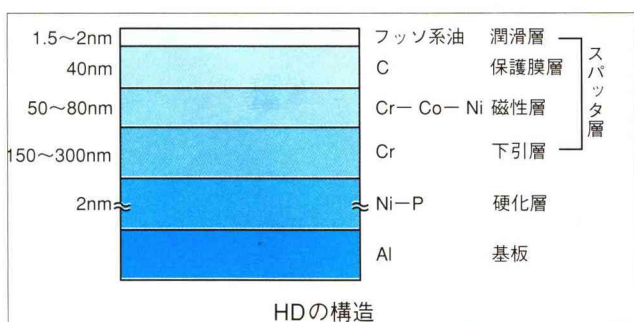
1980年、全く新しい記録方式のオーディオ媒体が開発された。コンパクトディスク(CD)の登場である。レーザー光の照射により記録・再生するという画期的方式を採用したCDは、オーディオ分野にいち早く普及した光ディスクである。

1987年には、アナログレコードに変わってミュージックソフトのトップにCDが躍り出た。

CDの大容量記憶をパソコンに應用ができないものかと開発されたのが読み出し専用CD(CD-ROM)である。

当初CD-ROMは、FDの陰に隠れ、CD-ROMドライブを内蔵するパソコンが1989年にわずかに登場したぐらいだった。その後、データ量の増大、音声や画像を扱うアプリケーションソフトの製品化ラッシュ、HDの大容量化などが進み、昨年までにCD-ROMドライブ出荷量も年間2000万台近くにまで急増している。

また、当初は音楽用、データ用ともに再生専用のもので、完成されたソフトを活用するというスタイルだけであったが、



記録メディアの世界を大きく変えた光ディスク

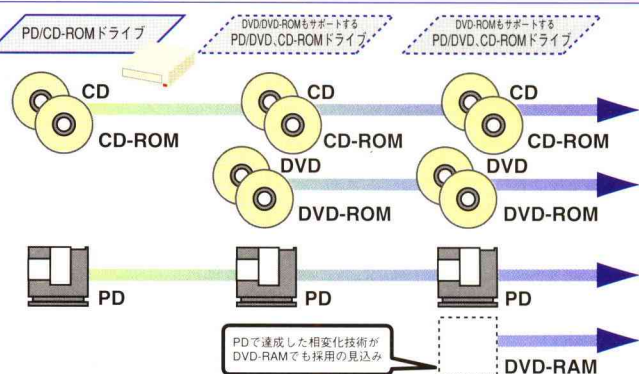


マルチメディア志向に応える媒体として誕生したPCRディスクシステム

光ディスクの進化（予想）

再生メディア

記録メディア



ユーザーが記録できるCD (CD-R) が誕生、ビジネスユースから私的なCD制作まで活用の幅が広がっている。ただし、データの書き替えができないというのが唯一残念な点である。

CDと同様、音楽・データ両用として開発されたものに光磁気ディスク (MO) がある。MOは、集束されたレーザー光の熱でディスク表面の温度を上げ、外部磁場をバイアスとして磁気方向を局所的に変え、データを読み書きする方式である。大容量記憶ができ、可搬性に優れているのがMOの最大の魅力であり、この点においてはFDに対し優位である。しかし、ハードディスクのようなオーバーライト方式ではないため、データアクセスに時間を要する。

現在普及するMOのタイプは3種類。もっとも最初 (1988年) に商品化され、主にジュークボックスなど業務用に使用されている5.25インチタイプ、1991年に商品化、1994年の大容量化 (230MB) によりグラフィックなどを含めた大容量データ用メモリとして普及した3.5インチタイプ、1992年に発売されオーディオ市場での浸透がめざましいMD (Mini Disc-データメモリ用のMD-Data) である。

5.25インチサイズが登場して以来7年あまりの間、MOはこうした小型化、データ・音声・画像に至るまでの多目的メディアとして飛躍的に進歩を遂げてきた。今後は、新しいデジタルメディア (後述のPCRディスクやデジタル・ビデオ・ディスクなど) と比した優位性、さらに共存していくための技術開発を迫られている。

21世紀を担うメディア、PCRとDVD

1990年代に入り、パソコン環境のキーワードとして「マルチメディア」が登場した。パソコンは「データを扱うもの」から、映像、音楽など幅広いフィールドをもつマシンへと変貌した。これに応えるメディアは、一層の大容量化が進む一方、複数種のソフト、メディアが扱えるというユーザの環境を超えた、共通のメリットが求められる時代を迎えた。

このような中、これまでの光ディスクからさらに一步前進した相変化型記録方式 (PCR) ディスクが1995年にパーソナルユーザー向けに発売された。

PCRディスクの特長は、

- ①ダイレクトオーバーライト (既存データを消去しながら

新しいデータを記録) を可能にし、データの書き込みを高速化

- ②大容量 (650MB、FDでは約300～600枚分に相当)

- ③一般的なドライブにおいてCD-ROM (4倍速) の再生が可能などである。PCRディスクの登場は、今後のパソコン環境における画像・音楽のデジタル化、経済的な編集環境の実現などを促進させるものと期待されている。

さらに今年、次世代を担う新メディアの発売が予定されている。それが「真のマルチメディア時代の核となり得るメディア」といわれるデジタル・ビデオ・ディスク (DVD) である。

DVDは両面2層での記録を可能とし、片面にCD7.5枚分、両面で17GBという大容量記憶ができる。しかし、DVDのフィールドはこれにとどまらず、約130分の高画質動画 (すなわち映画) の記録、ワイドテレビなどの対応、高音質のCD再生、マルチチャンネルオーディオなどにまで及ぶ。DVDは、コンピュータはもちろんビジュアル、オーディオのためのデジタルデータを一元的に扱える初めてのメディアなのだ。次世代の記録媒体として、発売前ながらも多くの人々の関心を集めている。

以上のように、記録メディアは情報化社会の一方の主角といっても過言ではない。ニーズに応えられる記録メディアが誕生していなかったとしたら、現在の社会は成り立たなかったであろう。また、ビジネスや経済情勢に与えた恩恵ははかり知れない。

今をときめくパソコンでは、多くの分野において、完成されたハードや活用しやすいソフトとにかく注目が集まりやすい。しかし、少し視野を広げて眺めると、ハード、ソフト以上に貢献しているものに会える。

記録メディアもハードやソフトとともに、今後も重要な役割を果たしていくだろう。

[取材協力：(社)日本記録メディア工業会、ソニー(株)、松下電器産業(株)、(株)東芝]

高密度記録のニーズにこたえる 酸化鉄磁性材

コンピュータのデータやオーディオ、ビデオなどの記録方式は、磁気を利用したものと光を利用したものに大別される。代表的な磁気記録メディアとしては、黒や茶色をしたカセットテープやビデオテープが古くから知られている。この色は磁性塗料の色。表面に付けられたわずか2～3 μm の磁性材の層がメディアの性能の鍵となる。そしてこの酸化鉄磁性材の多くが酸化鉄でできている。

磁気記録メディアの始まりは鋼線

鉄を使った磁気記録は、1898年にデンマークのポールセンが開発した「テレグラホン」という磁気録音機に始まる。「テレグラホン」は、真鍮製のドラムの周囲に切り込まれた溝に鋼線を渦巻き状に巻き、この周辺を回転するように電磁石ヘッドを取り付けたもの。録音時は、マイクロホンの電流で電磁石に磁気を起こし、連続的に鋼線を磁化する。再生時はこの鋼線に受話器を接続して磁気を音声に換える、というものであった。

この後、1930年代になるとドイツのフロイマーにより、はじめて塗布型磁気テープが開発された。この時使用された磁性材は、 $\text{Fe}_2(\text{CO})_9$ （カルボニル鉄）の熱分解で得られる直径3～5 μm の鉄粉だった。これは1935年のラジオ博覧会（ドイツ・ベルリン）に出品され多くの注目を集めた。1936年、鉄粉に変わる磁性材として、フェライト系材料の Fe_3O_4 （マグネタイト）の性能が確認され、これ以後、磁性材の主流はフェライト系酸化鉄となった。

フェライトとは、磁性を持つ鉄系複合酸化物の総称であり、アンテナコアや電磁石の芯、さらにVTRなどの磁気ヘッドなどにも使用されている。

このころの磁性材粉体は、すべて球状か立方状だった。当時の磁性材の保磁力は、結晶そのものの磁気特性によるもので、せいぜい1800e（エルステッド）にすぎなかった。1947年、カムラスが初めて針状体の磁性材を開発した。これにより磁性材の性能は飛躍的に高まり、保磁力は2300e程度にまで高まった。



現在もある日本の酸化鉄のルーツは、江戸時代の「弁柄」という顔料

江戸時代から始まった日本の酸化鉄

日本で酸化鉄の工業生産が始まったのは、1707年、江戸時代初期の「弁柄」にまでさかのぼる。その当時、「弁柄」は建築物に塗る赤い顔料や防腐剤、漆器の顔料などに使われ、古来は中国からわざわざ輸入していた高価な材料であったことが知られている。当時の生産地であった吹屋（岡山県・成羽町）では、中国山地で採掘される銅鉍石からこの弁柄を精製していたという。

明治時代以降、近代産業が発達すると酸化鉄の使われ方も変化し、船の赤色の防錆塗料や、研磨剤、レーダー吸収材などとして利用された。

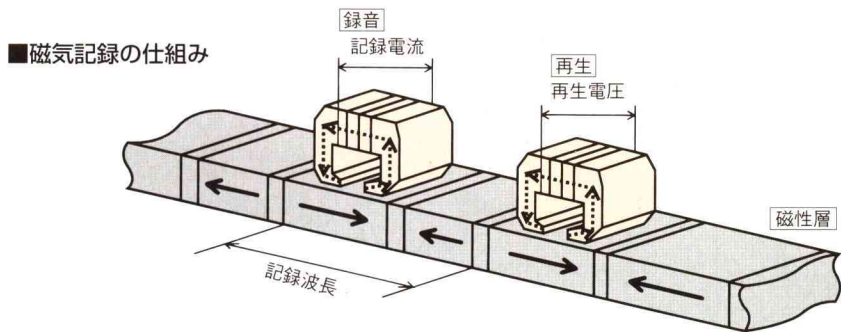
第二次大戦後、海外から遅ればせながらも、日本国内で磁性材としての酸化鉄の研究が徐々に始まった。1950年、東通工（現在のソニー）から日本初の磁気テープが発売された。このベースフィルムはクラフト紙にマグネタイト粉体を塗布したものだったが、この後、磁性材はマグヘマイトが主流となり、またベースフィルム材も、紙からビニルシート、さらにアセテートフィルムへと変化していった。

ちなみに当時のベースフィルム厚さは約50 μm 、テープレコーダは7インチ、5インチリールのものが主だったという。現在の平均的な厚さ12または18 μm のカセットテープと見比べると、およそ50年間の技術の進歩を改めて実感できる。

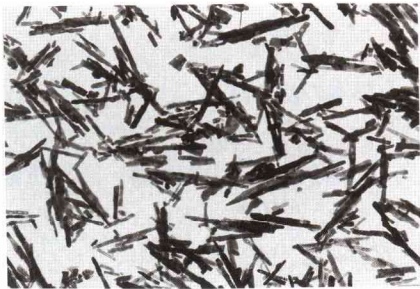
このように磁気記録メディアの歴史は、海外でも日本でもオーディオから始まり、その技術がビデオテープやフロッピーディスク、磁気カードなどに利用されるようになった。



日本初の磁気録音テープ
(1950年発売)



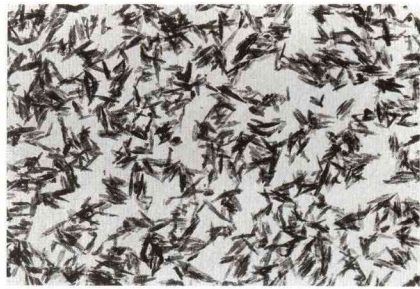
■酸化鉄のTEM像



SSA 20m²/g



SSA 30m²/g



SSA 50m²/g

50nm

ゲーテが見つけたゲーサイト

それでは酸化鉄磁性材は、どのようにして製造されているだろうか。

現在、国産の酸化鉄の原料の多くは、酸化チタンや銅板の製造工程で廃液として排出される硫酸鉄溶液である。硫酸鉄溶液に苛性ソーダなどのアルカリを加えると、硫酸は塩類として除去でき酸化鉄だけが沈殿する。この方法を「湿式製法」と呼ぶ。以前は硫酸鉄に熱を加えて酸化鉄を作っていたが、排煙中に硫酸分が混じるという問題があった。「湿式製法」を開発したのは、日本の酸化鉄の大手メーカーの戸田工業(株)で、この方法は硫酸分を排出しないだけでなく、反応時間も数時間で従来法に比べ速いという特徴があるという。

湿式製法によって得られるのが、ゲーサイトと呼ばれる α -FeOOHである。ゲーサイトの名は、ドイツの文豪ゲーテがこの物質を鉱石の中から発見したことに由来する。これが酸化鉄磁性材を作るための、いわば出発点となる材料だが、これはまだ非磁性材である。ゲーサイトに加熱脱水処理を施すと、次にヘマタイト(α -Fe₂O₃)ができ、これを水素で還元してマグネタイト(Fe₃O₄)ができ、ここではじめて磁性を持つ酸化鉄が誕生する。このマグネタイトにさらに処理を施すこと

により、目的や用途に合った各種の磁性材ができあがる。

現在、磁気記録に用いられている酸化鉄の代表的なものとしては、マグヘマイト(おもにオーディオテープ用)、コバルト被着型マグネタイト(オーディオ、ビデオ用)などがある。

粉体の形状が磁気特性を左右する

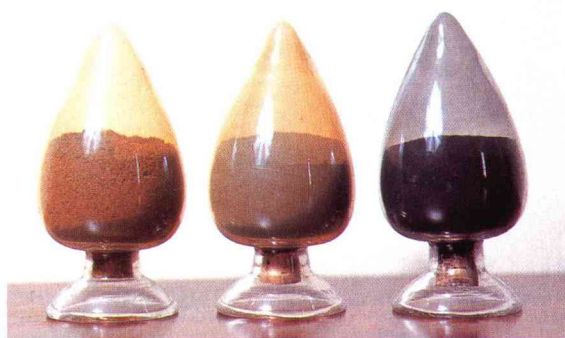
磁気記録メディアの特性は磁性材の材質だけでは決まらない。磁気記録メディアは、磁性材とバインダーを有機溶剤で混合して作った磁性塗料をベースフィルム上に塗布したもので、個々の材料だけでなく、それらを用いた粉体成形技術や、配合、塗布、表面処理などの工程との兼ね合いが重要となる。

たとえば形状。酸化鉄の粉体には針状、球状、立方状、紡錘状、平板状などがあるが、この中でも針状が最も保磁力が高い。

「たとえば、棒磁石のように一個の粉体の片端がS極、もう一方の片端がN極ならば、細長い形状の方がS、Nの磁気を打ち消しにくい。それでは、細長ければよいかというと、塗料にした時にバインダーとのなじみが悪くなるなど、塗りにくくなる。実際のベースフィルムの上にはテープの長手方向に平行に磁性材が並んでおり、これを均一に塗布する必要がある

■鉄系酸化物の種類

タイプ		色	磁気特性	粒子形状	大きさ
α -FeO(OH)	ゲーサイト	黄	非磁性	    	0.03~1 μ m
α -Fe ₂ O ₃	ヘマタイト	赤~紫	非磁性		
γ -Fe ₂ O ₃	マグヘマイト	赤褐色	磁性		
Fe ₃ O ₄	マグネタイト	黒	磁性		
β -FeO(OH)	アカゲタイト	にぶいオレンジ	非磁性		
γ -FeO(OH)	レピッドクロサイト	にぶい黄土色	非磁性		



左からガンマーマグヘイト、
コバルト被着ガンマーマグヘイト、
コバルト被着マグネタイト



戸田工業(株) 創造本部・永井規道氏

す」(戸田工業(株) 創造本部・永井氏)

こうしてできた磁性材の形状を評価する基準としてSSA(比表面積)があるが、一般にビデオテープなどに使われる磁性材は、SSA30m²/g程度である。

また粉体は、小さく、しかも形をそろえることによってバインダと均一に混じりやすくなり、塗布もしやすくなる。

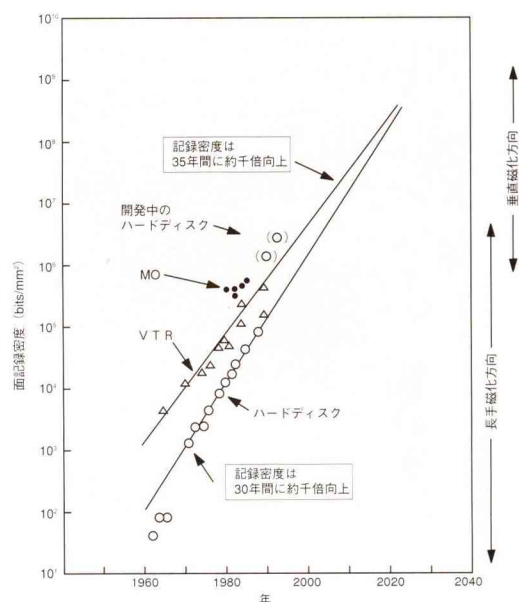
さらに保磁力を高めるために、粒体の表面にコバルトを被着させる技術がある。これは磁性材をコバルト水溶液に浸漬し、表面をコバルト層で覆うものであり、現在では、一般のオーディオ、ビデオテープにとどまらず、放送局などで使われる業務用のベータカムテープやコンピュータデータ記録のバックアップテープなどにも用いられている。

1mm²あたり1Gb記録に到達するか

情報記録の高密度化のニーズが日に日に高まり、磁気記録材にもこれに対応する新技术が求められている。

最も顕著なのが、アナログからデジタルへの移行である。磁気記録メディアはアナログ、デジタルのどちらにも対応できるが、デジタル化による高密度記録に対応するためには、磁性材をさらに微細化、高品質化を図ることが不可欠となる。デジタル化に対応するテープ方式の一つが、デュアルコート(二層)構造である。これは、ベースフィルムの上に非磁性の酸化鉄のベースコート層(厚さ2~3μm程度)と磁性材層(厚さ0.1~0.2μm程度)を同時に塗布する方法。これは、表面の磁性材が直接ベースフィルムに塗布しにくい性質を持っているため、ベースフィルムとの間に密着性のよい非磁性酸化鉄層を作ることである。また、これによってベースフィルム自体の耐久性が高まり、高速走行する際の摩耗に強く、長寿命化が図れるメリットも生まれる。

磁性材自体の動向としては、メタル粉の普及が挙げられる。



磁気記録のトレンドと可能性
講演会資料「記録メディアの現状と将来」(1993.3) 日本記録メディア工業会(中村慶久)より

メタル粉は微粒子メタル粉の表面にきわめて薄い酸化物層を被覆したもので、本格的に登場したのは1985年の8ミリビデオからであった。この時は録画、再生を行うハード本体もメタルテープに合わせたものが開発され、ベータ方式やVHS方式の約5倍の記録密度を達成している。この後、メタル粉を応用したメディアとしてはDAT、デジタルVTR、ハイビジョンVTR、コンピュータ用テープ、フロッピーディスクなどがある。

また磁性層の形成の方法でも、塗布型から蒸着による薄膜を利用するものも登場している。蒸着テープでは、磁性材は斜め蒸着としている。この方法は、ハードディスクや光ディスクの製造方法とも通じ、さらなる高密度化に対応するものと位置付けられる。今後、さらにVTRのデジタル化が図られると、蒸着方式の採用、同時にテープの平滑性向上が進むと思われる。またフロッピーディスクの高密度化に対応するものとして、垂直配向性のあるバリウムフェライトや針状磁性体(長手方向磁化)などの開発が進んでいる。

このように飛躍的に記録密度が高まると、将来的にはどこまで行き着くのだろうか。

東北大学の中村研究室では、磁気記録シミュレータを用いて、記録メカニズムの点から磁気記録密度の将来を展望している。これによれば、磁性体の磁気特性向上、垂直磁化方式による高密度化、などを進めることにより、現在の千倍の1mm²あたり1Gbの超高記録密度に達するのはおおむね2025年ごろになると推測されている。

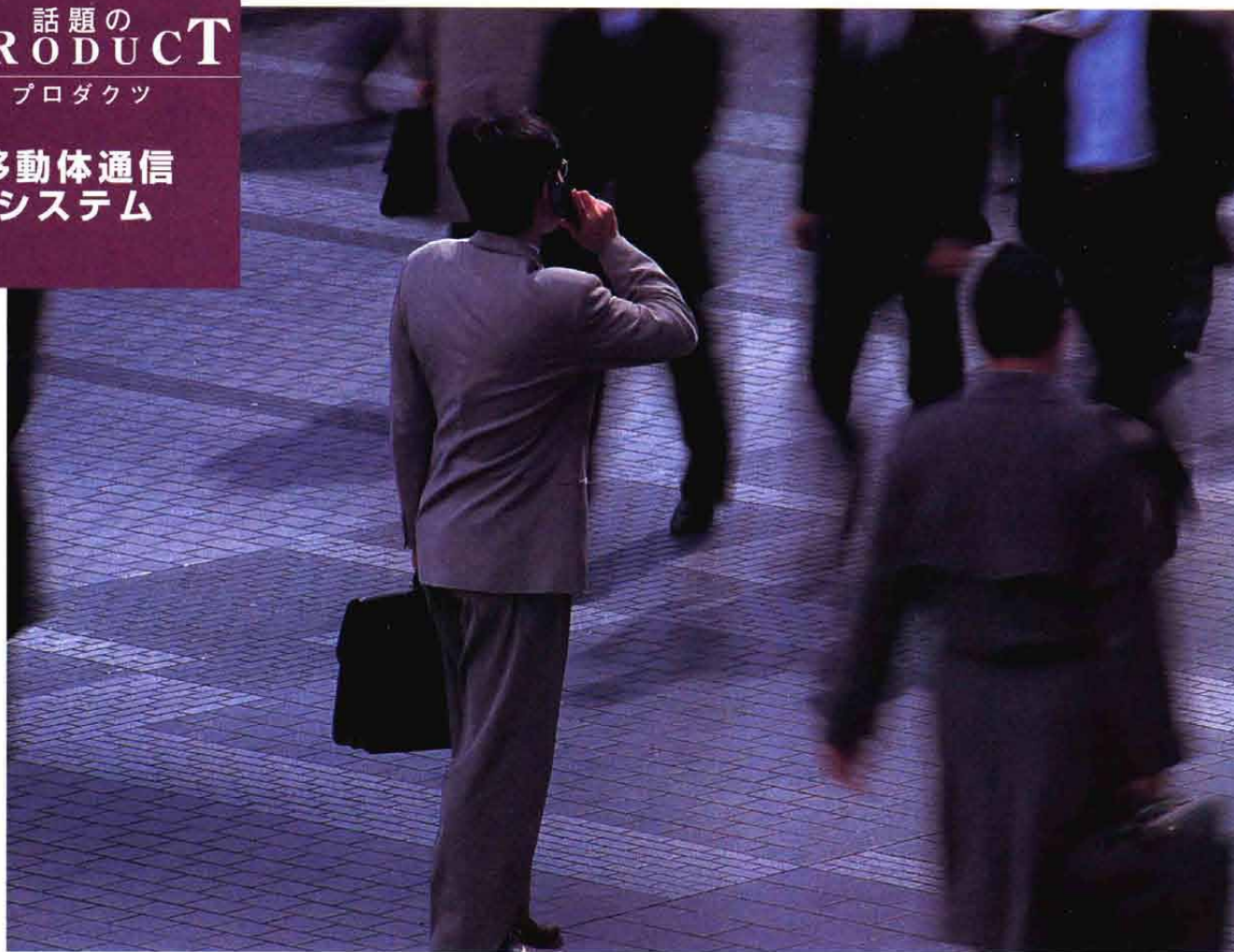
まさにとどまることを知らない磁気記録密度の進化。それをバックアップする大きな役割を、材料を初めとするミクロの技術が担っているのである。

参考文献:「記録媒体の需要動向調査報告書」(社)日本記録メディア工業会
[取材協力:戸田工業(株)]

話題の
PRODUCT

プロダクツ

**移動体通信
システム**



いま人気の携帯・PHSから 今後の移動体通信システムを考える

いまやビジネスマンの多くが持ち歩く携帯電話。
緊急時の連絡など、携帯電話が日本のビジネスシーンに
もたらした効用は大きい。また、これに続くPHSも
通話料の低価格化を前面に打ち出し、OLや学生など
プライベート利用層の取り込みを図っている。
次々に登場する便利な通信システム。
これから先どのような変化を遂げるのだろうか。



街中での携帯電話の利用も
いまやありふれた風景となった

身近になった移動通信システム

ビジネスマンの緊急連絡用ツールとして、受信のみ可能な通信機器だったポケットベル。これに加えて発信も可能とするアイテムとして登場したのが携帯電話である。発売当初はサービスを開始した事業体の狙いどおり、その利用者のほとんどがビジネスマンだった。当時まだ珍しかった携帯電話を電車やバス内、路上などで使用すれば周囲の人々から奇異の目を向けられることもしばしばあった。しかし現在、携帯電話はビジネスマンをはじめ、さまざまな人がどこで使用しても自然な通信機器となり、街中にあふれるようになった。端末（携帯電話機）の軽量化や料金の改正で、その使い勝手もよくなっている。それにともない変化を遂げたのはその利用者層である。いまやパーソナル市場にまで浸透した携帯電話は、学生でもちょっとアルバイトをすればすぐに手の届く価格なのだ。OLが友人との連絡など、プライベートのコミュニケーションツールとして利用するケースもあるようだ。

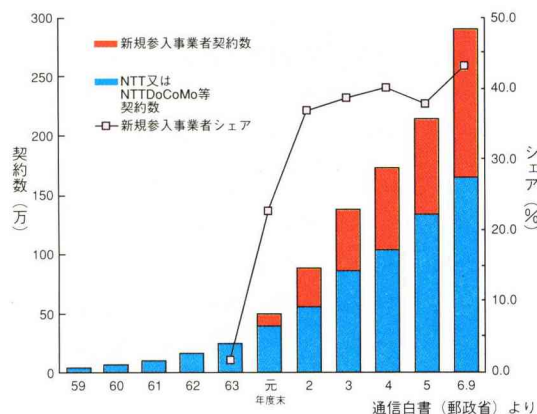
ポケットベルや携帯電話のほか、昨年7月からサービスを開始したPHS（パーソナル・ハンディホン・システム＝簡易型携帯電話）などさまざまな移動通信への加入台数は96年一月末現在、合計で867万台。全国平均で100人中約7人が加入している計算になる。そしてその9割ほどを携帯電話が占める。これはPHSが一般電話に掛けた場合の市内通話料が携帯電話の4分の1前後であるにもかかわらず、携帯電話機の安売り構成に押されてその安さが目立たないことが大きな理由だ。またPHSでは携帯電話が苦手とする地下街やビル街へのアンテナ設置が遅れ、通信エリアが確保できていない。さらに“ハンドオーバー機能”^{*1}が高速移動に対応していないため、自動車や新幹線などでの通話がしにくい。上記のように、PHSの普及が遅れているのは電話機能としては携帯電話よりも使いづらい面を持つことによるのではないだろうか。

PHSの携帯電話にまさるメリット

機能的に分が悪く見えるPHSにも、携帯電話にまさるメリットがある。

端末が小型で軽量。音声クリアなうえ送信を暗号化するため盗聴されにくい。また、総合的に見ると携帯電話の約半額の料金で利用できる。さらには電池寿命が長い。などが一般的などころだが、付加機能の例としても

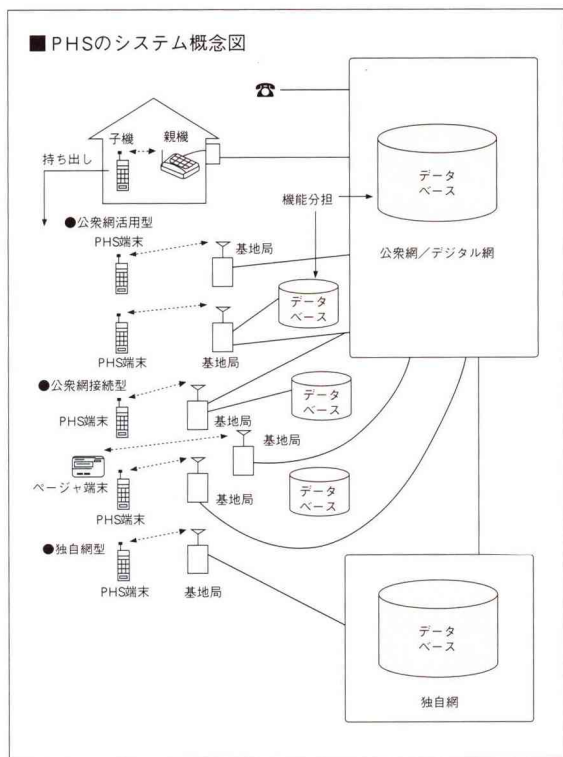
- ①ヘリカル状のアンテナと形状記憶合金を組み合わせることにより、アンテナの高感度を実現した
- ②PHS電話機が小出力設計であることに加え、次世代電池リチウムイオンバッテリーの採用によりさらなる長時間使用が可能（連続通話可能時間：最長約8時間／待ち受け時間^{*2}：最長400時間）



携帯・自動車電話契約数及び新規参入事業者のシェアの推移

^{*1}ハンドオーバー機能
無線を送受信する基地局がカバーするエリアを移動中に切り換える機能

^{*2}待ち受け時間
着信用にいま自分がどこにいるのかを知らせるため、一定時間ごとに信号を発信してネットワークにアクセスしている時間

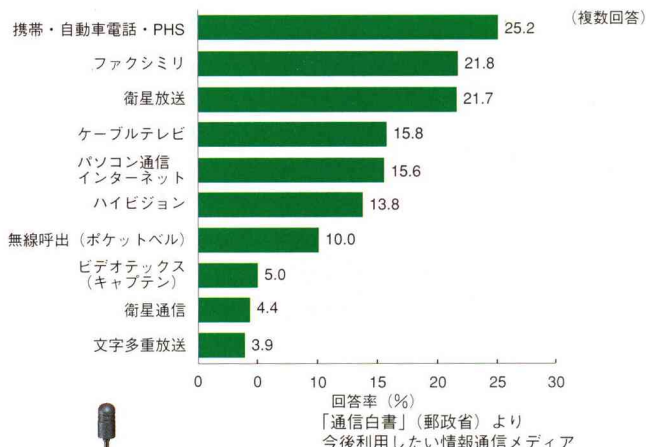


「パーソナルハンディホンのすべて」(電気通信事業政策研究会編)より

- ③専用の親機さえあれば通常のコードレス電話としても利用できる
- ④親機への登録により、PHS電話機が2台以上あればサービスエリア以外でも無料のトランシーバー機能を持つなどがあり、用途に応じて携帯電話以上に小回りの利く通信機器として利用できそうだ。さらにPHSの大きなメリットとして忘れてならないのは、現代のマルチメディアに対応できる有力な通信機器である点だ。文字や音声、情報をやり取りするマルチメディアの条件は情報がデジタル化されていることにある。PHSはまさにこのデジタル方式を用いた通信システムである。だからアナログ式携帯電話と比べればなんと16倍、またデジタル式携帯電話と比較しても同じ時間内に2倍近いデータを伝送できる。(デジタル式携帯電話の伝送量は最高でも9,600ビット/秒であるのに対し、PHSは32,000ビット/秒)その上、同量の情報を送るのにかかるコストは携帯電話の約一割程度ですむ。この情報処理能力からPHSは電話としてよりもむしろ、パソコンやインターネットなどマルチメディアの移動用情報端末としての普及が進むとする見方が強い。96年一月末現在のPHSの加入台数は、携帯電話の料金値下げなどが響き、業界の予想を下回る約71万台にとどまっている。今後のその明るい動向を期待したい。

近未来の通信機器、衛星携帯電話システム

携帯電話やPHSなどさまざまな通信システムは、料金や通話エリアなど相互のマイナス面を補い合っているか



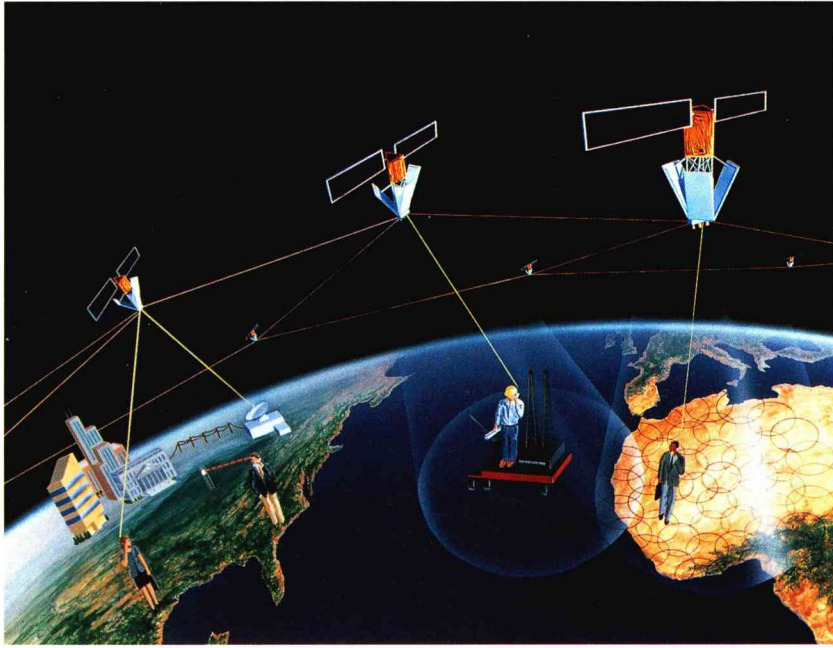
ヘリカルアンテナ

通常は棒状のアンテナを、コイル状にくるくると巻いた。本来アンテナには周波数により、電波をキャッチするのに効率のよい長さがある。携帯電話機の場合、棒状のアンテナにすると耐久性や使用時以外の収納性に支障をきたす恐れがある。また短くすれば電波をキャッチしずらくなり、感度が悪くなる。このため形状記憶合金とヘリカルアンテナを組み合わせることでアンテナに伸縮性を持たせた。使用時の感度のよさはそのままに、折れにくさなど衝撃への耐久性も実現した。

に見える。だが現在の通信システムでは、電波の送受信ができないエリアがまだまだ多く残っているのが実情だ。それを世界的な規模ですべてカバーしてしまおうという画期的なシステムが、衛星携帯電話システムである。これには、アメリカの半導体・無線通信機器メーカーのモトローラ社が提唱した『イリジウム計画』、国際海事衛星機構 (インマルサット)*3が推進している『インマルサットPプロジェクト』、アメリカのスペース・システムズ・ロラール社とクアコム社が計画する『グローバルスター』をはじめ、他にもいくつかの計画がある。

なかでも注目されるもののひとつ『イリジウム計画』は、モトローラ社を筆頭に世界各国17社の出資を受けるイリジウム社 (Iridium, Inc. 米国ワシントンD.C.) が進進母体となっており、日本国内では第二電電 (株) を筆頭に国内18社の出資を仰いでいる日本イリジウム (株) がその事業化を進めている。1990年に構想が打ち出され、1998年9月にはサービスを開始する予定だ。この計画は66基の衛星を地球の上空に周回させるもので、地球を原子核、衛星を電子に見立てた原子構造のようなシステム構成になっている。当初の計画では77基の衛星を周回させる予定だったことから、イリジウムの原子番号77になぞらえて『イリジウム計画』と名付けられた。この計画が成功すれば、地球のどの地点間でも高品質な通信を実現できるという。

このシステムにはこれまでの静止衛星とは大きく異なる秘密がある。通常の静止衛星が赤道上空約3万6千kmもの上空に位置するのに対し、イリジウム計画の衛星は地上



イリジウムサービスのイメージ。全世界のどこにいても自由に通話できるようになる



イリジウムサービスの衛星配置予想図



イリジウムサービスの衛星携帯電話端末

わずか約780kmの低軌道に位置するのだ。このため伝送遅延はほとんどなく、衛星通話にありがちな「不自然な会話」は、イリジウム衛星携帯電話においては解消されるのである。また、イリジウムシステムは衛星間通信を採用しているため、イリジウム端末相互間であれば、まったく地上の通信網を介することなく通話を行うことができる。さらに、世界各地に設置される関門局（日本では長野県に96年2月から建設着工）を通じて地上ネットワークと接続することにより、イリジウム衛星携帯電話と家庭、事務所などの電話とが通信することが可能となる。さらには既存の地上系携帯電話端末とイリジウム端末を一体化した端末を使用すれば、現在の携帯電話システムとの共用もできるのだ。

このイリジウム衛星携帯電話システムの効用としては、以下のような点が挙げられる。

- ①海外へ出ても、国内で使っている端末、電話番号がそのまま使用できる（“いつでも、どこでも、誰とでも”通信できる）
- ②通信整備が遅れている発展途上国の通信インフラとなりうる
- ③山岳や海洋での遭難や思いがけない災害に巻き込まれた場合でも、その場からただちに緊急連絡が可能
- ④（端末相互間であれば）地上の通信網を介する必要がないため、地震などによる地上回線の不通時にも、通信手段を確保できる

このほか、電話としての利用以外にファクシミリ、データ通信などマルチメディアとしての利用が可能である

ことはいうまでもない。利用料金は現段階で基本料金が1ヵ月50ドル、通話料は1分につき3ドル（ともに米ドル）程度を設定している。近い将来、この価格での実現が可能となれば、現在の携帯電話システムと比べてもさほどの割高感はない。

さらに衛星携帯電話システムは、現在電波の送受信基地局が設置されていない地域（国内では総面積の60%弱）にも通信システムを提供できるという大きな役割を担っている。つまりこのシステムによって、日本中どこであっても電話のかけられないエリアはなくなるのだ。また世界規模でも、全世界のどこにしようと、どこにいる人にも携帯電話機から直接通信ができる。この手軽さは国際電話に対するこれまでの観念を一層し、国内から海外への通信、海外相互間の通信などを活発にするだろう。

通話する相手との距離感が縮まることは確実で、移動先からでも海外への通信を可能とするこのシステムは、ビジネスシーンへの浸透に対する期待も大きい。プライベートでも海外の友人・知人にどこからでも直接通信できるという手軽さは、やはり画期的なシステムとして利用率の高いものとなろう。これまでの通信システムを、また一段と飛躍させてくれそうな衛星携帯電話システム。今からその実現が待ち遠しい限りだ。

※3 国際海事衛星機構

短波に依存していた海事通信を衛星技術の導入によって改善することを目的に設立された、海事衛星運用のための国際機構

【資料・写真提供：第二電電（株）、日本イリジウム（株）、京セラ（株）】

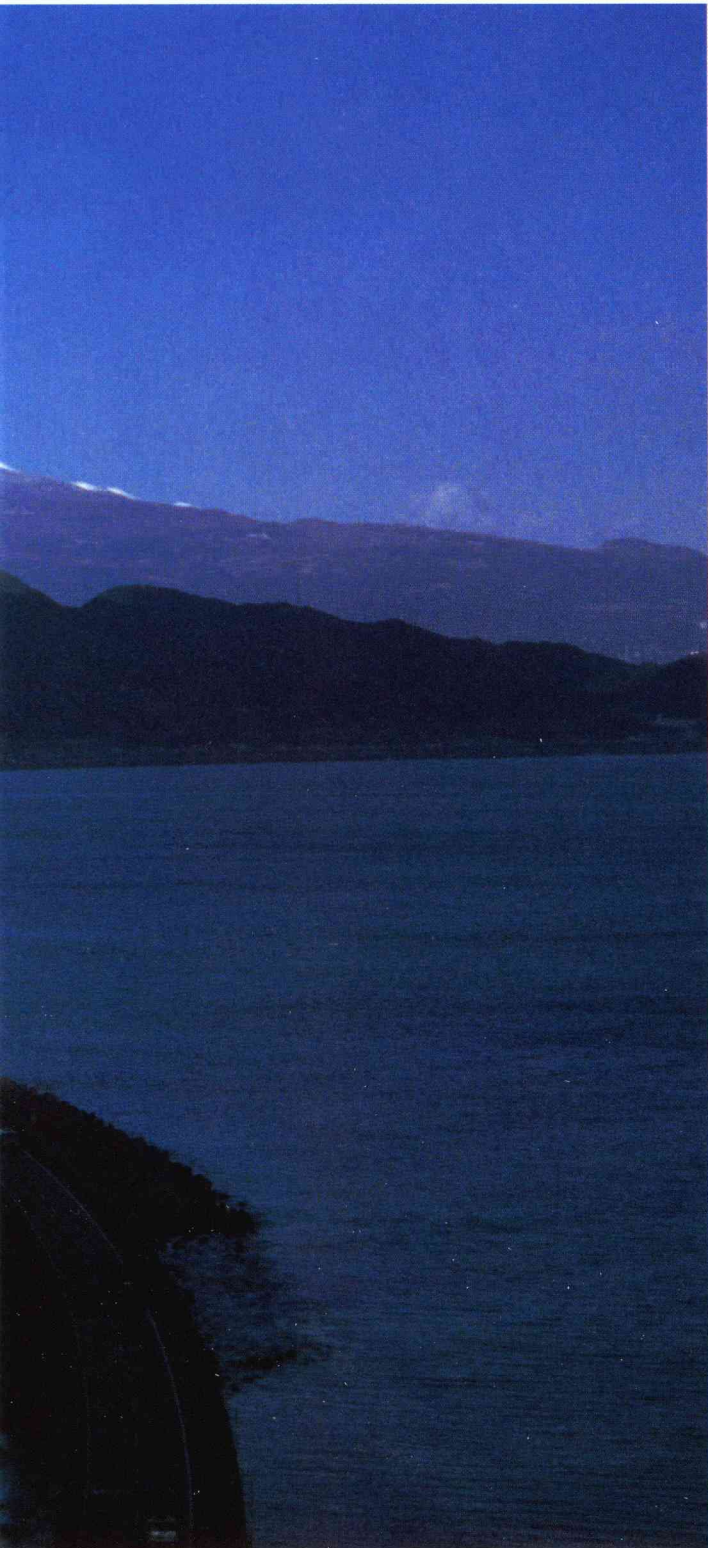
鉄の絶景

Steel Landscape.



旅景色の鉄～静岡

太平洋に面した東海道は、鎌倉時代より国内の最重要幹線としての役割を果たしてきた。国道1号線、新幹線と平行して走り、富士山と海岸線とを臨む眺望で知られる東名高速道路。静岡の由比町にスポットをあてる。



市民に親しまれてきた東海道の旅

江戸時代の末期に日本を旅したオランダ商館の医師、シーボルトは、その道中の観察から、あることを発見した。

ヨーロッパやアジアの他の国の人々と比べて、旅行というものをごこれほど気軽に、一般的に行なっている国民はいない。大名たちは参勤交替で一年置きに領土と江戸とを行列で結ぶ。商業的な流通も活気があるし、伊勢参りのような巡礼旅行も盛んに行なわれる……。

この時代の日本では、すでに旅がひとつのシステムとして完成されていた。街道の整備、宿泊施設や、馬、渡し船といった輸送手段の充実。これらはすべて、参勤交替という特殊な制度の産物であることはいうまでもないが、そうやって人々が国中を行き交うことになれば、土産話を通して見識も広まり、ぜひ自分もという気運も高まっていく。一般庶民もまた、旅から戻った人たちの諸国でのエピソードをして、旅への誘いとしたのだろう。

日本文学史上、著者によって一から創作された人物の中で、もっとも有名なのは、弥次郎兵衛と喜多八の二人だとよくいわれる。「東海道中膝栗毛」の主人公だ。一般に、弥次・喜多の方が通りがいい。

旅をテーマにした書物は多いが、この作品について知らぬ人はいまい。徹底した楽天主義者の二人が、笑いを誘う失敗を重ねながらも東海道の旅をつづける。江戸を出てから大坂（大阪）遊覧を終えるまでが本来の「東海道」であるが、あまりの人気に打ち止めにもできず、結局、続編がつくられ、中山道を進み、草津温泉に寄ったりして、最終的に江戸へ戻ってくる。

よもやの大ヒットで続編に追われつづけた作者の十返舎一九であるが、この作品の中で二人が江戸に戻ってくるまで、なんと20年もかかっているから、考えてみれば大作だ。

さて、江戸を起点とし、東海道、中山道、日光街道、甲州街道、奥州街道をもって五街道とされる。この中で朝廷と幕府とを結ぶ路線となる東海道が、もっとも重要視された。道幅は、例えば品川あたりでは6～9mほどの広さであったというから、かなり広い。その分、交通量も多かったということだろう。

由比の海岸線を走る東名高速道路



駿河湾での漁獲の多いサクラエビ
由比の名産でもある

由比に見る海岸線の風光明媚

歩いて遠い旅をする時代が過ぎ去り、かつての2か月近く掛けた遊覧旅行が新幹線なら2時間半に縮まった東海道。その景観と旅の趣は大きく変わったとはいえ、存分に目を楽しませてくれる名所は多い。

東名高速道路から臨む風光明媚は数多いが、静岡県由比町のあたりでは、大きく海に迫り出して、富士山と海岸線とが織りなす絶景をドライバーたちに与えてくれる。由比は、かつて由井、湯居などと記名され、東海道の宿場町として栄えてきた。幕府転覆を狙った由井正雪の出身地、また、サクラエビの名産地としても知られる。

東名高速は、美しい自然と調和する円曲線を設計の基本にしてつくられた。鉄の力強い構造体がゆるやかな曲線を支えている。海辺に沿って流れるような道筋が、美しい景色の移り変わりを満喫させる。のんびりと歩いての旅は懐かしくも風流だが、こうして高速で走り抜けることによる景観の素晴

らしさも捨てたものではない。海岸線を行く解放感、峠を越えたとき、突然目の前に広がるパノラマ。次々と変化していく景色……。

1963年（昭和38年）に名神高速の一部が完成したのが、わが国における高速道路のはじまりだ。オリンピックムードに沸く世相の中、「ハッスル」が流行語となった。やがて69年になって東名高速が開通し、本格的な高速道路の時代を迎える。そして現在、国内の高速道路は、約 6,500kmに達しようとしている。高速道路を走っているときに目にする景観は、他では感じられない壮快感と迫力をもって私たちに迫ってくる。高速道路の延長によって、新しい景観が次々と私たちに提供されつづけていると見ることもできる。

弥次・喜多は由比の付近では雨に遭い、見事な景色を楽しむ機会を失った。現在、東名高速の由比付近を通過する車は、毎日約65,000台ほどだという。それだけ多くの人々が、かつては一期一会だった風景に接して、走り抜けている。



由比駅から約2km、旧由比宿の中心に由井正雪の生家がある。代々紺屋を営んでいた。幕府転覆の企てに失敗し、駿河城下（静岡市）にて自決した。ちなみに、弥次・喜多は江戸っ子のように見えて、その実、駿河の生まれだった

展望

これからの科学技術行政 —科学技術基本法の目指すところ—

野崎雅稔 科学技術庁科学技術政策局政策課
Masatoshi Nozaki

Science and Technology Policy in the Future —Aim of the Science and Technology Basic Law—

1 はじめに

1995年11月8日、「科学技術基本法」は議員立法により国会で全会一致で可決成立し、同月15日、公布・施行された。同法は、今後の我が国の科学技術政策の基本的な枠組みを与えるものであり、そして、21世紀に向けて、我が国が「科学技術創造立国」を目指して、科学技術の振興を強力に推進していく上での大きなバックボーンとなるものといわれている。そこで、この「科学技術基本法」に関して、制定経緯、背景、基本的な考え方、ポイント・ねらい、今後の展望などについて、参考となる資料を交えながら紹介することとしたい。

2 制定の経緯及び背景

2.1 我が国の「科学技術」を取り巻く情況

我が国の「科学技術」は、いわゆるキャッチアップの時代の終焉を迎えている。これまでは、程度の差こそあれ目標となる先進国が常に存在し、かなりの分野で技術導入が可能であったといえるが、今後は、世界のフロント・ランナーの一員として、自ら未開の科学技術分野に挑戦し、創造性を最大限に発揮し、未来を切り拓いていかなければならない時機に差し掛かっている。

とりわけ、天然資源に乏しく、人口の急速な高齢化を迎えようとしている我が国が、経済の自由化・国際化に伴う経済競争の激化とあいまって直面することが懸念されている、産業の空洞化、社会の活力の喪失、生活水準の低下といった事態を回避し、明るい未来を切り拓いていくためには、独創的、先端的な科学技術を開発し、これによって新産業を創出することが不可欠である。

また、環境問題、食料・エネルギー問題、エイズ問題など人類の将来に立ちはかかる諸問題の解決に対し科学技術への期待は大きく、この面での我が国の貢献が強く求められている。

さらに、科学技術は、我々の自然観や社会観を大きく変

え、新しい文化の創成を促すという側面を有するため、これを人間の生活、社会及び自然との関わり合いの中でとらえていく必要があり、このような視点も踏まえ、新たな視点に立った科学技術を構築していくことが求められている。

2.2 我が国の「科学技術」の現状

ひと頃、「ハイテク＝日本」の言葉に踊らされ、「もう外国に学ぶべきものはない」などと、何となくその気になった我が国の「科学技術」は、実は楽観視できない状況にある。

科学技術庁が1993年に行った「我が国の研究活動の実態に関する調査報告」によると、我が国の研究水準の対米比較・対欧比較の結果、確かに、「生産・機械分野」等の特定分野における応用研究・開発研究では、自他共に認める世界最高水準の実力を保持しているが、独創的・先端的科学技術の源泉となる基礎研究の水準は、対米比較において調査した全分野で立ち遅れており、対欧比較でも「情報・電子分野」でわずかに我が国が優位であるものの、他の分野（ライフサイエンスや物質・材料、海洋・地球）ではいずれも欧州が優位との結果である。また、我が国の基礎研究の水準全体については、3年前に比べ、欧米に対し相対的に劣勢の方向、すなわち、実力差を大きく開けられていく傾向にあるとの結果も出ている。

我が国の研究環境についても、基礎研究の担い手たるべき大学・大学院、国立試験研究機関等では、欧米に比べ劣悪な状況に置かれている。研究者一人当たりの研究費をみても、図1に示すとおり、欧米主要国に大きく差をつけられている。さらに、施設の老朽化についても経年20年以上の施設が、国立大学で49%、国立研究機関では科学技術庁及び通産省関連を例にとると、全体の29%であり、設備の陳腐化についていえば、同じく科学技術庁及び通産省関連の国立研究機関における耐用年数が超過した設備が全体の82%を占めているとのことである。

また、科学技術の高度化・専門化に対応して総合的・学際的な取り組みが緊要となっているにもかかわらず、大学、国立試験研究機関、民間等の研究者が、組織や専門分野の壁を

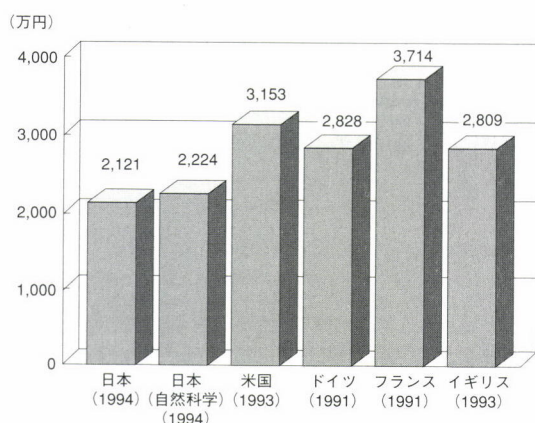


図1 主要国の研究者一人当たり使用研究費

注) 1.国際比較を行うため、各国とも人文・社会科学を含めている。
 なお、日本については自然科学のみの値を併せて表示してある。
 2.研究費はOECD購買力平価換算。
 3.日本のみ専従換算(full-time equivalent)をしていない。

表1 我が国の科学技術の現状

(年度の記載がないものは1992年度の数字)

項目	国名	日本 (94年度)	米 ^(注3) (94年度)	欧 州		
				独	仏(93年度)	英(93年度)
国力	国民総生産(GNP)	482兆円	687兆円	251兆円	138兆円	105兆円
	人 口	1.3億人	(93年度) 2.6億人	0.8億人	0.6億人	0.6億人
研究 活 動	研究費総額 《自然科学部門》	13.6兆円 (12.4兆円)	17.3兆円	6.3兆円	3.4兆円	2.2兆円
	研究費の対GNP比 《自然科学部門》	2.82% (2.57%)	2.51%	2.51%	2.43%	2.19%
	政府負担額 《自然科学部門》	2.9兆円 (2.5兆円)	6.2兆円	(91年度) 2.2兆円	1.5兆円	0.7兆円
	政府負担割合 《自然科学部門》	(21.5%)	(36.1%)	(36.6%)	(45.3%)	(32.3%)
	対GNP比 《自然科学部門》	[0.60%]	[0.91%]	[0.95%]	[1.10%]	[0.67%]
	《除く国防研究費》 政府負担割合 対GNP比	2.8兆円 (20.6%) [0.58%]	2.4兆円 (17.5%) [0.34%]	(91年度) 2.0兆円 (33.8%) [0.83%]	0.9兆円 (33.6%) [0.67%]	0.4兆円 (18.7%) [0.38%]
	民間負担額 (内は民間負担割合)	10.7兆円 (78.4%)	11.0兆円 (63.9%)	(91年度) 3.7兆円 (61.0%)	1.6兆円 (46.3%)	1.3兆円 (56.0%)
	研究者数 《自然科学部門》	64.1万人 (55.8万人)	(93年度) 96.3万人	(91年度) 24.1万人	(92年度) 13.8万人	14.0万人
	ノーベル賞受賞者数 《自然科学部門》 95年現在、[]内は戦後	5人 ^(注5) [5人]	175人 [156人]	62人 [26人]	25人 [9人]	66人 [41人]

注) 1.各国とも、人文・社会科学を含む。
 2.邦貨への換算は国際通貨基金 (IMF) 為替レート (年平均) による。
 3.米国及び独の研究費は暫定値、独の研究者数は推定値である。
 4.日本の国民総生産は、1990年基準のものを使用した。
 5.ノーベル賞の日本人受賞者 (自然科学部門) は以下の通り

氏名	受賞	部門	受賞研究テーマ
湯 川 秀 樹	昭和24年	物 理	核力の理論的研究に基づく中間子存在の予言
朝 永 振一郎	昭和40年	物 理	量子電磁力学の基礎的研究
江 崎 玲 於奈	昭和48年	物 理	半導体におけるトンネル現象の実験的発見
福 井 謙 一	昭和56年	化 学	化学反応におけるフロンティア電子理論
利根川 進	昭和62年	医学生理学	免疫機構の分子生物学的解明

超えて十分に有機的に連携しているとは言い難い状況にある。

さらに、将来の我が国の科学技術を担う若者に科学技術離れの現象が見られることは、国の将来にとって由々しいことである。

因みに、表1に「科学技術指標の国際比較」を示す。我が国は、民間部門 (企業等) を含めた国全体の「研究費総額」及び「対GNP比」については、欧米諸国に比べても遜色のない水準となっているが、「研究費の政府負担額の対GNP比」は0.6%であり、欧米諸国が概ね1%程度であるのに対して、低い水準にある。また、政府の負担率については、欧米諸国が概ね4割程度であるのに対し、我が国は2割にとどまっており、民間部門への依存率 (8割) が高い。これに関しては、かねてより、政府の研究開発投資額の抜本的拡充が急務であると指摘されている。

2.3 「科学技術基本法案」提出の経緯

以上に述べた我が国における科学技術の現状等を踏まえた上で、「将来にわたり先進国の一員として、世界の科学技術の進歩と人類社会の持続的発展に貢献するとともに、真に豊かな生活の実現とその基盤たる社会・経済の一段の飛躍を期するためには、『科学技術創造立国』を目指し、ここに改めて新たな視点に立って、科学技術の振興を我が国の最重要政策課題の一つとして位置づけ、科学技術振興の方針と基本方策を明らかにするとともに、関連施策の総合的、計画的、かつ積極的な推進を図ることが不可欠である。」との観点から、このための法律を議員立法により制定しようとする気運が、特にここ数年来、科学技術政策に明るい国会議員の間で高まった。

議員立法による「科学技術基本法」の制定を目指した検討は、まず、1994年3月に自民党の科学技術部会において、当時の部会長である尾身幸次議員らを中心に開始された。この検討は、与党3党 (自民党、社会党、新党さきがけ) の科学技術担当議員の間に広まり、さらに新進党も協議に参加するに及んだ。そして、1995年10月中旬までに、与党3党及び新進党の間で具体的な法案がまとめられ、同月27日、4党による共同提案の形で、「科学技術基本法案」が衆議院に提出されるに至った。

2.4 国会における法案の審議等

衆議院議員9名により提案された「科学技術基本法案」は、直ちに衆議院科学技術委員会に付託され、1995年10月31日に同委員会で審議が開始され、同日、衆議院本会議、翌11月1日に参議院科学技術特別委員会へと進み、11月8日の参議院本会議をもって総ての審議を終え成立をみた。いずれの委員会、本会議における採決でも全会一致で可決されている。なお、両院の委員会ではそれぞれ、法律の本文

には書き込めないものの、法律の運用面で、政府等に注文を付ける形での附帯決議が附されている。その後、同月15日に官報公布となり、同日付けをもって同法は施行されるに至った。

3 科学技術基本法の内容

「科学技術基本法」は、「総則」「科学技術基本計画」「研究開発の推進等」「国際的な交流等の推進」「科学技術に関する学習の振興等」の5つの章及び附則からなり、条文は全部で19条という構成である。(表2参照)

以下に、その主な内容について記述することとする。

3.1 「科学技術基本法」の目的 (第1条)

法律の目的は、第1条に規定されている。

「この法律は、科学技術（人文科学のみに係るものを除く。以下同じ。）の振興に関する施策の基本となる事項を定め、科学技術の振興に関する施策を総合的かつ計画的に推進することにより、我が国における科学技術の水準の向上を図り、もって我が国の経済社会の発展と国民の福祉の向上に寄与するとともに世界の科学技術の進歩と人類社会の持続的な発展に貢献することを目的とする。」

ここで、本法の対象とする「科学技術」について、「人文科学のみに係るものを除く。」としている点について、若干触れておく。

一般に「科学技術」は、その対象により、「自然科学に係るもの」と「人文科学に係るもの」に大別される。さら

に、「人文科学に係るもの」は人文科学のみに係るものとそれ以外の自然科学にも関連するものとに分けられる。

「人文科学と自然科学の融合領域、境界領域にある研究」(たとえば、コンピュータ・サイエンスは、言語学、心理学、社会学といった人文科学と自然科学である電子工学が融合して研究開発が進められている。)については、「人文科学のみに係るもの以外のもの」に該当するものであることから、この法律の対象とすべき「科学技術」に該当する。近年の科学技術の進展に伴い、これら融合領域あるいは境界領域における研究がかなり幅広く行われているのが現状である。

一方、「人文科学のみに係るもの」としては、文献の世界のみで研究が完結するような「文学」の例が挙げられるが、これらについては、その性格上、自然科学あるいは自然科学と関連を有するものと同列に、計画的・総合的な推進方策を講じることは必ずしも適当ではないとの観点から、これをこの法律に基づき振興を図るべき「科学技術」から除外したとのことである。国会の法案審議では、「人文科学のみに係る科学技術は少なくなっているというのが提案者の認識である」旨の答弁がなされている。

3.2 科学技術振興の基本方針 (第2条)

第2条は、科学技術振興の基本方針を規定している。

科学技術が我が国及び人類社会の将来の発展のための基盤であり、科学技術に係る知識の集積が人類にとっての知的資産であることにかんがみ、研究者等の創造性の発揮を

表2 科学技術基本法（平成7年11月15日 法律第130号）の構成

第1章 総則	〔本法の目的、科学技術振興の基本方針、国・地方公共団体の責務、施策の策定等に当たっての配慮事項、法制上の措置等及び年次報告といった一般・共通の事項について規定する総則〕
〔第1条〕 目的	
〔第2条〕 科学技術の振興に関する方針	
〔第3条〕 国の責務	
〔第4条〕 地方公共団体の責務	
〔第5条〕 国及び地方公共団体の施策の策定等に当たっての配慮	
〔第6条〕 大学等に係る施策における配慮	
〔第7条〕 法制上の措置等	
〔第8条〕 年次報告	
第2章 科学技術基本計画	〔科学技術基本計画について、規定すべき事項、策定・変更の手続き、要旨の公表等その他、同計画の実施に必要な資金の確保に関する措置についての規定〕
〔第9条〕 科学技術基本計画	
第3章 研究開発の推進等	〔科学技術の振興のために国が講じるさまざまな施策についての規定〕
〔第10条〕 多様な研究開発の均衡のとれた推進等	
〔第11条〕 研究者等の確保等	
〔第12条〕 研究施設等の整備等	
〔第13条〕 研究開発に係る情報化の促進	
〔第14条〕 研究開発に係る交流の促進	
〔第15条〕 研究開発に係る資金の効果的使用	
〔第16条〕 研究開発の成果の公開等	
〔第17条〕 民間の努力の助長	
第4章 国際的な交流等の推進	〔国が講じる国際的な交流等の推進のための方策についての規定〕
〔第18条〕 国際的な交流等の推進	
第5章 科学技術に関する学習の振興等	〔国が講じる科学技術に関する学習の振興等に関する方策についての規定〕
〔第19条〕 科学技術に関する学習の振興等	
附 則	〔本法は公布の日から施行することを規定〕

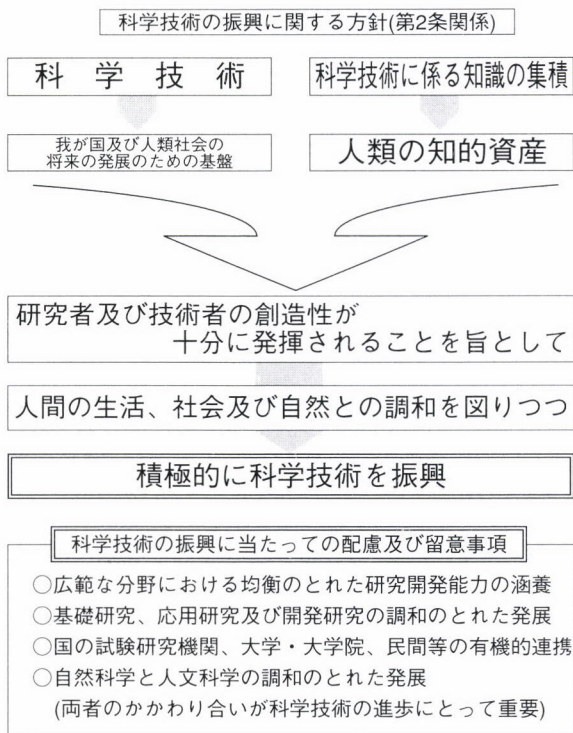


図2 科学技術基本法の基本理念

旨として、人間の生活、社会及び自然との調和を図りつつ、その振興を積極的に行なうこと、広範な分野における均衡のとれた研究開発能力の涵養、基礎研究、応用研究及び開発研究の調和のとれた発展に留意することを「科学技術振興の基本方針」として定めている。(図2参照)

3.3 国及び地方公共団体の責務等(第3～6条)

第3条及び第4条では、それぞれ科学技術振興に関する国及び地方公共団体の責務を規定している。

第5条は、基礎研究の推進に当たっての配慮に関する規定である。そもそも、基礎研究の性格に関して、「新しい現象の発見及び解明並びに独創的な新技術の創出等をもたらすものであること」「成果の見通しを当初から立てることが難しいこと」「成果が実用化に必ずしも結び付くものではないこと」としてとらえた上で、基礎研究の推進については、本来的に営利を目的とする民間部門(企業等)が主たる担い手となることを期待するのには無理があり、したがって、大学や国公立の試験研究機関が果たすべき役割がますます重要になってくる。このため、第5条では、国及び地方公共団体に対し、基礎研究の推進における国及び地方公共団体が果たす役割の重要性について配慮するよう規定している。

また、第6条では、国及び地方公共団体による大学等に係る施策の策定等に当たっては、大学等の研究活動の活性化を図るとともに、研究者の自主性の尊重などその研究の特性に配慮すべきことを規定している。

これら第3条から第6条までの規定振りについては、図3を参照されたい。

3.4 科学技術基本計画(第9条)

第9条では、政府は、科学技術の振興に関する施策の総合的かつ計画的な推進を図るため、科学技術会議の議を経て「科学技術基本計画」を策定することとしている。

「科学技術基本計画」には、次の事項が定められることとされている。

- 1) 研究開発の推進に関する総合的な方針
- 2) 政府が、研究開発の推進のための環境を整備するために、総合的かつ計画的に講じる施策
——研究施設及び研究設備の整備、研究開発に係る情報化など
- 3) その他科学技術の振興に関し必要な事項

また、政府は「科学技術基本計画」について、その実施に関し必要な資金の確保を図るため、必要な措置を講ずるよう努めることとしている。

さらに、国会での法案審議の結果、衆参両院の委員会においてそれぞれ附帯決議がなされているが、この「科学技

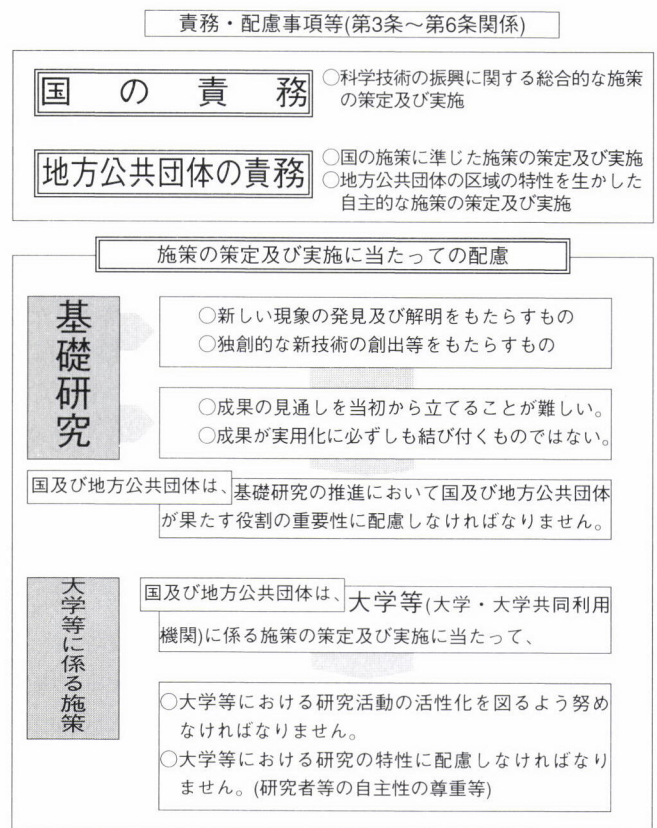


図3 国・地方公共団体の責務等

術基本計画」の策定方針等については、次のとおり、決議されている。

- 科学技術基本計画は、10年程度を見通した5年間の計画とする。
- 科学技術基本計画を策定するに当たっては、当該基本計画に基づき、我が国が科学技術創造立国を目指すため、政府の研究開発投資額の抜本的拡充を図るべく、当該基本計画の中に、例えば講ずべき施策、規模等を含めできるだけ具体的な記述を行うよう努めること。
- 我が国の研究開発における民間の果たす役割の重要性にかんがみ、科学技術基本計画に民間の研究開発について必要な事項を定め、その研究開発が促進されるよう所要の施策を抜本的に強化すること。

3.5 科学技術振興のための具体的施策(第10～19条)

第10条から第19条においては、科学技術の振興のために国が講じるさまざまな施策について規定している。以下に、そのあらましについて、簡単に紹介する。

(1) 多様な研究開発の均衡のとれた推進等(第10条)

第10条は、「国は、広範な分野における多様な研究開発の均衡のとれた推進に必要な施策を講ずる」とともに「国として特に振興を図るべき重要な科学技術の分野に関する

研究開発の一層の推進を図るため、その企画、実施等に必要施策を講ずる」ことを規定している。

前者の「広範な分野における多様な研究開発の均衡のとれた推進に必要な施策を講ずる」とは、特定の重要科学技術分野のみに力を入れるのではなく、どのような研究開発から将来の新しい科学技術の芽が出てくるのかは分からないことから、その芽を摘んでしまうことがないように、現時点ですぐに役立ちそうもない分野をも含めて、広範な分野での多様な研究開発を推進すべきとの趣旨である。たとえば大学や国立試験研究機関における経常的な研究開発の充実・強化が想定される。

後者の「国として特に振興を図るべき重要な科学技術の分野に関する研究開発の一層の推進」については、そのときどきにおいて、国全体として特に力を入れるべき科学技術分野として考えられるものについては、国全体としての研究開発基本計画の策定や産・学・官共同の研究開発プロジェクトにより、当該分野の積極的な推進を図るべきとの趣旨である。

(2) 研究者等の確保等（第11条）

第11条は、各研究開発機関における研究開発の担い手である「研究者及び技術者（研究者等）」の確保、養成、適切な処遇の確保等、並びに研究開発活動に不可欠な「支援人材」の確保、養成、適切な処遇の確保等について規定している。

第1に、「研究者等の確保、養成及び資質向上のため施策」が規定されているが、「大学院における教育研究の充実」の他、ポストク1万人計画にみられるような若手研究者を対象とした支援事業の整備・充実等が重要である。

第2に、「研究者及び技術者の職務がその重要性にふさわしい魅力あるものとなることを目指した、研究者等の適切な処遇の確保のための施策」については、給与面の改善のみならず、研究資源の重点的な配分等による研究現場における優遇措置、他の大学や研究機関への派遣・留学等による資質向上のための施策が重要である。

3番目は「研究開発に係る支援のための人材に関する施策」の規定である。研究支援人材とは、たとえば、分析機器の調整や研究用サンプルの加工処理、実験動物の繁殖・飼育といった研究支援業務を専門的に行う者のことである。研究者等を本来の研究活動に専念させるためには、優秀な研究支援人材の確保・処遇改善が不可欠であり、研究者等と同様の施策を講じることが重要である。

(3) 研究施設等の整備等（第12条）

産・学・官の研究開発機関を問わず「研究施設及び研究設備の整備」は、研究環境に関する最も重要な要素の一つである。特に、基礎研究の主たる担い手たる国立試験研究

機関及び大学等においては、研究施設等の陳腐化・老朽化がかなり進んでおり、これら研究施設等の拡充・高度化が急務であるといわれている。

また、研究開発を効果的に推進する観点から、「研究材料の円滑な供給等研究開発に係る支援機能の充実」も重要な課題である。ここでいう「研究材料」とは、「分析・測定機器の校正用標準物質」や「細胞・遺伝子類」、「研究用試薬類」を意味しているが、これらを迅速かつ確実に供給する体制を整えることが求められている。

(4) 研究開発に係る情報化の促進（第13条）

研究開発の効率的な推進を図るためには、研究開発の現場における、あるいは現場と現場をつなぐ「研究開発に係る情報化の促進」も極めて重要な課題である。

まず、「科学技術に関する情報処理の高度化」として、科学技術情報を円滑に流通させることはもとより、研究開発の手段としての画像処理技術の高度化、媒体である大型コンピュータ等の機器の整備、さらにソフトウェアの開発等が具体的な施策として想定される。

「科学技術に関するデータベースの充実」に関しては、たとえば、日本科学技術情報センター（JICST）等が「文献案内型データベース」提供を行っているが、今後、これらの一層の充実が期待されるほか、我が国では立ち遅れている「ファクト型データベース」や「全文型データベース」についてもその開発・整備が求められている。

さらに、「研究開発機関等との間の情報ネットワークの構築」の例としては、省庁の枠を越えて国立試験研究機関等を接続する「省際研究情報ネットワーク」の整備が着手されているが、今後、こうした情報ネットワークの拡充・強化が期待される。

(5) 研究開発に係る交流の促進（第14条）

第14条では、「研究交流」により研究者等の多様な知識の融合等を図ることが新たな研究開発の進展をもたらす源泉となるものであり、研究交流が研究開発の効率的な推進にとって不可欠であるとの認識の下、研究者等の個人のレベル及び研究開発機関（組織）のレベルでの研究交流を促進するための施策を国が講じるよう規定している。

特に、近年において境界領域分野や複合領域分野における独創的・先端的な研究開発への期待が高まっており、専門の枠を越えた異分野交流の重要性が指摘されるに至っている。たとえば、「生物学」と「機械工学」といった異なった分野の研究者・技術者による共同研究によって、先端的基盤技術分野の一つとされている「マイクロマシン技術開発」が推進されているように、既存の組織や専門分野の枠を越えた研究交流をいかにスムーズに行うかが重要な要素になってきている。

(6) 国際的な交流等の推進 (第18条)

第18条では、「国際的な科学技術活動を強力に展開することにより、我が国の国際社会における役割を積極的に果たすとともに、我が国における科学技術の一層の進展に資する」との観点から、科学技術に関する国際的な交流等のための施策を国が講じることを規定している。

「研究者等の国際的交流」として、我が国の研究者等が海外の研究機関等に出向くばかりでなく、外国人研究者を我が国の国立試験研究機関等に受け入れるためのフェロシップ制度等の充実や居住施設の整備等が重要である。

「国際的な共同研究開発」としては、我が国のイニシアティブにより創設された「ヒューマン・フロンティア・サイエンス・プログラム (HFSP)」や日・米・欧・露の4極共同で推進されている「国際熱核融合炉 (ITER) 計画」、さらに日・米・欧・加・露が参加している「宇宙ステーション計画」などが既存の例である。

また、「科学技術に関する情報の国際的流通」としては、たとえばJICSTが国際的な情報ネットワークを通じた英文データベースの提供の例がある。

(7) 科学技術に関する学習の振興等 (第19条)

第19条では、「国は、青少年をはじめ広く国民があらゆる機会を通じて科学技術に対する理解と関心を深めることができるよう、学校教育及び社会教育における科学技術に関する学習の振興並びに科学技術に関する啓発及び知識の普及に必要な施策を講ずるものとする。」と定めている。

「若者の科学技術離れ」が社会的風潮として懸念されている今日、将来の優秀な研究者等を確保していくためには、青少年をはじめとして、国民の科学技術に対する理解と関心を深めるしていくことが極めて重要である。

「学校教育及び社会教育における科学技術に関する学習の振興」として、小・中・高等学校における理科教育の改善、大学等の理工系分野におけるカリキュラム改善・充実や時代のニーズに合った学部・学科への改組などによる教

育研究体制の見直し、さらに、社会教育において、青少年を対象とした魅力的・創造的な課外科学学習プログラムの開発や科学教材の研究開発、各種科学普及事業の実施などの施策が想定される。

一方、「科学技術に関する啓発及び知識の普及」に関しては、科学技術を身近に感じるための各種イベントの開催や科学館等における展示施設の整備等が例として挙げられる。

(8) その他の科学技術振興方策

上記 (1)～(7) で紹介した施策の他、研究開発機関の現場における研究開発の進展に応じて予算の費目間流用を弾力的に運用していくこと等を主なねらいとした「研究開発に係る資金の効果的使用 (第15条)」、研究開発の成果の活用を図ることに主眼をおいた「研究開発の成果の公開等 (第16条)」及び、我が国の研究活動において重要な役割を果たしている民間の研究開発を促進するための「民間の努力の助長 (第17条)」についての規定がなされている。

4 今後の展望

本件「科学技術基本法」の施行を受けて、政府は早速、第9条に基づく「科学技術基本計画」の策定に着手している。これに関連して、内閣総理大臣は、平成7年11月29日に科学技術会議に対して、「科学技術基本計画について」の諮問を行っている。目下、科学技術会議では、総合計画部会の場合を中心に当該諮問事項について、精力的な審議を進めているところである。

政府としては、今後、科学技術会議からの答申を得て、できるだけ早期に、科学技術基本計画を策定することとしている。

平成8年度は、いわば「科学技術基本法元年」であり、国を挙げて科学技術の振興を一層強力に推進していくための特別な意味を持つ年になりそうだ。

(1996年2月5日受付)



入門講座

鉄鋼材料編-5

鉄の物性と機能 —物理的性質—

藤田英一 静岡理工科大学理工学部 教授
Eiichi Fujita

The Nature and Physical Properties of Iron

1 鉄の原子核と電子配置

1.1 鉄と物理学

40億年を越す地球の長い生き立ちに較べて、人類らしき祖先が出現したのは僅か300万年ほど前であり、その中でもおよそ歴史や文明と言える状態の痕跡・証拠は1万年前に遡ることすらできない。ところで、メソポタミアのウルの遺跡の最深部での4000B.C.頃の発掘品の中には既に金属製の偶や器があり¹⁾、金属が殆ど文明発祥と共にあったことは明らかである。その後、鉄が農耕具や武器において青銅を圧倒してから、文明・文化の急速な発展があり、産業革命を経て鋼の時代となり、今日の文明社会がある²⁾。

高い品質の鉄や鋼を効率よく生産するために、当然、科学・技術との結び付きが必要であったが、その科学は主として精錬のための化学であり、それに貢献した化学者としてラヴォアジエやブンゼンが知られている。一方、金属の性質を調べた物理学者としては、フック、ニュートン、ファラデーの名前を挙げることもでき、下って我が国を見れば、鉄鋼業の勃興と平行して我が国の近代的な金属学の開祖となった物理学者、本多光太郎の研究の中心は鉄と磁性であった³⁾。

今世紀初頭に量子物理学を根幹とする近代物理学が誕生すると、すぐに金属の結合や伝導の問題が対象となり、伝導電子、伝導帯の存在と状態が解明された。今日、我々が鉄を始め金属の状態や性質を理解できるのは量子力学のお蔭と言ってもよい。

1.2 鉄の原子核

少し詳しい周期表を見ると、Ⅷ属の鉄は26番目の元素で原子量は55.85となっている。これは鉄の原子核が26個の陽子を含み、核の外に26個の電子を伴って中性原子となること、また核には約30個の中性子も含まれていることを示す。原子量が端数であるのは、天然には質量数の異なる核が混在しているからであり、核種として、⁵⁴Fe（存在比5.84%）、⁵⁶Fe（91.68%）、⁵⁷Fe（2.17%）、⁵⁸Fe（0.31%）が

安定に存在する同位体（isotope）である。このような存在比は、本誌の創刊号にあるように、宇宙が陽子・中性子から始まって融合反応と回帰の繰り返しによって次第に大きな原子核を形成し、反応のほぼ終極の鉄に到るまでの過程で生じた多様性である。地表に較べて、地球深部の存在比は正確には判らない。また木星のように、軽い元素から成り、鉄が殆んど存在しないものもある。

多様性を見本として、加速器中で⁵⁶Feに陽子を当てて吸収反応をさせると、十電荷の核子が増すので、それは鉄ではなくなり、⁵⁷Coである。この同位元素は不安定（放射性）で、半減期270日で崩壊（電子捕獲）し、 γ 線を出して⁵⁷Feになる。このときの γ 線は鉄のメスbauer分光に利用される³⁾。

鉄が多くの同位元素からなることは鉄の物性に影響するようにも思える。例えば、水素（H）、重水素（D）、三重水素（T）の場合のように、拡散係数が異なればばらの値になるとか、³Heと⁴Heのように分離効果があるとか、あるいは、ある核種だけ（例えば⁵⁷Feだけ）を精製（濃縮）すれば特異な物性の材料が得られるかも知れない、と言ったことである。しかし、幸か不幸かそのようなことは見出されない。それは鉄の物性を支配しているのは、原子核よりはその外側にある電子の状態であり、また外殻電子（outer electrons）と周りの原子およびそれに属する電子との相互作用が作り出す結合状態であるからに他ならない。

1.3 鉄の電子状態

量子力学の教える所によれば、原子核の周りにクーロン力で引き寄せられている電子の軌道の状態は量子化されていて、内側のエネルギーの低い方から、主量子数、 $n=1, 2, 3, \dots$ で指定される不連続な準位を持つ。（そのエネルギーは $-1/n^2$ に比例するような値を持つ。）しかし、同じ n の中でも軌道角運動量の違いがあり、それを量子化している副量子数として、方位量子数 ℓ があり、軌道の方位と形状が決まる。 $\ell=0, 1, 2, \dots, n-1$ の値が許され、それらにs, p, d, $\dots$ の記号が使われている。例えば、 $n=3, \ell=2$ の準位は

3dと呼ばれる。さらに磁界が掛かると、角運動量のz軸成分の量子化によって、磁気量子数 m に従う準位の分裂（ゼーマン分裂）が現れる。 $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \ell$ が可能な状態であり、例えば、3dは磁界がなければ5個の m 状態の重なり（縮退）から成る。この上に第4の量子化がある。それはスピンと呼ばれるもので、簡単には電子が自転していると考えたと説明し易い。即ち、右または左回転の電流のために上向きか下向きの磁気モーメントが生じているとすればよく、それをスピンとよぶ。この量子数は他のものと異なって半整数であり、 $S=\pm 1/2$ の2個しかない。こうして原子に属する電子の状態は n, ℓ, m, S の4個の量子数で指定される。一つの量子状態には1個の電子しか入れないから（パウリの排他律）、例えば、上の規則によれば3dには10個の電子だけが収容される。表1に準位とそこに収容され得る電子数を並べて示した。これらの事は理工系の大学教養課程で既に学んだことであろう。

表1 原子に属する電子準位の種類と収容電子数（鉄の26個の電子の中で、3dに6個、4sに2個が入って外殻を形成している。図1参照）

n (主)	1	2	3	4
1(方位)	s	s, p	s, p, d	s, p, d, f
電子数	2	2, 6	2, 6, 10	2, 6, 10, 14

さて鉄の中性原子では26個の電子があるから、上の量子状態にエネルギーの低い方から順に詰めて行くと、3dに8個入れた所で電子は使い果たされる。しかし、事態はもう少し複雑で、3dよりも先に4sに電子が入り、3dに6個、4sに2個が通常の配置になる。これは主量子数の大きい所では、準位の高低に逆転が起きるからである。こうして3dには空きができるが、この傾向は多くの金属で起きていることで、内側の軌道が充足されていない（不完全閉殻）ものをまとめて遷移金属とよぶ。周期表の中で、3d(Ti, V, …, Ni)、4d、4fなどの遷移金属があり、融点が高く、強く、磁性を始めとして特異な性質が現れる。鉄はその代表格である。

遷移金属のスピンのある方は複雑で、鉄の3dの6個が3個ずつ正負のスピンを持てば磁気モーメントが打ち消し合い、安定であるように思えるが、正負は2対のみで、同符号の電子（不対電子）が2個残るのが安定で、このために鉄原子は磁気モーメントを持つ（イオンになると更に複雑）。電子軌道もモーメントを生じているが、上の余分のスピンの鉄の原子磁石の主な原因である。Ⅷ属のFe, Co, Niは大きな原子磁気モーメントを持ち、顕著な強磁性を発揮する元になっている。

電子状態についてもう一つの重要な問題はエネルギー準位の広がりである。外殻の鉄の4sなどのs電子は原子集団

の中では存在範囲が広く、集団全体に互ってかなり自由に動き回る状態になっている。これが伝導電子で、量子力学の計算によれば、そのエネルギー準位は図1のように広がった密な集り、つまりバンドを形成している。これが伝導帯（conduction band）である。（4sの下端は前に述べたように3dよりも下にある。）伝導電子は電気や熱の伝導の主役であるばかりでなく、その負電荷を介して原子（+イオン）同士が結合している。これが金属結合である。図にあるように、3d準位も広がっているが、その電子は各原子にかなり局在していて、鉄などでは磁性の元になっている他に、共有結合性をも担っている。遷移金属では結合が強く、融点の高いものが多い。鉄の26個の電子の上層部は図1の斜線部のように4sと3dの途中まで詰まっていたその最上準位をフェルミ準位という。伝導性などの物性を支配しているのはフェルミ準位近傍の電子である。

以上のような電子状態が判ったのは量子力学が生まれてからであり、鉄の物性の多くはそれに基づいて初めて理解される。

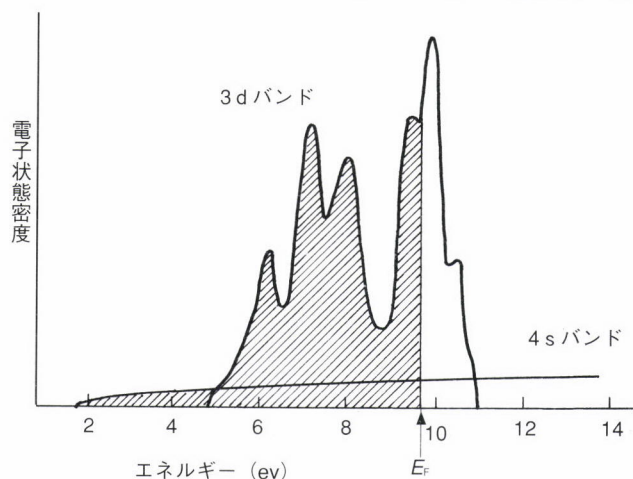


図1 鉄の4sバンド（伝導帯）と3dバンド（不完全閉殻）の状態密度分布の模式図。斜線部は電子が充満している。その右端がフェルミ準位 E_F 。

2 結晶構造と相変態

2.1 結晶構造と α - γ - δ 変態

鉄が低温から907℃まではbcc（体心立方晶）の α 相、その上では1410℃までfcc（面心立方晶）の γ 相、さらにまたbccの δ 相に変態し、1540℃の融点に到ることはよく知られており、鉄だけが元の構造に戻る変態、bcc $\rightarrow$ fcc $\rightarrow$ bccを持つのは、低温のbccでは原子が磁気モーメントの向きを揃えて強磁性になると、本来安定なfccよりもエネルギーが下がるからと説明されている。（本誌2号、西沢「鋼の組織制御学・入門」参照）

上の二つの変態では長さ（体積）が不連続に変わる。その変化量はbccおよびfccの単位格子の構造と寸法から計算すると約2.9%の体積収縮であることが分かる。変態熱

(潜熱)も必ず現れ、それは内部エネルギー U 、エントロピー S の不連続を意味する。このように状態の温度変化(1次微分)に飛びが生じるような変態を1次の相変態とよぶ。融解もその仲間に入る。これらに反して強磁性の α 相を768°Cに上げたときに変態して常磁性になる場合には、潜熱や長さの飛びが現れず、比熱の不連続のみが現れる。これは2次の変態である。磁気変態は後で述べる磁性材料に関係して、また変態の次数はマルテンサイト変態に関係して重要である。

鉄に炭素が入ると上の各変態温度がどのように変わるかは実用的に重要な問題であり、本講座でも鉄-炭素系状態図と共に繰り返し説明されている。

2.2 高圧による α - ϵ 変態

鉄は高圧下で上とは別の相変態を生じる。即ち、常温で静水圧 P を加えて13GPa(約13万気圧)に達すると、bccからhcp(六方最密:hexagonal close packed)構造に変わる。この新相は ϵ と呼ばれ常磁性である。hcpはfccと同じく隣接原子数が12の最密構造であり、bccよりも原子当りの体積が2.9%も小さく不連続収縮、 $-\Delta V$ を起こすから、1次の相変態である。この場合、相の自由エネルギー、 $G=U+PV-TS$ は変態によって $-P\Delta V$ だけ減少するので、高圧では密なhcpが有利な構造として出現することが理解できる。どの物質においても、高圧下では体積の小さい密度の高い相に移り変わる³⁾。鉄にさらに高圧を加えるとどうなるかは分かっていない。 ϵ 相は圧力を外すとすぐに α 相に戻る。

$P\Delta V$ と結合あるいは歪みエネルギーとの大きさの比較から、鉄鋼の技術上で意味のある圧力は1GPa程度以上であることが分かる。材料の破壊を抑える静水圧の効果も、発生する亀裂の空隙としての体積を ΔV に当てて考えればよい。高圧の問題は高圧押し出しのみならず、線引き、圧延、焼結など多くの工程に関係している。

2.3 マルテンサイト変態

炭素鋼を始め、多くの鋼種において γ 相から急冷(焼き入れ)すると、マルテンサイト相が現れ、それが鋼の強化に中心的役割を果たしているのは余りにも有名なことであり、本講座で度々解説された。それが格子のずれ変形、またはその組合せによる1次の相変態であり、炭素鋼の場合にはfcc $\rightarrow$ bct(体心正方晶)であること、またマルテンサイトがc軸の伸びたbct(body centered tetragonal)であるのは γ 相中に固溶していた炭素原子が急冷の間に抜け出す時間がなく、マルテンサイトの本来bccであるべき格子中に過剰に含まれ、c軸を押し広げているからであるということも既に説明された。従って、鋼のマルテンサイト変態の基本についてはそれ以上の解説は省くこととする⁴⁾。

観点を変えて、前々節の話題に従えば、マルテンサイト

変態は変態熱が1000~4000J/molの1次の相変態であり、格子の不連続変形と体積変化を伴う。母相の中に結晶軸の変化と体積変化を突然に生じて新相を作り出すのは容易ではなく、余分なエネルギーを要求されるから、核形成過程が必要であり、微細な双晶や転位組織の形成による応力緩和過程が現れ、冷却時の変態開始温度(M_s 点という)と加熱時の逆変態開始温度(A_s 点)の大きな差(100Kの桁)即ち、履歴を生じる。以上はマルテンサイト変態の特徴とも言える。(ただし、炭素鋼ではマルテンサイトは過飽和炭素を含むために加熱時に析出・分解してしまい、逆変態をしない。)

ところが他の合金、例えば、Ni₅₀Ti₅₀、Fe₇₀Pd₃₀、Cu-Al-Niなどでは変態熱(~300J/mol)や体積変化(1%以下)が小さく、変態、逆変態の温度差も小さく(10Kの程度)、格子変形も徐々に進行し、可逆的である。これらは磁気変態や規則格子変態などの2次変態の性質に近く、1次と2次の混合の様相を持つから弱い1次の(weak first order)変態などと呼ばれている。一方、これらの変態では変態に伴う微細な塑性変形は転位でなく、マルテンサイトの双晶のみで賄われる。双晶変形は格子の一樣なずれ変形の士の組合せであり、例えば、図2(a)の母相Aが剪断的な格子変態をするとき、図(b)のように双晶Mの正負のずれの組合せで外形を保てば、全体的な格子歪みを打ち消すことができる。その上、図(c)のように外力(矢印の剪断力)を加えて塑性変形させると、M双晶の間で食い合い(境界移動)をして無理なく外形を変形させ得る。この種の合金が形状記憶効果を持つ。即ち、図(a)の母相Aを低温にすれば、外形を保ったまま図(b)のマルテンサイトMになり、これに矢印の外力を加えて全体を図(c)のように塑性変形させることができ、それを加熱すればどの双晶部分も一義的に元の母相Aに戻るから、外形は図(a)に恢復する。これが形状記憶の機構である⁵⁾。Fe-Pd、Fe-Ptなどの鉄合金で形状記憶を示すものがある。形状記憶を持たなくても弱い1次のマルテンサイト変態はBaTiO₃(チタン酸バリウム)のような強誘電体やNb₃Snのような超伝導化合物にも見られる。

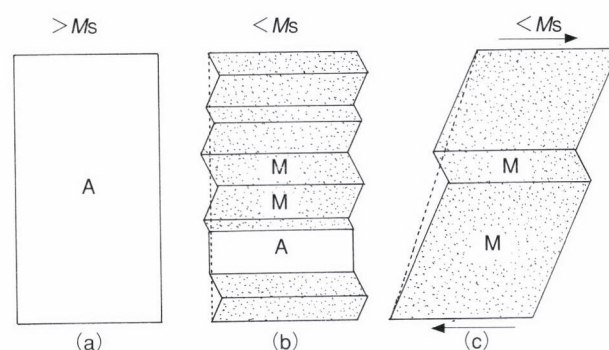


図2 形状記憶合金の変形様式と形状記憶の機構の模式図。
(a) 母相A、(b) 双晶マルテンサイトM、(c) 外部応力が掛かった場合の双晶間の変換による変形。変形後に逆変態をさせると(c)から(a)に戻る。

2.4 アモルファス化

1次の相変態には核形成過程が必要であるが、熔融状態から結晶の核形成が行われる機会を与えられずに液相の無秩序状態が急冷凍結されるとアモルファス（非晶質）材料が作られる。従ってこれは相変態というよりは相変態を抑制して出来た構造である。鉄のような単純な純金属では急冷によるアモルファス化は難しく、実際的な材料は方向性結合（共有結合など）の強いB、C、O、Si等を入れた共晶点近傍の合金が選ばれる。例えば、Fe-14%B、Fe-Si-C、Fe-Co-Si-Bなどである。液体急冷法はよく知られているように、図3に示す型の融体を回転ロール上にノズルから噴出させてリボンを作る方法が最も一般的である。種々の装置改良や合金の選択により、目的に沿う形状と性能のアモルファス材料が得られている。例えば、後で述べる変圧器鉄心用の広幅薄帯の電磁材料、4GPa（約400kg/mm²）を越す強度の超強力リボン、あるいは線材、棒材などが得られている⁶⁾。

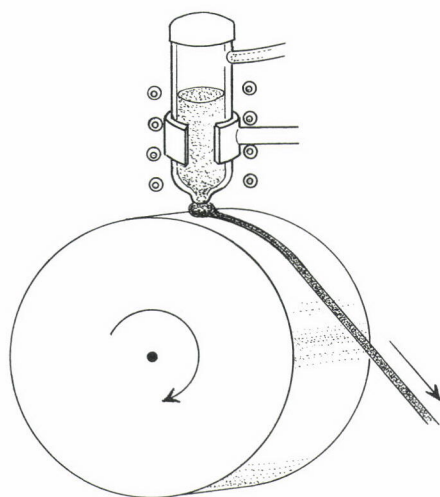


図3 ロール法によるアモルファス合金リボンの作り方の模式図。
2重丸の配列は加熱コイル。

アモルファス材料は結晶核の形成には到らないが、その初期の芽（embryo）ともいふべき極めて小さな秩序集団を含み、製造条件と熱処理によってその状態が変わるので、強度、磁性、耐食性、伝導性などが支配される。熱処理によって径10nm～100nmの超微細結晶の集合体としたものはナノ結晶材料である。アモルファス化とは別に、低圧の不活性ガス中で鉄などを蒸発させて超微細結晶の粉を作り、固めてナノ結晶材料を得る方法もある⁷⁾。

新しい相や構造が作られるときには、その核が形成される過程があり、マルテンサイト変態を始め各種の相変態、凝固、相分離、析出など多くの現象において考えなければならない問題である。核生成理論は鉄鋼の物性を取り扱う上で学んでおく必要のある分野であろう⁸⁾。

3 鉄の磁性

3.1 磁化の過程

鉄の磁性の元はすでに述べたように、原子磁石であり、それらが協同的に方向を揃えれば、強磁性にある。揃える力の本である電子間の交換相互作用 J とよばれる量の正負によって鉄のように強磁性になったり、Mnのように、ならなかったりする。しかし、磁石になるまでには、まだいくつかの機構が介在する。磁化する前には、磁性材料は図4(a)のように、結晶粒の中が100nm～1000nmの大きさの強磁性の領域である磁区（magnetic domain）に細分されていて、磁化方向が互いに打ち消し合い、磁石となっていない。 α 鉄では、磁区の磁化方向はbccの3個の立方軸 $\langle 100 \rangle$ の何れかであり、できるだけ磁束が連続して漏洩のないように磁区の境界である磁壁（domain wall）が配置される。図4(a)に磁化の方向が90°変わる磁壁と180°変わる磁壁が見られる。さて、図(b)の太い矢印のような外部磁界 H を掛けると、磁壁（domain wall）が図3(b)→(c)の双晶境界のように移動して、 H の向きに近い磁区が優勢となり、全体として磁化が現れる。さらに磁界を増すと、磁区内で磁化方向の回転が図(c)に示したように起こり、磁石の強さは飽和に近づく。1926年頃、S.Kaya（茅誠司）は鉄、ニッケル、コバルトの単結晶を作り、磁化を測定して、強磁性の磁化の本質を明らかにした。

一般に磁化過程は図5のように、外部磁界 H を与えて、試料の生じる磁束密度 B を測定することで得られる（材料の磁化の大きさ I で表現してもよい）。aの曲線を見ると、

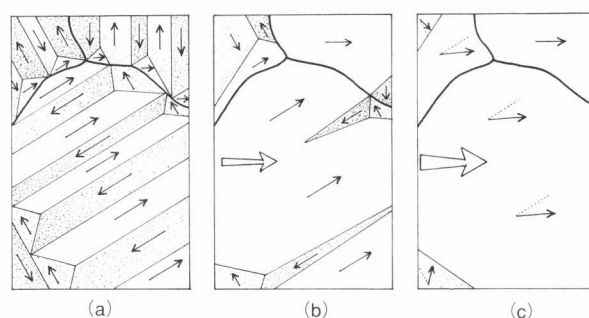


図4 磁化過程における磁区の変化（磁壁の移動）と磁区内の磁化回転。
太線は結晶境界、細線は磁壁、細矢印は磁化方向、白太矢印は磁界を示す。

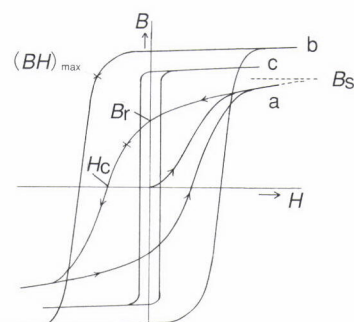


図5 磁石の反復磁化過程における磁束密度の変化（B-H曲線）
aは一般の材料、bは永久磁石（硬い磁石）、cは低損失の軟磁石の各履歴曲線。

$H=0$ 、 $B=0$ から外部磁界を大きくしてゆくと、 B は立ち上がり、磁壁の移動によって磁化が進み、やがて飽和に達する。磁石として飽和値 B_s が高いことが望ましい。応答の早い軟磁石には立ち上がりが早いものがよい。

3.2 履歴曲線と磁石材料^{9,10)}

磁化した状態から磁界を下げると、磁壁の運動は抵抗があって可逆的ではないので、 B の減少はa曲線の左向き矢印のように、 H の変化より遅れ、 $H=0$ になっても残留磁束密度 B_r を保つ。これが永久磁石であり、 B_r が高いことが望ましい。これから逆向きに磁界を増すと、 H_c のところで初めて B が消える。当然、 H_c が大きいことが望ましく、結局、永久磁石の性能は曲線の上に×印で示した B と H の積の最大値 $(BH)_{\max}$ が決め手となっている。図5のa曲線の上の多くの矢印が示すように、磁界を交番反復して与えれば、磁束密度(磁化)はループ、即ち履歴曲線(hysteresis loop)を描く。前記のマルテンサイトの履歴もこれに似ている。

太い角型のb曲線は強い永久磁石に要求される形で、合金の組成を選び(例えばAlnico Vは読んで字の如く、FeにAl、Ni、Coが入る)、熱処理などにより析出や方向性などの微細組織を整え、 $(BH)_{\max}$ の大きなものを目指す。現在、世界最強の磁石は1984年、M.Sagawa(佐川真人)らが発明したFe-Nd-B(鉄・ネオジウム・ボロン)磁石であり、 $(BH)_{\max}$ は405KJ/m³に達する。

縦長の細いc曲線は磁壁が移動し易く、立ち上がりがよく、応答が速い軟らかい磁石(soft magnet)の典型で、電力トランスのような交流磁界下では、ループの面積が磁石内部で熱として費やされて電力損失となるエネルギーに当たるから、できるだけスリムなループが目標である。Fe-3%Si近傍の電磁鋼板はゴス(Goss)方位とよぶ<100>方向が圧延方向、{011}面が圧延面となる再結晶組織を持ち、c曲線型の損失の少ない優れた磁石材料である。その上の工夫改良と生産工程管理によって軟磁石材料においても日本は優位を保っている。アモルファス磁石も磁区を持つが、その形成や移動は結晶の方位や境界がないので非常に自由であり、優秀な軟磁性材料となる⁶⁾。今日、あらゆる処で見いだされるフェライト系磁石は酸化鉄を主体としたもので、これも日本で発明された(武井武、加藤与五郎)。

磁石のもう一つの要点は耐熱性である。鉄の温度を上げると原子磁石の方向を揃える前記の力、 J に対して熱擾乱が強くなり、原子の磁気モーメントは向きが不揃いになり、配列の臨界点であるキュリー(Curie)温度、 $T_c=768^\circ\text{C}$ で2次の変態により常磁性に移る、つまり磁石ではなくなる。強力磁石として有効な合金組成を見出しても、 T_c が低ければ(合金にすると T_c は必ず鉄より低くなる)用途は狭められるので、高い T_c も開発の重要な目標である。

4 格子欠陥

4.1 転位と強度

鉄鋼の強度の話は本講座でも度々紹介され、金属材料の抗張力、靱性、破壊強度などの機械的性質を担うのは転位であり、鉄鋼ではその中の固溶炭素、炭化物などの析出物、マルテンサイトや α 相と γ 相の混合、等々の組織の転位の挙動に対する影響が重要な要素であることも説明された。鉄鋼の強度を高めるためには、材料の究極の強度はそのヤング率の1/10程度であることを弁えながら、以上の問題を基礎的に追求しなければならない。次回の本講座で基本的な説明がされる予定であるから、この小文では転位の説明も上の個々の問題にも言及しない。さらに勉強したい人のためには転位論の専門書がいくつか出版されている¹¹⁾。

4.2 点欠陥と拡散

格子欠陥のもう一つの重要なタイプは原子空孔と格子間原子が代表する点欠陥である。前者は通常材料中の拡散において主役を果たしている。図6のように、色分けした拡散しようとする原子の隣に原子空孔があれば矢印のように原子移動が比較的楽に行える。(空孔がなければ、この原子は周辺を強引に押し退けて通らねばならない。)隣が空孔となる確率は空孔の平衡濃度であり、それはボルツマン因子(Boltzmann factor)、 $\exp(-E_v/RT)$ の形で与えられる。 E_v は孔を作るのに必要なエネルギー、 R はガス定数、 T は絶対温度である。この指数関数は温度 T でエネルギー E_v を熱的に得る確率を表している。次に問題の原子が孔の方にジャンプするためには、図でも分かるが、周りを少し押し退ける必要もあり、図の下部のエネルギーの山、 E_m を確率的に越えねばならない。その速度は原子の振動数(越える試みの回数)を ν ($10^{13}/\text{s}$ の程度)として、やはり $\nu \exp(-E_m/RT)$ の形になる。結局、原子の移動速度を示す拡散係数は $D=D_0 \exp[-(E_v+E_m)/RT]$ という両項の積に比例した形となる。 D_0 は ν 以外も含むが、振動因子などとよばれ、 $E_v+E_m=E_0$ は拡散の活性化エネルギーとよばれる。 α -Fe中のCrの拡散の例では、 $D_0=2.3 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ 、 $E_0=240 \text{KJ/mol}$ である。500°C程度でCrは動き出す。

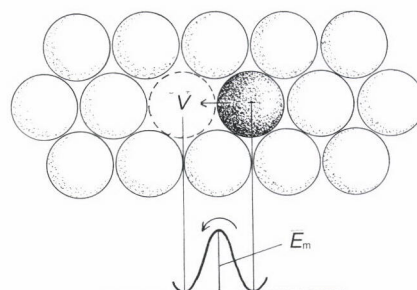


図6 原子空孔による拡散の機構と原子移動に対するポテンシャルの山。

鉄鋼の格子間原子で重要なのは、H、C、Nなどの小さいメタロイド (metalloid) 原子で、特に炭素の挙動が鉄鋼の性質を支配しているのは衆知の通りである。鉄の自己格子間原子はエネルギーが高く不安定なので通常存在しないが、原子炉などの照射損傷過程では重要である。格子間原子は拡散の際に空孔を必要としないから、 $E_D = E_m$ である。 α -Feの中のCの拡散では、 $D_0 = 1.2 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ 、 $E_D = 85 \text{KJ/mol}$ であり、 100°C 程度でも鉄中で炭素が動きだすことが分かる。ボルツマンの指数関数形は物理や化学の熱が関与するあらゆる分野に現れる重要な因子である。

5 鉄の伝導性その他

鉄の物性の中で電気伝導、熱伝導の問題は重要であるが、これはまた電子配置や伝導電子の散乱機構などの面倒な話になるので、紙数も足らず、鉄鋼技術の上でもやや本道から遠いので、解説は別の機会を待つこととする。ただ、遷移金属の仲間の電気伝導率が悪いのは例のdバンドのせいであること、鉄が超伝導の問題から除外されているのは磁性のせいであることだけを申し添えて置く。金属の熱伝導は電気と同じく伝導電子によるから、同じように考えてよく、熱伝導率の低いステンレス鋼は電気伝導も低いのは当然である。鉄の弾性率、熱膨張係数、比熱、原子材料的特性など、物理的問題はまだまだあるが、ここで話を終ることにする。

参考文献

- 1) E.キエラ：「粘土に書かれた歴史」(岩波新書, 321, 1958年初版)
- 2) 中沢護人：「鋼の時代」(岩波新書, 511, 1989年初版)
- 3) 藤田英一：「金属物理」(アグネ, 1996年)
- 4) 西山善次：「マルテンサイト変態, 基本篇」(丸善, 1971)
- 5) 本間敏夫：「形状記憶合金」藤田英一編著「新素材」(朝倉, 1987), p.137
- 6) 増本健, 深道和明：「アモルファス合金」(アグネ, 1981年)
- 7) R.W.Siegel, ed. by F.E.Fujita：「Physics of New Materials」(Springer-Verlag, Heidelberg, 1993), p.65
- 8) J.Burke：「The Kinetics of Phase Transformation in Metals」(Pergamon Press, 1965)
- 9) 太田恵造：「磁気工学の基礎 I, II」(共立全書, 1973)
- 10) 岩間義郎：「磁性材料」, 藤田英一編著「新素材」(朝倉, 1987), p.89
- 11) 鈴木秀次：「転位論入門」(アグネ, 1967年初版)

(1996年1月26日受付)



鉄の歴史 ④

朽ち果てぬ鉄に魅せられて、古代鉄を探る

井垣 謙三

東北大学 名誉教授

Kenzo Igaki

Looking for How to Reproduce High Quality Ancient Iron

1 はじめに

法隆寺の昭和の解体修理工事で取り出された古代の釘が、非常に健全でそのまま再使用できるものさえあることを知ったのは中学生の頃であったが、朽ち果てぬ上質古代鉄に魅せられて、その再現に努めている現在の自分の出発点はその辺にあったのかもしれない。

実用の鉄は多くの不純物を含む複雑な多元系であるため、避けていたのが実情であるが、昭和37年東北大学に移った時、鉄の精製を研究課題に取り上げた。鉄の最高到達純度が他の金属に比べてかなり低い水準にあり、どこかが盲点になっているように思われたからである。明瞭な向上が得られず、泥沼状態になるようであれば、直ぐ切り上げたいと考えていたが、数年の内に従来の記録を上回る好結果が得られ、向上が続いた。

湿水素中での熱処理を施して、非金属元素 (C、O、N) の影響を揃えたこと、残留抵抗比 RRR_H^* を物差しに用いて精製効果を評価したことが有効であったといえる。イオン交換分離とゾーン精製を重ねて、 RRR_H で 10,000 を越す値が得られ、化学分析でも高純度が確かめられて、どうやら他の金属と肩を並べる高い純度水準の鉄を造ることができたのだが¹⁾、研究室規模で、数kg程度の量を得たに過ぎない。精製された純鉄の外観はCr、Co、Niのそれに近く、なるほど同じ鉄族元素かと感心した。薄くて緻密な保護酸化被膜が形成され、錆の進行を抑えてピカピカの状態が長く保たれる。

水素還元から電解還元に変えられて、規模が少し大きくなり、年間1トン程度の生産になったが、精製純度の不揃いが避けられなかった。また、従来の電解鉄と同じく残留酸素量が数百mass ppmと高く、これを用いてそのまま溶製した合金の機械的性質などに大きい影響を与える点が問題であった。百トン単位の量が一時間足らずで製造される実用鋼純鉄との間の差を縮めることはできないものかと次

に模索した。量産には高カロリーの化石燃料・石炭による還元が必要であり、Sの結晶粒界への集積による脆化を防ぐため、Mnを加えてMnSの形にして割れない鉄を造った歴史的な経緯もあって、Mnは必要不可欠な元素のように思い込まれている。SiもMnとともに使いやすい脱酸剤として広く用いられ、実用鋼ではこれらの濃度を同時に100mass ppmレベル以下に下げようと試みられることはなかった。(以下で、%、ppmと記すのは、いずれもmass%、mass ppmである。)

製鉄段階で形成されたMnSを除くことは容易ではないだろうと思っていたが、工業用純鉄 (NK-J2) では、製鋼段階での酸化吹錬でMnを100ppmの桁の低い値まで下げていることを知り、伊予の鍛冶師白鷹幸伯氏から依頼の奈良薬師寺の回廊再建用の釘材として数トンの量の試作を打診した²⁾。上質古代鉄の化学分析から、Mn、SiおよびSの濃度がいずれも数10ppmの桁で、非常に低い値を示す例の多いことを知り、それに近い組成の試料を実用鋼素材で造り、比較することが重要と考えたからである。

数トンという量が研究室規模で造るには多すぎ、工場規模で造るには少なすぎるのが問題であったが、結局、純鉄を造ることとし、一回の転炉操業の250トンの内の50トンだけを電気炉に取り分けて、それに釘材の強度に必要な量のCを加え、Al脱酸を行い、残存Alもできるだけ低くすることとした。C以外のO、Nを含む11元素の総和が700ppmの純度水準のこの試作材料SLCMについて、鍛冶師は十分に満足できる性能と認め、また腐食試験は優れた耐食性を証明してくれた。

純良な鉄の優れた特性を、現在の量産鉄は生かしていないように思われ、これを見ごとに生かしているのが上質古代鉄なのではないかと考え始めた。出来るだけ来歴の明らかな古代鉄試料を入手したいと望んでいたが、早い時期に薬師寺月光菩薩像の鉄芯について調べることができ、また多くの方から貴重な試料を提供して頂いたのは幸であった。

*: RRR_H は室温での電気抵抗と60kA/m程度の縦磁界をかけて測定した4.2Kでの電気抵抗との比であって、後者は磁気的な影響を取除いた不純物散乱項に対応するので、この値は鉄の純度を評価する上での簡便な物差しとなる。

2 上質古代鉄はどこが違うのか、

2.1 耐食性

薬師寺や法隆寺の解体修理に携わった西岡常一棟梁は、法隆寺などの木造の古い建造物やその建造技術を、後世に残したいという願いから、「法隆寺を支えた木」とか「木に学べ」とか多くの本を書き、その中で今の鉄が駄目だということを述べている。大工にとって刃物は生命で、何時間もかけて研ぎ上げるのに、今の鉄では錆がすぐに浮き、時には錆が表から裏に突き抜けさえすると、耐食性に大きい差があることを指摘している。

耐食性をどのような腐食条件で試験するのが適切であるかを判定するのは容易ではないが、製作年代や製法の違う試料について同一腐食条件で比較することは重要と考え、中性に近い液中での腐食特性に注目して、0.15M- H_3BO_3 +0.0375M- $Na_2B_4O_7$ (pH:8.45)の、ほう酸塩緩衝溶液を選び、アノード分極曲線を測定した³⁾。図1にそれを示すが、電位を高めていくと-0.5V付近の電位で鉄の活性溶解が始まり、大きい電流が流れるが山を越えた-0.2V付近ではピーク値より約一桁低い電流値に落ち着く。これは化学的に活性な状態にあった鉄が、その表面を酸化皮膜や吸着層に覆われて、化学的に不活性になったため、電気化学的不働態と呼ばれる状態である。さらに電位を高めると1.2V付近から、酸素発生を伴う急激な電流増大が見られる。中間の低い電流値は、鉄の表面に形成された不働態皮膜を漏れて流れる電流であり、不働態維持電流と呼ばれるが、この値が小さいほど皮膜が健全なことを意味する。

古代鉄はもともとかなり不均一な材料であり、同一試料

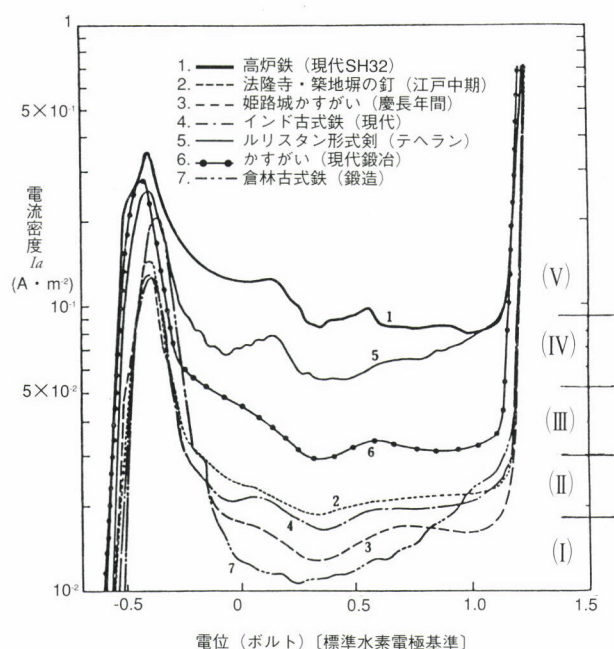


図1 ほう酸塩緩衝溶液中でのアノード分極曲線

でも分極曲線に差が見られることもあるので、かなり大きい変動誤差を想定する必要があるが、年代を異にする試料によって不働態維持電流の値に一桁に近い落差のあることにむしろ驚かされた。不働態維持電流自体がかなり変動する場合もあるが、一つの目安として、0.2Vから1.0Vまでの区間の不働態維持電流の平均値を採用して比較し、五つの領域に分類して表1に示した。丁寧な鍛錬を受けた試料が低い不働態維持電流を示す傾向が認められ、古い時代の試料の大部分が領域Ⅰ、Ⅱに入り、優れた耐食性をもつことが知られる。戦災などの火災に遭った刀についても測定したが、介在物や析出物の分布状況も変化しているためか、耐食性も低下しているのが一般的であった。領域Ⅳ、Ⅴに分類される試料の一部では、不働態維持電流の値が大きいばかりでなく、それが大きく変動して、安定な不働態皮膜が形成されているとはいえない状況にあるものも見られた。市販の炭素鋼SH32がこれに属したが、効率的な量産を目標とし、耐食性に対しては配慮されていないから止むを得ない。

表1 不働態維持電流による耐食性の分類

領域	不働態維持電流C (10 ⁻⁴ A・m ⁻²)	試料
(Ⅰ)	C < 1.7	刀(南北朝時代・備前・長船政光)、姫路城かすがい(慶長年間)、刀(江戸中期・薩摩・奥忠重)、倉林古式鉄(現代)、NK-J2、SLCM(現代)
(Ⅱ)	1.7 < C < 3.0	釘(飛鳥時代・法隆寺)、海住山寺鉄柱(鎌倉時代)、刀(室町時代・伊勢・二代村正)、刀(室町時代・山城・了戒)、刀(江戸中期・肥前・忠廣)、鑄鉄板(鎌倉時代)、インド古式鉄2種(現代)、釘(江戸中期・法隆寺築地堀)
(Ⅲ)	3.0 < C < 5.0	刀・茎部(室町時代・山城・来国俊)、焼けた刀(室町時代・筑前・左文字)、刀(現代・大和伝・法華三郎)、かすがい(現代鍛冶)
(Ⅳ)	5.0 < C < 9.0	焼けた刀(江戸時代)、高炉鉄(現代・S45C)、ルリスタン形式剣(現代?・テヘラン購入品)
(Ⅴ)	9.0 < C	高炉鉄(現代・SH32)

薬師寺の回廊再建用の釘材SLCMは、これまでに測定したどの試料よりも低い不働態維持電流を示した。どの程度バラツキが見られるかと、鍛造仕上げ温度を変えた5本以上の釘について同様の測定を行ったが、測定誤差範囲内の差しか認められず、この促進腐食試験で知られる限り、それ以上を望めないほどの優れた耐食性を示した。電気化学的に造られる不働態皮膜の厚さは、むしろ薄い、健全な緻密な皮膜が形成されている。

領域Ⅰに分類される鉄程度になると、大気中放置によっては容易には錆は浮かず、浮いたとしてもその錆が広がるようなことはなく、18-8ステンレス鋼のそれに近い輝きを持つ。インドでFerrum Candidum(光り輝く鉄)として高く評価された鉄もこれと同様の物と考えられる。鉄が錆びやすく、朽ち果てて土に帰るというのは、鉄自身の性質ではなく、現在の量産工業鉄の平均的な性質にすぎないことが知られる。

2.2 鍛接性

日本刀の場合、和紙に包み、灰汁をかけ、加熱して鍛造することによって接合（鍛接）している。人によっては灰汁は使わず、木炭粉あるいは銑鉄粉を用いて鍛接する。このような接合が可能なことを、刃物工は泥沸かしが効く、沸かしが効くと言っているが、現在の工業鉄では、この沸かしが効かない。日本刀鍛練の技術を保存するために、奥出雲で年に数回のたたら操業を実施しているのも、沸かしの効く鉄を造るためであって、採算がとれる訳はなく、各方面からの補助金を得て、1kgあたり8000円という価格で刀匠に頒布されている。実用鋼より二桁高い価格が通用するのも、日本刀が美術工芸品として広く愛好されているからであって、実用品にこのような鉄が使われることは、まずあり得ない。

ところが、人類は2000年以上も前から鉄を使い続けている。古くから銑鉄を使っているのは中国およびその影響圏だけであって、ほとんどは鍛鉄を用いたものであり、沸かしの効く鉄を用いたのであった。どの小さな集落にも鍛冶屋がいて、農具・工具のほか各種の日用品の修理・製作に忙しく立ち働いていた。沸かしの効かない鉄が普通になって、修理は出来なくなり、鍛冶屋の槌音は消え、農具・工具の取次販売店に変わってしまう。

沸かしが効かない、鍛接出来ないというのは、どういふことなのか。厚い酸化皮膜が出来て、それが金属同士士の接触を妨げているのではないか。電気化学的に形成した不働態皮膜の場合と同様に、高温でも薄くて緻密な酸化皮膜が出来て、その後の酸化の進行を抑えていれば、この皮膜は容易に破れ、あるいは還元除去されて、金属同士士の接触が起り、鍛接出来るのではないか。そこで刀匠に頼み調べて貰うと、極低炭素鋼なら大抵は鍛接出来るということで、高炭素の刃物用鋼で調べなければならないことになった。

薬師寺回廊再建用の鉄と同程度の純度の刃物用鋼を造って欲しいとの依頼が、白鷹氏を通じて越後与板の打刃物師碓氷健吾氏から寄せられた。今度は研究室規模の50kg溶解を依頼し、電解鉄より一桁廉価なNK-J2に炭素を添加して、2種類の鋼を調製した。沸かしが効くか効かないかにまず関心があったが、全く問題なしとのことであった。刃物については私も良く分らないので、成果の程は以下の来信の内容から判定して頂きたい。

碓氷 健吾氏（平成3年11月1日付）： 造って頂いた鋼で鉋を造りました。純度の良い鋼は昔から焼入性が悪いと言われていましたが、今回の鋼は焼入性も良く、ロックウェルで65.5～66.位出ており、今迄の炭素鋼とくらべて非常に力があるように思われます。又、錯の件ですが、完全に外の鋼にくらべて良いようです。

碓氷 健吾氏（平成5年1月10日付）： 試作して頂い

た炭素鋼1.16%Cの方を、此の度鉋に使用して、自分で切味試験をいろいろやって見て驚きました。従来は炭素鋼は少し力が足りなくて硬木には無理と思っておりましたが、櫟等の硬木も楽に削る事が出来ました。その鉋屑をご参考迄に同封申し上げます。若い頃、県の試験場の技師と炭素鋼と特殊鋼の事で、いろいろと議論致しました際に純度の良い炭素鋼なら絶対に良い結果が出ると云われましたが、其の通りになりました。又、三条の岩崎さんからも玉鋼の鉋を破きるつぼで溶解した鋼を頂き、それで造った鉋と並べて試験を致して居りますが、今のところ同等の切味が出ています。1.16%C鋼は偏析もなく又炭化物の分布も非常に均一でしたが、特殊鋼の様に炭化物を微細にするには相当の鍛練技術が必要の様に感じています。黒檀やタガヤサンの硬木にも奇麗に鉋がかりました。刃こぼれしてはいないかと、後から顕微鏡で調べましたが大丈夫でした。

この碓氷健吾氏からの鉋の削屑の一部を下記の方々に送り感想を求めた。

西岡 常一氏（文化功労者、宮大工）（平成5年2月18日付）：（略）素晴らしい鉋削屑、鋼もさること乍ら、磨ぎの腕、砥石と三拍子揃わねばと存じます。（略）

八十六 老工 常一 謹言

村松 貞次郎氏（東大名誉教授、明治村理事長）（平成5年2月19日付）：（略）碓氷健吾さんのカンナ屑拝見、私も素人ですが、硬木がこれほど削れるとはたいしたものですね。地鉄、鋼、鍛冶、台、研ぎ、削り手と、すべてがシステムとして完成しないと、これだけのカンナ屑は出ないですね。それにしても、健吾氏 熱心な鍛冶です。

なお、この鉋の台金には英国製パドル鋼が使用されており、現在の鉄にはこれに対応する物がなく、刃物師は困っているよしである。この点について、以前に下記の来信あり。

池上 喬庸（左 久作）氏（平成2年1月12日付）： 刃物の地鉄は、昔の和鉄のように軟らかくて、黒い不純物が入っている鉄が一番良いようです。これは砥石に当ててサクサクと研げるので、研ぎ上がりに趣がある為です。最近の鉄で炭素量 0.005%の純鉄を使って鉋を造ったことがありましたが、軟らかいだけで、砥石の表面を駄目にして（砥石が糸を引くと申します）、かえって結果的には駄目でした。

なぜパドル鋼が良いのか、詳しいことは私には分らない。刃先の部分より、台金の使用量の方が数倍多いから、刃物師にとっては確かにかなりの大問題なのであろう。

2.3 化学組成

考古学的にも貴重な試料である場合も多く、出来るだけ非破壊的な手段を用いて組成分析を行なうことが望ましいが、青銅器の場合と違って、Fe-C系2元合金である鉄器の

場合には、蛍光X線分析はほとんど有効な知見を与えてくれない。信頼性の高い結果を得るためには、金属地の残留している試料を用い、金属地部分について分析を実施することが重要になる。数百ミリグラム程度の試料しか分析用には採取できないといった状況を前提として、それから出来るだけ多くの知見を得ることに努めた。

原子吸光分析と熱中性子放射化分析とを主として用いて得た分析結果を表2に示す。表中Cuについては原子吸光、中性子放射化およびICPの各分析法による結果を与えているが、かなり大きい差のあることが認められる。この差は各分析法の精度の問題ではなく、もともとかなり不均質な材料から微量の試料を採取しているサンプリングの問題であり、2倍近い差が認められるのは当然とすべきである。これらの経験から、3倍程度の許容誤差があるものとして分析結果を見ることにすれば、ほぼ誤りない推論が得られよう。

従来の多くの分析結果をも考慮に入れて、古代鉄器と現代の工業鉄との間の差異に注目すると、Si、SおよびMnの含有量に本質的な差のあることが知られる⁹⁾。

- i) Siについては、酸可溶分中の濃度に注目すると、60ppm以下が大半で、現代の工業鉄中のSi濃度が少ないものでも数千ppmであることを考えると、顕著な差といえる。
- ii) Sについては、35ppm以下というのがほとんどであり、鑄鉄板その他のやや特殊な例を除くと、100ppmを越えるものは見当らない。これは石炭を用いず、木炭による還元であるためであって、硫化物による低温脆性の問題はなく、容易に加工・延伸される。
- iii) Mnについては、高速中性子の混在度の少ない熱中性子線束（京都大学熊取原子炉実験所）を用いての放射化分析によって、高い精度でMn濃度を決定できるようになったが、古代鉄器のMn含有量は

50ppm以下と低く、現代の工業鉄のMn濃度が2000ppm程度以上ときわめて高いのと比べ、際立った差を呈した。

3 ¹⁴C年代測定

古代上質鉄の示す優れた耐蝕性・鍛接性に注目して、現代の量産鉄と古代鉄との間の差を明らかにしてきた。千年を経てきわめて健全な状態にある伝世品も数多く調査することができたが、伝世品には来歴の明らかでない物も多く、それが鉄として造られた年代を知ることは非常に重要な課題である。幸い金属相は健全に保持されているので、名古屋大学年代測定センターの協力を得て、金属相中の炭素について加速器質量分析法による¹⁴C年代測定を試み検討を加えようとした。

燃焼法により古代鉄器中のCをCO₂として放出させ、分離・捕集した後、還元してグラファイトとし、これを圧縮成型したペレットをターゲットとして加速器質量分析を行なう。炭素は負イオンとして、また正イオンとして静電的に加速され質量分析される。木曾檜の1840～1860年の年輪部分を標準試料とし、それと測定試料とについて¹⁴C/¹³C比を交互に繰り返し測定する。Libbyに従い、¹⁴Cの半減期には5570年を用いて、年代を算出した。古代鉄は酸化鉄を木炭で還元して製造されるのが普通であり、¹⁴C年代測定は厳密に言えば還元を用いられた木材の年輪形成期を与えるが、あまり古い木材から木炭を作ることも考えられず、木炭もすぐ製鉄に使用されるのが普通であるから、現在の¹⁴C年代測定法には誤差が80年程度はあることを考慮すると、鉄器の製作年代を求めたものとして良いと考えられる⁹⁾。

鉄鏝・鉄鋌・直刀X・丸鍛え日本刀M1の4種類の試料について測定した。鉄鏝は“かな”あるいは“ちょうな”の類の木工具とされ、使用されて先端の一部が欠けた後、埋められたもので、土と錆とが一体になって強固に付着していた。

表2 各種鉄器の化学組成 (mass ppm)

	Na	Al	Si*	Si [#]	P [#]	S**	Ca*	Ti	V [#]	Cr*	Mn	Co*	Ni*	Cu*	Cu	Cu [§]	Ga	As
飛鳥時代・釘	8.8	46	39	—	—	24	120	<10	—	<3	10	44	17	80	46	—	19	14
法隆寺五重塔・釘 (創建当初)	23	293	48	—	—	21	14	160	—	64	29	244	633	109	140	—	86	15
薬師寺月光菩薩像鉄心 (奈良時代)	8.4	140	63	—	240	19	41	110	70	60	22	146	240	78	60	180	19	13
鎌倉時代・鑄鉄板	<3	20	33	120	1,400	120	14	<25	—	48	56	40	55	210	137	—	11	24
海住山寺塔・鉄柱 (鎌倉時代)	13	65	120	100	110	—	<20	<30	—	30	11	89	39	23	27	—	11	11
鎌倉時代・日本刀 (山城)	17	100	(450)	—	—	50	110	<90	—	26	13	310	212	174	85	—	10	20
南北朝時代・日本刀 (備前)	<5	150	—	—	810	—	<10	220	—	<5	56	192	—	53	110	—	28	20
姫路城・かすがい (慶長年間)	2.2	41	42	120	250	21	<16	39	30	26	15	76	16	77	114	200	157	8.9
東大寺大仏殿・釘 (江戸中期)	<7	130	(410)	140	90	70	440	<44	—	122	6.9	129	78	179	—	—	18	19
インド・古式鉄 (現代)	<3	17	112	310	180	20	51	67	—	<3	41	183	353	336	110	—	1.3	6.8

*原子吸光分析、**燃焼ガスクロマトグラフ法、§ ICP法、# モリデンブルー吸光度法、他は熱中性子放射化分析（京都大学熊取原子炉実験所）

2mm厚程度の鉄錆の下は健全な金属相として残され、透過X線像から多くの気泡を含む鋳造品であることが知られる。鉄鋌はウワナベ古墳陪塚出土のもので、部位により腐食の程度を異にするが、3mm厚程度の健全な金属相の部分から試料を採取した。直刀Xは出土地不詳の伝世品で二尺六寸の記載がある。腐食状況は同様であるが、5mm厚以上の健全な金属相が保持されている。日本刀M1で丸鍛えとしているのは、心金・皮金といった炭素濃度の違う材料を合せるのではなく、全体を込みにして鍛接して薄く延べ、重ね鍛えして造ったもので、鎌倉～室町時代と推定されるとのことであった。得られた年代測定結果を下記に示す。

試料名	[%C]	yrs.BP	西暦年代	備考
鉄鐘	3.6	1720±160	AD70～390	後漢～三国時代・晋
鉄鋌	0.44	2372±80	BC502～342	
直刀X	0.044	1952±82	BC91～AD73	
日本刀M1	0.5	880±150	AD920～1220	平安末期～鎌倉初期

日本刀M1については、予想していたより少し古い年代が出た。軟らかい心金を皮金で包む手法が確立するのは鎌倉時代中期とされるから、妥当な結果と言えよう。鉄鐘の値は、反対に予想より少し新しい時代を示した。とはいっても、日本の歴史には記録のない古い時代である。このような古い時代から鋳鉄を使用しているのは、中国およびその影響下の文化圏だけで、西欧諸国が鋳鉄を使い始めるのは千年以上も後のことなのである。鉄鋌についてはウワナベ古墳築造年代よりはかなり古い製造年代になった。炭素濃度の低い直刀Xとも同じく、国外から持ち込まれた物とも考えられるが、今後の検討を待ちたい。

これらの試料の化学組成を、表3に示す。

古代鉄器についての ^{14}C 年代測定の報告が、これまで、ごく一部を除いてなされなかった理由の最たるものは、測定に多量の試料を必要としたことであろう。タンデトロン加速器質量分析法で必要とする炭素量は3ミリグラム程度であり、鉄試料としては数グラムを要する。試料の炭素濃度によって必要な試料量は違って来るから、予め、火花試験などで炭素濃度を推定しておくことが望ましい。日本刀の場合など0.5%程度の炭素は含まれているから、1グラムあればよいことになり、茎（なかご）部から目釘穴程度の試料を採取できれば

よい。非破壊的な手段で各種の測定を実施し、最後に年代測定を行うことにすれば、試料も十分に生かされたといっているのではないだろうか。

4 産地推定の試み

生産地を自然科学的な手段で識別できれば大きい貢献になるが、古代鉄器について報告された例はなく、発掘地を明示して参考としているのが普通である。青銅器については、鉛同位体比測定によって、原料産地の識別が可能になり、最近、興味ある知見が数多く得られている⁹⁾。鉛は青銅器においては主成分の一つであり、少量の試片から容易に鉛を抽出し、同位体比測定を実施できるが、鉄器の場合は簡単には進まない。鉄器中の鉛の含有量は数ppbの桁であり、細心の注意を払わないと、汚染の影響を測定していることになってしまうからである。この困難な課題に挑戦して漸く成果が得られた東京国立文化財研究所の平尾良光氏らの測定の中に私の提供試料も入れてもらった⁷⁾。

鉛同位体比測定の詳細については文献(6)を参照して頂きたいが、安定同位体 ^{204}Pb の外に、放射性元素の壊変 $^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$ 、 $^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$ 、 $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$ による3種の同位体があり、これらの壊変の半減期はほぼ十億年の桁の値で、地球が誕生した後、鉄器原料の鉱物・岩石が析出してUやThから別れるまでの期間に応じて、これらの同位体間の存在比が変化するので、こ

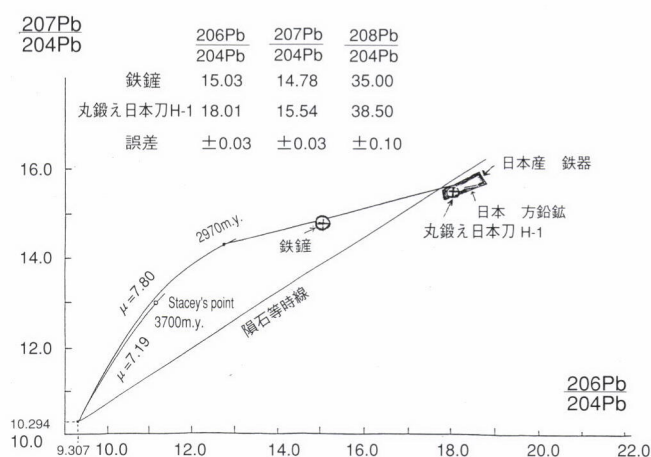


図2 鉄器の鉛同位体比

表3 古代鉄試料の化学組成

	C%	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Ti	Co	Al	Ca	As
鉄鐘 (AA)	3.63%	220	116	50	—	917	208	44	<50	170	6.2	140	70
	—	—	54	—	—	<36	430	38	78	150	120	<640	140
鉄鋌	0.44%	110	—	220	36	—	—	—	—	—	—	—	—
別試料	0.054%	1500	110	190	—	480	—	—	40	—	—	<50	—
別試料	0.71%	2500	20	270	30	1100	—	—	20	—	—	—	—
直刀X	0.044%	270	—	330	20	—	—	—	—	—	—	—	—
日本刀M1 (AA)	0.49%	60	—	690	—	—	—	—	350	—	140	—	—
	—	—	22	—	55	<32	<120	22	190	130	10	<880	6.1

(AA) は武蔵工業大学原子力研究所、中性子放射化分析

れによって原料の産地を識別するのである。

$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ を縦軸に、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ を横軸にとると、時代の経過とともに、これらの値が増大してゆく形になるので、これに従って図2に測定結果を示した。

鉄器についてのデータはまだきわめて少ないので、控え目な表現を取らなければならないが、日本産の鉄器14種は図2中に示した限定された領域内に入っている。日本産の方鉛鉱の領域を含むが、測定精度に差があり一致するとは言えない。一方鉄鏝についての測定結果は上記の領域とは大きくかけ離れ、現在より約十億年前の古い時代に分離したものと推定され、先カンブリア紀の盾状地となり、中国大陆の北部が一つの候補として考えられる。将来多くのデータが蓄積されれば、詳細に限定することも可能になると期待される。

鉄鏝は古貨幣研究家の郡司勇夫氏からの提供で、表面に金石文の文字のように思われる文様が浮き出ている特異な試料である。もし青銅製であれば、どこかの貨幣博物館に収蔵されて、試片採取など到底望めなかった品物である。その外観、透過X線像、表面文様拓本を図3に示す。かなり重要な試料と考えられたので、付着していた土についての花粉分析を、東北大学・教養部 相馬寛吉教授に依頼して実施した。

53個の花粉と胞子が見出され、ヨモギ属(10)、イネ科〔栽培種とは思われない〕(9)、スギ科(7)、アカザ科(5)、マツ属(5)その他、コナラ属、キク科、ハンノキ属、ニレ属、ハシバミ属、ヒカゲノカズラ属等があり、出土地は拓かれた乾燥原野で、近くには水の流れがあり、遠くには深く茂った森が望まれたであろうことが推定される。スギ科の中のスギ属の花粉は特徴のあるものであり、出土地を中国大陆と日本列島だけにほぼ限定し、朝鮮半島の可能性はきわめて低いことを教えてくれる。

これらを総合的に考慮すると、この鉄鏝の産地を中国大陆と躊躇なく判定できよう。

5 古代鉄と酸化精錬

この鉄鏝は多くの気泡を含んでおり、鑄造品としては失敗作に違いないが、中には酸化鉄の詰まった孔もあることが分かり、当時の鑄造技術を推定させる意味でも重要な試料といえそうである。銑鉄の湯に空気を吹き込んで強くかき回し、酸化鉄鉱石をも加えて、銑鉄中の炭素量を減らし、脆くなく鍛錬できる強い鉄、すなわち鋼をつくる「炒鋼法」という酸化精錬法が、中国では古くから知られている。空気をとり入れての炭素の燃焼反応による発熱と、酸化鉄の還元反応による吸熱とのつりあいが重要で、この試料の場合、酸化鉄が一時にやや多量に加えられたために温度が下がり、大急ぎで鑄込まれたものであろう。

炭素の燃焼反応は湯の温度を上げるが、必要温度に到達すればそれ以上はエネルギーの浪費である。酸化鉄の添加は鉄の収量の増加に結び付くから、温度さえ適正に管理されておれば、きわめて有効な手段といえる。この試料の場合、温度管理に失敗し、炭素量があまり減らないうちに温度が下がり、湯の流動性が悪くなって、一酸化炭素などが気泡として閉じ込められたまま凝固したものと考えられる。これはかなり初歩的な失敗と見なすことができ、修練を積めば、可鍛銑鉄程度ばかりではなく、炭素濃度を1%以下にまで低減することに成功しているのではないかと想像される。中国の古書「呉越春秋」⁸⁾に、鉄に関連して「劍を鑄す」という記述が見られるのは、これに対応するのではないかと提言したい。

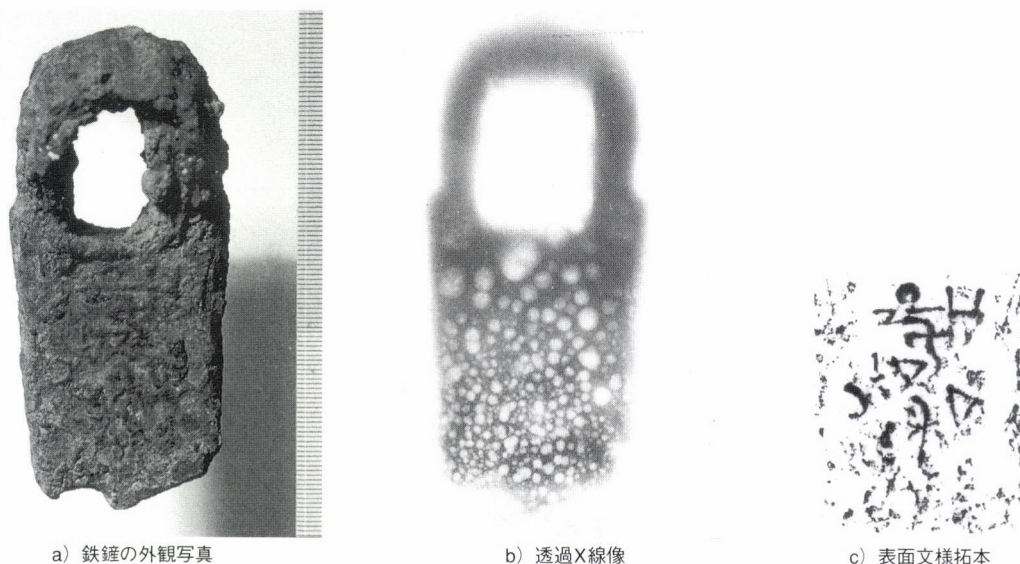


図3 鉄鏝の外観写真 (a)、透過X線像 (b)、および表面文様拓本 (c)

パドル鋼の場合も、最終段階に近いところで、酸化鉄粉に包んでこね回す操作があり、その後で酸化物系介在物を絞り出すが、酸素との親和力が鉄より大きい不純物を酸化物として系外に除去するものであり、脱マンガン・脱けい素に有効であったと思われる。

現在の工業鉄において広く採用されているマンガンやけい素による脱酸は、金属相中にそれらの不純物を残すものであり、これによって昔の人の常識とは非常にかけ離れた鉄、すなわち沸かしの効かない鉄が量産される結果になったと言えそうである。

6 おわりに

古代鉄の優れた性質に魅せられて、現在の量産鉄との差を明確にしたいと考えたのが最初であった。多くの方々の厚意によって、貴重な試料を数多く提供して頂き、思いのままに試験片を切り出せる幸運に恵まれたことを感謝したい。

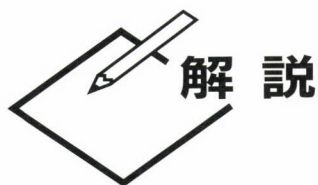
来歴の不明な伝世品も数多く、年代測定から産地推定までと、関心は広がるばかりなのに、自分自身の能率は低下するばかりで、まとめられる日が来るのは何時になるのかなどと、思い迷ったこともあったが、不十分ながらも一つ

の区切りをつけることができた。

快く協力して頂き、貴重な測定結果を出して下さった方々に、厚くお礼申し上げる。

引用文献

- 1) M.Isshiki and K.Igaki : Techn. Reps. Tohoku Univ., 44 (1979) No.2, 331
井垣謙三：鉄と鋼, 68巻, 3号, 1982年, 393頁
- 2) 井垣謙三：文芸春秋, 1991年, 11月号, 85頁
- 3) 杉本克久, 松田史朗, 一色 実, 江島辰彦, 井垣謙三：日本金属学会誌, 46巻, 1982年, 703頁
- 4) 井垣謙三：古文化財の科学, 29巻, 1984年, 18頁
- 5) K.Igaki, T.Nakamura, M.Hirasawa, M.Kato and M.Sano : Proc. Japan Acad., 70B (1994), No.1, 4
- 6) 馬淵久夫：『考古学のための化学10章』8章, 東京大学出版会, 1981年, 157頁
- 7) 平尾良光、榎本淳子：考古学と自然科学, 第29号, 1995年, 41頁
- 8) 『呉越春秋』卷二：(後漢) 趙曄撰, (元) 徐 天祐 音註
(1996年3月11日受付)



製鋼プロセスへの数値解析技術の適用

三宅俊也 (株) 神戸製鋼所機械研究所流熱技術研究室主任研究員
Toshiya Miyake

Application of Computer Aided Engineering to the Steel Making Process

1 はじめに

製鉄プロセスに代表される素材製造プロセスにおいては、ユーザーの厳しい品質要求、コスト削減を実現するべく、プロセス改善、新プロセスの開発を行っている。これを効率良く行うためには、プロセス内の物理現象をできる限り短期間に正確に理解することが要求される。このとき、生産設備を用いながら、量、質ともに十分データ収集が可能であるならば、Full-Scaleの実設備を用いた実験を行うことが最も即物的なアプローチである。しかしながら、実機実験、またそれに近いスケールの実験になれば実験費用が大きく、1600度近い温度を有する溶融金属内の物理現象を直接任意の点を測定によって定量化することは、実験手法または安全の面で困難である。そこで、コールドモデル実験、または小規模なホットモデルを中心とした実験工学的なアプローチが試みられ実績を上げてきた。たとえば、製鋼プロセスであれば、対象は反応容器の内の溶鋼であり、この動粘性係数が水とほぼ同じであることと、安全、安価であることから水を用いたモデル実験が多く用いられている。近年のレーザ計測、画像処理を用いた計測技術などモデル実験における計測技術の進歩により実験からも以前と比べて膨大な情報を得ることができるようになった。ところが、簡便で、かつ安全である反面、反応および凝固など相変化を含む伝熱現象、電磁力と流体の連成などのモデル実験は非常に困難である。一方、冶金学的実験からは反応のモデル化の基礎となる知見、反応メカニズムに関する知見が得られるが、スケールアップの効果などの評価が困難である場合が少なくない。コールドモデル、小規模のホットモデルどちらのモデル実験の場合でも、現象を支配する無次元量を実機のそれと完全に一致させることは困難である。そこで、これを補完する手段として、計算機演算能力の進歩を背景に製鉄プロセスの開発、改善のテーマに対して、数値解析を用いたアプローチがいろいろな工程の検討に用いられるようになってきている。したがって、数値解析に期待される役割は、次の点に要約される。

①モデル実験だけでは、物理現象を支配する因子に対して相似則が成り立ちにくい場合のスケールアップ効果の評価。

②プロセス改善のための現象を支配する因子の絞り込み。
または、費用、および時間を要するモデル実験、実機実験条件の絞り込み。

③実機での実験が困難な場合の現象の定量化、可視化。

さらに、上の三項目に加えて、数値解析技術を確実に操業、プロセス改善に結び付けるためには、設計者、操業者の要求するレベルに応じた改善提案をタイムリーに出すことが要求される。たとえば、いくらか精緻なモデルを使用した計算であっても1ケースの検討に1ヶ月かかるようであれば試行錯誤的な検討はできない。逆に、大胆な仮定を置いたモデルであっても現象の本質的なところをはずしていなければ、大胆なモデル化を行った数値計算を用いたパラメータスタディーの方がよい場合もある。数値解析を効率よく使いこなしていくためには、このあたりのセンスが技術者に要求されるところである。

さて、数値解析に話をもどせば、相似則の問題点からは解放されたのであるが、製鉄プロセスにおいては現象が複雑であるため数学モデルが不完全である現象も多く、それに関連して境界条件などが明確である現象はむしろ少ない。そのため「使える数値解析結果を得る」ために、実プロセスまたはモデルを用いた実験にもとづく境界条件の設定、フィッティングパラメータの設定、数学モデルの構築、修正など実験的アプローチと組み合わせて使用することが一般的である。

以上述べてきたように、実験技術、数値解析技術もそれぞれ長所、短所があり、プロセス改善、改良を効率よく行うためには、モデル実験、実機実験、数値計算それぞれの特長を生かしながら現象の理解へつなげてゆく作業が、現状のもっとも効率の良い手法であろうと考えられる。本稿では、製鋼プロセスに関して、数値解析のプロセスへの適用例を示しながら、数値解析の適用の現状を紹介する。

2 数値解析からみた製鉄プロセス内の流れの特徴

ここで、数値解析を製鉄プロセスに適用する際の、数値解析からみた製鉄プロセス内流れの特徴を整理する。

①複雑な物理現象の連成系である！

たとえば転炉内の現象を数値解析ですべて扱うことを想定すれば、転炉内は固気液三相流であり、気相はランスからの噴流のように超音速の状態から、溶鋼中の気泡領域の部分までである。液相である溶鋼はガスの衝突によって湯面は大きく変形しており、内部は当然乱流状態である。かつその中で精錬反応が起こっている。この種の現象をすべて数値解析で表現することは現状では絶望的であるし、また経済的アプローチでない。したがって、着目する現象が表現できる範囲まで計算モデルを単純化し、さらに境界条件の設定、数学モデルの構築、修正などはモデル実験とうまく組み合わせて行う必要がある。

②境界条件がわからない？

プロセスを対象とした計算を始める場合に、必ず境界条件が必要になるが、その際、流れの境界条件、熱的な境界条件が不明などの問題に突き当たることが少なからずある。境界条件をどう取り扱うかはノウハウによるところも多く、計算機上の試行錯誤と実験結果との比較の中で適切な値を設定することが多い。

③空間、時間スケールの全くことなった現象が混在！

一回の処理が数十分の時間スケールの反応容器の中に精錬反応、燃焼などの時間スケールの非常に短い現象が存在するような適用先が多数ある。このような“固い系”を非定常計算で取り扱う場合、数値計算上多数の計算回数を必要とし、この種の計算を困難にしている。また、空間のスケールでは数mの長さスケールの反応容器の中の容器内で数mmのスケールの現象を云々する場合、格子解像度に問題が生じる場合がある。

④使用している数学モデルの妥当性は？

①に関連して、解析に使用しているモデルが、対象とする系に適合しているかどうか不明の場合も多い。または、混相流解析での相間の運動量交換、物質伝達等の様にモデル化が未だ確立していない領域も多い。

3 数値解析手法

さて、製鋼プロセスに対して数値解析を行うため支配方程式について簡単に紹介しておく。

3.1 流動場の支配方程式

製鋼プロセスにおいては、溶銑、溶鋼を取り扱うため、基本的にはNavier-Stokesの式(N.S.方程式)とエネルギー式、

連続の式が使用される。

連続の式

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

Navier-Stokes式

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\nu_l + \nu_t) + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \beta (\Gamma_{ref} - T) g + f_i \dots\dots (2)$$

エネルギーの式

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial u_i T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\alpha_l + \frac{\nu_t}{\sigma_T}) \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad \dots\dots\dots (3)$$

3.2 介在物、気泡の取り扱い

製鋼工程では、気泡および、非金属介在物挙動を問題にする事が多い。介在物等の数値的な取り扱いに関しては、気泡、非金属介在物を溶鋼中の分散相として浮上速度を考慮した濃度の移流拡散方程式を用いる場合と、離散的な粒子と仮定して粒子の運動方程式を解く場合の2種類に大別されよう。

a. 連続相としての取り扱い、

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial C u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(D_l + \frac{\nu_t}{\sigma_c} \right) \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$u' = u + u_{slip}$

ここで、 u_{slip} ：介在物または気泡の浮上速度、 u ：流体の流速をあらわす。

D_l ：層流拡散係数、 ν_t ：乱流動粘性係数、 σ_c ：乱流シュミット数

b. 離散的に取り扱う場合

Basset, Boussinesq, Oseen, and Tchen式(以下B.B.O.T.式)⁹⁾を非定常に解くことにより離散的な介在物の軌跡を求めるものである。B.B.O.T.式の場合、抗力係数 C_D はStokes則を用いて与えているが、実際の粒径の分布をもつ介在物では、Stokes則の適用限界を超える場合もあるので、それぞれの適当な抗力-パーティクルレイノルズ数の相関式を用いて決定すればよい。

$$\begin{aligned} \rho_p V_p \frac{d\vec{U}_p}{dt} = & -\frac{1}{2} \rho_p (\vec{U}_p - \vec{U}_f) \left| \vec{U}_p - \vec{U}_f \right| C_D A_p & (\text{抗力の項}) \\ & + V_p (\rho_p - \rho_f) g & (\text{浮力の項}) \\ & + \rho_f V_p \frac{d\vec{U}_f}{dt} & (\text{圧力勾配の項}) \\ & + \frac{1}{2} \rho_f V_p \left(\frac{d\vec{U}_f}{dt} - \frac{d\vec{U}_p}{dt} \right) & (\text{付加質量に対する加速に要する力}) \\ & + \frac{3}{2} d_p^2 (\pi \rho_f \mu_f)^{\frac{1}{2}} \int_{t_0}^t dt' \frac{\frac{d\vec{U}_f}{dt'} - \frac{d\vec{U}_p}{dt'}}{\sqrt{t-t'}} & (\text{バセット項}) \quad \dots\dots (5) \end{aligned}$$

添え字 p ：粒子、 f ：流体

V_p 、 A_p 、 d_p はそれぞれ粒子を完全に球と仮定した場合の体積、投影面積、直径を表す。

μ ：粘性係数、 ρ ：密度、 C_D ：抗力係数、 $\vec{U}$ ：流速ベクトル、 g ：重力加速度

3.3 乱流の取り扱い

ここで(2)式を無次元化することで現れる流れを支配する重要な無次元数であるレイノルズ数 Re のオーダーを考えれば次のようになる。溶鋼において数cm/sec～数m/sec、代表長さを1mのオーダーであるとする Re は $10^4 \sim 10^6$ のオーダーとなり、乱流の現象も考慮する必要がある。

数値的に乱流を扱う場合、モデル化をすることなくN.S.方程式を非定常で解く直接解法、N.S.方程式に平均化操作を施した基礎式にもとづく乱流モデルを用いる方法に大別される。プロセス設計に供する熱流体の数値解析では乱流の微視的な構造を問題にするよりも、反応容器内の巨視的な運動量、エネルギーの輸送を問題にする場合の方が圧倒的に多いため、乱流モデルを用いた解析を行うのが一般的である。その場合、定常状態を問題とする場合は時間平均化したN.S.方程式にもとづく $K-\epsilon$ モデルが多く用いられており、汎用ソフトウェアも大部分がこの手法を用いている。一方、非定常の流れの挙動を問題にする場合は格子サイズ以下の渦に対してはモデル化し、格子サイズ以上の大きい渦は直接解くLarge Eddy Simulationが用いられる。乱流モデル及びその解析手法については文献6)などを参考にされたい。

3.4 数理解析手法

図1に、乱流モデル、非圧縮性流体の数理解析手法、汎用プログラムの変遷を示す。非圧縮性流体の解析手法は差分法、または有限体積法をもとに構造格子系で発展してきた。計算上表現できる形状は構造格子系においてもBody Fitted Coordinate(BFC)、Multi-Block BFCなどが考案され計算対象の形状の自由度が広くなり、最近では、非構造格子系の計算も活発に行われている。解析手法そのものの基本的な考え方は、1970年代に考案されたMAC²⁾、SIMPLE³⁾法などが現在も使われている。この手法を取り入れた商用

の汎用プログラムも1980年代に登場し、カタログ機能的には、混相流、燃焼、乱流等複雑な現象の解析まで取り扱える。しかし、一方で、本稿で取りあげているような対象に対しては、ユーザが独自で反応モデル等のカスタマイズをする必要が多くあり、そのため汎用コードはハンドリング性の悪さ、中身の細かい部分の不透明さもあり、自社開発したコンピュータプログラムを使用する場合も多い。

4 具体的事例

ここでは、製鋼工程での具体的な事例を紹介する。製鋼工程における数値計算の主な適用先と適用した目的および、各工程での着目現象を代表的な文献とともに表1に示す。表をみてもわかるように製鋼プロセスにおいては、熱流体の数値計算の技術分野のほとんどがプロセスの各工程に関連しており、さらには、電磁場解析と連成させた解析、熱流体解析結果にもとづいた熱変形等の構造解析など広い範囲の解析技術の融合が現象の解明に必要となっている。以下に紹介する事例に関連した連成計算の手順を図2に示しておく。

表1 製鋼工程における熱流体解析

工程	解析で知りたい現象	モデル化すべき現象	参考文献
溶銑予備処理	①インジェクション方法による混銑車内流れの変化 ②混銑車形状による混銑車内流れの変化	①気泡攪拌 ②脱S、脱P反応 ③固液三相流	(11)
転炉	①気液界面反応 ②転炉内の反応速度 ③転炉内の溶鋼流動 ④溶鋼への着熱効果	①固液三相流 ②気相内燃焼反応	
鍋精錬	①鍋内の混合特性、温度分布、濃度分布 ②鍋内の反応速度	①気泡流 ②精錬反応モデル化	
RH	①脱C速度(容量係数) ②鍋内濃度分布 ③RH形状による異流量特性	①気泡流 ②脱C反応	(12)、(13) (14)
タンディッシュ	①タンディッシュ形状による介在物浮上特性の変化 ②タンディッシュヒーターによる溶鋼加熱特性と流れへの影響 ③タンディッシュ内パブリングの影響 ④異鋼種製造時の成分非定常変化の把握	①介在物運動のモデル化 ②介在物運動に対する壁面、スラグメタル界面でのモデル化	(19)、(20) (21)、(23) (24)、(25) (26)、(27) (28)、(29) (30)
鋳型内流れ	①鋳型内介在物浮上特性、または凝固殻への捕捉 ②鋳型内気泡浮上特性 ③浸漬ノズルの形状による鋳型内流れの影響 ④鋳型内流れに対する電磁力の影響 電磁攪拌の影響 電磁ブレーキの流れへの影響 高周波磁場による流れへの影響 ⑤流れと凝固成長の把握 ⑥鋳型形状と介在物浮上特性の関係 ⑦異鋼種製造時の非定常混合特性	①介在物の挙動 ②気泡運動のモデル化 ③電磁力と流れの連成 静磁場との連成 移動磁場 高周波磁場 ④流れと凝固の連成 ⑤鋳型形状、浸漬ノズル形状のモデル化	(31)、(32) (33)、(34) (35)、(36) (37)、(38) (39)、(40) (41)、(42) (43)、(44) (45)、(46) (47)、(48)

4.1 溶銑予備処理

著者らが行った混銑車内流動計算の例を示す。混銑車をもちいた予備処理の場合、その形状の影響で、容器端部の溶鋼の攪拌が悪く、そのため脱硫(S)量の不均一分布が生じる。脱硫反応の不均一をなくす目的で電磁力等を用いて混銑車内の端部を中心に向かって攪拌力を付加した場合、トランジトリー反応が大部分を占める脱硫反応に対してS濃度分布の解消にそれがどの程度効果があるものかを検討した。図3にその計算結果の一例を示す。攪拌によって混銑車内S不均一分布が大きく緩和することが理解でき

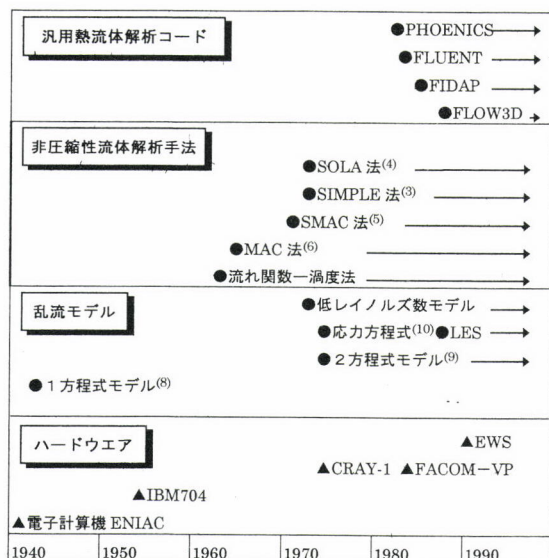
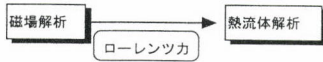


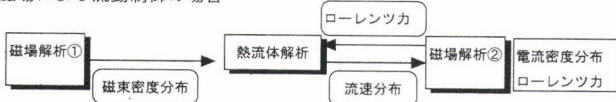
図1 熱流体数値解析手法の進歩

①磁場による流動制御の効果の評価

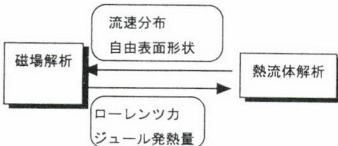
低周波磁場による流動制御の場合



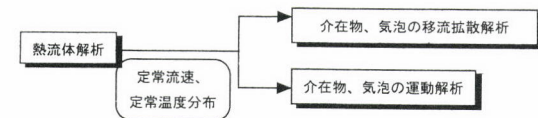
静磁場による流動制御の場合



高周波磁場による流動制御の場合



②介在物、気泡の挙動、浮上特性の評価



③鋳型内の不均一凝固の評価

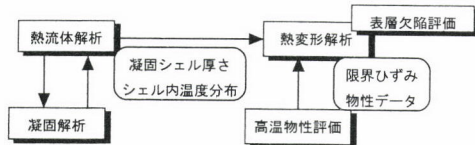


図2 連成計算の代表的手順

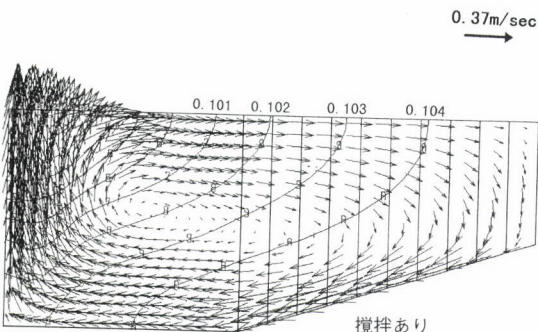
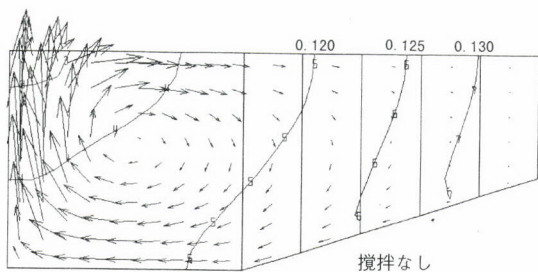


図3 混鉄車中央断面における速度ベクトル図、及び濃度の等値線

る。さらに両者の計算における反応時間を比較することで攪拌強化によって処理時間がどの程度短縮できるかを検討できる。この計算においては、気泡の領域を実験にもとづき仮定し、その領域でのみ反応がおこるものと仮定した。反応速度定数は、非攪拌時の平均処理時間が操業データに

フィットするように調整し、攪拌のある、なしの差異を検討している。

4.2 RH、銅

RHに対して、加藤ら¹²⁾は、取鍋内の流動状態を組み込んだ脱炭反応モデルを構築して、脱炭速度に及ぼす溶鋼流動の影響を考察している。図4に計算例を示しておく。Tsujinoら¹⁴⁾は、取鍋内での短絡流の有無、管径拡大の効果を解析で検討している。古野ら¹³⁾は、RHの形状と取鍋内の混合特性の関係を検討している。これらの研究は主として鍋内の流動に着目しており、貫流量を境界条件として与えた計算を行っている。

取鍋のガス攪拌については、主として取鍋内の混合特性を定量化するねらいのものが多く、計算上の取り扱いとしては、気相と液相のそれぞれの運動方程式を相間の運動量交換を考慮した手法と、気泡流領域を仮定して気泡による攪拌効果を溶鋼の運動方程式の浮力として取り込む手法に大別できる。前者の手法については、Ilegubusiら¹⁶⁾、Johansenら¹⁵⁾の研究、後者の手法については、Zhuら¹⁷⁾、Shengら¹⁸⁾らの研究がある。前者の場合、気相と液相間の運動量交換は、気泡の抗力の実験式にもとづいて与えられている。

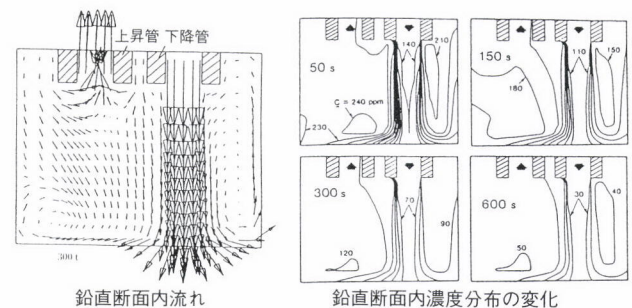


図4 RHでの流動反応解析例（加藤ら（12）より引用）

4.3 連続鋳造装置

4.3.1 タンディッシュ内流れ

タンディッシュにおいては、介在物浮上を促進するため、一般に溶鋼滞留時間を大きく、短絡流を抑える必要がある。そのためのタンディッシュ形状、堰の位置、長さなどの最適化に関する事例が多い^{19),20),22),23),30)}。また鍋交換による成分、温度の非定常性を述べたものとして、Chakraborty²¹⁾、Damleら²⁹⁾の研究がある。高谷ら²⁴⁾、Shumiyaら²⁷⁾は注湯方法による介在物浮上特性への影響について解析を行っている。図5に高谷ら²⁴⁾の計算結果を示す。この計算は先に述べた濃度の輸送方程式を用いて介在物の浮上、流出を検討している。その他、石井ら²⁶⁾はタンディッシュヒーターの効果も流動も含めて検討している。さらにタンディッシュ内の乱流、層流の取り扱いを2流体モデルを用いて検討したIlegubusi²⁸⁾の研究がある。

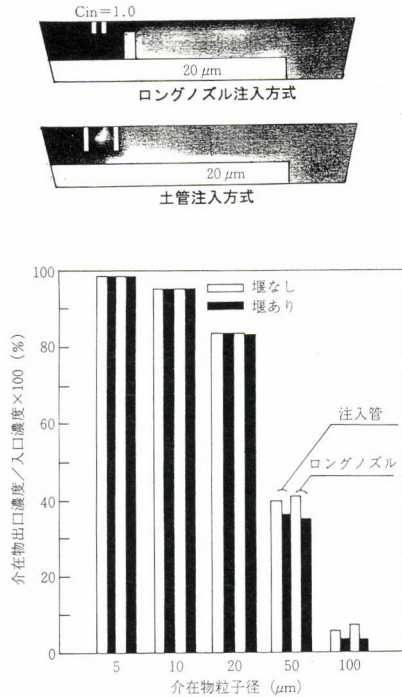


図5 注湯方法によるタンディッシュ内の介在物濃度分布の変化および介在物径による介在物出口濃度の変化 (高谷ら (24) より引用)

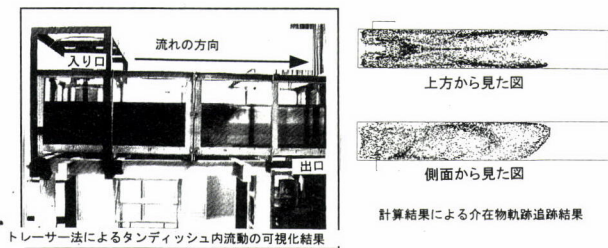


図6 水モデルによるタンディッシュ内流動の可視化と計算結果との比較

ここで、図6に介在物を離散的に扱った場合の計算例と水モデルを用いた可視化実験結果の比較を示す。両者は良好に一致している。この例での粒子は、可視化実験のトレーサーを模擬するために介在物径が非常に小さいもの（1ミクロン）を扱っている。手順は、流れの定常解を求めた後に流れ場を固定し、粒子の運動方程式を非定常に解くことにより各時刻での粒子の位置を求めるものである。粒子

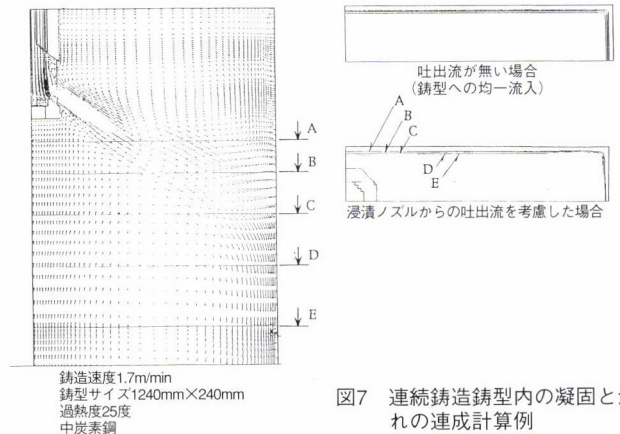


図7 連続鋳造鋳型内の凝固と流れの連成計算例

径を変化させることにより、介在物などの粒子径と浮上特性の変化を調べることも可能である。ただし、粒子のスラグメタル界面での捕捉条件、介在物の溶鋼中での凝集、合体についてはモデルが未確立であり、計算での浮上率と実験での浮上率の定量的な対応は現状困難である。

4.3.2 鋳型内流れ

鋳型内の流れは、浸漬ノズル形状による鋳型内熱流動の変化^{46)~48)}、電磁力を用いた流動制御による流動の変化を数値的に解析し、介在物浮上効果などを議論したものが多い。凝固、電磁場と流体の連成、その中での介在物の挙動を解析するなど様々な連成解析が行われている。

4.3.2.1 凝固と流れの連成^{31),32)}

連続鋳造鋳型内では、溶鋼流動が凝固殻成長に対して影響を与えることが指摘されており、これを定量化することで品質上問題となる表層欠陥と鋳型内流動との関係を明確にすることができる。図7に、著者らが行った凝固と流れの連成計算の例を示す。鋳型コーナー部において凝固殻の不均一が生じていることが観察できる。この不均一凝固を防止するような流れを実現することで表面品質の向上を図ることができる^{33)~37)}。凝固と流れの連成では、潜熱によるエンタルピー変化を考慮したエネルギー式とN.S.式を連立

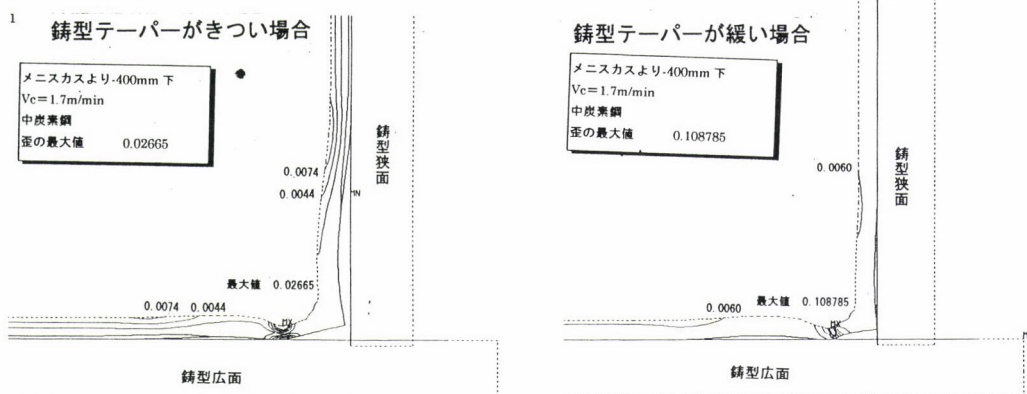


図8 凝固遅れによる鋳片コーナー部の凝固殻変形一ひずみの等直線一

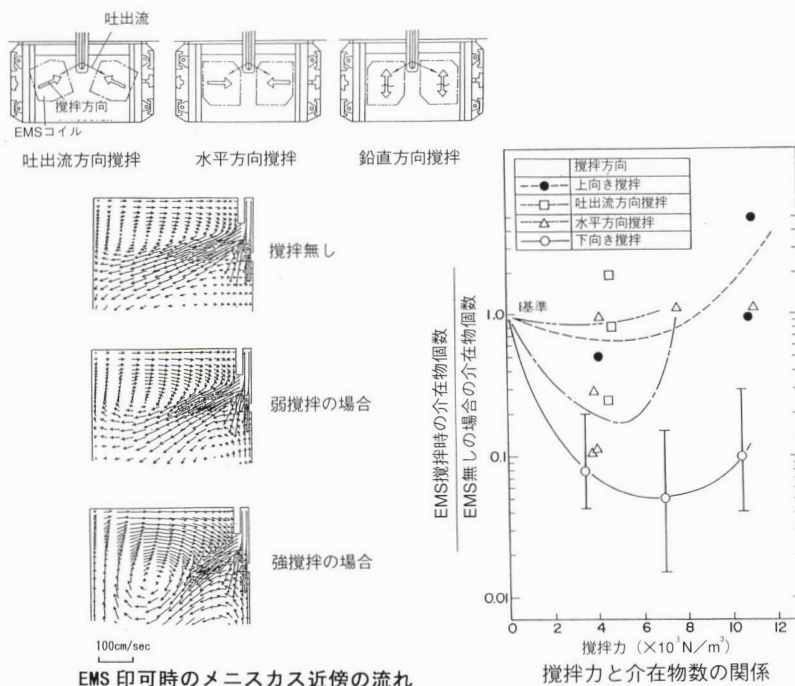


図9 電磁搅拌の数値解析例

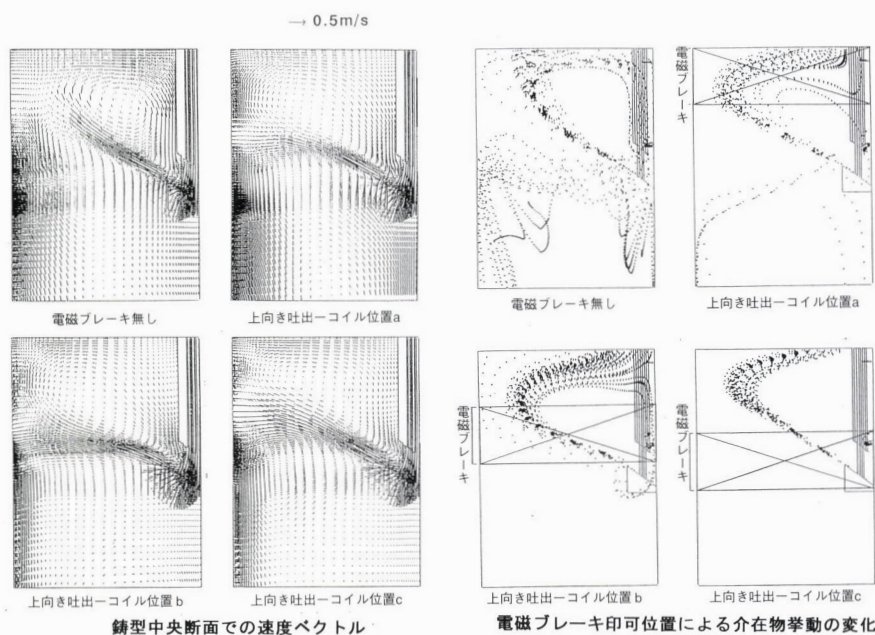


図10 電磁ブレーキによる流動制御の解析例

させて解くことで実現できるが、固液共存相での抵抗則、凝固計算時の乱流モデルの取り扱いなど今後の課題も多い領域である。

4.3.2.2. 凝固遅れと凝固殻変形

铸型内の凝固殻の成長は、モールドパウダーを介した铸型への抜熱と数十度の過熱度を持った溶鋼から凝固殻への入熱の釣り合いで決まる。そのバランスが不均一である場合、凝固殻厚さおよび凝固殻変形も不均一となる。図8に、

凝固遅れが铸片コーナー部にある場合の凝固殻変形を示す。解析には、別途行った実験により得られた高温強度の物性値を使用し、熱収縮、溶鋼静圧を考慮している。凝固殻の成長に不均一がある場合、凝固遅れ部に大きなひずみが発生することが分かる。また、铸型テーパ送り量を適切にすることでひずみが緩和されることも理解できる。このように铸型内の流動、凝固さらには流動に影響を受けた凝固殻の変形といった流動解析、構造解析の組み合わせで表層欠陥の原因の解明も可能となる。

4.3.2.3 電磁力による流動制御

電磁力による溶鋼流動の制御は、鋳型内流れの制御技術として、電磁攪拌、電磁ブレーキなどが実用化されている。電磁力による流体の制御をモデル実験で扱うためには、低融点金属、水銀を用いた実験を行う必要があるため、設備検討には電磁場解析と流体解析を組み合わせた数値計算が活用されている^{38)~42)}。ここでは、その例として、鋳型内電磁攪拌、電磁ブレーキ、高周波磁場による流動制御の計算例を示す。福元ら³⁸⁾、Genmaら³⁹⁾は電磁場解析と流体解析を組み合わせて、湾曲鋳型内での電磁攪拌による介在物低減効果を検討している。A- ϕ にもとづく電磁場解析により得られた時間平均のローレンツ力を流体解析の外力として考慮することで、低周波磁場による電磁攪拌の効果を表現している。図9に電磁攪拌の攪拌方向によって、攪拌力-介在物個数の関係が変化することがわかる。次に図10に電磁ブレーキによる流動制御の解析例を示す。電磁ブレーキは静磁場中で溶鋼が運動をする場合、それを制動しようとするローレンツ力が働くことを利用したものである。この制動効果を考慮した流動計算を行うには、一般に電磁場解析を独立して行い、流れの支配方程式と電位ポテンシャル、電流密度を連成して解くことで取り扱われている。図のように数値解析を用いることで静磁場印可位置、磁場強さ等の最適化が可能となる。

5 最後に

図11に大型コンピュータ、その次の世代であるワークステーション(EWS)、さらに、ここ数年で民生用として大きく裾野を広げたパーソナルコンピュータ(PC)の性能の変遷を示す。図中の性能はLINPACKベンチマーク(n=100)の結果にもとづくもので、スカラー演算能力を示すと考えてよい。最近のPCのスカラー演算スピードは、10年前の汎用機程度のスピードであり、数十万円で購入できる計算機で現

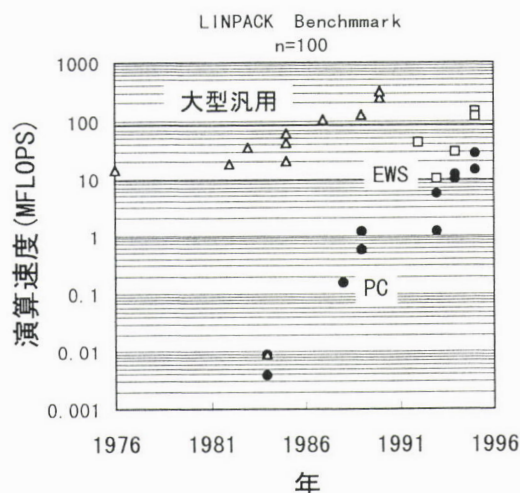


図11 計算機環境の進歩 (データはDongara J. (49) より引用)

状のワークステーションで行われているような規模の計算が可能になっていることがわかる。本稿で紹介したような解析もかなり身近に設計者、開発者らが、安価におこなえるであろう。このとき、得られる結果の信頼性、質の向上が今後いっそう問われることになるであろう。したがって、我々自身がこれまで数値計算を使いこなすうえで蓄積したノウハウ的な経験則を体系的に整理しておくことも重要であり、一方で基礎的な現象の解明、数学モデルの開発、解析手法の改良など、学際的な分野もふくめてソフトの質の向上をめざした努力を今後とも継続してゆく必要がある。

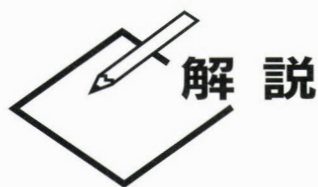
ハードとソフトがバランスよく進歩することによって、数値解析技術を、開発効率をあげるためのツールとして、さらには、現象の理解を深め、創造的な思考、発想をうむための支援ツールとして活用してゆけるものと信じている。

参考・引用文献

- 1) Hinze, J.O. : "Turbulence" 2nd ed. , (1975) , p.460, McGrawHill
- 2) Harlow, F.H. and Welch, J.E. : Physics of Fluids, Vol.8 No.12, pp. 2182-2189 , (1965)
- 3) Patanker, S. V. and Spalding, D. B. : International Journal of Heat and Mass Transfer , Vol.15 , pp. 1787-18061, (1972)
- 4) Hirt, C. W. , Nicols, B.D. and Romero, N. C. : Los Aramos Scientific Report LA-5852, (1975)
- 5) Amsden, A. A. and Harlow, F. H. : Los Aramos Scientific Report LA-437 , (1970)
- 6) 乱流解析, 数値流体力学編集委員会編, 東京大学出版, (1995)
- 7) Prandtl, L. : ZAMM, 5, pp. 136-139 , (1925)
- 8) Prandtl, L. , : Math. Phys., K1, pp. 6-19 , (1945)
- 9) Launder, B. E. and Spalding, D. B. : Comp. Meth. Appl. Mech. Eng., 3, pp. 269-289 , (1974)
- 10) Launder, B. E. : J.Fluid Mech. , Vol. 68 , (1975) , p.537
- 11) 三宅俊也, 相楽嘉一, 藤田貴, 小川兼広, 蝦名清, 堀川健一 : 材料とプロセス, Vol.8, (1995) , p.107
- 12) 加藤嘉英, 中戸参, 藤井徹也, 大宮茂, 高取誠二 : 鉄と鋼 Vol.77 , (1991) , No. 10, p.1664
- 13) 古野好克, 石口由紀男, 政岡俊雄, 井上茂 : 材料とプロセス, Vol.4 , (1991) , p.232
- 14) Tsujino, R. , Nakashima, J. , Hirai, M. and Sawada, I. : ISIJ Inetrnational, Vol. 29 , (1989) , No.7, pp.589-595
- 15) Johansen, S. T. and Boysan, F. : Metallurgical Transactions B, Vol. 19B , (1988)
- 16) Ilegbusi, O. J. and Szekeky, J. : ISIJ-International, Vol. 30 (1990) , No. 9. pp.731-739

- 17) Zhu, M. Y., Inomoto, T., Sawada, I. and Hsiao, T. : ISIJ International, Vol. 35, (1995), No. 5, pp.472-479
- 18) Sheng, Y. Y. and Irons, G. A. : Metallurgical Transactions B, Vol. 24B, (1993), p.695
- 19) Jung, T., Kim, K. J., Jung, Y. and Lee, S. M. : SEAIQ Quarterly, (1992), pp.36-51
- 20) Sinha, S.K., Godiwala, K.H. and Sivaramkrishnan, C. S. : Ironmaking and Steelmaking, Vol.20, (1993), No. 6, p.485
- 21) Chakraborty, S. and Sahai, Y. : Ironmaking and Steelmaking, Vol.19, (1992), No. 6, pp. 479-487
- 22) Joo, S. and Guthrie, R. I. L. : Canadian Metallurgical Quarterly, Vol. 30, (1991), No. 4, p. 261
- 23) 森正晃, 大崎真宏, 岩崎正樹, 堤直人, 沢田郁夫: 製鉄研究, 第338号, pp. 29-34
- 24) 高谷幸司, 城田良康, 樋口善彦, 谷澤好徳: 住友金属, Vol. 45-3, (1993)
- 25) 木村秀明, 森正晃, 後藤修, 白井登喜也, 田中宏幸: 材料とプロセス, Vol.4, (1991), p.1198
- 26) 石井俊夫, 近藤裕計: 第6回伝熱シンポジウム講演論文集, p.75
- 27) Shumiya, T., Shiraishi, A., Iwata, K., Hitomi, Y. and Nagahata, T. : The Sumitomo Search No. 55, pp. 7-13, (1994)
- 28) Ilegubusi, O. J. : ISIJ International, Vol. 34, (1994), No. 9, pp. 732-738
- 29) Damle, C. S. and Sahai, Y. : Steelmaking Conference Proceedings, (1994), pp.235-247
- 30) 赤井芳弘, 山田和之, 豊田守, 布袋屋道則, 関野一人, 高谷幸司: 材料とプロセス, Vol. 4, (1991), p. 1322
- 31) 蝦名清, 森下雅史, 三宅俊也, 徳永宏彦: 材料とプロセス, Vol.7, p.285, (1994)
- 32) Miyake, T., Morisita, M., Tokunaga, H. and Ebina, K. : WCCM III, Vol. 2, (1993), p. 1778
- 33) 徳永宏彦, 小林高, 森下雅史, 田井啓文, 蝦名清, 安中弘行, 三宅俊也, 仲山公規: 材料とプロセス, Vol.8, p.345, (1995)
- 34) 田井啓文, 安中弘行, 蝦名清, 谷川完士, 木村雅保, 仲山公規: 材料とプロセス, Vol.8, p.286, (1995)
- 35) 安中弘行, 蝦名清, 小北雅彦, 谷川完士, 木村雅保, 仲山公規, 竹鼻直人: 材料とプロセス, Vol.8, p.287 (1995)
- 36) 森下雅史, 田井啓文, 蝦名清, 三宅俊也, 徳永宏彦: 材料とプロセス, Vol.8, p.346, (1995)
- 37) 田井啓文, 安中弘行, 森下雅史, 蝦名清, 徳永宏彦, 小林高, 仲山公規, 三宅俊也: 材料とプロセス, Vol.8, p.347, (1995)
- 38) 福元裕彦, 坂本雄二郎, 源間信行, 貝原保男: 神戸製鋼技報, Vol.40, No.3, (1990)
- 39) Genma, N. : ISIJ International, Vol.29, No.12, pp. 1056-1062, (1989)
- 40) Fujisaki, K., Sawada, K., Ueyama, T., Okazawa, K., Toh, T. and Takeuchi, E. : International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials, (1994), p.272
- 41) Okazawa, K., Toh, T., Takeuchi, E. and Fujisaki, K. : International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials, (1994), p.278
- 42) Lehman, A. F., Tallback, G. R., Kollberg, S.G., and Hackl, H.R. : International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials, (1994), p.372
- 43) Morisita, M., Miyake, M., Tokunaga, H. and Ebina, K. : International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials, (1994)
- 44) Idogawa, A., Sugizawa, M., Takeuchi, S., Sorimachi, K. and Fujii, T. : Materials Science and Engineering, A173, (1993), pp.293-297
- 45) Takatani, K., Nakai, K., Kasai, N., Watanabe, T. and Nakajima, H. : ISIJ International, Vol. 29, (1989), No. 12, pp.1063-1068
- 46) Wang, Y. H. : 10th PTD Conference Proceedings, (1992), p.271
- 47) 横谷真一郎, Westhoff, R., 浅古豊, 原茂太, Szekely, J. : 鉄と鋼, Vol. 80, (1994), No. 10, p.759
- 48) Bessho, N., Yoda, R., Yamasaki, H., Fujii, T. and Nozaki, T. : ISIJ International, Vol.31, (1991), No. 1, pp. 40-45
- 49) Dongara, J.J., //www.netlib.org/benchmark/performance.ps, (1996)

(1996年2月22日受付)



薄鋼板圧延の歴史と技術の現状

藤田文夫

NKK 総合材料技術研究所プロセス研究センター 主幹研究員

Fumio Fujita

Strip Rolling

1 はじめに

圧延工程は大きく熱間圧延工程、冷間圧延工程に分けて考えられる。わが国での鉄鋼製品のうち鋼板の占める割合は60%以上であり、さらに熱間薄板ミルによる圧延は鋼板全体の80%近くになっている。冷間圧延はそのうちの80%以上に施される。このように薄鋼板の圧延は、現在では鉄鋼製品のうちの最も生産量の多い工程の一つとなっているが、その技術が確立したのはこの100年ほどのことである。当初は金属を薄くするのが圧延の主目的であったが、現在では材質を調整する役割も担っており、各種最先端の制御技術も導入されてきている。この解説では、薄鋼板圧延の歴史と技術の現状を見直してみたい。次に進むべき方向を模索する参考になれば幸いである。

2 薄鋼板圧延の歴史¹⁾

薄鋼板の圧延はヨーロッパに始まり、アメリカで近代的な技術の形態をそなえ、日本で大量生産への発達を見ている。この歴史を4つの期間で考えてみることにする。

2.1 創生期（～1800）

非鉄金属の冷間圧延は14世紀から試みられているが（Fig.1参照）、鋼の熱間圧延は16世紀にドイツで開始された比較的新しい技術である。それとほぼ時期を同じくして、ベルギー、英国でも開始されている。それから17世紀の前半までは、圧延に関する発展の記録はないが、1665年に操業されているミルの記録がある。ドイツではバーからの薄板圧延は17世紀の始めから行われていた記録があり、英国のブリキ市場をほぼ100年間独占していた。

1682年には英国で鉄鋼用の大型熱間圧延機が操業を開始し、バーから板を圧延し、更にスリットされて、棒が製造されている。1720年以前には英国で水車駆動の圧延機によって普通の棒からのブリキ用の薄板の圧延が開始され始め、英国がこの後150年間ブリキ板の主生産国となった。

18世紀の初期には圧延機は英国や、ヨーロッパにおいて普通に用いられるようになっている。18世紀の後半の英国のpatentに見られる圧延機はほぼ現在の形態となっている。また、板を2枚4枚と重ねて圧延して、薄板を製造する方法もこの時期に行われ始めた。また、この時期には棒鋼圧延にタンデムミルが用いられ始めている。

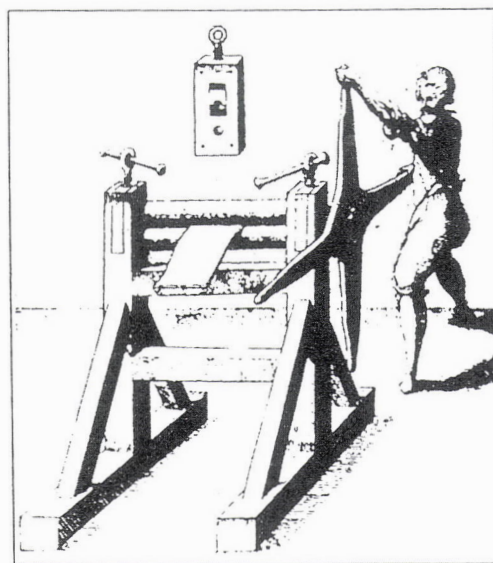


Fig.1. Mill to roll lead of the 1960's.

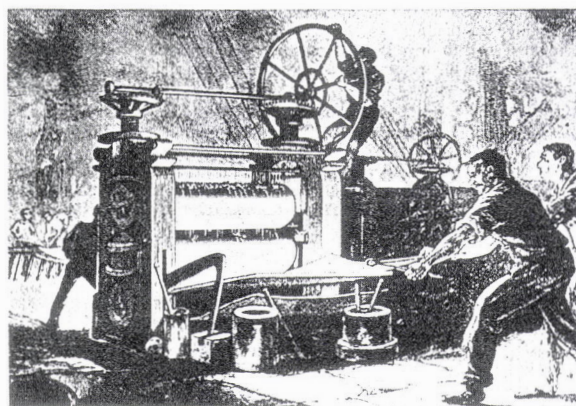


Fig.2. Typical sheet mill of the 1860's.

2.2 確立期（～1930年代）

最初のレバースタイプのプレートミルは英国で1854年に操業を開始し、蒸気船の建造に用いられている。現在の形の4段圧延機は1872年に英国でレールを製造する素材を圧延するミルに採用され始めた。

1880年前後の薄板圧延はFig.2に見られるような3段圧延機によって行われていた。熱間薄板圧延のタンデム圧延は1890年前後に試みられ始めているが、製品製造には至っていなかったようである。この技術の商業的な成功は1920年代の米国で実現を見ている。また、本格的な4段圧延機の4スタンドタンデム冷間圧延機も1926年にアメリカで操業を開始している。圧延可能な冷間圧延製品の幅も1900年以前は250mm以下であったが、この時期には2000mmを越える幅の圧延が行われるようになっていく。日本においても近代的なタンデムミルが実現するまでは、3段のプルオーバーミルによる製造が主であった。

2.3 拡大期（～1960年代）

第2次大戦後しばらくまでは、アメリカの鉄鋼業が世界を牽引していた。この時期には5大湖周辺に大製鉄所が建設され、近代的な熱間圧延機が稼働している。5スタンドのブリキ用圧延機、より薄いブリキを圧延するためのダブルレデュースミルなど、現在の大量生産圧延ミル形式はほとんどこの時期に確立されている。日本は戦後の復旧の需要と、産業の飛躍的な発展に合わせるように米国の製鉄技術を導入し、各地に一貫製鉄所が建設された。1960年代にはアメリカの最新の圧延技術を導入し、現在も活躍しているミルが多い。

2.4 熟成期（～現在）

冷間圧延機の完全連続化は1971年に最初に日本で完成され、本格的な大量生産の動きが始まった。米国では、鉄鋼産業は投資の対象として低い評価が与えられるようになり、この時期を境に、製鉄技術、圧延技術の中心は日本に傾斜していった。その後約30年間、板厚制御、プロフィール・形状制御などの新しい圧延技術のほとんどは日本で開発されている。圧延機のコンピューター制御や、圧延現象の解析も日本を中心として盛んに行われるようになった。冷間圧延の連続化による大量生産システムは日本におけるほとんどのミルで実現している。電動機もインバーターを用いた精密な速度制御が可能な交流式が一般化してきている。また、初めての熱間圧延での連続化も実現を見ようとしている。

しかしながら、この数年は、経済情勢の急変とともに、近代的な設備を新設した東アジア諸国での鉄鋼生産がそのコスト競争力を武器として台頭し始め、また、米国におい

ても鉄鋼業の立ち直りの兆しを見せ始め、日本の鉄鋼業は従来のように技術の優位さのみでは成り立たなくなりつつある。

3 薄鋼板圧延技術の現状

前章で概説した歴史のようにこの10数年の鉄鋼圧延技術の中心は日本にあったといえる。各技術要素毎に現状を概説したい。

3.1 板厚制御技術²⁾

薄板圧延において板厚制御は最も重要な技術である。ことに熱間圧延においては、連続圧延機のロールギャップを圧延荷重の推定値をもとに設定し、圧延開始直後から目標板厚に仕上げる必要があるとされる。また、種々の条件の変化によって生じる荷重変化に応じた制御を行って、一定の板厚を得ることが必要であり、要求される板厚精度は年々厳しくなっている。圧延機は、ロールを含めてほとんどが鉄鋼材料で構成されているが、加工対象が鋼であることから、圧延荷重が大きく、圧延中の圧延機の弾性変形が、要求される板厚精度に影響する大きさとなる。現在薄鋼板圧延に用いられている4段圧延機の剛性はほぼ、500～600ton/mm程度であり、幅1m～2mの薄板を圧延する場合の圧延荷重は約1000～2000tonとなるため、圧延中にはロールの隙間は2～4mmも広がることになる。また、圧延荷重が数%変化すると、ロール隙間は数10μm変化することになり、近年の製品に要求される板厚精度に影響を与えることになる。

ミルのギャップ変化と圧延荷重の関係は、

$$P=f(h_2-gap_0) \quad \cdots \cdots \cdots (1)$$

また圧延荷重は、

$$P=k \cdot \sqrt{R(h_1-h_2)} \cdot Q_p \cdot w \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

で表される。入り口板厚 h_1 のとき、ロールギャップを gap_0 に設定した圧延機で圧延したときの板厚 h_2 、圧延荷重 P は(1)、(2)式を連立させて求められる。ここに、 $f(x)$ はミル伸び曲線を表す式、 Q_p は圧延荷重関数と呼ばれる関数である。この関係をFig.3に示す。

ミル伸び曲線は、圧延機が弾性系であるため、基本的には直線であるが、ロール圧下装置のヒステリシスや、機械的なガタ、ワークロールとバックアップロールの接触状態の変化などによって非線形性を有する。

板厚制御は当初、ロールギャップ制御が電動式のスクリ

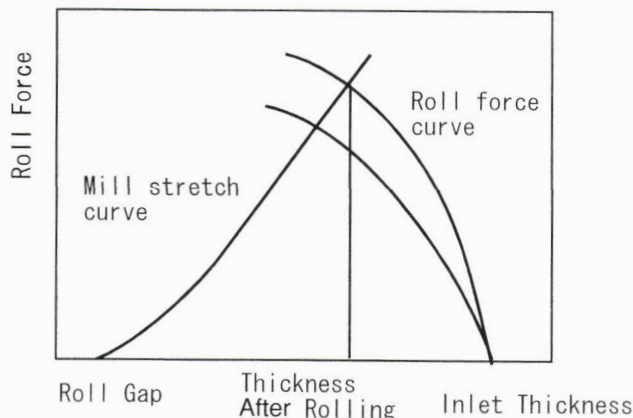


Fig.3 Mill stretch curve and roll force curve.

ューダウンによっていたため、十分な応答が得られなかった。しかしながら、応答遅れを解消するために、板厚計の計測結果を待たずに圧延荷重の変化を計測して、ロールギャップを制御するゲージメータ制御またはBISRA制御と呼ばれる制御が行われる。これは、圧延開始後の安定した時の圧延荷重を基準として、時々刻々の圧延荷重との差 ΔP から、次式で計算されるロールギャップ値を制御する方法である。

$$\Delta gap + \frac{\alpha}{K_c} \cdot \Delta P = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 α はチューニング率、 K_c は設定したミル剛性(1/ミル伸び)である。近年圧下装置に油圧シリンダーを組み込むようになり、応答の速いロールギャップ制御が可能になっている。このとき、 $\alpha=1$ とすることによって、荷重変動による板厚変化を無くすることができ、ミル剛性を見かけ上無限大化できる。また、圧延荷重の予測精度、ミル伸び曲線の精度を向上させて、式(1)から直接ロールギャップを設定する、絶対値AGCも実現している。この方法によれば、板厚や、材料が大きく変化しても、圧延開始から目標板厚が得られるようになる。圧延機の出口には板厚計が設置され、これによる検出板厚と目標板厚との差に比例したフィードバック制御が行われる。これをモニターAGCと呼ぶ。

ロールギャップの変化 Δg による板厚変化 Δh は、張力などが変化しなければ、式(4)

$$\Delta h = \Delta g \cdot \frac{M}{M - \frac{dP}{dh}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

で表される。ここに M はミル剛性であり、 dP/dh は塑性曲線の傾きである。これからわかるように、冷間圧延のように荷重関数の傾きが大きいばあいにはロールギャップの板厚制御への効果が小さくなる。このような場合にはむしろ張力を操作して、塑性曲線の傾きを変化させた方が有効で

ある。熱間圧延ではロールギャップが、冷間タンデム圧延機の場合には、塑性曲線の傾きの比較的小さい前段ではロールギャップ制御が、傾きの大きい後段では張力制御がAGCに用いられる場合が多い。

ゲージメータAGCの場合、ロールの偏芯や、ベアリングの非対称などによる圧延機側の要因による荷重変化が生じた場合は、ロールギャップ制御は板厚精度をかえって悪くしてしまう。このため、ゲインを小さくして、AGCの効果が十分得られない場合もある。これらの圧延機側の要因を機械構造の改造によって取り除いたり(キーレスベアリング)、油圧によるバックアップロールの偏芯を制御する方法が開発されている。

圧延直前の板厚を測定して、ロールギャップを制御するフィードフォワードAGCも実現している。また、タンデムミルの複数のスタンドの荷重の予測値と実測値の誤差の傾向から、ファジーロジックによってフィードフォワード制御する方法なども実用化されてきている。板厚測定も、接触式や、X線式の他に、レーザーの回折を用いた板速度計を用いたマスフロー方式も実用化されている。特に板速度計を用いた板厚測定は、時間遅れが比較的小ないため、モニターAGCに用いて効果を上げやすい。

圧延を開始するときの、ロールギャップの設定や、ロール速度の設定はミルセットアップと呼ばれるが、この精度は圧延開始から板厚を精度よく圧延し、圧延を安定して開始するために重要である。特に熱間圧延では、冷間圧延に比べて板厚が厚く、先端のオフゲージが歩留まりを大きく左右することになる。圧延荷重の推定精度は、これを構成する変形抵抗値 k 、圧延荷重関数 Q_p の精度に依存する。

$$P = k \cdot \sqrt{R' \cdot (h_1 - h_2)} \cdot Q_p \cdot w \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$Q_p = Q_p(R', h_1, h_2, t_b, t_f, k)$$

熱間変形抵抗については、美坂、橋爪らが実験結果をまとめて、式(6)のような形を提案している。

$$k = \varepsilon^m \cdot \dot{\varepsilon}^n \cdot \exp\left(A + \frac{B}{T}\right) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに ε は圧延歪み、 $\dot{\varepsilon}$ は歪み速度、 T は材料の絶対温度、 A 、 B は材料によって決まる常数である。ここでの圧延歪みは通常は当該スタンドでの歪みを用いるが、これはスタンド間で回復、再結晶が完了してしまうとして良いと考えられるためであるが、Ti、Nbなどの合金元素が添加された鋼の場合には、回復、再結晶が終了しない場合があり、歪みとして前のスタンドでの歪みを考慮する必要がある。近年製造され始めた炭素量の極端に少ない極低炭素鋼板の場合には、変態点が比較的高いため、熱間仕上げ圧延中の変態を考慮した変形抵抗が必要となる場合がある。

熱間変形抵抗の場合は特に材料の温度の精度も必要であり、近年では熱伝導方程式を差分で解くモデルなど比較的精度の高い温度推定式を組み込んでいる場合が多い。

冷間変形抵抗については、種々の提案があるが、式(7)の様に表すのが一般的である。

$$k = a \cdot (\epsilon + b)^l \quad \dots\dots\dots (7)$$

a 、 b 、 l は材料によって決まる常数であるが、熱間圧延条件にも影響される。ここでの歪み ϵ は熱間圧延の場合と異なり、累積歪みを用いなければならない。冷間変形抵抗も温度歪み速度の影響があり、特に焼鈍後の調質圧延などの場合には考慮する必要があるが、通常の冷間圧延では考慮していない。

圧延荷重関数は圧延理論によって展開されているが、実機の制御に用いる場合には近似式が用いられる場合が多い。冷間圧延、熱間圧延の場合のSimsの近似式、熱間圧延の場合の志田の近似式などが一般的である。

3.2 プロフィール・形状制御技術

前述のように圧延機を構成する各要素は弾性体であり、圧延荷重によって弾性変形を引き起こす。このため、圧延材は中高の断面プロフィールになってしまう。また、圧延される前の断面プロフィールと圧延後の断面プロフィールが異なると、圧延歪みが板幅方向に分布を持つこととなり、伸びが幅方向の位置で異なる。この伸びの分布は残留歪みとなって、製品の平坦度に影響する。伸びが大きいところでは、圧延方向の圧縮の残留歪みが発生し、これによる応力が限界値を越えると座屈現象によって波うちを生ずる。これが平坦度(形状)不良であり、波うちの発生する板幅方向の位置によって、耳波、中伸び、クォーターバックルなどと呼ばれる。これらを防ぐために、研削時にロールに中高のクラウンを与える方法や、ロールの熱膨張を制御する方法などが試みられていた。その後、より高応答の制御手段を要求され、ワークロールショックに油圧装置を組み込んで逆曲げを与えるベンダーが取り入れられた。

このような方法によるプロフィール・形状制御の自動制御を実現するために定量的な検討が行われた。特に1970年代からはコンピューターが普及し、ロールの弾性変形を精密に解析する試みが行われた。しかしながら、これらの解析結果と実際のプロフィール変化とは一致せず、特に冷間圧延では実際のプロフィール変化は解析に比べて一桁小さい値となった。この理由を、プロフィールの変化によって生じる残留歪みすなわち張力分布が圧延荷重の分布に影響を与え、これがロールの変形に影響するフィードバック効果として説明された。(Fig.4参照) この効果を数値解析に組み入れて、プロフィール解析や、平坦度解析が行われ、種々の制御方法

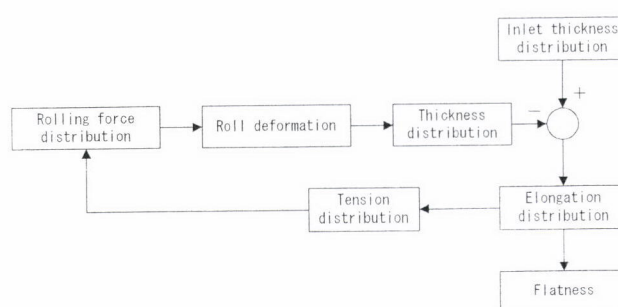


Fig.4. Diagram of tension feed back effect to thickness distribution.

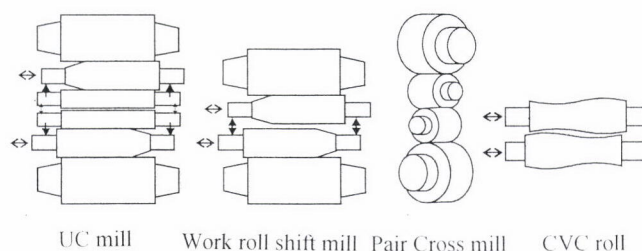


Fig.5. Profile and flatness control mills.

の制御効果が定量的に比較検討された。

Fig.5に実用化されているプロフィール形状制御方法を列挙する。

このような状況の下に、1975年前後にロールの弾性変形を安定させるために、中間ロールを軸方向に移動させる機構を備えたHCミルと呼ばれる6段ミルが開発され、広く熱間圧延機、冷間圧延機に採用された。また、板幅端部に発生する板厚の急峻な低下であるエッジドロップは、板幅中央部が平面歪みに近い状態であるのに対して、板幅端部の応力状態が平面応力であること、ロールの扁平変形が圧延荷重の直接与えられている部分(板と接している部分)と幅の外側のそうでない部分とで急峻に変化するため発生するものであるが、この制御には、ワークロール端部にテーパ状のプロフィールを設けて、このテーパ部分を板幅端部に重ねるような圧延が有効であることが明らかとなっている。この制御を板幅の違いに対応させるために、ワークロールを軸方向に移動させるワークロールシフト機構が導入されている。

熱間圧延の場合のプロフィール制御には、より大きな効果の制御手段が要求され、上記のロールの弾性変形を制御する方法では限界があった。この制御を実現したのが、ペアクロスミルと呼ばれる方法である。これはFig.5に示されるように、バックアップロールとワークロールを対にして、上下で同調中央部を支点にしてクロスさせるような配置をとる方法で、このクロスの角度を変えることによって、ロールギャップの幅方向分布を大きく変化させることができる。この原理は既に50年以上前に実験的に試みられているが、実機への適用に関しては、ロールに発生するスラスト

力や、クロスさせる機構などの問題を解決する必要がある、実現は1984年となった³⁾。この方法は、熱間圧延での強力なプロファイル制御の手段として、近年建設されるミルに多く採用されている。

局所的な形状不良は、上記の方法では制御不可能であり、局所的なロール冷却による熱膨張を利用する方法などが実用化している。

3.3 完全連続圧延技術

1970年代には日本において鉄鋼の大量生産技術が確立された。圧延技術ではその代表的なものに完全連続圧延技術がある。

3.3.1 冷間タンデム圧延機の完全連続技術

1コイル毎に圧延を完了するいわゆるバッチ圧延は、先端部をロールに噛み込ませる通板に時間を消費するばかりでなく、先端部後端部を圧延するためにロール表面に欠陥を生じやすく、製品の表面欠陥の原因になっていた。

これらを解決したのが完全連続圧延機で、1971年に日本で初めて実現している⁴⁾。この要素技術は①圧延に耐えうる圧延材の溶接接合技術、②圧延中に板厚を変更する走間板厚変更技術である。溶接接合技術は、フラッシュバット溶接と呼ばれる、直接通電による突き合わせ溶接で実現している。

走間板厚変更技術は、ロールギャップの変更とロール速度の変更を各スタンドでタイミング良く行う必要があり、板厚変更点のトラッキング技術と、セットアップモデルの高精度技術の組み合わせで実現している。近年主駆動モーターがインバーターによる交流化によって速度制御の精度が飛躍的に向上し、走間板厚変更点前後の、板厚の許容範囲からずれた部分の長さ、オフゲージ長さは数m以内に短縮されている。

冷間タンデム圧延機はその後、前工程である酸洗ラインとの連結が実現し、コイルハンドリングや、溶接などの共通部分の省略によって、省力化、高生産性が得られている。

更に冷間圧延の後工程である連続焼鈍との連結も実現している。

3.3.3 熱間タンデム圧延機の完全連続化

薄鋼板の熱間圧延では、先後端で板厚、板幅、温度、形状・プロファイルなどが非定常となりやすい。特に1.5mm以下の極薄熱延鋼板で発生しやすい、通板・尻抜け時の詰まり、絞り、破断などのトラブルはワークロールの異常組み替えを必要とし、生産能率、歩留まりの低下を招いていた。これらを解決する一つの技術が熱間タンデム圧延機の完全連続化技術である。これは1995年秋に操業を開始したばかりの技術であるため、その詳細は明らかではないが、①粗バーの温度確保を兼ねたコイルボックス装置、②粗バーの接合技術、③走間板厚変更技術、④高速切断技術、⑤高速巻き取り技術などが主要技術である。Fig.6にこれらの概略を示す。約10本のコイルを連続的に接合しながら圧延する計画であり、最初の1本目のみは加速による非定常部が生じるが、2本目以降はほぼ1000m/分の定常圧延が実現できるとしている。このため、ダウンコイラーでの高速切断、高速安定巻き取り技術が必要である。

この技術は既存のバッチミルでは難しかった1mm前後の板厚の製品を安定して圧延できるのみではなく、中厚鋼板への適用によっても、歩留まり、生産能率の向上が期待できる魅力的な技術と考えられている。

3.4 その他の主な圧延技術

3.4.1 小径ワークロール圧延機

変形抵抗の高い材料や、板厚の薄い材料を圧延すると、圧延荷重が非常に大きくなって、数%の圧下率しか得られない場合がある。このような場合にはワークロール径の小さな圧延機の適用が効率的である。しかしながら、小径のワークロールは曲げ剛性が小さくなるため、水平方向に支持をする機構を持つ必要がある。これを実現したのがクラスタータイプの圧延機であり、また、MKW、FFC、UC4といった4段圧延機を改造した形の圧延機である。これらのロール配列をFig.7に示す。

クラスタータイプの圧延機を本格的な圧延機として最初に実用化したのがセンジミアミルである。これはロール配

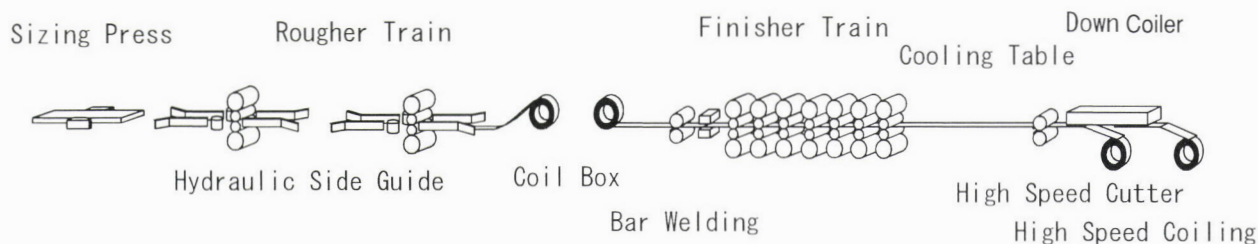


Fig.6. Schematic view of fully continuous hot rolling mill.

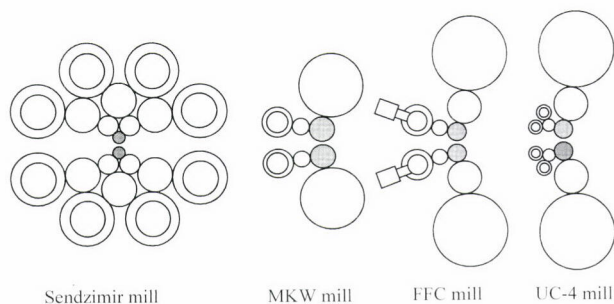


Fig.7. Several types of small work roll mill.

列を、上下とも1—2—3（—4）の12または20段としている。最後方の3または4本のロールは胴長方向に分割したベアリング構造をしており、各分割の間で剛性の高いハウジングからベアリング軸を支える構造をしている。この支え部分に偏芯機構を組み込んでベアリング軸をたわませて形状制御を行ったり、中間ロールにテーパを施してこれを軸方向にシフトして形状制御を行っている。

もう一方の形式のミルは既存の4段圧延機を改造して組み込む形式で垂直方向の支持は従来の4段圧延機と同様であり、水平方向の支えを新しい機構で行うものである。FFCミルは他のミルと異なり、水平方向の支持に油圧機構を組み込んで積極的に水平曲げを形状制御に用いている。

小径ワークロールによる圧延は、圧延荷重を小さくできるだけでなく、ロールギャップへの潤滑油の導入量を大径の場合に比べて少なくでき、圧延製品に高い光沢度を与えることが可能である。

3.4.2 幅圧延技術

近年薄鋼板用のスラブはほとんど連続鋳造によって鋳造されている。一般的にはスラブの幅は製品幅に近い幅を要求され、連続鋳造で幅を連続的に変える技術などが開発されている。しかしながら、幅変更中に非定常な幅のスラブができてしまうこと、一回の幅変更量に制限があることなど問題点が大きかった。

また、粗圧延機列での幅圧延も油圧圧下などが導入されて動的な制御が行われている。粗圧延機列での幅は

$$W = W_0 + \Delta W_S - \Delta W_E + \Delta W_R \quad \dots\dots\dots (8)$$

で表される。ここには W_0 はスラブの幅、 ΔW_S は板厚圧下による幅拡がり量、 ΔW_E は幅圧延機による幅圧下量、 ΔW_R は幅圧下を行うことによって生じる板幅端部付近の板厚増加（ドッグボーン形状）を続く板厚圧下で圧下する際に戻ってしまう幅変化量である。このドッグボーンの形状は、幅圧下ロールと材料の接触長さが短いと局所的な形状になり、幅戻りの率が大きくなる。また、ドッグボーンを圧延すると後端部にフィッシュテールと呼ばれる形状が形成され、

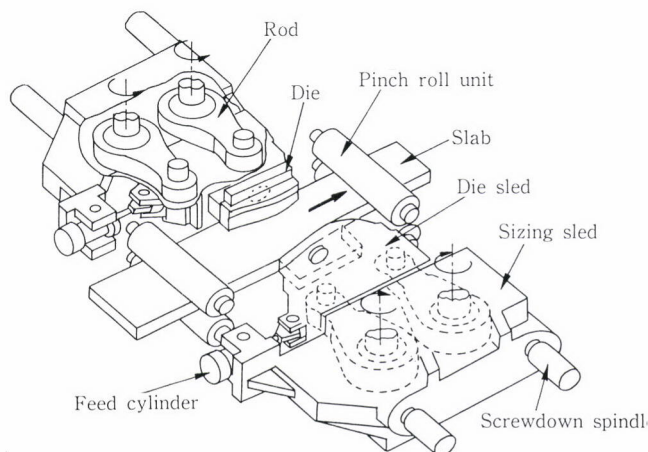


Fig.8. Schematic view of sizing press.

歩留まりの低減をまねくため、幅圧下量を制限している。このため、最大の幅圧下量は100～200mm程度である場合が多い。

これらの問題を解決する技術が幅をプレスで圧下する、サイジングプレスまたは幅圧下プレスと呼ばれる技術である⁵⁾。この概略をFig.8に示す。スラブの幅を間欠的に部分的に圧下していく構造で、油圧駆動と電動機駆動の装置が開発されている。圧延機による幅圧下に比べて接触長さを長くすることができ、ドッグボーンの発生を小さく抑ええた幅圧下ができるため、フィッシュテールの発生を些少にして350mm程度の幅圧下を実現している。この技術によれば、連続鋳造での幅変更の頻度を大幅に少なくできる幅集約が実現できるだけでなく、製品幅よりも広いスラブを鋳造できるため、連続鋳造の能率の向上も期待できる。

板幅は粗圧延機のみでなく仕上げ圧延機でも変化することが確認されている。これは主としてスタンド間の張力の変化によって幅がネッキングするためであると考えられており、張力制御をになっているルーパ制御のロールギャップ制御との非干渉化や、軽量のルーパを油圧で制御する装置などの開発によって解決されつつある。

3.4.3 スケジュールフリー圧延技術

熱間圧延機、冷間圧延機でのコイルの圧延順はさまざまな制約で決められている。典型的な制約が板幅制約である。熱間圧延の場合Fig.9のような幅の組み合わせに従うスケジュールが取られる。この図の形からコフィン（棺桶）スケジュールと呼ばれる。この制約は基本的にはワークロールの摩耗による障害をさけるための制約である。Fig.10-aにワークロールの摩耗の例を示す。ほぼ板幅に応じた階段状の摩耗が生じている。これを解決する方法の一つにワークロールを軸方向に定期的にシフトし、ロールと材料に接触する領域を均一化する方法がある。この適用例をFig.10-bに示す。

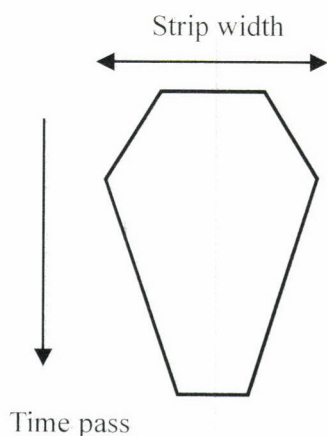
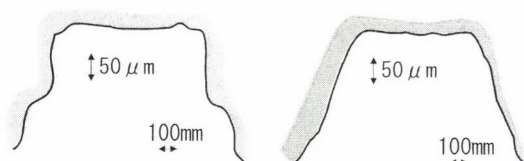


Fig.9. Schematic width schedule for hot rolling. (Coffin schedule)



a : Without work roll shift b : With work roll shift

Fig.10. Examples of work roll wear.

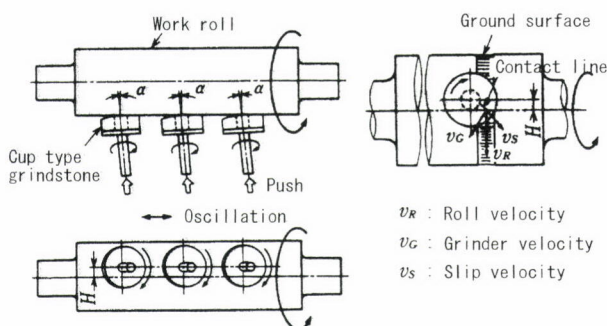


Fig.11. Schematic view of Online Roll Grinder.

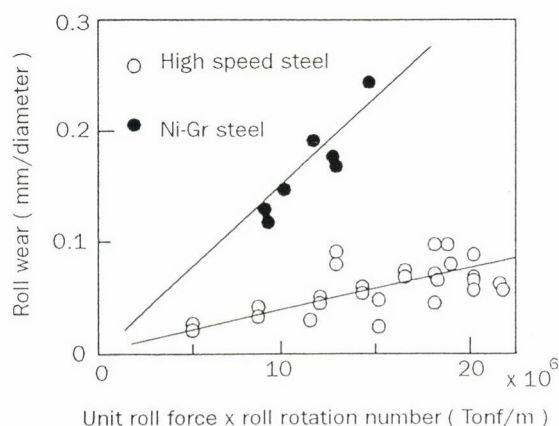


Fig.12. Comparison of work roll wear.

また、より積極的にロールを圧延機に組み込んだまま研削する技術も開発されている。オンラインロールグラインダー (ORG) と呼ばれる技術で、その概要をFig.11に示す⁷⁾。この技術とオンラインでのロールのプロファイルの計測技術を組み合わせることによって、任意のロールプロファイルに研削する技術も開発されている。

また、熱間圧延においてより摩耗の少ない材質のロールが用いられるようになってきている。この材質としてバナジウム、タングステンを含む高速工具鋼 (ハイス鋼) が用いられる。Fig.12に従来のニッケルグレンロールとの摩耗の比較を示すが、約1/4に抑えられており、ロール研削当たりの圧延量も5~6倍に伸ばすことができている。

現在スケジュールフリーが実現されていると言っても、極、限られた範囲での制約緩和でしかなく、板幅以外にもミルセットアップの精度や、冷間圧延の場合の溶接強度、板厚変更可能範囲などによる板厚制約や、圧延荷重の変化の制約による材質制約も存在する。

4 まとめ

近年の薄板圧延技術を中心に解説した。比較的古い技術にもかかわらず、スケジュールフリーや幅、曲がり、通板不安定の問題などまだ解決していないと考えられる技術も多く残されている。更に生産性の競争を強いられるであろう状況下で、日本の鉄鋼業の存続はこれらの未解決な問題の解決がキーポイントになる可能性もある。長期の取り組みにもかかわらず解決されていない諸問題に対しては、地道な取り組みと同時に、既存の考え方にとらわれずに、実現象をもう一度見直す取り組みが必要ではないかと考えられる。今後の若い研究者、技術者の活躍に期待したい。

参考文献

- 1) William L. Roberts : Cold Rolling of Steel, Marcel Dekker, INC, (1978)
- 2) 板圧延の理論と実際、特別報告書No.36, 日本鉄鋼協会 (1984)
- 3) H.Matsumoto, H.Tsukamoto, S.Hatae and H.Hino : Development of a Pair Cross Rolling Mill for Crown Control of Hot Strip, Advanced Technology of Plasticity, Vol. II, (1984), p.1372
- 4) 一丸隆六郎, 比企野賢三 : 日本鋼管技報, Vol.56, (1972), p.273
- 5) 田添信広, 片山忠, 塩崎宏行, 大谷内司, 横山孝廣 : 石川島播磨重工業技報, 30-1, (1990), p.18

(1996年3月12日受付)

現場技術報告

コークス炉ガス液の高度処理技術

Advanced Technology of Coke Oven Gas Drainage Treatment

新日本製鐵(株)名古屋製鐵所

山口彰一・菊池勇人・嵯峨弘・
東忠幸*

1. 緒言

新日鐵名古屋製鐵所では、コークス炉ガス液(以下;安水と記す)のCOD削減の為、オゾン酸化法の安水への適用を検討し、H6年4月より実機稼働を実現した。本報は、オゾン酸化法を安水へ適用した場合の操作条件の最適化、装置スケールアップ性に関する技術検討結果と実機稼働状況について報告する。

2. 現状のコークス炉ガス液処理フローと課題

コークス炉から発生した安水は、アンモニア等の除去を目的に安水蒸留設備により一次浄化した後、活性汚泥処理による脱COD後、排水される。

しかしながら、処理水には生物処理不能な高分子COD成分が含有されており、さらなる環境浄化に対応する安価、且つ高効率な処理技術の確立が必要と考えた。(Fig.1)

3. オゾンによる基礎試験

オゾンによるCOD除去性能を確認する為、バッチ試験装置を製作し、COD除去率等の基本的な性能を確認した。

- (1) Fig.2に示すように、入側COD濃度に対して、出側COD濃度は比例的に減少し、オゾンにより低減可能であることを確認した。
- (2) オゾン酸化により排水中のSS成分も酸化され、減少する。
- (3) オゾン消費原単位は、1~3mg/mg-CODであった。

4. オゾンによる気液攪拌装置の開発

本法の装置の適正化として、従来からオゾン処理に利用されている散気式と比較し、液中での気体の拡散力の高い機械攪拌方式を利用した安水のCOD除去性の定量化を実施した。

4.1 実験装置と方法

攪拌方式でのCOD除去性を定量化すべくFig.3に示す165φ×500Lの小型処理装置(1m³/Hr)を用い試験を実施した。COD除去量を定量化する事を指標としてオゾンとCOD成分との気液反応であることから、排水へのオゾンの総括物質移動容量係数 K_{La} を指標とした。 K_{La} は(A)式で表せられ、飽和オゾン濃度から K_{La} を求めた。

$$\text{Log } \frac{C'-C}{C} \cdots \cdots \cdots (A)$$

C' : 溶存オゾン濃度(mg/l), C : 液中平衡オゾン濃度(mg/l),

t : 接触時間(1/s)

4.2 実験結果と考察

浄水に対するオゾンの溶存量を調査した結果をFig.4に示す。これより(A)式を用いて、 K_{La} を求めると従来の散気式の数倍程度となる。

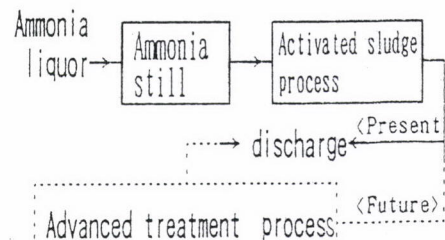


Fig. 1. Process of the Ammonia Liquor Treatment.

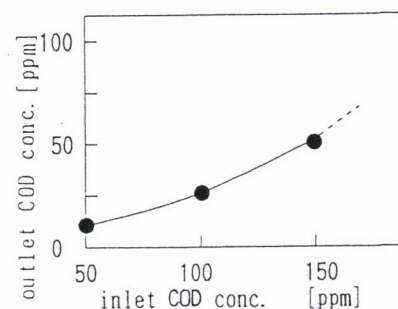


Fig. 2. Relation between inlet COD conc. and outlet COD conc.

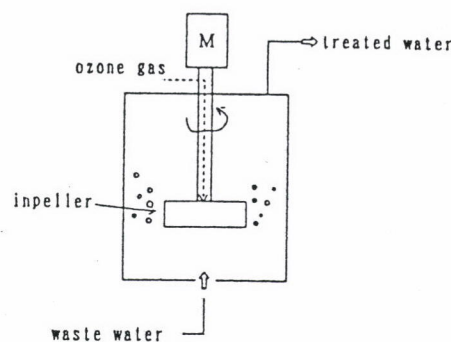


Fig. 3. Experiment apparatus.

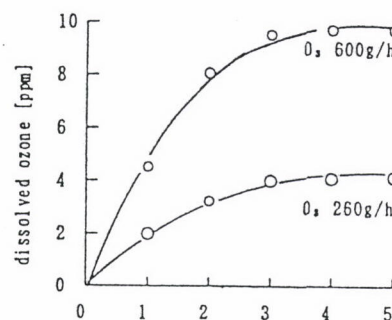


Fig. 4. Amount of dissolved ozone.

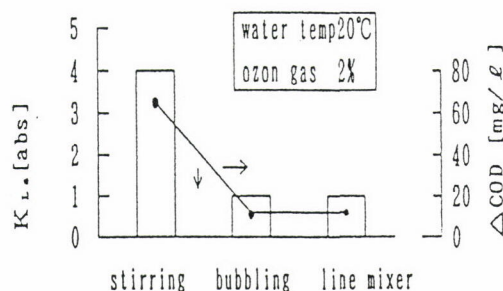


Fig. 5. Comparison of treated methods.

また、各気液方式の K_{La} 、COD除去性能を比較した結果をFig.5に示す。機械攪拌方式は、散気式やラインミキサー式より4倍程度の K_{La} を有しておりCOD除去性能も6倍優れている。

5. 装置のスケールアップ性

実機化を実施するに当たり、装置のスケールアップ性と連続処理性について検討を加えた。

5.1 実験装置と方法

小型試験装置の知見を基に700φ×1040L処理量10m³/Hrのパイロットプラントを建設した。

スケールアップについては、オゾンと安水の反応は気液界面で進行していると考え、その溶解性の指標となる K_{La} を一定にする為、回転数と線速度を制御し、気泡径、気泡拡散を一定化した。Table 1にベンチプラントとパイロットプラントの仕様を示す。

5.2 試験結果

Fig.6に小型試験装置とパイロットプラントのCOD除去結果を示す。オゾン添加量を変化させても両者ともに同等の処理性能を有しており K_{La} 一定で十分スケールアップ可能であることが判明した。

Table 1. Experimental condition.

Item	Bench Ex	Pilot Ex
Troughput [m ³ /H]	1	10
Linear Velocity [cm/s]	2.4	1.5
Rotation Speed [rpm]	1,300	950
Dia. and Height [mm]	165φ×450L	700φ×1,040L

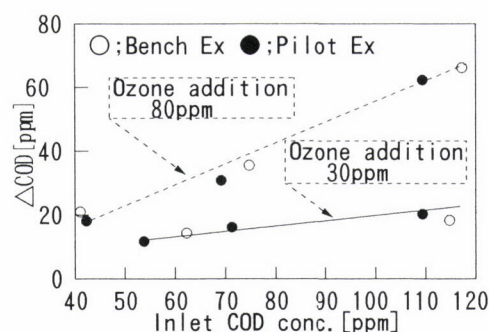


Fig. 6. Results of scale-up data.

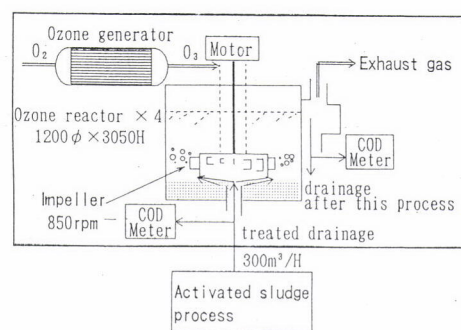


Fig. 7. Schematic flow of COG drainage treatment.

6. 実機稼働状況

基礎試験からパイロットプラント試験までの知見を基に、実機の建設を進め、平成6年4月から順調に稼働中である。その概要について述べる。

6.1 設備概要

本設備の概要をFig.7に示す。本設備の特徴は、非溶解性CODも機械的に剪断し、酸化する高効率反応装置(小翼式剪断型攪拌装置)を採用した事にある。本装置によればオゾンの気泡径を微小化、均一化する事ができる。

6.2 設備稼働状況

- (1) Fig.8は、開発段階と実機設備のCOD除去性能を比較したものであり、両者はほぼ一致している。これは、 K_{La} 一定でのスケールアップ則が妥当であることを示している。
- (2) Fig.9に本設備の入側、出側COD濃度を示す。入側COD濃度変動に対して、オゾン注入量を変化させる事により出側COD濃度をほぼ一定に制御する事が可能である。
- (3) 設備稼働率は98%以上であり、順調に稼働中である。

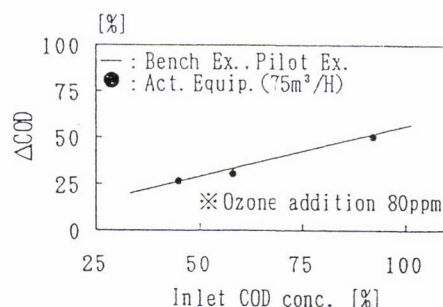


Fig. 8. Inlet COD conc. vs ΔCOD.

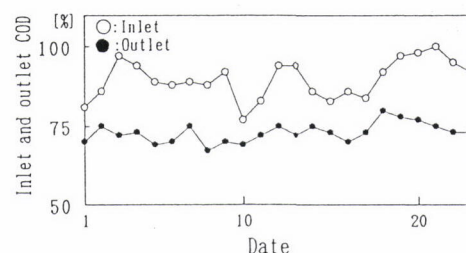


Fig. 9. Transition of COD in drainage.

7. まとめ

さらなる環境浄化を目的に安水へのオゾンの適用を基礎試験から実施し、高効率な方式による実機設備化まで完成させた。今後も設備の安定稼働に努めると共に、その他の環境への対応も実施していく。

現場技術報告

製鋼使用済耐火物リサイクル技術の開発

Development of Used-refractory Recycle Technology in Melting Shop

大同特殊鋼（株）知多工場

中坪修一・天野肇・立石亨*
新貝元

1. 緒言

当社知多工場における使用済み耐火物（以下、廃レンガと称する）の発生量は約10kt/年であり、定盤レンガを除く大半は場内処分場に埋設処分してきた。しかし、場内処分場の残余寿命の低下、及びそれに伴う公共投棄場への投棄費用発生の問題が顕在化したため、廃レンガ発生量低減が必須の状況になってきた。

Fig.1 に知多工場の廃レンガ発生量の内訳を示す。上記の理由により、廃レンガ発生量の抑制対策を図るべく、使用済み耐火物の再利用技術開発に取り組んできた。廃レンガ再利用の用途としてはLF造滓材・EBT（電炉偏心炉底出鋼方式）詰砂・SN（スライディングノズル）プレート・再生レンガ等の多種にわたり開発を実施した。本資料ではその概要について報告する。

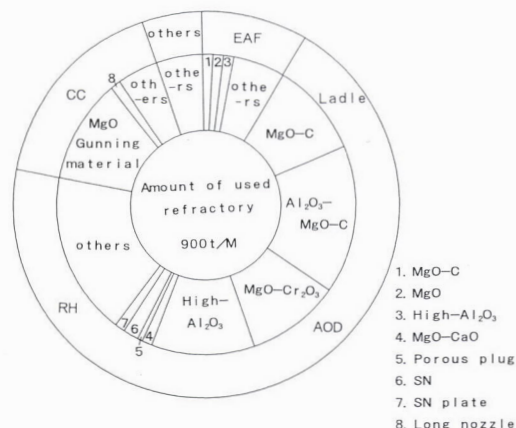


Fig. 1. Structural ratio of used refractory in Chita Plant.

2. 廃レンガ再利用技術

2.1 LF造滓材への適用

Fig.2 にLF造滓方法を示す。通常の精錬用途としてのCaO・CaF₂の他に、取鍋レンガ保護を目的に軽焼ドロマイト（MgO源）を添加している。その最適組成として過去の知見より（%MgO）=8~12%にコントロールすることがポイントである。

LF造滓材に適用する廃レンガの代表成分をTable 1 に示す。MgOを含有している取鍋スラグライン部のMgO-Cレンガ、メタルライン部のAl₂O₃-MgO-C（AMC）レンガを粉砕したものを軽焼ドロマイトと置換えて用いた。

廃レンガを使用するにあたり、滓化性、及び精錬能をチェックする目的で、粒度を<5mm、<10mmの2条件に粉砕し、実炉試験を実施した。その結果、懸念された粗粒（<10mm）での滓化性は良好であり、脱S速度等の精錬能力にも遜色ない結果が得られた。それに比べて微粒（<5mm）は粉砕能率・粉塵発生量等、廃レンガ製造上の問題が多いことが判明した。

Table 2 にLFスラグ組成を従来の軽焼ドロマイトと比較して示す。スラグ中のMgOは約10%であり、前述した最適組成にコントロールされている。また廃レンガ使用に伴いスラグ中のAl₂O₃が約3%増加している。

Table 2. Slag composition in LF.

	FeO	SiO ₂	S	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
Used refractory operation N=23 (σ)	0.30 (0.45)	17.85 (2.33)	0.84 (0.16)	8.05 (1.21)	61.36 (3.13)	10.25 (2.60)
Conventional operation N=18 (σ)	0.59 (0.35)	19.68 (1.48)	0.94 (0.22)	5.17 (1.11)	63.39 (5.12)	9.51 (3.49)

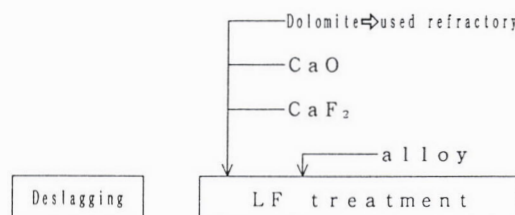


Fig. 2. Typical LF operation.

Table 1. Composition of used refractory and light burned dolomite.

	C	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	others (%)
Used refractory	11.8	24.9	48.5	2.4	12.4
Light burned dolomite	—	—	>30	>60	—

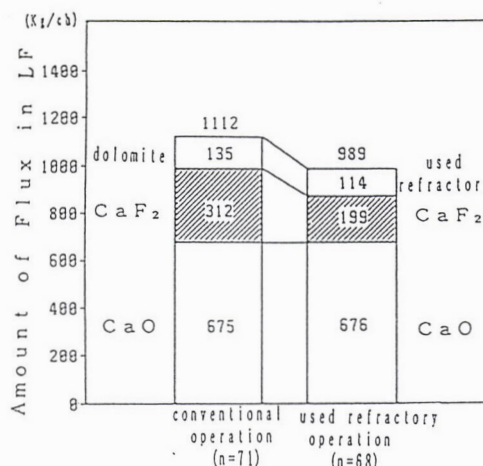


Fig. 3. Flux consumption in LF.

Fig.3 にLF造滓材使用量を従来と比較して示す。取鍋で発生する廃レンガ適用により、軽焼ドロマイトがレンガ層に置き換わり、スラグ中の Al_2O_3 の増加により粘性が低下したため CaF_2 使用量低減効果も得られた。

2.2 EBT詰砂への適用

EBT詰砂は、溶鋼から出鋼口を保護する栓の役目をしており、出鋼時に自然開孔すれば材質に特別な制限はないため、自然開孔するための必要条件として難焼結性という点と、投棄上の課題が多いという両面から、 $\text{MgO-Cr}_2\text{O}_3$ 廃レンガの適用を第1優先に検討した。 $\text{MgO-Cr}_2\text{O}_3$ 廃レンガを用いて実炉試験を行った結果、自然開孔率は高レベルを維持(>98%)しており使用上全く問題のないことが判明した。

つづいて、廃レンガのリサイクル率向上を目的として他の材質適用を図った。まず、対象として電炉 MgO レンガの粉碎品を試みたところ、自然開孔率が著しく劣ったため適用困難な結果となった。そこで、電炉の炉蓋や取鍋で使用している高 Al_2O_3 レンガの粉碎品を混合した結果、粒度分布が改善され、自然開孔率で従来品と遜色のない結果を得ることができた。

Fig.4 にEBT詰砂の使用比率を示す。 $\text{MgO-Cr}_2\text{O}_3$ 廃レンガ、及び高 Al_2O_3 廃レンガの適用により、リサイクル率は86%と高水準に至るまでになっている。

2.3 SNプレート再生技術

Fig.5 に使用済みSNプレートの溶損状況を示す。6ch使用後の孔径拡大は3mm程度、及び摺動部はmax10mm溶損されている。また、プレートのクラック発生は少なく、孔部の再生・摺動面研磨を実施すれば十分再生可能であると判断した。

使用済みSNプレートの再生方法として方式の検討を行なった結果、再生コスト高だが最も安全性の高いリング交換方式(Fig.6)を採用した。なお再生の工程はSNプレート表面を研磨しその後孔部をボーリング加工した後、別途新作したリング耐火物をはめ込む工程を経て製造される。

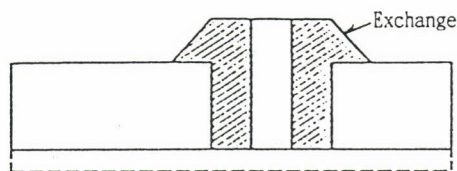


Fig. 6. Reformed sliding plate.

Fig.7 に再生SNプレート使用後の外観を示す。若干亀裂の進行は認められるものの孔周辺部・摺動部の脱炭は少なく良好な結果を得た。現在、SNプレート450セット/月使用の内、約20%は再生品を使用しており、今後さらにその比率を向上させてゆく計画である。

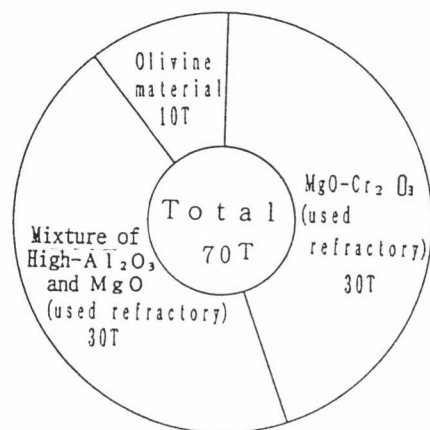


Fig. 4. Ratio of tap hole plug material of EBT.

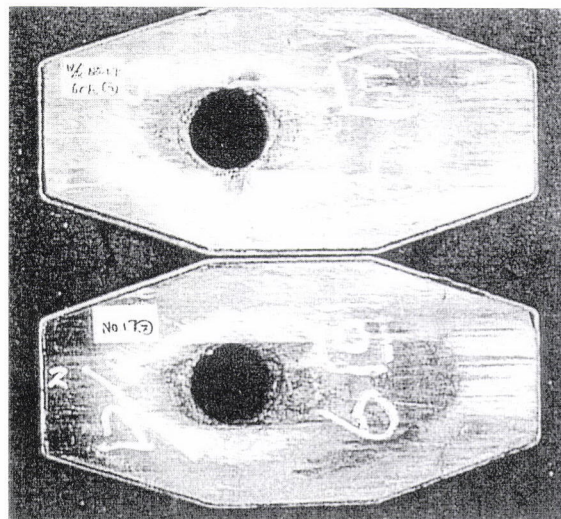


Fig. 5. Sliding plate after casting.

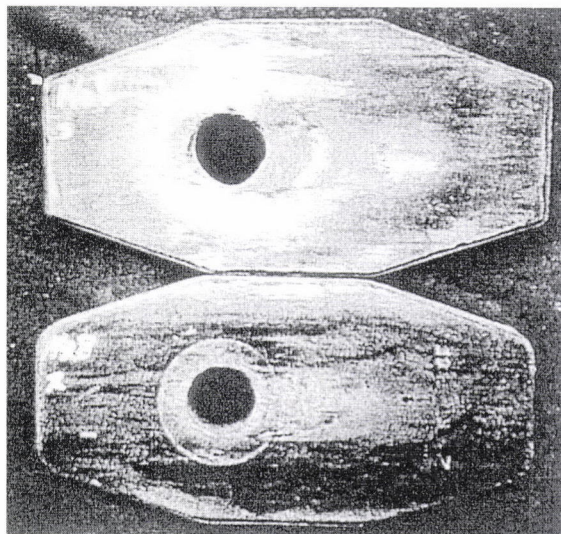


Fig. 7. Sliding plate after casting.
(Reformed sliding plate)

Table 3. Chemical composition of ladle brick.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	F・C	SiC
Used brick	2.5	55.7	0.9	1.5	28.7	8.4	1.6
New brick	1.8	55.7	0.5	0.9	29.4	9.8	—

(%)

2.4 再生レンガ技術

取鍋レンガはLF処理に代表されるように使用条件が過酷であるために、高品位の耐火物を使用しているのが一般的である。したがって、取鍋レンガへリサイクルするためには、廃レンガに付着する不純物（スラグ等）を極力除去することが必須条件となる。そのため、使用済みレンガを回収する段階で除去作業を実施し、不純物のピックアップ抑制を図った。Table 3 に除去作業を実施した回収廃レンガと原レンガの成分値比較を示す。スラグ成分であるSiO₂、Fe₂O₃、CaOの増加は若干認められるが、回収廃レンガのレベルとしては非常に良好であり、除去作業の効果が大きいと考えられる。

除去作業を実施しても不純物の完全除去は不可能であるため、廃レンガの混入比率を制限することが再生レンガを製作する上のポイントとなると考えられる。そのため、廃レンガ比率が諸特性に及ぼす影響を調査するべく、ラボテストでその影響を検証した。

- ・耐食性への影響：Fig.8 に廃レンガ混入比率と溶損指数の関係について示す。廃レンガ比率を増加するに従って溶損指数は急増する傾向にある。これは、廃レンガ中の不純物の影響と考えられる。
- ・耐酸化性への影響：Fig.9 に廃レンガ混入比率と脱炭指数の関係について示す。耐食性とは逆に耐酸化性は廃レンガ混入比率に伴って向上する傾向にある。この現象は、廃レンガ中に未反応の酸化防止材が残留しており、廃レンガ混入に伴って酸化防止材の絶対量が増加するためと推定される。
- ・残存膨張への影響：Fig.10に廃レンガ混入比率と残存膨張率の関係について示す。廃レンガ混入比率が増加するに従い残存膨張が低下する傾向がある。この現象は、廃レンガが既に熱膨張履歴を受け変化しているためと考えられる。

以上の結果から、廃レンガ混入比率は10～20%程度に抑えるのが適していると考えられるため、実鍋にて10%混合品、及び20%混合品（どちらもAl₂O₃-MgO-Cレンガ）使用テストにより評価した。湯当り部に10%混合品を、非湯当り部に20%混合品を施工した結果、新品レンガと比較して溶損は同等であることが判明した。

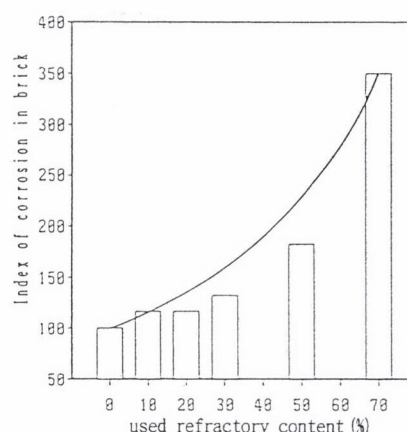


Fig. 8. Influence of used refractory content on corrosion.

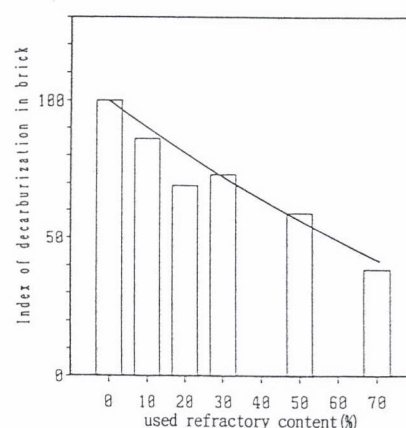


Fig. 9. Influence of used refractory content on decarburization of brick.

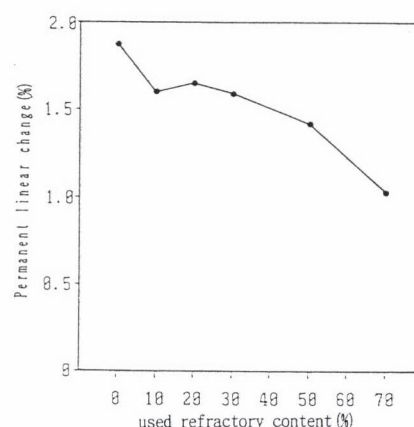


Fig. 10. Influence of used refractory content on permanent linear change.

Table 4 に再生レンガ使用状況を示す。取鍋への用途に限らず、電炉スラグライン、及びRH下部槽レンガへの適用も実施・拡大中である。

Table 4. Result of reformed brick application in Chita Plant.

I t e m	A r e a	C o n t e n t (%)	
		Recycle material	New material
MgO-C brick (Unburned)	Slagline in EAF	90%	10%
MgO brick (Burned)	Metalline in EAF	85%	15%
MgO-Cr ₂ O ₃ brick (Burned)	Bottom vessel in RH	100%	0%
Al ₂ O ₃ -MgO-C brick (Unburned)	Metal line in ladle	20%	80%

3. 結言

当社知多工場で発生する廃レンガの発生量は10kt/年にも及び、その発生量の低減を目的に、使用済み耐火物再利用技術開発を行ってきた。その結果、現在ではトータル45%のリサイクル率を実現するまでにいたっている。(Table 5)

今後、再生レンガ使用拡大、及び廃レンガを使用した不定形吹付材開発を推進し、さらなるリサイクル比率の向上を図っていく所存である。

Table 5. Result of used refractory application in Chita Plant.

	Material	Structural ratio used refractory (%)	Ratio of recycled refractory (%)	Application
E A F	MgO-C	1	1	MgO-C reformed brick
	MgO	1	1	MgO-reformed brick plug material of tap hole in EBT
	高Al ₂ O ₃	1	1	Plug material of tap hole in EBT
Ladle	MgO-C	10	6	Flux in LF, Castable
	AMC	16	11	Flux in LF, Castable
	MgO-Cr ₂ O ₃	10	9	Plug material of tap hole in EBT
R H	高Al ₂ O ₃	11	8	Plug material of tap hole in EBT Flux, Castable
	MgO-CaO	1	1	Repairing material for bottom in EAF
A O D	Porous plug	0.5	0.5	Castable
	S/Nplate	3	3	Reformed sliding nozzle
Tundish	MgO gunning	11.5	3	Flux in LF
	Long nozzle	1	0.5	Flux in LF
Others	Others	33	0	—
Index of total amount		100	45	—

鉄-21世紀への夢

創立80周年記念懸賞作文入賞作品紹介 ⑤

日本鉄鋼協会では、創立80周年を記念して平成7年度に懸賞論文を募集しました。全国から寄せられた第1部（中学・高校生の部）195編、第2部（大学生・一般の部）187編のうち、選ばれた入賞作品について順次掲載します。

第1部 3等賞

カイロにみる鉄の未来

吉祥女子高等学校3年

水野 亜紀

朝、目覚めると空気がひんやりしていて布団から出るのが億劫になる頃、私の家ではいつも玄関にまとめ買いした使い捨ての携帯用カイロを積んで置いておきます。それを見ると、また冬がやってくるんだと厳しい寒さを思いうかべて少し気持ちがひきまります。小学生くらいの時は冬でも外で遊び回っていたのでカイロは子供達にとって冬の必需品でした。初めてカイロの存在を知ったのは、ちごんまりしたスーパーを経営している家の友達の家で遊んだ日の帰り際に、

「また来てね。これおみやげ。」

とその子がくれた時だったことは鮮明に今でも覚えています。幼な心にとて嬉しくて、あたたかい気持ちで満たされながら家に帰りましたが、しばらくするとだんだん冷たくなってきてしまってそれは昨日までパンパンに膨らんでいた風船が今日になってもうくたばったと言わんばかりにしぼんでしまった時のような淋しさを感じさせるものでした。実際携帯用のカイロが発売されたのは15年くらい前ですが、それが一般の人々の間で爆発的に売ってきた頃が10年くらい前だったわけです。現在では貼るタイプのもや、座布団型のもまで売られています。手を加えなければひんやり冷たいのに、シャカシャカと音をたてて振ると、手で握っているのもためらわれる程熱くなります。中を開けてその正体が何であるか知りたいという衝動にかられないではいられません。

その正体は何か新種の物体かと思ってしまうのですが、案外身近で、私達にとってはなじみの深い鉄であることに焦点をあててみたいと思います。冷たいものが熱くなるこの反応の説明は化学式で表すと一目瞭然で、

$$\text{Fe} + 3/4 \text{O}_2 + 3/2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + 96\text{Kcal/mol}$$
となります。簡単に言えば鉄(Fe)と酸素(O₂)が化学反応をおこした結果として水酸化第二鉄(Fe(OH)₃)が生じる、つまり酸化です。日常生活で使う鉄に釘がありますが、少し放っておくだけで、赤茶色く錆びてしまうことがよくあります。あの錆びるという現象は、化学的な専門用語で言うところの酸化しているということです。その錆びることを人間が意図的にスピードを早め普通なら徐々に熱を放出させるところを一気に外に発熱させるわけです。そのスピードを早めるために鉄板ではなく鉄粉を用いて空気に触れる面積をぐっと大きくしています。その他、酸化を早める為に塩を混ぜたり、空気中の酸素を吸着する活性炭を混ぜているのですがこれらは鉄と酸素が

反応することを促進させるという目的のもとでなされているわけです。大ヒット商品としての売上げも素晴らしいものですが、着目したいのは普段では鉄の短所としかみなされない錆びるという現象を、その化学反応に伴う発熱を利用することによって鉄の長所に逆転させてしまったということです。一人の人間に長・短所があるように、鉄の長所は金属の中では比較的安いこと、安全であることなどがあげられ短所としては重い、錆びるといったことなどがあげられます。しかしカイロに関しては重さは粉にすることによって、錆びは逆にそのエネルギーを利用することによって短所ではなくなっています。人間関係において、他人の欠点ばかり探しているとその人の長所が見えなくなったり、第一印象にとらわれてその人が本当はどのような人なのか知らなかったりすることがよくあります。そういったことはほとんど無意識に行われるのですが、鉄に関してもそのことがあてはまっていると思います。鉄が錆びるとそれを掃除するのも億劫になりがちです。また以前クリーニングの店の人が衣服につくよごれで落ちにくいのは果物の汁と錆びなんですよ、と言っていました。このように錆びは私達にとってマイナスイメージでとらえられています。このような状態の中で錆びを酸化ととらえることで90度思考を転換させ、その酸化の際に放出される熱を利用することでまた90度転換させ結果として短所が長所へと180度鉄に対する考え方を逆転していることになります。灯台もと暗し、と言いますが日常生活を送る中でよく起こることに限って先入観にとらわれてしまうものです。

鉄が酸化するという現象が化学式で表すことができる程明らかな事実であるように、私達の身の回りでは化学的に証明できるものが大部分を占めているし電気や通信といった大規模な発明もつくられているような気がして、少し退屈に思ってしまうのが現代の特徴ではないでしょうか。あとほんの数分で21世紀になるわけですが私達は誰にでも明らかな現象や発明された物に一ひねり加えて全く別の利用法を考えていく時代になるのではないかと思います。現在市販されている携帯用のカイロはその先駆けとなっているものだと思います。鉄という金属を初めて発見した時のような性質のとらえ方には本当に感心してしまいます。

現在使われているカイロにも、もう一つ未来に向けて考えなければならない問題が残されています。それは使い捨てされている

ことです。もともとカイロは漢字で懐炉と書き、石を温めて使っていたわけですから一回使ったらそれきりという物ではありませんでした。カイロの中には鉄だけが含まれているのではないしゴミを出す際にカイロだけ別に集めているわけではないので今のところリサイクルはされていません。しかし私の家にもある座布団型のカイロは相当な大きさでこれが使い捨てられていると思うと複雑な心境になります。しかし鉄という大きな範囲では実際鉄くずが集められ、電気炉精錬業者に持ちこまれ鉄筋コンクリート用の棒鋼などにリサイクルされています。私達が日常よく使うものでは自動車や自転車、スチール缶などの鉄がありますがりサイクルする際に鉄以外の不純物が混ざると上質の鉄にはなりません。しかし今では磁選機という巨大な磁石を使って鉄と他のゴミをあらかじめ分別してリサイクルするという方法があります。ただその磁選機を使う為にコストがかかるという理由で普及がおくれているようです。駅前などでは放置自転車をたくさん見かけますが私の住んでいる東京都練馬区では、自転車商業組合が処分原価400円で店頭の引き取りを行っており、回収トラックが運んでいきます。このように少しづつではありますが鉄がりリサイクルされていることを実感します。鉄の選別を行う磁選機の普及、これが今後

の課題と言えるでしょう。またカイロの話題に戻りますが使い捨てという面ではアキ缶も使い捨てが当たり前だったわけですから、同じくリサイクルの対象になっても不思議ではないと思います。

数々のアイデア商品が発売され、私達の生活も便利で快適なものとなってきました。しかし地球の資源は私達が考えているよりもずっと限られていて少ないものです。使い捨ての携帯用カイロは鉄の利用法の幅をぐっと広げる発明品であると共に貴重な資源の使い方の問題を提起する商品と言えます。なくなったら地球から資源を取り出すのではなく、一回使った資源を再生することにこれからの時代は重点が置かれるべきでしょう。地球上の水分は海から蒸発して空に上がり雨として降り川に流れまた海に戻ると言いますが、高まる環境保護運動の中で鉄もそのように再生するしくみを整えることによってカイロのような鉄の性質を生かす商品の将来が更に明るいものになると思います。カイロの熱で体があたたまるとほっと安心するような気持ちになりますが、地球ともそのようなあたたかい気持ちで接したいものです。

参考文献

井上勝也『錯をめぐる話題』(裳華房)

第1部 3等賞

鉄への夢

岐阜県大垣市立北中学校2年

森 宏文

21世紀になると、今よりもっと鉄の利用がさかんになると思います。

普通の住宅なども、鉄でできたものが多くなると思います。木造の、それも木、独特の風情のある家が少なくなるかもしれません。だから、一見すると木造のように見えるような質感、色調などがある鉄があればいいと思います。さらに、強度を極限まで上げ、振動も極限まで少なくなれば、地震がきても、倒れないと思います。そんな防災対策の家が、21世紀には要求されるのではないのでしょうか。

また、道路などを鉄にしてみるのもいいと思います。そして、車がブレーキをふむと、タイヤにすごく強い磁力が発生し、すぐに止まれるようになるはずで。そうすれば、交通事故の防止にかなり役立つはずで。スピードが出すぎると、自動的に磁力が発生し、スピードをおさえられるようになると思います。

完全防音の鉄があればいいと思います。そうすると、車、電車、そして飛行機などの騒音がかなり減ると思います。もっといろいろな物、例えば、電動の鉛筆けずりなどに使用すれば、うるさい雑音がすくなくなると思います。

鉄がさらに軽く、いろいろな色に変えられることになると、紙のかわりに鉄が使えるようになるかもしれません。しかし、かなり軽くうすくならなければなりません。しかし、もしもそういう

技術ができるようになったら、ぜひ実現してほしいと思います。そうすれば、紙の材料だった木の減少をストップできていいと思います。さらに、鉄が紙のかわりになれば、とても丈夫で、紙のようにたやすく破れたりもしないと思います。重要なことをかいた紙も破れたりしなくてとても役に立つはずで。

鉄も、透明、あるいは半透明になるようになれば、建物の窓ガラスが鉄になるかもしれません。しかし、そうなると、ガラスのように割れることがないので、これも地震の対策として役に立つことができると思います。21世紀になると、より強度がたかく、災害時の被害が少なくなるようなものが注目されると思うので、とてもよいと思います。

また、熱の伝達が調整できるようになれば鉄の住宅はもっとよくなると思います。それは、夏は床や壁などの熱をなくすようにすれば、床や壁が冷たくなり、寝ころがると、ひんやりしてとても気持ちがいいと思います。逆に冬などは、熱を上げると、あたたかくなり、スリッパなしで歩いたとしても、冷たなくていいと思います。さらに、電気カーペットのような役割まで果たしてくれると思うので、快適な居住空間が作れるはずで。

建物で、あるスイッチを押すと、小さな範囲に磁気を与えることができるようになると、鉄を装着した掃除機がひきよせられて、その通った道を掃除してくれるれば、楽になると思います。また、

ちょっとしたことで倒れそうな物や、落とすとやっかいな花びんなどに鉄を装着し、固定しておけば、倒れたり、落ちたりしなくてすんで、とてもいいと思います。これから、よりいっそう機械化がすすんでくれば、もっともっと役に立つ利用法が見つかるかもしれません。

鉄が、スプレーのようにすぐ細かくわかれることができるようになって、特有の、臭いがなくなり、透明になればとも思います。それは、服や靴などにつけると、鉄は水分を吸収しないので、防水効果が得られるようになるかもしれません。雨などが降って

いる時に、このスプレーを服にふきかけることによって、防水効果で、服がびしょびしょになることはないと思うし、もし汁物や飲み物をこぼしてしまっても、防水なので、あわてることがないと思います。

将来、鉄に、いろいろな機能が与えられるようになれば、多くの用途で活躍が期待できるし、それをさらに発展、応用し、より複雑な機能を持たせることによって、鉄のさらなる飛躍が期待できると思い、少しでも実現できればと望みます。

第2部 3等賞

西暦2045年秋—夢のあとさき

神奈川県横浜市

遠山 晃

ランドマークから見る横浜の朝の光景に、少しの目映さを感じながら亮はコーヒーを口に運んだ。昨日はこのラウンジの下にあるホテルで孫の結婚式に出席し、その疲れもあってか早めにベッドに入ったため普段より目覚めがよかった。月曜日の朝でまばらな客席の、ベイブリッジが見おろせる窓側に座っていた亮の席に一人の女の子が駆け寄って来た。

「おはよう。おおじいちゃん。」

曾孫の久美子である。

「ああ、おはよう。お父さんやお母さんはどうしたんだい。」

「まだ寝てる。おばあちゃんが、ラウンジにきつとおおじいちゃんがいるから見てきてごらん、といってたから。」

久美子のおばあちゃん、即ち、亮の長女の彩子はさすがに長い間の父の習慣が分かるのだろう。

「昨日の結婚式、おもしろかったね。慶一おじさん、いつもよりずっとかっこよかった。でも鉄鋼会社の人って歌もうまいし、手品もやるし、全然イメージと違う。」

「久美ちゃんは、もともとどんなイメージがあったんだい。おおじいちゃんだって、昔は鉄鋼会社で働いていたんだよ。」

「うん。それは、おばあちゃんから聞いているわ。おおじいちゃんは、あそこに見える製鉄所の研究所にいたんでしょ。」

ベイブリッジから鶴見つばさ橋を繋ぐ首都高速湾岸線が、緑に覆われた島を通過していた。亮がかつてそこに勤めていた頃、威風堂々と林立していた2本の高炉も今は無い。代わりに緑の屋根の下で溶融還元炉が静かに真っ赤な銹鉄を供給している。退職してもう28年にもなろうとしていたが、亮の目には今でも黒くそびえ立つ高炉と赤い熱延工場の屋根がくっきりと見えるのである。

「学校の社会科で、日本の産業はもう習ったのかい。久美ちゃんのお父さんが働いている銀行は商業に入るんだよ。」

「それは、もう習ったの。今ちょうど工業を習っているところ。でもおおじいちゃん。工業や農業って昔はもっと盛んだったんでしょ。今は、労働人口の7割はMOS産業なのよ。」

MOS産業、即ち、M…Moneyを扱う、O…Officeのみで働く、S…Serviceを扱う、その昔は第3次産業といったものだったが、いつの頃からか三番目の産業という言い方に反発したのだろう、すっかり呼称が変わってしまった。

「それは、国内だけを見ているからだ。工業も農業も海外に出て立派に仕事をしているんじゃない。例えば、ほら、昨日の慶一だって新婚旅行から帰ればすぐにオーストラリア行きだ。慶一の新N製鉄会社の主力工場は、メルボルンの近くだろ。」

「ああ、そんな説明の仕方じゃ、久美ちゃんがぼかんとしているじゃない。もっと、順を追って分かりやすく、説明してあげなくちゃ。」

妻の友子が、亮の横の椅子に座りながらいつもののんびりとした口調で小言を言った。もうとうに金婚式も過ぎて結婚64年を経っていたが、昔からせっかちな亮とのんびりした友子の性格は変わらない。

「久美ちゃん。何か食べる。クロワッサンでもいただきますよ。…あ、ボーイさん、このモーニングAセットを3つで、飲物はオレンジジュース、ドレッシングはフレンチでいいわ。」

「工業も農業も昔は、そうつい3、40年前までは、国内でも盛んに生産をしていたんじゃないよ。…」

友子が、朝食を注文している間にも、亮は曾孫娘の久美子に説明を始めていた。既に88歳になった亮夫婦には、2人の娘夫婦と、4人の孫、6人の曾孫がいたが、何と言ってもこの久美子が亮の大的お気に入りであった。それというのも、初の曾孫であったことに加え、その性格が、祖母の彩子よりもむしろ彩子の妹である好子にそっくりであったからである。亮は自分とは全く異なり、社交的で人懐っこい好子を気に入っていたので、顔立ちが彩子に似て、性格が好子に似ている久美子が大好きであった。

「ところが日本の国のお金が外国のお金に比べて価値がどんどん上がってしまって、日本で作って外国に持って行っても売れなくなってしまった。例えば、鉄もおおじいちゃんが久美ちゃんのお

父さんと同じ年の頃は、車2台分約1トンの鉄が10万円だった。アメリカに売るとそれが千ドルだったのに、今では7千ドルにもなる。これでは、外国の人は日本の製品が買えなくなる。いや逆に日本の人も外国の製品を買った方が安くて得になってきた。だからまず衣類や電気製品といった会社から海外に工場を作って、そこで出来た製品を日本に持ってきて売ようになった。自動車も2、30年前からそうするようになってしまった。ところが、鉄鋼会社はそう簡単には海外にいけなかった。」

「どうして。だって、海外には高くて売れず、日本では、鉄を使う工場がどんどんなくなっていったんでしょ。」

遠慮がなくまた実に適切な質問にあい、目を細めながら亮は話を続けた。

「製鉄所は、簡単には作れない。とてつもない広い土地と港と水と電気と働く人とが必要なんじゃよ。しかし久美ちゃんの言うようにお客さんが海外に行ってしまったんではついて行かざるをえない。そこで思い切った国際協力によるグローバルな製鉄所ができたんじゃ。」

「知ってる。慶一おじさんの新N製鉄会社のことでしょう。」

亮は、20年前の新N製鉄会社の発足の事を昨日のこのように覚えている。規模を縮小しながらも6社体制を続けてきた国内鉄鋼会社の最初にして最後の大英断により、日韓中豪の4カ国にまたがる大製鉄会社が発足し、拠点の製鉄所を、中国の上海近郊と、豪州のメルボルン近郊に建設したのであった。

「でも、まだ国内の製鉄所は止まっていないわ。生産量は勿論その国際会社に負けているけど、それでも去年は3千万トンと2年ぶりにまた上回ったって習ったの。どうしてなのかしら。」

「そう、そこが大切なところなんじゃよ。」

フルーツの桜桃をおいしそうに頬張る久美子を見つめながら亮の脳裏には50年も昔の研究所時代の思い出がまざまざとよみがえってきた。

「鉄は、人類が最初に手に入れた宝物だった。それまでは石をけずったり土を固めたりして獵をしたり土器を使ったりしていたのが石器時代だが、鉄を手にした人類は急速に文明社会を築いていった…」

いきなり人類の歴史の解説が始まったので久美子は少し不思議そうな顔をしたが、それでもおとなしく話に耳を傾けた。

「それ以来、鉄と人類とのつきあいは何千年にもなる。特に高炉が発明されて以降の進歩は、近代の幕開けを担ってきた。大航海時代にしても、蒸気機関にしても、モーターゼーションにしてもいつも土台を支えていたのは鉄鋼なんだよ。日本で関ヶ原の戦いをやっている頃、既にヨーロッパでは、小さいながらも高炉が作られていたんだよ。」

「その後、製鋼法といって、脆い鉄から強靱な鋼にする平炉とか転炉とかいったもんが発明されて20世紀は大きな高炉が世界中にたくさん作られたものだった。おおじいちゃんが久美ちゃんの年の頃は、鉄は産業の米と呼ばれていたし、国民一人当たりの鉄の消費量がその国の文化の育成度を表すパラメーターといわれたも

のじゃった。」

今日も天気は良いのだろう。朝方東京方向に少し見られた霞がかった雲も今は無く、横浜港内は波も穏やかにその活動を始めようとしていた。昨日の慶一の結婚式を最も楽しみにしていたのも他ならない亮であった。娘2人の婿や孫4人も含めて亮と同じように工学部を出たのも、まして鉄鋼会社に就職したのも慶一だけだったのである。

「ちょうどおおじいちゃんが、久美ちゃんのお父さんと同じ年の頃から段々と様子が変わり始めた。」

「さっきもそれは話したんじゃない。円が高くなってきたからなんでしょう。」

友子が口をはさんだ。

「もちろんそれもある。しかし、半導体が鉄に変わって産業の米といわれだし、鉄鋼、造船、重機械などが重厚長大産業なんて言われ、かたや半導体、電気・電子が軽薄短小産業ともてはやされた頃なんじゃ。久美ちゃんのおばあちゃんが小学校のころ、社会の勉強を見てやると教科書にもそう書いてある。まったく、その頃の風潮が、鉄鋼は成熟産業だなんて烙印を押してしまったものだから、若い人もあまり入ってこなくなってしまった。」

友子も50年前を思い出していた。あの頃は首都圏では中学入試が大変だった。彩子や好子にいろいろと教えていた頃がなつかしく思い出される。彩子はそれでも社会に異常に興味を示し、製鉄所の位置や鉄鋼石等の輸入先をいっぺんで覚えたものだったが、好子はなかなか覚えようとせず、たまに車で湾岸線を通り父親の勤める製鉄所の真上を通った時でも、沖合いに浮かぶ原料運搬船よりも羽田から飛び立ったジャンボ機を視線は追っていたものである。

「初めのうちは、いろんな事をやった。鉄以外で何か儲かることはないとか、少ない人数で工場を動かす工夫も必死でやったものだった。でもそのうちだんだんと分かってきた。何も世の中に迎合する必要なか無いんじゃないかと。成熟産業なんて言われているけど本当なんだろうか、と。」

「鉄の時代は本当にもう終わりなんだろうか。何千年も鉄に取って代わる材料は出てこなかった。今でもまだ出てきていないのに何で鉄の時代が終わってしまうのだろうか。何かやり残していることがあるんじゃないだろうか。」

ラウンジにも少しだが人が増えてきた。亮達のテーブルの横には、久美子の父親である健介をはじめ、孫夫婦達がだんだんと揃ってきていた。普段は減多に顔を合わせる事もない親族同士であり、話題はつきる事もなく話しは弾んでいるようである。その輪の中でも、昨日の結婚式の主役であった慶一の母親、即ち亮夫婦の次女である好子は、やはり話しの中心をしめているようであり、友子も時々そちらのテーブルをほほえましそうに眺めるのであった。

しかし、久美子はやはりおおじいちゃんがお気に入りだけあって、そちらには目もくれず、話しに聞き入っていた。

「そして始まったのが“鉄—再発見時代”なんじゃ。」

「鉄は昔から進歩してきた。その頃でも自動車用鋼板は0.1mmという薄さであったし、建築用でも高張力鋼があった。ステンレス鋼も何十種類と区分されていて用途に応じて使い分けられていた。もうそれ以上の進歩は新金属に託すしかないのではないか、と思っていたりしたのを、逆に鉄はまだ未発見なんだ、と。ちょうど、北極の氷山と一緒に、我々がこれまで見ていたのは海の上に出ているほんのちょっとした部分なんだ、と。今からは、海の下に隠れている部分を発見してやらなくては、せっかくこの地球上に与えられている貴重な資源である鉄に申し訳ないじゃないか、と。」

「ふーん。誰がそんなことを思ったの。」

「日本の鉄鋼会社だけでなく、世界中の鉄鋼会社に勤めていた人みんながそう思ったんじゃない。最も、いち早くそう感じて鉄そのものの研究に舞い戻ったのは日本が圧倒的にはやかったんだが。」

「でも、わかんない。だって、鉄が金やダイヤモンドに化けたりするはずないし、お金にもなっていないし。」

亮の説明にも納得できかねる顔をした久美子は、こっそりと曾祖母の友子や祖母の彩子の顔を見てみた。二人ともまるでもう何度でもこの話を聞いているかのように、驚いている様子もなく、かといって、あきれた様子もみせていない。『パパの話しよりもおもしろそう。』

心の中で、久美子は父親の健介がいつも家で、母や久美子それに弟の啓太に話してくれる海外の珍しい品物の事を考えていた。久美子の父は、商社で海外の装飾品を中心に輸入する仕事をしていたのである。

「はっはっは。再発明といっても、鉄は鉄に変わりはないさ。まして、誰も普段は気に止めていないところに隠れているからね。例えば、久美子ちゃんは、筑波エキスポタワーに行った事あるかい。」

「うん。今年の春休みに行ったわ。びっくりしちゃった。だって、この横浜ランドマークタワーの3倍も高いんですもの。」

「あのタワーはその昔に筑波で開かれた科学博覧会の70周年記念に開かれた科学文化博覧会の目玉事業だったからね。何と言っても、230階建ての超超高層ビルで、世界一ののっぽビルになったんだね。でもそのビルに使われている鉄骨は何とほぼこのランドマークタワーと同じ量なんだよ。」

「えーっ。何で。だってこのビルよりも3倍も高いし、広さも少しだけあちらの方が広いような気がする。」

「正確に言うと、使われている鉄骨の重さが同じなんだ。しかし、もちろん長さはあちらが圧倒的に長い。つまり、あちらのビルに使われている鉄骨は、薄いんだ。薄いけど強いしねばい。だから鉄骨を積み重ねても、重くならないので高くできる。薄いので壁も薄くなり、床も広くなる。」

「地震にも強いって話しね。」

時々横から友子が口を挟むのも昔から一向に変わりはない。

「それは、制振性能といって揺れを吸収してしまう性能を付与したためなんじゃが、それに加えて、最近の超超高層ビルは必ず地

下数百メートル、場合によっては、1キロ以上のところにある岩盤まで、鉄杭を打ち込んでからその上に作らなくてはいけなくなっていて、だから地震にも強くなったんじゃないよ。もちろん、その地下深くまで打ち込む鉄杭も開発された高強度で耐食性の高い鋼管がなければ、無理な話しだったけどなあ。」

「制振性能って、冷蔵庫とか洗濯機にも使われているんでしょ。」

「久美ちゃんは、いろんなことを知っているなあ。そう、その制振性能はもう何十年も前からいろいろな所で必要になってきた。洗濯機も昔はうるさくて夜中に洗濯なんてできなかったんだけど、今では、いつ終わったのかが分からないほど静かになった。でもこの技術が最も役だっているのが、レールなんだよ。鉄道のレールに使われている一種の形鋼の改良が、騒音問題を解決してしかもスピードアップの決め手になった。昔はのぞみ号でも東京から博多まで5時間以上もかかったんだが、今では3時間しかかからなくなったんだからのう。」

「乗り物は随分と進歩したんでしょ。最近は交通事故死も減ってきているのよ。」

「毎年1万人以上が命を落としていたんだが、いまでは2〜3千人になっているね。自動車の設計も変わってきたのもあるけど、今の車の前後に使われているスーパースティールは、ある加速度以上の衝撃を受けると、その衝撃を吸収してしまい、一瞬に変形してしまう。だから、人にぶつかっても大抵のスピード以下なら、車の前が収縮してしまうだけでドライバーも歩行者も大けがをしなくなった。しかも、その加速度以下の荷重には十分な耐力を持っているから、衝突しないかぎり問題が無い。横のドアは高張力薄板なので、ぶつけられても多少へこむだけなんだ。でも、それでもまだ無謀運転をする者を守る事はできない。スピードさえ無茶に出さなければ、もっと事故もすくなくなるはずなんじゃが。」

「それで、何で国内の鉄鋼生産量が減ったのかしら。こんなに超超高層ビルも自動車も増えているのに。」

「国内では、もうそういった鉄の機能性の研究と試作しかやっていないからだよ。ほら、例えばあそこにおおじいちゃんの昔いた製鉄所が見えるだろ。あそこは、今は電力用鉄鋼研究所になっている。自動車用鉄鋼研究所は、この湾を挟んだ向かいの千葉だし、さっきの建築用は、神戸に研究所がある。国内では、開発研究とそれに伴う試作品の製作をし、ある量までの生産もする。でも本格的に必要なになってきたら、さっき言ったような、海外の大製鉄所に技術移管していい物を安く作るようにしているんじゃない。だから、国内の粗鋼生産量がまた3千トンを超えたというのは、ますます研究開発が活発化している兆しであり、喜ばしいことなんだよ。」

かつて1億トンを超えていた日本の粗鋼生産量を誇りにしていた亮の世代にも、最近の国内製鉄所、いやむしろ製鉄研究所の生産量に対する物足りなさはじょじょに薄れはじめ、変わりにその役割の重要性を認識するとともに新たな誇らしさを感じ始めているのであった。

「あそこの電力用鉄鋼研究所は、何をやっているの。鉄から電気を作るのはどうやればいいのか。」

「はっはっは。何も鉄鉱石から電気を取りだそうというのでは無いんじゃ。電気を作る設備に使われている鉄鋼材料、例えば発電機やモーター用の磁性を持った鉄鋼材料の効率向上をおこなったり、原子力発電用にウランやプルトニウムなどの放射性物質に長い間接していても劣化しない材料を開発している。また、ほらあそこのパイブリッジの向こうにきれいな建物が見えるだろう。」

「あれは、T電力の横浜火力発電所よ。春に社会科見学でいったわ。静かだし、周りが公園になっていて、バードチェアリーもあったし、でもびっくりしたのは、LNGっていう液体燃料を燃やしているボイラの中は、1,000度を超えているって、言ってたわ。」

「LNGや石炭を燃やす火力発電所も、今は数は減ったけれど、発電量は増えているんだ。それもいま、久美ちゃんが聞いているように、燃やす温度と圧力、ちょっと難しいかもしれないけど、その二つをあげてやると、電気を作るタービンを回す蒸気の温度と圧力もあがって発電効率が飛躍的に向上するんじゃ。今では90%を超えている発電所もある。50年前はせいぜい40%程度だったから、倍以上になった。原子力発電も増えたから、火力発電所の数は減ったけど、効率があがったから、発電量は増えていないし、二酸化炭素の排出量は、50年前よりも20%も減っているんじゃ。」

「この温度をあげることができるようになったのが、超耐熱鋼管の開発のためなんじゃ。クロムとかニッケルといった鉄と仲の良い金属の助けを少し借りて熱に対する強度も、熱伝導性も、水蒸気への酸化もしないすばらしい材料じゃ。」

「あっ。分かった。おおじいちゃんもその仕事をやっていたんでしょ。だってあそこの研究所にいたんだから。」

「そうだよ。最後の10年はその研究をやっていたよ。でもおおじいちゃんの頃はまだまだ鉄以外の金属に頼りすぎるところがあったなあ。」

友子と彩子はもう別の話をしているのだろう。口を挟む事もなくなっていた。久美子はそれでもまだまだ聞き足りないのか、目をそらそうとしない。

「鉄にこんなに優れた機能があったことがわかったのも、鉄鉱石からほとんど100%に近い超高純度の鉄が作れるようになったからなんだよ。まざりけの無い鉄は、ほんの僅かな不純物によって、熱に強くなったり、衝撃に対して変形して吸収したり、揺れを吸収したりすることができるようになったんだ。昔から、鉄は温度によっても姿を変える事が得意だった。だから、板を作る温度を変えてやればいろいろな強度の鋼板ができた。水をかけてやって急に冷やしてやったり、炉の中で、1日かけてゆっくりひやしてやったり、そのたびに性能が変わるから、ほんとにおもしろいもんじゃった。これに高純度化と微量元素のコントロールが可能になって加わってきたから、まさしく千変万化の世界じゃ。」

「電車の車両も軽くなって綺麗になった。昨日横浜から乗ったみなどみらい線も青と白の綺麗な色をしていたじゃろ。あれは、カラスステンレスで、1万色を超えて色がつくれる。久美ちゃんの学校の校舎の屋根や体育館も同じ色が使われているね。あの屋根はもちろん制振鋼だから、雨が降っても音がぜんぜんしない。校

庭のジャングルジムや鉄棒も錆びなくなった。夏でも熱くならないし、冬でも冷たくなならないから、いつでも遊べるだろう。」

「さっき話したけど、久美ちゃんのマンションも地震に強い構造になっているよ。冷蔵庫も洗濯機も流し台も、装飾にも鉄はいたるところでみかけるだろう。」

「そうね。いろんな色をして形もいろいろあるから、普段は全然気に付かないわね。」

「昔から、そういった物は鉄でできていたけど、軽く、錆びなく、カラフルで綺麗になって、温かみがでてきたから、ますます使われるようになったんじゃ。船も速くなった。横浜からでも、毎週末は九州、四国、北海道へ定期便がでていますが、高松でも僅かに5時間でいけるようになった。」

「久美子も今年のお盆のお墓参りは船でいったよ。高松はうどんがおいしいから、大好き。」

夏に久美子は祖父母、父母とともに四国旅行にいったのである。亮も誘われたのだが、最近身体も弱ってきたため、なかなか遠出が出来なかった。子供の頃を過ごした瀬戸内海の穏やかな海辺を思い起こしながら、窓の外の横浜港の活気ある船の行き来に目を落としていた。

「慶一おじさんも、やがては、日本の研究所に戻って来るって、昨日言ってたね。今度はどんな鉄を作ってくれるのかしら。」

「私も中学に入ったら、いっぱい勉強して、工学をやりたいなっちゃった。ふふ、でもまだまだ先ね。」

久美子の愛らしい声が亮の耳に心地よく聞こえている。はるか先の鶴見つばさ橋あたりに再びうすすらと霞がかかってきた。緑に覆われた製鉄所の敷地に忽然と大きな黒くどっしりと構えた溶鉱炉がそびえ立つのが亮の目にくっきりと入ってきた。

...

「加熱温度は1,225度、圧延機入り口は1,115度、出口は1,050度になっています。…」

「よし、二つ目のビレットも同じ条件でいこう。三つ目と四つ目は、加熱温度を20度あげるんだ。」

50年前の自分の姿が突然圧延工場の中に現れていた。見慣れた作業長や工長も横について圧延状況を見守っている。輻射熱により、ヘルメットの横から汗が滴り落ちるのを感じながらも、ふき取る時間さえ惜しむかのように圧延機の出口を注視していた。

『今からだ。今から新しい時代が始まるのだ。』

皆の熱い思いをうけて真っ赤に伸ばされたパイプが姿を現してきた。

...

「おおじいちゃん、ねえ、おおじいちゃん。どうしたの。おばあちゃん、おおじいちゃんが、返事してくれない。」

久美子の言葉にラウンジにいた皆が一斉にテーブルにかけよってきた。周囲のざわめきもう亮の耳には、遠く遠く薄れていっていた。2045年秋、横浜港の朝は何事もなかったかのように静かに澄み切った空気に包まれていた。

(NKK勤務)

第2部 3等賞

日本鉄鋼業の行方

神奈川県横浜市

簗手 徹

鉄鋼業に就職が内定した金属工学科の学生と、その指導教官の会話。

「先生、日本の鉄鋼メーカー、本当に大丈夫なんですか」

「大丈夫だよ。アメリカの鉄鋼会社だって一社もつぶれていないだろ」

この学生、現在は私の上司である。鉄に携わる人なら、私の上司の抱いた不安はよくわかるであろう。それに対して、教授の答え方は余りにも脳天気である。

私はこの教授に尋ねたい。アメリカ鉄鋼業とは一体何なのか。アメリカ鉄鋼業が衰退したといわれて久しいが、なぜそうってしまったのか。何気ない会話がきっかけとなって、私は日米鉄鋼業の歴史を調べ始めた。歴史は繰り返すという。アメリカを見れば日本鉄鋼業の21世紀が見えてくるはずである。

円高不況、バブル経済の崩壊と、鉄鋼業はその活力を失いつつあるようだ。このまま衰退してしまうのか。それをくい止める手だてはあるのか。私は鉄鋼研究者の端くれであるから、技術的な観点からこの問題を考えることにする。

アメリカ鉄鋼業の全盛期にさかのぼって話を始めよう。

第二次大戦でアメリカは大局を決する役割を果たしたわけだが、当時のアメリカの粗鋼生産量は年間8,000万トンを超え、世界の過半量を生産していた。第二位のドイツが2,000万トン、日本の生産量は、最大の年でもアメリカの10%に達しない765万トン（1943年）に過ぎない。

しかも、日本は鉄鋼生産そのものをアメリカに依存していた。平炉を使用していた当時は、「鉄くず四分六」といって鉄鉄4、スクラップ6の割合が最も品質が良いとされていた。スクラップの発生量が少なかった当時の日本では、スクラップの絶対量が足りない。アメリカから大量のスクラップを輸入していたのだ。アメリカが日本にはスクラップを売らないといえ、それは即、生産の危機を意味したのである。

軍需物質の要である鉄鋼について、日本の政治家がこの状況を把握していなかったはずはないのだが、軍部の暴走もあり、戦争に向かって邁進してしまった。こっけいというほかない。

終戦直後、GHQに提出した統計データが大幅に間違っていたことをマッカーサー元帥に指摘された吉田茂首相は、「だから、今度の戦争では負けたのですよ。もし、統計がちゃんとしていたら、この戦争、どっちがどっちになったか、わかりませんでしたぞ」と応酬したという。少し脱線してしまったが、要するに日米鉄鋼業にはこれだけの力の差があったのである。

第二次大戦終了後も、アメリカ鉄鋼業には追い風が吹いた。

1950年に朝鮮戦争が勃発し、軍事需要が発生したのである。

アメリカ政府は、軍用資材の確保とインフレの抑制のために、投資を促進して生産力を拡大しようとした。加速償却制度や軍事産業への低利融資などがそれである。鉄鋼業もこの機会をとらえて投資に踏み切った。しかし、この投資はあくまで朝鮮戦争に対応したものであり、即効性が求められた。新しい技術を導入する冒険は許されず、確立された技術による確実な生産力の拡張が必要だったのである。結局、最先端技術であった純酸素上吹き転炉（LD転炉）の導入は見送られ、平炉の増設が行われた。この当時建設された設備は、生まれたとたんに時代遅れになる運命にあったのである。

アメリカ鉄鋼業は絶好調であったが、後から振り返ると致命的ともいえる過ちを犯してしまった。LD転炉の導入が大幅に遅れてしまったのである。

平炉とLD転炉は製鋼工程における主役である。製鋼工程では、高炉で作られた鉄鉄、あるいはスクラップを溶解して、炭素やマンガンといった鉄鋼材料に必要な成分の調整を行い、燐や硫黄などの有害な成分を取り除く。製鋼のできいかで銅板や銅管を作る下工程は大きく影響を受けてしまう。圧延中に板が割れてしまったり、できあがった製品の強度や靱性が要求される性能に達しないといったことが起こる。

製鋼技術の差はそのまま鉄鋼会社の技術力の差になって現れる。「製鋼屋さん」と呼ばれる製鋼の技術者は、他の工程に比べて出世する可能性が高い。製鋼工程は非常に重要なのだ。

難しい技術的な話はなるべく抜きにして、LD転炉を平炉と比較してみる。

まず、生産性であるが、精錬時間は平炉の7～8時間に対して、LD転炉の方はわずか20分ほどである。製鋼炉1基が1時間あたりに製造する鋼の量で比較すると、LD転炉は平炉の6～8倍に達する。工場というところは、生産ラインを1分止めると損失がいくらかという厳しい世界である。製鋼工場の連続鑄造機が1日停止すると1億円の損害がでるという話を、私は聞いたことがある。生産性ひとつとってもLD転炉がいかに優れているかがわかる。

原料の問題も製造現場では重要である。製鋼工程の原料は、鉄鉄とスクラップである。このふたつの混合比率は、どちらが安価に入手できるか、あるいは能率や製造コスト、品質に与える影響などを考慮して決められる。

平炉法は、スクラップの配合率が0～100%の範囲で操業が可能であり、非常に融通が利く。一方のLD転炉では、スクラップの配合比は高々30%までであり、平炉ほどの自由度はない。

鉄鋼生産量が増加すると、スクラップの供給量が不足し始め、価格変動が生じやすくなってきた。安定的に原料を得るには、自社の高炉で製造した鉄鉄を用いるのが最もよいということになった。原料の主体は溶鉄となり、これに自社内で発生する15%程度のスクラップが加えられた。

高炉を持つ一貫メーカーにとって、平炉の融通性は必ずしも長所ではなくなってしまった。残ったのは市中のスクラップであるが、スクラップ溶解においても、平炉は電気炉にその役割を譲っていた。

他にも、LD転炉の利点はたくさんある。平炉では精錬に必要なエネルギーを、外から与えてやらなければならないが、LD転炉では吹き込んだ酸素と溶鋼中の炭素が反応して燃えるおかげで、熱を加える必要はない。これだけでもコストが下がる。建築費についても、立地条件が同じならば、LD転炉の工場は平炉工場の60～70%ですむといわれていた。さらに、LD転炉は工場の敷地も小さく、操業に必要な人数も少ない。品質についても、LD転炉は平炉に比べて遜色があるわけではなく、むしろ有利な点がたくさんある。いいことづくめのLD転炉であった。

日本における製鋼法もかつては平炉が主体であった。戦後、日本鋼管（現NKK）はトーマス転炉法を再開したが、いろいろな問題をかかえていた。

1950年代に入って、トーマス転炉に吹き込む空気中の酸素の比率を増やせば良好な性能が得られることが明らかになってきた。また、工業用酸素の量産装置が実用化され、1952年から53年にかけて、オーストリアでLD転炉の試験操業が行われた。

日本鋼管はいよいよ実用化が近いとみて、早くも1956年にはLD転炉法の技術導入契約を結んだ。そして、57年に八幡製鉄所に、ついで58年には日本鋼管に、相次いでLD転炉が稼働した。

実用化のメドがたってからわずか数年で、日本は海の物とも山の物ともつかなかったLD転炉を稼働させたのである。これはまことに慧眼であって、日本鉄鋼業に大きな幸運をもたらしたことは、その後の歴史が証明している。日本は戦争に破壊されてすべてを失ってしまったが、だからこそ新しい技術をためらうことなく導入することができたのではないだろうか。

LD転炉は急速に平炉を駆逐し、日本では1971年に、平炉はその姿を消した。LD転炉の導入が遅れたアメリカで平炉の火が消えたのは、日本に遅れること20年、実に1991年のことである。この間の1980年、ついに日本の粗鋼生産量はアメリカを抜いて自由社会で一位になった。

アメリカにとっては、平炉があまりにも発達していたことが、かえって裏目にでてしまった。成功体験に溺れて社会の状況が変化していることに気付かず、以前と同じようにやろうとして失敗することは、よくあることである。アメリカ鉄鋼業を成功させてきた平炉は、いつまでも甘い汁をすわせてはくれなかった。

LD転炉導入の失敗を皮切りに、アメリカ鉄鋼業の技術力は衰退していく。技術を使う「人」にも問題があったからである。

業界を先導する立場にある経営者たちは、アメリカ鉄鋼業の先

駆者であるカーネギーの「発明は引き合わない」というお題目を、後生大事に持ち続けた。まず他者に研究開発と新技術導入のコストとリスクを負わせ、その後に決断しようとしたのだ。

鉄鋼会社は研究開発をおざなりにし、新しい技術の導入は遅れた。経営学修士（MBA）と呼ばれる財務屋が会社を牛耳るようになってから、この傾向にはいっそう拍車がかかるようになった。彼らは株価をつり上げることに熱中し、必要な研究開発や設備投資を怠った。財務体質改善のために行ったりスストラで、会社を去っていった人々の中には、優秀な技術者が数多く含まれていたに違いない。

工場で鉄を生産していた労働者は、どうだったのだろうか。労働者の意見を代表するのは労働組合である。会社と協調している日本の労働組合からは想像もできないほど、アメリカの鉄鋼労働組合（USW）は戦闘的である。1980年代の初頭における、アメリカ鉄鋼業の労働者の賃金が、製造業全体の平均賃金の2倍を超えていたことは、USWの影響力の大きさを示している。

USWが1956年に会社から勝ち取った譲歩の中に、「第二条B項」があった。その内容は「確立している労働慣行は、基本的な条件に変化がないかぎり、これを変更しない」というもので、締結された当時はほとんど注目されなかった条項であった。

ところが、組合はこのあいまいな条項を自分たちに都合よく解釈した。他の国で人減らしのための技術が開発されると、組合はこの条項を盾にとって、その導入を阻んだのである。「第二条B項」は、新しい技術の採用を阻止し、非効率的な古い労働慣行を改めることを不可能にしてしまった。

1980年代に入ると、アメリカ鉄鋼業の技術的な弱点が露呈されるようになってきた。この頃には、日本の自動車メーカーはアメリカのビッグスリーに追いつき、1982年に日産とホンダのアメリカ工場が操業を開始し、84年には、トヨタとGMの合弁会社も操業を始めた。これらの工場がアメリカの鉄鋼メーカーから鋼材を調達できればよかったのだが、そうは問屋がおろさなかった。アメリカ鉄鋼業の技術力では、日本の自動車メーカーの要求する鋼材を製造することができなかったのだ。

鋼材を現地調達した自動車メーカーは、「亜鉛メッキがはがれる」、「材料を曲げると割れる」などの問題に直面した。このため、重要な部品の材料は日本から持ち込まざるを得なくなったのである。品質の問題もさることながら、「納期が1ヶ月単位で遅れる」といったことまで起こった。アメリカ最大級の鉄鋼メーカー、ベスレヘムのウィリアム社長はその後、アメリカ製の鋼材が、自動車メーカーや部品メーカーから、溶接性、曲げ特性などの点で、日本やヨーロッパの輸入鋼材より劣るという評価を受け、1982年当時の返品率が8%に達したという事実を認めている。

困った日本の自動車メーカーは、日本の鉄鋼メーカー各社に対し、アメリカ鉄鋼業への技術協力を要請し、これを受けた日本の鉄鋼各社は次々とアメリカに進出した。

日本鉄鋼業にとって、当時のアメリカの鉄鋼市場には魅力があったが、VRA（アメリカ国内の見掛消費に占める鋼材輸入のシェ

アを一定以内に抑える規制)によって、日本からの輸出は制限されていた。現地生産を行えば、供給量、収益ともに拡大する期待があったのである。

さらに、日本鉄鋼業はアメリカ鉄鋼業に助けられて発展してきたという経緯がある。アメリカの製鉄所を見学した日本の鉄鋼会社は、会社の最高機密であるべき工場の図面までもらってきた、というまことしやかな話もあるくらいだ。そろそろ恩返しをするべきだという考え方もあった。

日本の鉄鋼各社は、それぞれパートナーの会社を選んで、技術協力や資本参加を行った。新日鐵はインランドスチールと冷間圧延以降の下工程ラインで合併した。川崎製鉄はアームコ社と組み、上工程も含めた事業全体に参加し、鉄鋼一貫で品質向上に努めた。NKKは、ナショナルスチールの株式の70%を取得し、全面的な技術協力を行った。

アメリカ鉄鋼業は、日本に対米輸出自主規制を求めたり(1969～74年)、1978年から82年にかけてトリガー・ブライス・メカニズム(日本鉄鋼業のコストを日本側から提出させ、それをもとに米国商務省が算定したトリガー価格を下回る輸入があった場合、ダンピング調査を行える制度)、あるいは先に述べたVRA(1984～92年)による堅固な防護壁を作りあげてきた。その一方、ますます技術力は低下し、日本鉄鋼業による援助がなければ需要家を満足させる製品を製造することも、設備投資を行うこともできなくなってしまった。いまやアメリカ鉄鋼業界が新聞紙上ににぎわすのはダンピング訴訟だけである。

こんなアメリカ鉄鋼業に誰がしたのか。その最大の原因は、彼らが研究開発や設備投資を怠ってきたことにあるのではないだろうか。日本鉄鋼業はアメリカ鉄鋼業の失敗を、他山の石とせねばならない。

「技術」と「電力」は貯めておけないといわれる。電力は電池やバッテリーである程度は貯めておけるが、長期間にわたって大量に保存するのは無理である。乾電池をしばらく使わずに放っておくと、いつの間にか弱って、使いものにならなくなってしまう。

技術も電力と同じである。

設備さえあれば誰にでも鉄がつくれるかという、そうではない。設備を動かす人のノウハウやセンスがあつてはじめて、生産が可能になるのだ。

私たちの身の回りにある電気製品や車が、あれほど故障が少なく、誰にでもすぐ使えるというのは、まさに奇跡的なことである。機械というのは故障するのが当たり前ののであって、ちょっとでも調整を怠れば、すぐに機嫌を損ねてしまう。ましてや、工場の巨大な設備になると、正常な運転を続けるだけでもたいへんなことである。家庭用電気製品なら、壊れたら買い換えればよい。ところが、何億円もする生産設備を、壊れたから、言うことを聞かないからといって、買い換えるわけにはいかない。辛抱強く使いこなさなくてはならない。技術力で最も重要な要素のひとつは、技術を使う「人」なのだ。

ここに、技術を貯めておくのは難しいといわれる原因がある。

どんなに優れた技術者でも、いずれは定年を迎えて会社を去っていく。当然、若手社員への技術の伝承が行われるが、100%の伝承というのは不可能である。それは、書類を渡せばすむという問題ではない。技術には感覚的な部分が多いからである。マニュアルを何度読み返そうが、いくら口酸っぱく教えられようが、技術的センスはなかなか身につかない。先任者と同じレベルに達するのは、並大抵のことではない。放っておけば、人の入れ替わりによって、技術力はどんどん低下していつてしまう。

技術レベルを今までと同等か、あるいはそれ以上にするにはどうすればよいか。仮に、先任者から80%の技術伝承しかできなかったとする。残りの20%はどうやって埋めるか。それを可能にするのが設備投資である。

設備投資が行われると、最新の設備が導入される。そこには新しい技術が盛り込まれている。設備を立ち上げるには、新しい技術を勉強しなければならない。設備の立ち上げは技術者を鍛える最も良い機会なのだ。先任者の知らなかった新しい技術を身につけることによって、技術者は先任者に追いつき、追い越すことができるのである。

研究開発も技術力の維持向上に非常に有効であることは言うまでもない。新しいプロセスの開発や設備の改良は、研究開発の結果である。研究開発がなければ設備投資の意味は半減してしまう。また、需要家の高度な要求に応え続けるには、次々と新製品を開発しなければならない。

私は、バブル経済が日本の研究開発体制を弱体化するきっかけになってしまったのではないかと危惧している。

それまで、研究者の社内的立場はそんなに強いものではなかったと思う。「研究所の連中、何を研究しているのかよくわからないけど、会社も儲かっているし、まあ大目に見ておこう」という見方をされていたのではないだろうか。会社の主流でなかったからこそ、研究者は比較的自由な発想で研究することができた。そういう雰囲気の中で、多くの失敗を積み重ねて、ときには花を咲かせる研究が出てきたのである。

ところが、バブル経済は研究所にスポットライトを当ててしまった。この時期、どんな会社も多かれ少なかれ経営の多角化を考えていた。鉄だけに頼ってきた鉄鋼メーカーには、特にその思いが切実だった。何か新しいことを始めなければいけないということになると、研究開発が注目されるのは当然のなりゆきである。こうして、研究所は社内の期待を一身に集めて数年間が過ぎた。

ところが、バブル期に取り組んだ研究は、会社の収益に大きく貢献するような事業にはつながらないものが多かった。研究に失敗はつきものであるし、あまり経験のない新しい分野に挑戦したのであるから、無理もないことである。しかし、研究のなんたるかをよく知らない社内の大半の人は、そうは考えず、「研究開発にどれだけの価値があるのか」という疑問を持つようになってしまった。

リストラがはやっている今回の不況では、「聖域」といわれていた研究所にもメスが入った。ベテランの研究者は次々と姿を消

した。若手研究者に十分な技術伝承を行うこともなく。そればかりか、「研究所不要論」なるものも一部でまじめに議論されるようになってしまった。実に残念なことである。

アメリカ鉄鋼業の歴史を見ればわかるように、技術開発が停滞すれば、それは即座に日本鉄鋼業の技術力の衰退につながってしまう。

アメリカ鉄鋼業もその全盛期には、自分たちの技術力が自動車メーカーの要求に応えることができなくなり、日本から技術協力を受けるようになるとは、夢にも思っていなかっただろう。ところが、それは現実になってしまった。これを日本に置き換えると、日本鉄鋼業もいずれ韓国や台湾から協力を受けなければ、鉄を生産できなくなることになる。

悲観的な話が続いたが、日本鉄鋼業も黙って手をこまねいているわけではない。日本の鉄鋼会社は、世界の製鉄技術をリードしてきた。21世紀にも高い技術力を維持するために、懸命の努力が続いている。

住友金属は、総額八百億円をかけて、新しいシームレスパイプの工場を建設中である。

新工場が完成すれば、現工場に比べて要員が500人減って1,600人となり、3割以上の生産性向上が図れるという。

日本の場合、シームレスパイプの75%が輸出向けであり、円高で採算性が悪化している。NKKはシームレスパイプの中径管工場の閉鎖を決定し、新日鐵と川崎製鉄は業務提携して、どちらかに生産を集約しようとしている。そんな中を、シームレスパイプの国内トップシェアを持つ住友金属は、「パイプの住金」の看板で勝負をかけてこうとしている。

川崎製鉄も負けてはいない。仕上げ圧延機内で銅板を連続的に圧延できる熱間圧延の新技術を開発した。百二十億円を投資し、1996年1月には新しい設備として稼働する予定である。

これは、仕上げ圧延の前に高速接合機で銅板と銅板をつなぎ、最後の巻き取り工程の直前で切断するものである。これまでの熱間圧延工程では、板の先端を中心に形状や品質のばらつきがあったが、何枚もの銅板をつなぐことにより、2枚目以降の銅板からばらつきをなくすることができるようになる。

もちろん、連続熱間圧延の技術開発は世界で初めてである。

21世紀をにらんだ、次世代製鉄技術の研究開発も着々と進んでいる。NKKを中心とした国家プロジェクトで取り上げられている「溶融還元法」がそれである。

現在使われている高炉では、鉄鉱石を焼き固めた焼結鉱と、石

炭を蒸し焼きにしたコークスを高炉内で加熱して銑鉄を作っている。ガスで加熱した鉄鉱石と石炭から銑鉄を作る溶融還元法では、高炉に不可欠なコークス炉や焼結機は必要なくなる。銑鉄を作るコストでは、高炉に比べて約1割下がる見通しである。生産面で見ると、いったん稼働すると止めることのできない高炉に対し、溶融還元炉は、始動、停止が容易である。最近の需要構造が多品種、小ロット化している傾向にも対応しやすい。地球温暖化の元凶である二酸化炭素の放出も減らすことができる。資源の有効利用と省エネルギー、環境対策、という時代の流れをくんだ技術だといえる。

21世紀初頭には、1基数百億円する日本のコークス炉は、相次いでその寿命を終える。それまでに溶融還元法が実用化できるかどうかは、これからの日本鉄鋼業を占う上で、重要な因子である。

仮に、コークス炉を新設したとして、その直後に他の国で溶融還元炉、あるいは、別の新しいプロセスが実用化して、コークス炉以上の競争力を持てばどうなるだろうか。かつてアメリカ鉄鋼業が平炉で犯した過ちを、日本鉄鋼業もまた繰り返すことになってしまう。

溶融還元法の研究は、日本鉄鋼業の命運を担っているといっても過言ではない。

日本は特許出願件数も、登録件数も世界で一番多い。それにもかかわらず、「技術貿易」の赤字も多いのが現状である。しかし、鉄鋼業だけは違う。世界各地への技術輸出はあるが、技術輸入は見当たらない。日本鉄鋼業の技術力は名実ともに世界一なのだ。

日本の大学は、金属工学専攻の学生を、アメリカの1.5倍から2倍、ヨーロッパの10倍も送り出している。今、世界の鉄鋼研究者は7,000人といわれている。そのうち、日本の研究者は2,000人、3分の1近くを占める。

研究費を見ても、日本鉄鋼業は研究開発に力を入れていることがわかる。1993年度、日本の鉄鋼メーカーは経常赤字に転落したが、それでも新日鐵の研究開発費は売上高の3.6%に達した。これは韓国やドイツの1~2%と比べて、非常に高い数字である。

こうした研究開発の努力は、21世紀に必ずや実を結ぶはずである。

日本の鉄鋼各社の収益が悪化する中、設備投資と研究開発を続けることは容易ではないだろう。しかし、続けなければならない。設備投資と研究開発なくして、日本鉄鋼業の21世紀はないのだから。

(NKK勤務)

▶「国際金属歴史フォーラムしまね」参加見聞録◀

名古屋工業大学材料工学科 山口 周

1996年1月16～17日、島根県松江市のくにびきメッセを会場に、「国際金属歴史フォーラムしまね」（日本金属学会主催、日本鉄鋼協会他後援）が開催された。このフォーラムは、1998年5月に松江市で開かれる第4回国際金属歴史会議（BUMA-IV）の、いわば準備のためのフォーラムであり、国内外の著名な研究者13名の招待講演が行われた。実行委員会会長の今井勇之進先生（東北大学名誉教授）はご都合により参加されなかったが、副会長の井口泰孝先生（東北大学教授）、幹事の田口勇先生（専修大学教授）を中心とする実行委員会及びボランティアスタッフによって実施され、様々な分野から100名ほどの参加者があった。その内訳をみると、歴史・考古学の専門家、現役の金属・鉄鋼関係の研究者、技術者やそのOBだけでなく、金属の歴史に関心を持つ一般の人たちも数多く見受けられ、金属の歴史への関心の高まりを感じさせられた。

招待講演は、この国際金属歴史会議の提唱者の一人でもあるR. Muddin 先生による「鉄の進歩と発展の歴史」から始まり、以下のような内容であった。

講演者	所属	講演題目
Robert Muddin	ペンシルバニア大学・ハーバード大学名誉教授	鉄の進歩と発展の歴史
Brian Gilmour	王立武具博物館主任研究員	模様をもつ刀剣 一 中世のヨーロッパならびに南アジアの刀剣製作技術
Paul T. Craddock (B. Gilmour 代読)	大英博物館	日本の色金（いろがね）技法の原形
Cristian Segebede	素材研究所	ヨーロッパのダマスコ模様鋼鉄器について
Lars F. Stevnik	トロント大学教授	鉄生産と社会—ノルウェーの先史時代を例として
河瀬正利	広島大学助教授	前近代日本の鉄生産
Michael R. Notis	リーハイ大学教授	日本の金工技法の様式美とその国際技術交流について
Tom Chase	スミソニアン博物館主任研究員	金属組織から見た中国青銅器
Fulvia Lo Schiavo	文化遺産環境省主任研究員	銀の考古学
Choi Ju (崔 火主)	韓国科学技術研究院研究委員	朝鮮青銅器時代の特徴
Chen Tiemei (陳 鉄梅)	北京大学教授	北京大学における加速器を用いた放射性炭素年代測定と古代冶金史への応用
Han Rubin (韓 汝王分)	北京科学技術大学教授	中国古代鉄溶鋳炉の発展
馬淵久夫	東京国立文化財研究所名誉研究員	鉛同位体法による日本国出土青銅器の研究—荒神谷遺跡の場合

これらの講演は、最新の研究成果をまとめたものであり、いずれも学術的に高い水準のものであった。金属・鉄鋼に関係しているはずの筆者が、いかにその歴史を知らずにいたかということを痛感させられた。特に1980年代以降の中国における発掘調査の進展は目を見張るものがあり、日本の古墳時代以前にすでに溶鉄を生産していたという事実には驚かされるとともに、またなぜその技術が日本に伝来しなかったのかといった疑問などがわき起こり、ある種のカルチャーショックに似た衝撃を受けた。また、考古学上の争点となっている遺跡から出土するスラグが製錬スラグか鍛冶フラックスかという点で、文化系（考古学）と自然科学系（主に分析）の立場で見解が異なることなど、現代の鉄の研究者が貢献できる可能性を知ったことも収穫であった。また、先史時代から技術の伝承や普及、技術の栄枯盛衰が市場原理にしたがっているという点も理解することができたように思う。

18日には、引き続きフォーラムのフィールドワークが「鉄のコース」と「銀と銅のコース」とに分かれて実施された。それぞれのコースでは、復元された「日刀保たたら」操業の見学や、荒神谷遺跡および石見銀山の見学が行われ、好評であった。このフォーラムは、様々なバックグラウンドと専門的知識のレベルの異なる参加者が集まったということからも予想されるように、普段我々が経験する国際会議とは多少趣が異なるものであり、運営の面でも苦勞のあとが見受けられた。同時通訳があったとはいえ、海外からの招待講演のほとんどが英語で行われ、また最新の高度な研究成果が発表されたことから、専門的知識のない人にとっては難しい面もあったかもしれない。しかし全体としてこのフォーラムが円滑にしかも成功裡に行われたのは、実行委員会やスタッフの方々の献身的な努力によるものであり、そのご苦勞には頭が下がる思いだった。

これまで金属・鉄鋼の歴史に深く関わる機会のなかった筆者にとって、このフォーラムは、松江の町の面影とともに、様々な意味で印象深いものとなった。技術が長い時を経るうちに埋没し、あたかも不連続に発展したかのように見えることは衝撃的であった。その時代の技術者達が、その時代に「いま」を生きるために努力した成果を「今」の視点で振り返っているものがこの「金属の歴史」であるとするならば、「いま」を生きる我々の成果が時代を経て「発掘」されたとき、人々はそれにどのような意味を見いだすのだろうか。悠久の時の流れの中で、「いま」何をなすべきかという問いかけが心に残った。

次号目次案内

ふえらむ Vol.1 (1996) No.6掲載記事

海を駆ける IRON & STEEL

話題のプロジェクト

燃料電池

鉄の絶景—鹿児島編

展望

パソコン市場動向と開発戦略

田中光三 (NEC)

入門講座

鉄鋼材料編—6 やさしい転位論

古林英一 (早稲田大学)

鉄鋼プロセス編—4 一度は通る狭き門—鉄鋼圧延プロセス入門

戸澤康壽 (大同工業大学)

鉄の歴史⑤

大地に刻まれた製鉄・鍛冶神の偶像

山内登貴夫 (映像ジャーナリスト)

*掲載記事及び題目は変更になる場合があります。

本会情報一覧

記事内容	掲載号
第132回秋季講演大会一般講演募集案内	本号 382頁
講演大会参加方法のご案内	本号 383頁
第132回秋季講演大会予告セッションへの講演申込のお誘い	本号 384頁
ノーベルプロセッシングフォーラムWWWホームページ公開のお知らせ	本号 384頁
第131回春季講演大会学生ポスターセッション報告	本号 384頁
第132回秋季講演大会討論会講演募集案内	本号 385頁
第132回秋季講演大会学生ポスターセッションでの発表のお誘い	本号 386頁
第1回遊休研究設備紹介事業のご案内	本号 387頁
鉄鋼研究振興資金による第6回助成テーマの募集	4号 299頁
会員名簿代金自動振替のお知らせ	4号 299頁
平成8年度重点研究募集要領	4号 301頁
計測・制御・システム工学会シンポジウム「鉄鋼業における信頼性と設備診断技術」開催案内	4号 301頁
創形創質工学会 鋼構造品工学フォーラムへのお誘い	4号 302頁
学術雑誌目次速報データベースご利用のお知らせ	4号 302頁
第161・162回西山記念技術講座「鉄鋼とチタンの組織制御技術—極限性能をめざして—」開催案内	4号 305頁
第32回白石記念講座「これからの品質保証」開催案内	4号 306頁
理事、監事、評議員候補者一覧	3号 212頁
新名誉会員および受賞者のお知らせ	3号 213頁
定款改正のお知らせ	2号 147頁
入会案内	1号 73頁

高知工科大学(平成9年開学予定)物質・環境システム工学科教員公募

- 募集人員：助手 1名
- 専門分野：化学工学若しくは材料工学
- 応募資格：専門分野に研究業績があり、修士又は博士の学位を有する(平成9年4月までに取得予定の者を含む)若手研究者
- 採用予定：1997年4月1日
- 提出書類：(1)自筆履歴書(写真貼付) (2)研究業績(研究業績一覧表及び著書・論文掲載紙(抜き刷り、コピー可))なお、主要著書及び論文に要旨(200字以内)を添付すること (3)推薦書
- 応募締切：1996年5月31日
- 書類送付先・問合せ先：〒100 東京都千代田区霞ヶ関3-3-1 尚友会館1階 (財)高知工科大学設立準備財団東京分室
主任 吉井一雄 Tel: 03-3503-8028 Fax: 03-3503-8078

編集後記

近頃本屋に立ち寄ると、やたらとマルチメディアやインターネット関連の雑誌が目につく。本会報の本号においても、PHSやパソコンの記事が紹介されているが、鉄鋼協会の会報としては従来あまりお目にかからなかった記事で、隔世の感なきにしもあらず。

聞くとところによると、マルチメディアを核とする情報通信産業は2010年に120兆円産業に成長するという。一方我々鉄

鋼産業の将来像は……。基礎生活資材、産業資材としての重要性は将来にわたって揺るぎなきものと信じるが、将来展望に関して明るい話題の少ないことは寂しい。

その中であって、スチールハウスが脚光を浴びてきた。鉄の優れたコストパフォーマンスを活かし、将来の生活向上に資する、用途開拓に向けた議論がもっと高まればと願う次第である。
(Y.K.)

会報編集委員会 (五十音順)

委員長 阿部 光延 (新日本製鐵 (株))

副委員長 雀部 実 (千葉工業大学)

委員 石井 邦宜 (北海道大学)	石井 満男 (新日本製鐵 (株))	梅本 実 (豊橋技術科学大学)
川田 豊 ((株) 神戸製鋼所)	小林 正人 ((社) 日本鉄鋼連盟)	近藤 隆明 (NKK)
佐藤 駿 (住友金属工業 (株))	杉山 香里 ((株) ニューマーケット)	手塚 誠 ((社) 日本鉄鋼協会)
友田 陽 (茨城大学)	中村小夜子 ((社) 日本鉄鋼協会)	久松 定興 (いすゞ自動車 (株))
古田 修 (愛知製鋼 (株))	三宅 苞 (川崎製鉄 (株))	柳 謙一 (三菱重工業 (株))
山口 周 (名古屋工業大学)		

連絡先

本部事務局 〒100 東京都千代田区大手町1-9-4 経団連会館3階

TEL: 総合企画事務局: 03-3279-6021 (代)

学会部門事務局: 03-3279-6022 (代)

生産技術部門事務局: 03-3279-6023 (代)

FAX: 03-3245-1355 (共通)

ふえらむ (日本鉄鋼協会会報) 定価 2,000円 (消費税本会負担)

Bulletin of The Iron and Steel Institute of Japan Price: ¥2,000 (Free of seamail charge)

1996年5月1日印刷納本・発行 (毎月1回1日発行)

編集兼発行人 東京都千代田区大手町1-9-4 経団連会館内 島田 仁

印刷人/印刷所 東京都新宿区三栄町20-3 (新光オフィソーム) (株) ニューマーケット

発行所 社団法人日本鉄鋼協会 〒100 東京都千代田区大手町1-9-4 経団連会館3階

TEL: 総合企画事務局: 03-3279-6021 (代)

学会部門事務局: 03-3279-6022 (代)

生産技術部門事務局: 03-3279-6023 (代)

FAX: 03-3245-1355 (共通)

郵便振替 口座東京00170-4-193 番 (会員の購読料は会費に含む)

© COPYRIGHT 1996 社団法人日本鉄鋼協会

複写される方に

本誌に掲載された著作物を複写する場合は、本会が複写権を委託している次の団体に許諾を受けて下さい。

学協会著作権協議会

〒107 東京都港区赤坂9-6-41 社団法人 日本工学会内 TEL 03-3475-4621 FAX 03-3403-1738

また、本会は上記団体を通じて米国Copyright Clearance Center, Inc.と、また本会独自に米国Institute for Scientific Informationと複写権に関する協定を結び、双方に本誌を登録しています。従って、米国において本誌を複写される場合は、次のいずれかの機関の指示に従って下さい。

Copyright Clearance Center, Inc.

222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA TEL 001-1-508-750-8400 FAX 001-1-508-750-4744

Institute for Scientific Information

3501 Market Street Philadelphia, PA 19104 USA TEL 001-1-215-386-0100 FAX 001-1-215-386-6362

行事等予定

太字は本会主催の行事

開催期日	行事(開催地)	締切	掲載号及び頁
1996年			
5月 12日	計測・制御・システム工学部会シンポジウム「鉄鋼業における信頼性と設備診断技術」(東海市)		4号 301頁
15～17日	自動車技術展「人とくるまのテクノロジー展'96」(横浜)		4号 310頁
17日	工学教育連合講演会「産業構造の変革に対応した大学と企業での教育のあり方」(東京)		本号 391頁
21,22日	第161回西山記念技術講座「鉄鋼とチタンの組織制御技術—極限性能をめざして」(東京)		4号 305頁
22,23日	計測連合シンポジウム 先端計測'96 (東京)		3号 224頁
23日	第71回塑性加工講習会「PL法と塑性加工」(東京)		4号 310頁
27,28日	第18回宇宙ステーション利用計画ワークショップ (東京)		本号 391頁
28日	鑄造材料の信頼性向上を目指して—材料工学と機械工学の接点を探る (名古屋)		3号 224頁
29,30日	超高温材料国際シンポジウムX (宇部)		本号 391頁
30日	日本金属学会分科会シンポジウム (横浜)		本号 391頁
6月 4日	第124回塑性加工懇談会「塑性加工インプロセスセンシングとセンサー技術」(東京)		本号 391頁
5,6日	高性能二次電池と関連金属材料「基礎から最新技術まで」(大阪)		本号 391頁
6日	第46回塑性加工研修会「最新の接合技術と役割」(福島)		本号 391頁
7日	第108回腐食防食シンポジウム「さびの科学」(東京)		本号 391頁
9～12日	SICE夏期セミナー'96「実プラントのモデリングと H_{∞} 制御」(山梨)		4号 310頁
10日	第32回白石記念講座「これからの品質保証」(東京)		4号 306頁
11,12日	平成8年度溶接技術基礎講座 (東京)		本号 391頁
14日	九州支部 第90回合同学術講演会 (福岡)		本号 391頁
18日	第11回技術セミナー「腐食を理解するための電気化学入門」(東京)		本号 391頁
18,19日	第162回西山記念技術講座「鉄鋼とチタンの組織制御技術—極限性能をめざして」(大阪)		4号 305頁
20～22日	2nd International Symposium of Croatian Metallurgist (SHM'96) (Croatia)		本号 391頁
25日	東海支部第19回若手材料研究会「土木・建築用材料」(名古屋)	1996/6/10	本号 391頁
7月 2～4日	第64回塑性加工学講座「板材成形の基礎と応用」(千葉)		本号 392頁
9日	第73回塑性加工講習会「チューブフォーミングの基礎と実際」(大阪)		本号 392頁
9～11日	第65回塑性加工学講座「鍛造加工の基礎と応用」(千葉)		本号 392頁
10日	軽構造接合加工技術シンポジウム (東京)		本号 392頁
12日	第170回塑性加工シンポジウム「冷間圧延における品質・作業環境と圧延潤滑油」(東京)		本号 392頁
17日	第125回塑性加工懇談会「材料の微視組織の成長と巨視的応答の予知」(大阪)		本号 392頁
17,18日	システム制御情報学会セミナー'96 (大阪、東京同時開催)		本号 392頁
25,26日	第32回X線材料強度に関するシンポジウム (京都)	1996/4/24	4号 310頁
26～28日	第7回電顕サマースクール「極微構造のダイナミック解析技術」(大阪)		本号 392頁
27～8月2日	第22回鉄鋼工学セミナー(蔵王)	1996/5/10	3号 217頁
29～31日	第15回混相流シンポジウム'96 (福井)	1996/4/12	3号 224頁
30日	第44回年次大会「工学・工業教育に関する研究」(広島)	1996/3/11	2号 160頁
30～8月1日	第27回結晶成長国内会議 (滋賀)	1996/4/30	4号 310頁
8月 28,29日	平成8年度技術士試験「技術士法に基づく技術士第2次試験」(全国9都市)	1996/4/5	2号 155頁
9月 28～30日	第132回秋季講演大会(札幌)	1996/7/11	本号 382頁
10月 8,9日	第9回日本・ドイツセミナー(デュッセルドルフ)		
13日	平成8年度技術士第1次試験「技術士補になるための試験」(全国9都市)	1996/5/17	4号 309頁
21～24日	第4回傾斜機能材料国際シンポジウム(FGM'96) (つくば)		2号 160頁
22～24日	7th International Symposium on Physical Simulation (つくば)	1996/4/1	1号 68頁
27～30日	"2nd International Symposium on Extraction and Processing for the Treatment and Minimization of Wastes (Arizona,USA)"		1号 76頁
11月 18～20日	第2回エコバランス国際会議 (つくば)	1996/3/31	3号 224頁
12月 5～7日	International Welding Conference 1996 IWC-96 (Bombay,India)	1996/4/30	4号 310頁
9～11日	第3回環太平洋国際会議「鑄造凝固プロセスのモデリング」(北京)	1996/4/1	3号 224頁
1997年			
1月 4～8日	5th International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts' 97 (Sydney, Australia)	1996/3/15	2号 154頁
3月 27～29日	第133回春季講演大会(東京)		
7月 14～17日	Australasia-Pacific Forum on Intelligent Processing and Manufacturing of Materials (Sydney, Australia)		2号 160頁

ふえらむ Vol.1 No.5 広告目次

表2 ㈱トライメート	高圧酸素切断方式	前3 ㈱島津製作所	多元素分析装置	後1 本誌広告目次
前1 ㈱マツボー		4 ㈱テクノヨコハマ	炉外精錬装置	㈱協会通信社 広告案内
	重工業グループ取扱商品一覧	5 島津メクテム㈱	寸法測定装置	2 富士電波工機㈱ 各種試験機
2 住友金属テクノロジー㈱		6 財日本規格協会	書籍	表3 日本ミンコ㈱ サンプル・サンブラ
	試験分析サービス			表4 日本アナリスト㈱ 各種分析装置

本誌広告取扱 協会通信社 〒104 東京都中央区銀座7丁目3番13号
TEL 03(3571)8291・FAX 03(3574)1467

*Please allow us to advertise
your excellent products and technology.*

ふえらむ

ferrum

Bulletin of The Iron and Steel Institute of Japan

Monthly.

Circulation: 11,000 Copies. Written in Japanese.

鉄と鋼

TETSU-TO-HAGANE

Monthly.

Circulation: 3,000 Copies. Written in Japanese.

ISIJ International

ISIJ International

Monthly.

Circulation: 5,500 Copies. Written in English.

日本鉄鋼協会講演論文集

材料とプロセス

Report of the ISIJ Meeting

Current Advances in Materials and Processes

Spring: No. 1, 2, 3. Autumn: No. 4, 5, 6.

Circulation: 3,000 Copies each. Written in Japanese.

*For more Information,
Write or Facsimile.*

**ADVERTISING AGENCY for
The Iron and Steel Institute of Japan
KYOKAITSUSHINSHA CO., LTD.**

**3-13, GINZA 7 CHOME CHUO-KU,
TOKYO 104 JAPAN
Tel. 03-3571-8291 • Fax. 03-3574-1467**

INDUCTION HEATING & CONTROL

富士電波工機の試験機シリーズ!!

コンピュータシステムによるデータ処理

☆ **formastor-F** 全自動変態記録測定装置

CCT, TTTの急速自動測定

各種熱処理条件をシミュレートして変態測定

☆ **ThermoFINE** 高精度全自動熱サイクル再現装置

試片をマガジンにセットするだけで無人運転ができる

高周波加熱と通電加熱の併用で急速加熱ができる

自動化により再現精度が向上

☆ **THERMECMASTOR Z** 熱間加工再現試験装置

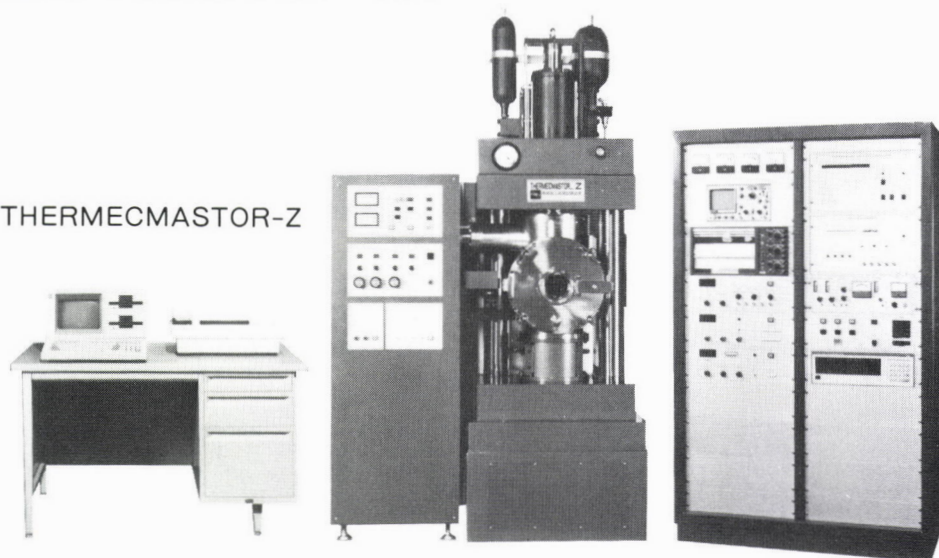
熱間加工試験研究の決定版!

熱間における加工条件を正確に再現

変形抵抗・組織変化及び熱間変形時の延性を的確に測定

加工後の変態測定が可能

THERMECMASTOR-Z



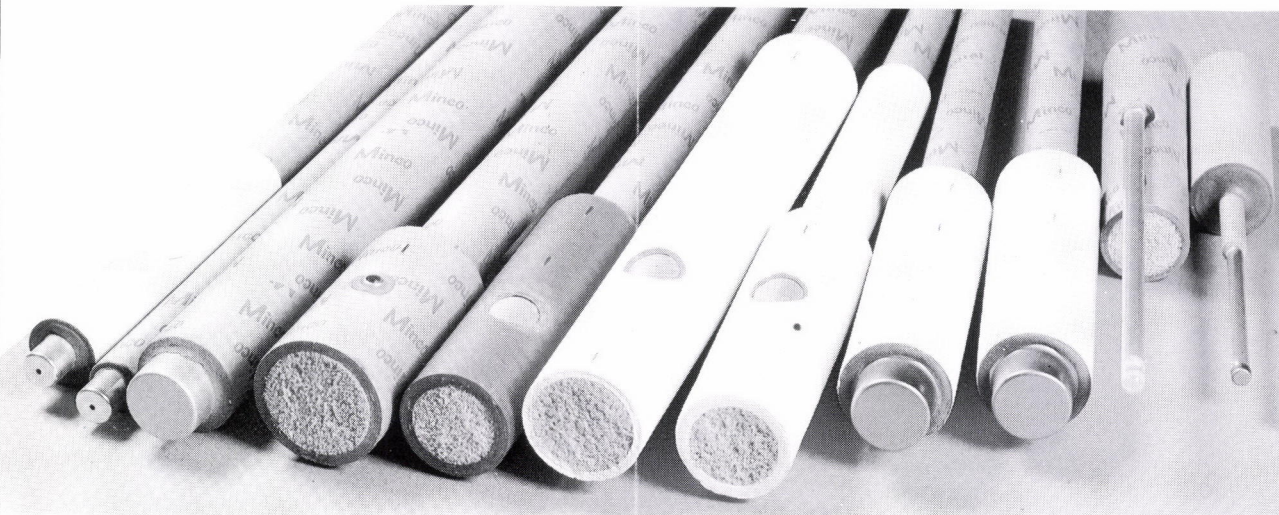
富士電波工機株式会社

本社・工場 埼玉県鶴ヶ島市富士見6-2-22
(〒350-02) ☎(0492)86-3211 FAX(0492)86-5581
大阪営業所☎(06)539-7501 名古屋営業所☎(052)763-7511

Minco ミンコ・熱電対とサンプラー

品質向上のパイオニア

■ ミンコサンプラー (製鋼 製鉄 試料採取用)



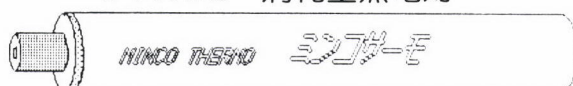
ミンコサンプラーの3つの大きな特徴 信頼性、作業性、安全性。

炉外精錬装置 脱ガス装置 電気炉 レードル タンディッシュ CCモールド
高炉出鉄樋 トピードカー 溶鉄予備処理などあらゆる場所から採取できます

■ ミンコサーモ 消耗型熱電対

for IRONS, STEELS, FERROUS ALLOY

PT301型 消耗型熱電対



TYPE R(13%) IPTS 1968
白金・白金ロジウム

■ 標準試料

世界各国各社の製品を取り扱っております。

化学分析用、発光分光分析用、蛍光X線分析用、英国BAS、米国NBS、
BRAMMER、ALPHA、MINCO、カナダALCAN、ドイツBAM、
フランスIRSID、スウェーデンSKF、他 ご用命下さい。

日本ミンコ株式会社

本社 東京都新宿区西新宿6丁目6番3号
新宿国際ビル新館4階
TEL03(3342)8728 〒160

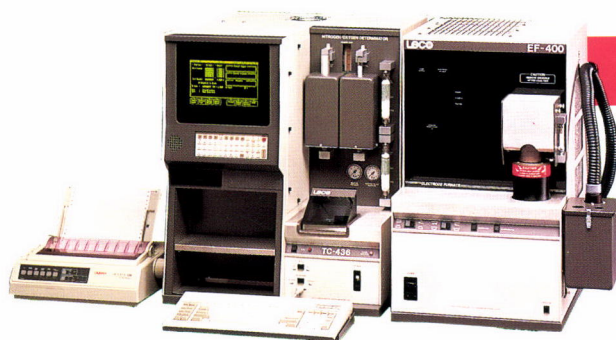
お問い合わせは

営業本部 埼玉県三郷市谷中388番地1
三郷工場 TEL.0489(52)8701~4 〒341
FAX.0489(52)8705

MINCO U.S.A. (WISCONSIN)
MINCO GERMANY (DÜSSELDORF)
MINCO AUSTRALIA (WOLLONGONG)



金属・鉱石・無機物・セラミック中 C・S・O・N・H 分析装置各種



TC-436

酸素窒素同時分析装置

(鉄鋼, 非鉄金属, 電子材料, 炭素繊維等)
(各種セラミックス (Si₃N₄, AlN, BN, SiC, TiC)
SiO₂, Ba₂ YCu₃ O_{7-y}等)

感 度: 0.1ppm 分析時間: 標準40秒
分析範囲: (1g試料) (50mg試料)
酸素: 0~0.1% 酸素: 0~20%
窒素: 0~0.5% 窒素: 0~45%

電子天秤: プリンター内蔵
オプション: 昇温抽出プログラム

姉妹機

TC-136 O-N分析 TN-414 N分析
RO-416 O分析 TN-114 N分析

CS-444

炭素硫黄同時分析装置

(鉄鋼, 非鉄金属, 特殊合金, 鉱石等)

感 度: 0.1ppm 分析時間: 標準30秒
分析範囲: (1g試料) 炭素: 0~6.0%
硫黄: 0~0.35%

電子天秤, プリンター内蔵
オプション: オートクリーニング
オートローダー, ルツボ空焼器

姉妹機

CS-244 C・S分析 EC-12 C分析
IR-412 C・O分析 IR-432 S分析
WR-112 C分析 IR-232 S分析



RH-404

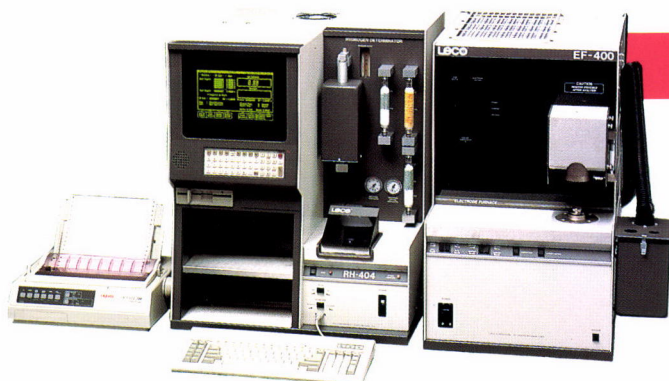
水素分析装置

(鉄鋼, 銅, チタン等)

感 度: 0.01ppm 分析時間: 通常80秒
分析範囲: 0.3~250ppm (試料1gの場合)

姉妹機

RH-402 水素分析
DH-103 水素分析



常設展示中 分析方法その他
御相談承ります。



日本総代理店

LECO CORPORATION
U.S.A.

日本アナリット株式会社



ISO-9002
No. FM 24045

(BSI - British Standards Institute)

本 社 〒141 東京都品川区西五反田 3-9-23 ☎(03)3493-7281代 FAX(03)5496-7935
大阪支店 〒560 大阪府豊中市岡上の町 2-6-7 ☎(06) 849-7466 FAX(06) 842-2260
九州営業所 〒804 北九州市戸畑区汐井町1-1(戸畑ステーションビル) ☎(093)884-0309 FAX(093)873-1190