

ふえらむ

Vol.3 No.11 1998

(社)日本鉄鋼協会会報

B u l l e t i n o f

T h e I r o n a n d S t e e l

I n s t i t u t e o f J a p a n

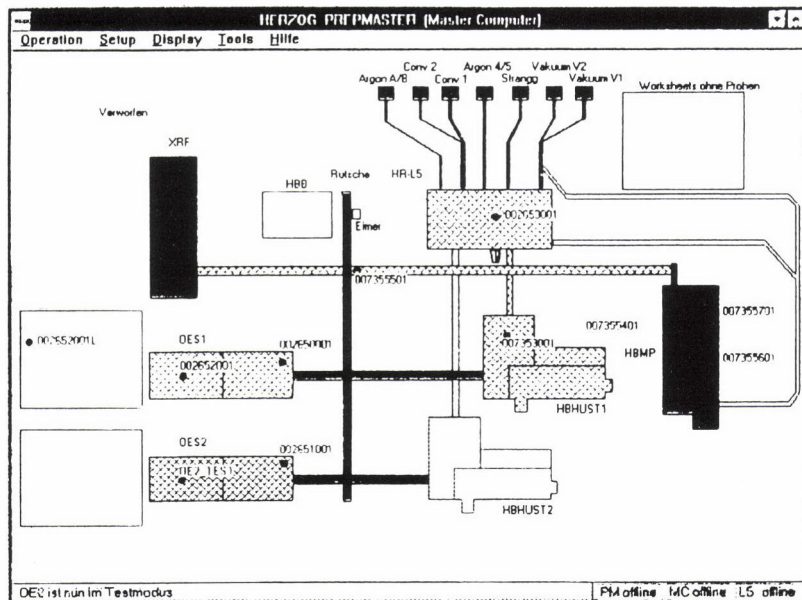


社団法人 日本鉄鋼協会
The Iron and Steel Institute of Japan

ホームページ <http://www.isij.or.jp>

ドイツ・ハルツォク社の全自動ラボ PREPMASTER

Sample Management System
for Laboratory Automation



■全自動気送システム

各種試料の搬送から
自動取り出しまで完全自動

■試料調製装置

切断・研磨・粉碎・プレス
ビード成形の完全自動

■運行管理システム (PREPMASTER)

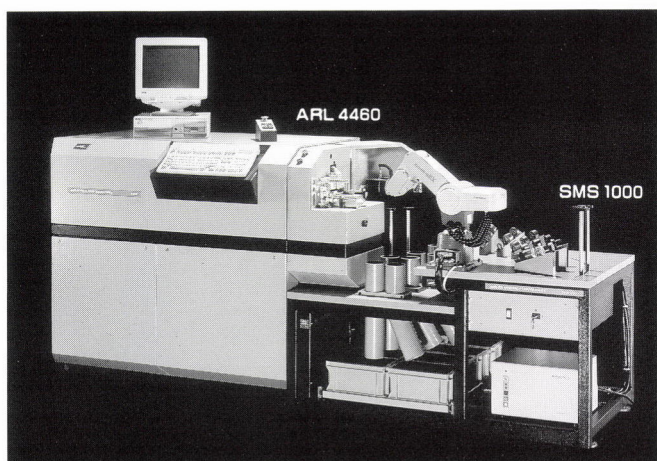
装置管理
ID番号管理
運行管理

HERZOG

発光分光分析装置 ARL 4460

ARL

ロボット・ハンドリング・システム SMS1000



ARL 4460の概要・特徴・仕様

全世界的に高い評価を得ているARL社の最高モデル。ベストセラー機種として既に2000台を超える実績を持つ“3460”をベースに、CCS（電流制御ソース）及びTRS（時間分解スペクトロスコープ）の2つの新技术が加わり、高い信頼性を実現。

- 分 光 器 / 1メートル、Paschon-Runge真空式ポリクロメーター、最大60チャンネル
- 試料スタンド / アルゴンフラッシュ、循環水冷テーブル
- 回 折 格 子 / 3タイプ：1080、1667、2160 gr/mm
- 電流制御発光電源：(CCS)
- スリット幅 / 1次：20μm 2次：37.5、50、75μm

SMS 1000の概要・特徴

強力なワークステーションにささえられた完全無人化システム。工程分析から試料ファイルまでの工程管理、装置校正分析から補正・校正用試料管理までの装置管理の完全自動化。

ハルツォク HERZOG ジャパン株式会社

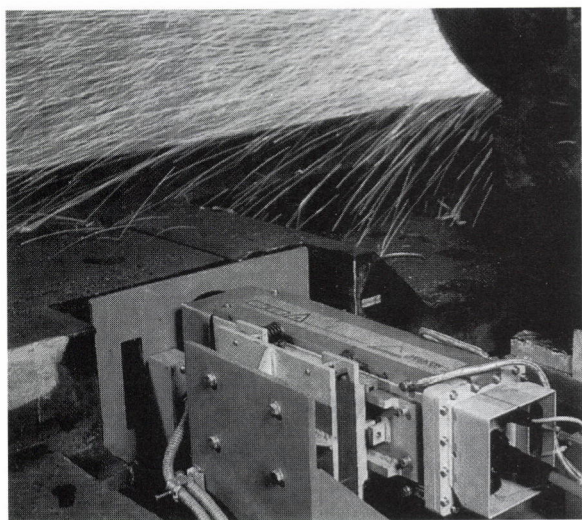
〒174-0041 東京都板橋区舟渡三丁目5番8号(区立第一工場ビル)
TEL03-5994-0273 FAX03-3967-2224

ドイツ/メザコン社 高精度レーザー測定器



メザコン社のレーザー測定器は、優れた耐環境性能(水、ダスト、高温、振動等)を有しH型鋼、棒鋼、ワイヤの熱延ラインに於いて、非接触形状・寸法測定を行います。駆動部がなく回転式に比べメンテナンスフリーのレーザー計測器です。

☆レーザー長さ計、速度計 LV503型



主仕様例

- ・測定範囲：0～90m/sec又は
-45～+45m/sec(オプション有り)
- ・焦点距離(許容距離変動)：
1000(±50mm)又は2000(±100mm)
(偏光システムにより近傍設置も可能)
- ・測定精度：±0.05%(1000±50mmタイプ)
±0.1%(2000±100mmタイプ)
- ・被測定物温度：最高1200℃
- ・応答時間：1ms
- ・光源：He/Neレーザー
5mW(クラス3B)

☆オンラインレーザー形状測定装置 Mesameter P型

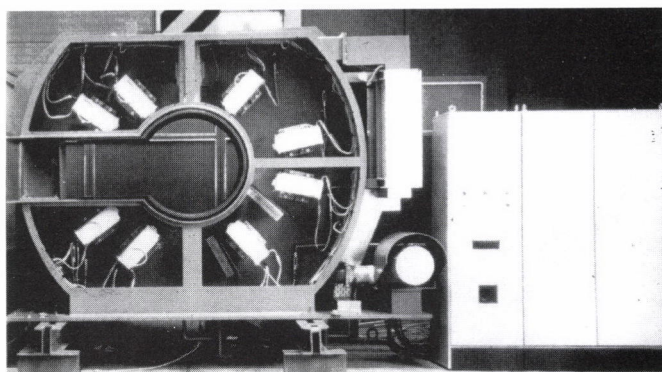
主仕様例 右図装置の場合

- ・ライン速度：最大10m/sec
- ・総合精度：±0.1mm
- ・演算速度：0.01sec以内
- ・レーザー測定器：DS2型

応用例：型鋼寸法測定

棒鋼寸法測定

スラブ寸法測定(オフライン)



MESAMETER P

(ドイツPreussag社納入のH鋼形状測定装置)

これからも世界の先進技術をご紹介します。

日本総代理店

株式会社 **マツボー** プラント2部

〒105-0001 東京都港区虎ノ門3丁目8番21号
TEL.03-5472-1746 FAX.03-5472-1740

国内メンテサービス

株式会社 **タウ技研**

〒224-0054 神奈川県横浜市都筑区佐江戸町181番地
TEL.045-935-0721 FAX.045-935-0731

中型自動切断機 ユニットム

Unitom



(特 徴)

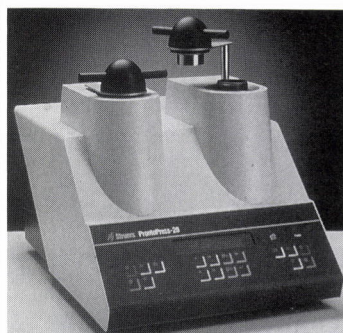
- マイクロプロセッサで制御される切断パラメータ。
- 予定されている定常な送り速度。
- マイクロプロセッサに支援された切断パラメータの拡張。
- 加圧力限界の調整による試料の保護。
- 切断ホイールが試料を通過し終えた時の自動停止。
- 近代的なデザイン。
- 耐蝕性のある切断室。
- 最高の安全性。

ユニットム

最新のプロセス制御で非常に効果的な高機能と強力な切断力を備えた自動切断機。

自動二連式埋込プレス プロントプレス-20

ProntoPress-20



(特 徴)

- 熱伝導効率を大幅に向上させた斬新なシリンドラ。
- 冷却水が節約できる3種類の冷却プログラム。
- 循環冷却装置が接続可能。
- 最大φ50mmまでの6種類のシリンドラ。
- 良好な埋込を支援する予熱機構。
- 再現性の高い埋込を可能にする圧力と加圧力の自動設定。
- 設定温度の自動制御。
- 最大200件の埋込データを保存できるデータベース。

プロントプレス-20

2基のシリンドラを装備し、同期運転により高い処理能力を実現した埋込プレス。

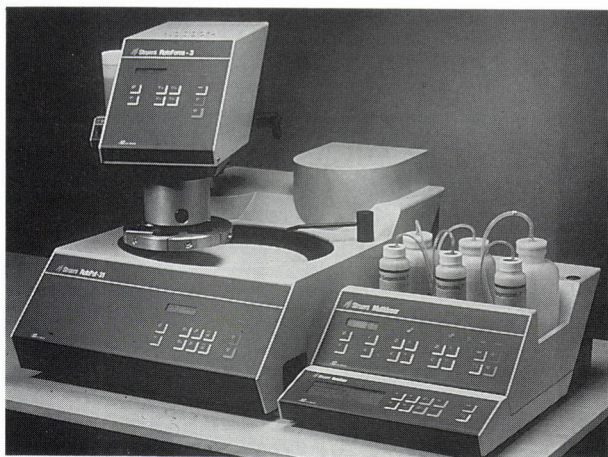
卓上型高性能自動研磨装置 ロトシステム300

ロトポール-31 ロトフォース-3 マルチドーザ ロトコム

RotoSystem300

RotoPol-31 Multidoser

RotoForce-3 RotoCom



ロトポール-31

最大φ300mmの円板が使用でき、大きな負荷が必要な研磨に耐える卓上型研磨/琢磨装置。

ロトフォース-3

最大φ200mmの試料板の使用で、大量の試料及び大型試料の研磨が可能な自動試料回転機。

マルチドーザ

ダイヤモンド懸濁液3種、潤滑剤2種及び酸化物琢磨剤1種用の自動精密供給装置。

(特 徴)

- 各装置が独立で使用可能な装置の組み合わせで必要に応じて増設できるシステム。
- システムが完備されれば各試料独自の研磨条件を時間、圧力、回転速度及び研磨剤供給量の各項目で作業段階毎に制御。
- 使用される消耗品を画面表示。
- 附属のPCソフトウェアを使用しパソコンと接続することで保存できる研磨条件数が増大し、条件の入力もパソコンのキーボードで可能。(接続できるパソコンには制限があります。)
- パソコンからFIDによるデータの移動が可能。

ロトコム

100件の研磨条件が保存可能で、システム上の研磨工程を管理する制御装置。

掲載された各装置は弊社西川口の実験室でご覧になれます。

Struers

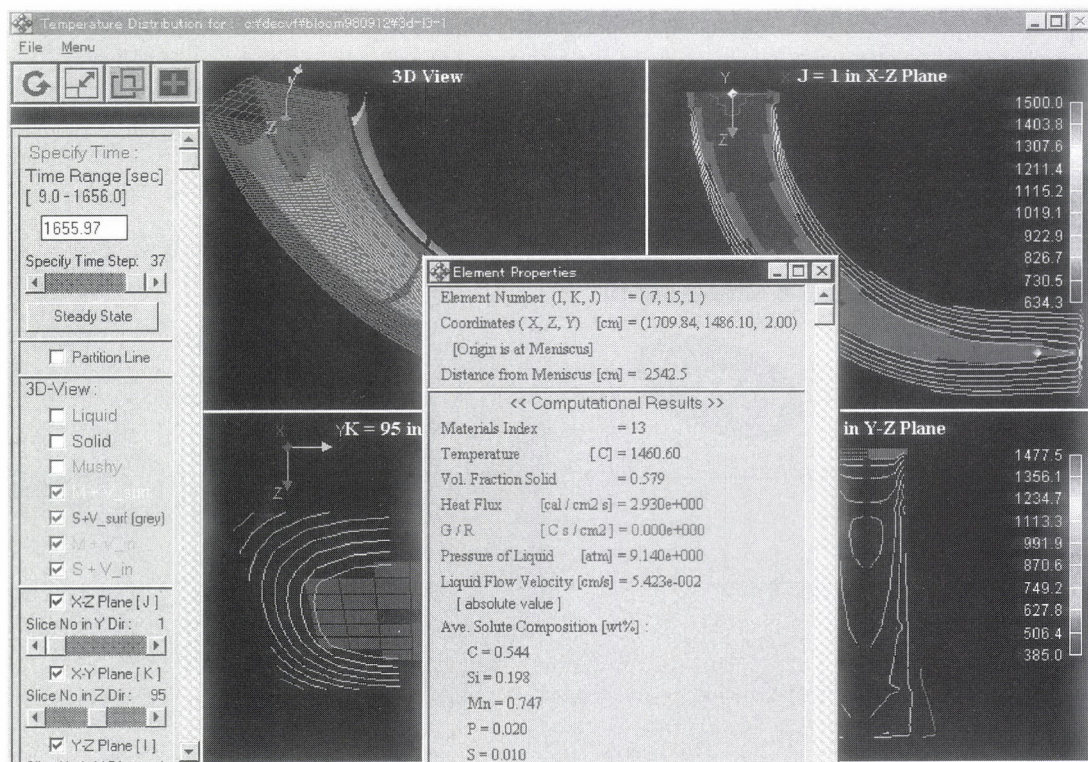
丸本ストルアス株式会社

本 社 〒104-0045 東京都中央区築地二丁目12番10号
TEL(03)3546-8051 FAX(03)3546-7980
大阪営業所 〒550-0014 大阪市西区北堀江一丁目6番5号
TEL(06)532-2661 FAX(06)532-1977
名古屋営業所 〒464-0075 名古屋市中千種区内山三丁目17番4号
TEL(052)732-1862 FAX(052)732-2392

鋼・連続鑄造の凝固過程を シミュレーションによって画像表示

凝固シミュレーションシステムCPRO

鋼の凝固過程では多数の要因が絡み合って成分の偏析や微小空洞などの欠陥が発生する。この極めて複雑な凝固現象をコンピュータでシミュレートし、多種大量の計算結果を画像データとして取出すことを可能にするノウハウが実用化されました。これによって、操業上の問題点の診断とその解決法、操業の最適条件を知ることが可能となります。



■製品名 凝固シミュレーションシステムCPRO(新製品)
■サンプル 上の画像は鋼ブルームの3次元解析例

■CPROの特徴

対象プロセス: 鉄・非鉄の連続鑄造、普通鑄造

対象材料: 鉄鋼、ステンレス鋼、アルミ合金、銅合金、
亜鉛合金、Ni基超合金、Ti合金等の実用合金

理論: 非線形多元合金モデルによる温度と固相率の関係、エネルギー式、溶質再分布式、
Darcy流れ及び運動方程式等を最新の凝固理論に基づいて展開しミクロスケールにおける凝固現象とマクロスケールにおける熱、液相流れ現象を連成させた。鋼の連鑄では鑄片の塑性変形、相変態も考慮。

解析機能: マクロ引け巣、ミクロポロシティ、マクロ偏析、固溶ガスの影響、相変態等

出力情報: 温度、固相率、G/R、熱流、液圧、流速ベクトル、ミクロポロシティ、マクロ偏析、
パーライト変態(鋼の連鑄)、その他多数の計算結果を3次元CGにより可視化

■計算実績

連鑄品: 鋼、ステンレス鋼、アルミ合金、銅合金
鑄造品: 大型鋼塊、鋳鋼、アルミ合金、亜鉛合金

■期待される効果 ブラックボックスである凝固過程で何がおきているかを知ることによって、操業上の問題点の診断とその解決方法、操業の最適条件を知ることが期待できる。

■開発元 株式会社エビス 戎 嘉男(工博)

●CPRO説明会のご案内

日時: 平成10年11月18日(非鉄)・24日(鉄鋼)
場所: 相模原市立産業会館

●CPROセミナー

最新の凝固理論を実践的に講義し、CPROの理論を理解するとともにシミュレーションの実際を体験することが出来ます。期間は1年間。

詳細は当社・CPRO担当までお問い合わせ下さい。

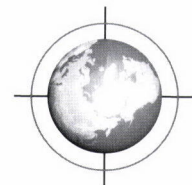
Engineering & Basic Interdisciplinary Science
株式会社 エビス

〒228-0825 神奈川県相模原市新磯野5-10-6

TEL0462-53-5593 FAX0462-53-5170

HORIBA

測定結果の正確さ、 簡単操作で豊富な ラインナップ。 金属分析に差をつけます。



ISO 14001 認証取得
JQA-E-90039 (本社・工場)
ISO 9001 認証取得
JQA-E-0298

金属などの導電性試料を多元素同時に高精度で分析。

発光分光分析装置

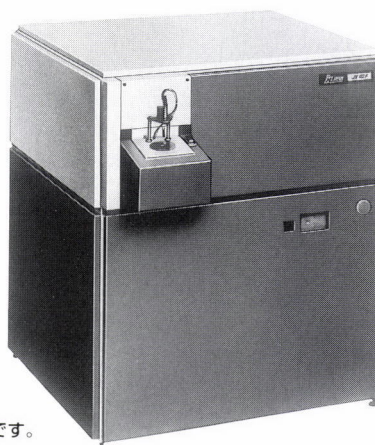
JY132F

New

主な仕様

光学配置：パッシェンルンゲ
焦点距離：50cm
窒素パージ方式
回折格子：イオンエッチドブレードホログラフィック
分解能：一次 0.028mm/0.014mm
47 波長まで増設可能

● JY132F は光学装置のトップメーカー、フランスのジョバン・イボン社製です。



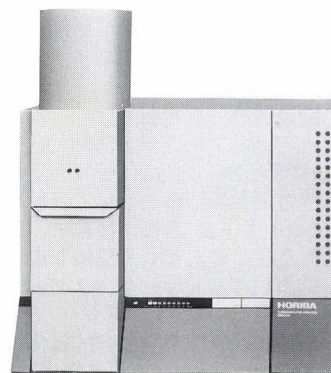
鉄鋼・非鉄金属・新素材・セラミックスなどの品質チェック、
研究開発に。

炭素・硫黄分析装置

EMIA-820シリーズ

酸素・窒素分析装置

EMGAシリーズ



●写真は EMIA-820 です。

製品についてのお問い合わせは(ホリバCSセンター)まで
(祝祭日を除く月～金 / 9:00～12:00、13:00～17:00)



0120-37-6045

詳しい資料をご希望の方は、郵送または FAX で(株)堀場製作所
広報室までご請求ください。FAX (075) 321-6621

JY132/EMIA-820
資料請求券
ふた5'98・11

株式会社堀場製作所 本社 〒601 京都市南区吉祥院宮の東町 2 TEL (075) 313-8121
●東京 TEL (03) 3861-8231 ●名古屋 TEL (052) 936-5781 ●大阪 TEL (06) 390-8011 ●福岡 TEL (092) 472-5041
日製産業株式会社 ●東京 (03) 3504-7211 ●札幌 (011) 221-7241 ●仙台 (022) 264-2219 ●筑波 (0298) 23-7391 ●横浜 (045) 451-5151 ●新潟 (025) 241-3011 ●金沢 (0762) 63-3480
●名古屋 (052) 583-5854 ●京都 (075) 241-1591 ●大阪 (06) 366-2551 ●広島 (082) 221-4514 ●高松 (0878) 2-3391 ●福岡 (092) 721-3501

ふえらむ

Vol.3 (1998) No.11

C O N T E N T S

目 次

Techno Scope	自動車の水素で走る日	766
話題のプロジェクト	脳型コンピュータ	774
鉄の点景	音を奏でる鉄—ピアノ線	778
展 望	鉄鋼のさらなる高強度化の可能性 牧正志	781
入門講座	分析試験法編-6 放射化分析 平井昭司	787
鉄の歴史	戦後復興・発展期における我が国鉄鋼製造技術史—学術編 耐熱鋼の進歩とそれを支えた科学 田中良平	795
解 説	鋼中微量残留元素の功罪 上田修三	804
	最近のウェーブレット研究の動向 榊原進	813
アラカルト	環境と行政、環境人間学のミッション 木原諄二	819
国際会議だより		825
会員へのお知らせ		826

ホームページ <http://www.isij.or.jp>



自動車が水素で走る日

—水素エネルギー時代への足音—

もし水素エネルギーを基幹とした社会システムが可能になったとしたら、地球温暖化の原因といわれるCO₂を今ほど大気に排出することもなくなり、限りのある化石燃料に代わって、長く使い続けられるエネルギー源となっていく可能性は高いだろう。しかし、コストも含めた水素利用のための技術もさることながら、水素そのものを製造するために必要な1次エネルギーをどう確保していくかが、難しい問題となっている。究極のエネルギーといわれる水素エネルギーは、はたしてわれわれのものになるのか。可能性と現実の明暗に目を向けてみる。

写真：イ

開発進む水素エンジン車と燃料電池車 海外から水素タンカーが到着する日はくるのか

水素自動車の技術的な熟成とともに、次世代のクリーンカーテクノロジーとして水素を動力源とする燃料電池車の開発競争が始まっている。その一方でNEDOが実施している国の水素関連プロジェクトの第1期が終了しようとしている。構想では海外の安価な電力で水素を製造し、輸入することが計画されている。それによって水素自動車や水素燃焼タービンによる発電を行うという。液体水素タンカーが水力資源の豊富なカナダ、南米から日本をめざしてやってくる時代は来るのだろうか。自動車をめぐる潮流と、国家プロジェクトの現状を追う。

ガソリン車とかわらない運転の感触

この9月、新潟市で行われた緑化フェアに1台の水素自動車が登場した。フェアでは約2,500人がこの「低公害車」を見学し、うち約1,000人が試乗した。試乗者によれば、運転の感触はガソリン車とほとんど変わらなかったという。この水素自動車は武蔵工業大学が20年以上をかけて開発を続けてきた一連のモデルの最新型『武蔵10号』で試乗会は日本道路公団の協力を得て行われた。

『武蔵10号』には既存の2000cc ガソリンエンジンを改良した水素エンジンが搭載されている。燃料には液体水素を使用し、トランクスペースに搭載した100ℓの燃料で300kmを走行できる。最高速度も150km/hとかなり実用的なスペックだ。馬力そのものは、NO_x（窒素酸化物）を低減させることを重視したためガソリン車の半分程度となっているが、かなりの成果といえるだろう。

水素を燃料とすることのメリットは、いうまでもなく「低公害」という点にある。水素と酸素の反応では、水ができる。すなわち水素自動車の排気は水蒸気ということである。COP3でも問題になったCO₂の排出量は実質ゼロ。したがってもし世の自動車を水素式に切り替えることができれば、大幅な炭酸ガス排出量の削減につながる可能性は高い。ただし水素エンジンでも燃焼にともなって大気汚染に重要な位置を占めるNO_xのような有害ガスは発生する。NO_xを低減するためには、ガソリン・エンジンでも研究されているようにリーン・バーン（薄い混合気で燃料を完全燃焼させる）方式とするのが効果的である（外部混合燃焼でのNO_x特性のグラフ参照）が、水素エンジンの場合、ガソリンでは燃焼不能な燃料の濃度まできわめて薄くすることが可能であり、究極のリーン・バーン・エンジンが可能になるという。

『武蔵10号』では、この発想をとりいれた「外部混合式（シリンダー内に送り込む前に目的の濃度の混合気をつくっておく）」のメカニズムをベースにして、追い越しや高速走行のよ



武蔵10号。



武蔵10号のエンジン。



武蔵10号の水素タンク。



水素エンジンのベンチテストの様子。

うに大きな馬力が必要な場合にだけ燃料直噴装置によってパワー・アップするハイブリッド的なシステムが採用された。だが残念なことに現段階ではシステムの連携がうまくゆかず、燃料噴射装置は適切に作動せず外部混合のみでの走行になった。ただし外部混合のパワーだけでも実用的な基本走行が可能のように設計されていたため、先のような試乗者の好評を得ることができたという。

「NO_xを増やさないためには、馬力不足の分、単純にエンジ



高速走行性能を追究した8号車。



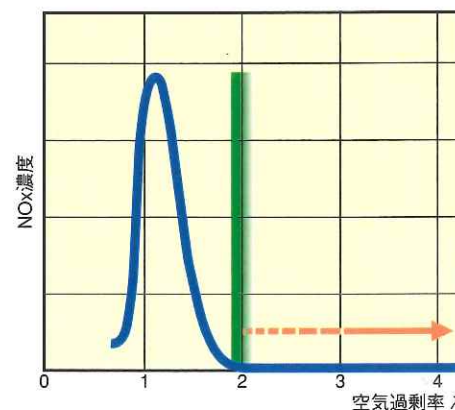
車内から見た
8号車の水素
タンク。



水素注入の様子。手
前はガス抜きパイプ。



水素エンジンをトラックに搭載した9号車。箱根のような急カーブ、急勾配の道路でも実用的な性能を発揮できることが実証された。



外部混合燃焼でのNOx特性

※空気過剰率が一定値をこえると（空気の比率が上がると）NOx濃度は激減することが分かる。



9号車の液体
水素タンク。

ン排気量を増やすという方法で対処することも可能です」（武蔵工業大学水素エネルギーセンター・山根公高助教授）。

山根助教授らは、燃料直噴装置によるガソリン車なみのハイパワーというテーマについても、実はすでに『10号』より以前の『武蔵8号』で達成していた。「単位時間あたりにたくさんのパワーを出さなくてはならない自動車には、水素エンジンは適しているでしょうね」。大馬力のガソリン・スポーツ車をベースに改造された『8号』は、水素直噴式のエンジンによって、ほぼベースのガソリン車に近い出力で高速テストコースを走ることができたという。

電気自動車やハイブリッドカーが達成できなかった高出力も、どうやら水素なら可能なようである。ただし、燃料直噴方式ではどうしても一定量のNO_xが発生してしまう。この問題を解決するには、ガソリン車にも適用されているように排気管に触媒を設けるという方法もあるが、すでに述べたようにリーン・バーンとする（空気過剰率を大きくする）ことでもEZEV

（Equivalent Zero Emission Vehicle／ゼロエミッション相当車）程度は達成できる。『8号』の後に動力性能面ではむしろ平凡ともいえる『10号』が開発された背景には、そうした事情があった。直噴との併用は成功しなかったものの、外部混合式への新たな道筋がつけられたことが『10号』の成果ということのようだ。

8号車と10号車の間にはトラックタイプの9号車があり、物流を担う荷物車も水素エンジンによって十分な性能をえられることが、9号車によって確認されている。

メーカーの開発が進む燃料電池車

CO₂ゼロの実現を可能にする水素エンジンだが、NO_xのような排気ガス問題から見る限りいわゆるZEV（Zero Emission Vehicle／無公害車）とはいえない。ZEVの導入をめぐるカリフォルニアでの法規制導入へのカウントダウンは有名だが、水素エンジンでは完全なZEVの条件をクリアすることはできないともいえる。米国の自動車メーカーであるGMあたりは、急速充電が可能なニッケル水素蓄電池式の電気乗用車を開発し、こうした時代の波に備えているが、充電スタンドなどのインフラ問題も難しいネックとなりそうな気配である。



トヨタが開発した燃料電池車。



トヨタの燃料電池ユニット。

こうしたゼロ・エミッションをめぐる自動車業界の潮流の中で、注目されつつあるのが燃料電池車である。

燃料電池については本誌でもVol.1 No.6の話題のプロジェクトで取り上げているが、原理は水の電気分解の逆の化学反応を利用し、水素と酸素の化学反応から電気を得ようというものである。燃料電池車とは、この電気でモーターを回すいわば燃料式の電気自動車である。燃料に水素を用いるため排出ガスが水蒸気のみででき、「燃やす」のではなく、より穏やかな化学反応により電気をえるためNO_xも発生しないなど、環境対策面できわめて有利な特性をもっている。次世代の低公害車として有望視されているこの種の燃料電池車も水素エネルギー技術の一部と考えていいだろう。

燃料電池車については国内ではトヨタ自動車が生産したRV車をベースにした試作車を走らせることに成功している。固体高分子電解質を採用した燃料電池ユニットと水素吸蔵合金を組み合わせたこの燃料電池車は、1回の水素充填（2kg）で250kmの定地走行ができ、45kWのモーターを用いて最高速度では100km/h以上を達成した。さらにトヨタは翌年1997年のモーターショーでは、メタノール改質式の燃料電池車モデルを出品している。メタノールを燃料に使えるタイプを加えたのは、燃料供給面でより実現性が高いと判断されたためようだ。メタノール改質式はメタノール（CH₃OH）と水蒸気を、触媒を用いて反応させ水素を取り出す。そのため改質の過程で多少のCO₂が排出され完全なZEVとはいえないのだが、トヨタのモデル車でも1回の充填で約500kmを走るなど優れた航続性を示し、その点でも現状のガソリン車やディーゼル車に比べ環境負荷を小さくできる可能性を秘めている。

海外のメーカーの中で燃料電池車の開発に先行しているのはダイムラー・ベンツだろう。ベンツはワゴン車タイプの最初の試作車を1994年に走行させてから、段階を追って性能向上を



ベンツの燃料電池車necar3。



ベンツの燃料電池バス。すでに公道を走っている。

達成してきており、昨年1997年にはコンパクトな3号車を開発し、走行させている。ベンツも1号、2号が水素式（こちらは高圧タンク）であったのに対し、3号はメタノール改質方式を採用してきている。この最新型は、38ℓのメタノールで400kmの距離を走ることができるという。最高速度はあえて120km/hに制限している。ベンツは将来への見通しとして燃料電池車の技術的な課題（メタノール供給の最適化、燃料電池のいっそうの小型化、低コスト化など）を急ピッチで解決し、2004年には量産第一号の市場投入を目標にしているという。その時の製造コストは「ディーゼル車なみ」にする予定だということから、これはなみなみならぬ決意といえそうだ。ちなみに量産とはいえないまでも公共の交通用としては、水素タンクを屋根に積載したベンツの燃料電池バスがすでに実用化され米国、ドイツ等で公道を走行している。

水素自動車の安全性

水素そのものではなく、メタノールを燃料とするところからスタートしそうな燃料電池車の開発競争だが、燃料電池そのものが必要とする燃料が水素であり、CO₂の排出量ではメタノールよりは水素が圧倒的に有利だということを考えると、水素を使用する燃料電池車の意義は大きい。とりわけ先に紹介したような水素エンジン車の有望性（既存のガソリンエンジンの技術を継承できるなど）も考え合わせれば、両者の併存の可能性もありうるだろう。

各種燃料の燃焼で発生する二酸化炭素 (CO₂)

燃料	代表分子	発熱量(kcal/kg)	CO ₂ (kg/Q)	ガソリンとの比較
石炭	C	8100	3.53	1.56
ディーゼル軽油	C ₁₆ H ₃₄	10400	2.33	1.03
ガソリン	C ₈ H ₁₈	10600	2.27	1.00
メタノール	CH ₃ OH	4770	2.25	0.99
天然ガス	CH ₄	11900	1.80	0.79
水素	H ₂	28700	0	0

(注) Q=ガソリン1lの熱量 (7800kcal/l)

ドイツではすでに国家プロジェクトで液体水素スタンドを開発している。これはある程度ロボット化され、液体水素を安全に自動注入できるシステムである。日本でも平成11年度からスタートする通産省のWE-NETプロジェクト(後述)第Ⅱ期で、水素スタンドのモデルシステムの研究を実施することになっている。

液体水素を燃料とするエンジン車の研究を集中的に行っているメーカーの例としては、BMWがあげられるだろう。液体水素を積載する場合に開発しなくてはならないのが燃料タンクである。20K(−253℃)という低温の燃料を貯蔵するため、その構造は魔法ビンのような断熱構造になるが、BMWは国の補助を得てこの液体水素タンクまわりの安全性の試験も行っている。

水素というと一般にはヒンデンブルグ号など水素飛行船の歴史的大事故の印象から、爆発性の高い危険な物質と考えられがちである。その点で安全性の検証と社会的認知が必要とされている。BMWは火災試験や貫通試験などいくつかの側面から実験を行い、液体水素タンクの「安全性」を確認している。

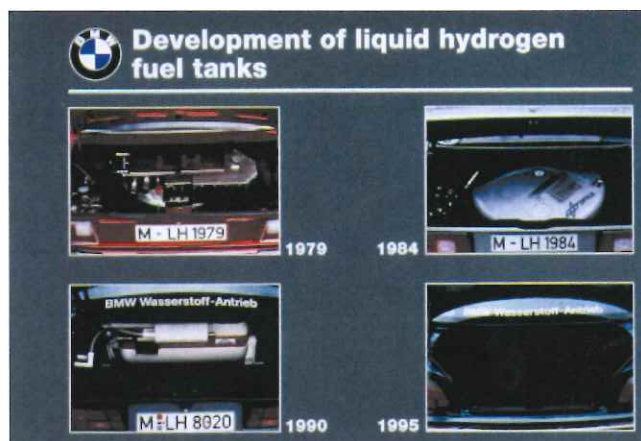
BMWの液体水素タンクはヒーターで液体水素を加熱し、気化した水素の圧力でエンジンに水素ガスを供給する方式を採用しているが一定以上の圧力になるとガス圧力弁が作動して破壊が起こらない構造になっている。そのため仮に火災が発生しても安全弁から水素が吹き上げるだけで爆発は起こらないことが確認されている。噴出した水素も拡散が速いため極端な燃焼は起こらない。

また衝突など外部からの衝撃によって鋼材がタンクを貫通した場合を想定した実験でも、爆発は起こらないことが分かっている。

「水素タンク内は還元雰囲気になっていて酸素が存在しません。ガソリン車が事故などで爆発を起こすのはタンク内に空気があるからです。水素自動車では水素だけですから爆発は起こらないんですよ」(前出・山根助教授)。山根助教授は安全性の面では、現在相当数が走っているLPG車との比較で考えればいいだろうという。「仮にタンクからガスがもれた場合にも下にたまるLPGに対し、水素は上へと上昇し拡散がきわめて速いため火災につながる可能性は低いといえるでしょう」。武蔵工業大学の液体水素タンクもほぼ同様の構造になっているが、水素のエンジンへの供給方法としてヒーター式ではなく、高圧



歴代のBMW水素エンジン車。通常のガソリン車と外見は変わらない。



BMWの液体水素タンクの進歩。最新式ではトランクを開けてもほとんど分からない。

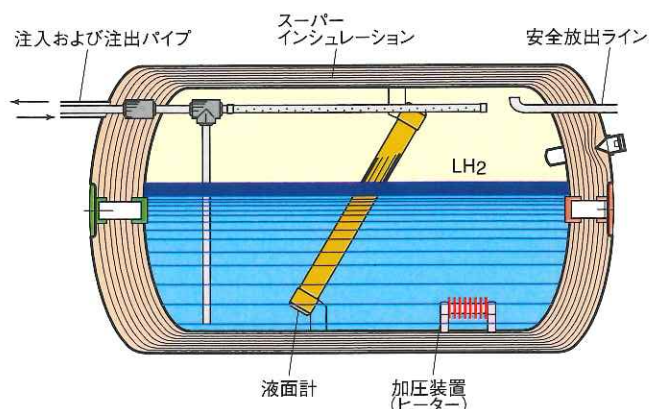


水素スタンドからの注入風景。

ポンプを使用している点がシステム上の大きな違いだという。

こうした液体水素燃料エンジンの自動車と燃料電池車が併存し、水素スタンドが整備されていくようなケースを想定すれば、燃料電池車にもメタノール改質ではなく水素を使うほうが汎用性があるとも考えられる。ただし液体水素の場合は上述のような特殊な断熱タンクが必要となるから、その分のコストや重量の上昇、パッケージングなどの点で、メタノールには利点があるだろう。

また空想の域を出ないが、もし燃料電池車に液体水素を適用するとすれば超電導カーの可能性も否定できないだろう。液体水素の20 Kという温度は、本誌Vol.3 No.2のTechno Scopeでも取り上げたように、高温超電導体の代表的材料であるビスマス系酸化物超電導体が安定した特性を示すポイン



自動車用液体水素タンクの構造 (BMW)。

トだからである。超電導磁石による強磁界を生かすことができれば、燃料電池車の性能はさらに向上するだろう。むろんコスト問題という重いテーマを解決したうえで話であることは予想されるが……。

海外の安い水力を利用した水素輸入構想

自動車を中心に話を進めてきたが、車の動力源を水素に代替していく技術は、環境面からも、また石油枯渇という可能性を考えた場合にも、きわめて多大な可能性を秘めていることが水素エンジン車や燃料電池車の開発状況を概観していくなかで見えてきたのではないだろうか。ガソリン、軽油ともに国内需要の9割以上が自動車向けである事実は、車の代替エネルギー開発の重要性を認識させてくれる。

ただし「石油代替」という発想をする場合には、忘れてはならないポイントがある。すなわち水素があくまで2次エネルギーだということである。つまり水素を使える形で取り出すためには、使用できる水素エネルギーよりも多量の1次エネルギーが必要になる。

現状、工業用の水素の使用量はLPGの10分の1以下（重量ベース）だが、製造の方法としては天然ガスから分離したり、ナフサやメタンなどの軽質炭化水素を改質したり、石炭をガス化するなど、さまざまなノウハウが使われている。これらの製造技術は工業的にもすでに確立されたものだが、共通しているのは、これら主要な水素製造方法の多くが化石燃料に依存しているという点である。

水素エネルギーへの期待は、水というきわめて豊富な資源から得られる点にあるが、電気分解をする場合にも、その電気が化石燃料起源ならば、かえって浪費にしかならないのである。したがって持続的な水素エネルギーシステムの実現には、1次エネルギーとしての電力をどこから調達するのが重要な鍵になってくる。そして1次エネルギーを含めたトータルな製造コスト面で、ある程度化石エネルギーと競合しうるものでなければ普及はおぼつかない。これはかなり厳しい条件といわねばならないだろう。

製造、輸送、貯蔵などによるロスが小さくないことを考えれ

ばコスト問題が大きな壁となって立ちはだかってくることは必ずである。値段の高い日本の電気（発電コスト10円/kWh前後）を使って電気分解を行うとなると、水素自体もかなり高価なものになることは避けられない。この解決策として現状もっとも現実的な方法が、電気料金の安い海外の電力、それも再生可能エネルギーである水力を用いて水を電気分解し、液体水素にして輸入しようという発想である。

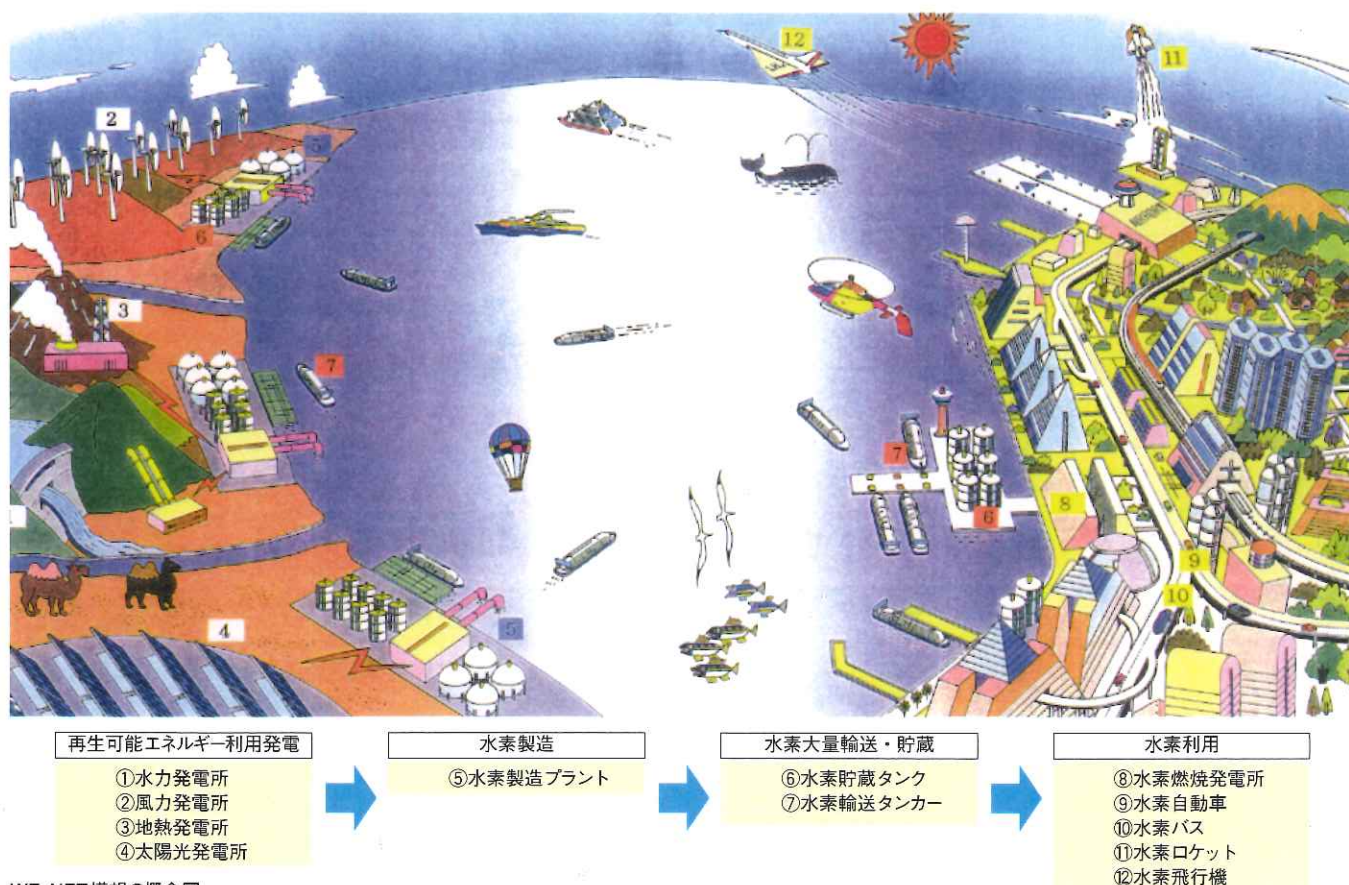
たとえばNEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）の試算によれば、カナダの2円/kWhという電力を使用して液体水素をつくれれば輸送費も含め32円/Nm³程度の価格にできるという。今もっとも安価な水素製造法は天然ガスからの改質法で、現時点で14円前後である。だがIPCC（気候変動に関する政府間パネル）によれば今は安いこの天然ガス蒸気改質法も2010年には33円以上になるとの見通しもあり、水電解法のコストダウンがうまく進めば、十分に競合しうるとも考えられる。

通産省のニューサンシャイン計画の一環としてNEDOによって推進されているWE-NET（World Energy NETwork）プロジェクトは、このような海外の再生可能エネルギー資源によって製造された水素を輸入し、環境問題と石油枯渇時代のエネルギー問題に備えるという発想を根幹としている。同プロジェクトは平成10年度で第Ⅰ期が終了し平成11年度から第Ⅱ期に入るが、海外の安価な電力を使用して製造した水素の輸入は、第Ⅲ期での実現が目標とされている。NEDOの見通しによれば、一連の技術開発によって、うまく水素関連技術のコストダウンが進んだ場合、2030年から40年にかけて水力発電による水素エネルギーの導入が始まり、2040年にはわが国の総エネルギー供給のうち、約3.5%程度が水素エネルギーになっていくだろうという。

だが、1次エネルギーとなる肝心の海外の水力資源とはどのくらいあるのだろうか。ある資料によれば、現状、開発が可能だが着手されていないもの、インフラや交通事情の整備をすることで開発が可能なるものを合わせると、アジア、アフリカ、中南米あたりにはかなり豊富な水力資源が期待できると考えられている（事項・世界の水力資源参照）。当面はカナダの安価な電力に期待するとして、いずれこれらの地域での水力開発を考えていくということになるのだろうか。

むろん水素エネルギー開発をめざしているのは日本だけではない。EUはカナダとの共同プロジェクトEQHHPP（Euro Quebec Hydro-Hydrogen Pilot Project）を実施しているし、米国DOE（エネルギー省）の水素プログラムは、2010年には国内で販売する自動車の25%を水素にするという旗印を上げている。

もし水素エネルギー技術の実用化がうまくいった場合、今度は水力資源に各国が殺到するような事態が起こってくることもありえるだろう。その際には新たな水力資源の開発が課題にな



WE-NET構想の概念図。

世界の水力資源（GWh/年）

	開発可能	既開発	未開発	開発率
アジア	4,334,528 (28.7)	367,498 (18.0)	3,967,030 (30.3)	8.5%
アフリカ	1,153,600 (7.6)	35,775 (1.7)	1,117,825 (8.6)	3.1%
北アメリカ	968,982 (6.4)	536,127 (26.3)	432,855 (3.3)	55.3%
中南米	3,535,900 (23.4)	362,800 (17.7)	3,173,100 (24.3)	10.3%
ヨーロッパ	1,073,300 (7.1)	485,376 (23.7)	587,924 (4.5)	45.2%
旧ソ連	3,831,000 (25.5)	219,800 (10.8)	3,611,200 (27.7)	5.7%
オセアニア	202,000 (1.3)	36,945 (1.8)	165,055 (1.3)	18.3%
	15,099,310 (100.0)	2,044,321 (100.0)	13,054,989 (100.0)	13.5%

開発可能：インフラなどの整備によって開発が可能になるもの Water Power1989-9より

ってくるだろうが、その場合あくまでも水力開発が環境や生態系の破壊に直接関係する要因となることも忘れてはならない事実である。CO₂の増加現象は、化石燃料の使用以上に森林や生態系の破壊による部分のほうが大きいという見方もある。環境との整合性を適切に評価する方法や手順をどうやって取り入れていくのが重要になってくると考えられるだろう。

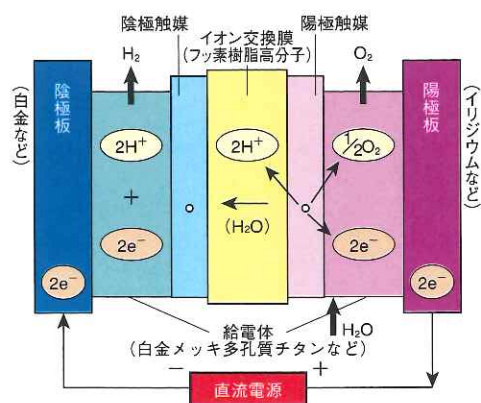
WE-NETプロジェクトによる新技術の開発

話を少しもどして、WE-NETプロジェクトで研究開発が行われている技術にもう一度目を向けてみよう。まず第Ⅰ期では新たな水素製造法の技術として、固体高分子電解質を用いた水の電気分解法の基礎技術が開発された。従来の電解法は、水に水酸化カリウムなどを溶かしてアルカリ水溶液として通電するというものである。この方法でも高温高压にすることでエネルギー変換効率を85%くらいまでに引き上げることができた

が、固体高分子電解質水電解法は、フッ素系の高分子膜を用いた新たなノウハウの成功によって、90%以上の電解効率が達成できるようになった。WE-NETプロジェクトでは装置的にもコンパクトにできるこの固体高分子電解法を水素製造の主役にしようと考えているようだ。

プロジェクトで、もうひとつの大きな焦点となるのが水素燃焼タービンの開発である。現在すでに発電用のガスタービンはさまざまな形で実用化されているが、水素と酸素を燃焼させるためのタービンの技術と、それによる大規模発電システムの実現がめざされている。最近のガスタービンシステムでは効率を高めるためにガスタービンでの発電の後、排熱を熱交換器で回収し、蒸気タービンで再利用するという方法が考案されてきた。水素燃焼タービンでは、燃焼ガスが水蒸気であることから、排気をそのまま蒸気タービンに使えるため同様のシステムで60% (HHV) の効率が期待できる。また酸素と水素だけを燃焼させるこのシステムでは、窒素が入りこまないためNO_xが発生する心配もない。

第Ⅰ期では、水素燃焼タービンの技術的な検討とともに、水素の燃焼実験を経て、データの収集が行われた。続く来年度からの第Ⅱ期では、水素燃料のコージェネレーションシステム等の水素を分散して小規模に利用する技術へプロジェクトの重点が移される見込みである。この段階では天然ガスを改質した水素が使われる。化石燃料起源の水素にならざるをえないが、「水素エネルギーを社会に導入していくための段階を踏んだア



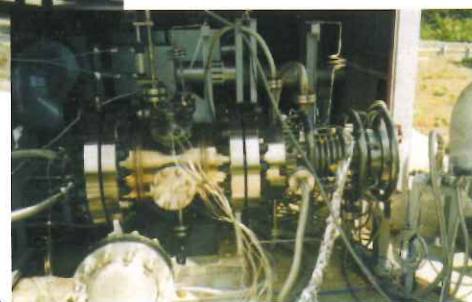
固体高分子電解質水電解の原理。



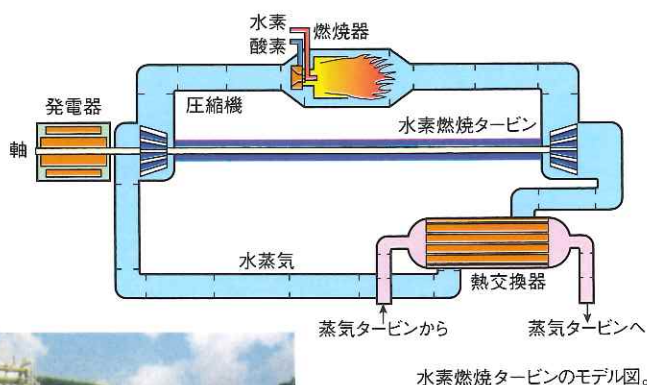
固体高分子電解質水電解法の試験設備
(2500cm²セル評価試験設備)。



水素-酸素燃焼試験設備 (秋田県)。



水素-酸素燃焼試験装置本体。



水素燃焼タービンのモデル図。

プローチ」(NEDO 水素・アルコール・バイオマス技術開発室・吉川政彦主査)とのことで、再生可能エネルギーによる水素利用は第Ⅲ期以降に実現したいとしている。

プロジェクトでは固体高分子電解質水電解法や水素燃焼タービン以外にも、輸送や貯蔵のための技術や概念の評価が行われ、水素エネルギー導入へ向けてのシナリオが練られている。先叙した武蔵工業大学の水素自動車も、独創的産業技術研究促進事業の一貫としてNEDOのバックアップを受けているという。

金属関係の技術としては、液体水素をあつかう際の低温材料研究や、水素脆化の研究などが(財)金属系材料研究開発センターへの委託事業として実施されている。水素脆化の問題については「自動車に関していえば、ほとんど気にならないレベル」(山根助教授)とのことだったが、将来は航空機への適用も当然考えられており、H2 ロケットのLE-7 エンジンの開発では水素脆化対策が講じられていることから、航空機開発に際しては再度注目されるかもしれない(水素飛行機については、ドイツ、ロシアが中心になって2000年の初飛行を目標にデモンストレーション用の改造機を製作している)。

1次エネルギーさえ確保できれば、水素エネルギーの技術はけっして非現実的なものではないだろう。水力開発の問題をうまくクリアできれば、かなり希望が持てそうでもある。ただし先に述べたように、水素エネルギーの開発が、新たな水力開発を通じて生態系破壊につながるようなことには、十分な対策が必要かもしれない。

水素燃焼タービンによる発電は、たしかに使用地にとってはクリーンなものだが、電力→水素→電力の過程で60%以上が失われる電力の輸入であり、輸出国の環境問題とのバランスが微妙だという点を常に考慮に入れておく必要があるようだ。

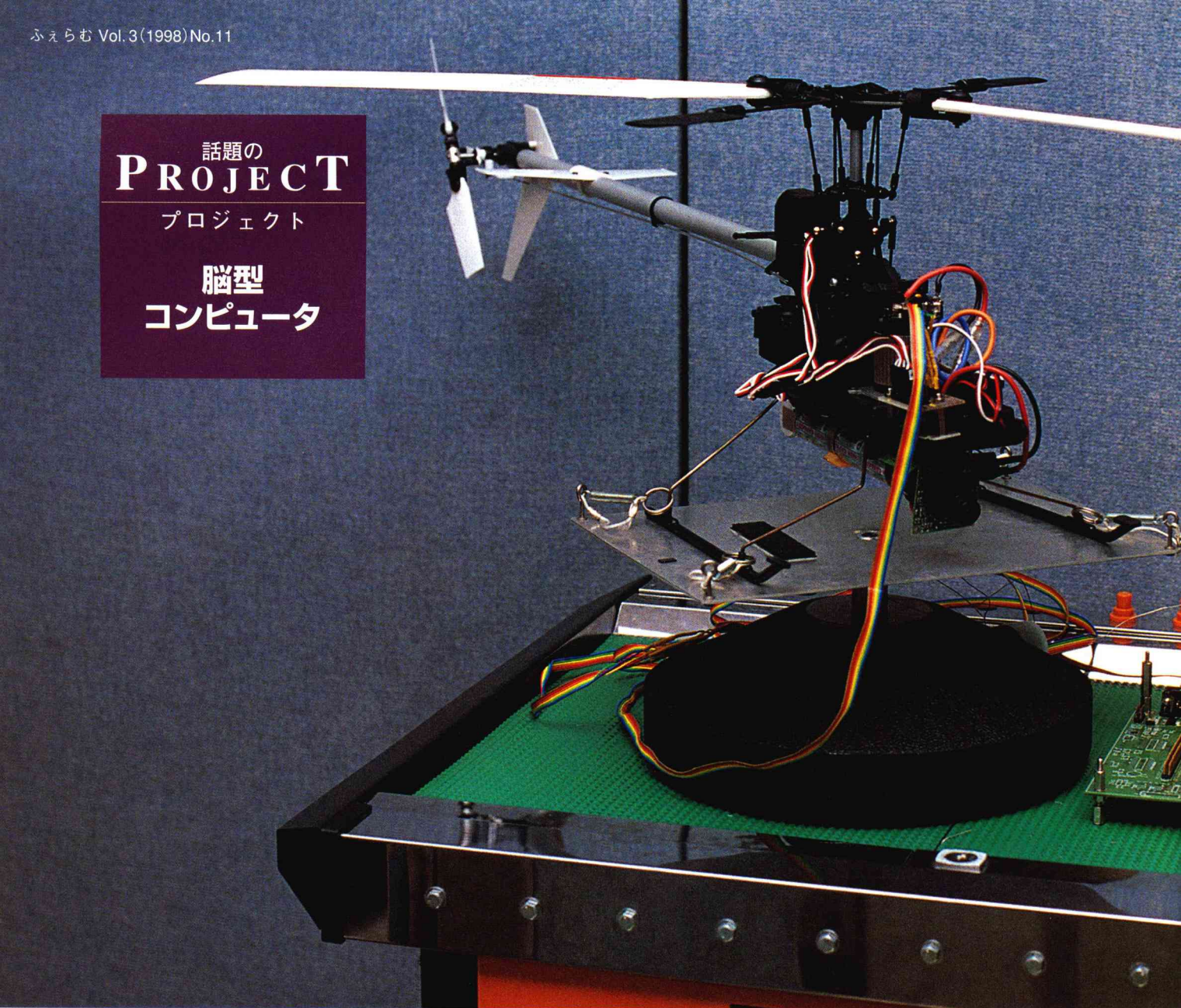
砂漠で太陽電池を使って水素製造を行うというプロジェクトもかつてドイツとサウジアラビアによって研究されているが、最終的な問題は製造コストにかかってくる。砂漠の5%を太陽電池で覆えば世界全体のエネルギーをまかなえるという議論はいまだ生きているが、国内用の電力としても当分は十分な競争力が期待できない太陽電池で水素を製造するということは、新たなブレイクスルーがない限り現時点では夢物語というべきかもしれない。

山根助教授は水素自動車導入のチャンスは2回あるという。もし地球温暖化への危機感や世論が高まっていった場合、2005年には水素自動車は公道を走り始めるのではないかと。もし、その時期をのがせば、水素関連技術がある程度充実してくる2030年頃になるだろうという。石油文明が過去のものになるまでには今後も予想不可能なさまざまな技術要因や経済要因が関与してくることになるとは考えられるが、たとえば電気では飛行機を飛ばすことがきわめて困難だということをひとつ取ってみても、文明の後退を想定しない限り水素エネルギーへの道は必然と考えざるをえないかもしれない。

取材協力・写真提供：武蔵工業大学水素エネルギーセンター、新エネルギー・産業技術総合開発機構、ビーエムダブリュ(株)、トヨタ自動車(株)、メルセデスベンツ日本(株)

話題の
PROJECT
プロジェクト

**脳型
コンピュータ**



インテリジェンスを持ったコンピュータの開発

蓄積された脳の生理機能の研究をベースに プロトタイプ開発に着手

「2001年宇宙の旅」で描かれたHAL9000のような
インテリジェンスを持ったコンピュータ（人工頭脳）を作りたい。
これは人間の見果てぬ夢なのだろうか。

脳の生理機能を解明することから、真の人工頭脳を作り出すことができるのではないか。
そう考えて研究を進めているグループがある。

理化学研究所脳科学総合研究センター脳型デバイス・ブレインウェイグループ

脳創成デバイス研究チームの市川道教チームリーダーに、研究の現状をうかがった。



神経細胞機能を電子回路で再現したNNPの実験に用いられている模型ヘリコプター。

AI・ニューラルネットワークの限界

人間の脳は、150～1000億個の神経細胞で構成された複雑な情報処理システムと考えられている。しかも脳は、コンピュータ（電子計算機）のようにあらかじめプログラムが組まれていなくても（やり方を知らなくても）、またいくつかデータが不足していたとしても、なんらかの結論や答えを導き出すことが可能であり、そのうえかなり高速で処理することができる。

こうした「あいまいさ」を処理したり学習能力をもったシステムを人工的に作り出そうというアイデアは、意外に古くからあった。その一つが人工知能（AI）である。AIの説明によく使われる例として、医療診断用エキスパートシステムがある。医師が患者に対して問診を行い、病名を診断していく際の論理をコンピュータのルールに従って書き下ろし、対話しているうちに「あなたは風邪です」とか「糖尿病の疑いがあります」といった判断を行おうというものだ。

AIは一時ブームとなり、いろいろなエキスパートシステムが研究されたが、一部の例外を除いて成功したとは言い難い。エキスパートシステムの仕組みを簡単にいってしまうと、脳の入力と出力関係だけに着目して、貯えられた知識をもとに推論を行おうというものだ。しかし、人間が判断するために利用している知識や経験は膨大であり、すべてをルール化することはできそうにない。またできたとしても、そのためには大変な手間を要してしまう。処理する問題が複雑になればなるほど、その手間も飛躍的に増加する。

一方、脳を実現するもう一つの方法として12～13年前に注目されたのが、ニューラルネットワークである。動物が何かの刺激を受けると、脳では神経細胞が次々に情報を伝達し、どう対処するか判断し命令を出す。そのとき情報は単一のルートを通るのではなく、複数の道筋を経て脳内の各部分に伝達されていく。脳が高速に情報を処理できるのは、この並列分散処理によって直観的に思考しているからだと考えられる。ニューラルネットワークは、こうした神経細胞における情報伝達の仕組みを電子的に置き換えて、不完全な情報や一部矛盾した情報があっても、人間のように高速に処理できるシステムを実現しようとするものだった。

しかし、ニューラルネットワークも、いくつか壁にぶつかっている。処理速度の高速化という点では成果が上がっているが、処理の内容によっては、従来型コンピュータのほうがより高速に処理できる場合もある。またあまり複雑な推論をさせると、うまく処理できないといった欠点が指摘されるようになった。

神経回路の働きと脳全体の理解を同時に進める

脳をブラックボックス化して、入出力関係だけに注目したマクロ的な手法であるAIも、神経細胞の働きに注目したミクロ的な手法である並列分散処理システムも、脳の機能を実現するには不十分だった。脳型デバイス・ブレインウェイグループでは、その両面から検討していく必要があると考え、現在、研究を①脳の生理機能の解明、②脳型デバイスの制作、③具体的なアプリケーションの実現という3つの方向に定めている。

脳研究は古くから取り組まれてきたが、脳内の生理機能に関する具体的な成果が上がってきたのはつい最近のことだ。また論理的な思考をつかさどっているといわれる大脳新皮質の研究はある程度行われてきたが、海馬などの大脳辺縁系の研究は、部位が奥に位置することもあってなかなか進んでこなかった。特に回路を設計するために必要な定量的研究はほとんどなされていないという。

一方、神経細胞の働きを電子回路を使って実際に作ってみることで、現在、脳の働きに関するどのようなデータが欠けているのかがわかってくる。同研究グループでは2年前にニューラルネットワークプロセッサ(NNP)と呼ばれる神経細胞の機能を

ニューラルネットワークプロセッサ(NNP)

2年前に試作されたNNPは、神経回路と同じ並列分散処理をハードウェアで実現したプロセッサだ。神経細胞には隣接する1万～10万の組織からさまざまな刺激が伝達される。ところが、1つの神経細胞から出力される刺激はたった1つしかない。しかもどのような条件が整えばある刺激を出力するのかは、細胞ごとに違いがあるという。NNPは、この神経回路と同じ働きを電子回路によって実現している。

NNPの処理能力は、計算させる内容にもよるが、25MHzで動作するNNP1チップでおよそ1000個分の神経細胞と同じ能力(200MHz動作のペンティアム相当)がある。また200チップ程度なら並列動作させることが可能で、約300Wの消費電力で20万～50万個の神経細胞に相当する処理能力(スーパーコンピュータ並み)を持たせることも可能だ。処理はNNP用に開発された専用言語を使って行われる。

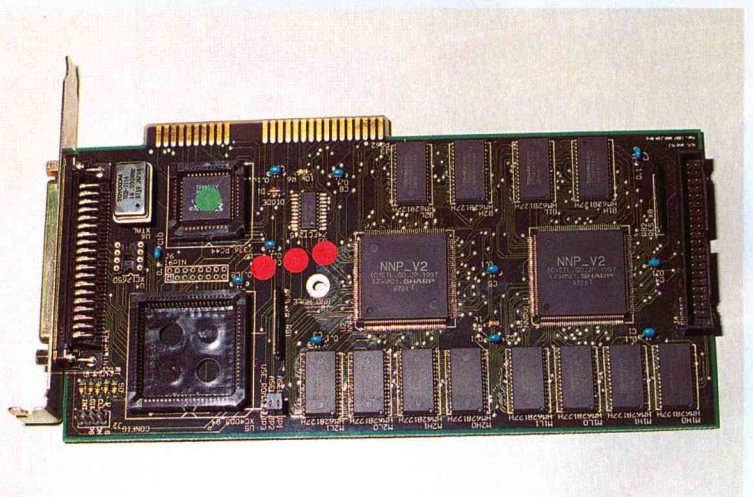
ニューラルネットワークは、まず仮説を立ててからその検証を行うという手順で処理を行う際に、非常に柔軟に処理を進めることが

可能という利点を持っている。

たとえば、人間はときどき見間違いをする。街を歩いていて、友人によく似た人を見つけると「彼だ」と思ってしまう。ところが近づいてよく見ると、ぜんぜん違う人だったということがある。これは、実際に目から入った情報が神経細胞に届き、友人と同一人物かどうかを分析する前に、彼を認識している神経細胞の側で発火が起こっているからだ。従来型のコンピュータでは、ある変数値について処理を進め、条件に合致しなければ最初に戻ってやり直すことを繰り返すことになるが、ニューラルネットワークでは無駄なく処理が進められる。

現在のNNPは、自立的に学習する能力(学習制御機能)は持っていない。重要な処理手順や誤り、禁止事項については人間が指示してやる必要がある。この部分の研究が進むことで、脳が学習するメカニズムが解明される可能性もあるという。

NNPチップ(写真左)。NNPチップを組み込んだボード(写真右)。



組み込んだLSIを試作し、一定の成果を収めている。

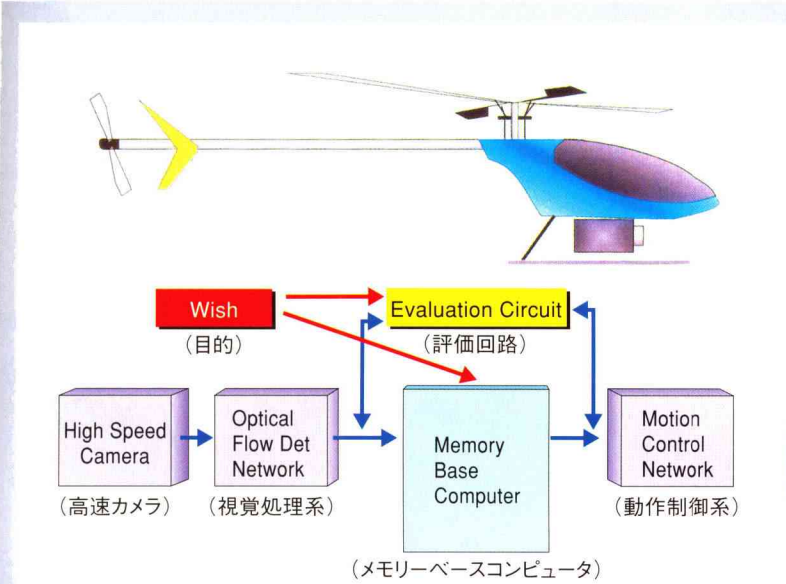
アプリケーションの実現に関しては、模型ヘリコプターを自律的に飛行させる実験を行っている。脳の働きの特徴は「学習」機能にある。学習機能をどのように定義するかは難しい問題だが、本能的に持っている知識・機能に、経験によって得た新たな知識を加えながら自立的に目的を達成していく能力を獲得することとも考えられる。

模型ヘリコプターに事前に与えられているのは、飛行するために必要な基本的な機能だけ。これが本能にあたる部分だ。機体には超高速カメラが取り付けられており、自身の位置・角度に関するデータが刻々と入力される。ヘリコプターはカメラから入ったデータを即時に処理しながら、自身の位置を修正して安定して飛行するよう学習能力が与えられている。現在は、ヘリコプターを離陸させ、ある位置に静止するところまでを目

指して研究が進められている。

現在、急に飛び出してくる障害物を避けながら、目的地まで半自動的に走行できる自動車の研究が進んでいるが、脳型コンピュータはその基礎技術としても有望だと予想される。また自動翻訳や画像認識など、不確実であいまいな情報を処理しなければならない用途に適していると考えられる。もちろん、ワープロや表計算といった処理では、従来のコンピュータのほうが速度やコストの面から考えて、有利な面も多い。両者は、必要に応じて使い分けされるものと思われる。ただ、最終的な研究目標としては、自ら目標を設定し、自身で判断しながら処理していくという本当の意味での「人工頭脳」、意識や発想を持ったコンピュータの開発に取り組んでいくという。

[取材協力：理化学研究所]

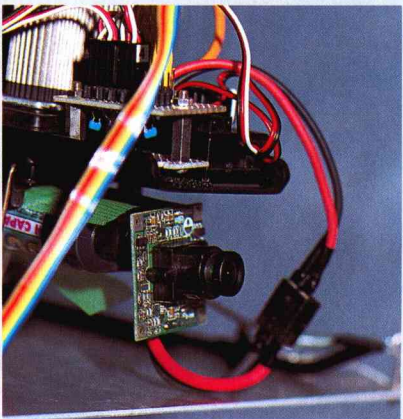
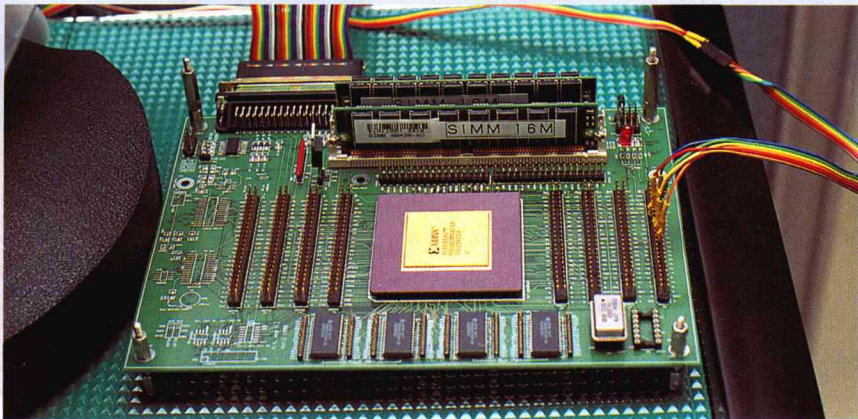


模型ヘリコプター実験

ヘリコプターには上昇や前進、姿勢制御などの基本機能（本能）と、離陸してある位置で静止するという目的が与えられている。ヘリコプターは目的を達成するため、高速カメラから入ってくる情報を処理し、その経験をメモリーベースコンピュータに蓄積しながら学習していくシステムになっている。

ヘリコプターが選ばれた理由は、室内など限られた空間でも実験が可能なこと、飛行機などに比べ、ヘリコプターの制御が比較的難しいこと、農業散布など経済的用途が考えられることなどがある。これが完成すると、オートドライブシステムなどへの応用は比較的簡単に進むという。

処理を担当するプロセッサ（写真左）。
前端部に取り付けられた高速カメラ（写真右）。



脳組織の光計測法

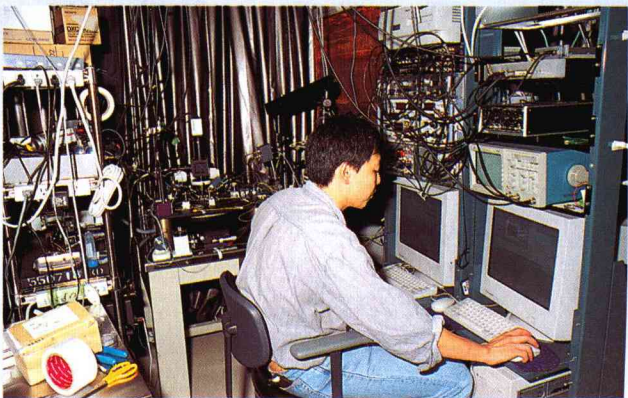
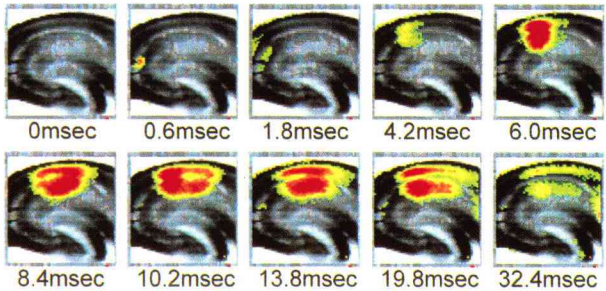
外界から受けた刺激に対して、脳内のどの部分が反応しているのかを解明する研究が盛んに行われている。その結果、視覚野とか運動野など、大脳のどの部分がどんな機能に関係しているのかが徐々にわかってきている。

こうした研究は従来、細胞組織に電極を刺し電流の流れや電位差を測るという方法で行われていた。脳型デバイス・ブレインウェイグループでは、ボルテージ・センシティブ・ダイ（電圧感受性色素）と呼ばれる色素化合物で染めることにより、非接触で高速・連続して神

経活動を記録する方法を開発した。この計測法を使うことで、刺激が脳組織内をどのように伝わっていくのかが明らかになってきた。

ラットを使った実験では、海馬は一時的に記憶を貯えておく、コンピュータのバッファに似た働きをしているらしいことがわかってきた。

ラットの海馬組織内を刺激が伝わっていく様子をコマ何ミリ秒単位で計測した結果（図左）。
神経細胞組織の刺激伝達を観測する光計測装置（写真右）。





Steel Landscape

鉄の点景

ピアノ線は、JIS規格(G3522)に準拠し、ピアノ以外にもワイヤーロープやPCワイヤー、タイヤの補強材(スチールコード)、ばね材など、さまざまな工業的用途に用いられている。名称そのままにピアノに用いられるものは、とくに今日ではミュージック・ワイヤーと呼んで区別しているようだ。もともとはピアノのために生まれた線材の加工技術が、現代のきわめて重要な技術に結びついている事実を、ピアノ線の歴史を追っていくことで容易に理解することができるだろう。今回は音楽用に使われるミュージック・ワイヤーをひとつの手がかりに、ピアノ線というものに目を向けてみる。



音を奏でる鉄

ピアノ線

1854年に開発された微細パーライト結晶生成の技術

グランド・ピアノのピアノ線には、もっとも高音用の細いもので13番手（0.775mm）といわれるものから、太いものでは26番手（1.6mm）くらいのもので約230本（88キー分）のミュージックワイヤーが使用されている。低音用では銅線のまわりに銅をコイル状に巻いて線密度を高めてある。ミュージックワイヤーは、製法や材質などの点では一般的な工業用のものとさほど変わらないが、音楽用ということで、とくに断面の真円度を重視しているという。もし断面が楕円だとX方向とY方向で固有振動数が変わってしまうために唸りが生じて音が濁るのだそうだ。

ピアノ線の製造方法は、線材をパテンティングと呼ばれる熱処理をした後、冷間で数段階にわたって引抜加工し、その間にボンデ処理を行うことで表面にリン酸亜鉛の被膜をほどこす方法をとっている。この工程によって線材は引っ張り強さで250kgf/mm²（約2451N/mm²）程度に仕上げられる。パテンティングとは約900℃に加熱した線材を約570℃にまで急冷した後しばらくその温度を維持するという手法である。これによって微細パーライト組織が形成され、ピアノ線特有のねばりと強度が生まれる。約570℃という特定の温度で急冷をとめるために製造ラインでは急冷用に溶融鉛が使われる。「パテンティングは1854年に英国で初めて考案されてから、経験的にその方法が受け継がれてきましたが、メカニズムが解明されたのはずっと後のことです」（鈴木金属工業研究開発部長・落合征雄氏）。

グランド・ピアノではこの線を約100～90kgf/mm²程度（1.5～3倍程度の安全率）で張る。したがって230本のピアノ線が張られたフレームにかかる引っ張りは合計で20tにもおよぶ。この強大な引っ張りを支えるフレームには、鋳鉄（FC15～FC20くらいのもの）が用いられる。鋳鉄を使うのは複雑な形状を一体成型できることと、鉄としては振動エネルギーの内部損失が比較的高い材質を使うことでメタリック・ノイズ成分を抑え澄んだ音にするためである。

「約100kgf/mm²の力で引っ張られたピアノ線は、応力弛緩現象（リラクゼーション）によって微妙に伸びを生じて律の低



伸線機によるピアノ線の製造工程。



出荷前のミュージック・ワイヤー。

下をまねきます。ピアノが定期的な調律を必要とするのはおもにこのためです。またハンマーでくりかえしたたかれることで疲労（ファティグ）が蓄積されていくと、ついには断線ということも起こりえます」（ヤマハ・ピアノ技術部長・林田甫氏）。

ブルジョワ層のピアノ需要に应运

ピアノは1709年フィレンツェのチェンバロ製作者バルトロメオ・クリストフォリによって発明された。メディチ家の保護を受けていたクリストフォリは1698年には新しい楽器のアイディアを温めていたとされ、その目標はピアノもフォルテも出せるチェンバロだった。チェンバロとは鍵盤をもった撥弦楽器（はじ

いて音を出す）で、国によってはハープシコードの名で呼ばれる。弦をはじくチェンバロでは音の強弱の差によって激しい感情表現をすることはできなかった。クリストフォリの「グラヴィ・チェンバロ・コル・ピアノ・エ・フォルテ」なる楽器は、ハンマーで弦を「打つ」ことでピアノ（弱）からフォルテ（強）までの音の表現を可能にしたのだった。

鍵盤の起源そのものはオルガンの歴史とともにあり、欧州では中世からルネサンスにかけて整っていったようである。オルガンはいわば送風装置をつけた管楽器であり、初期のものでは音階順にならべたパイプへの送風を断続させるためにシンプルなレバーが設けられていた。このしくみが、より自由自在に音を選択できるようにと工夫され鍵盤になっていったようである。

こうして生まれた鍵盤をハープのような撥弦楽器と組み合わせたものがチェンバロであり、さらに打弦という発想によって変幻自在の表現力を秘めるピアノへと結びついた。ピアノは誕生後ハンマーのアクションや弦の張りかたなどがさまざまに工夫されていく。時まさに産業革命前夜。複雑なメカニックによって「鉄」を打つ楽器は、音楽にとってなくてはならない重要な要素となっていた。

その後、産業革命によって誕生した新興ブルジョワ階級の人々は教養と社交の道具あるいはシンボルとしてピアノを求めた。その需要に応えるなかで良質のピアノ線づくりの開発がめざされ、先述のようなパテントという高炭素鋼の熱処理技術が生み出されたのである。パテントとは今日でも工業上の特許をさす言葉だが、当時この技術はまさしくパテントであり熱処理特許の嚆矢であったという。

長大橋や、海底光ケーブル（補強材）、ICリードフレーム金型の加工には不可欠なミクロン単位の放電加工ワイヤーなど、いわゆる先端的な分野で今日でも使われている重要な線材加工技術が、もともとはピアノのために開発されたものだったという事実は興味深い。

〔取材協力・写真提供：ヤマハ(株)、鈴木金属工業(株)〕

浜松市楽器博物館

1995年にオープンした日本初の公立楽器博物館で、ヨーロッパ、日本、アジア、アフリカの各地域ごとに世界各地の楽器が展示されている。国産化が実現した明治時代のオルガンやピアノ、ヨーロッパのさまざまな時代のピアノの展示を見ることができる。

休館日は月曜日と祭日の翌日、年末年始。

問合せ先：TEL. 053-451-1128
JR浜松駅より徒歩7分





鉄鋼のさらなる高強度化の可能性

牧 正志
Tadashi Maki

京都大学 工学研究科
材料工学専攻 教授

Possibilities of Further Increase in Strength of Steels

1 はじめに

現在、実用に供されている鉄鋼材料の最高強度はマルエージ鋼の約2.5GPaである(ただし、細線ではピアノ線の約3.0GPa)。この2.5~3GPaという値は鋼の理想強度の1/4程度であり、我々は鉄鋼の有する本来の強度能力をいまだ十分に利用していない。実は、鉄鋼材料に限らず、チタン合金やアルミ合金でも実用合金の最高強度は理想強度の1/4~1/5程度であり、この辺りにすべての金属材料に共通した高強度化の大きな壁が存在しているように見える。鉄鋼材料はどこまで強くなるのであろうか。

強化の難かしさは、それを阻害する要因(例えば、溶接性、プレス成形性、被削性などの加工性、および疲労破壊、遅れ破壊などの各種破壊)を克服せねばならぬところにある¹⁾。しかしここでは、このような阻害要因については触れず、主として組織制御の観点から、鉄鋼材料のさらなる高強度化の可能性と問題点について考えてみる。

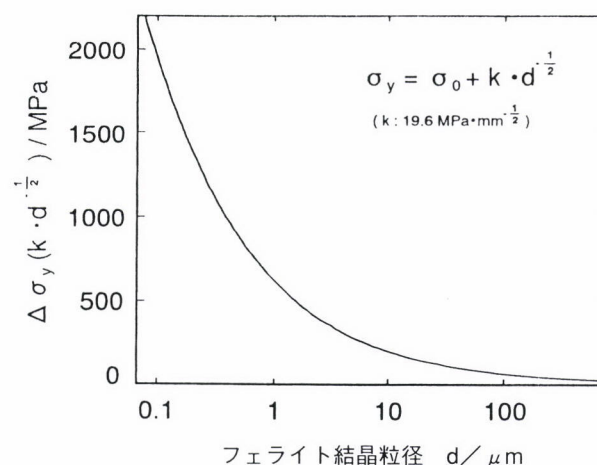


図1 フェライト結晶粒径と強度の関係

2 強化の素機構から見た高強度化の可能性 析出強化の重要性一

強化の素機構には、固溶強化、転位強化(加工強化)、粒界強化、析出(分散)強化があり、転位論によって定量的に強度を予測することができる²⁻⁴⁾。我々は各種強化機構の強化能力を現在どの程度まで利用しているのであろうか。

固溶強化は、合金元素の固溶量に制限があるため、本質的に大きな強化は望めない(ただし、後述する炭素鋼のマルテンサイトの場合は例外である)。粒界強化(強度は結晶粒径の $-1/2$ 乗に比例する)および転位強化(強度は転位密度の $1/2$ 乗に比例する)による強度上昇を図1および図2に示す。結晶粒径および転位密度がある値を越えると強度上昇が著しくなるのが分かる。現在、実用鋼で種々の方法を駆

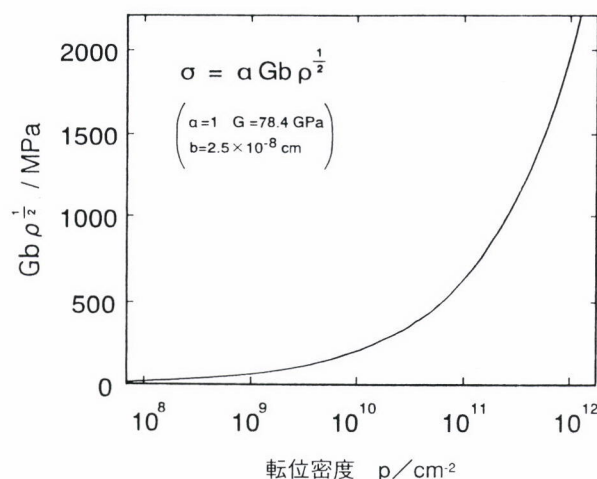


図2 鉄中の転位密度と強度の関係

使して得られている最も微細な結晶粒径は数 μm 程度、最高転位密度は高々 $1 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ 程度である。皮肉なことに、これらの値はちょうど強度上昇が急速に大きくなり始めるあたりの組織状態にある。実用金属材料の最高強度が長年頭打ちになっているひとつの理由はおそらくここにあるのであろう。これらの強化機構の有する強化能力を最大限に引き出すには、結晶粒径で $1 \mu\text{m}$ 以下の超微細粒、転位密度で $5 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ 以上の超高密度転位組織という、現状の組織制御手段では到達し難い大きな壁を破らねばならない。

四つの強化機構のうち、強化能力が最も大きいのは析出強化である。図3はオロワン機構によって強度が決まるとしたときの析出粒子間距離(λ)と強度の関係を示す。析出強化の場合も、粒子間距離がある値(約30nmあたり)以下になれば急激に強度が上昇するのが分かる。図4は球状析出物が均一に分散した場合の、析出物の直径(d)、体積率(f)と粒子間距離(λ)の関係を示す。通常の析出粒子の大きさが数nmから数10nm程度であることを考えれば、粒子間距離30nm以下という析出組織を得ることはそれほど困難なことではない。特に、析出物の量が10~20%と多くなると、比較的大きな析出物でも小さい粒子間距離が得られる。つまり、析出強化はその強化能力を最大限に活用することが出来る最も現実的な強化法なのである。

析出強化の研究や利用が最も進んでいるのはアルミ合金である。鉄鋼材料においても、析出強化を利用したマルエージ鋼や二次硬化鋼があるが、アルミ合金に比べるとまだまだ研究が少なく、析出強化による高強度化の可能性を徹底的に追求していく必要があると思われる。時効析出に関しては、アルミ合金から教わることは多い。

過去に鉄鋼材料の極限強度を最も精力的に追求したが、河部らの金材技研のグループであろう。彼らは、マル

エージ鋼を対象に特殊加工熱処理を駆使し実験的に最高強度4.4GPaを得ているが、通常は3GPa程度で強度が頭打ちになる傾向があり、それ以上の強化は極めて困難であることを示している⁵⁾。析出強化を最大限に利用したマルエージ鋼の強度が、なぜ3GPa程度で頭打ちになるのだろうか。これは、このような高強度にすると低応力破壊がおこるようになり強度上昇が制限を受けるためである。この壁を破る方法は、母相オーステナイトの微細化にあることが河部⁵⁾によって指摘されている。つまり、低応力破壊の開始は結晶粒径に大きく依存し、マルエージ鋼では図5⁵⁾に示すようにオーステナイト粒径が $5 \mu\text{m}$ 程度(現実に得られる最も微細な粒径)なら実際に得られる最高強度は3.5GPa程度であり、たとえそれ以上に強化(硬化)されても引張試験すれば低応力破壊を起こして強度が出ない。これが、マルエージ鋼の最高強度が3GPaあたりで停まっている理由である。しかし、オーステナイト粒径を $2 \mu\text{m}$ 程度にできれば引張強さ4GPaが得られ、もし $0.5 \mu\text{m}$ の超微細オーステナイト粒が得られれば4.5GPaを越す超高強度が達成されることを図5は示唆している。マルテンサイト鋼において、析出強化を最大限に活用出来るかどうかの鍵は母相オーステナイト粒の超微細化にある。

③ セメントタイトの析出強化への活用

鉄鋼材料の大きな魅力のひとつは、炭素の添加で比較的簡単に強化できることである。炭素鋼の室温組織は炭素をほとんど固溶しないフェライト(bcc)と鉄炭化物(セメントタイト、 Fe_3C)の二相から構成されている。つまり、純鉄の中に第二相として硬いセメントタイトが存在している組織である。析出強化を考える場合、前述したように析出物の体

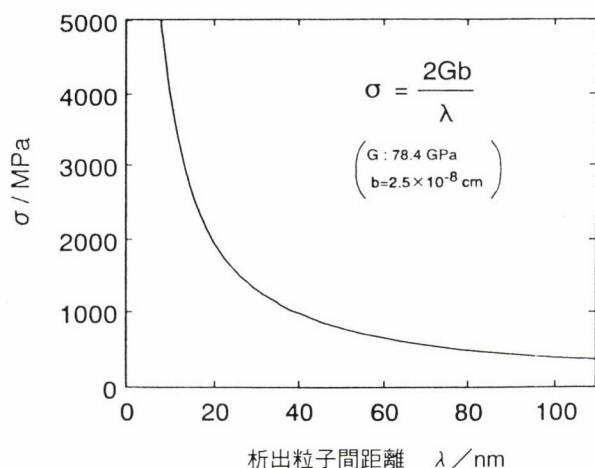


図3 鉄中の析出粒子間距離と強度の関係(オロワン機構による強化量)

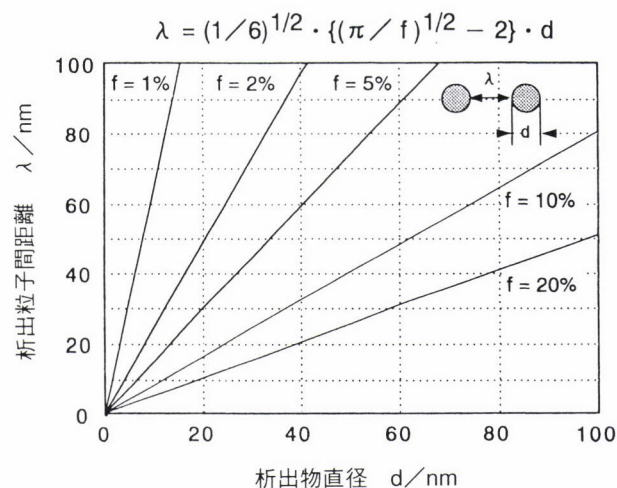


図4 析出物の直径、体積率と粒子間距離の関係

積率を大きくするのが効果的である。合金鋼では、通常、析出強化のために合金炭化物(Mo_2C , V_4C_3 など)や金属間化合物(Fe_2Mo , Ni_3Al など)が用いられている。しかしこの場合、合金元素量の関係で析出物の体積率はそれほど多くなく、高々5~10%程度までである。オーステナイトには炭素が最大2.1mass%固溶するので、室温ではセメンタイトの体積率は最大約30%にもなる。共析鋼(0.8mass%C)でも12%程度のセメンタイトを含む。Fe-C合金は高温のオーステナイト相では炭素を多量に固溶し、低温のフェライト相は炭素をほとんど固溶せず添加した炭素はすべてセメンタイトという化合物として存在するわけで、この特徴は析出強化の点から見れば非常に好ましい合金といえる。

実は我々は、セメンタイトが第二相として多量に存在するという炭素鋼の特長をすでに最大限に利用しているのである。それが、パーライト変態であり、高炭素鋼のマルテンサイトの低温焼もどしである。セメンタイトの形態は変態組織やその後の熱処理によって様々に変化するが、パーライトでは非常に薄い板状であり、マルテンサイトの低温焼もどしでは細かい球状(実際には ϵ 炭化物)で均一に分散している。

共析変態によって生成するパーライト組織は、軟らかいフェライト地に硬くて薄いセメンタイト板が0.1~0.5 μm という極めて細かい間隔で層状に積層された素晴らしい天然の複合材料である。このような組織を我々は人工的に作る事が出来るであろうか。パーライト組織は鉄鋼材料の貴

重な財産であり、これのお陰で炭素添加によって比較的高強度を簡単に得ているのである。さらに、この組織は大きな加工硬化を示すために、図6³⁾に示すように極細線ではあるが鉄鋼材料の実験室的最高強度(5.7GPa)が得られる基地組織になっている。

高炭素鋼のマルテンサイトを150~200℃の低温で焼もどすと、数nm程度の非常に微細な ϵ 炭化物($\text{Fe}_{2.4}\text{C}$)が多量に析出し、大きな析出強化によって高強度、高硬度が得られる⁶⁾。しかし、600~700℃での高温焼もどしではセメンタイトが粗大になるため、大きな強化作用はない。セメンタイトは比較的容易に粗大化するのが欠点であり、この粗大化を抑制する工夫をすれば、より高温での焼もどしまで高強度が維持できるであろう。多量に存在するセメンタイトを均一微細に分散させる方法として、マルテンサイトの焼もどし以外にも、例えばパーライト組織を出発材とし加工熱処理によって微細な間隔のラメラセメンタイトを微細球状化させること、なども考えられる。

合金元素に頼らない単純組成の鋼を対象に高強度化を図ろうとする場合には、セメンタイトのより積極的な利用の検討が不可決の課題であると思われる。

4 超微細組織形成のための大ひずみ加工の利用

2節で述べたように、現状では実用的に到達していない超微細結晶粒や超高密度転位組織を得ることができれば、極めて大きな強化が期待できる。このような組織形成のひとつの有効な手段は大ひずみ加工の利用であろう。この場合、大ひずみ加工の作用は大きく分けて二つある。一つは、大ひずみ加工によって相変態・再結晶前の母相中にできるだけ多くの格子欠陥を導入し、核生成サイトを増したり、駆動力を大きくして核生成速度を大きくする作用であり、もう一つは、変態後の組織を大ひずみ加工によって物理的

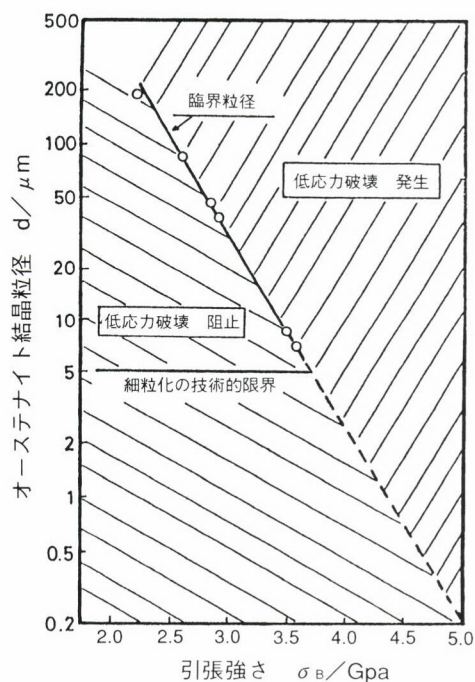


図5 低応力破壊が発生する臨界オーステナイト粒径と引張強さの関係(マルエージ鋼)

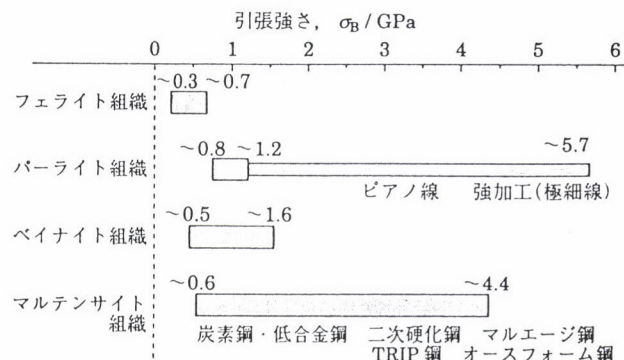


図6 実験室レベルで到達している各種組織の強度レベル

に分断・細分化する作用である。

バルク材で結晶粒径 $1\mu\text{m}$ 以下の超微細粒を得ることが鉄鋼材料の大きな目標の一つになっている。相変態・再結晶によって結晶粒を微細化する方法では、現在実用的には制御圧延・制御冷却(TMCP)で得られる数 μm 程度のフェライト粒が最も小さい粒径である。しかし、実験室的にはすでに $1\mu\text{m}$ 以下の超微細粒組織がバルク材で得られている⁷⁻⁹⁾。これらはいずれも80~90%という大圧下圧延が施されている。高木ら⁸⁾は、準安定オーステナイト系ステンレス鋼においてオーステナイトを室温で強圧延してほぼ100%の加工誘起マルテンサイト組織にした後加熱し、逆変態と再結晶を巧みに利用することにより約 $0.2\mu\text{m}$ という超微細オーステナイト粒を得るのに成功している。筆者の知る限り今のところこれがバルク材の加工熱処理で得られた最も微細な組織である。

変態組織に大ひずみ加工を施し高強度化する例として、すでにパーライト組織を強伸線加工したピアノ線がある。ピアノ線は実用鋼で最高強度を示すもので、実験室的には図6に示したように極細線で5.7GPaの引張強さが得られている¹⁰⁾。ピアノ線はパーライト組織が大きな加工硬化を示すという特徴を利用して高強度を得ているが、強伸線後の加工組織の詳細は、極細線であるための観察の困難さや組織の複雑さのためにほとんど不明であった。しかし、近年、最新の解析機器を用いた研究により、パーライト組織を強伸線加工すると、ラメラセメンタイトがナノ粒子化(20nm程度)することや¹¹⁾、セメンタイトの一部が溶解してフェライト中に炭素が過飽和に固溶すること¹²⁾、など今まで想像しなかった現象が起きていることが明らかになってきた。ピアノ線は古い材料であるが、その超高強度化の謎や内部組織の秘密が最近になってようやく明らかになり、その結果、大ひずみ加工によって大変面白い組織変化が起こることを我々に教えてくれた。

最近、強伸線加工以外にも種々の大ひずみ加工法による超微細組織形成の研究が盛んになっている。粉末のメカニカルミリングによって、純鉄で 25nm ¹³⁾、オーステナイト系ステンレス鋼で 200nm ¹⁴⁾の超微細粒が得られている。バルク材を得る方法としては、繰返し重ね接合圧延によって、純鉄で $0.5\mu\text{m}$ 粒が得られている¹⁵⁾。また、鉄鋼への適用は今のところないが、せん断変形を繰返し与えるECAP(Equal-Channel Angular Pressing)法によって、 $0.2\mu\text{m}$ 粒のAl合金のバルク材が得られている¹⁶⁾。バルク材の大ひずみ加工はメカニカルアロイングで起きている種々の複雑な現象をバルク材で実現させることが可能で、超微細組織を得るための新しい組織形成手段として興味深い方法である。

5 鋼のマルテンサイトの魅力

鋼のマルテンサイトの有用性は図7に示すように二つある。ひとつは、変態生成物が硬くて強い組織であるため、高強度鋼の基地組織としての重要性であり、他は、せん断型変態に由来する外形変化(形状変化)を利用した種々の新しい機能の出現である。

鉄鋼材料が他の金属材料に見られぬ非常に広範囲の強度レベルをカバーできるのは、硬くて強いマルテンサイト組織のお陰である。マルテンサイトは通常焼もどして使用されるため、その強化の主因は析出強化である。析出強化という視点から見ると、鋼のマルテンサイトの素晴らしさを再認識させられる。例えば、図8(a)に示したように、通常の溶体化処理により過飽和固溶体を得たのち時効する材料では溶体化時の合金元素の固溶量に制限があるため、析出物の体積率はそれほど大きく出来ない。それゆえ、より高強度化のためには時効前に加工を施す加工熱処理が行われ、加工によって導入された転位を核生成サイトとして析出物を出来るだけ細かく均一に分散させるようにしてい

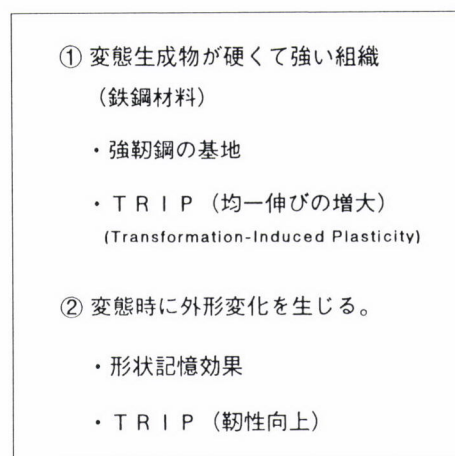


図7 鋼のマルテンサイトの有用性

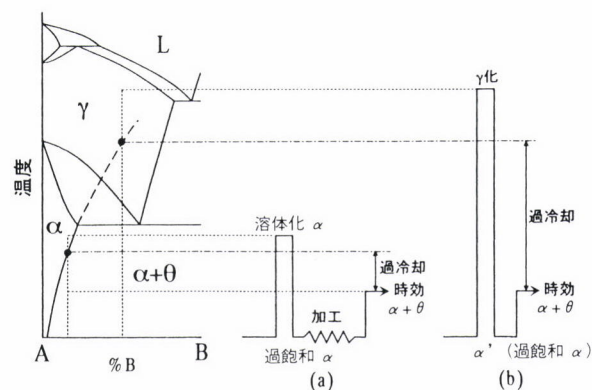


図8 溶体化材(a)および焼入れ材(b)の時効析出の比較

る。ところが、図8 (b)のようにマルテンサイト変態は合金元素を多量に固溶する高温相を母相とするため、著しい過飽和固溶体を得ることが出来る手段である。しかも、マルテンサイトには高密度の格子欠陥が存在しているので、焼入れたままで図8 (a)の加工熱処理を施した状態になっているとみなせる。さらに、マルテンサイトの焼もどしは、図8 (b)に示すように非常に過冷度が大きい状態で析出させていることになる。過冷度が大きいほど核生成のための駆動力が大きくなり、臨界核の大きさが小さくなる。つまり、マルテンサイトは、多量の析出物を均一微細に生成するための極めて好ましい条件を自然に備えており、析出強化を最大限に利用出来る優れた組織であり、鋼の超高強度化には欠かせない重要な変態生成物である。

マルテンサイト変態は、せん断型変態であるため変態時に外形変化(形状変化)を生じる。変態時の形状変化によって周囲の母相に応力を発生する。逆に、母相中に残留応力があったり変形時に応力集中が起こると、マルテンサイト変態によってそれを軽減することができる。このような作用を巧く利用すると、材料の靱性・延性が向上する。その一例が、加工誘起変態を利用したTRIP(Transformation-induced Plasticity: 変態誘起塑性)現象である。

TRIPによる延性および靱性向上の理由を模式的に図9¹⁷⁾に示す。安定なオーステナイトを引張試験すると、ある程度の均一変形をした後くびれが発生し、そこに変形が集中して破断に至る。ところが準安定オーステナイトの場合には、くびれが生じるとその部分の応力が高くなるので加工誘起マルテンサイトが生成する。鋼のマルテンサイトは強いので、くびれの部分が強化されそこでの変形が起らなくなり、他の部分で変形が進行する。このように、加工誘起マルテンサイト変態によってくびれの進展が抑制される結果、大きな均一伸びが得られるようになる。さらに、変形中にマルテンサイトが生成すると靱性も向上する。こ

れは、クラック先端の応力集中部に適当なバリエーションのマルテンサイトが生成することにより変態時の外形変化によって応力集中が緩和されるからである。このように、TRIP現象を伴う材料は、材料にかかる応力を感知して準安定オーステナイトがマルテンサイト変態を起こし、変形中に発生する破断や割れの原因を自ら取り除いているわけで、まさしく知能材料の典型的な例といえよう。

マルテンサイトの利用は、超強力鋼の基地組織として重要であるとともに、同時に、応力によって生成する(加工誘起変態)という特徴や、形状変化を伴うという特徴を巧く利用することにより、強靱性に優れた新しいタイプの鉄鋼材料や、新しい機能を有する材料(その代表的な例が形状記憶合金である)の開発が可能である。

6 複合組織の面白さ

鉄鋼の組織には、フェライト、パーライト、マルテンサイト、ベイナイト、オーステナイトがある。各組織には、それぞれ長所と短所がある。適当な二相(もしくは多相)を複合させることにより、互いの長所を生かし、短所を補うことができる複合組織鋼は、材質向上のための有効な手段である。重共析鋼のフェライト+パーライト組織は典型的な複合組織鋼であり、軟らかいフェライト地に硬いマルテンサイトを分散させたdual phase鋼や強いマルテンサイト地に靱いオーステナイトを分散させた9%Ni鋼なども有名である。強度-延性(靱性)バランスで不連続な飛躍的な向上が見られることがあるが、それらは複合組織化をした時に出現している場合が多い。二相組織や三相組織の組み合わせは数多くあり、まだまだ残されている有望な複合組織がありそうである。

複合組織を得るための代表的な熱処理が、フェライト+オーステナイトなどの二相域を利用した二相域熱処理である¹⁸⁾。この熱処理の面白さは、低合金鋼でありながら二相域での加熱保持中におこる二相間の合金元素の分配を利用し、マトリックス中に高合金の性質を持った第二相を分散させることが出来ることにある。さらに、複合組織は熱処理中の粒成長が遅くなるので、微細粒を得やすいという利点もある。複合組織化の一層の検討が望まれる。

7 加工熱処理の今後の展開

加工熱処理は鋼の強靱化法として極めて有効である。加工熱処理が登場した約35年前から現在に至るまで多くの加工熱処理が開発されてきたが、その時々主役となる加工熱処理が存在し、それらが鉄鋼材料研究を活性化してきた。

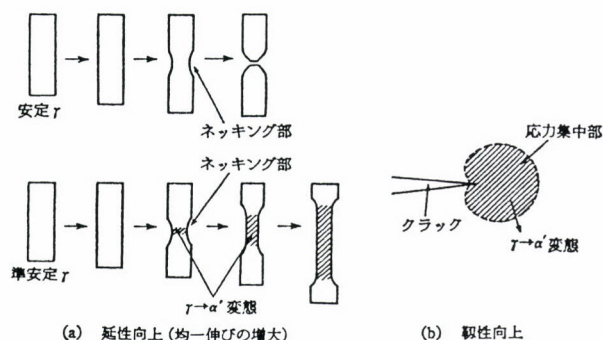


図9 TRIP現象による延性(均一伸び)および靱性向上の説明図

その間の代表的な加工熱処理の変遷をまとめると図10¹⁹⁾のようになる。マルテンサイトを対象にしたオースフォームから始まり、TRIPを経て、加工熱処理の主役が拡散変態(主としてフェライト)を対象にした制御圧延・制御冷却(TMCP)に移行し、最近では再びマルテンサイトを対象にしたものに関心が戻っている。約30年前に大きな注目を浴びたオースフォームやTRIPは、処理の複雑さ、困難さや高合金という制約のために、当時は実用的には成功しなかった。しかし最近、これらの加工熱処理が昔とは少し形を変えて(合金組成や処理温度などに昔には無かった新しい思想が導入され)再び関心が高まり、実用化が可能になり、新しい高強度鋼が開発されている。優れた原理を有する現象は、種々の制限のために日の目を見ず一度忘れられても、必ず時期が来れば再登場するという、典型的な例である。他にも過去の研究の中に多くの宝が埋もれているはずである。

加工熱処理の目的が強靱化にあるため、図10からも分かるように、歴史的に見てマルテンサイトを対象にした加工熱処理が圧倒的に多い。鉄鋼材料の主要組織の中で、組織制御の観点から見て最も遅れているのが、ベイナイトであろう。また、パーライトもピアノ線と関連して加工硬化挙動に関する研究は最近でも活発になされているが、組織制御という観点から見ると重要な組織にもかかわらず非常に研究が少ない。これらの組織は、まだまだ組織制御や加工熱処理によって性質の向上が図られる余地がありそうである。

8 おわりに

実用鋼の最高強度は四半世紀以上もの間停滞している。これでは素材としての鉄の魅力が失われるばかりである。最近、次世代を支える新しい鉄鋼材料の開発を目指した国家プロジェクトがスタートし^{20,21)}、鉄鋼材料研究が再び活性化してきた。実験室的にはすでに理想強度の約1/2の強度が得られている。鉄鋼材料を強くする方策はまだ多く残されている。鉄の魅力を再認識させるためにも、今こそ、もう一度新しい視点から鉄鋼の高強度化の限界に挑戦する好機であろう。

参考文献

- 1) 鉄鋼の高強度化と信頼性向上, 日本鉄鋼協会, 材料の組織と特性部会 鉄鋼の高強度化研究会編, (1997)
- 2) 高木節雄: 第141・142 回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, (1992), 1.

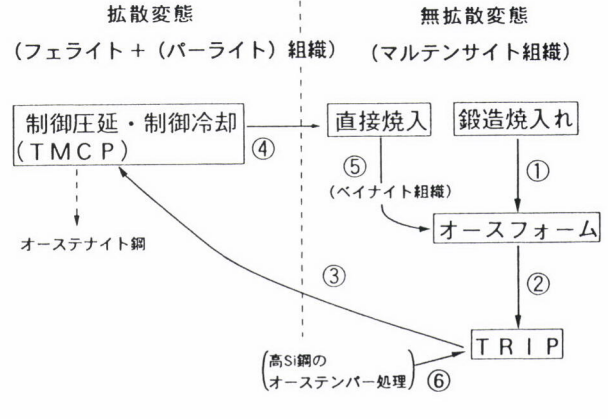


図10 鋼の代表的な加工熱処理の変遷

- 3) 牧 正志: 第29・30回白石記念講座, 日本鉄鋼協会編, (1995), 65.
- 4) 高木節雄: までりあ, 36 (1997), 675.
- 5) 河部義邦: 鉄と鋼, 68 (1982), 2595.
- 6) G. Krauss: ISIJ Int., 35 (1995), 349.
- 7) 飴山 恵, 松村直巳, 時実正治: 熱処理, 28 (1988), 233.
- 8) 高木節雄: 鉄と鋼, 80 (1994), N529.
- 9) 林 透, 梅澤 修, 鳥塚史郎, 津崎兼彰, 長井 寿: CAMP-ISIJ, 11 (1998), 566.
- 10) 落合征雄, 西田世紀, 大羽 浩, 川名章文: 鉄と鋼, 79 (1993), 1101.
- 11) 横井浩一, 家口 浩, 南田高明, 鹿磯正人, 茨木信彦, 隠岐保博: 鉄と鋼, 83 (1997), 514.
- 12) H. G. Read, W. T. Reynolds Jr., K. Hono and T. Tarui: Scr. Mater., 37 (1997), 1221.
- 13) Y. Kimura and S. Takaki: Trans. JIM, 36 (1995), 289.
- 14) 飴山 恵, 広光 誠, 今井信幸: 鉄と鋼, 84 (1998), 37.
- 15) 齊藤好弘, 辻 伸泰, 谷川修一, 宇都宮裕: CAMP-ISIJ, 11 (1998), 560.
- 16) 堀田善治 他: 日本金属学会会報, 32 (1993), 898.
- 17) 牧 正志: 鉄と鋼, 81 (1995), N547.
- 18) 牧 正志: 日本金属学会会報, 27 (1988), 623.
- 19) 牧 正志: 熱処理, 37 (1997), 5.
- 20) 湯川憲一, 下斗米道夫, 阿部義男: までりあ, 36 (1997), 147.
- 21) 佐藤 彰: ふえらむ, 3 (1998), 88.

(1998年8月13日受付)



入門講座

分析試験法編-6

放射化分析

平井昭司
Shoji Hirai

武蔵工業大学 工学部
エネルギー基礎工学科 教授

Activation Analysis

1 放射化分析とは

放射化分析は元素(厳密には原子核)にエネルギーを持った中性子、荷電粒子(α 線、陽子線、電子線など)あるいは光量子(光子)を照射し、原子核反応を起こさせ、生成した放射性核種の放射能を測定して、元素の定性分析あるいは定量分析を行う方法である。放射能測定において、放射線のエネルギーまたは放射性核種の半減期の測定に基づいて定性分析を、また、放射線の放射能強度の測定に基づいて定量分析を行う。このように放射性核種を生成させることから放射化分析の名前が付いている。

2 放射化分析の種類

2.1 放射化分析の名前

放射化分析の名前は、照射する放射線の種類により区別されている。主に、照射する放射線に中性子を使用するのを中性子放射化分析(Neutron Activation Analysis: NAA)、荷電粒子を使用するのを荷電粒子放射化分析(Charged Particle Activation Analysis: CPAA)、光量子を使用するのを光量子放射化分析(Photon Activation Analysis: PAA)と分類し、大別している。さらに、照射後、放射能測定において妨害となる放射性核種を分離・除去したり、分析目的核種を選択的に分離・濃縮する化学操作を行う場合には、放射化学(Radiochemical)の語句が各分析法に接頭される。また、照射した試料を何ら化学的操作を加えずに直接放射能測定する場合には、機器(Instrumental)の語句が接頭される。現在、一般に放射化分析と言うと機器中性子放射化分析を指すことが多い。

2.2 放射化分析を構成するシステム

放射化分析は、照射する放射線の種類により名称がいろ

いろ区別されているが、分析を構成するシステムは、主に照射システム、放射能測定システム、解析システムの三つの要素から構成されている。一例として、中性子放射化分析のシステムを図1に示す。分析目的元素が標的核で、放射化された生成核が壊変する際放出する γ 線を測定して分析を行う。

2.2.1 照射システム

放射線の発生源となる照射システムは、研究用原子炉、加速器、放射性核種等がある。中性子照射には、研究用原子炉がほとんどの場合利用されているが、ときには陽子、重陽子、 α 粒子などの荷電粒子を加速器(サイクロトロン、バンデグラフ、コッククロフト・ワルトン、ライナックなど)により加速し、適当なターゲットに衝突させ、その際原子核反応で発生する中性子を利用するのと、放射体中性子源と言われる α 放射体(^{210}Po 、 ^{226}Ra 、 ^{241}Am など)とベリリウムの混合物から発生する中性子、 γ 放射体(^{124}Sb 、 ^{226}Ra など)とベリリウム混合物から発生する中性子、自発核分裂性核種(^{252}Cf など)から放出する中性子が利用されている。

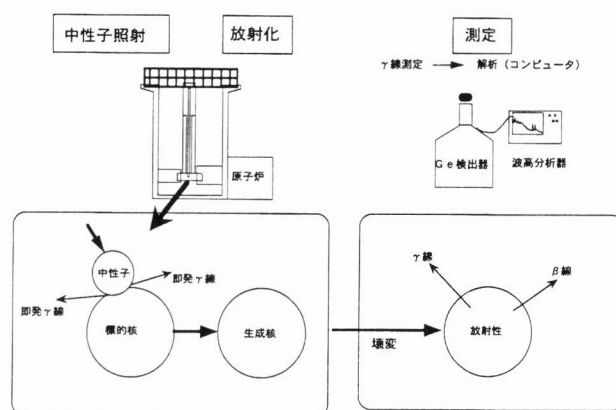


図1 中性子放射化分析のシステム

一般に、原子炉からの中性子束密度は、加速器および放射体中性子源からの中性子束密度に比較して非常に大きいことから、放射能測定において検出感度を上げる(分析感度の向上)意味から広く使用されている。

荷電粒子照射には、種々の加速器が利用され、陽子、重陽子、 α 粒子、 ^3He 粒子などが一定エネルギー以上で加速され、原子核に衝突させて放射化している。荷電粒子と原子核が原子核反応を起こすには、原子核のクーロン斥力(障壁)以上のエネルギーで衝突させなくてはならず、概ね数MeV以上の高エネルギーの加速を要している。

光量子照射には、ライナック(線形加速器)で10~30MeVに加速した電子ビームを白金板などに照射し、発生する制動放射線(光量子)を用いている。

2.2.2 放射能測定システムと解析システム

試料を照射した以降の放射能測定システムと解析システムについては、中性子照射、荷電粒子照射、光量子照射いずれの照射システムを使用しても照射システムの使用による違いはなく、試料及び分析目的核種の種類、分析元素量などにより多様の放射能測定システムを選択することができる。多くは γ 線あるいは β 線を計測する放射能測定システムを使用している。

β 線(β^+ 線および β^- 線)は最大エネルギーからゼロまでの連続エネルギーを持つことから核種の判別には利用できなく、半減期及び放射能強度の測定のみ利用される。そのため、放射化学的分離操作を必要とすることが多い。一方、 γ 線は放射性核種に固有のエネルギーを持つことから、エネルギー測定をも行うことにより核種の判定を行うことができる。特に、多くの放射性核種は γ 線を放出していることから、性能の良い γ 線測定システムが容易に利用できることから、現在はこの測定システムが主流となっている。

それゆえ、解析システムにおいてはこの γ 線システムの場合だけが問題となっている。すなわち、エネルギー分解能の良い γ 線検出器(Ge検出器)を利用して放射能測定を行うと、いろいろの放射性核種からの γ 線スペクトルを一度に収集することになり、数多くの γ 線を解析することと、複雑に重なり合った γ 線を解析しなければならない、迅速で正確度の高い結果を導き出すコンピュータの手助けが必要になってくる。このようなとき、解析システムが重要なポイントとなる。解析プログラムは、 γ 線測定システムを製作しているメーカーで提供しているが、ユーザーが独自に開発した放射化分析専用の解析プログラムも利用できる。

3 放射化分析の特徴

中性子放射化分析、荷電粒子放射化分析、光量子放射化分析のいずれも、放射体線源を除き研究用原子炉あるいは加速器という非常に大がかりな(高価な)機器を使用しなくてはならず、また、放射線あるいは放射能を取り扱える施設でしか分析が行えないという制限がある。このことは本分析法が広く普及する最大の欠点となっているが、欠点を克服する以上の最大の特長を持っている。それは本分析法が原子核反応に基づいた原理(原子核一つづつと反応している)で分析を行っていることで、分析感度が他の分析方法に比較して一段と良いからである。さらに、一度放射化してしまえば、環境からの汚染や分析操作中での汚染による分析値への影響が全くないことから(分析対象の同位体と汚染による同位体では異なっている)、微量・超微量元素を扱うのにクリーンルームなどの設備が無くても正確な分析値を提供できる方法になっている。図2に通常の化学分析と放射化分析とのプロセスの違いを示している。放射化の段階で分析対象核種が変わっている。

放射能測定における γ 線測定では、特別な場合を除き γ 線の試料中での他の物質との相互作用や減衰等は非常に僅かであるので、化学分析法とは異なり化学干渉による分析値のずれは起こらない。そのため、多くの分析法の中で正確な分析値を提供する方法の一つに挙げられている。それゆえ、国内外の種々の標準物質の元素含有量の認証値の決定に、本法が数多く使用されている一つにもなっている。

3.1 中性子放射化分析の特徴

中性子は電荷がないことから、試料内部まで浸透・透過し、いろいろの原子核と核反応を起こしやすい。特に、主流となっている研究用原子炉を利用した中性子放射化分析

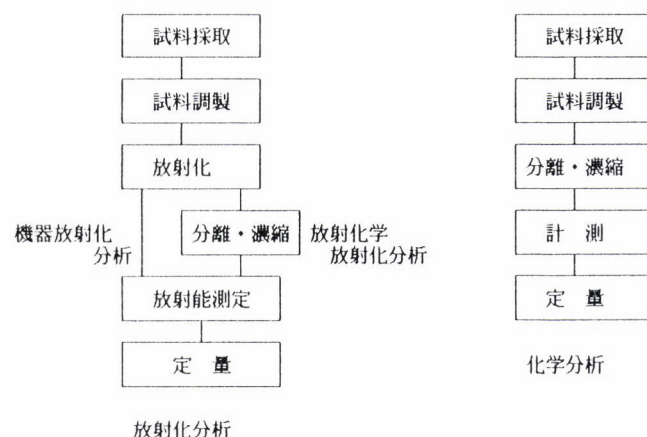


図2 放射化分析と化学分析とのプロセスの違い

では、エネルギーの低い熱中性子が大部分であるので、 (n, γ) 反応が主反応となり生成放射性核種は、分析対象核種の質量数が1多い同位体となる。一方、加速器や放射体線源からの中性子は、熱中性子以上のエネルギーを持っているので、 (n, p) 、 (n, α) 、 $(n, 2n)$ などの反応が起こり、異なった同位体を生成する。

熱中性子を利用した場合、分析できるのは周期表でフッ素以上の高い原子番号の元素を分析できる。また、核反応における発熱も少ないことから、生体試料なども容易に分析できる。一方、加速器や放射体線源を用いた場合、中性子源が点線源であることから、線源から離れるに従って減弱(距離の2乗に逆比例)するので、試料内における中性子束密度の減衰の補正を行わなくてはならない。これは加速器を使用する荷電粒子放射化分析および光量子放射化分析においても共通的な問題である。高エネルギーの中性子を利用したときは、熱中性子と異なり軽元素との核反応が起こりやすく、これらの分析にはふさわしい。

3.2 荷電粒子放射化分析の特徴

高エネルギーの荷電粒子では、 (d, n) 、 (d, α) 、 (p, n) 、 (p, d) など多種の核反応が起こる。それゆえ、同一の生成核種が複数の原子核から生成することの補正を考慮しなければならない。また、試料中を荷電粒子が通過する際のエネルギー損失が急激に起こることから、生成放射能のエネルギー依存性を補正しなければならない。このエネルギー損失が大きいことは核反応が比較的試料表面付近で起こることになり、表面分析法に近い形で分析が行われることになる。ホウ素、炭素、窒素、酸素などの軽元素の分析には有効な手段となっている。

3.3 光量子放射化分析の特徴

光量子は連続エネルギー(最大10~30MeVからゼロ)の制動放射線が利用され、主に (γ, n) の核反応を起こさせている。生成放射性核種は、分析対象核種と同じ質量数が1小さい同位体になる。この場合、ほとんどの生成核は β^+ 壊変型になるので、0.511MeVの消滅 γ 線をともなうことになる。また、荷電粒子ほど試料内でのエネルギー損失が大きいので、ある程度試料内を均一に、かつ発熱量も少なく照射することができる。熱中性子放射化分析で困難な炭素、窒素、酸素、フッ素、リン、チタン、ジルコニウム、タリウム、鉛などが本法で分析できる利点がある。

4 中性子放射化分析の実際

4.1 照射設備

放射化分析の中でも一般的な原子炉中性子を利用する中性子放射化分析について解説する。研究用原子炉内には0.00数eVの遅い中性子から10数eVの速い中性子が連続的に存在している。その中でもエネルギー分布がマックスウエル分布する熱中性子(20℃の平均エネルギー:0.025eV)が大部分を占めている。放射化では主にこの熱中性子を利用するが、約0.4eV以上のマックスウエル分布をはずれた熱外中性子(エピサーマル中性子)や0.5MeV以上の高速中性子を利用することもある。熱外中性子には、特異的に原子核と共鳴吸収あるいは共鳴散乱反応を起こす共鳴中性子(1eV~1keV)とも言われる。わが国で中性子放射化分析に利用できる研究用原子炉は、表1に示すように限られた数しかない。一般に研究用原子炉の規模は最大熱出力の値で表すが、おおよそ最大熱中性子束密度とも比例する。また、各原子炉には熱中性子束密度の異なる照射場が用意され、目的に応じて種々の場所を利用することができる。高放射能を得るにはより高い熱中性子束密度の照射場で、短寿命核種を生成させるには、照射から取り出しまでを迅速に取り扱える気送管設備を利用する。

4.2 分析の原理

放射能分析から元素分析ができる原理は次の通りである。

中性子を照射し、核反応で生成する放射性核種の数(N^*)は、

$$N^* = f\sigma N \{1 - \exp(-\lambda t)\} / \lambda \quad \cdots \cdots (1)$$

となる。放射能(A)は、1秒間当りの放射性核種の壊変速度(λN^*)に等しいことから(1)式より

$$A = f\sigma N \{1 - \exp(-\lambda t)\} \quad \cdots \cdots (2)$$

となる。

ここで、 t は照射時間(s)、 N は放射化される核種の個数、 f は熱中性子束密度($n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、 σ は放射化断面積(barn= 10^{-24}cm^2)、 λ は放射性核種固有の壊変定数[$(= \ln 2 / T(T: \text{半減期}) : \text{s}^{-1})$]である。半減期は、放射性核種の個数がある値から半分になるまでの時間で、放射能が半分になる時間とも等しい。さらに、核種の数(N)を分析元素の重量(W)(g)で表すと

$$N = W N_A \theta / M \quad \cdots \cdots (3)$$

となる。ここで N_A はアボガドロ数($=6.02 \times 10^{23}$ 個)、 θ は放射化される核種の同位体存在度、 M は分析元素の原子量である。(3)式を(2)式に代入すると放射能は、

$$A = f\sigma (W N_A \theta / M) \{1 - \exp(-\lambda t)\} \quad \cdots \cdots (4)$$

のように変換できる。それゆえ、分析試料を t_i 時間(s)照射

表1 わが国で中性子放射化分析法に利用できる研究用原子炉及び主な照射設備

原子炉名	所属	最大熱出力 (kW)	主な照射設備	熱中性子束密度 ($n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$)	高速中性子束密度 ($n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$)	カドミウム比
京大炉 (KUR)	京都大学 原子炉実験所	5×10^3	水圧輸送管	8.2×10^{13}	3.9×10^{13}	4
			傾斜照射孔	3.9×10^{12}	4.4×10^{11}	11
			黒鉛熱中性子柱	9.3×10^{10}	—	10400
			圧気送管—1	1.9×10^{13}	3.2×10^{12}	7
武蔵工大炉 (MITRR)	武蔵工業大学 原子力研究所 (現在停止中)	100	中央実験管	3.8×10^{12}	9.8×10^{11}	6
			照射溝	8.0×10^{11}	3.7×10^{10}	14
			照射室	1.0×10^9	0.9×10^6	100
			気送管	1.5×10^{12}	4.3×10^{11}	5
立教炉	立教大学 原子力研究所	100	中央実験管	3.7×10^{12}	2.0×10^{12}	3
			Fリング管	1.4×10^{12}	6.1×10^{11}	3
			回転試料棚	4.9×10^{11}	6.5×10^{10}	4
			気送管	1.5×10^{12}	—	—
JRR—2	日本原子力研究所 東海研究所	10×10^3	インコア	8.9×10^{13}	5.9×10^{13}	2
			垂直実験孔—1	1.3×10^{14}	2.8×10^{13}	2
			垂直実験孔—5	1.2×10^{13}	5.8×10^{10}	18
			気送管—2	6.5×10^{13}	2.5×10^{13}	5
JRR—3M	日本原子力研究所 東海研究所	20×10^3	水力照射HR1	1.2×10^{14}	1.7×10^{12}	5
			垂直照射RG	2.0×10^{14}	1.0×10^{14}	4
			放射化分析用PN3	1.9×10^{13}	6.0×10^9	300
			気送照射PN1	6.0×10^{13}	1.7×10^{11}	26
JRR—4	日本原子力研究所 東海研究所	3.5×10^3	Tパイプ	6.0×10^{13}	1.3×10^{13}	4
			Sパイプ	5.0×10^{13}	5.5×10^{12}	5
			気送管	4.0×10^{13}	7.5×10^{13}	4
JMTR	日本原子力研究所 大洗研究所	50×10^3	HR—1	1.1×10^{14}	8.8×10^{12}	—
			HR—2	1.3×10^{14}	2.1×10^{13}	—

し、 t_w 時間(s)後の放射能(A_w)は、

$A_w = f\sigma(WN_A\theta/M)\{1 - \exp(-\lambda t_i)\}\exp(-\lambda t_w) \cdots (5)$
 となる。分析では、この放射能 A_w を測定することになる。
 (5)式において f や σ の値を正確に求めるには非常に複雑で、困難な場合が多い。そのため f や σ の値は誤差の多い曖昧な数値となってしまう。この曖昧さをなくすために、元素の定量において分析試料と元素含有量が既知の標準物質と一緒に照射し、それぞれの放射能を比較して算出する比較法を使用する方法が多くなされている。

分析試料をX、標準物質をSの添字で表わし、分析試料と標準物質中の元素量の比を求めると、分析試料中の元素含有量(W_x)は、

$W_x = W_s \{A_{wx} \exp(\lambda t_{wx})\} / \{A_{ws} \exp(\lambda t_{ws})\} \cdots (6)$
 と単純な式になり、分析試料と標準物質の放射能(A_{wx} と A_{ws})と両試料を測定するまでの時間(t_{wx} と t_{ws})を求めて、元素量を定量することになる。このような比較法では、正確な中性子束密度、中性子スペクトルや放射化断面積が判明しなくても正確な定量値を得ることができる。

4.3 分析の誤差要因

中性子放射化分析での誤差要因は、試料を扱う上での分析化学的な誤差要因と放射能測定における誤差要因とがある。前者については放射化分析に限ったことではないので、後者についてのみ説明する。

放射能測定における γ 線測定一般において注意しなければならない誤差要因が幾つかある。第一に妨害核反応の影響である。分析を目的とする核種の生成は、熱中性子による(n, γ)反応であるが、高速中性子により(n, α)や(n, p)や($n, 2n$)反応が起き、分析を目的としない核種からも同一の核種が生成し、区別が付かない。このような場合、分析目的元素でなくても各反応により生成する核種の生成量を予め調べておき、その量を補正しなければならない。表2に主な妨害核反応の一例を示す。鉄鋼分析においては、鉄がマトリックスになることから鉄鋼中の微量のマンガンやクロムを定量する場合にはこの補正が必要で、例えば表1の立教炉で放射化したとき、鉄からの影響はマンガンで41ppm、クロムで39ppm程度ある。また、ウランを含有している場合、 ^{235}U の核分裂反応で質量数90及び140近傍の核種が生成される。この付近の質量数の核種を使用しての測定

表2 主な妨害核反応

目的生成核種	妨害核反応
^{27}Mg	$^{27}\text{Al} (n, p) ^{27}\text{Mg}$ $^{30}\text{Si} (n, \alpha) ^{27}\text{Mg}$
^{28}Al	$^{28}\text{Si} (n, p) ^{28}\text{Al}$ $^{31}\text{P} (n, \alpha) ^{28}\text{Al}$
^{24}Na	$^{24}\text{Mg} (n, p) ^{24}\text{Na}$ $^{27}\text{Al} (n, \alpha) ^{24}\text{Na}$
^{56}Mn	$^{56}\text{Fe} (n, p) ^{56}\text{Mn}$ $^{59}\text{Co} (n, \alpha) ^{56}\text{Mn}$
^{46}Sc	$^{46}\text{Ti} (n, p) ^{46}\text{Sc}$
^{51}Cr	$^{54}\text{Fe} (n, \alpha) ^{51}\text{Cr}$
^{52}V	$^{52}\text{Cr} (n, p) ^{52}\text{V}$
^{60}Co	$^{60}\text{Ni} (n, p) ^{60}\text{Co}$ $^{63}\text{Cu} (n, \alpha) ^{60}\text{Co}$
^{64}Cu	$^{65}\text{Cu} (n, 2n) ^{64}\text{Cu}$ $^{64}\text{Zn} (n, p) ^{64}\text{Cu}$
^{65}Zn	$^{66}\text{Zn} (n, 2n) ^{65}\text{Zn}$

では前記同様区別が付かない。このときも予めウラン量と生成する核種の生成量を調べて補正を行う。ランタン、セリウム、ネオジムなどの定量の際には注意を要する。核反応ではないがウランが存在していると100keV付近のX線を常時放出しているのも、サマリウムの定量に用いる ^{153}Sm の γ 線と重なるのでその補正をしなければならない。

第二に壊変形式に基づいた影響がある。異なった放射性核種から同一のエネルギーの γ 線を放出する場合がある。一方の核種が β^- 壊変し、もう一方の核種が β^+ 壊変あるいは軌道電子捕獲壊変したとき、両核種は同一の核準位転移を行い、同一の γ 線を放出することになる。このようなとき半減期の差を利用して補正しなければならない。 ^{65}Ni (2.52h)と ^{65}Zn (244d)や ^{153}Sm (46.7h)と ^{153}Gd (242d)などがその例である。

第三に極めて高い中性束密度で照射した場合の二重中性子捕獲反応の影響がある。 (n, γ) 反応で生成した核が壊変し、その核がさらに (n, γ) 反応を起こしたり、生成核の放射化断面積が非常に大きい場合、壊変する前に連続して (n, γ) 反応が起こり、別の核種を生成する。 $^{30}\text{Si}(n, \gamma)^{31}\text{Si}(\beta^- \text{壊変})^{31}\text{P}(n, \gamma)^{32}\text{P}$ の反応や $^{181}\text{Ta}(n, \gamma)^{182}\text{Ta}(n, \gamma)^{183}\text{Ta}$ の反応がその例である。

これらの核反応に基づいた影響以外に、照射時における中性子の自己遮蔽の影響がある。試料中に熱中性子吸収断面積や共鳴吸収断面積の大きい核種が多く含まれた場合、その近傍で中性子束密度は急速に低下し、試料と標準物質

との間で生成放射能の値が大きく異なって誤差要因となる。そのため試料量を少なくして自己遮蔽の影響を少なくして放射化する必要がある。希土類元素やカドミウムや金などは自己遮蔽を大きくする元素である。

γ 線計測時においても幾つかの誤差要因があるが、一番注意しなければならないのが不感時間による計数値の数え落としである。 γ 線測定システムにおいて高計数率で入力した γ 線は、パルスの数え落とし現象を起し、分析値は見かけ上低めの値となり、ときには真値より30%以下になることもある。特に、短寿命核種に注目して γ 線測定をする場合には高計数率でなければならないときがあるので注意を要する。このようなとき、 γ 線測定システムにパイルアップリジェクター付きの波高分析器を使用することでその影響を避けることができる。また、短寿命核種に注目しないときは、試料を検出器から遠ざけるか、冷却時間において放射能が弱まるのを待ってから測定する。目安として不感時間率が10%以下にしてから試料を測定する方がよい。

以上の誤差要因は、分析者が注意深く取り扱うことでその影響をかなり低減することができる。しかしながら、分析法の本質に潜んでいる大事な放射能測定に伴う誤差要因がある。放射性核種の壊変速度を測定する放射能測定においては、放射性核種の壊変が統計的・確率的現象であることから、計数値にはゆらぎ、すなわち標準偏差を伴って得ることになる。この標準偏差が放射能測定における計数誤差と言われる。計数値に対する標準偏差を相対標準偏差と呼び、計数値が高ければ高いほど相対標準偏差は減少するので、できるだけ測定時間を長くして計数値を高めるように放射能測定すれば、この計数誤差要因をある程度まで低減することが可能である。

このように本法は必然的な誤差要因を抱え、他の化学分析法に比較して、精度の点で多少劣ることになるが、一般には種々の誤差を含めても多くは10~20%前後の精度で分析することができる。また、先にも述べたように化学干渉がないことから得られた分析値は真値に近く正確な値が得られる。

4.4 中性子放射化分析の種類

照射する中性子のエネルギーによって、熱中性子放射化分析及び熱外中性子放射化分析あるいはエピソード放射化分析に分けられる。原子炉中性子は熱中性子が主であるが、熱外中性子や高速中性子も存在している。できるだけ熱中性子で照射するため、各研究用原子炉の照射場には、他の照射場より熱外中性子や高速中性子を数10分の1から数100分の1程度(カドミウム比が数10以上)に低減させた照射場(熱中性子柱、サーマルカラム)がある。この場所を

使用しての放射化では、高速中性子による妨害反応の影響をかなり抑えることができ、純粋に (n, γ) 反応による放射性核種の生成を得ることができる。

これとは逆に、熱中性子をカドミウム板(1 mm以上)あるいはホウ素化合物によりカットして熱外中性子を利用する熱外中性子放射化分析がある。多くの核種の放射化断面積(吸収断面積)は、熱中性子領域では $1/v$ 則に従っているが、熱外中性子領域になると所々で吸収断面積が高くなる共鳴吸収と呼ばれるところがある。この値が非常に高い表3に示されるような核種を分析目的核種としているときは、本法が有効となる。

4.5 分析感度

分析感度は、原理的には(5)式の生成放射能から元素量を計算することができる。しかし、熱中性子束密度、照射時間、冷却時間(照射後測定するまでの時間)、測定時間などの条件によって分析感度は大きく変わる。一例として、熱中性子束密度 $1 \times 10^{13} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ で1時間照射した場合の分析感度を表4に示す。多くの元素が μg 以下の超微量まで分析でき、中性子放射化分析が高感度分析法と言われるゆえんである。本表での分析感度はこれらの元素が単独で放射化されたとき得られる感度で、機器中性子放射化分析を行ったときのように多くの元素が同時に放射化されている中では、これらの分析感度まで定量することができない。それゆえ、本表に示されている値は一つの目安しかすぎない。機器中性子放射化分析法での分析感度は、マトリックス核種や他の放射性核種の影響で大きく左右され、一律に分析感度を示すことが困難である。高純度鉄(日本鉄鋼認証標準物質JSS001-4)の約数100mgを立教炉で放射化した場合、表5に示されるような定量値と定量下限値を得ている¹⁾。ここで反同時計数法は後述する特殊な γ 線測定法の一種である。短寿命核種を生成する様な元素の感度は悪くなっている。

5 分析方法

5.1 照射前の試料の準備

分析する試料の形状は、板状、塊状、線状、粉末などどのような形状であっても分析は可能である。定量するための標準物質の形状は、分析試料と同様な形状ならびに組成が望ましいが、本分析法においてはそれほど注意をする必要がない。比較標準物質として一定濃度の標準溶液をろ紙に添加した方法が多く選択されている。分析試料質量は、試料中の主成分元素含有量や分析元素含有量にもよるが、数mg～数gの試料量で分析できる。試料は洗浄したポリ

表3 熱外中性子放射化分析が有効な核種

⁸¹ Br	⁸⁵ Rb	⁹⁸ Mo	¹⁰⁰ Mo	¹⁰⁹ Ag	¹¹³ In	¹¹⁵ In
¹²¹ Sb	¹²³ Sb	¹²⁷ I	¹³³ Cs	¹³⁰ Ba	¹⁵² Sm	¹⁵⁹ Tb
¹⁶⁹ Tm	¹⁷⁵ Lu	¹⁸¹ Ta	¹⁹³ Ir	¹⁹⁷ Au	²³² Th	²³⁸ U

表4 中性子放射化分析での分析感度

分析感度 (μg)	元素
$1 \sim 3 \times 10^{-6}$	Dy
$4 \sim 9 \times 10^{-6}$	Mn
$1 \sim 3 \times 10^{-5}$	Kr, Rh, In, Eu, Ho, Lu
$4 \sim 9 \times 10^{-5}$	V, Ag, Cs, Sm, Hf, Ir, Au
$1 \sim 3 \times 10^{-4}$	Sc, Br, Y, Ba, W, Re, Os, U
$4 \sim 9 \times 10^{-4}$	Na, Al, Cu, Ga, As, Sr, Pd, I, La, Er
$1 \sim 3 \times 10^{-3}$	Co, Ge, Nb, Ru, Cd, Sb, Te, Xe, Nd, Yb, Pt, Hg
$4 \sim 9 \times 10^{-3}$	Ar, Mo, Pr, Gd
$1 \sim 3 \times 10^{-2}$	Mg, Cl, Ti, Zn, Se, Sn, Ce, Tm, Ta, Th
$4 \sim 9 \times 10^{-2}$	K, Ni, Rb
$1 \sim 3 \times 10^{-2}$	F, Ne, Ca, Cr, Zr, Tb
10～30	Si, S, Fe

熱中性子束密度: $1 \times 10^{13} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 照射時間: 1時間

表5 高純度鉄(JSS001-4)の機器中性子放射化分析による定量値と定量下限値

定量下限	通常の γ 線測定法	反同時計数法
100～1000 ppm	Si, S	
10～100 ppm		Sr, Zr
1～10 ppm	Mg, Ca, Ti, Mn, Ba	K, Cr, Ni, Sn
0.1～1 ppm	Cl, Cu, Ga, Ag, Nd, Gd, Pt	Zn, Rb, Mo, Cd, Te
10～100 ppb	Al, Na, Co, Se, Br, I, Cs, Tb, Hf, Ta	As, Ce, Pr, Tm, Yb, W, Hg, Th
1～10 ppb	Sc, V, In, La, Eu, Dy, Lu, U	Sb, Ho
0.1～1 ppb	Ir	Sm, Au
定量値 (ppm)	Co: 0.24 ± 0.02 (0.3), Zn: 5.6 ± 0.9 (6.8), W: 0.23 ± 0.02 (0.3),	
() 内認証値	Al: 0.080 ± 0.023 , Cl: 1.94 ± 0.11 , V: 0.038 ± 0.003 , As: 0.153 ± 0.015	

エチレン袋に封入するが、中性子束密度が高い(概ね $10^{13} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上)か長時間(10時間以上)照射する場合には、高純度石英管に封入する。また、このようなときの比較標準物質は、石英板あるいは石英アンブルに標準溶液を滴下・乾燥したものを石英管に封入するか、高純度金属を封入して使用する。このような試料を照射カプセルに入れ、原子炉で照射する。この照射前の準備で注意しなければならないことは、一般的な分析上の注意事項でもあるが、大きな試料から少量の分析試料を取り出すとき、種々の切断・切削器具などからの汚染に注意すると共に切り取った試料表面の除染処理を行わなければならない。このときの試料の汚染について細心の注意を払えば、その後の γ 線測定には汚染の心配をしなくて良いことになる。

5.2 原子炉照射

照射カプセル(ポリエチレン製、アルミニウム製、ポリ

イミド製)に封入された照射試料は、分析対象元素に応じて表1に示される研究用原子炉の照射設備で照射される。機器中性子放射化分析では、大きく分けて二種類のパターンで照射と測定を行う。一つが気送管を使った短時間の照射で、その後すぐ短時間の測定を行う方法と、もう一つが長時間の照射で、長い冷却時間を置いた後長時間の測定を行う方法である。前者ではマトリックス元素からの生成核種が長寿命核種で、目的核種が短寿命核種のときに利用できる。一方、後者ではマトリックス元素からの生成核種が短・中寿命核種で、目的核種が長寿命核種のときに利用できる。このようにマトリックス元素と分析元素に関して生成核種の寿命の間で多少の制約があるが、ほとんどの試料の分析はこの二種類のパターンで充分間に合う。

5.3 γ 線測定装置と解析システム

二重のポリエチレン袋に封入され照射された試料は、袋から取り出され、新しいポリエチレン袋に移し替えられる。粉末試料の場合には、外側のポリエチレン袋だけを交換することもある。石英管に封入したときも同様で管内から試料を取り出す。石英管内に付着している場合、まず、石英管の外側をフッ酸溶液で洗浄した後、管内を酸で溶解させ、試料を取り出すこともある。この試料を一定の冷却時間を置いて、同軸型Ge検出器と4096あるいは8192チャンネルの多重波高分析器とを組み合わせた γ 線測定装置により一度に多くの γ 線を同時に収集・測定する。同軸型Ge検出器は鉄あるいは鉛で構成された遮蔽体の中に設置され、室内の種々の物質から放射されている天然の放射線を減弱させて試料からの γ 線を測定する。 γ 線測定では、高計数率にならないように不感時間率が凡そ10%以下を目安に、試料と検出器との距離を適当に調整しながら測定しなければならない。このとき分析試料と比較標準物質は、同一の距離で測定しなくてはならない。

収集された γ 線スペクトルは、パーソナルコンピュータなどのコンピュータを用いて解析^{2,3)}を行い、 γ 線エネルギー、同定核種、 γ 線ピーク面積、ピーク計数率、元素含有量、検出限界値、元素濃度などを算出し、定量を行う。 γ 線スペクトルを解析するプログラムは、主に γ 線ピークサーチ、ピークフィッティング、半減期補正、核種ライブラリーのプログラムから構成されている。

γ 線測定において90%以上は通常同軸型Ge検出器が使用されるが、ときに数10keVから100keV程度の γ 線を測定するのに平板型Ge検出器が使用され、LEPS(低エネルギー光子スペクトロメトリー)の名で一部の核種(希土類元素など)が測定されている。また、井戸型Ge検出器を使用して計数効率を高め、測定する方法もあるが、 γ 線のサム効

果(γ 線のエネルギーが重なり、真値より高い計数になる効果)の補正をしなければならず、解析も煩雑である。さらに、特殊な計測法として同軸型Ge検出器と井戸型NaI(Tl)検出器を組み合わせ、同時計数法あるいは反同時計数法を行って、選択的にある特定の核種を効率よく計数する方法で、分析感度の向上を図る測定方法がある。同時計数法では壊変形式上でカスケード状に γ 線を放出する核種を効率よく計数したり、反同時計数法では単独に γ 線を放出する核種を効率よく計数したり、コンプトンバックグラウンドを低減させ、多くの分析核種の感度を向上させている。

6 放射化学中性子放射化分析

機器中性子放射化分析では、二種類のパターンで照射と測定を行っているため、妨害核種の影響で分析感度に制限が生じる。分析対象元素が微量あるいは超微量でマトリックス元素による放射能で分析目的核種の放射能が測定できない場合、放射化学的分離操作を行い、目的核種を選択的に分離するか、あるいは妨害となる放射性核種を分離・除去してから放射能測定する放射化学放射化分析がある。

放射化学的分離操作として、イオン交換クロマトグラフィー、溶媒抽出法、共沈法などがあり、マトリックスの妨害核種の除去や目的核種の分離を行う。放射化された分析目的核種の量は非常に少ないことと放射性であるため、細心の注意の操作を要したり、分離挙動が通常分離挙動と異なることもある。そのため放射化後、分析元素(放射性でない：担体)を加えて、超微量あるいは放射性であることからの影響を避けて分離操作を行い、放射能測定し、ppbあるいはpptレベルの元素を定量する。

図3は、高純度鉄中のモリブデンを定量したときの放射化学前後の γ 線スペクトルである。放射化した鉄を塩酸で溶解した後、リンモリブデン酸アンモニウムを担体として添加し、鉄マトリックスを水酸化鉄沈殿で除去し、さらに、陽イオン交換クロマトグラフィーで鉄及び他の放射性核種を分離し、分析目的核種の⁹⁹Moを回収した。その γ 線を測定してモリブデンの定量値 9.4 ± 0.2 ppm($n=5$)、定量下限値0.04ppmを得た。同様に、高中性子密度で照射したとき、高純度鉄認証標準物質(JSS001-4)でのモリブデンは、 10 ± 0.5 ppbと定量され、その定量下限値も2ppbと極微量まで、精度よく分析を行うことができる。また、目的元素を完全に回収するには困難なことが多いので、担体を加えた後、溶液化し、種々の化学分離操作で目的成分の不足一定量(微量の一定量)を再現性良く分離して、比放射能の測定から定量する不足当量放射化分析法も本法の分類に属する。

7 むすび

放射化分析に関する日本語の成書⁴⁻⁹⁾の数は少なく、より広くアプリケーションについて学びたい読者は、参考文献^{7,10)}を参照して頂きたい。

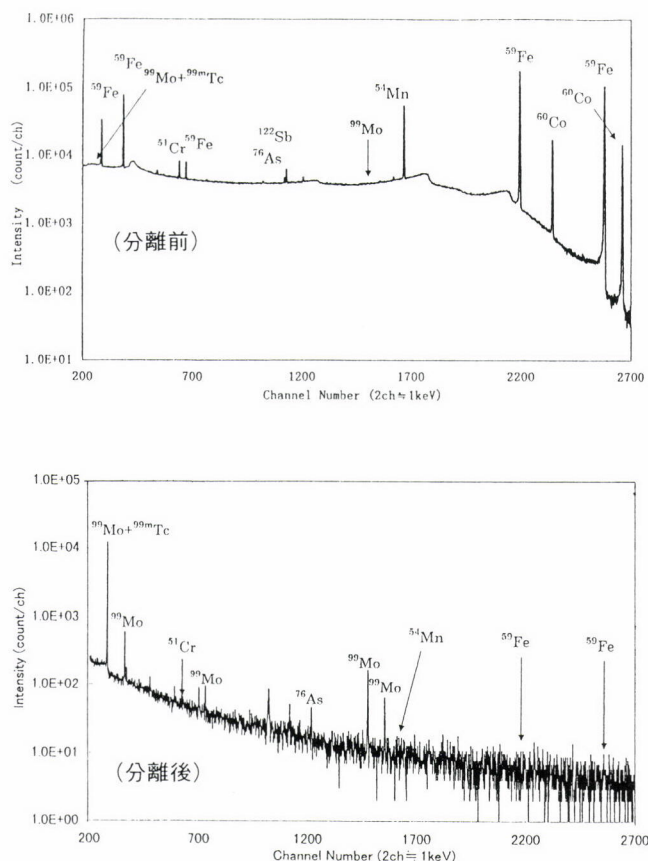


図3 高純度鉄(JSS001-4)の放射化学的分離前後のγ線スペクトル

参考文献

- 1) 鈴木章悟, 平井昭司: 機器中性子放射化分析法による高純度鉄及び鉄鉱石標準物質中の微量元素の定量, 分析化学, 44, (1995), 521.
- 2) 鈴木章悟, 平井昭司: マイクロコンピュータによる中性子放射化分析のためのγ線スペクトル解析プログラムの開発, Radioisotopes, 34, (1985), 155.
- 3) 鈴木章悟, 平井昭司: γ線スペクトル解析プログラム(GAMA98)の開発, Radioisotopes, 38, (1989), 315.
- 4) 日下 譲: 放射化分析, 共立出版, (1973)
- 5) 放射化分析による環境調査—微量・多元素・同時分析法—, 日本アイソトープ協会編, アイソトープ協会, (1979)
- 6) 日下 譲, 平井昭司: 放射化分析, 化学総説No.29 核現象と分析化学, 日本化学会編, 学会出版センター, (1980), 43.
- 7) 橋本芳一編: 放射化分析の実際, 講談社サイエンティフィク, (1978)
- 8) 橋本芳一, 大歳恒彦: 放射化分析法・PIXE分析法, 日本分析化学会編, 共立出版, (1986)
- 9) 平井昭司: 放射化分析法, 高純度化技術体系 第1巻, 保母俊行監修, フジ・テクノシステム, (1996)
- 10) 連載講座中性子放射化分析, Radioisotopes, 日本アイソトープ協会編, 43, (1994), 41 (No.1), 99 (No.2), 228 (No.4), 371 (No.6), 432 (No.7).

(1998年8月10日受付)



鉄の歴史

戦後復興・発展期における我が国鉄鋼製造技術史—学術編 耐熱鋼の進歩とそれを支えた科学 —高温における固溶強化と炭化物の析出分散強化を中心として—

田中良平 (株)超高温材料研究所 技術顧問

Ryohei Tanaka

A Brief History of R&D and Some Strengthening Mechanisms in Heat-Resisting Steels at Elevated Temperatures

1 はじめに

1.1 耐熱鋼とは

耐熱鋼は高温装置などの構成材料としての不可欠な材料であるが、その耐熱鋼に要求される特性は、一般に①耐酸化・耐食性のような化学的性質、②高温強度、とくにクリープ強度や疲労強度などの力学的性質、またときには③熱膨張係数や熱伝導率、あるいは密度などの物理的性質も重要であり、さらに④加工性や溶接・接合性、そして⑤それらの特性に見合った適切な生産コスト、つまりコスト／パフォーマンスのバランスもまた欠かせない要素である。

これらのうちどれを重視するかは、用途、とくに使用される部品の種類、環境、応力などの条件によって変わるが、一般に材料開発の観点からは、高温の酸化・腐食に対する安定性、すなわち①の耐酸化・耐食性と、②の高温での大きな強度と靱性とがもっとも重要であり、研究と開発は主としてこの二つの性質の向上改善を車の両輪のようにして進められてきたと言えよう。

JIS G 0203-1984 鉄鋼用語(品質)でも、耐熱鋼は次のように定義されている。

「高温における各種環境で耐酸化性、耐高温腐食性または高温強度を保持する合金鋼。数%以上のCrのほかNi, Co, Wその他の合金元素を含むことが多い。主としてその組織によってマルテンサイト系、フェライト系、オーステナイト系および析出硬化系の四つに分類される。なお、合金元素の総量が約50%を超える場合は一般に超耐熱合金または耐熱合金もしくは単に超合金と呼ばれる。」

本稿では、このような耐熱鋼について、まず戦前戦後の開発の歴史は垣間見る程度にとどめ、次いで固溶強化と炭化物の析出強化に焦点を絞り、戦後における高温強化機構の考え方について簡単な展望を述べてみたい。

1.2 耐熱鋼小史

耐熱鋼という名称は何時ごろから用いられ、また何を目的として開発されてきたのか、その用途は戦前と戦後でどう違うのであろうか？

青木¹⁾によれば、「砲身用の耐高温酸化材料を探していた英国のブレアリーは、マルテンサイト系ステンレス鋼に当たる13%Cr鋼が耐酸化性ととも耐食性にも優れていることを見だし、1913年に試験鋼塊を製造したが、軍はこれに関心を持たず、食卓用ナイフとして実用されるようになった(中略)。彼は、英国での用途開発に見切りをつけ、一連のCr鋼について“Cutlery”という名称で1915年に米国特許を出願し、さらにガス・水道メータの軸類などへの将来の商業性を見越し、“Stainless Steel”と名付けた。ガスタービンブレードへの適用も考えていたというが、それが実用化したのは戦後のことである」と書かれている。青木¹⁾はまた、「Ni入りのステンレス鋼については、クルップ社のマウラーとシュトラウスが熱電対用保護管の研究に見だしたFe-Cr-Ni系合金に関する特許を1912年に出願している」とも述べている。一方、濱住²⁾によれば「1906年にニクロム電熱合金を開発したMarshは、Fe-Cr-Al電熱合金も発明したが、この合金は著しくもろく常温で線引きできないため、実用化には至らなかった」とされている。このFe-Cr-Al合金も1930年代には加工技術が進歩して電熱線として実用化されている。

さて日本では、往時の海軍が第1次世界大戦後の艦船用蒸気タービンの高圧化につれて1929年にそれまでのリン青銅の動翼に替えて13Crステンレス鋼を採用している³⁾。

これらが日本での耐熱鋼の草分けであろうか。

1920年代には、軍用飛行機の高速化に向けて各国でターボチャージャやガスタービンの開発が進められ、それに必要な耐熱鋼の開発も盛んに行われた。日本でも1930年代から40年代にかけて航空機のガスタービン用耐熱鋼の開発が

かなり行われ、海軍技術将校であった川村宏矣はその中心的な役割を果たした⁴⁾。

戦後の1952年になって、日本金属学会誌に8号にわたって連載された玉置と出口の進歩総説「耐熱鋼」⁵⁾は、戦前・戦後にかけての低合金耐熱鋼からフェライト系、オーステナイト系および超合金までの主要な研究が詳細に紹介されている。そのなかでとくに、「第2次大戦の後半においてガスタービンとしてかつてなき高性能の耐熱鋼が要求され、かつ資源的關係よりNiを全然含まざるオーステナイト高Mn-Cr鋼をこれに当てなければならなかったために、これに関する研究が各方面で甚だ盛んに行われた」として、この種の研究内容をかなり詳細に述べている。ここで挙げられているガスタービンは、航空機用エンジンである。

日本のジェットエンジンの開発は1941年頃から海軍を中心に進められ、1945年8月7日、国産ジェットエンジンの「ネ20」を積んだ双発機「橘花」が千葉県木更津の飛行場で、高度600m、12分間の初飛行に成功した⁶⁾だけで、終戦を迎えた。以来、サンフランシスコ平和条約が効力を発する1952年まで、日本は航空機に関する一切の活動が禁じられて、欧米で展開されたジェットエンジンの開発競争から完全に切り残された形になるとともに、耐熱金属材料の開発にも見るべき成果がないままに推移した。

ところで、1940年代前後の金属材料に関する代表的な教科書と言える三島の著書⁷⁾には耐熱鋼の名称はなく、「ヴァルブ鋼」が記載されているのみである。一方、第2次大戦の終了も間近い1944年8月に発刊された前記の濱住の著書「晩近鉄鋼及び特殊鋼」では、B5判の本に第38章として「耐熱鋼」²⁾が実に14ページにわたってかなり詳細に記述されている。その用途としては「冶金工業、化学工業、その他機械部品としても高温高压蒸気に接する場合など、高温で強くかつ変質しない鋼が必要である」とし、炉金物や石炭液化の反応塔、発動機弁、蒸気タービン翼などが例として挙げられている。

これらのなかで、この時代に耐熱鋼がもっとも発展し実用化が進んだのは、自動車や軍用航空機のエンジンバルブ、とくに排気弁であろう。濱住の著書²⁾には、現在のJIS耐熱鋼のSUH31に類似した組成を持つCr-Ni-W鋼について、イタリアの論文から引用された「100hにつき0.1%の匍匐限(著者注：クリープ限度)」の温度依存性(800℃まで)の図が一つだけ示されている。

これらの著書で、前記の玉置、出口の総説に見られる大戦中の膨大な研究開発にまったく触れられていないのは、資料が公表されていなかったためであろう。

一方、火力発電の歴史⁸⁾によると、日本で小規模の蒸気機関による発電が開始されたのは1887年であるが、運転温度

に関しては戦中戦後に長い停滞期間があり、主蒸気温度が450℃を超え482℃〔送電端効率29%(HHV)〕に上がったのは1952年である。三瀬⁹⁾によれば、戦後初めて熱効率のよい高温高压ボイラといわれた第1号機は温度470℃、圧力58気圧(5.7MPa)、「クリープ性能が要求され、キルド鋼に転換するようになり、Cr-Mo鋼も多く使われだした」とされている。このように、普通鋼では強度が不足して使用に耐えなくなり、高温強度を高めるために少量の合金元素が添加された特殊鋼が用いられるようになって、ボイラ用の各種鋼板や鋼管が開発され広く実用化されてきた。火力設備の近代化はようやくこの頃に始まったと言えよう。その後の約20年間に温度・圧力とも急上昇し、主蒸気温度で538℃(再熱温度は566℃)、圧力は24.1MPaの超臨界圧発電が一般的となり、高温の強度と耐酸化性に優れる18-8系ステンレス鋼が大量に使われるようになってきた。なお、現在進められている超々臨界圧発電設備の蒸気条件は566~649℃-31.0~34.4MPaの範囲である。

化学工業の分野では、1960年代に入って、石油化学工業が急速に普及するにつれて、水蒸気改質炉やエチレン分解炉にCrやSi, Niなどを多く添加された耐熱鋳物部品が利用されるようになり、やがて遠心鋳造によるオーステナイト系耐熱鋳鋼管も多量に使用されるようになってきた。



高温における強化機構に関する研究の発展

前節で述べたように、耐熱鋼に要求されるもっとも重要な性質は高温の強度と耐酸化・耐食性であるが、以下では高温強度に焦点を絞り、強化機構についての戦後の発展に触れてみたい。

2.1 高温における強度と組織

一定の温度、一定の応力のもとでクリープ現象を測定して得られるひずみと時間の関係はクリープ曲線と呼ばれ、一般には一次、二次、および三次クリープの3段階に分けられることが多い(それぞれ遷移クリープ、定常クリープ、および加速クリープとも言う)。一般に塑性変形が始まるとそれにともなう転位の増殖によって加工硬化が起こり、変形抵抗が外力と釣り合うまでクリープ速度は減少する。この段階が一次クリープである。高温では加工硬化組織の回復が起こるため塑性変形は継続し、加工硬化と回復が釣り合うときはほぼ一定の速度でクリープ変形が進むようになる。これを二次クリープと呼んでいる。変形が進んで、き裂やキャビティ、くびれなどが試験片に生じるとクリープ速度は次第に大きくなり、破壊に至るわけであるが、最近

では、き裂などが生じなくても加速クリープは現れ、き裂などの有効断面積の減少以外にも三次クリープの原因を考える必要があるとされている¹⁰⁾。

このようなクリープ変形の素過程としては、転位すべり、拡散クリープ、格子拡散(Nabarro Herring)クリープ、粒界拡散(Coble)クリープなどが挙げられているが、それらの詳細については最近の成書¹¹⁾などを参照されたい。

耐熱鋼では、その組織、とくに転位その他の格子欠陥や析出物などを含み微細組織と高温強度との関連性を追求して、その強化因子を解明し、これを足場にして効率的に高温強度、とくに耐クリープ性の高い材料を開発しようとする努力が長年にわたって行われてきた。しかしながら、今日の実用材料では、熱力学的平衡状態の安定組織になっていることはまれであり、高温での使用中あるいはクリープ試験中に、析出その他の現象が複雑にからみ合ってクリープ挙動に大きな影響を与えることが多く、理論的な取扱いは必ずしも容易ではない。しかし、強化機構についての基礎的な知見は着実に積み重ねられてきた。

材料の種類や組成によっても異なるが、一般にクリープが問題となる温度、応力の範囲では、転位の運動を阻止することがもっとも重要であり、クリープ強度に関係する主な組織上の因子としては、固溶強化、析出分散強化、および結晶粒度の三つに大別されよう。

以下では、これらの組織因子のうち、固溶強化と析出分散強化に関連する戦後の知見の推移について、定性的ながら解説を試みる。

2.2 固溶強化

2.2.1 固溶強化に寄与する主な因子(1)―積層欠陥エネルギー、自己拡散係数およびヤング率

耐熱鋼の固溶強化機構については、東京工大当時の著者のグループによる総説¹²⁾もあるが、ここでは若干の説明を加えつつ、その要点を述べる。

鋼のクリープにおける添加元素の影響についての先駆的な研究の一つは、C. R. Austinらの論文¹³⁾であろう。図1は、工業用純鉄に各種の合金元素をそれぞれ単独に添加した場合の427°Cにおけるクリープ強度の変化を示した彼らの実験結果の一部である。この図でFeとの原子半径の差が大きいMoは高温強度を増加させる傾向も著しく、1%までの添加ではCrがMoに次いでいる。

このように、固溶強化は主として固溶原子による格子ひずみにもとづくものと考えられるが、この図で1%の合金元素の添加による固溶強化の程度は、原子半径差とは必ずしも比例しない。その原因については後章で触れるが、一口に固溶強化と言ってもその内容は単純ではない。

前節で、定常クリープは加工硬化と回復の釣り合った状態での変形の進行と考えたが、クリープに強い材料を開発するには、加工硬化の大きいことと、回復速度の小さいことが必要となる。しかし、一般に加工硬化は合金元素によってはあまり影響を受けない。そこで、クリープにともなって導入された変形組織の回復を合金元素によって遅らせることができれば、耐クリープ性を改善することが可能となろう。そのように考えれば、まず拡散係数を小さくする合金元素の添加が有利と言えるが、SherbyとBarrettは自己拡散係数 D のほかに積層欠陥エネルギー Γ とヤング率 E も主な固溶強化因子として挙げ、これら三つの因子が定常クリープ速度 $\dot{\epsilon}_s$ に及ぼす影響を純金属¹⁴⁾および黄銅¹⁵⁾について実験的に調べ、次のような式を与えている。

$$\dot{\epsilon}_s = A \cdot \Gamma^m (\sigma_a/E)^n D \cdots \cdots \cdots (1)$$

ここで、 A は材料固有の定数、 σ_a は負荷応力、 m と n は定数であり、 m はおよそ3.5、 n はおよそ5.0とされている。これがいわゆるSherby-Barrettの式である。

この式によれば、高温での強化をはかる、つまりクリープ速度 $\dot{\epsilon}_s$ を小さくするためには、積層欠陥エネルギー Γ と自己拡散係数 D を低下させ、ヤング率 E を増加させる合金元素の添加が有利であり、とくに5乗で効く E と3.5乗で効く Γ を大きく変化させる合金元素が望ましいことになる。須藤ら^{16,17)}は、(1)式を用いてNiにCu、CrおよびWをそれ

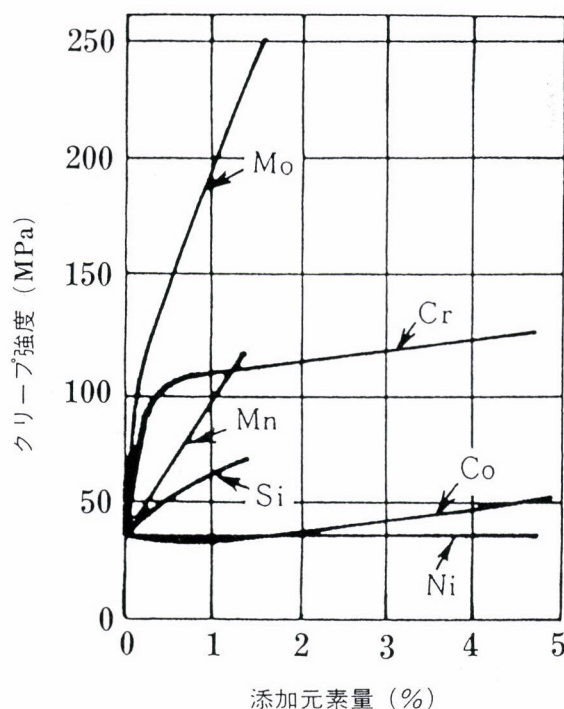


図1 工業用純鉄のクリープ強度に及ぼす合金元素の影響¹³⁾
(クリープ強度は、427°Cで 10^{-6} /hのクリープ速度を生じる応力をとっている)

それぞれに添加した場合のクリープ速度の減少を解析し、両元素が E 、 Γ および D の各因子の変化を通じて高温強化にどのように寄与しているかを定量的に示した。その結果のなかからCrとWの効果を図2¹⁷⁾に引用した。CrとWのいずれも、定常クリープ速度を減少させる度合いは、固溶元素による積層欠陥エネルギーの減少を通しての効果がもっとも大きい。しかし、 Γ のほか、 E と D を含めてそれらの変化に起因するクリープ速度減少量の計算値(図中の3点鎖線)は実測のクリープ速度 $\dot{\epsilon}_s$ (obs)に十分には届かず、まだ1割程度の他の要因の存在が推定される。そこで、須藤らは鈴木効果あるいはコットレル効果と類似したdrag stressの寄与を示唆しているが、いずれにしてもNi合金の場合は、合金元素のクリープ強化因子として、積層欠陥エネルギー Γ の役割がもっとも大きい。 Γ が小さく積層欠陥を生じやすい場合には、その積層欠陥自体の効果と同時に、そこに析出する炭化物などの微細分散を容易にし、またその積層欠陥に溶質原子が偏析し、更に積層欠陥の幅を広げて安定化し、転位の上昇運動や交差すべりを困難にする。このような現象は鈴木効果¹⁸⁾と呼ばれ、Cottrell効果と異なって濃度の異なる部分の範囲が非常に広い(3~10nm)ため、熱運動によって転位がそこから脱出することがきわめて困難となり、それによる強化は温度が上昇してもあまり減少しないという特徴がある。一般にfcc構造のオーステナイト鋼がbcc構造を持つフェライト系の鋼より高い強度を

示す原因は、最密充填構造のため D が二桁程度小さいことに加え、この低 Γ による鈴木効果によるところも大きいと考えられる。

2.2.2 固溶強化に寄与する主な因子(2)一原子の大きさ効果(size effect)

前述のように、須藤らはNi基合金のクリープ強化について、 Γ 、 E および D の効果を抽出評価したが、鋼の場合の合金元素の役割はどうであろうか？ 著者のグループでは、Ni合金と同じfcc構造を持ち、耐熱鋼として多用されているオーステナイト系のステンレス鋼を取り上げ、上記の須藤らと同様の解析を試みた。炭化物その他の析出による効果を排除して純粋な固溶強化のみを評価するため、炭素無添加の17Cr-14Ni鋼を用い、Cu、Mn、Moなど数種の置換型元素をそれぞれ単独に添加して900℃でのクリープ試験を行い、固溶元素によるクリープ速度の変化に対する Γ 、 E および D の各強化因子の寄与を抽出評価した¹⁹⁾。その結果、上記3因子の効果は意外に小さく、むしろ図3に示すように、固溶原子の大きさ効果を格子ひずみ率(%)で表すと、合金元素の種類にかかわらず、定常クリープ速度との間に直線関係が見いだされた。Ni基合金とはまったく異なり格子ひずみが相対的に大きな重要性を持っていることが分かる。ここで、

$$\text{格子ひずみ率}(\%) = (|a - a_0| / a_0) \times 100 \quad \cdots (2)$$

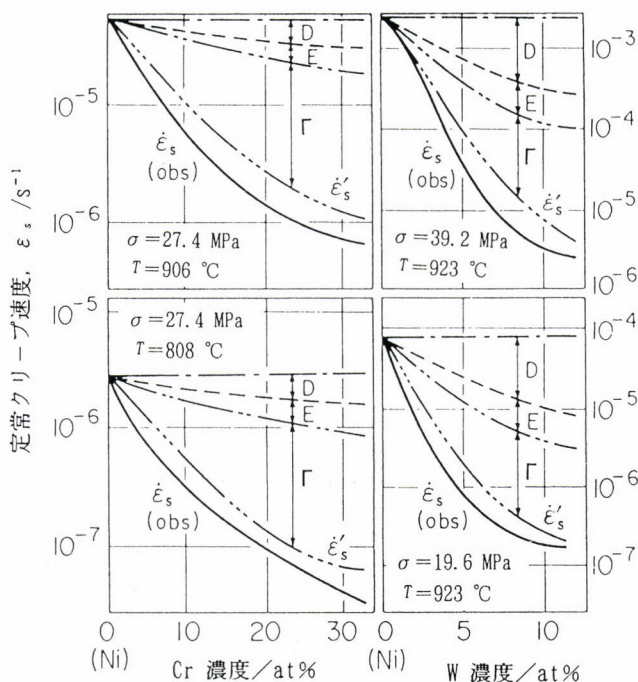


図2 Ni-CrおよびNi-W合金のクリープ抵抗に及ぼす固溶強化因子の効果¹⁷⁾

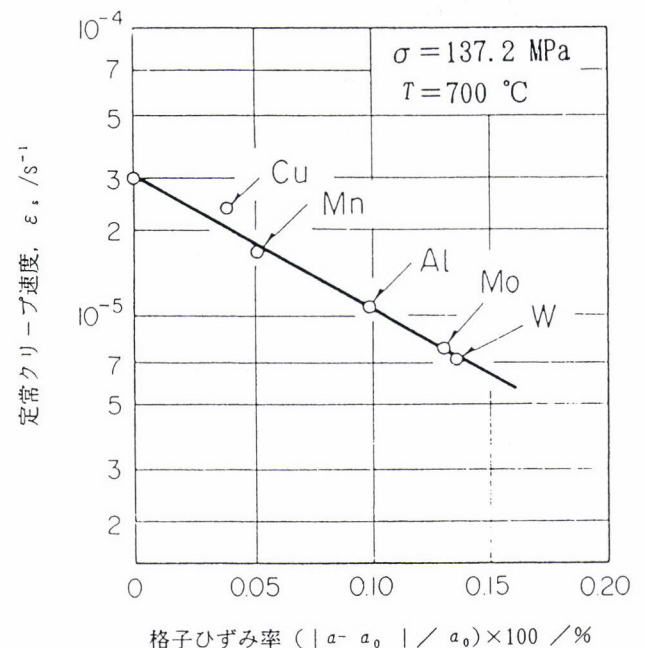


図3 17Cr-14Ni オーステナイト鋼における各固溶元素1at%当たりの定常クリープ速度の減少と格子ひずみ率の増加¹⁹⁾

であり、 a_0 ：基本組成鋼のオーステナイト格子定数、 a ：固溶元素を添加した鋼のオーステナイト格子定数である。

ところで、固溶体中では溶質原子が転位の周りに集まり、いわゆるCottrell雰囲気を作ることはよく知られている。転位はこの雰囲気から引きずり抵抗を受けながら運動することになるが、この場合の転位の速度に関与する因子の中に原子の大きさ効果が含まれ、格子ひずみの二乗に逆比例して転位の速度は減少することが理論的に予測されている²⁰⁾。この引きずり抵抗は、フェライト中で侵入型に固溶するC原子によって大きく現れるが、このCと相互作用を持つ第3元素(主として置換型固溶元素)が存在すれば、引きずり抵抗がいつそう強くなることは容易に推測される。図1に関連して述べた1%の合金元素添加による固溶強化の程度が、原子半径差、つまり格子ひずみの大きさととは比例しないという実験結果は、工業用純鉄中に少量含まれるCやNと、CrやMnなどの添加元素との間に生じる異種原子同士の相互作用によって引きずり抵抗を高めているものと考えられる。

須藤ら^{21,22)}は、このような発想で、侵入型固溶原子(I)であるC、Nと、これらとの化学的相互作用が中程度に強い置換型固溶原子(S)であるCr、Mn、Mo、Wなどの原子が互いに化学的に引き合って転位の周りに複合雰囲気ないしはクラスターをつくり、青熱脆性類似の機構によって強化作用を示すものであるとして、この強化機構をI-S効果と名付けている。この効果は、C、Nとの相互作用の小さい元素を加えたときには現れにくく、また相互作用の大きすぎるTiやZrの添加ではC、Nの固溶量が非常に減少するため、やは

り現れにくくなる。

図4²³⁾には、このI-S効果を含めて、耐熱鋼と超合金の使用温度範囲ごとの主な強化因子が説明的に示されている。I-S効果は、300℃以上で現れ、高温ほど大きくなるが、理論的な検討²²⁾によれば、800Kつまり約530℃では0.01%/hのクリープ速度でI-S効果は極大を示し、クリープ強度に対して50MPa程度の寄与をするとされている。したがって実用材料の1%/10⁵hのような非常に遅いクリープ速度領域が問題となる場合は、あまり有効ではないように思われる。むしろ、低合金鋼の設計許容応力が主として降伏点の値で決められる400℃程度までの温度範囲でI-S効果は極めて有効に寄与するものと言えよう。

かつて低炭素鋼の高温強度のばらつきが問題となり、その主因が脱酸法にあること、鋼中のNがAlによって固定されると高温強度が低下すること、そのNがフェライト中に固溶している場合に高温強度が高くなることなどが明らかにされた^{24,25)}。このNの作用については、Mnとのクラスターが生成することによって強度が高められる^{26,27)}と考えられていたが、このようにNがMnとともにフェライト中に固溶しているときに現れる強化は、上記のI-S効果でよく理解されよう。またこのような強化機構は、降伏点で許容応力が決まる400℃程度までの温度範囲での経済的な高強度鋼種の開発・実用化に応用されている。ただし、低合金鋼のクリープ強化は、炭化物などの安定な析出相の微細均一分布による分散強化に依存するところが大きいと考えられる。

一方、オーステナイト系耐熱鋼においてもNがCrやMo

温度 (°C)	使用される耐熱鋼	強化に寄与する分散粒子	主要な固溶強化作用(その模型) ・ I: 侵入型原子 (C, N) ● S: 置換型原子 (Cr, Mo など) ⊥ 転位, τ 応力, $\sim$ 相互作用
R. T.	普通鋼	Fe_3C	
100			
200			
300	低合金耐熱鋼 ($2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼 など)	$(\text{Fe}\cdot\text{Cr})_3\text{C}$	
400		$\text{Mo}_2\text{C}, \text{V}_4\text{C}_3$	
500	5Cr, 12Cr 鋼	$\text{Cr}_7\text{C}_3, \text{Cr}_{23}\text{C}_6,$	
600		$\text{Mo}_2\text{C}, \text{V}_4\text{C}_3, \text{NbC}$	
700	ステンレス鋼 Fe基 Co基 N基	$\text{Mo}_2\text{C}, \text{V}_4\text{C}_3, \text{NbC},$	(積層欠陥エネ) ⊥ ●●●● (鈴木効果) (ルギー減少) (短範囲規則格子)
800		$\text{TiC}, \text{Cr}_{23}\text{C}_6$	
900		$\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ 各種金属間化合物	

図4 耐熱鋼の使用温度範囲と主な強化因子²³⁾

と共存するときに著しい高温強化作用が認められている。すなわち、Cをほとんど含まない高Cr-高Niオーステナイト鋼で、N添加量が0.3%程度までは添加量の増加とともに700°Cクリーブ破断強度は増加するのに対し、NとMoを組み合わせて添加すると、N添加量を0.3%以上に高めてもさらに破断強度は増加する²⁸⁾。高Cr-高Niのオーステナイト素地へのNの固溶限は、Cに比べて一桁以上大きい、そのNを窒化物の固溶限以上に添加しても、その添加量に応じた固溶強化が長時間にわたって維持される。例えば、0.22%のNを含む鋼では、700°Cで数千時間の時効を施しても母相中のN濃度はほとんど低下せず、0.31%N鋼では700°Cおよび800°Cで数千時間後も過飽和のNが母相中に残存し、窒化物の析出はMoの共存により著しく遅滞される。この固溶Nがこの鋼の高温強化に大きく寄与している²⁹⁾。またMoが共存せずCrだけでもNの固溶強化は1000°Cまで認められ、その効果は低温、長時間側で著しいことが報告されている³⁰⁾。

鋼の合金元素としてのNは、戦前からドイツで、そして日本でも、Niの代替元素としてオーステナイト系耐熱鋼の開発に利用されてきたことは前述した。戦後のステンレス鋼の発展の過程では、むしろCとともにNもできるだけ減少させて粒界腐食を防止する方向に進んできたと言えるが、1960年代からの岡本らの研究³¹⁾を初めとして、再びNが利用されるようになり、現在のJISではオーステナイト系のステンレス鋼板で10種類以上が最大0.4%までのNを含むように規定され、耐熱鋼でもバルブ鋼を中心に4鋼種がある。

2.3 析出強化

Ni基超合金における γ' 相 $[\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})]$ を初めとして、析出分散強化が耐熱金属材料にとって極めて重要であることは言うまでもないが、添加元素は固溶限の範囲でまず固溶強化に働き、固溶限を超えると析出相を生じて、これも強化に関与するようになる。

今日、実用されている耐熱鋼や超合金では、固溶強化された素地の全面にさらに微細な析出物を分散させてその強度をいっそう高めるようにしたものが多い。析出物の周囲には内部応力場を生じて、転位の運動に対する障害となり強化が起こる。しかし、析出物の大きさが小さすぎ、また析出物間の距離が近すぎると強化作用はあり大きくない。析出物の大きさおよび間隔が適当な状態のときに強化はもっとも大きくなり、それ以上に間隔を増すと転位は析出物の周りに転位の輪を残して析出物の間を容易に通抜けける。一般に析出物は高温になるほど凝集成長してその間隔は大きくなるため、転位の通過が容易となり、高温強度は

低下する。高温で耐クリープ性を維持させるためには、適度の強度を持つ析出物をできるだけ多く、かつ適当な大きさに一様に分布させることが必要であり、析出粒子の平均間隔がもっとも重要である。

いわゆる酸化物分散強化型(ODS)合金は別として、一般に材料中の析出物はあらかじめ熱処理によって適当に析出分散させておく場合もあり、また高温での使用中に素地から析出することもあるが、いずれにしても高温長時間では析出物は次第に凝集成長する。

そこで、析出強化を効果的に利用するためには、まず素地中に多数の析出サイトの発生をはかるとともに、析出粒子の凝集成長を抑制する必要がある。

2.3.1 母相結晶粒内への多数の析出サイトの付与

フェライト系やマルテンサイト系の耐熱鋼では、熱処理によって析出炭化物を素地中に微細かつよく分布させた状態で核発生させることは比較的容易と思われるが、オーステナイト系の場合は、 M_{23}C_6 炭化物がしばしば結晶粒界へ優先析出し、オーステナイト粒内へ分散析出することは比較的少ない。この粒界析出が18-8系ステンレス鋼の粒界腐食の原因とされてきたわけであるが、クリープ変形にともなってオーステナイト粒内へ転位が導入されると、炭化物はその転位上に核発生して転位の運動を妨げる効果が現れる。しかし、可能ならばクリープ変形が始まる前に微細分散を生じさせる多数の析出サイトを与えておくことが望ましい。幸いに微量のTi, Nbを添加した鋼では M_{23}C_6 が主としてオーステナイト粒内に析出するようになり、しかもその分散状態が均一微細となって、クリーブ破断強度を著しく高めることが見いだされた³²⁾。この発見は、ステンレス鋼スクラップを配合すると溶製材のクリーブ破断強度が大きくばらつくことに気付いたのが始まりである。そのばらつきのうち、強度の高い鋼ではオーステナイト粒内に析出炭化物の微細分散析出がみられること、このような炭化物の微細析出が微量のTi, Nbの混入によってもたらされたものと推論され³²⁾、微量Ti, Nbの組み合わせ添加の影響が研究された。図5³²⁾はその実験結果で、(a)のように $(\text{Ti} + \text{Nb})/\text{C}$ の原子比が約0.25のときに650°Cおよび700°C-1000hのクリーブ破断強度は明瞭な極大値を示している。また $(\text{Ti} + \text{Nb})/\text{C}$ の値を0.25付近で一定にし、TiとNbの割合を変えた場合は、同図(b)にみられるようにTiとNbの原子比がほぼ等量のときに最大の強度が得られる。微細組織観察の結果、このような高強度の鋼では M_{23}C_6 の凝集が他の鋼に比べて遅いことも明らかにされ、適量のTi, Nbの組み合わせ添加が炭化物 M_{23}C_6 のオーステナイト粒内への均一核発生を促し、かつその粗大化を遅らせること

に役立ってクリープ破断強度を向上させているものと結論された³²⁾。その後の研究から、このような微量Ti、Nbの効果は、固溶化熱処理の際にオーステナイト粒内に未固溶のまま少量残存するTiやNbの炭化物が、クリープ変形によって導入される転位のからみつきを誘発して析出サイトを提供し、 $M_{23}C_6$ 炭化物の微細析出を促進したものと理解されている³³⁾。

このような炭化物の分散状態が高温強度に与える影響を考慮すると、以前から粒界腐食を防止するための安定型ステンレス鋼として使用されてきたSUS321あるいは347鋼のTiおよびNbの添加量は、高温強度の観点からは必ずしも適当ではない。すぐれた高温強度を得るためには、むしろ通常の添加量の数分の一でよく、かつ両者を組み合わせることが有効である。

オーステナイト系耐熱鋼の場合は、このようにまず何らかの形で粒内析出のサイトを与えることが高温強度の観点からは重要であろう。

2.3.2 析出炭化物の凝集を遅らせる

分散粒子の凝集は、素地中の溶質原子の拡散が起こりうる条件のもとで、小さい粒子が固溶し、その溶質原子が大きな粒子の方へ拡散してその表面に析出し、それを成長させることによって起こると考えられるが、この過程における素地の溶質濃度と粒子径などの関係について、Nuttingら³⁴⁾は次式を与えている。

$$\ln \frac{C_r}{C_\infty} = \frac{2V\gamma}{rRT} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで C_r と C_∞ はそれぞれ r および無限大の半径をもつ

分散粒子と接した素地中の溶質濃度、 V は分散相の1mol当たりの容積、 γ は分散相と素地との界面エネルギー、 T は温度(K)、 R はガス定数である。この式から、分散粒子を成長させないためには、 γ 、 V および C_∞ を小さくすることが必要である。もし γ が大きければ、 C_r/C_∞ 比が大となり、大きな濃度差を生じて容易に拡散が起こり、分散相は急速に凝集成長する。界面エネルギーは分散相の性質によるが、素地と分散相のいずれか、または両方に固溶できる他の合金元素を添加することによって変えることができる。例えば、フェライト鋼中の V_4C_3 粒子は、 V/C 比が4より大きいときに成長が速くなる³⁵⁾。この比以上の V は素地に固溶してフェライトの格子定数を変え界面エネルギーを大きくするからで、Moを添加すればそのMoが素地と V_4C_3 の両方に固溶して V_4C_3 の成長速度は減少する。

18-8系ステンレス鋼の場合も同様である。この系の鋼に析出する炭化物 $M_{23}C_6$ はfcc系であり、 $M_{23}C_6$ 粒子と同じfccであるオーステナイト素地との界面のmisfitを微量添加元素で調整して界面エネルギーを低下させ、 $M_{23}C_6$ 粒子の凝集を遅らせることができる。例えば、微量のBおよびNの添加によって高いクリープ破断強度が得られるのは、まさにそのような効果で、微細な炭化物分散状態が長時間にわたり維持されるためであろうと考えられている³⁶⁾。Moの添加は逆にmisfitを大きくして炭化物の凝集を促進する。

B むすび

本稿では、「鉄の歴史—学術編」という主題にしたがって、まず戦前から戦後にわたる耐熱鋼開発の経過に触れ、次いで耐熱鋼に要求される特性のなかで高温強度問題に焦点を当て、とくに固溶強化および析出強化の機構に関連する過去の研究に絞って著者の周辺を中心に述べた。クリープ強度に関しては、これらの因子のほかにも結晶粒度や結晶粒界の役割、粒界における炭化物析出や偏析元素などの問題もあるが、紙面の都合で割愛した。

最近の耐熱鋼の研究は、強度および強化機構に関連するものだけでも大変な数の論文が発表されている。とくに金属材料技術研究所の膨大な長時間クリープデータに基づいて、フェライト系耐熱鋼の長時間クリープ強度特性が系統的に解析された結果から、基底クリープ強度という新たな概念が提唱されている³⁷⁾。この基底クリープ強度は、「微細組織形態や時間の経過に依存しない強度特性である」「微細組織が完全に焼戻されるだけの十分な時間が経過した高温・長時間側では微細組織形態に依存した強化因子の効果は消滅し、クリープ強度は時間の経過に依存しない固有の強度特性となる」とし、このような安定な強度特性を基底

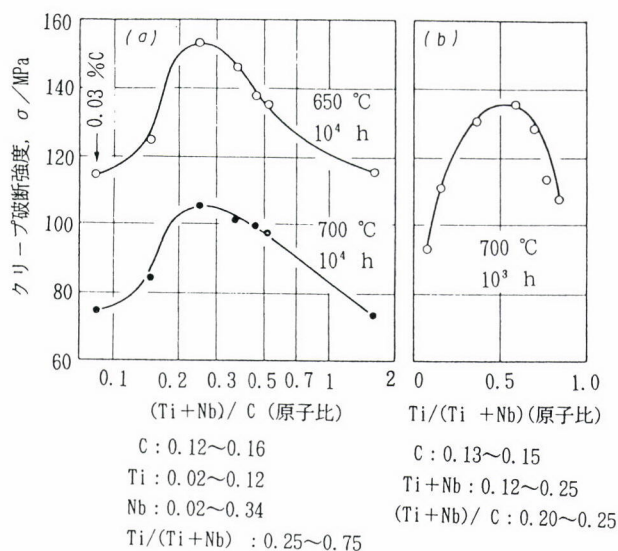


図5 18-8ステンレス鋼のクリープ破断強度に及ぼすTiとNbの組み合わせ添加の影響(固溶化熱処理温度: 1100°C)³²⁾

クリープ強度と名付けられている³⁸⁾。

同様のことはオーステナイト鋼についても言えそうである。松尾はクリープ破断強度に及ぼす炭化物の析出分散の効果を模式的に図6³⁹⁾のように示している。図中の太線は応力-破断時間曲線であり、斜線を施した部分は炭化物の析出分散強化(加工硬化なども含まれよう⁴⁰⁾)による破断時間の延長を示している。フェライト系耐熱鋼の場合、斜線部の下側の直線は、まさに上述の基底クリープ強度に相当する。

一方、オーステナイト鋼の場合は、固溶化熱処理を施し、 γ 単相として使用される場合が多く、そのため炭化物による析出分散強化が最大となる時間域で破断時間はもっとも長くなる。ところが、650℃付近では $M_{23}C_6$ の析出は非常に速く、また応力負荷も析出を速めることから、高応力側(短時間側)の破断時間はとくに試験前の熱履歴に強く依存するとしている³⁹⁾。

ところで、基底クリープ強度の概念を認めるならば、これまでの高温強化に関する多数の研究は何であったか、と考えさせられる。確かに高温では拡散が速く、析出粒子が容易に粗大化して、分散粒子による強化作用はやがてほとんど意味をなさなくなる場合があることは言うまでもない。だからこれまでの研究が無意味である、というわけではない。これまでの耐熱鋼の強化に関する研究開発は、むしろ実用上の必要な温度範囲、使用時間の範囲で、「必要にして十分な程度」に組織変化を抑制し、強度を維持させる、という命題に取り組み、苦勞してきたのであると考えるべきであろう。

本稿は、筆者の独断による偏った一部の研究成果、あるいは実証の不十分な推論を紹介した面も多々あるが、著者のグループの中であって直接研究に当たられた方々、またさまざまなご指導をいただいた方々にこの場を借りて深く感謝の意を表する。

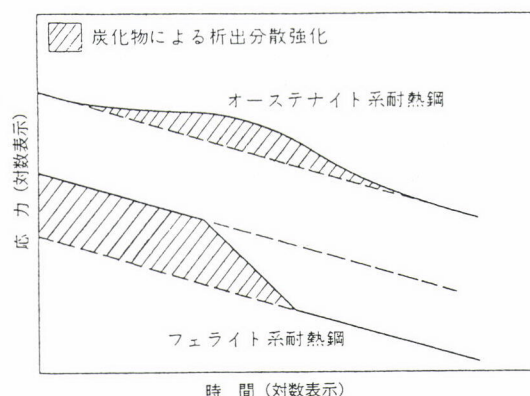


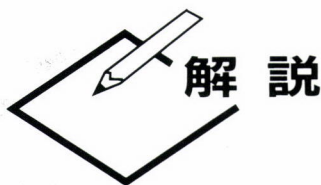
図6 オーステナイト系およびフェライト系耐熱鋼の応力-破断時間曲線に及ぼす析出分散強化の影響³⁷⁾

参考文献

- 1) 青木 茂：防錆管理，41 (1997)，367.
- 2) 濱住松二郎：輓近 鉄鋼及び特殊鋼，内田老鶴圃 (1944)，439.
- 3) 日本ステンレス50年史，日本ステンレス(株)，(1984)，60.
- 4) 出口喜勇爾：私信 (1998)
- 5) 玉置正一，出口喜勇爾：日本金属学会誌，16 (1952)，A-87；A-125；A-172；A-200；A-261；A-292；A-327；A-353.
- 6) IHIの先端技術，PART-IV(ジェットエンジン)，石川島播磨重工業(株)広報部 (1983)
- 7) 三島徳七：金属材料及びその熱処理，共立社 (初版1938年，改訂増補版1942年)
- 8) 山崎泰雄，片岡 穆，黒沢辰雄：日本機械学会誌，100 (1997)，No.938，61.
- 9) 三瀬真作：ふえらむ，3 (1998)，No.2，49.
- 10) 丸山公一，中島英治：高温強度の材料科学，内田老鶴圃 (1947)，7章
- 11) 例えば，文献10) 2章
- 12) 近藤義宏，松尾 孝，田中良平：日本金属学会会報，22 (1983)，24.
- 13) C. R. Austin, C. R. St. Jone and R. W. Lundsday : Trans. Met. Soc. AIME, 162 (1945)，84.
- 14) O. D. Sherby and M. Burke : Progress in Mater Sci., 3 (1967)，325.
- 15) K. R. Williams and B. Wilshire : Met. Sci. J., 7 (1973)，176.
- 16) 須藤 一：日本金属学会誌，34 (1970)，177.
- 17) 須藤 一，山田邦明：日本金属学会誌，35 (1971)，231.
- 18) H. Suzuki : Dislocations and Mechanical Properties of Crystals, Wiley (1957)，361.
- 19) 松尾 孝，篠田隆之，田中良平：鉄と鋼，63 (1977)，980.
- 20) A. H. Cottrell : Dislocations and Plastic Flow in Crystal, Oxford Univ. Press (1953)，139.
- 21) 門間改三，須藤 一，早乙女和己，根本 正：日本金属学会誌，29 (1965)，191；門間改三，須藤 一，小北英夫：日本金属学会誌，29 (1965)，941.
- 22) 門間改三，須藤 一：日本金属学会誌，30 (1966)，558.
- 23) 門間改三，須藤 一：構成金属材料とその熱処理，日本金属学会 (1977)，149.
- 24) J. Glen : J. Lessells, R. R. Barr and G. G. Light-

- body : Structural Processes in Creep, ISI(U.K.), Special Rep., No.70 (1961), 222.
- 25) 三好栄次, 行俊照夫, 岡田康孝 : 鉄と鋼, 50 (1964), 1965.
- 26) L. M. Hopkins : JISI, 203 (1965), 583.
- 27) P. G. Stone : Conf. on 'High Temperature Properties of Steels', Paper No.41 (1966)
- 28) 田中良平, 篠田隆之, 戸部陽一郎 : 鉄と鋼, 56 (1970), 1014.
- 29) 脇田三郎, 菊池 實, 田中良平 : 鉄と鋼, 61 (1975), 2418.
- 30) 松尾 孝, 森岡信彦 : 電気製鋼, 56 (1985), 91.
- 31) 岡本正三, 田中良平, 内藤武志, 藤本六郎 : 鉄と鋼, 48 (1962), 123.
- 32) 篠田隆之, 耳野 亨, 木下和久, 峯岸 功 : 鉄と鋼, 54 (1968), 1472.
- 33) T. Shinoda, R. Tanaka, T. Mimino and K. Kinoshita : Proc. Int. Conf. on Sci. Tech. of Iron and Steel, II, 1224 ; 田中良平, 篠田隆之 : 材料, 21 (1972), 198 ; 篠田隆之, 田中良平 : 日本金属学会会報, 11 (1972), 180.
- 34) J. Nutting and J. M. Arrowsmith : Structural Processes in Creep, ISI(U.K.) Spec. Rep. No.70 (1961), 147.
- 35) R. G. Baker and J. Nutting : Precipitation processes in steels, ISI Spec. Rep. No.64 (1959), 1.
- 36) 松尾 孝, 篠田隆之, 田中良平 : 鉄と鋼, 59 (1973), 907.
- 37) 木村一弘, 九島秀昭, 八木晃一, 田中千秋 : 鉄と鋼, 77 (1991), 667.
- 38) 木村一弘, 九島秀昭, 八木晃一, 田中千秋 : 鉄と鋼, 81 (1995), 757.
- 39) 松尾 孝 : ステンレス鋼便覧, 第3版 (1995), 216.
- 40) 木村一弘 : まてりあ, 35 (1996), 535.

(1998年5月8日受付)



鋼中微量残留元素の功罪

—材質劣化作用を見極め、材質改善効果を探る—

上田修三
Syuzo Ueda

川崎製鉄(株) 理事
技術研究所 首席研究員

Deterioration and Improvement of the Properties by Residual Elements in Steel

1 はじめに

鋼中微量残留元素と言えは材質を損なう徒党を組む嫌われ者—不純物というイメージで捉えられ勝ちであるが、実はそれらの恩恵を蒙っていることも多く、あるときはその秘められた効能に気付かず、悪玉扱いして予期せぬ事態を招くこともある。一概にすっきり無くしてしまえばよいものでもなく、近年その善玉ぶりに目を着け積極的に利用することも考えられるようになった。とにかくそれは鋼種、用途、そして諸特性に応じて七変化しながらの挙動をもつので、成分設計においてとくに注意が払われている。今日の製鋼プロセスにみられる不純物元素および非金属介在物の低減技術については、一昨年本誌に掲載された池田の解説¹⁾にまとめられており、ここではそれに対称する形で関連する材料技術について低合金鋼を主体に概説する。

まず悪玉による要注意の特性変化とその原因および合金元素の添加などその軽減策を整理した。また善玉を掘り起こし、無意識に利用していた薬の作用についても認識を高めることにした。そして来る21世紀の環境重視、省資源、スクラップ大量使用の時代を鑑み、鋼中微量残留元素の積極的利用の可能性を探ってみた。

2 材質のアキレス腱—粒界

2.1 粒界偏析

微量残留元素の鋼中での存在状態は材質に大きな影響を及ぼす。通常それらは組成や熱履歴に応じて固溶、偏析、晶出、析出等の様々な状態にある。固溶度と拡散係数に依存して固溶し、また晶出あるいは析出する。多くの場合凝固偏析、表面偏析、粒界偏析などの形態をとっていると言っても過言ではない。悪玉ぶりが粒界偏析に関わる粒界問題であることはしばしばである。

意図せず鋼中に混入されている元素は平均濃度が微小でも粒界や異相界面にときとして数十倍偏析するので侮れない。結晶粒径が $30\mu\text{m}$ の場合10ppmあれば全粒界(単位原子膜)は覆いつくされる。マクロ偏析を考慮すると1ppmでも安心できない。粒界は変形(転位の運動)や亀裂伝播の障壁となり強度と靱性に寄与する一方、組織ひいては材質のアキレス腱となることは周知であり、粒界偏析は粒界脆化や粒界腐食の原因になっている。

2.2 粒界強度

不純物元素などが粒界に偏析して隣接結晶粒の接合強度すなわち粒界結合が弱くなる機構についてはつぎのように説明されている。

- 不純物原子とその周囲のFe原子との間の結合力が弱くなる。
- 不純物原子とFe原子が共有結合的な強い結合をするため、それらに隣接するFe原子同士の結合が弱められる。この場合破壊は図1に示される経路をとる²⁾。

木村³⁾はFe-P合金を用いた研究でPは2～3原子層の薄い領域に局在し、 Fe_3P の化学結合状態にあることを指摘し、Pによる粒界偏析脆化をb.により説明した。Fe中のSnについてもメスバウアー効果(γ 線の共鳴吸収現象)にて共有結合状態での存在が確認されておりSnによる粒界脆化もb.で説明されている。

粒界に偏析する不純物元素はかような低温脆化のほか、高温での粒界強度にも大きな影響を及ぼしており、これについては3.2節で詳述することにする。

3 材質劣化とその軽減策

残留元素は微量でも固溶状態、粒界または相界面偏析あるいは析出物や非金属介在物の形態で、鋼材の機械的性質、

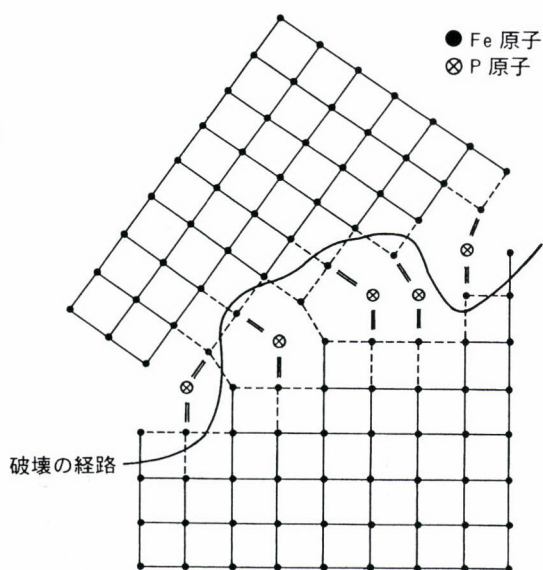


図1 粒界に偏析したPとその周囲の鉄の結合状態および破壊の経路²⁾

溶接性、耐食性、さらには鋼材の製造性を著しく低下させるので、古くから多くの研究によりその原因が明らかにされ、数々の軽減策が講じられてきた⁴⁻⁶⁾。ここではこれまでの不純物元素低減技術の開発の引き金になった代表的現象を紹介する。なお、悪影響の軽減策としては、通常絶対量の低減に加えて合金元素の添加により不純物元素の形態を変化させることが行われている。これは不純物の単位量当たりの有害度に注目すると、素地に固溶または粒界等に偏析する状態で原子単独で存在するよりも、他の原子と結合して物理的歪場や化学的結合力を制御または減少できる析出物の形に変化した方がその影響が少なくなると言う論理に基づいている。また粒界偏析による材質劣化の抑制に結晶粒微細化が有効とされることが多いのは、粒界単位面積当たりの不純物元素量が稀釈されるためである。粒径 $1/n$ で結晶粒当たりの粒界面積は $1/n^2$ 、結晶粒数は n^3 倍となり、粒界面積は n 倍つまり偏析許容範囲は n 倍となる。

ちなみに現在転炉一脱ガス工程では、不純物元素のSは3~5ppm、Pは10~20ppm、Oは5~10ppm、Hは0.5~1.0ppm、そしてCとNも必要ならいずれも10~20ppmの水準に低減できるに至っている。

3.1 靱性の低下

3.1.1 Sによる延性・靱性の低下と異方性の発生

1960年代以降著しい発展をみた球形ガスホルダー用および潜水船耐圧殻用高張力鋼ではとくに靱性要求値が厳しくそのうえ圧延方向(L)とそれに直角方向(C)の靱性が同等であることが望まれた。また建築用や海洋構造物用極厚鋼

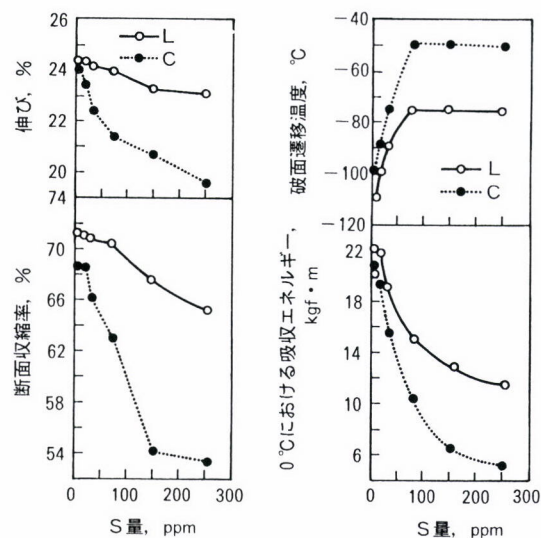


図2 HT780鋼のS量低減による引張延性およびシャルピー衝撃特性の改善効果⁷⁾

板では板厚方向に引張応力がかかる設計となることが多く、板面に平行な剥離であるラメラテアを起こし難い、Z方向引張試験での絞り値の優れた鋼が求められた。図2は極低S化がそれらの要求に応えるものであることを示している⁷⁾。S含有量の低減に努力が払われるとともに、Caや希土類元素(Rare Earth Metals: REM)を添加し、硫化物を展伸MnSから球状CaSやREM・Sに変えることにより、靱性およびその異方性の改善が計られた。

3.1.2 Nによる靱性の低下

溶接構造用鋼については、N量は多くの場合AlやTiなどの窒化物形成元素との量比で結晶粒微細化の観点から合金元素として論じられるものであった。薄板で注目されるストレッチャ・ストレイン(縞状歪模様)の原因となる時効硬化現象が問題視されることは少なく、Nが不純物元素であるという意識は比較的小さかった。ところが大入熱溶接用造船HT490鋼の開発過程で、溶接熱影響部とくにボンド部の靱性がP、SのみならずNの低減で向上することが見出され、図3に示す系統的データの発表⁸⁾もあった。間もなく転炉一脱ガス工程でのN量40ppm以下への低減が可能となり、ボンド部靱性が重視されるとNは悪玉となった。しかし今日Nによる靱性低下の機構は明らかでなく、転位の固着による延性低下、粒界偏析脆化、脆弱な島状マルテンサイト組織の生成の促進などの諸説が打ち出されているところである。

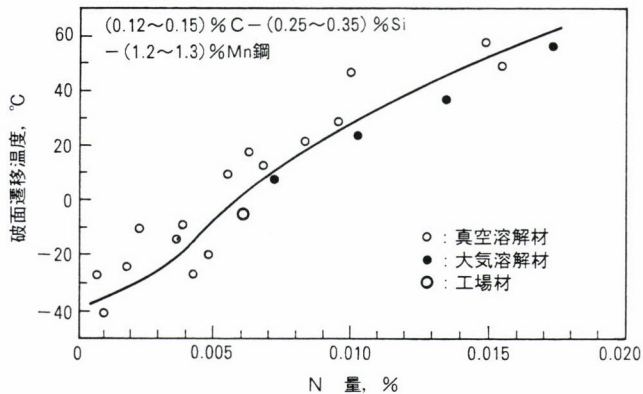


図3 入熱量100kJ/cmのサブマージアーク溶接ボンド部に相当する熱サイクルの靱性とN量の関係⁸⁾ (最高加熱温度1400°C、800~500°C間の冷却時間96s)

3.1.3 微量のP、Sn、Sb、As等による焼もどし脆化

高張力鋼やCr-Mo鋼、とくに重油脱硫反応容器に用いる2 1/4%Cr-1%Mo鋼は母材、溶接部とも400~600°Cで長期間使用された場合、またはこれらの温度域で溶接残留応力を除去するための熱処理などを受けた場合、旧オーステナイト粒界は不純物元素の偏析、とくにCrと共偏析し易いPの偏析により著しく脆化する。この現象を焼もどし脆化と呼び、その感受性指標としては次式のJ値⁹⁾またはX値¹⁰⁾を用いることが多い。

$$J = (Si + Mn)\% \times (P + Sn)\% \times 10^4$$

$$\bar{X} = (10P + 5Sb + 4Sn + As) \text{ ppm} / 100$$

不純物元素の減少は焼もどし脆化の抑制に大変効果的であるので、1980年代以降これらの鋼種では原料の厳選と転炉および炉外精錬により、 $P \leq 0.010\%$ 、 $Sn \leq 0.002\%$ 、 $Sb \leq 0.0007\%$ 、 $As \leq 0.004\%$ が達成されており、この現象が懸念されることはほとんど無くなった。

一方Si量を少し低減するとこの脆化は大きく軽減されることが見出された。齊藤ら¹¹⁾は図4のとおりPの低減が困難な場合でもSiの低減で脆化の抑制が計れることを定量的に示している。

なおこの脆化は9%Ni鋼やHT780鋼でも多少現れるが大きな問題となったことはない。Mo量の影響を大きく受け0.5%程度の含有は、Pを Mo_2P として粒内に固定するので脆化を抑制し、0.7%超では炭化物を生成し固溶Crの増加を招き脆化を促進すると言われている。汎用される1~1 1/4%Cr-1/2%Mo鋼でこの脆化が論点にならない理由はMo量で説明できる。

3.2 高温割れ性の助長

3.2.1 SとPによる溶接部の高温割れの助長

米国において3%Ni-Cr-Mo系高降伏点HY80鋼を用い

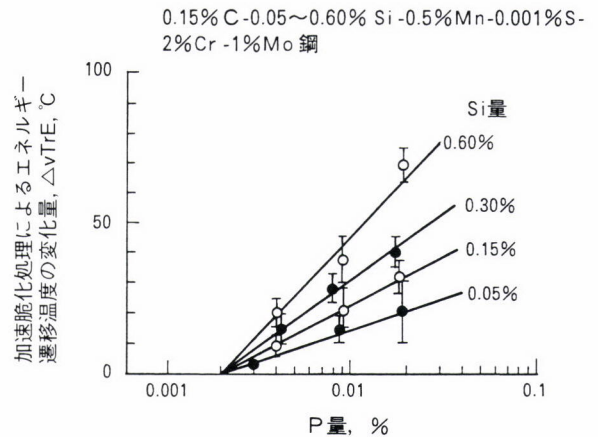


図4 2 1/4%Cr-1%Mo鋼の焼もどし脆化に及ぼすPおよびSi量の影響¹¹⁾

た潜水艦船殻の隅肉溶接部に発生した割れが、旧オーステナイト(γ)粒界で起こり割れ面は著しく酸化し着色していることから高温割れとされ問題となって以来、我が国でも高張力鋼や高Ni系低温用鋼でしばしば同様の割れに遭遇し原因の究明と防止策の検討が行われた。

まず γ 粒界へのSの偏析とそこでの低融点硫化物、 FeS や NiS の生成が液化割れを招くとして、SとMn、SとPやCさらにSi、Niなどとの相互作用が論じられてきた。低合金鋼の高温割れ感受性指標HCSは次式で示される¹²⁾。

$$HCS = [C\%(S\% + P\% + Si\%/25 + Ni\%/100) / (3Mn\% + Cr\% + Mo\% + V\%)]$$

C量の増加はSのFe中への溶解度を減少させSの活量を増やす。ついてはSの粒界偏析が助長される。

割れの防止策ではまずSを高融点硫化物 MnS として固定することが提唱された¹³⁾。C量が0.14%までであれば、Mn/S比がおおよそ20以上で割れは防止でき、C量が包晶点を越える0.16%超となると、Mn/S比の増加のみでは割れの防止は難しく、むしろPの低減が重要となる。かようなC量では初晶が γ 相となりPの溶解度が下るので、Pは粒界偏析して Fe_3P を生成し、続いて Fe_3P -Feの低融点共晶物を形成することにより液化割れを起こし易くすると説明された。PやSiはSの粒界偏析を増加させることにより高温割れの発生を助長しているという説もある。近年SはTiやZrさらにはLaやCeなどで固定されることが多い¹⁴⁾。

3.2.2 微量のS、P、Sb、Sn、As等による再熱割れの助長

高張力鋼やCr-Mo鋼などの溶接熱影響部は応力除去焼なましで割れが発生することがあり再熱割れまたはSR割れと呼ばれるが、菊地ら¹⁵⁾はこれにS、P、Sb、SnおよびAsが大きく関わっていることを指摘した。S以外の元素は3.1.3項で述べた焼もどし脆化元素であり、この現象も粒界

偏析脆化で説明できないか論じられた。一方SについてはSが粒界に形成された空洞または亀裂の表面に偏析して、表面エネルギーを低めまたそれらの先端を鋭くして、その進展を容易にしていると考えられた¹⁶⁾。再熱割れは高張力鋼を用いた実験で $[S_{total}\% - 32/40 \cdot Ca\%]$ なる式¹⁷⁾、Cr-Mo鋼を用いた実験で $[S_{total}\% - 32/40 \cdot Ca\% - 32/140REM(希土類元素)\%]$ なる式¹⁸⁾から算出される固溶Sの低減により防止できると報告されている。

3.2.3 Sb、Sn、As等によるクリープ脆化の助長

C-1/2%Mo鋼やCr-Mo鋼の母材および溶接熱影響部は応力除去焼なまし条件が不適切であると、クリープ破断試験で伸びや絞り非常に小さくなることもある。この現象はクリープ脆化と呼ばれ圧力容器の高温使用による材質劣化の原因の一つとして、前述の焼もどし脆化と並び要注意とされている。1970年代後半我が国で石油精製装置の外表面に発生した割れ損傷が、この現象と酷似していることが指摘され、材料面からは不純物元素が影響していることが明らかにされた¹⁹⁾。乙黒²⁰⁾はその脆化感受性指標CEFとして次式を提案している。

$$CEF = P\% + 2.3 As\% + 3.6 Sn\% + 8.2 Sb\% \\ (\text{各不純物量}0.05\% \text{以下})$$

この式を3.1.3項で示した焼もどし脆化指標 $\bar{X}$ 式と比較すると、クリープ脆化の場合Pの影響が他の不純物元素に比べて小さく、SbやSnの影響が逆に大きい。このようにPの影響が小さいのは、Pは粒界の自己拡散係数を低下させ、脆化の主因である粒界ボイドの成長を抑制する働きをもつためと説明された。またSbが特段の悪役となっているが、これは希土類元素(REM)やCaの添加により軽減できることが見出されている²¹⁾。

3.3 極微量のOによる疲労強度の低下

鋼材の疲労強度に硬質のTiNなどの析出物や Al_2O_3 などの非金属介在物の存在が影響を及ぼしていることは周知のことであり、鋼中残留元素とくにOの悪玉ぶりは有名である。たとえば1%C-1.5%Cr系軸受鋼SUJ-2のスラスト型転動疲労寿命はOの低減で著しく改善される。福本²²⁾が図5に示すように、 B_{10} 寿命すなわち全試験片数の10%が壊れる寿命は、ほとんどが Al_2O_3 の形態であるが全O量と強い相関を有している。鋼中Oが10ppm以下の領域ではその1ppmの低減が B_{10} 寿命を著しく改善している点は注目値する。

3.4 SおよびPによる水素誘起割れ(HIC)の助長

原油や天然ガス輸送用ラインパイプおよび貯蔵用タンク

などでは、それらに含まれる H_2S や CO_2 さらには水分が反応して生じたHが鋼中に侵入してHICが生じる。侵入したHがMnSと地鉄との界面で捕捉され集積して割れを起こす。割れの発生率は鋼中のS量あるいは展伸介在物の長さで非常に相関がある。そこでCaによる硫化物の形態制御が行われ、図6に示すHIC発生率とCa/S比の関係が明らかにされた²³⁾。HICはCa/S比を制御することにより防止できることがわかる。またHICは連铸中心偏析部の硬化組織に発生し易いので、耐HIC鋼では硬質の低温変態相の生成を回避するためにPやMn量の低減が計られている。

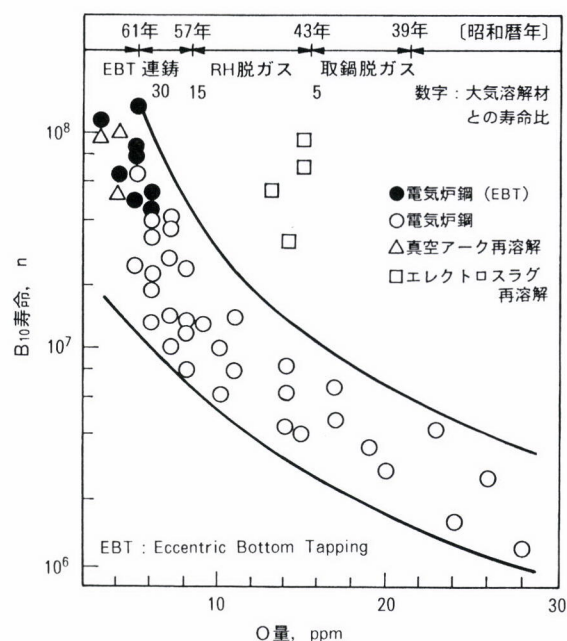


図5 1%C-1.5%Cr系軸受鋼のスラスト転動疲労寿命に及ぼす鋼中O量の影響²²⁾

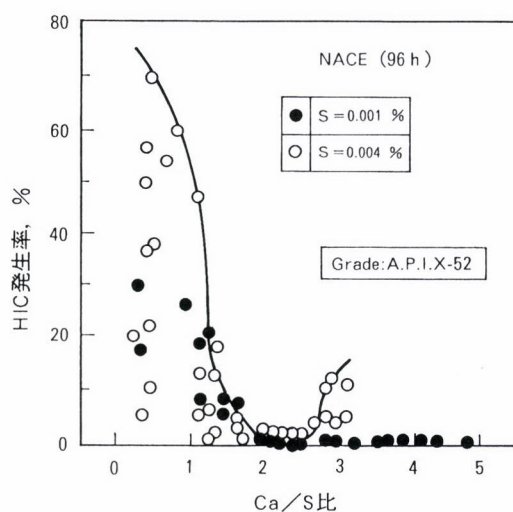


図6 NACE条件でのHICの発生率と鋼中のS量およびCa量/S比の関係²³⁾

3.5 Nによる冷間鍛造性の低下

自動車下部構造部材である等速ジョイントなどの棒鋼製品の製造工程は、近年省エネルギーや省資源を考えて熱間鍛造から冷間鍛造に変わってきた。冷間鍛造では断続的な多段加工が高速で行われるので、温度上昇を伴い加工時には動的歪時効が、加工の間では静的歪時効が生じる。それらは鋼材の延性を低下させることになり、ひいては鍛造割れを引き起こす。割れの起点は硫化物や酸化物であることが多い。ついては冷間鍛造用には歪時効性が小さく清浄度のよい鋼材が望まれている。冷間割れ率と固溶N量の間には図7に示す明瞭な関係がある²⁴⁾。固溶N量の低減が割れ率の低下にきわめて有効であることがわかる。今日低N化に加えて低O化も冷間割れ防止策としてとり挙げられている。

3.6 Hによる内部欠陥や置き割れの発生

鋼材溶製時に混入したHが原因で超音波探傷試験(UST)欠陥や置き割れの発生があり、とくに高張力鋼や極厚鋼材・鍛鋼材では鋼中Hの低減には多大の努力が払われてきた。3.4節の耐HIC鋼でも注目した連铸中心偏析部の硬質組織のところは内部応力も高く、UST欠陥等の問題を起こし易い。例えば通常のラインパイプ用鋼でも板厚15~25mm材について割れを防止するには、H量を1.5~2.5ppm以下にする必要があると言われている。溶製時の脱ガスや熱間圧延および熱処理工程での均熱や徐冷等が水素低減対策としてとられている²⁵⁾。

4 秘められた機能

不純物元素の低減が予期せぬ事態を招いたことがある。単に少なくてもよい、または目的の特性に対しては少ない方がよりよいと考えられる場合も、その低減に当たっては派生する問題がないか熟慮が望まれる。不純物とみていた元素が鋼材の機能に対して隠れた役割を果たし、実はその恩恵を蒙っていたという事柄、さらに変化物である残留元素のことであるので役立つ面をもつことも十分承知しながら悪玉ぶりの除去に真っしぐらであるため軽視してきた善玉の素などをとり挙げてみる。

4.1 Nに見られる残留極微量Bの無害化作用

3.1.2項に記述のとおり大入熱溶接熱影響部の靱性の改善などを目的にN量の低減が求められ、転炉一脱ガス工程でN量が40ppm以下の鋼材の製造が可能となった。一方転炉鋼においてもSi-Mn合金などの添加材から数ppmのBが意図せず含有されることがある。この程度のBはN量が40ppm以上あれば通常BNとして固定されるため、オース

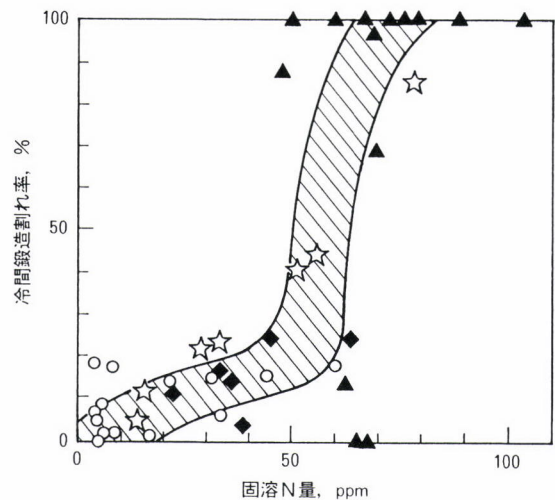


図7 0.35%C鋼の断続的2段据込み冷間加工時の割れ発生率と固溶N量の関係²⁴⁾

テナイト(γ)粒界に偏析して焼入性を増加させることはない。過去N量が50~60ppm以上であった頃TS490MPa級~580MPa級の主にフェライト-パーライト組織をもつ非調質高張力鋼では、数ppmのBは毒にも薬にもならないとしてその混在すら意識されていなかった。しかしN量が低減されると、この鋼種では数ppmのBが粗大な上部ベイナイトを生成し、強度を上げるが靱性を下げるといった問題を生じた²⁶⁾。NとBに関わる同様の現象は溶接熱影響部の硬化性にも現れる。

Nが混在する数ppmのBをBNとして固定し無害にしていたことは、予期せぬ事態を招いて初めて知り得た事柄であり、Nの秘められた機能であったと言える。

4.2 SのMnSの形で見られる拡散性Hの無害化作用

3.1.1項に記述のとおりSは展伸MnSの形で鋼材の延性や靱性を低下させるうえ、異方性を大きくするので少ないほどよいと考えられてきた。しかし一方MnSは遅れ割れの主因である拡散性Hの捕捉個所となり、応力集中部へのHの集積を抑制するという実験結果が発表された²⁷⁾。続いてMnSはオーステナイトからフェライトへの相変態の核生成サイトの機能をもち、溶接熱影響部のマルテサイト化すなわち硬化を抑制し、遅れ割れ感受性を低下させるという説まで提唱された²⁸⁾。MnSが思い掛け無効能をもっていたのであるが、実用溶接用鋼で調べてみると、数々の特性支配因子の影響が大きくその効能は現れていなかった²⁹⁾。現実にはこの観点からSの低減を控えるには及ばないとされた。しかしSはMnSの形で工業的実効はないにしても、期待の作用を少なからず発揮しているのであり、ここに善玉の顔を覗かしている。

4.3 極微量Cの粒界強化作用

高張力薄鋼板に超深絞り性を兼備させるためには、圧延面に平行に{111}面方位粒が多く、{100}面方位粒の少ない再結晶集合組織の発達が不可欠とされている。この場合固溶Cの存在はご法度ということで、含有C量は10ppm以下に低減され³⁰⁾、そのうえ0.025%のNbが添加されCの固定が計られている。こうなると粒界までC濃度が希薄となり、予想外の粒界脆化を起こす。この鋼種の2次加工脆性と呼ばれる絞り加工部が再加工されると割れる現象は、これが原因になっている。この問題はB添加による粒界強化でいち速い解決をみた。しかし今後もCを不純物元素と見做し徹底的に低減するに当たっては、極微量Cの粒界偏析による粒界強化という機能³¹⁾には注意が必要である。

また低C化は溶接構造用鋼の低温靱性と溶接性を著しく改善するので、熱処理や熱加工制御法を駆使して強度を確保しながら努めてCの低減が計られてきた。液化石油ガス(LPG)タンクに使用されるAl処理細粒キルド鋼は焼入れ焼もどしにより強度と靱性が確保され、C量が大幅に低減されている。しかしCの極端な低減は古君ら³²⁾による図8に示されるように、かえって靱性を低下させる。C量を0.01%以下に低減し0.03%のNbを添加すると、焼入れ焼もどし材でとくに破面遷移温度の著しい上昇がみられる。焼もどし処理によるNbのC固定作用は固溶Cの一層の低減を招き、粒界偏析Cの低下ひいては粒界脆化を引き起こしたと言える。

かような諸現象はC量が極微量といえども合金元素として重要な役割を果たすことを示している。実用鋼でのCのこの機能は、C量がおおよそ0.03%以上の従来鋼を製造して

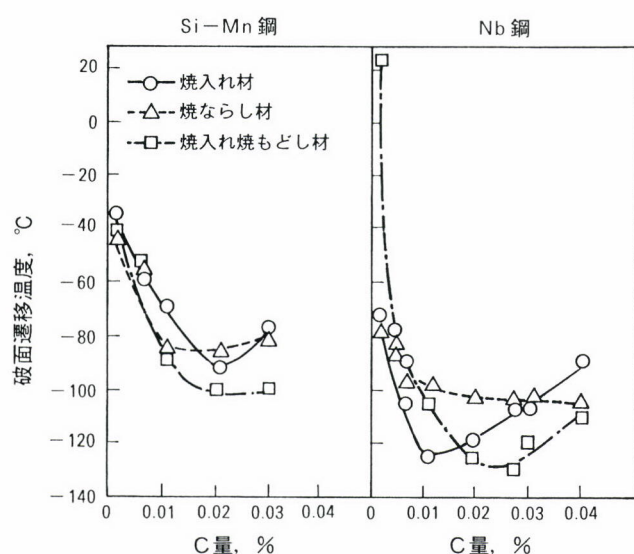


図8 Al処理細粒キルド鋼の極低C化に伴う脆化³²⁾

いたときには気に留めることはなかったわけで、その恩恵のみ蒙っていたことになる。

5 材質改善への積極的活用

5.1 微量残留元素の合金元素としての可能性

微量残留元素をむしろ合金元素として有効活用できないか考えてみた。すでに実用されている効能、意識せず利用してきた効能、まだ活用されていないが魅力がある効能などを挙げるとつぎのとおりである。

- ① N、O、SなどはAlNやTiN等の析出物の形で、またはMnSやREM(O,S)、Ca(O,S)等の硫化物・酸化物の形でオーステナイト(γ) $\rightarrow$ フェライト(α)変態の核生成サイトとなり、また結晶粒粗大化阻止効果を發揮して細粒化に役立つ³³⁾。
- ② P、Sb、S、N、H、Bなどは粒界に偏析してそのMisfit energyを低下させ、 $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態の粒界核生成を抑制して拡散変態を遅滞させる。Bの効果は善悪にかかわらず顕著である。
- ③ 粒界偏析元素は通常粒界移動を抑制し再結晶を遅滞させる。回復段階でもそれらは転位の運動に関わり影響を及ぼす。
- ④ 極微量の固溶のCとBは4.3節で記述のとおり粒界に偏析して粒界を強化する。
- ⑤ C、N、Pなどは固溶強化に寄与する。
- ⑥ PとCuは耐候性および耐食性の向上のために合金元素として添加される。残留元素として含有される場合も微量でありながら、それらの効果を無意識に享受していることが多い。
- ⑦ O、Sなどは高温で安定なCa(O,S)、MnSなどの形でTiNやVNなどの析出サイトとなりそれら窒化物の微細分散析出に役立つ³³⁾。
- ⑧ SはMnSなどの形で4.2節で記述のとおり鋼中のHの捕捉個所となり、Hの拡散を抑制する²⁷⁾。
- ⑨ SはMnSの形でLaminated structureをつくり材質の異方性を生む。このことも関係するのであるが、($\alpha + \gamma$)2相域圧延材の場合集合組織の発達と相まって、破面に主亀裂の伝ばに先立つセパレーションという圧延面に平行な脆性割れ現象を起こす。これは不安定延性破壊の停止特性を改善するとともに、疲労亀裂の進展を抑制する³⁴⁾。
- ⑩ SはCu含有低合金鋼においてCu₂Sの形で、高S燃料燃焼環境下での耐硫酸露点腐食性の改善に役立っている。Sは不動態被膜、保護性のある腐食生成物皮膜の形成を助長しているわけで、極低S化は好ましくない。耐食性にはSnやSbも少量含有されている方がよい³⁵⁾。

⑪Sbは高C-Cr軸受鋼において緻密な酸化物を形成して製造時の表面脱炭を防止する作用をもつ。

5.2 非金属介在物の変態核としての利用による組織の微細化

近年オキサイドメタラジーと呼ばれる研究活動が盛んであるが、これらの主たる目的はまさに本題である。1970年代の中頃からTS480MPa級～570MPa級鋼(HT480鋼などと呼称)の大入熱溶接熱影響部組織の微細フェライト(α)-パーライト(P)化を目的にオーステナイト(γ)粒内での α 粒の形成を目指して、核生成作用の大きい微細粒子が探究されてきた。TiN、REM(O, S)、 Ti_2O_3 などの効果や複合析出するBNやMnSの寄与が指摘された³³⁾。一例としてREM(O, S)とBNが $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態核となった様子を示す電子顕微鏡写真とその効果を利用したHT490鋼の大入熱溶接ボンド部組織の微細化状況を図9と10に示す³⁶⁾。それらの機構について微細粒子周辺の応力場または歪場、それら粒子と α 相の界面の格子整合性、粒子周辺部での粒子構成元素の濃度希薄部の形成などの視点から、現在鋭意研究されているところである。

製鋼技術者がひたすら鋼の清浄化と高純度化の技術に取り組んでいる最中、それまで嫌われものであった酸化物や硫化物を積極的に利用するという時流に逆らう発想であったが、関係者の理解は速かった。鋼を汚すのではなく非金属介在物等を微細分散分布させるのであり、ここにも新しい技術開発活動があった。

5.3 スクラップの癌—Cuのリサイクル時の鋼中許容量の増加策とその利用

5.3.1 Cu濃縮相回避による表面赤熱脆性防止策

Cuは精錬による除去が困難なためSnと並んで循環型元素の代表格であるが、年々その含有量が増えるスクラップの大量使用時代を迎えて、熱間圧延時に生じるCu起因の表面きずや表面割れは鉄鋼技術者にとって大きな関心事である。これらは表面赤熱脆性と呼ばれる現象によるもので、Feの選択酸化によって生じるCu濃化相が原因の一種の液体脆化である。通常高価なNiを添加して濃化相の融点を高め液化の抑制が行われている。

最近0.4%のSiや0.02%のPが0.5%Cu鋼の表面割れを減少させる効果があることが柴田ら³⁷⁾によって見出された。Siは酸化を抑制するとともに、Cu濃縮相をスケール内

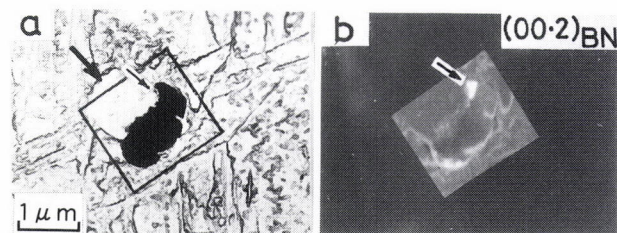
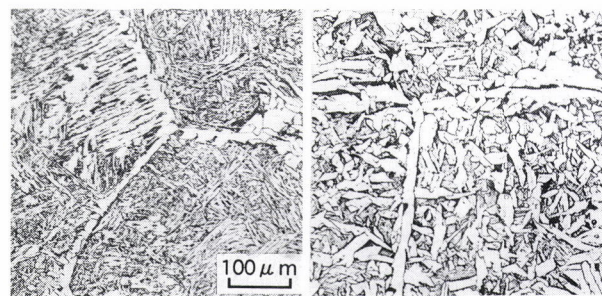


図9 γ 粒内 α (↑)に隣接して観察されたREM(O, S)(黒色部)とBN(↑)(レプリカ)³⁶⁾



商用HT490鋼

REM-B処理HT490鋼

図10 入熱229kJ/cmの溶接ボンド相当の再現熱サイクル材の光学顕微鏡組織³⁶⁾

へ取り込むことによって、Feとスケールの界面に生じるCu濃縮層の量を減じることを通じて効くと説明されている。またPは割れの成長を遅らすことにより表面割れを抑制するとされた。

5.3.2 結晶粒界の構造変化によるCu起因の高温延性低下の防止

馬越ら³⁸⁾はまずFe-0.5%Cu合金の高温延性は粒界に析出する純Cuに近似する組成の低融点第2相の多少に影響され、そしてこの第2相の量と形態が低角度粒界、対応粒界*および高角度ランダム粒界に大別される結晶粒界構造(粒界性格とも呼ばれる)と密接な関係があることを指摘した。Cuは対応粒界では均一で微細な析出形態を示すのに対して、ランダム粒界では不均一でその形態も著しい異方性をもつことを示した。またこの合金はCrを0.2%含有すると、図11のとおり800°Cの延性を大きく改善すること、そしてCuは規則性のよい対応粒界に比べ、欠陥構造の多いランダム粒界に優先析出することも明らかにされた。

さらにこのCrの合金化がランダム粒界の頻度を83%か

* 隣接する結晶粒の例えば(111)面の粒界部での原子の並びをみても、格子点の二対が重なるように平行移動して両結晶格子を重ね合わせると、あちらこちらで格子点の重なりを生じ、結局格子点の何割かが「重なり格子点(対応格子点)」となる。つまり隣接結晶粒が特別の方位関係にあることが多い。対応格子点密度と結晶格子点密度の比の逆数を Σ 値と呼ぶ。結晶粒界はアモルファスのように隣接結晶粒の格子と何の関係もないのではなくかなり共通の並びが残っており、それらが多いほど Σ 値は小さく、強い粒界である。

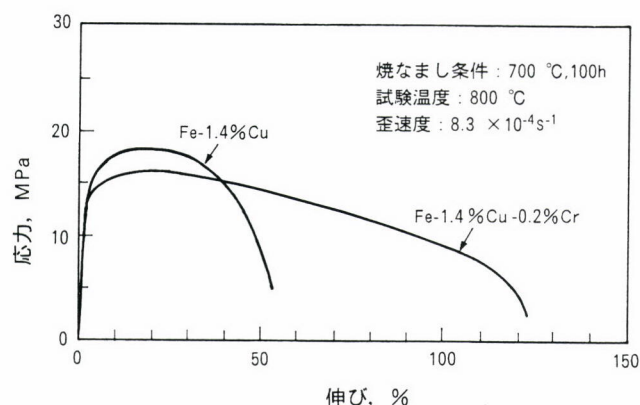


図11 Fe-1.4%Cu合金の800°Cにおける応力-歪曲線に及ぼすCr添加の影響³⁸⁾

ら78%に低下させ、また強い粒界といわれるΣ1ならびにΣ3対応粒界の存在頻度を10%超にすることを見出し、この粒界構造の変化こそCuの析出状態を変化させ粒界脆化を軽減するという結論を導いた。

Cuは耐食性改善や固溶強化と析出強化に役立つ合金元素として大いに利用できる。スクラップから混入量が増えても表面割れと延性低下の防止策が確立さえしておればさほど心配することもない。この2項で紹介した実験結果をCu問題の解決のトリガーとして、幅広い基礎および応用研究が展開されることが期待される。

6 おすび

今日微量残留元素が鋼中で表す特徴についてはよく認識されており、とくに不純物元素については鋼種や用途に応じて絶対量の低減が計られるとともに、合金元素の添加による形態変化などを用いる無害化対策が講じられ、鋼材は高い品質を保証されている。しかし例えば不純物が粒界偏析ひいては粒界脆化を起こす機構、つまり不純物元素による粒界結合力の低下に関する機構はまだ推論の域を出ていない。近年各種元素の原子レベルでの分布状態が観察できるアトムプローブFIM(電界イオン顕微鏡)法や結晶粒界の構造の理解に役立つ粒界性格分布を迅速に測定できるEBSD(後方電子散乱回折)法など数々の新しい手段が諸現象の解明に使われ始めた。これらを用いて微量残留元素の挙動が一層明確にされ、善玉・悪玉の制御が可能になることが望まれる。

資源のリサイクルが叫ばれる21世紀にはCuやSnなどの循環型元素の無害化あるいは代替技術に関する研究が一層推進されると考えられる。5.3.2項に記述のCuの影響をCrの微量添加で粒界性格分布を変えて改善するという指摘は示唆に富み、粒界問題解決の糸口となるものである。

ついで残留元素を合金元素という位置づけで有効活用する場合に注目したい機能を挙げた。非金属介在物の相変態の核生成サイトとしての役割のほか、数多くの魅力的作用があり、いずれもよく考察するに値すると思う。

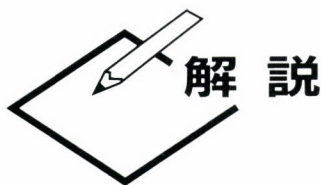
終わりに不純物元素の隠れた役割を知らずひたすら低減し予期せぬ事態に遭遇したことは大きな教訓であった。今日の鋼材の高品質がどのような過程で構築されたか、そのメタラジををよく認識して、微量残留元素自体の生み出す現象を近視眼的に見るのではなく、材質全体からみて総合的判断で品質改善や新製品開発が行われることが肝要である。

参考文献

- 1) 池田隆果：ふえらむ，1 (1996)，272.
- 2) W・Losch：Acta Metall., 27 (1979)，1885.
- 3) 木村 宏：日本金属学会報，21 (1982)，757.
- 4) 大内千秋：第90・91回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会編，(1983)，93.
- 5) 西沢泰二：同上，1.
- 6) 牧 正志：大量生産規模における不純物元素の精錬限界，日本鉄鋼協会・日本学術振興会編，(1996)，19.
- 7) 小沢幸正：鉄と鋼，63 (1977)，S713
- 8) 佐藤 誠：第54・55回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会編，(1978)，175.
- 9) 宮野樺太男：圧力技術，12 (1974)，3，135.
- 10) R. Bruscatto：Welding J., (1970)，April，148-s.
- 11) 齊藤良行，今中拓一：高純度鋼研究の進歩，日本鉄鋼協会編，(1989)，101.
- 12) F. J. Wilkinson, C. L. M. Cottrell and H. V. Huxley：Brit. Weld. J., (1958)，557.
- 13) P. W. Jones：同上，(1959)，282.
- 14) 上田修三：構造用鋼の溶接，地人書館，(1997)，189.
- 15) 菊地俊郎，大西 巖：溶接学会誌，48 (1979)，838.
- 16) 藤井利光，山本広一，上野正勝：鉄と鋼，67 (1981)，1523.
- 17) 大野恭秀，岡村義弘，矢野清之助，藤井利光，山本広一：同上，67 (1981)，1777.
- 18) 今中拓一，佐藤信吾：同上，70 (1984)，S1481.
- 19) 上田修三：上掲14)の文献，323.
- 20) 乙黒靖男：圧力技術，26 (1988)，368.
- 21) 橋本勝邦，乙黒靖男，齊藤俊明，武田鐵治郎，菊竹哲夫：鉄と鋼，72 (1986)，2093.
- 22) 福本一郎：第126・127回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会編，(1988)，121.
- 23) Y. Sugitani, S. Yamaguchi, M. Hashio, H. Tomono：HSLA Steels Technology and Applications, ASM,

- (1984), 403, 萩林成章：上掲の文献22), 195.
- 24) 上掲文献4)に掲載の天明玄之輔, 大鈴弘忠の未発表データ
- 25) 大西敬三：第54・55回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, (1978), 139.
- 26) 井上 毅, 落田義隆, 木下修司：鉄と鋼, 68 (1977), 328.
- 27) 菊田米男, 荒木孝雄, 広瀬明夫, 松田英光：溶接学会論文集, 3 (1985), 385, 490.
- 28) H. M. Hart：IIW Doc. IX-1308-84, The Welding Institute, (1984)
- 29) 奥村 誠, 百合岡信孝, 糟谷 正, 永野恭一：製鉄研究 (1987), 327, 15.
- 30) A. Okamoto and M. Takahashi：Proc. ICOTOM, 6 (1981), 739.
- 31) 木村晃彦, 木村 宏：日本金属学会誌, 47 (1983), 807.
- 32) 古君 修, 鈴木重治, 鎌田晃郎：鉄と鋼, 68 (1982), 256.
- 33) 上田修三：上掲14)の文献, 214.
- 34) 溶接用鋼の疲労強度向上に関する基礎検討, 日本鉄鋼協会編, (1995), 115.
- 35) 松島巖：低合金耐食鋼, 地人書館, (1995), 139.
- 36) 船越督己, 田中智夫, 上田修三, 石川正明, 腰塚典明, 小林邦彦：鉄と鋼, 63 (1977), 303.
- 37) 柴田浩司, 徐石 宗, 朝倉健太郎：トランプエレメントの鉄鋼材料学, 日本鉄鋼協会編, (1997), 168.
- 38) 馬越佑吉：川鉄21世紀財団 1995年度事業報告書, 54, Y. Umakoshi and W. Fujitani：ISIJ Int., 38 (1998), 888.

(1998年7月16日受付)



最近のウェーブレット研究の動向

榊原 進 いわき明星大学 理工学部
機械工学科 教授
Susumu Sakakibara

Recent Status of Wavelet Research

1 はじめに

ウェーブレットとは局在する波を表す関数を一つ固定し、これを縦横に伸縮したり平行移動したりして得られる一連の関数族のことである。実体としての波ではなく数学的な道具としての波で、関数解析、信号解析、信号処理、数値計算などに広く利用されている。

ウェーブレットとして一つ選んだ関数をマザー・ウェーブレット、またはアナライジング・ウェーブレットと呼ぶ。図1(左)に示すのは、ガウス型の窓で振幅変調した複素正弦波であるガボール関数の実部であるが、図(右)にはこれをマザー・ウェーブレットとして作ったウェーブレットの一例を示す。

ウェーブレットの線形結合として表すことにより、信号をウェーブレット関数の持つ特徴を手がかりに調べることができる。ウェーブレットはすべて一種の相似変換であるから展開に余分な構造が持ち込まれることがなく、ウェーブレット関数の特徴を最大限に利用できるのである。また、ウェーブレットを離散的に配置して信号を表す場合には、局所的な基底関数であるウェーブレットが多重解像度解析と呼ばれる極めて特徴的な構造に配置されるが、これもこの解析法の大きな特徴となる。ウェーブレットに対応して1つのデジタルフィルタが決まり、離散ウェーブレット

変換はデジタルフィルタによる信号処理として実現されるので、実際の計算には既存の技術が大いに役立つことも、ウェーブレット解析が使いやすい理由の一つであろう。

マザー・ウェーブレットとして用いられる関数は、図1のガボール関数だけでなく、目的に応じてさまざまなウェーブレット関数が作られている。図2に示すのは直交ウェーブレットとして知られている最も有名なドーブシー関数の1つで、左のスケーリング関数と右のウェーブレット関数との組で現れる。

信号をウェーブレットの線形結合で表すときの展開係数の組をウェーブレット変換という。ウェーブレットが局所的な波であることから、ウェーブレット変換では従来のフーリエ変換では困難とされた過渡現象を効率的に捉えることができ、この特徴を生かしてさまざまな応用が試みられている。本稿ではウェーブレットの発展の経緯を簡単に振り返り、最近のウェーブレット応用研究の動向までを概観することにした。

2 連続ウェーブレット変換

1982年頃、フランスの石油探査技師モーレー(J. Morlet)らが考案し、人工地震による反射波の解析に使ったのが現在のウェーブレットブームの起源とされる。1984年頃モー

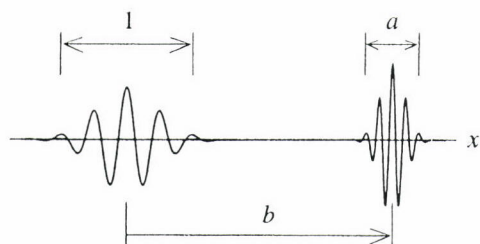


図1 ガボール関数の実部(左)とそのウェーブレット(右)

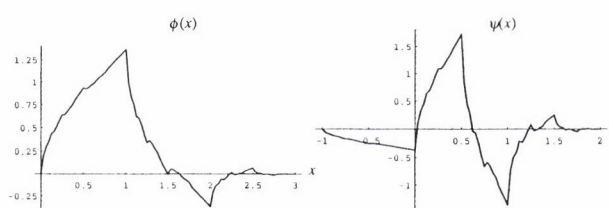


図2 ドーブシーのスケーリング関数(左)とウェーブレット関数(右)

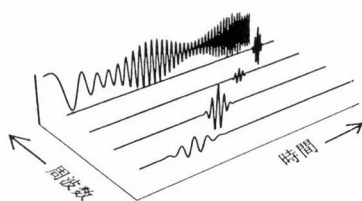


図3 ウェーブレット変換における信号の表現

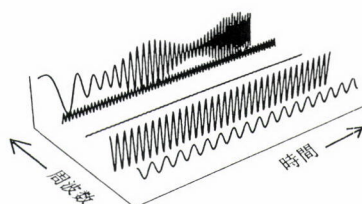


図4 フーリエ変換における信号の表現

レーとグロスマン(A. Grossmann)はウェーブレット変換をフーリエ変換と同様な積分変換として数学的に定式化した。図3にこの方法で信号を表す様子を模式的に示す。一番奥の信号を手前のウェーブレットの集まりで表している。図4はフーリエ変換に対応する模式図である。ウェーブレット関数が局所的であるから、ウェーブレット変換においては信号を時間・周波数の両面から見ることで、すなわち時間・周波数解析が可能となる。

どんな周期関数もその周期の整数分の一の周期の正弦波の和として表すことができるという事実は1807年にフーリエ(J. Fourier)によって示された。これは信号を周波数という観点から特徴づけるだけでなく、信号の滑らかさの特徴づける性質も持っている。たとえば、値にジャンプのある信号の n 番目のフーリエ係数 c_n の大きさ $|c_n|$ は n に反比例し、連続でも折れ曲がっている信号では $|c_n|$ は n^2 に反比例する。ジャンプや折れ曲がりという局所的な性質は、 $|c_n|$ の n 依存性、すなわち大域的な性質と結びついている。一般に、局所的な信号の性質はフーリエ変換では大域的な性質に現れ、またその逆も成り立つ。このような極めて特徴的な性質のために、信号の性質を調べるのにフーリエ変換は不可欠なものとなっている。

しかし、局所的な特徴が大域的に広がってしまうという性質は、その特徴の存在する位置を特定しようという応用には適さない。この欠点は、フーリエ変換に使われる無限の広がりを持った正弦波を局在する波で置き換えることによって解消される。ウェーブレットの元になるこのアイデアはすでに古くからさまざまな試みられていた。1946年に

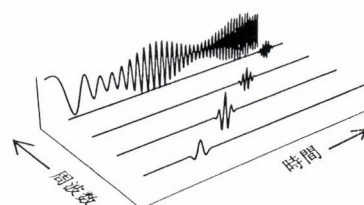


図5 短時間フーリエ変換における信号の表現

ガボール(D. Gabor)は図1に示す関数を用いて信号を表し、図5に示すような短時間フーリエ変換と呼ばれる時間・周波数解析を得ていた。

3 直交基底

図3のウェーブレット変換では、変調する正弦波の周波数に合わせて窓の幅も変えているが、図5の短時間フーリエ変換では、ガウス型の窓の幅は固定し変調する正弦波の周波数だけを変えている。この結果、信号の低周波成分の分解能が悪くなるが、これは図からもわかる。図からはわかり難いが重要な事実は、フーリエ変換では正弦波が信号の直交基底を成していることで、これはガボール関数では成り立たない。直交基底であれば、展開係数は一意的に決まり、またその計算法も簡単であるから、応用上効率がよい。もっと正確に言えば、日常的な応用において計算効率は必須である。それを認識するには、離散フーリエ変換の実際的な応用は、1965年にクーリー(J. Cooley)とチュッキー(J. Tukey)によって発見された高速計算法であるFFTによって日常的なものとなったことに注意すれば十分であろう。

こうして、局在する、できればコンパクト・サポートの(有限の区間の外では値が0である)直交基底を成すウェーブレットが望まれる。実際、そのような関数は1910年頃ハール(A. Haar)によって作られた。図6(右)に示すのがそれ

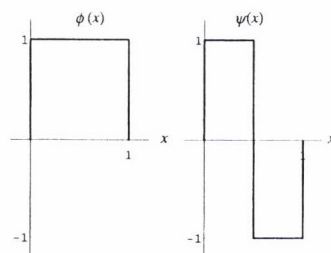


図6 Haarのスケール関数(左)とウェーブレット関数(右)

で、図(左)のグラフは今日ハールのスケーリング関数と呼ばれる関数である。これらの関数は構造が簡単のためさまざまな議論に例としてよく使われるが、連続関数でないので連続な信号を表すのには効率が悪い。図2のような、連続でコンパクト・サポートの直交ウェーブレットが作られるまでには、さらに80年ほどの時間が必要であった。1980年にシュトロームベルク(J. Strömberg)は連続な直交ウェーブレットを作ったが、これはコンパクト・サポートでない。

今日のウェーブレット理論の構築に重要な役割を果たしたのは、フランスの数学者メイエ(Y. Meyer)である。関数解析の専門家である彼は1985年に偶然グロスマンの論文を知り、ウェーブレットをさまざまな観点から研究することになった。かれはまず連続でコンパクト・サポートの直交ウェーブレットは存在しないことを証明しようとして、逆にそれを作ってしまった。厳密には、メイエ・ウェーブレットは周波数領域でコンパクト・サポートであるが、これは初めて作られたコンパクト・サポートの直交ウェーブレットであった。

4 多重解像度解析

信号処理の分野では数学上の発展とは独立に、その後のウェーブレット理論に貢献するいくつかのアイデアが生まれていた。1980年頃ガラン(C. Galand)は、エステバン(D. Esteban)らと共同で開発したクアドレチャーミラー・フィルタ(QMF)を使って、信号の帯域をいくつかのサブバンドに分ける方法を考えた。信号を送受信するときに圧縮して効率化を図るものであった。

また、画像処理においてバート(P. J. Burt)とエイデルソン(E. H. Adelson)は1983年にラブラシアン・ピラミッドと呼ばれるアルゴリズムを考えた。たとえば 512×512 ピクセルの画像で、それぞれの 2×2 ピクセルの画像の値の平均値をとって、これを1ピクセルに割り当てれば 256×256 ピクセルの画像が得られる。こうして得られた縦横半分の大きさの画像は、元の画像の粗い近似になっている。この手続きはまったく同様な手順で繰り返すことができ、 128×128 ピクセルの画像、 64×64 ピクセルの画像、と1段階ごとに解像度を下げていくことができる。これら一連の画像は多重解像度の構造を持っているわけである。

シュトロームベルクのウェーブレットもこの多重解像度の性質を持っている。さらに、サブバンド符号化も結局は同様の構造を持っており、つまりこれらはすべて多重解像度という観点からは同じものである。この事実気付いたのは当時23歳の大学院生であったマラー(S. Mallat)で

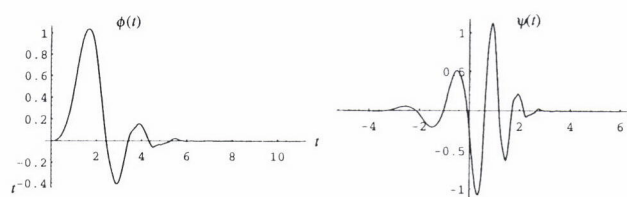


図7 ドーブシー $N=6$ のスケーリング関数(左)とウェーブレット関数(右)

あった。かれはその後メイエの助けを得て1985年から89年にかけて多重解像度解析の概念を確立した。トゥー・スケール関係を満たすスケーリング関数を使って、多重解像度解析を数学的に定式化し、信号の展開係数を計算するMallatアルゴリズムが作られたが、これは今日一般に離散ウェーブレット変換と呼ばれている。

そして1988年には、連続でコンパクト・サポートの直交ウェーブレットがドーブシー(I. Daubechies)によって作られた。彼女はマラーの方法を使い、関数にモーメント条件としてレギュラリティーを課すことによって、一連の直交ウェーブレットを作った。図2の関数では1次のモーメントが0であるが、図7に示すドーブシーの関数 D_{12} では5次までのモーメントが0である。

5 ウェーブレット理論

ドーブシーはドーブレット(Daubelets)と呼ばれる直交ウェーブレットを作っただけでなく、多重解像度解析に基づくウェーブレットの一般的な作り方を示した。これによってさまざまなウェーブレットを作ることができるが、実際彼女はドーブレットより対称性のよいシムレット(Symlets)や、スケーリング関数もモーメント条件を満たすコワフレット(Coiflets)も作った。さらに1992年にはコーエン(A. Cohen)らとともに双直交ウェーブレットを作った。これはスプラインをスケーリング関数とし、直交性を持たない欠点を補うように工夫されたもので、多項式の組み合わせで作られる簡単な関数で、しかも対称性を持つ関数としての利点がある。

こうして基本的な概念が確立され、実際に関数が作られて道具建てがそろそろと、アルゴリズムに実装することが可能になる。このころからウェーブレットの応用が盛んになった。論文の世界に閉じこめられていたウェーブレット理論も書籍としてまとめられるようになった。初期の3部作¹⁻³⁾はウェーブレット理論を一般に開放したし、直交関数系という観点から数学的によくまとまった本も現れた⁴⁾。

その後、理論がさらに整備されるにつれて毎年数冊の本が出版されるほどになったが、現在代表的な教科書としては数冊を挙げることができる⁵⁻⁸⁾。日本語の教科書としては9-11)がある。

応用にはコンピュータによる計算が不可欠である。1990年代にはパソコンの性能が飛躍的に向上し、これを利用してウェーブレット解析ソフトウェアもたくさん作られるようになった。初めはフリーウェアであったが、1995年頃にはその実績を踏まえて商用のソフトウェアにアドオンとして使うパッケージが作られるようになった。代表的なものとしては、統計数値計算システムS-PLUSのWavelet Toolkit、行列数値計算システムMATLABのWavelet Toolbox、数式処理システムMathematicaのパッケージWavelet Explorerがあり、それぞれのソフトウェアの特徴が生かされたデザインとなっている。応用研究にはこれらのソフトをそのまま、あるいは機能を加えて利用することができるようになった。文献6)はもともとS+Waveletのマニュアルであるが、教科書としても優れている。

ウェーブレット理論は応用とともにさらに発展した。ウェーブレットは対数的周波数解像度を持ち、低いレベルにおける解像度がよくない。これを改善するものとして1992年にコワフマン(R. Coifman)、メイエ、ヴィッカーハウザー(M. Vickerhauser)はウェーブレット・パケットを考案した。また、同じ頃コワフマンとメイエは、高いレベルにおける時間軸解像度を改善するものとして局所三角関数基底を考案した。これはJPEGなどの画像圧縮法に一般に使われている局所コサイン基底を一般化したもので、これに滑らかな窓関数をかけて作られる。これらの関数や基底はウェーブレット理論における標準的な項目となっており、上に述べたソフトウェアにも標準で実装されている。

6 連続ウェーブレット変換の応用

ウェーブレットの応用はまず連続ウェーブレット変換によって信号を時間・周波数解析することから始まった。図3のような表示の代わりにふつう等高線グラフが使われる。図8にはフラクタル信号を解析した例を示すが、異なるスケールで相似なパターンが観測される。

このような等高線グラフを使って正常な信号と比較することにより、信号の中に埋もれた異常性を検出することができる。フーリエ変換で信号の特異性が大域的に表現されることを述べたが、ウェーブレット変換では信号の特異性をウェーブレット係数の性質から探ることができる。このような観点から、日本においても1990年頃から連続ウェーブレット変換の応用研究が始まった。山田らによる乱流の

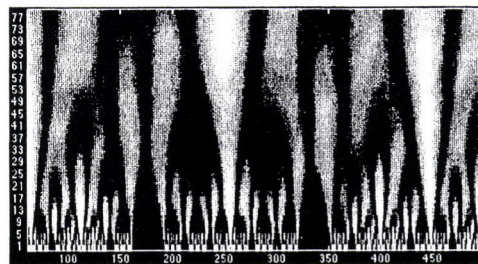


図8 フラクタル信号のウェーブレット解析

ベキ則の解析や、菊池らによるエンジンの異常燃焼の検出は代表的なものである。

しかし、次第に離散信号の解析には離散ウェーブレット変換が使われることが多くなった。連続ウェーブレット変換で受動的に信号の性質を観測するのではなく、信号処理としてデータをさまざまに加工して、もっと積極的にデータから情報を得ることができるからである。次の節でその基本を簡単に見ることにしよう。

7 フィルタとウェーブレット関数

離散ウェーブレット変換の最も簡単な例は移動平均である。32個の数値からなる信号 $\{s_0, s_1, \dots, s_{31}\}$ を考え、次のように2個ずつ組にして平均と差をとろう。

$$\left. \begin{matrix} c_0 \\ d_0 \end{matrix} \right\} = \frac{s_0 \pm s_1}{2}, \dots, \left. \begin{matrix} c_{15} \\ d_{15} \end{matrix} \right\} = \frac{s_{30} \pm s_{31}}{2}$$

$\{c_k\} = \{c_0, c_1, \dots, c_{15}\}$ は信号の移動平均、 $\{d_k\}$ は各組における差分、すなわち変動分を表す。移動平均と変動分の和と差をとって交互に並べれば元の信号を復元することができる。

$$s_0 = c_0 + d_0, s_1 = c_1 - d_1, \dots$$

正確に言えば $\{c_k\}$ は移動平均を一つおきに取ったもので、長さは16、つまり元の信号の長さ32の半分となっている。変動分 $\{d_k\}$ の長さも16で、両方合わせれば元の信号と情報量が等しく、そのために元の信号を完全に復元できる。変動分 $\{d_k\}$ は信号 $\{s_k\}$ のウェーブレット成分と呼ばれ、これを抽出する手続きは信号のウェーブレット分解と呼ばれる。信号を画像と見れば、信号の長さは解像度を表す。移動平均 $\{c_k\}$ は元の信号の半分の解像度を持ち、平滑化された信号を表す。

ウェーブレット分解はデジタルフィルタによる信号処理として実行できる。係数を $\{\frac{1}{2}p_k\} = \{\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\}$ とするデジタルフィルタで信号を処理すれば移動平均が、 $\{\frac{1}{2}q_k\} = \{\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}\}$ で処理すればウェーブレット成分が得られる。これら2つのフィルタは互いに共役な対をなし、

分解で得られた成分からの元の信号の再構成も、同じ共役なフィルタ対からなるフィルタバンクを使って行うことができる。

さらに、移動平均を改めて信号とみなしてウェーブレット分解を行うこともできる。これを繰り返すと、32個の s_k は16個の d_k と、このとき得られた16個の c_k を分解して得られる8個の d_k と、このとき得られた8個の c_k を分解して得られる4個の d_k と、という具合の和に分解される。

$$\{s_k\}_{32} \rightarrow \{d_k\}_{16} + \{d_k\}_8 + \{d_k\}_4 + \{d_k\}_2 + \{d_k\}_1 + \{c_k\}_1$$

ここで、 $\{\}$ の添字は係数列の長さで、それぞれをピクセルと見なせば解像度を表す。レベル j を用いて解像度を 2^j とすれば、もとの信号は $j=5$ であるから、 $j=0$ まで5段階の分解が可能である。このような信号 $\{s_k\}$ の分解を離散ウェーブレット変換という。また、逆に元の信号を復元する変換が逆変換である。

この例のフィルタはハール・フィルタと呼ばれ、実際にも使われるが必ずしも理想的なフィルタではない。たとえば s_0 から s_1 への変動は捉えることができるが、 s_1 から s_2 への変動は捉えられない。これらの欠点を補うためには係数の個数の多いフィルタを使えばよく、たとえばドーブシーのフィルタ D_4 は次の係数からなる。

$$\left. \begin{matrix} p_0 \\ p_3 \end{matrix} \right\} = \frac{1 \pm \sqrt{3}}{4}, \quad \left. \begin{matrix} p_1 \\ p_2 \end{matrix} \right\} = \frac{3 \pm \sqrt{3}}{4}$$

また $q_k = (-1)^k p_{1-k}$ である。さまざまな長さのフィルタが考案されているが、そのようなフィルタはウェーブレットの理論から決定される。

一般にフィルタを $\{p_k\}$ とすると、信号のウェーブレット変換は

$$c_k = \frac{1}{2} \sum_{\ell} \bar{p}_{\ell-2k} s_{\ell}, \quad d_k = \frac{1}{2} \sum_{\ell} \bar{q}_{\ell-2k} s_{\ell}$$

また逆変換は

$$s_k = \sum_{\ell} (p_{k-2\ell} c_{\ell} + q_{k-2\ell} d_{\ell})$$

で、これらはまとめてMallatアルゴリズムと呼ばれる。

フィルタ係数 p_k が与えられるとスケーリング関数が決まる。スケーリング関数とはトゥー・スケール関係

$$\phi(t) = \sum_k p_k \phi(2t-k)$$

を満たす関数である。ウェーブレットは

$$\psi(t) = \sum_k q_k \phi(2t-k)$$

によって与えられる。ハール・フィルタのときこれらの関数は、図6のハール関数となることは容易にわかる。上に示したドーブシー・フィルタでは、図2のドーブシー関数となることを示すことができる。このように、フィルタ p_k

と関数は密接に結びついており、フィルタの性質は関数の性質から決められる。

トゥー・スケール関係によって多重解像度解析が数学的に定式化される。実際、フィルタ係数にハール・フィルタを取って2次元に応用すれば、ピラミッド・アルゴリズムで 2×2 ピクセルの平均値を1ピクセルに割り当てる操作を表す。ドーブシー・フィルタではそれを一般化した操作になっている。

8 離散ウェーブレット変換の応用

画像圧縮は離散ウェーブレット変換が最も有効な応用である。画像は2次元データであるから、縦方向と横方向と独立にウェーブレット変換を行う。エッジなど画像における重要な情報は変動分に相当するから、エッジの位置に相当するウェーブレット係数の値が大きく、そのほかの部分では係数の絶対値は小さい。小さい値の係数を0と置いてこれをカウントしなければ、情報を失わずに信号の圧縮ができる。図9に示すのは、指紋の画像(左)をウェーブレット分解し、1/10に圧縮して逆変換した画像(右)であるが、情報はほとんど失われていない。

統計学の分野では、ノイズを除去する有効な方法としてウェーブレット縮小法(WaveShrink)がドノホ(D. Donoho)らによって開発された。図10にその例を示す。これらは代表的な例であるが、ウェーブレットの応用範囲は極めて広く、ここではこれ以上の紹介を割愛せざるを得ない。

9 最近の動向

1990年代中期からはウェーブレットの応用は普及の段階に入ったと言える。前述のように教科書やソフトウェアが整備され、ウェーブレットはあらゆる分野の研究者やエンジニアに身近なものとなった。コンピュータと不可分のウェーブレット応用は、インターネットの普及を最大限に

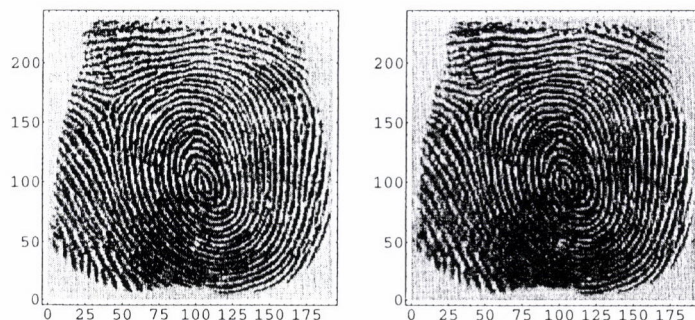


図9 指紋の画像(左)の圧縮(右)

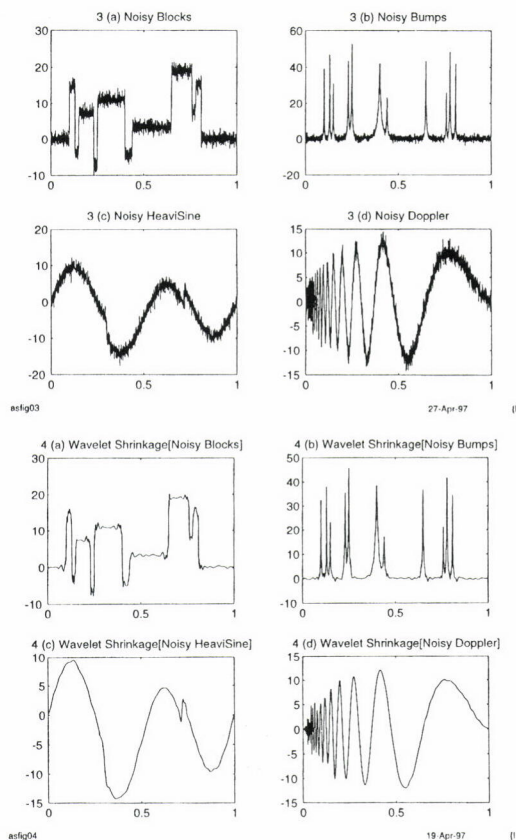


図10 ウェーブレット縮小法によるノイズ除去の例

利用している。1992年春にスウェルデンス (W. Sweldens) によって開設されたウェーブレット・ダイジェスト (<http://www.wavelet.org/>) にはウェーブレットに関するあらゆる情報が集められており、新しい論文のアブストラクトや学会の予定、さらにウェーブレットに関する質問や答えが載っており、ハイパーリンクによって論文のファイルや学会の詳細を取り寄せることができる。

ダイジェストを見ながら最近の動向を概観してみると、理論の面では、区間に限定されたウェーブレット、リフティングというより高速なウェーブレット変換アルゴリズムの考案、マルチ・ウェーブレットなどが挙げられよう。一般にウェーブレットの応用においては、信号の境界条件の扱いが難しいが、区間限定ウェーブレットはこれを解決する試みである。またマルチ・ウェーブレットは、ふつう多重解像度解析は1つのスケーリング関数によって生成されるが、対称性などを改善するために複数のスケーリング関数を導入するもので、フィルタ係数が行列となる。しかし、これらはまだ研究段階で、標準とされる関数は作られていない。

微分方程式の解法などの数値計算への応用は以前から行われているが、ウェーブレット基底では微分演算子に対角化されないのが簡単でなく、最近も研究が盛んである。これも含めて、日本におけるウェーブレットの応用研究の一部は文献12)にまとめられている。

最近幅広い範囲で応用研究が盛んで、生物学、化学、医学などの分野でデータ解析や画像解析に使われている。また、特に最近注目されるのは、経済などの時系列解析における分散の解析への応用である。

こうしてみるとウェーブレットは、さまざまな研究者やエンジニアが、いまや一般に普及したインターネットで一同に会し、分野を越えて研究を行い、情報を交換する世界を形成していると言えよう。

参考文献

- 1) C. K. Chui : An Introduction to Wavelets, Academic Press, (1992); 桜井 明, 新井 勉訳, ウェーブレット入門, 東京電機大学出版局, (1993)
- 2) I. Daubechies : Ten Lectures on Wavelets, SIAM, (1992)
- 3) Y. Meyer, Wavelets : Algorithms and Applications, SIAM, (1993)
- 4) G. G. Walter : Wavelets and Other Orthogonal Systems with Applications, CRC Press, (1994)
- 5) G. Strang and T. Nguyen : Wavelets and Filter Banks, Wellesley-Cambridge Press, (1996)
- 6) A. Bruce and H.-Y. Gao : Applied Wavelet Analysis with S-PLUS, Springer, (1996)
- 7) C. S. Burrus, R. A. Gopinath and H. Guo : Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms : A Primer, Prentice-Hall, (1998)
- 8) S. Mallat : A Wavelet Tour of Signal Processing, Academic Press, (1998)
- 9) 榊原 進 : ウェーブレット ビギナーズガイド, 東京電機大学出版局, (1995)
- 10) 芦野隆一, 山本鎮男 : ウェーブレット解析, 共立出版, (1997)
- 11) C. K. Chui : Wavelets, A Mathematica Tool for Signal Analysis, SIAM, (1997); 桜井 明, 新井 勉訳, ウェーブレット応用, 東京電機大学出版局, (1997)
- 12) M. Kobayashi, editor : Applications of Wavelets, SIAM, (1998)

(1998年8月14日受付)



アラカルト

環境と行政、環境人間学のミッション

木原 諄二
Junji Kihara

姫路工業大学 環境人間学部
教授・学部長

Environment and Government Correlated with The Mission
of Humanity for Environment Policy and Technology

1. 環境人間学との関わり、気楽に書けない「環境」

平成10年4月1日、姫路工業大学に環境人間学部が誕生した。ふえらむ編集委員会から、環境人間学に関して肩の凝らない気楽なものに纏めて、ふえらむに寄稿して欲しいと依頼された。姫路市の依頼で環境と行政の問題を新学部のミッションと関わりをつけて講演したばかりだったので引き受けたが、これはシリアスな課題なので、気楽に取り扱うと大やけどを負うことになりかねない。それを気にしていると不意に筆が重たくなって、肩がどうしても凝ってしまう。

環境人間学部の設置に携わってから、環境は今日の問題ですね、と会う人々から言われ、背筋に寒さを覚え、環境の課題と向き合っていく難しさを噛みしめている。

本文は、たまたま本年4月1日に「環境と行政」というテーマで行った講演で触れた幾つかの問題について改めて随想の形で書いたものである。また、平成9年夏、淡路島で淡路創造大学の講師としてリサイクル社会への道というテーマで講演した内容も含め総合的に議論を展開した。環境を主題とする以上、読者の厳しい批判を受けるのは覚悟の上である。

2. 環境人間学部とは

環境人間学部は一学部一学科制の学部である。この教育体制で可能なことの一つは高等教養教育であり、他の一つは具体的な使命を持つ課題に対して全専門の知識を動員して対応することを教育することである。後者は実社会から生まれてくる問題や課題をその課題の在り様に従って捉えていくような学問の可能性の追求である。文理融合と言うより文理工社会融合の一学部一学科と言えるだろう。そして、そのような構造と使命を持つ学部であれば、その名が表すように環境と人間との関わりを課題とすることは当を得たものである。

教員は三つの大講座に所属する。一つは生活環境学大講座であり、健康・スポーツ、食物栄養、被服・住居などに関する教育と研究を行う。二つ目は社会システム環境学大講座で、エコシステム、地域システム、企業システムなど、三つ目は文化環境学大講座で、環境と文化、異文化間コミュニケーション、人間学などのそれぞれの専門に関する教育と研究を行う。

要するに鳥の目の観察と蟻の足の歩みとを連関して人間の課題に対応しようという学部である。

3. さて、環境問題とは

ある人は、足尾鉾毒事件を考えるだろう。この事件は我が国の戦後復興期から高度成長期にかけて起こった公害問題の基本的な性格や構造を持っている。これらの公害問題は、環境問題というより企業による環境犯罪と言った方がよいかも知れない。つまり、加害者と被害者がともにはっきり分かるからである。

しかし、これらは被害者が加害者にその賠償を求め、加害者が犯罪者として裁かれる、というようにはならなかった。これらの殆ど全ての場合、加害者の方が圧倒的な政治力を持っていたからである。これらの公害問題は、国民国家の課題である重工業化の過程において起きた。一国経済思想のもとで加害者である企業または企業群が比較的寛容に扱われる時代の出来事であった。

4. エコロジーの始まり、エレンからレイチェルまで

十九世紀半ば一人の女性がマサチューセッツ工科大学に入り、無給の研究者として大学に残った。彼女の仕事は、工業がその活動によって排出する物質が人間の健康をどのようにむしばむか、企業が食物として製造販売するものがどれほど人体を損なうかを研究することであった。彼女の存在は産業界の敵視することになり、彼女の研究活動に対す

る社会的評価は厳しかったのであるが、大学の同僚の教授が彼女の専門をサイエンスドメスチカと定義し、経済的考察を基にした食環境と栄養と健康、健康を目指す生活環境の設計と言うミッションを与えることによって、彼女すなわちエレン・スワロウ・リチャード(リチャードは彼女の庇護者で夫である)を庇護しその時代に環境学の看板を掲げることに対しての社会からの批判と圧迫とを柔らげた。田中正造が足尾問題と取り組んでいた時代と符合する。

二十世紀中葉、また合衆国においてであるが、レイチェル・カーソンが、沈黙の春という書物を出版し有機塩素化合物の生命一般に対する毒作用に関して警告した。彼女の指摘した環境破壊は、国家の産業政策の中で企業の環境安全義務が甘くなったが故に企業が加害者となった、というものはやや趣を異にするものである。防虫剤として民生に使用される薬品の安全性の確認の遙か及ばない微量濃度による長期の作用の結果、取り返しのつかない自然の変質が起こる。人間の営為が人間にもその他の動植物にも被害を与えることになるのである。その系譜では、最近の環境ホルモンの問題がある。沈黙の春の警告した環境破壊に続くものである。

5. 企業の責任から文明の責任へ、連関構造の形成

有機塩素化合物は環境ホルモンの作用をする物質としても悪玉である。ダイオキシンはその一つに数えられている。

四半世紀前の環境問題は公害問題とも言われ、未来学の故坂本二郎が公害ではなく私害だと語っていたように、発生源と被害者とを明確に分別することができた。しかし、国にしても地方公共団体にしても公害の発生源に対して微温的な態度を取ったことの背景には、公害の発生源に対する処分によって加害者のみならず被害者にも経済的打撃が加わるという連関構造が存在するという状況が存在した。この連関構造の形成は環境問題において本質的な意味を持つものと言える。

6. 文明を享受する責任

二酸化炭素ガスによる地球温暖化、酸性雨による森林の喪失の問題、フロンによるオゾンホール拡大、さらに環境ホルモンによる動物の生殖状況の混乱と言う問題に関しては、誰を悪玉にして良いか分からなくなる。これらの事柄は、近代文明を享受する人間の活動が本来の自然の大きさと比較できるレベルに達したことを物語っている。近代文明を享受することを是とする以上、この状況から産み出される環境問題には誰しもが責任があると言わなければならない。

このような環境問題の特徴は、危機が忍び寄り気がつい

たときには深刻な事態になっているというところにある。このような中では事態の正確な観測と評価を可能にする技術を充実させなければならない。

7. 行政と技術の課題、リサイクルを巡って

連関構造を持つ環境問題に如何に取り組んでいくか。それは第一に行政の課題であり、またそれを支える技術の問題である。現代の環境問題は人間が快適な生活環境を作り出そうという過程から産み出された副産物や廃棄物が原因となっている。廃棄物を作り出さない、あるいはそれを無害化する技術を構築することを技術研究の正面に据えることは可能である。

さて現在、環境問題に関しての行政の取り組みには幾つかの問題があると考えられる。たとえば、リサイクルに関して、あるいは廃棄物の資源化に関して、行政が大きな組織を作り採算を度外視してまで介入すると、経済社会の営みのシステムに不合理なリンクを挟み込むことになって、却って、地球と共生できる社会の実現の方向と反する結果を招くことがある。例として故紙回収事業の問題がある。新聞紙・マスコミ・事業所の多量の紙需要とその故紙化によって紙のリサイクルプロセスへ流れてくる物量は、再生紙の市場の需要を遙かに上回るレベルにある。そこで、回収業と言う民間の事業の市場は、その物流の規模に圧殺されてしまっている。多くの自治体や非営利団体は、運動として紙のリサイクルに努めてはいるが、経済システムとして自立的に回転を始める段階に至るまでの間に、運動体のエネルギーの持続を行政が支えることができるか懸念される。

紙に限らず資源のリサイクルは、地球のために未来を残そうと言う努力の一つであるが、社会システムの整合性を無視すると、しばしば未来から咎められることになる。将来の状況や問題を綿密に検討し、対処すべき技術課題を抽出して、技術的にも経済システムの面でも合理的な対応策を創出していかなければならない。これは行政が課題を投げかけ技術が答えていく問題である。

8. 行政と技術、ゴミの問題を巡って

プラスチックのゴミを考えてみよう。

ダイオキシンやオゾンホールの問題と関わりの深い有機塩素化合物としてフロンや塩化ビニールがある。塩化ビニールは食塩から苛性ソーダを得るときに必然的に副産物として生成する塩素を有用な形で活用するのに格好の物質であり、ソーダ業界と塩ビ業界とは物質循環／交換の面で緊密な連関の状況にある。塩ビ業界が成立しない場合ソーダ業界は塩素の処置に窮するのである。物質循環のルート

の閉塞、とくに副産物としてのルートの崩壊がその産業にとって致命的な状況をもたらすのである。

要するに、工業製品製造過程で副産物として生じる塩素をどのように処理すべきかが技術の課題として提起され、その抜本的な技術的解決までの間に廃プラスチックを如何に扱うべきかという、技術と行政の双方に関わる問題である。

9. ゴミは焼却すべきか

ゴミを焼却によって処理することは、焼却技術の完全性を高めて有害物質を排出しないように技術的課題を解決していくことを前提にすれば、ゴミ対策の中で比較的合理性の高い方法である。すなわち、地上投棄あるいは埋め立てにまわる灰分の量は元のゴミの何桁も小さく、投棄量の圧縮が図れること、生ゴミに含まれる感染危険物質などの衛生的処理がほぼ完全に行われることは確かであり、ゴミ処理の究極は焼却処理だと言えるかも知れない。ただし、それは二酸化炭素の問題を考えなければの話である。

そこで、二酸化炭素ガスとゴミ処理との関係についての問題を考えてみたい。ある報告を見ていたら、可燃ゴミを圧縮して体積を減らしそれを固形燃料として利用するとあった。また、別の報告には、林から手入れのために切り出した木ぎれを木炭にして燃料として利用するとあった。直ぐにゴミとして焼却処理をしないだけ、また化石燃料を使用しないので、二酸化炭素問題に配慮しているようであるが、あまり優れた案ではない。ダイオキシンの問題を少し慎重に考えなければならないのであるが、ゴミを燃やすことに私はやや疑問を抱いている。

ゴミは炭化の状態まで熱処理して後は保存固形物として扱うという考えはどうであろうか。炭化処理のエネルギーはゴミに含まれる低級炭化水素系化合物を含む含水素系可燃物の発熱でまかなえるのではないかと考えている。

保存固形物は無定形炭素の機能を生かした燃料以外の用途に活用することを考える。河川の底に敷いて水の浄化を図るとか、粉碎して土壌改良材に用いるとか、酸化してゆっくり二酸化炭素になっても、焼却ほど短時間に非温暖化炭素から温暖化炭素である二酸化炭素や低級炭化水素ガスに変化しなければ良いのである。

10. エコマテリアルとしての炭素系材料

炭素を非温暖化炭素の状態でも地上にも長く固定することの試みとして、森林の活用がある。最近、松山市に出かけたが、さらに南に下ったところに久万と言う林業の盛んな町がある。この町に町立美術館が建っている。この美術館は陳列物にも特徴があるが、一番の特徴は木造ということ

である。木造の美術館は絵画の保存にとって理想的なのだろう。防火の面から木造建築にすることには躊躇したが、文化庁の後押しもあって決断した。木造の保存庫を鉄筋コンクリートの鞘堂の中に作り、非常時への対応に配慮したそうである。斑鳩の法隆寺ではないがこの久万町の木造美術館も長年月維持されることになろう。

恒久的な建造物をなるべく木造建築にして、木材の使用量を増すことは、我が国のようなアジアモンスーン地域にある森林を木材の供給源とする限りにおいては、二酸化炭素問題に対する積極的な寄与となろう。

どこの地域の森林も林業の対象として、木材を切り出して恒久的な建造物を造ればよいのではなく、その森林がどのような気候環境の地域に存在しているかが重要である。

日本は、地価、労賃、地形、過疎などのハンディを除けば気候帯、地味などから言って木材生産地として申し分のない条件にある。手入れを放っておけば直ぐに草ぼうぼうになる我が家の庭を見ても、我が国での二酸化炭素を固体状態の炭素化合物に変える自然の力が逞しいことが分かる。ハンディの中で地形を除けばこれは人工的な条件である。

森林は、人間の手を入れないのではなくその森林が最も早く成長する速度の状況に維持するように、伐採と植林などの手入れをするべきである。そこで得られる木材資源を燃やさないで長年にわたり利用し続けるような、家屋、調度、食器などの利用システムを可及的速やかに構築しなければならない。これは、我が国でこそ可能な炭素の陸上固定の課題への寄与である。厳密な森林資源に関するライフサイクルアセスメントに基づく定量的な戦略の策定が求められる。

11. もう一つの環境の課題、環境計画とデザイン

環境の別の側面を考えてみよう。これまで、環境問題を、人間がその活動によって引き起こしてきた地球の危機の問題として考えてきた。次の環境に関する課題は、人間が太古以来、人間性に基づいて今日まで営んできた生活設計と地域づくりに関する問題である。住居、住居内環境、道路、交通網、サービスエリア、学校、病院、官公庁などの配置をどのようにすることが合理的か、またその合理性の根拠として何を考えるのが正当か、という問題である。この地域づくりの設計には言うまでもなく、省エネルギー、省資源、省力、環境負荷低減という環境課題を考慮して進められるべきであって、新しい世紀の地域づくりは地球との共生の課題と折り合うものである。

人間にとっての快適さに関して言えば、従来の地域づくりは標準的な健常者をモデルとしてなされてきたきらいがある。今後はエイジレス、バリアフリーなどの価値観に基

づいて考えていく必要がある。

このような、人間の生活空間の計画・デザインを深く、また多角的に捉える教育は、ある意味で良い建築家を育てることができると言える。そこで、環境人間学の履修モデルの中に一級建築士の受験資格の要件を満たすものが設定されており、人間と環境への深い理解を持つ建築家の誕生が期待されている。

12. 矛盾する状況の克服と政治的人間性

環境の問題は相互に深く関連し、対応する方策の間にも矛盾が生じてくるものである。そのような状況を乗り越えていくのが人間の英知であり政治的な能力である。

問題を全て技術の問題に還元して最適化をしても、意識ある人間は不満を持つこともあるし、物言わぬ原環境である自然にとっても不具合が残る可能性がある。しかし人間は必ずしも最上ではない次善の状況を決断によって受け入れる能力を持っている。この能力は人間性の一つであり、この人間性に依拠して事柄を導いていくのが政治であり行政であろう。

大気・水問題や地域システム計画の場合、地球環境問題と人間生活との折衝の場であることを述べたが、人間は人間独特の環境を構成する。それは社会である。社会というのは、ある人にとっては企業であり、行政組織であり、教育機関や研究機関、社会活動団体などである。このような場所には共通の約束事が必要であり、人間の組織論が人間性に立脚して構築されている。そのような各場所で、コミュニケーションと個人性とをどのように両立させるかは組織設計の重要事である。それは政治体制の評価の問題ともつながる。このような組織における人間関係は民族や人種の独特の人間性によって規定される個性と局所性の強いものである。そこでグローバル時代の人間の組織の在り方をどのように設計すべきかは、民族や人種独特の人間性を一つの環境として捉えて進めるべき課題である。社会における少数者の利益を損なわずに個々の環境を一つの総合的な環境にまとめ上げていくことが要請される。ボーダレス時代の課題である。このような問題が、国、県そして市でそれぞれどのようなレベルで解決されていくのが問題である。

13. 地方分権の政治環境、個の普遍性と均質性

地方分権が地方に任せても全部が均一に同じようにやってくれるだろうから安心して任す、と言うのでは本当の分権ではないだろう。それでは、江戸時代の幕藩体制と同じ事になる。藩ごとには違いがあっても幕府の意図に反しない限り何をやっても良いというのは、分権みたいに見えるが、隣の藩との交流や協力を禁じられた上で全ての藩がヒ

ラメのように幕府を見ているというのは形を変えた中央集権体制である。この疑似地方分権の統治文化が江戸時代・明治維新を貫いて現代日本までの国家の基本となっている。

自治というのは一つの意志を持つ個体となるという意味であって、内政不干渉で何をやっても自由というのではなく、意志を持つ一つの個体として折衝する主体となるということである。

14. 袋としての人間の内なる環境

最後に、人間の環境としての精神の問題にぶつかる。環境と言う言葉をいろいろな意味に使ってきたが、要するに環境とは何かと問われれば、人間を上下左右前後内の七方面から包む精神的ならびに物理的空間の状況と言おう。こうやってしまうと人間は袋袋ということになる。袋の内なる環境に関して言えば、気候・大気・水・摂取物との関わりと文化や宗教との関わりから身体・健康の環境が形成され、反対に身体・健康の環境が関わって文化や宗教の環境が育つ。物理的あるいは物質的な環境の人間の内環境との関わりは必ずしも一時的なものとは限らず、歴史的な時間の関わりを持つ要素もある。

環境人間学における人間は、環境によって形成され環境と交渉して生きる袋としての存在である。

15. 文化の交流と軋轢、コミュニケーションの濃密化

地球上にいろいろな宗教があり思想があり文化が育ってきた。和辻哲郎はアジアモンスーン地帯の米作文化、中近東の砂漠の文化、中欧の森の文化とユーラシア大陸の文化圏を大割に定義したが、そのような分け方には今日多くの疑問が出されている。しかし、人間の心が気候という外的なものの影響を受けて形成されるという考えは正しいだろう。そして、風土という言葉には人間の文化的要素が自然と合体している様子が感じられる。

近代は交通通信技術の発達を特徴とするその文明によって、それらの宗教や文化の間に太い情報通信運搬回路を形成した。勿論シルクロードの時代にも異文化の間の回路があったが、それを通して伝えられる情報はそれぞれの文化圏に生きるものにとって、非日常的なおとぎ話のようなものであったろう。そのようにして細々と受け入れられた文化が伝わった先の文化に、料理における薬味のはたらきのような味わいを添えるように影響している。

しかし、今日、大量の情報をそれを裏打ちする経済的な質量と共に伝えることができる回路によって、異なる文化圏にある人同士が文化的緩衝帯無しに接することになった。人間は異文化を、時空隔てることなく、また消化と同

化のプロセスなしに受け入れざるを得ない状況にある。

16. 異文化研究と植民地経営

異文化を意識しそれを研究する学問が、英国のアジア植民地経営のために英国において始まった。英国がそして、他のヨーロッパ諸国がそして新興の合衆国が、異文化圏との折衝の技術を磨いて全地球的なコミュニケーションの標準を作り上げた。異文化の世界を自らの経済的・軍事的利害としての対象として意識し、政策と技術とを研究したのはこれら欧米の国々であった。

その標準が、そのように偶然の、そして軍事・経済的な必要によって作り上げられたにも拘わらず、逆に、モラルフリーで技術的合理性を具有するという利便性を持っており、それ故に一見普遍と見まがう擬世界標準となることができた。そこで、その反動として幾つかの軋轢が平和を脅かすようになり、20世紀は二回の世界大戦を経験することになる。

17. 統一と団結か契約と連帯か、20世紀の二つの人工国家

マルクスが歴史は繰り返すと言ったとき、それは二人のナポレオンのことを指していたということである。しかし二回の世界大戦も百年の尺度の歴史としてみれば、文化の軋轢の歴史が繰り返されたと言えないことはない。一回目はプロイセンのゲルマン民族主義と英国の汎世界標準との文化闘争、そして二回目は偏狭なゲルマン民族主義に我が国の国家主義が共鳴して、英米の標準との文化闘争が一つの契機となっている。

20世紀現代史の研究者の間では、フランス革命からロシア革命までの長い19世紀と、ロシア革命からソ連崩壊までの短い20世紀として考えることが常識であるそうである。20世紀は、ソ連と合衆国の二つの人工国家の試行を比較する世紀だったとも言える。

ソ連は経済体制と政治体制に関する一つのアイディアのもとに創成された国家、合衆国は自らの文化的・神話的ルーツを切り離して、国家の約束事に従うことを誓約して合衆国市民となった人々の国である。合衆国は、英米の標準のラディカルな実施例だとも言えよう。ソ連は神話と伝統に代えて経済制度と政治制度の合理性に信頼して、一致と団結すなわち統一をベースに国家形成を図ったが、21世紀を待たずして崩壊した。しかし合衆国の組織論理の没民族性は多くの国家の体制として民族や人種を越えて受け入れられた。合衆国は、民族の歴史や伝統を個人の自覚として持つとしても、それらを民族自決の国民国家形成の論理として考えることから自由になることのできる人々が、英米の

汎世界的標準の枠の中で契約して形成される国家である。この標準が普遍性を持つか否か、は問題であるが、異文化を背負った人間同士の契約と連帯の場としての国家の形成を可能にし、逆にそれぞれの文化的個性の普遍的広がりの可能性を否定しない場を構成できる特長がある。

18. モラルは国家のものか個のものか

いわゆる国民国家あるいは自然国家が国家形成のモラルとして、その自然史の表象としての歴史や伝統を上から設定するのに対して、合衆国では個人が自覚的にモラルの基準を認識していることが求められる。

余談となるが、大学が自己評価を求められてきたが、最近、自己評価は駄目でやはり第三者評価でなければならないと言われるようになった。大学が自己のモラルを設定しそれを外部に明確に提示してこそ自己評価が客観性を持つのである。しかし自然国家においては個がモラルを自覚するのは殆ど不可能に近く、従って我が国の大学は自己評価が成り立つ基盤を持たないということになる。

19. グローバルな課題の解決の場と異文化間交流

戦争の理由の半分は文化的理由であると言える。全ての人が異文化との折衝に寛容であることを期待することはできない。20世紀の終わりを迎え文化的理由たとえば宗教上の理由や体制上の理由から他の文化の中にいる人間の存在を許さない原理主義が軋轢の証としてはびこるようになった。それは、自己のアイデンティティを民族のそれに合一して守る以外に道の見いだせない人々にとっての「合理的」な選択と言える。

しかし、それぞれの文化を背負った人々の間のコミュニケーションが濃密になっていく現代において、それぞれの個性をベースにした人間の連帯を作り出すことが必要であろう。それが、全地球規模に相互連関して生じているいわゆる環境問題の解決、局地的な軋轢や紛争の持つ普遍的な意味の理解の上で不可欠である。次の世紀がボーダレス時代であれば、自然国家もグローバルな場で意味のあるモラルを主張することが要請される。

環境人間学の一つの柱である文化環境学のミッションの中で、この課題に対応することは重要度の最も高いものの一つである。

20. 被批判可能性について、おわりにかえて

文理工社会融合という前提の基に創設された環境人間学部の責任者の立場で引き受けた講演の内容に可成り手を入れてまとめてみた。環境が人を上下左右前後内から包むものという代物なので、ある一つの材料プロセス技術を解説す

るようにすっきりと書くことができなかった。

誰もがアマチュアのような領域なので、何を書いても言っても良いようであるが、しかし例の「知の技法」の言うところの被批判可能性のある随想となるように心がけて書いた。また学部創設に当たって詰め込まれたものを、振り返って整理するつもりで書いた。是非、遠慮のないご批判といろいろご教示を得たいものである。

尚、参考文献は筆者が読んでいて本稿を書くのに影響を受けたと思われるものを列挙した。

参考文献

- 1) 小宮山宏：地球温暖化問題に答える，東京大学出版会，(1995)
- 2) 山本良一編著：地球にやさしい材料革命 エコマテリアルのすべて，日本実業出版社，(1994)
- 3) アンナ・ブラムウェル，金子 努監訳：エコロジー 起源とその展開，河出書房新社，(1992)
- 4) 竹内 啓，湯本昌編：地球を考える 生命と環境のランドデザイン，三田出版会，(1992)
- 5) 林 竹二：田中正造伝，講談社現代新書，講談社，(1976)
- 6) ロバート・クラーク，工藤秀明訳：エコロジーの誕生 エレン・スワローの生涯，新評論，(1994)
- 7) 太田猛彦，北村昌美，熊崎 実 他編：森林の百科事典，丸善(株)，(1996)
- 8) 東京大学公開講座：文化としての20世紀，東京大学出版会，(1997)
- 9) 小林康夫，船曳建夫編著：知の技法，東京大学出版会，(1994)
- 10) ゲオルグ・モッセ，佐藤卓巳，佐藤八寿子共訳：大衆の国民化，柏書房，(1994)

(1998年7月21日受付)

Fifth International Conference on Progress in Analytical Chemistry in the Steel and Metals Industriesに参加して

名古屋大学工学部 千葉 光一

1998年5月12日から14日にかけて、ヨーロッパ鉄鋼分析協会(CETAS: the European Committee for Study and Application of Analytical Work in the Steel Industry)の主催による標記国際会議がルクセンブルクにおいて開催された。本会議は3,4年おきに開催される鉄鋼分析分野で唯一の国際会議である。今回は、26カ国から約370名が参加者した。発表総数は105件であり、そのうち講演・口頭発表が68件、ポスター発表が37件であった。また、分析機器展も併設され、ヨーロッパの分析機器メーカーを中心に30社ほどがブースを開設し、鉄鋼分析に関係する分析装置の展示と説明を行った。日本からは10名の参加者があり、6件の講演を行い、さらに佐伯正夫氏(元新日鉄、現富士物産)が「分析方法の標準化」および「これからの分析方法」と題するパネルディスカッションに参加した。日本は、EC12カ国および北欧3カ国に次ぐ参加者と講演数であった。

本会議における講演の全般的な傾向は、分析方法論的に分類すると、表面分析関連16件、ICPAES 5件、ICPMS 9件、GDS13件、X線分析関係6件、レーザ利用7件、ガス成分分析8件など、最新の分析手法の鉄鋼分析への応用や新分析方法の開発に関するものが目を引いた。特に、今回の会議では、ヨーロッパ各国の大学および研究機関からの参加がこれまでになく多く、新分析技術の開発や物性の評価およびその方法に関係する研究が数多く発表された。ヨーロッパでは伝統的にGDSに関する関心が高く、日本ではすでに若干収束気味であるが、GDSによる表面分析およびバルク分析に関する研究が盛んに行われている印象を受けた。直流GDSと交流波GDSの特性比較、ガス成分分析における影響などが報告された。レーザ利用に関する研究は大学・研究機関を中心に積極的に行われている印象を受けた。レーザアブレーションあるいはレーザブレイクダウンを利用する発光分析や試料導入に関して基礎から応用に至る研究が報告され(日本からの報告も1件有り)、新たな固体試料分析法として、その研究の進展が期待される。ICPAES、ICPMS関連では、トランプエレメントの鉄鋼材料への物性影響や耐久材の環境影響の観点から鉄鋼あるいは金属中の微量および超微量元素を分析するための報告が目についた。また、銅中ガス分析法では、レビテーション(浮揚融解技術)を利用する新しい非接触型分析技術に関する報告があり、会場の関心を引いた。

また、分析対象別には、工程管理分析の自動化、銅清浄性の評価、スラグの評価、標準物質、環境(ダイオキシン関連、焼却飛灰)など、極めて今日的な課題に関する活発な講演と議論が展開された。工程管理分析の自動化に関しては、現在日本の各製鉄所において整備されている全自動分析システムがヨーロッパにおいても急速に普及していることが報告された。銅の清浄性に関しても、ヨーロッパ各国においてこれまでになく活発に研究が行われている。日本からの講演に対して活発な質疑と議論が行われ、日本での清浄性評価に関する研究に高い関心を寄せていた。特にヨーロッパでは、PDA(Pulse Discrimination Analysis)ー固体発光分光分析法を用いる研究が各国で開始され(これまでは特許上の制約から、日本メーカーのみが生産)、Sol Alの評価、 Al_2O_3 やMnSのマッピング、Cのマッピング等への応用が報告された。また、溶融スラグ中 Fe_2O_3 の直接分析について、スラグからの紫外発光(200~400nm)測定する方法についての基礎検討結果が報告された。標準物質、標準化に関しては、パネルディスカッションも行われて関心の高さが示された。基本的には標準物質の整備と分析方法の標準化を進めることには異論が無いものの、具体的な進め方においては基本思想や優先課題での認識の相違があり、収拾までにはまた時間が必要であろう。

本国際会議の基調講演は「ヨーロッパ鉄鋼分析分野における共同研究とその成果」(L: H. Österholm, Chairman of CETAS)と題するものであり、1974年からの鉄鋼分析分野における共同研究体制とその成果が紹介された。この24年間に産学協同研究に約50 MECU(約50億円)の研究費が投入され、そのうち約33 MECU(約33億円、年間約1.5億円)がECSC(European Coal and Steel Community)からのサポートであった。その結果として、産学あるいは企業間の共同研究が大いに振興されたことが紹介された。今会議の全体の印象として、統合に向けたECと経済苦境下の日本という社会的要因も考慮する必要があるが、ヨーロッパにおける活発な研究状況と親密な共同研究体制(産学および企業間)を感じるが多々あった。この数年間でヨーロッパの分析技術は格段に進歩し、現在トップレベルの水準にあり、産学の共同研究をてこに新技術を開発しようとする意気込みが感じられた。また、標準化の分野においても自らの技術のスタンダード化を狙い、世界をリードしようとしているようである。今後、日本においても、分析技術のグローバル化に対応して、さまざまなレベルにおける共同研究の推進を測るとともに、その成果を世界に向けて積極的に発信することの必要性を痛感した国際会議であった。

なお本稿の執筆にあたり、NKK基盤技術研究所 千野 淳氏および日鐵テクノロジー 柿田和俊氏に大変にご協力いただきました。

名 誉 会 員 追 悼



故 名誉会員 藤本 一郎 君

社団法人日本鉄鋼協会名誉会員、元会長、川崎製鉄株式会社相談役藤本一郎殿のご逝去の報に接し、謹んで哀悼の辞を申し上げます。

氏は、昭和43年から45年までの2年間、本会会長を務められ、鉄鋼技術に関する深い造詣と、卓越した指導力をもって本会事業の企画運営にあたられました。特に、氏の尽力によって初めてわが国で開催された鉄鋼科学技術国際会議は、世界各国から千百余名が参加し、鉄鋼の精錬から加工、材料にいたる広範囲にわたって活発な討論が行われ、実り多い成果を挙げることができました。また、氏は、ソ連科学アカデミーとの第2回日ソシンポジウム、国際鉄鋼協会技術委員会等の開催、ISO鉄鋼規格の調査研究推進を通じて鉄鋼業界の国際交流を活発に行われました。さらに、情報処理構想のための委員会を新設する等、数多くの立派な業績を残し、鉄鋼技術の興隆発展に尽くされました。

これらの事業推進にあたって、氏は、高邁なる識見と優れた洞察力と指導力を発揮され、その発展に多大の貢献をされておられます。

氏は、昭和7年東京帝国大学工学部冶金学科を卒業後、株式会社川崎造船所（現川崎重工業株式会社）に入社、昭和25年、川崎重工業の製鉄部門が分離独立した川崎製鉄株式会社に移られ、わが国臨海大型製鉄所の先駆けとして近代製鉄所のモデルとなった戦後日本初の鉄鋼一貫製鉄所である千葉製鉄所の建設を推進されました。その後、水島製鉄所の建設では、建設委員長として陣頭指揮を執り、川崎製鉄の現在の事業基盤を築かれました。また、旺盛な探究心を発揮し、高炉の大型化推進、底吹転炉導入、連続铸造設備採用などを先導的に実施する一方、フィリピン・シンター・コーポレーション、ツバロン製鉄所など海外事業も積極的に展開され、同社の海外戦略の布石を打たれました。

氏は、昭和41年に社長に就任され、「技術の川鉄」という企業イメージを定着させるとともに海外を含めた経営の多角化などを的確な洞察力に裏打ちされた信念をもって精力的に推進され、同社を一平炉メーカーから世界屈指の鉄鋼一貫メーカーへと脱皮・雄飛せしめられました。

氏は、本会のみならず、鉄鋼界、産業界に亘る各種団体の要職を歴任し、わが国の経済、学術技術の発展に多大の貢献をされました。これらの一連のご業績に対して、本会から服部賞、渡辺義介賞、製鉄功労賞ならびに褒賞が贈られているほか、政府から勲一等瑞宝章、藍綬褒章が授与されております。

元会長の本会発展に尽くされました偉業を偲び、会員一同心から哀悼の意を捧げ、ご冥福をお祈り申し上げます。

平成10年9月

社団法人日本鉄鋼協会 会長 岸 輝雄

2001

March 25-28, 2001	84 th Steelmaking & 60 th Ironmaking Conferences Omni Inner Harbor Hotel, Baltimore, MD
Oct. 28-31, 2001	43 rd MWSP Conference, Charlotte, NC
Nov. 11-14, 2001	59 th Electric Furnace Conference Phoenix Civic Plaza Convention Center Phoenix, AZ

2002

March 10-13, 2002	85 th Steelmaking & 61 st Ironmaking Conferences Opryland Hotel, Nashville, TN
(Date to be determined)	44 th MWSP Conference 8 th International Rolling Conference
Nov. 10-13, 2002	60 th Electric Furnace Conference San Antonio Marriott Rivercenter & Riverwalk San Antonio, TX

*tentative

本会情報一覧

記事内容	掲載号
第137回春季講演大会 一般講演募集案内	本号827頁
第137回春季講演大会 予告セッションへの講演申込のお誘い	本号828頁
講演大会参加方法のご案内	本号830頁
第137回春季講演大会 討論会講演募集案内	本号830頁
第137回春季講演大会 学生ポスターセッションでの発表のお誘い	本号832頁
効果的な講演発表のためのOHP作成方法	本号833頁
第137回春季講演大会 新製品・新技術紹介コーナー出展社募集	本号833頁
会費等納入についてお願い	本号833頁
第169・170回西山記念技術講座「高精度化・高機能化に挑む最新圧延技術」開催案内	本号834頁
ISS主催行事予定	本号835頁
高温プロセス部会精錬フォーラム・社会鉄鋼工学Bフォーラム共催「環境とパイロメトラジー研究セミナー」開催案内	本号837頁
高温プロセス部会「材料における非線形現象」研究グループ研究会のお知らせ	本号837頁
高温プロセス部会第6回「高温物質の物性とその数学モデル」研究会開催案内	本号838頁
社会鉄鋼工学部会「前近代における鉄の歴史」フォーラム 技術史グループ講演会開催案内	本号838頁
第6回鋼構造シンポジウム「鋼構造用高張力鋼(780N/mm ² 級鋼)の製造・利用技術の現状と展望」開催案内	本号839頁
平成11年度俵・澤村論文賞候補論文推薦に関するお知らせ	本号839頁
「鉄と鋼」執筆要領一部変更のお知らせ	本号839頁
1998年度上期分野別部会大会開催状況	本号840頁
日本鉄鋼協会ホームページに検索機能付加のお知らせ	本号841頁
日向メモリアル国際会議助成の募集案内	10号751頁
学術功績賞受賞候補者の推薦募集	10号751頁
平成10年度重点研究採択結果のお知らせ	10号752頁
学会部門からの評議員候補者推薦募集	10号753頁
計測・制御・システム工学部会シンポジウム「大規模複雑系のモデリングと最適化」開催案内	10号754頁
評価・分析・解析部会「材料の電気化学分析」自主フォーラム研究会開催案内	10号755頁
正会員への転格のお知らせ	9号686頁
日本鉄鋼協会刊行物の購入申込み先変更のお知らせ	9号687頁
平成11年度科学研究費補助金の申請について	9号687頁
材料の組織と特性部会セミナー「技術者のための高温変形・高温材料入門」開催案内	9号692頁
第8回日本・中国鉄鋼学術会議	9号693頁
第4回(1999年度支給開始)次世代鉄鋼奨学助成受給者	8号615頁
「製鉄プロセスフォーラム」及び「資源エネルギーフォーラム」ホームページ開設のご案内	8号618頁
ISIJ International特集号原稿募集のご案内	8号622頁

第15回塗料・塗装研究発表会

1. 日本塗装技術協会
2. 1999年3月26日(金)
3. 芝浦工業大学 田町校舎 北校舎
〒108-0023 東京都港区芝浦3-9-14
4. 日本塗装技術協会 〒103-0024
東京都中央区日本橋小舟町3-4
第一ナカビル
Tel.03-3663-5534 Fax.03-3363-6009

METEC Congress 99

International Conference on New
Developments in Metallurgical Process
Technology and 6th European Electric
Steelmaking Conference

1. VDEh (Verein Deutscher Eisen-
hüttenleute)
2. 1999年6月13日～15日
3. Congress Center Düsseldorf
OCD, Sud Messe Dusseldorf
GmbH, Stockumer Kirchstraße
61 D-40474 Düsseldorf, Germany
4. VDEh Sohnstraße 65, Postfach
10 51 45 D-40042 Düsseldorf,
Germany
Tel.+49-0211-6707472
Fax.+49-0211-6707410

JIMIS-10 第4回再結晶と
関連諸現象に関する国際会議

1. 日本金属学会
2. 1999年7月13日～16日
3. つくば学園都市
4. 電気通信大学 電気通信学部機械制
御工学科 酒井 拓
Tel.0424-43-5404 Fax.0424-84-3327
E-mail:sakai@mce.uec.ac.jp

行事等予定

太字は本会主催の行事

開催期日	行事(開催地)	掲載号及び頁
11月 6日	関西支部 材料セミナーX線解析—集合組織の測定・解析と材料への応用(京都)	9号695頁
6日	評価・分析・解析部会「材料の電気化学分析」自主フォーラム研究会(東京)	10号755頁
6日	第21回制御技術部会研究会「非定常時の運転制御」(東京)	本号844頁
8～12日	国際炭素会議1998(東京)“ニューカーボンのための科学と技術”	1号58頁
9～11日	第7回鉄鋼王冠国際会議(千葉)	4号299頁
10,11日	SICEセミナー 現代制御理論入門(東京)	10号759頁
10～12日	画像化システムと画像通信システムの雑音低減に関する国際シンポジウム(ISNIC-98)(東京)	1号58頁
11日	社会鉄鋼工学部会「前近代における鉄の歴史」フォーラム技術史グループ講演会(東京)	本号838頁
11～13日	第39回真空に関する連合講演会(大阪)	7号550頁
11～13日	第39回高圧討論会(岐阜)	6号451頁
12日	第18回疲労講座「実機の疲労設計と設計規格」(東京)	本号844頁
12,13日	第8回日本・中国鉄鋼学会会議(千葉)	9号693頁
12,13日	第30回溶融塩化学討論会(大阪)	本号844頁
13日	関西支部 材料セミナー界面・微小部分分析(大阪)	9号694頁
13日	関西支部 ウィークエンドセミナー98(大阪)	本号841頁
13日	九州支部 秋季講演会(長崎)	10号757頁
13日	第1回技術フォーラム「フォーラム東京'98 素形材フロンティアはどこまで進歩したか」(東京)	本号844頁
14日	'98SASインテリジェント・シンポジウム(神奈川)	本号844頁
16～19日	第11回国際超電導シンポジウム(ISS'98)(福岡)	7号550頁
17日	材料情報交換フォーラム講演 ブレークスルーが生み出す新しい材料の世界(東京)	10号759頁
17,18日	セミナー「システム設計におけるユーザビリティとその評価～人にとっての使いやすさとは?～」(大阪)	10号759頁
17～19日	第24回固体イオニクス学会討論会(仙台)	6号451頁
17～20日	'98国際粉体工業展(千葉)	10号759頁
18日	第1回実用表面分析セミナー(大阪)	本号844頁
18～20日	第6回鉄鋼工学アドバンスセミナー(千葉)	7号541頁
19日	第6回鋼構造シンポジウム「鋼構造用高張力鋼(780N/mm ² 級鋼)の製造・利用技術の現状と展望」(東京)	本号839頁
19,20日	平成10年度材料科学基礎講座 最近の表面界面の評価技術(東京)	10号759頁

19～21日	第41回自動制御連合講演会（大分）	7号550頁
20日	東北支部 地区見学会（仙台）	本号841頁
20日	第54回シンポジウム「高純度軽金属材料の精製法と用途・開発動向」（大阪）	本号844頁
20日	第119回腐食防食シンポジウム（東京）	本号844頁
21日	第183回塑性加工シンポジウム「軽量構造部材の加工法・接合法」（東京）	10号759頁
21,22日	第2回たたらサミット（名古屋）	10号759頁
21～23日	第49回塑性加工連合講演会（東京）	7号550頁
22日	平成10年度文部省科研費補助金研究成果公開發表行事 面白いぞ、材料は！ーきみだって鉄をつくれる（名古屋）	本号844頁
24日	'98センシング技術応用セミナー「先端検査技術の最新動向ー非破壊検査の基礎と産業への応用」（大阪）	10号759頁
24日	計測・制御・システム工学部会シンポジウム「大規模複雑系のモデリングと最適化」（神戸）	10号754頁
24日	材料の組織と特性部会セミナー「技術者のための高温変形・高温材料入門」（東京）	9号692頁
25,26日	関西支部 材料セミナー化学評価ー金属材料の耐環境性評価ー（大阪）	9号692頁
25～27日	テクノ・オーシャン'98（神戸）	5号384頁
26,27日	凝固理論と応用III（東京）	8号627頁
27日	軽金属学会シンポジウム「アルミニウム合金の動的変形と強度」（東京）	本号844頁
30日	第169回西山記念技術講座「高精度化・高能率化に挑む最新圧延技術」（東京）	本号834頁
12月 1,2日	第4回初心者のための分子動力学講習会（京都）	本号844頁
1～3日	第2回高温エネルギー変換システムおよび関連技術に関する国際シンポジウム（名古屋）	1号58頁
2,3日	第4回流動層シンポジウム（札幌）	8号627頁
3,4日	第36回高温強度シンポジウム（神奈川）	本号844頁
3,4日	第3回超鉄鋼ワークショップ「超鉄鋼材料実現への期待と課題」（つくば）	本号845頁
4,5日	1998年度材料技術研究協会討論会（東京）	本号845頁
5日	北陸支部 平成10年度総会・連合講演会（長野）	10号758頁
8日	高温プロセス・社会鉄鋼工学部会「環境とパイロメタラジー研究セミナー」（東京）	本号837頁
9日	第170回西山記念技術講座「高精度化・高能率化に挑む最新圧延技術」（神戸）	本号834頁
10日	関西支部 材料シンポジウム（京都）	本号841頁
10,11日	第2回赤外線サーモグラフィによる非破壊評価シンポジウム（東京）	本号845頁
11日	抗菌性材料の現状と将来ー金属・セラミックスを主としてー（東京）	本号845頁
14,15日	第4回分子動力学シンポジウムーマイクロメカニクスとの協調・融合を目指してー（京都）	本号845頁
15日	第184回塑性加工シンポジウム 圧延による複合材料の製造技術の進歩（東京）	本号845頁
17日	高温プロセス「材料における非線形現象」研究グループ研究会	本号837頁
18日	高温プロセス 第6回「高温物質の物性とその数学モデル」研究会（東京）	本号838頁
21日	第6回メゾ材料シンポジウム クラスターとメゾ材料（京都）	本号845頁
1999年	システム制御情報学会 第48回講習会 ITS (Intelligent Transport Systems) の現状と将来予測（大阪・東京）	本号845頁
1月 19,20日	第27回ガスタービンセミナープログラム 地球環境に優しいガスタービンを目指して（東京）	本号845頁
21,22日	第185回塑性加工シンポジウム 熱間圧延におけるスケール関連技術（東京）	本号845頁
2月 1日	第185回塑性加工シンポジウム 熱間圧延におけるスケール関連技術（東京）	本号845頁
1～3日	EcoDesign'99 第1回エコデザイン及びインパース・マニファクチャリングに関する国際シンポジウム（東京）	7号550頁
3月 15～17日	第28回FRPシンポジウム (JSMS COMPOSITES-28)（京都）	本号845頁
17日	関西支部 材料セミナー 高温材料入門（大阪）	9号695頁
19日	1999年春季マイクロメカニクス学術講演会（東京）	本号845頁
26日	第15回塗料・塗装研究発表会（東京）	本号846頁
29～31日	第137回春季講演大会（東京）	本号827頁
6月 13～15日	METEC Congress 99 International Conference on New Developments in Metallurgical Process Technology and 6th European Electric Steelmaking Conference (Germany)	本号846頁
7月 13～16日	JIMIS-10 第4回再結晶と関連諸現象に関する国際会議（つくば）	本号846頁
11月 14～18日	Second International Conference on Processing Materials for Properties(PMP'99) (USA)	5号384頁

編集後記

今回、水素エネルギーについての取材の中で、改めてエントロピーの壁の厚さというものを意識させられることになりました。分かってはいたつもりでしたが、水素はエネルギーを生み出す「源」ではなく、たんなる媒体でしかないという事実。つまり水素エネルギー技術が確立されても、おおもとのエネルギー源は、どこからか探してこなくてはならないのです。

現代の経済学がいう「生産」の概念には、なんらかの欠陥がひそんでいるのではないか、ここ数年そうした原初的イメージが確信へと変わりつつあります。「石油生産」とひと口にいうけれど、なんのことはない。太陽と地球が長い

年月をかけて貯蓄してきたエネルギーを、人間はただ掘って使っているにすぎないのです。たとえるなら銀行預金を引き出しているだけです。それを「生産」と考えてしまうことに問題があるのかもしれないなあ、と。人類は親の残してくれた財産をあっという間に使いつくそうとしている放蕩息子なのかもしれません。

(Y. N.)

会報編集委員会 (五十音順)

委員長 雀部 実 (千葉工業大学)

副委員長 近藤 隆明 (NKK)

委員 浅野 弘明 (愛知製鋼株)	石井 邦宜 (北海道大学)	梅本 実 (豊橋技術科学大学)
大河内春乃 (東京理科大学)	上村 正 (いすゞ自動車株)	久保田 猛 (新日本製鐵株)
小西 正躬 (株神戸製鋼所)	今野 美博 (住友金属工業株)	佐藤 駿 (財金属系材料研究開発センター)
下川 成海 (社日本鉄鋼協会)	塚本 穎彦 (三菱重工業株)	長坂 徹也 (東北大学)
中村 欣弘 (株トライ)	日野 義久 (社日本鉄鋼連盟)	丸山 俊夫 (東京工業大学)
三浦 和哉 (社日本鉄鋼協会)	山下 孝子 (川崎製鉄株)	

ふえらむ (日本鉄鋼協会会報) 定価 2,000円 (消費税等込・送料本会負担)

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

1996年5月10日第三種郵便物認可 1998年11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 内仲康夫

印刷人/印刷所 東京都文京区白山1-33-15 (株トライ)

発行所 社団法人日本鉄鋼協会 〒100-0004 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 00230-1-18757 HJS/ISIJ刊行物 (会員の購読料は会費に含む)

© COPYRIGHT 1998 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

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル3階 TEL&FAX 03-3475-5618

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 001-1-978-750-8400 FAX 001-1-978-750-4744

Institute for Scientific Information

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

表紙デザイン 出澤 由野

ふえらむ Vol.3 No.11 広告目次

表2 ハルツォク・ジャパン(株)	前3 (株)エビス	後1 (株)協会通信社	広告案内
発光分光分析装置	連続・凝固解析システム	2 富士電波工機(株)	各種試験機
前1 (株)マツボー	4 (株)堀場製作所 発光分光分析装置	表3 日本ミンコ(株)	サンプル・サンブラ
高精度レーザー測定器		表4 日本アナリスト(株)	各種分析装置
2 丸本ストルアス(株) 試料準備機器	後1 本誌広告目次		

本誌広告取扱 (株)協会通信社 TEL.03-3571-8291 / (株)共栄通信社 TEL.03-3572-3381 / (株)スノウ TEL.03-3257-9565
FAX.03-3571-8293 FAX.03-3572-3590 FAX.03-3257-9568

*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.

ISIJ International

ISIJ International

Monthly.

Circulation: 5,500 Copies. Written in English.

鉄と鋼

TETSU-TO-HAGANÉ

Monthly.

Circulation: 3,000 Copies. Written in Japanese.

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 104-0061 JAPAN
Tel.03-3571-8291 · Fax.03-3571-8293**

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

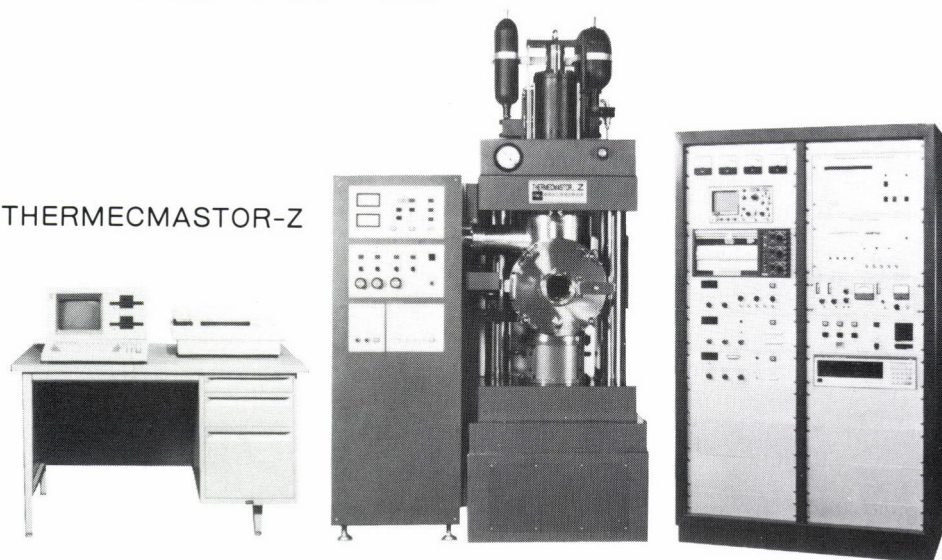
熱間加工試験研究の決定版!

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
〒350-2201 ☎(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)



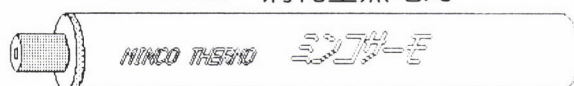
ミンコサンプラーの3つの大きな特徴 信頼性、作業性、安全性。

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

お問い合わせは

営業本部・三郷工場 〒341-0032
埼玉県三郷市谷中388-1
TEL.0489(52)8701~4 FAX.0489(52)8705

本 社 〒160-0023

東京都新宿区西新宿6-6-3 新宿国際ビル
TEL.03(3342)8728 新館4階

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

LECO

新製品

金属中 酸素・窒素 炭素・硫黄 分析装置

TC-300/CS-200

分析対象物質：鉄、鉄鋼、フェロアロイ、非鉄金属、特殊合金 他

酸素・窒素分析装置 TC-300型

永年の実績と信頼を誇るTC-136シリーズが、一段と使いやすくグレードアップしてTC-300シリーズとしてよみがえりました。酸素・窒素分析装置の更新にはTC-300シリーズを是非ご検討下さい。



測定部寸法(mm) 710(H)×610(W)×690(D)
炉 寸 法(mm) 760(H)×460(W)×690(D)

- 特徴**
- ◆迅速分析：1分以内
 - ◆高精度分析
 - ◆標準試料による1点校正
 - ◆自動診断機能付
 - ◆高性能データベース内蔵
(最大記憶容量 32,000件)

オプション：プリンター、天秤
シリーズ機種 TN-300型 窒素専用機
RO-300型 酸素専用機

炭素・硫黄分析装置 CS-200型

お客様のニーズに合わせ、分析対象物の炭素・硫黄含有量に応じた分析範囲を各種ラインナップから機種を選定できます。

- 特徴**
- ◆迅速分析：45秒
 - ◆赤外吸収式ソリッドステート型検出器
 - ◆豊富なラインナップ(12機種)
 - ◆容易な分析範囲の変更
 - ◆自己診断機能付

オプション：IRセルアップグレードキット17種類
プリンター、天秤、オートクリーナー
ラインナップ機種

CS-200型、CS-200CH型、CS-200CL型、CS-200CSH型、CS-200SH型
C-200型、C-200CH型、C-200CL型、C-200CLH型
S-200型、S-200H型、S-200DR型



本体寸法(mm) 775(H)×700(W)×600(D)

日本国内では、日本アナリストの定評あるサービス態勢がLECO分析装置の精度・信頼度を一層高いものにしています。本社(東京五反田)には、常設展示場と分析研究室があり、分析技術のご相談を承っております。

LECO

日本総代理店

LECO CORPORATION
U.S.A.

日本アナリスト株式会社



ISO-9001
No. FM 24045
(BSI - British Standards Institute)

本 社 〒141-0031 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 〒560-0023 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 〒804-0003 北九州市戸畑区中原新町2-1(北九州テクノセンター) ☎(093)884-0309 FAX(093)873-1190