

ふえらむ

Vol.3 No.10 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



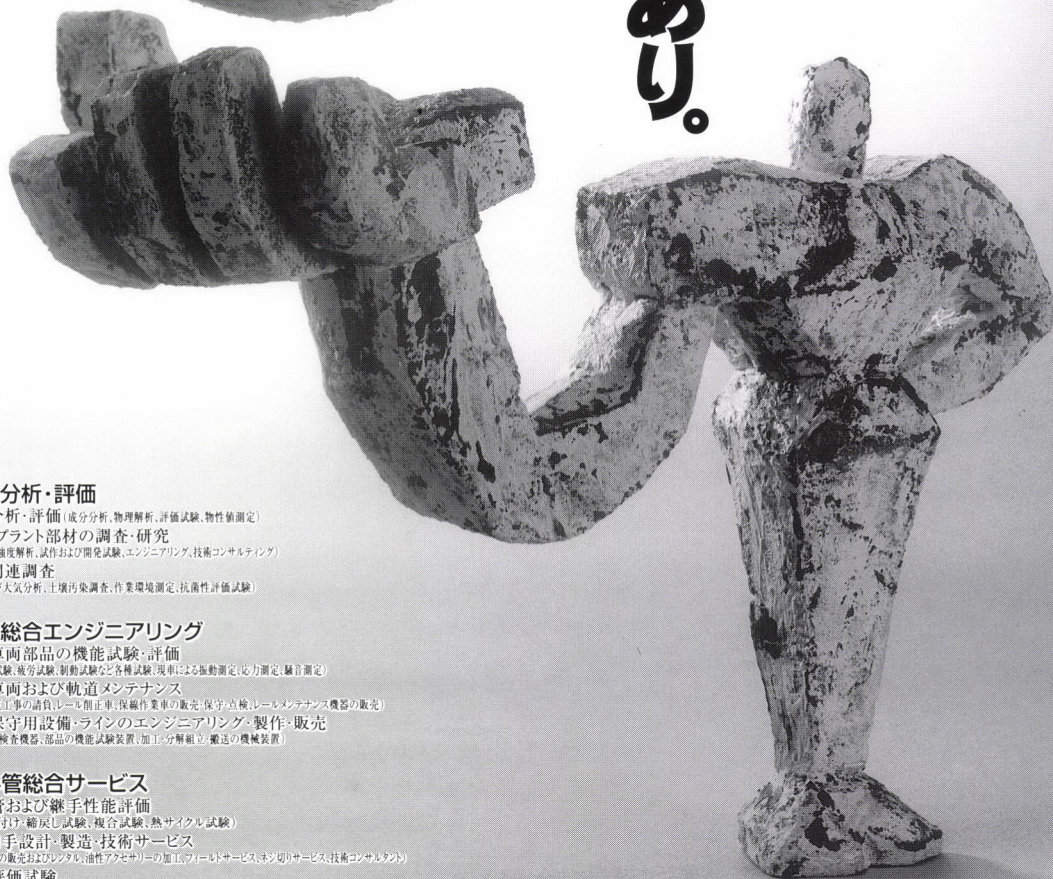
社団法人 日本鉄鋼協会
The Iron and Steel Institute of Japan

ホームページ <http://www.isij.or.jp>

人に社会に環境に役立つ
製品づくりのために。
住友金属テクノロジーの
技術をお役立てください。

SMT

チカラに自信あり。



■材料分析・評価

- 材料分析・評価(成分分析、物理解析、評価試験、物性値測定)
- 材料・プラント部材の調査・研究
(素材特性・強度解析、試作および開発試験、エンジニアリング、技術コンサルティング)
- 環境関連調査
(水質および大気分析、土壌汚染調査、作業環境測定、抗腐性評価試験)

■鉄道総合エンジニアリング

- 鉄道車両部品の機能試験・評価
(台車回転試験、疲労試験、制動試験など各種試験、電車による振動測定、出力測定、騒音測定)
- 鉄道車両および軌道メンテナンス
(レール修正工事の請負、レール修正車、保線作業車の販売・保守、点検・レールメンテナンス機器の開発)
- 車両保守用設備・ラインのエンジニアリング・製作・販売
(測定機器、検査機器、部品の機能試験装置、加工・分解組立、搬送の機械装置)

■油井管総合サービス

- 油井管および継手性能評価
(継手締付け・締戻し試験、複合試験、熱サイクル試験)
- ねじ継手設計・製造・技術サービス
(継手タンクの販売およびレンタル、油性アセチレンの加工、ファーストサービス・ネジ切りサービス、技術コンサルティング)
- 各種評価試験
(圧密・水密試験、耐圧試験、破壊試験、実体疲労試験、腐食環境下での材料評価試験、その他特殊試験)



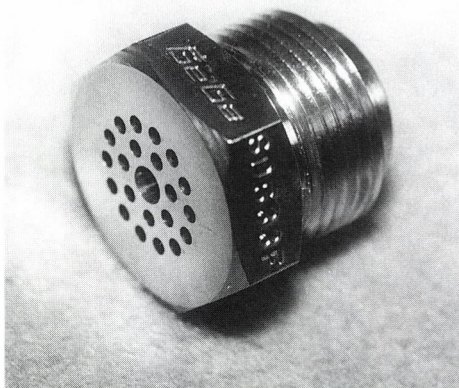
住友金属テクノロジー株式会社
SUMITOMO METAL TECHNOLOGY, INC.

本社:〒660-0891 尼崎市扶桑町1番8号 TEL(06)489-5778

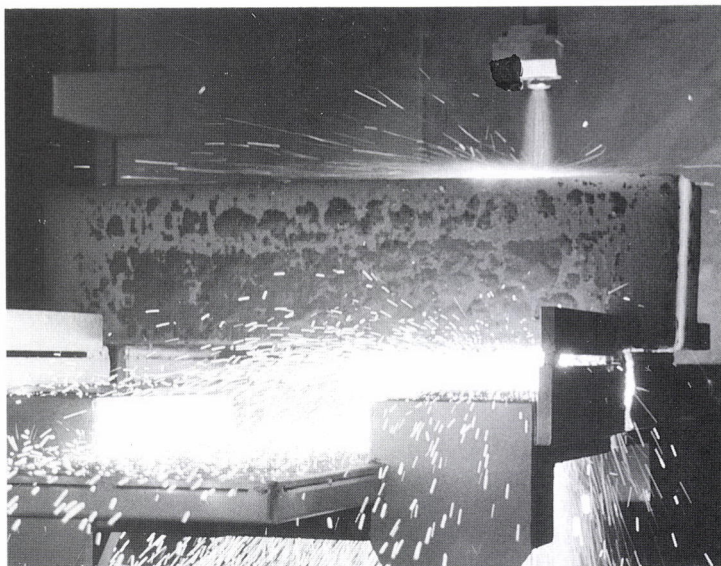
受託研究事業部・関西事業部・和歌山事業部・小倉事業部・鹿島事業部・鉄道産機事業部・OCTG事業部

良質で狭いカーフ幅の優れた切断面が得られる ゲガ社が開発した厚板切断火口!!!

GeGa

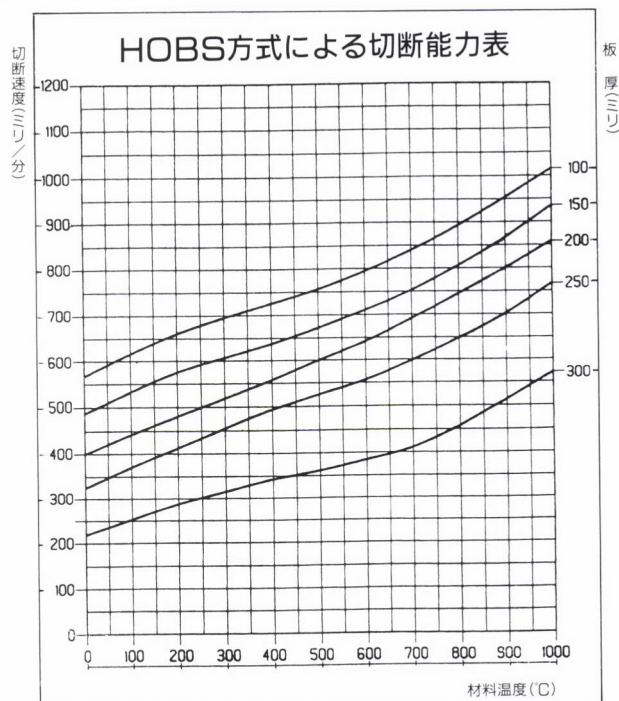
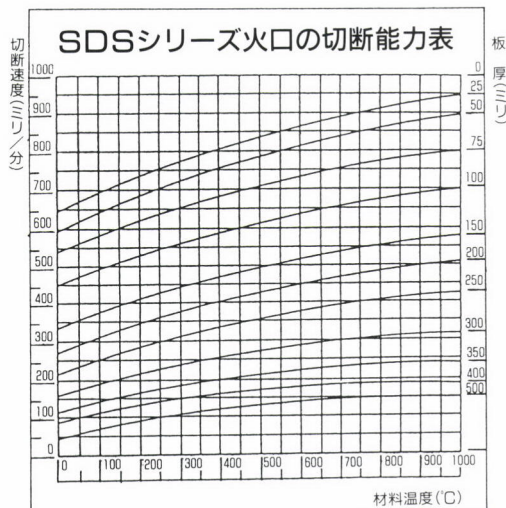


従来からご好評を得ているSDSシリーズ切断火口(SOBS)で、火口高さは120~140ミリ、平均カーフ幅はおよそ6~8ミリと、経済性に優れた火口です。
(日本特許権取得済み)



新たに開発された高圧高速切断技術(HOBS)で、従来のSDSシリーズ火口に比べ、約40~60%以上の高速切断速度が得られるようになりました。

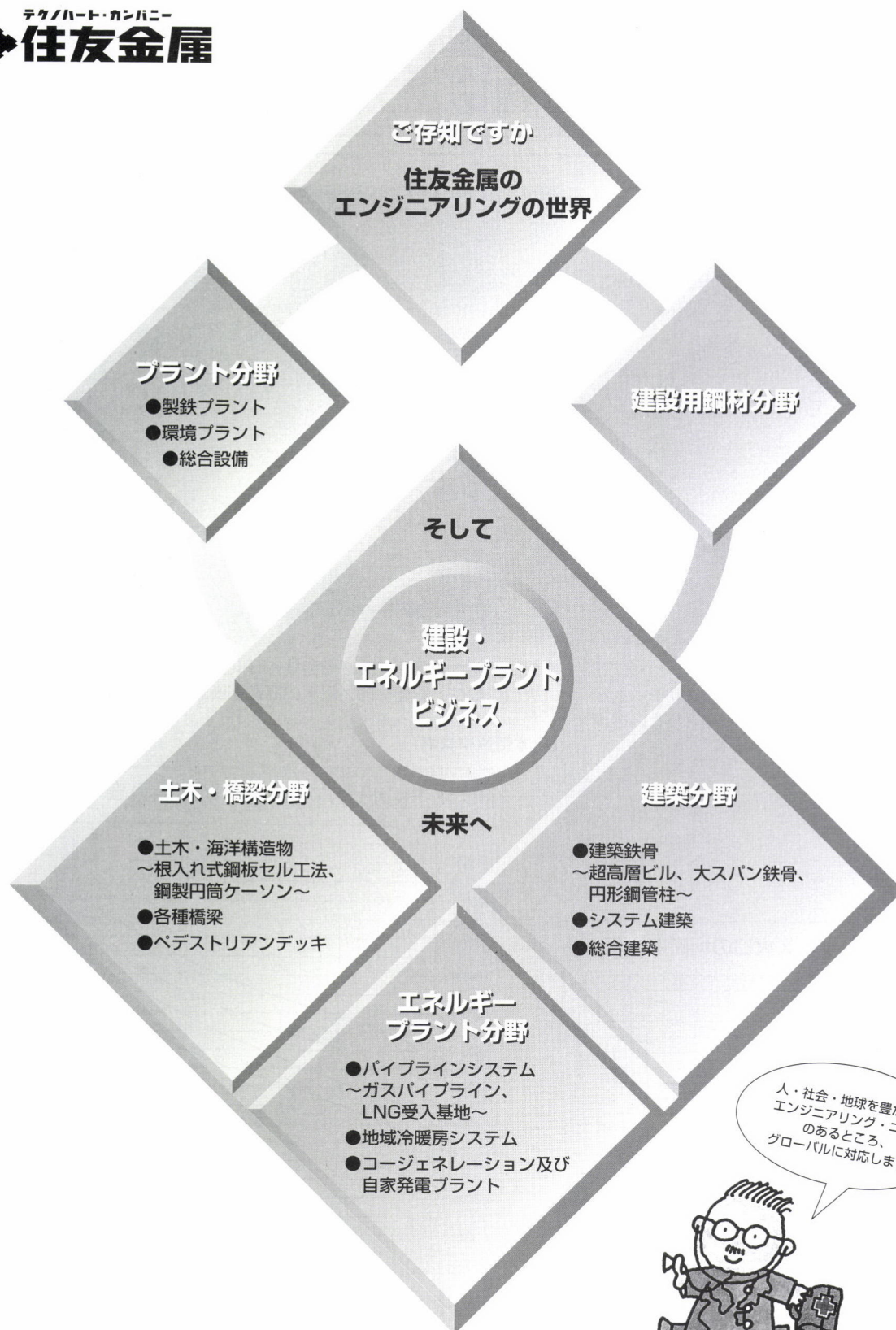
(日本特許申請中)



GeGa Lotz社の総販売代理店:

株式会社 トライメート

〒194-0023 東京都町田市旭町1-6-11 コスモ・ミツイ
PHONE: 0427-27-2813 TELEFAX: 0427-23-0803



人・社会・地球を豊かに。
エンジニアリング・ニーズ
のあるところ、
グローバルに対応します。



住友金属工業株式会社

<http://www.sumikin.co.jp/>

エンジニアリング事業本部

東京プロジェクト開発部 TEL.03-3282-6229 大阪プロジェクト開発部 TEL.06-220-5467

ふえらむ

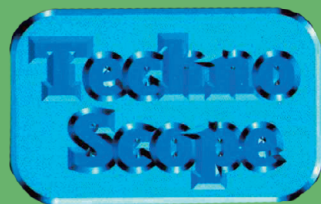
Vol.3 (1998) No.10

C O N T E N T S

目 次

Techno Scope	ハitek医療工学	702
話題のプロジェクト	機能性蛋白質集合体応用技術	710
鉄の点景	食文化の変遷をみつめ続けてきた鉄—燕の洋食器	714
展 望	酸化物超伝導材料の現状と展望 戸叶一正	717
入門講座	専門用語-鉄鋼プロセス編-3 エクセルギー 秋山友宏、八木順一郎	723
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 高張力鋼の進歩とそれを支えた科学 邦武立郎	729
解 説	電磁鋼板の二次再結晶における「Gossのミステリー」 早川康之 宇宙開発における構造材料の現状と将来 森野美樹	741 746
会員へのお知らせ		751

ホームページ <http://www.isij.or.jp>



ハイテック医療工学

— ハード面から医療を支える技術の frontline —



新しい領域を創造しつつある。
計測・診断の分野では高度な映像技術によって
見ることができなかったものが
見られるようになり、
微量細胞やDNAなどの微小な世界を
キャッチすることが可能になりつつある。
また脳というあまりにも複雑な組織に対するアプローチも
先端技術によって新たな局面の開けることが期待される。
空前の高齢化社会を目前に、
工学が医療に貢献しうる可能性を
先端での研究例に探してみたい。

医学と工学の結合・協業が拓く 医療・福祉のフロンティア

今日の医療が大きなターゲットとしているもののひとつに、いわゆる成人病がある。成人病の御三家といえ、癌、心臓病、脳卒中で、日本人の病気による死亡原因のトップ3を占めている。加齢による成人病対策の必要性が増すにつれて、診断・治療はもとより、予防、さらには病気以前の健康保持・増進の医学が重視される傾向が強まっている。最近では、Quality of lifeという発想からライフサポートの医学も提唱されている。なるべく苦痛や傷を小さくできる医学、また人としての文化的生活を可能なかぎり全うしうる医学、という発想もそうしたところから生まれてくる。そこに新たな技術と工学が貢献していける可能性は大きい。

医療の様相変えるハイテク工学

先端技術と結びついて医療のレベルが飛躍したのは1960年代頃からである。心電図や脳波計などが開発され、医用計測にエレクトロニクスを応用した新しい装置がさかんに使われるようになった。

1970年代に入ると、医療技術の進歩はさらに多様化しつつ加速され、いろいろな領域で様相を一変させるようになった。それらのキー・テクノロジーは、次の5つのカテゴリーからなる。

①生体計測技術

超音波診断装置、X線CT^{*1}、MRI^{*2}などさまざまな生体計測装置が開発され、診断精度を著しく向上させた。

②衝撃波、レーザー応用技術

衝撃波発生やレーザー光線を利用した結石破碎装置、レーザーメス、レーザー血液凝固装置等の治療装置が開発され、より安全な治療が可能になった。

③情報処理技術

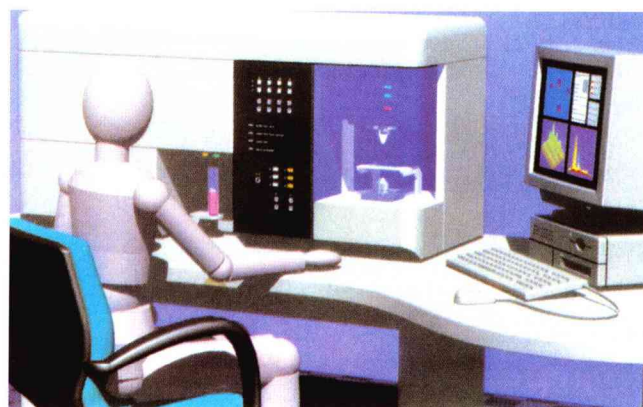
画像処理、CT法、心電図自動診断、病院情報システム等々のコンピュータを利用したシステムの開発で、精度、信頼性、効率が飛躍的に向上した。

④人工臓器

新素材、センサー、情報処理技術などの応用により、人工臓、ペースメーカー、人工関節といった人工臓器が実用化された。

⑤細胞工学、遺伝子工学

実用段階に入り、測り知れない可能性を秘めた有用な技



微量細胞情報検出システムの完成予想図。

術として期待されているが、また新たな論議の対象ともなっている注目の技術である。

これらのカテゴリーのうち人工臓器についてはVol.2 No.3で取り上げており、また細胞工学、遺伝子工学については、一般にいう「工学」の発想でとらえるには特殊なジャンルでもあるので、ここでは非侵襲高性能の生体計測技術と情報処理技術に絞って見てゆきたい。

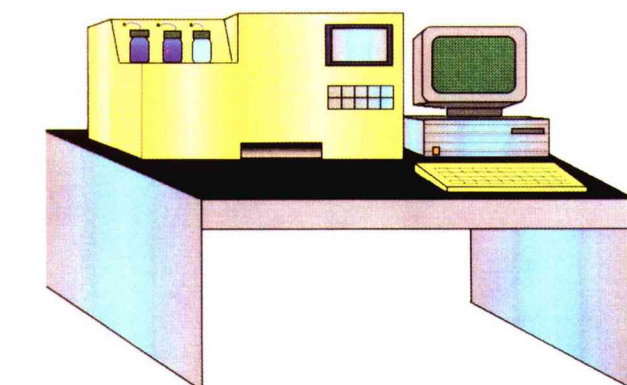
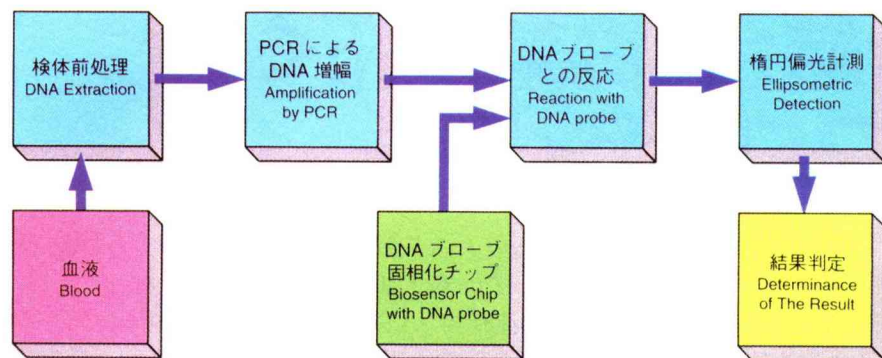
開発が進む高性能検体検査装置

人間の病気はひじょうに多岐に渡っているが、病気を治療するにはどのような病気なのかを正しく見極めなければならない。しかし、不幸なことに似通った症状を起こす病気がたくさんあり、ひとつの検査法で病気の診断を行うことはできない。病院では、各種検査をするとともに、その検査結果を総合して診断を行っている。人間ドックや成人病検査等で経験する数々の検査は、だてに行われているわけではなく、症状を正しく診断するためのものなのである。

病気の診断法は、体から取り出した血液や組織を検査する検体検査、脳波や血圧などの信号を計測する生体信号計測、X線写真のような画像診断に大別される。

^{*1} CT/Computed Tomography：X線を用いて身体の断層撮影を行う装置だが、近年では寝台を一定速度で移動させることで3次元画像がえられるヘリカルCT、スパイラルCTが登場してきた。

^{*2} MRI/Magnetic Resonance Imager：CTが放射線を用いるのに対し、磁気を用いる映像法。原理は静磁場での組織内水素原子核の変化をとらえるもので、情報処理技術の発達にともなってより詳しい画像情報がえられるようになってきた。断層面だけでなくさまざまな方向の像がえられ、臓器の様子も詳細に描出できる。



高感度DNA光検出装置のイメージとシステム構成。

検体検査の一種である血液検査は、全身を流れる血液を検査するものであり、体全体の状態を大まかにつかむのにひじょうに有効な検査方法である。病院で診断してもらうとまず最初に行うのが血液検査である。従来の血液検査はマクロに血液を検査するものだったが、近年では血液に含まれるDNAをミクロに調べることで難病感染症の検査ができるのではないかと期待が高まっている。このようなミクロレベルでの血液の検査を可能にするのが「高感度DNA光検出装置」である。

生体の最小組織単位は細胞であるが、この細胞のレベルでの変化を検知しようというのがこの「微量細胞情報検出システム」である。何らかの要因で生体機能に異変が生じた時、その兆候はまず細胞に現れる。微量な生体試料からその変化情報を光学的に分析して探りだすことで早期発見を行おうというものである。

また、難病感染症の新しい検査法として注目を集めているものに「高感度DNA光検出装置」がある。

難病感染症の検査は、従来、免疫学的な手法で行われていた。しかし、この方法では感染源の早期検出や特定が困難である。そこでDNA検査による方法が登場したが、現在のDNA検査は熟練技術を要し、また結果を得るまでに時間がかかる、検査担当者の安全確保に問題がある、などの難点がある。高感度DNA光検出装置というのは、光センサ技術を用いて、ウイルスのDNAやRNAの量を光量の変化として測定する。また、



光断層イメージングシステムの完成予想図。

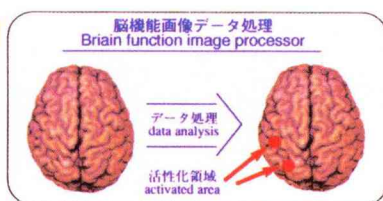
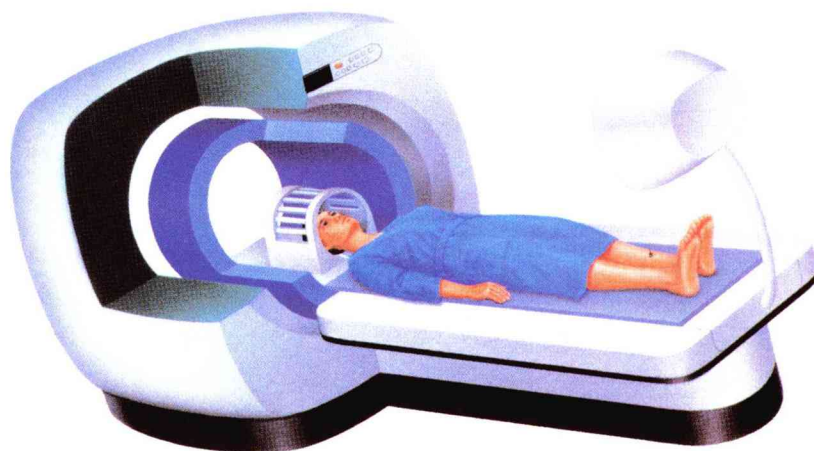
同時に検体の前処理から検出までを自動化するためのマイクロ加工技術を開発、二つの合わせ技で難病感染症の早期診断を可能にしようというものである。

形態から機能・代謝の計測へ

検体検査が取り出した組織の検査をするのに対して、画像診断はあるがままの状態では生体各部の生体情報を取り出す診断方法である。病気がどこまで広がっているかなどの確定診断をするうえでなくてはならない診断方法である。一般に画像診断で得られる情報は次の3つに分類される。

- ①形態情報
- ②機能情報
- ③代謝情報

これまでの検査のほとんどは、たとえば腫瘍とか出血領域などの目で認められる形態の変化を認知するものであった。しかし、病気によって、あるいは病気の進行状況によっては形態に変化が現れないこともある。機能情報や代謝情報をチェックする検査法が開発されれば、早期発見度は飛躍的に向上する。こうしたニーズに答えるものに、「光断層イメージングシステム」がある。



超高速／高精度脳機能MRIシステム。

病気の診断、治療、予防のうえで生体の正常な働きのもとである酸素代謝の状況をチェックすることはきわめて有力な方法である。そのための装置として陽電子放出各種断層装置（PET＝Positron Emission Tomography）というのがあるが、放射性薬剤を用いるため繰り返し計測を行うと人体に影響が出る可能性がある。そこで、すぐれた生体透過性、生体情報抽出性を持つ近赤外線を利用し、生体酸素代謝をCT法による二次元画像として生体を損なうことなく連続的に計測しようというのがこの光断層イメージングシステムである。

また上記のPETは、脳機能の計測にも用いられているが、この場合、陽電子を用いているため、精度や時間分解能に問題がある。そこで脳機能の計測用に超高速・高精度脳機能計測MRIシステムが開発されつつある。このシステムは、各種の刺激を与えることによって促される脳神経細胞の活性化にともなう血中ヘモグロビンの磁性変化を磁気共鳴映像装置（MRI＝Magnetic Resonance Imager）で高速かつ高精度に測定するのである。

「微量細胞情報検出システム」「高感度DNA光検出装置」「光断層イメージングシステム」といった先端での技術開発には、いずれも通産省の外郭団体であるNEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）の委託を受けた技術研究組合医療福祉機器研究所を窓口として複数の民間企業が開発に参画している。

高齢化社会のもとの医療

さて、話かわって、先頃の新聞報道によると、日本人の平

COLUMN 1

ハイテク医療の進歩は 磁性材料へのニーズを高める？

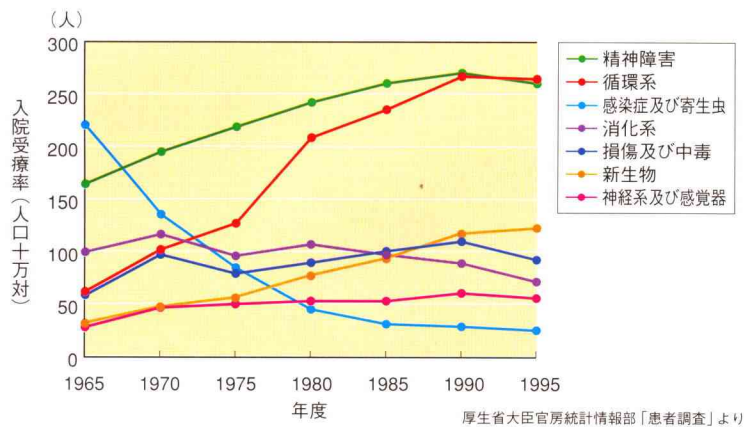
ハイテク医療機器の代表として脳の検査等に用いられるMRIは、生体に含まれる水のNMR信号を計測して、形態変化をとらえようとする装置であり、これまでは脳内の神経細胞の興奮の度合い（機能状態）を調べることができなかった。本文で説明したように、近年、神経細胞の興奮状態とともに変化する磁性をMRIで調べ、脳の活動状況を計測しようという研究が行われ、着実な成果をあげている。一方、神経細胞の興奮にともない発生する磁場を直接計測しようという試みもなされている。

また心筋梗塞の場合では、初期症状として心臓の一部に血が行かなくなる「虚血状態」をあらかじめ発見できれば予防が可能になるが、これも心臓が発する磁気をとらえられれば検知できる。

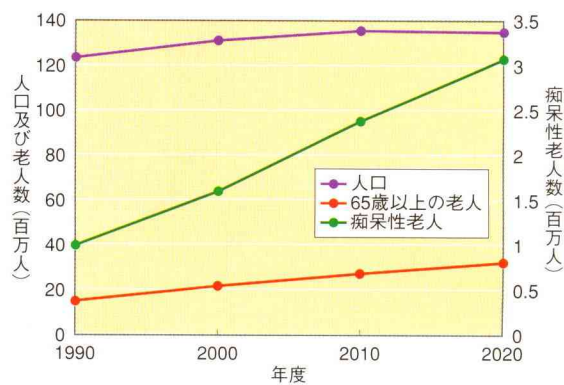
神経細胞や心臓から発生する磁場はごく微弱であり、かつては測定が困難だと考えられていた。だが近年、SQUID（超電導量子干渉素子）というハイテク技術が開発されたことにより、上記MRIによる脳機能計測とともに、臨床への応用が期待されている。

きわめて微弱な人体磁気を検知するには地磁気をも含め、磁気ノイズを完全にシャット・アウトしなければならない。この磁気遮断のためのシールド材には現状、おもに合金鋼による磁性材料が使われているようである。

磁気を含む電磁波の応用は、ハイテク工学のキー・テクノロジーのひとつであり、医療分野での磁気利用がさらに進めば、磁性材料の出番はさらに広がることだろう。



疾病別入院受療率



疾病別入院受療率

均寿命は男女ともにまたも記録を更新して世界一となった。人生80年はおろか、女性の場合は90年にも達しようとしている。これからの医療について考えると、この進み行く人口構成の高齢化を考慮しないわけにはいかない。高齢化が進めば癌、心臓病、脳卒中の成人病御三家への対策がますます必要となるのはもちろんだが、高齢化社会でもうひとつの大切な要素となるのは、のびた寿命をただ命長らえるだけでなく、幸せに全

うすることであり、そのための医療の必要性が叫ばれているのである。最近よく耳にするようになったQuality of lifeを重視する医療、ライフサポートの医療とも呼ばれる発想である。

Quality of lifeを考える場合に必要なのは、やはり個人としての自立性、文化的な生活が維持できる身体の高齢化ということになるだろう。その意味でいわゆる「寝たきり」にさせな

COLUMN 2

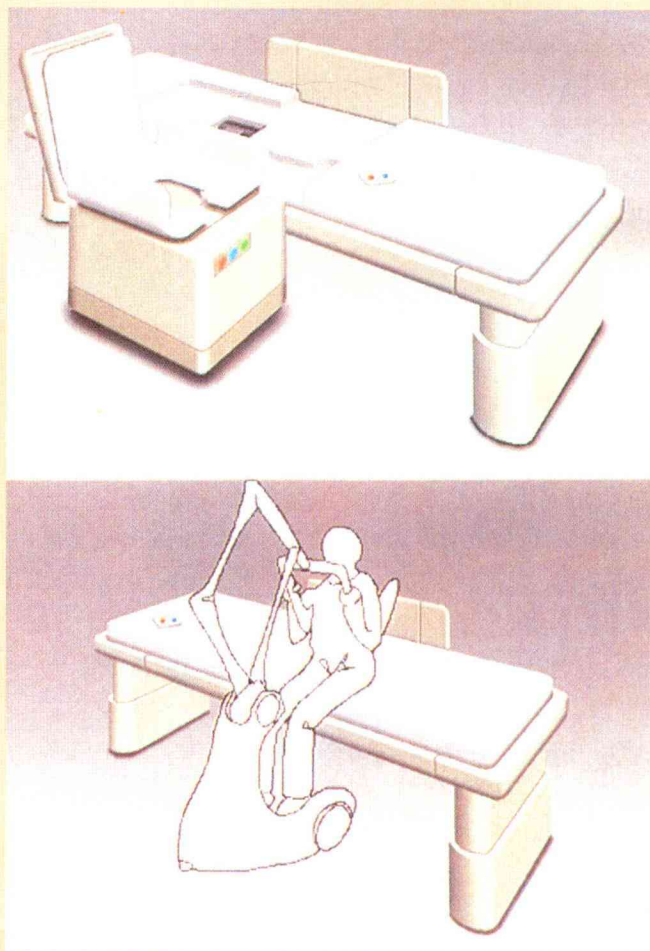
せめて排泄くらいは自分で……

高齢化社会の到来によって痴呆とならんで大きな悩みのタネになるのが「寝たきり」の問題である。2000年には寝たきり高齢者の数は現在より30万人増え約100万人にふくれあがると予測されている。

介護問題に対するハイテク応用の可能性としてはVol.2 No.9で取り上げたような介護ロボットの研究が行われているが、なんといっても寝たきりになった本人にとって心理的な負担になるのが「シモの世話」ではないだろうか。せめて排泄くらいは自分の力というのが心情であるし、自立意識を維持していく意味でもこのテーマは軽視できない。

産業科学技術研究開発制度では、起き上がりを補助するベッドとポータブル・トイレの組み合わせや、トイレまでの移動を助ける簡単なロボット・システムなどの排泄自立支援システムが研究されている。せめてトイレくらいは自分でできれば、寝たきりになった後でも「健康で文化的な生活」が享受しうかもしれない。

1日もはやいこれらハイテク機器の完成に期待をしたいが、実用までの道程を考えると経費問題や住宅事情の改善など、考えていかなければならない問題は多い。要素技術の完成とともに、この種の技術には社会システムとの総合的なすりあわせが欠かせないもののようなのだ。





無侵襲的脳代謝計測用 ^{13}C -MRS装置。

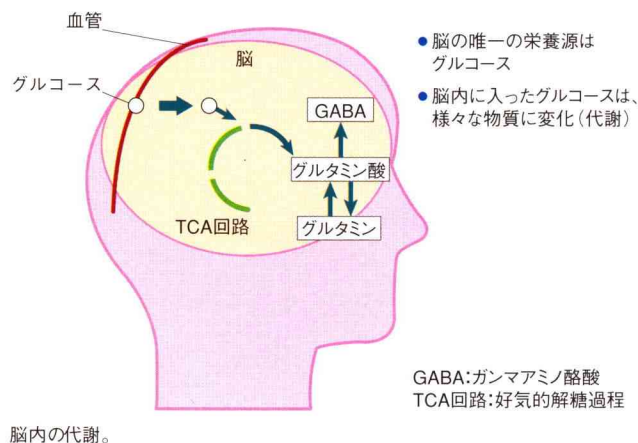
いための努力が重要になってくるが、自由に動きまわる身体
の健康があっても、自立的で文化的な生活ができなくなるケース
がままある。つまり「脳の健康」の問題である。

前頁上のグラフをご覧いただきたい。これは病気の種類別に
人口10万人当たりの入院患者の数をグラフにしたものである。
1995年の時点でのトップは心臓疾患や脳卒中などの循環器系
疾患で、精神神経疾患が僅差でこれに次ぐ。精神神経患者と
循環器系患者がほぼ同数であり、新生物つまり癌が低位であ
ることに意外の感を受けるのではないだろうか。

癌は致死率の極めて高い病気であるが、実は死亡率が高い
がゆえに病院にとどまる人数は少ない。精神神経系疾患には
躁鬱病、精神分裂病、高齢者の精神障害があるが、この中
でも最近患者が急激に増加し、家族への負担が大きいのが老人
性痴呆症である。老人性痴呆症は死に至る病ではなく、入院
期間は長期にわたる。

高齢化社会の到来にともなう極めて深刻な問題の一つがこ
の老人性痴呆症の激増であることは確かである。本人の不幸
だけではなく、すべての近親者を巻き込んで悲惨な状況に立ち
至る例が珍しくない。短命の昔は気は確かなうちに死を迎える
のが普通だったが、今や体はなんとか補修しながらでも命をつ
なげたりする。だが脳がこわれた場合の補修のすべがない。い
いかえれば、肉体疾患の予防や克服は進んだが、精神疾患の
それが立ち遅れていることがこの結果を生んだのである。

そこで医療分野での未知のフロンティアとしてとくにクローズアッ
プされているのが脳の研究である。これが進めば、22世紀の医療



脳内の代謝。

とさえいわれる老人性痴呆治療への道が開けてくるわけである。

まず、精神神経疾患への対策が他の病気の場合と決定的に
異なるのは、確とした診断法が存在しないことである。多くの
病気は装置や試薬を用いて診断することができるが、ほとん
どの精神神経疾患は確実な診断を行うための手段がない。その
原因についても、客観的に調べることは不可能であり、対処
療法以外の抜本的治療法がないのに等しいのが実情である。

確かに脳障害用の薬もいろいろ出ているが、これらはたまた
ま他の病気に使用された際、副次的に脳への効果が認めら
れた偶発的なものがほとんどで、生理学的研究の結果として生
まれた本格的な精神神経障害の治療薬はまだないといってい
い。

第一に必要なのは、脳の中の働きを調べる手段を確立する
ことである。そのための有力な技術として期待されているのが
無侵襲的脳代謝計測用 ^{13}C -MRS装置である。

実験用一次試作装置はすでに完成し、ボランティアを使っ
ての実験データ収集の段階にまで進んでいる。世界初の画期
的な開発ということで、昨年、新聞紙上にも発表されたので
お目に留められた方もあることだろう。

いまや老人性痴呆症は私たちに取って非常に関心の深い問
題であり、その対策は社会的要請ともいえる。

脳内代謝を追跡する画期的新システム

無侵襲的脳代謝計測用 ^{13}C -MRS装置は、先述のいくつか
の開発例と同様にNEDOの委託を受け、技術研究組合医療
福祉機器研究所を窓口として株式会社東芝、東京ガス株式
会社、日本酸素株式会社の3社による機器、試薬の開発チー
ムと、創価大学生命科学研究所所長の塚田裕三客員教授を
中心とする研究チームが協同で開発に当たっている。

開発メンバーの一員として深くかかわってきた東芝研究開発
センター情報・通信システム研究所の鈴木義規参事に話をう
かがってまとめた。

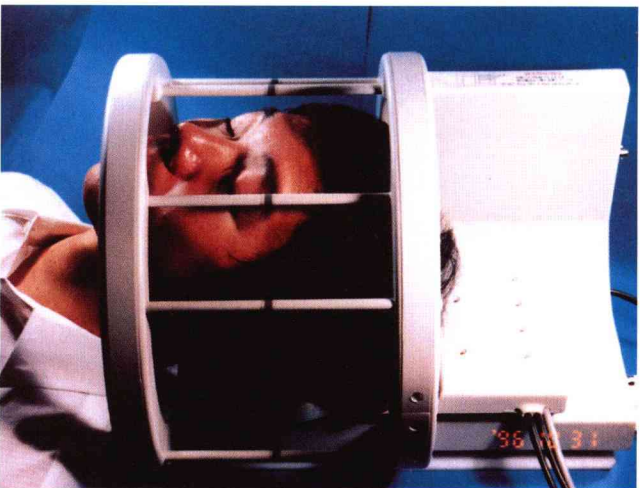
精神・神経系疾患は、①躁鬱病、②精神分裂病、③高齢



^{13}C -MRS用超電導磁石（2Tクラス）。

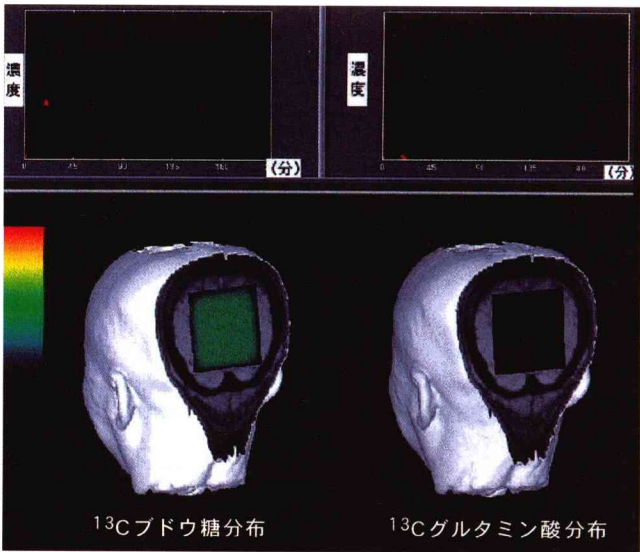


^{13}C -MRSの実験風景。

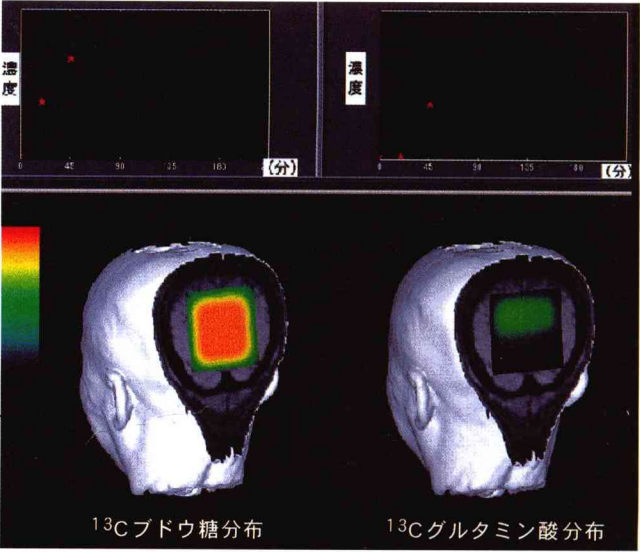


プローブ装着状態。

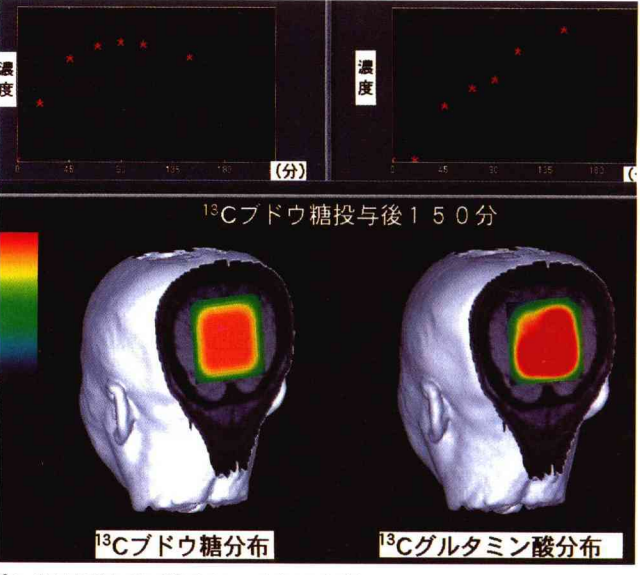
^{13}C ブドウ糖の脳内代謝の経時測定画面例。
ブドウ糖がグルタミン酸に変わっていく様子が分かる。



^{13}C ブドウ糖投与後の断層イメージ（20分後）。



^{13}C ブドウ糖投与後の断層イメージ（50分後）。



^{13}C ブドウ糖投与後の断層イメージ（150分後）。

者の精神障害、④精神発達障害であるが、③は近年患者数が急激に増加しており、家族への負担が大きいため今後大きな問題となってくるという。21世紀には痴呆性老人のいる家庭が10軒に1軒の割合になるといわれている。

こうした精神神経疾患の特徴は、神経系疾患（変性疾患）、欠陥性疾患、代謝性疾患、脳腫瘍・頭部外傷、感染性疾患、欠乏性疾患等々、病因が多様にわたることで、既存の診断装置では確定診断できないことが多い。（特に早期）

このうち例えば脳腫瘍の場合、あるいは老人性痴呆症でも動脈硬化による脳血流障害などは形態情報で診断できるので、MRIといった装置が使える。しかし脳細胞の原因不明の変性によるアルツハイマー氏病の診断や治療には有効な手段が全くない。このような老人性痴呆は目に見えない代謝の変化により引き起こされるのではないかと考えられているようである。代謝異常に端を発しやがて機能障害へと至るというのである。

そこで脳内の代謝の仕組みを見てみよう。脳の唯一の栄養源はグルコースとよばれるブドウ糖で、脳内に入ったグルコースが例えばグルタミン酸などのようなさまざまな物質に変化して行く。これが脳内の代謝である。痴呆症等の早期診断にはこれらの代謝変化の異常を動的にまた経時的に追跡する必要があると考えられている。

無侵襲的脳代謝計測用¹³C-MRS装置では、生体内物質代謝で最も重要な炭素鎖化合物（ブドウ糖、グルタミン酸など）に着目、安定同位元素¹³Cを多く含有した化合物を体内に投与し、脳内での代謝変化を経時的に測定しようというものである。磁場中の原子から発生する固有の電波の周波数を分析し、さらにこれを映像化することで代謝の様子を目の当たりに知ることができる。原理的にはMRIと同じだが、MRIは生体中の水からのNMR信号をとらえるだけなのに対して、本装置では生体中に微妙に含まれる代謝物質からのNMR信号を周波数分析できるのが大きな違いで、MRS（Magnetic Resonance Spectroscopy）と呼ばれる。

装置とともに試薬の開発も行われており、診断に適した試薬の開発、医学的評価が進められており、この方は東京ガス、日本酸素が担当している。

この装置は老化に伴う疾病の早期発見のみならず、新しい精神神経障害の治療薬の開発や脳の高次機能の解析など、広い分野に貢献できる新兵器として大いに期待されている。

期待される高度治療装置と医療情報ネットワーク

ハイテク医療の今一つのキー・テクノロジーは情報処理である。画像処理、CT法、ECG自動診断といった個々の情報処理技術は、これまでに述べてきた生体計測装置でもいろいろな形で応用されているし、また、コンピュータを高度に駆使する

手術システムも開発されようとしている。たとえば「脳腫瘍等手術支援システム」である。

- ①患部映像と各種医療情報を統合する画像情報処理技術、
- ②画像情報を立体高品位表示するハイビジョンビューア、
- ③表示画像を見ながらの狭い空間での手術を可能にする操作型マニピュレータ

の三つを組み合わせたもので、患者の安全の見地から、特に高齢者の場合、短時間で極力ダメージを押さえた手術（低侵襲手術）が必要だが、これを実現するシステムとして期待されている。

こうした個々の技術とは別に、情報の管理、利用、伝達を統合したいわば医療情報ネットワークシステムの整備も急がれている。

地方の場合、最新の医療機器を備えている病院ばかりではないだろうし、また、ハードは完備していても、病理診断の専門家が不足する場合もある。人間のみならず医療の過疎が問題になっているような僻地もある。こうした医療の地域格差を解消するために、通信回線を利用するケースが増えている。たとえば、東京都立広尾病院では伊豆七島から通信回線で送られてきたX線やCTスキャンの影像を専門医が判断して、島の診療医にアドバイスを送るといったシステムが実用に供されている。

これに類する方法を実行する医療機関は増えており、情報メディアを利用した遠隔医療さらには在宅診療はすでに現実のものとなりつつある。今後、病院、医師、患者間の情報の流通がネットワーク化し、もっと大幅かつスピーディーに行われるようになれば、医療サービスは格段に向上し、誤診、治療の遅れなども減少し、医学研究の上でも大きな進歩が期待できよう。

応用例のひとつとして、医療専用のカードシステムがある。国民ひとりひとりが過去の受診記録をすべて記憶したカードを持ち、このカードは全国どここの診療機関でも入出力できて、医師の診断を容易にし、検査の重複の無駄も省ける。

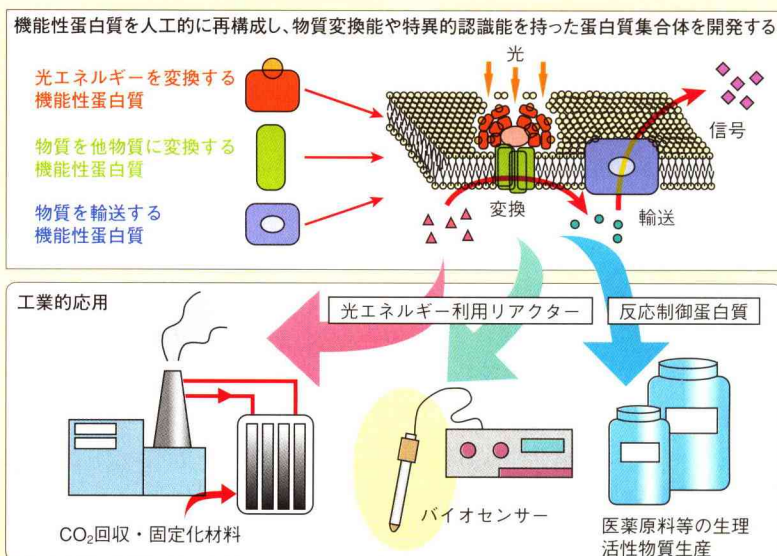
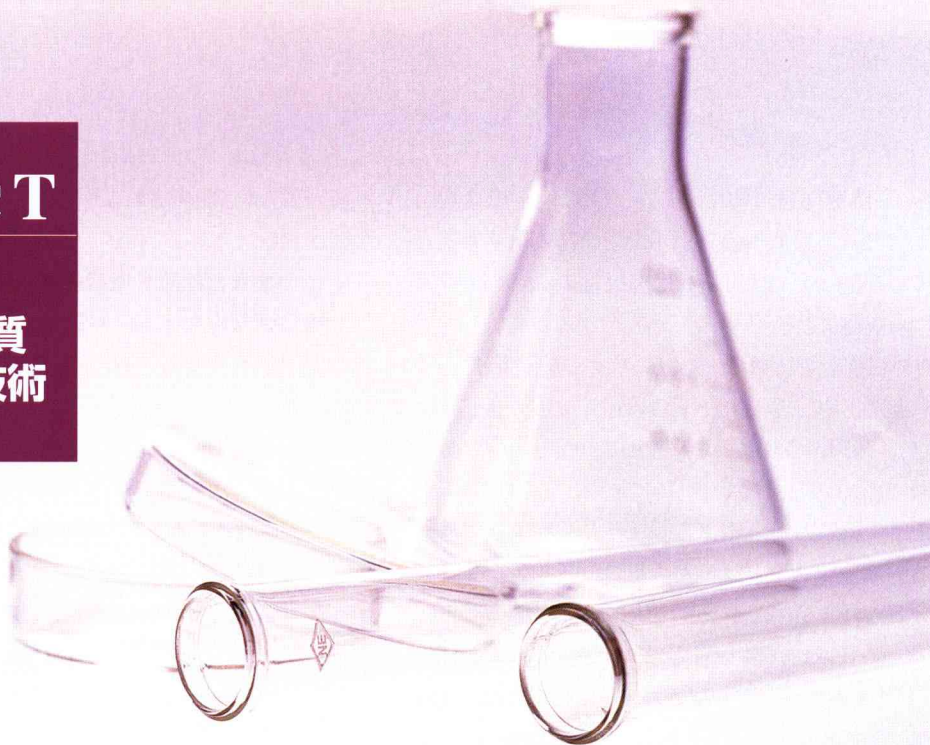
こうしたカードを情報センターで集中管理し、集計や解析を行えば、診断基準や検査データの均質化が進み、疫学や予防医学の上で威力を発揮するであろうし、医師の知見向上にも役立ち、医療環境は理想に近づくであろう。現在のところ、これは構想段階であるが、次代の緊急な医療テーマとして研究段階に入る日も遠くはなさそうである。

ハイテク医療工学は今や世界の至る所でラッシュを迎えている。シーズの澎湃とするところには、これまでになかった新しい何かが生まれてくる可能性がある。新たなハイテク医療技術の確立に期待したい。

〔取材協力・写真提供：技術研究組合医療福祉機器研究所、
（株）東芝研究開発センター情報通信システム研究所〕

話題の
PROJECT
プロジェクト

**機能性蛋白質
集合体応用技術**



機能性蛋白質集合体の
概念図

生命の機能性を人工的に創造、応用する技術

化粧品や洗剤、医薬品、バイオセンサなどへの 利用が期待される

微量な有害物質を検出するバイオセンサや、
生物から抽出することが難しい有用物質を人工合成する技術開発が次々に進んでいる。
生化学反応を工業に応用しようという試みは、
遺伝子工学などと並んで、バイオテクノロジーの主要な分野だ。
なかでも酵素や蛋白質など、生理活性を持つ機能性分子集合体の応用技術は、
工業に飛躍的発展をもたらすと期待が大きい。
開始から10年を経た産業科学技術研究開発の概要を紹介する。

化学工業に飛躍的な発展をもたらす技術

生体内では環境や外部からの刺激に対して、各器官が独自に判断し状況に合わせて必要な物質だけを運搬したり、情報を伝達したりしている。なかでも「生体膜」と呼ばれる細胞膜（細胞と外界を区切る）や細胞内膜（ミトコンドリア、葉緑体などを囲む）は、エネルギー変換、情報受容・伝達、分子認識・応答、物質多段変換、選択透過・輸送などのいわゆる生理活性機能を担っている。

この生体膜の機能を主に実現しているのは複数の蛋白質だが、これらを人工的に再現し、その機能性の部分のみを自由にコントロールして応用できないだろうかとの発想がバイオテクノロジーの先端分野で提示されている。このように人工的に生体膜など（の機能）を再現したものを最前線の研究者たちは「機能性蛋白質集合体」と呼んでいる。微生物や生命現象を利用して生産活動を行おうという発想は、すでにさまざまな形で実現しつつあるが、生命活動の「機能」だけを人工的に再現しようという試みが、今、最前線ではめざされているのである。生命活動を利用することでより環境負荷が小さく、しかも効率的に有用物を得られるという点がバイオのひとつの利点と考えられてきたが、生命の「機能」のみを再現・利用できれば、さらに画期的な生産技術に結びつく可能性は高いといえよう。その実現へ向けての要素技術開発をめざすのが「機能性蛋白質集合体応用技術」である。

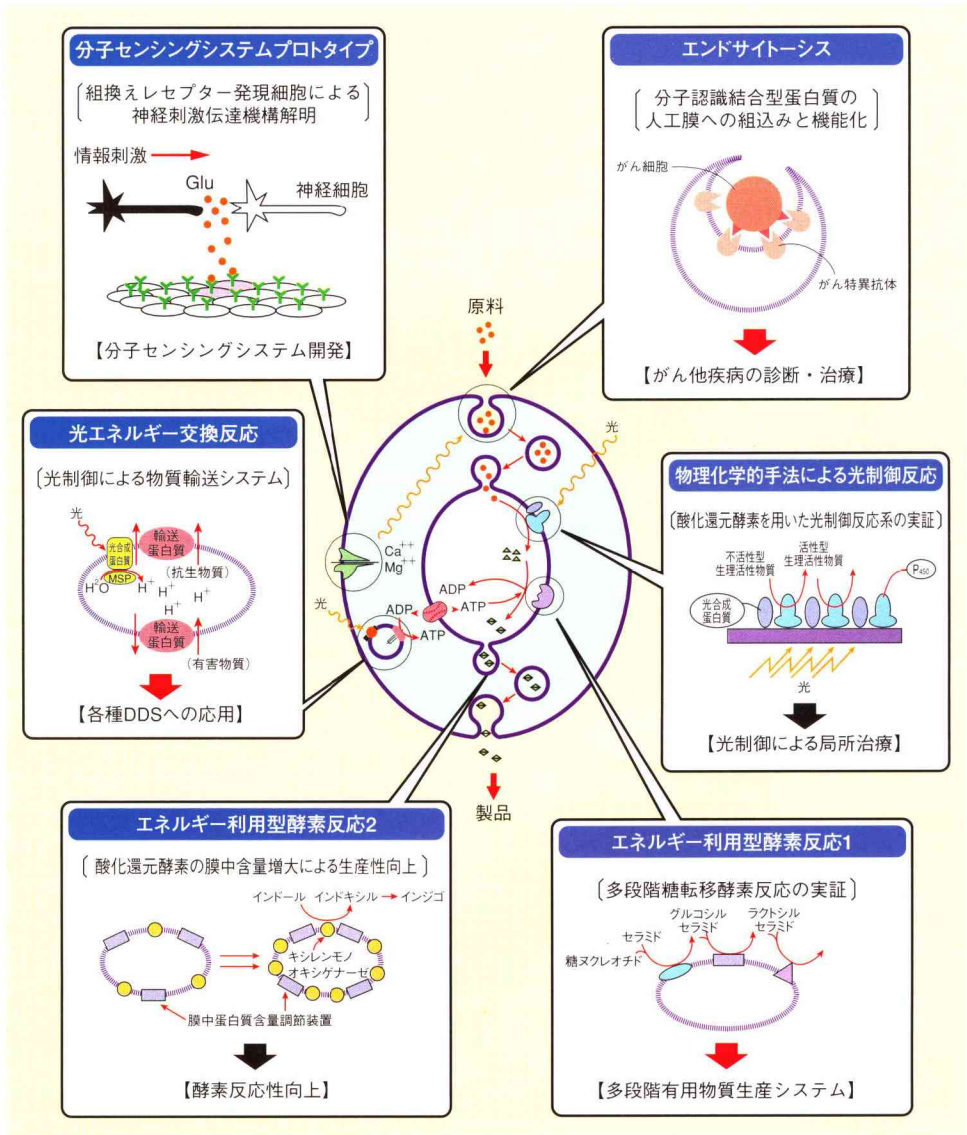
「機能」を再現するメリットはどこにあるのだろうか。たとえば、これまでの合成酵素による反応技術では通常1種類の酵素を使って1ステップの物質変換を行うのがせいぜいだった。もし複数の酵素を使って連続して物質変換を行うことができれば、複雑な有用物の生産工程を大幅に簡略化できることになる。また大腸菌などの微生物を利用する場合、その微生物が本来嫌う物質を生成する反応の人為的コントロールが不可能という問題

があった。

その点生体膜のように、特定の物質やエネルギーだけに反応し、状況に応じて反応を制御する仕組みを人工的に作ることができれば、必要な物質・エネルギーだけを効率的に、かつ省エネルギーで製造したり、情報を伝達できることになる。その実現をめざすプロジェクトとして、1989年から10年間の開発期間で通産省工業技術院産業科学技術研究開発制度による「機能性蛋白質集合体応用技術」研究がスタートした。

発足当初の研究開発の内容は、①機能性蛋白質集合体の構造・機能の解析・評価、②機能性蛋白質集合体の生物材料からの抽出・分離・精製、③機能性蛋白質・脂質の安定化、改変および人工材料の開発、④機能性蛋白質集合体の人工的再合成などに置かれていた。10年間の開発期間を経て、現在の主な方向として、〈光制御反応系〉、〈分子認識制御反応系〉、〈物質変換反応系〉の3つに絞られてきている。

研究事業の実施については、NEDO（新エネルギー・産業



機能性蛋白質集合体応用技術の研究開発（1989年度～1998年度）

技術総合開発機構）の委託により、民間企業によるバイオテクノロジー開発技術研究組合と工業技術院の各国立研究所によってとり行われている。

3 方向に集約されつつある研究開発

現在研究が進められている3つの領域について、順を追って解説してみよう。

〈光制御反応系〉ではおもに2つの研究がある。そのひとつが「物理化学的手法等による光制御型酵素反応」である。光合成をつかさどる蛋白質は、光を受けると光電荷分離反応によって電子を発生することが知られている（光電変換反応）。この種の蛋白質を分離・精製し、プロジェクトで開発されたラングミュア-プロジェクト（LB）製膜法という新技術によって向きをそろえて薄膜状に配列した後、光を当てると電流が発生するという。いわば一種の太陽電池として働くわけだが、この技術はバイオエレクトロニクスへの応用ができるのではないかと考えられている。

もうひとつは、「生物化学的手法等による光エネルギー変換反応」で、藍藻の一種がもつ蛋白質集合体の機能（好熱性シアノバクテリアが持つ光化学系Ⅱ）を改良して、人工的なエネルギー生産系をつくることを目指している。たとえば光合成では水を分解してエネルギーとプロトン（H⁺/水素イオン）が作られるがこのプロトンの電位差を利用して物質輸送が行え

表2 研究開発テーマと目標

研究開発テーマ	開発目標
物理化学的手法等による光制御型酵素反応系	物理化学的手法等により、光によって反応を制御する機能を有する蛋白質集合体を構成するための要素技術を開発する
生物化学的手法による光エネルギー変換反応系	生物化学的手法等により、光エネルギー利用機能を有する蛋白質集合体を構成するための要素技術を開発する
微小膜領域における分子認識制御反応系	分子認識によって機能を発揮するイオンチャンネル型蛋白質集合体を構成するための要素技術を開発する
エクソサイトーシス型分子認識制御反応系	分子認識によって制御されるエクソサイトーシス型蛋白質集合体を構成するための要素技術を開発する
エンドサイトーシス型分子認識制御反応系	分子認識によって制御されるエンドサイトーシス型蛋白質集合体を構成するための要素技術を開発する
機能性複合脂質合成酵素集合体の構築	多段階反応型酵素集合体、特に複合脂質合成系の蛋白質集合体を構成するための要素技術を開発する
遺伝子工学的的手法等による複合酸化還元反応系	遺伝子工学的的手法等により、複合酸化還元反応系の蛋白質集合体の機能を増強させて構築するための要素技術を開発する

（注）第1期はクラレ㈱と工業技術院生命工学工業技術研究所が担当した。

るのではないかと考えられている。具体的には脂質小胞上に光合成蛋白質集合体を作り込み、脂質膜を横切る形でプロトン勾配をならべるといふ。

〈分子認識制御反応系〉の研究としては、「分子センシングシステム」がある。脳にはレセプター（受容体）と呼ばれる蛋白質があり、そこに特定の物質が結びつくことで情報伝達が行われていると考えられる。脳内で神経情報伝達に重要な役割を果たしているグルタミン酸について、このレセプター蛋白質の機能や構造を調べ合成することは分子による情報伝達という新技術への道を開くことになる。もうひとつは「エンドサイトーシス型分子認識制御反応系」である。エンドサイトーシスとは、細胞内への物質取り込み現象を意味する。免疫細胞の一種であるマクロファージ（食食細胞）が細菌やウイルスを捕食する機能を解明し、その機能の応用を模索しようというものだ。

〈物質変換反応系〉の研究のひとつとしては、「機能性複合脂質合成酵素集合体の構築」がある。これは機能性蛋白質集合体の実現に不可欠な酵素による多段階反応を研究するものであり、プロジェクトでは現在までに「多段階糖転移酵素反応」に成功している（糖質合成の研究は世界的にもまれで成功例は少ない）。「多段階糖転移酵素反応」とは、冒頭でも述べたように酵素を1ステップではなく多段階にわたって反応させる技術のひとつで、プロジェクトではセラミド→グルコシルセラミド→ラクトシルセラミドといった順番で物質合成を行うことに成功した。ラクトシルセラミドは最終目標である「スフィンゴ糖脂質」の人工合成にあたって出発材料となるものだ。スフィンゴ糖は動物細胞膜の表面にあって細胞の識別・分化、増殖、癌化、免疫機能に関与するとされ、生命機能のメカニズムを解明し再現するうえで重要な物質と考えられる。もうひとつは「遺伝子工学的的手法等による複合酸化還元反応」の研

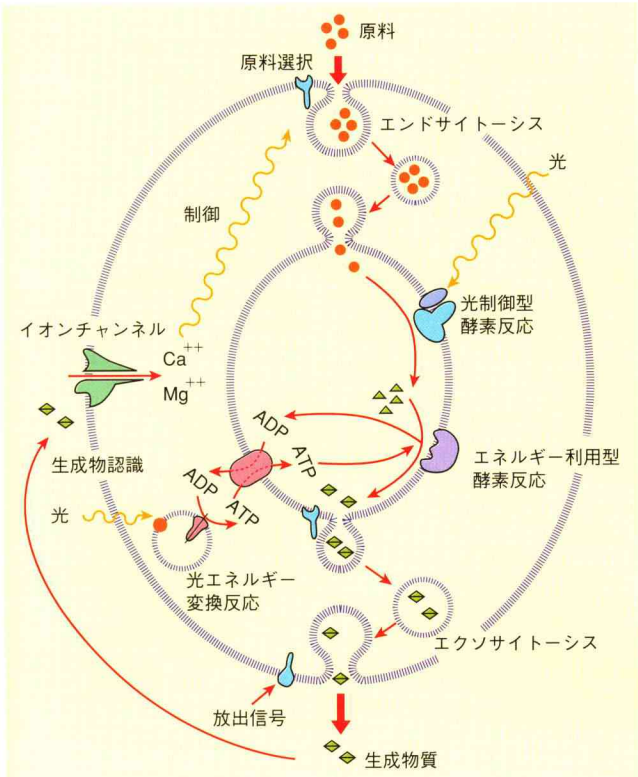
C O L U M N 1

工業生産技術に新たな道筋を拓く

蛋白質を構成するアミノ酸には分子式は同じだが立体構造の異なる「光学異性体」といわれるものがある。アミノ酸の「光学異性体」としてはL体とD体の2種が知られるが、生体内には前者のみが存在し、後者はほとんど存在しない。

たとえば「うまみ」の成分であるグルタミン酸もアミノ酸の一種だが、「うまみ」を感じさせるのは、むろん生体に存在するL体のほうである。つまり人工調味料のような「うまみ」としてのグルタミン酸を生成したい場合、L体のみが必要なのだが、従来の工業生産技術では最初の段階で同量のL体とD体ができてしまう。現実には残ったD体を分離・再加熱してさらに必要なL体を取り出すといった行程が繰り返されることになるわけだが、生体の「機能」をうまくコントロールして用いることが可能になれば、こうした複数の行程はずっと簡略化される可能性が出てくる。

鉄に関連する生物関連の話題としては、酸化細菌の存在が思い浮かぶが、細菌の機能の部分だけを応用する技術が拓ければ、（空想の範囲を出ないが）新たな加工・処理ノウハウが見出だされないとはいえないだろう。工業生産技術を生命活動のメカニズムから学ぶ時代が来るのだろうか。



期待される蛋白質分子集合体の形成図

究である。コリネ菌では生体膜に蛋白質を組み込む特別の蛋白質（組み込み・透過蛋白質）があるが、この性質を応用することも、機能性蛋白質集合体技術の実現に有用だと考えられる。遺伝子操作を行ってこの機能を増強するために必要な技術の確立が目指されている。

これらの機能性蛋白質集合体の応用技術がトータルに確立

C O L U M N 2

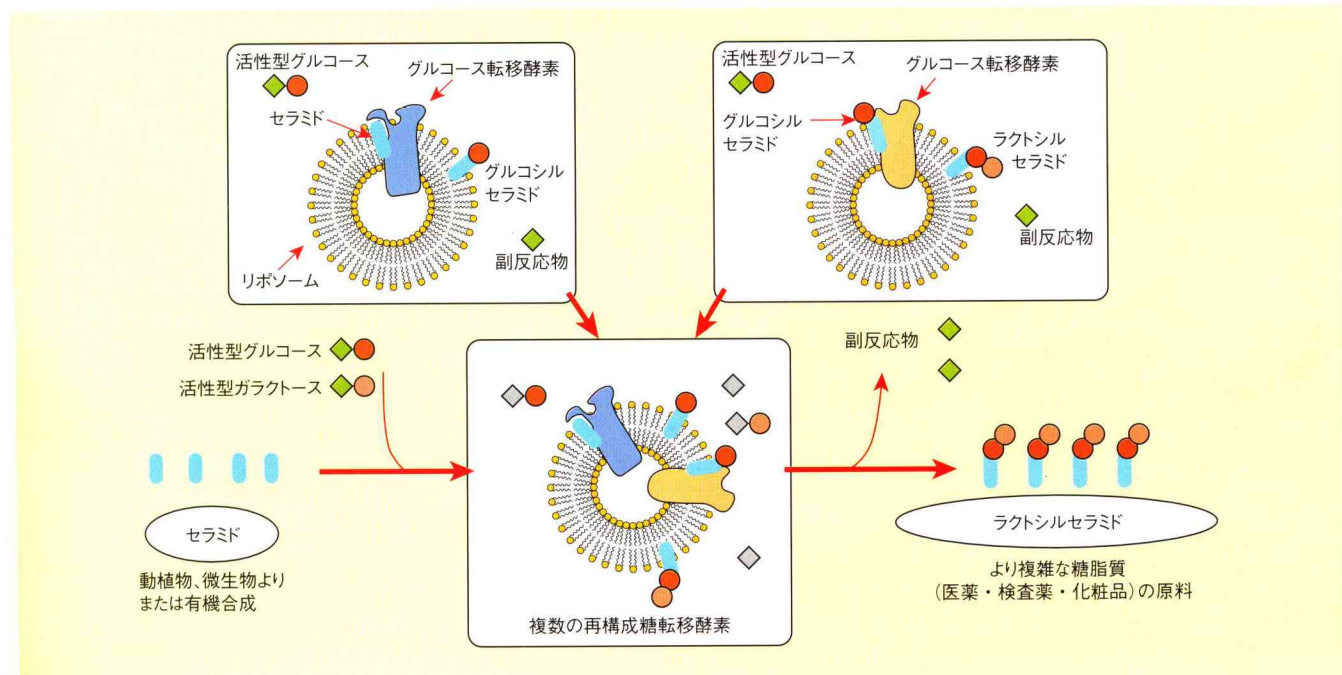
生体機能を人工的に再現することの意味

蛋白質の「機能」を利用するための発想として、生物から抽出して使う、ということが最初に想定される。しかし蛋白質そのものは生体から取り出してしまうと、きわめて不安定になり、生理機能をつかさどる高次構造が破壊されて生理活性を示さなくなることが多い。また必要な「機能」はアミノ酸が複雑に絡み合った蛋白質構造のうち、ごく一部であったりする。

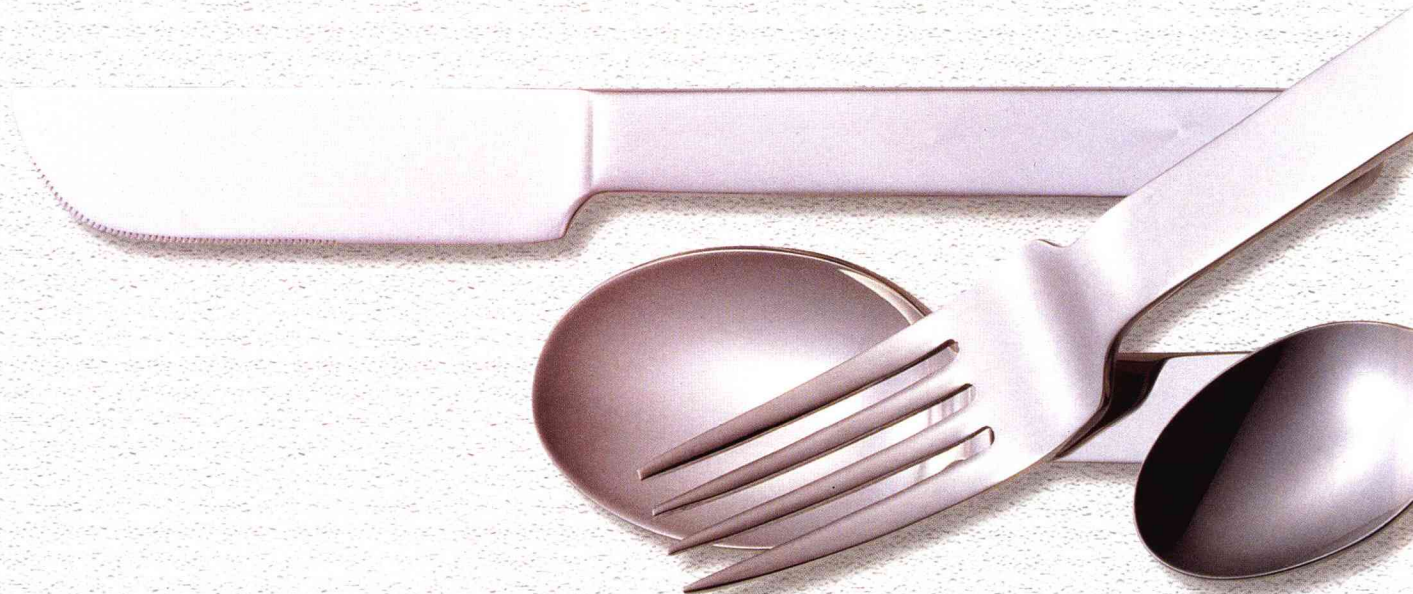
そこで、立体構造を事前に見極めたうえで抽出を試みたり、あるいはまったく人工的に合成をしてしまうことが必要になってくる。また構造と機能の関係を解明すれば、必要な機能だけを組み合わせた「人工酵素」の可能性も出てくる。蛋白質構造中の分子認識部位と触媒活性部位を独立して連結するようなノウハウである。

された時、画期的な〈次世代生産システム〉が可能になるという。「マイクロセルリアクター」と名づけられるこのシステムは、脂質などを基質として蛋白質や酵素などを組み込み、多段階の生化学反応を行わせて有用物質を大量、効率的に合成する人工細胞のようなものと考えられるだろう。研究開発はまだ要素技術の開発段階にあるが、「多段階糖転移酵素反応」のようなブレイクスルーといえる技術も生まれつつある。また人工知能の研究が心理学に新たな局面をもたらしたようにこうした研究業績は生命科学の分野にフィードバックされることは、生命の神秘解明にも新たな道をもたらす可能性を秘めているともいえよう。

[取材協力：バイオテクノロジー開発技術研究組合]



他段階糖転移酵素反応の例



大正初期の手づくり洋食器



昭和初期の洋食器

Steel 鉄の点景 Landscape

新潟県の燕市は金属洋食器の産地として有名であるが、その地場産業として育ってゆく過程は、時代の流れを見事に写し出していて興味深い。輸出型産業として、多くの日本の産業がそうであったように、燕の洋食器もさまざまな努力によって時代の荒波を乗り越えてきた。いまや燕の金属加工業は金属洋食器のみにとどまてはいないが、食文化の変遷の裏側で、ひとつの時代を支えてきた地場産業の姿にスポットをあててみたい。

食文化の変遷をみつめ続けてきた鉄——

つばめ

燕の洋食器

ステンレス加工で開けた戦後の道

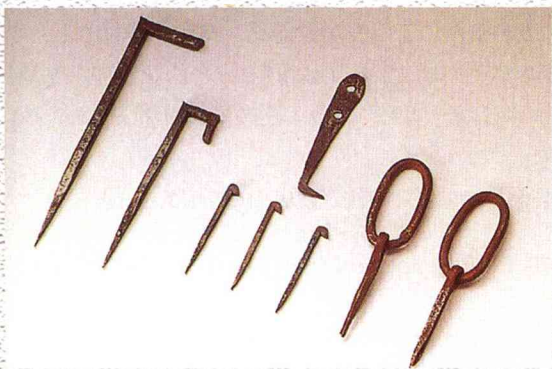
ある年齢以上の読者にとって「洋食」という響きは、一種独特の郷愁を誘うものであるはずだ。甘いバターの香り、卵やソースの濃厚な味、はらべこだった少年時代のある日の風景。スプーンとフォークで口に運ぶその料理のうまさは、なにか特別なもののように思われたものだった。世界中のグルメが日常にあふれる今にしてみれば、まるで簡素な料理だったはずなのだが……。

国内最大の金属洋食器の生産地である新潟県の燕でスプーン、フォーク、ナイフが初めて「手造り」で生産されたのが大正3年だという。それ以前の金属洋食器は舶来だった。金属洋食器の国産化はいわゆる「洋食」が庶民の間にも浸透していったことの指標と見ることができるだろう。

新潟県燕市は、今日でも国内最大の金属洋食器の生産地であり、全国生産額の95%以上がここで生産されているという。見開き写真のスプーン、フォーク、ナイフは、燕でつくられた現代の製品だが、素材にはステンレス・スチールが使われている。一部の高級品をのぞき、いまや金属洋食器はステンレスが主流になっている。おもにSUS304またはSUS420といった素材が使用されているという。むろんステンレスが使われるようになったのは戦後のことで、それ以前は真鍮にメッキをほどこしたものが一般的だった（高級品は銀製で、それは今も変わっていない）。真鍮からステンレスへの転換が図られたのは、朝鮮戦争による真鍮不足の影響が大きかったという。

「戦後、機械や金型の改良にいち早く着手して、ステンレスというむずかしい素材の加工技術を獲得したことが他の追随を許さない地場産業としての成功につながったようです」と日本金属洋食器工業組合の青柳理事長は当時のことを述懐する。真鍮に比べて硬く延びにくいステンレスという新しい素材にさぞかし苦労をされたことだろう。青柳氏自身、シベリア抑留から帰国後、潜水艦の潜望鏡の払い下げを受けて圧延し、進駐軍むけの土産物をつくることから再出発したという経験をもつ。燕の地場産業である金属加工業再興までの必死の足取りを想像させるエピソードである。「ステン材料なくして、その後の燕市の成功はなかったでしょうね」と青柳氏。

燕市製の金属洋食器



和釘



矢立

燕の金属洋食器生産は、その後またたくまに世界のトップクラスにまで成長する。結果、昭和32年には日米貿易摩擦の第1号として、輸入制限を受けるという困難に直面した。繊維産業の貿易摩擦が問題になるのはその後の話であり、当時の輸出産業としての金属洋食器の勢いが推察される。

時代とともに揺れた地場産業の歴史

すでに述べたように燕で初めて金属洋食器がつくられたのは大正3年のことだった。きっかけになったのはやはり「戦争」である。当時欧州では第一次世界大戦に突入し、生活必需品の生産がストップしてしまった。スプーンやフォークも不足品目となり輸入先を外に求める傾向が強まっていた。それに応えたのが燕だったというわけだ。燕に先だって東大阪で金属洋食器生産が試みられたが、技術的に失敗してしまったらしい。そこで金属加工では歴史と実績があった燕でつくれないかということになった。そして燕の職人たちは、驚異的な器用さを發揮し、手造りで金属洋食器をつくりだしてしまったのだという。

大正3年の試作をへて翌年には燕の金属洋食器は、4万本、金額にして5万円を出荷。たちまち品質のよさと価格の安さが人気を呼んで、3年目の大正5年には、25万本を生産するまでになった。金額にして35万円、うち25万円が輸出分だったという。

さらに大正9年からは機械を導入し、本格的な量産体制に入った。第一次大戦後の不況時には、産業振興のための指定輸出22品目に選定されるなど、輸出産業としてのスケールは拡大していった。

現在、燕の金属加工業の製造品出荷額は3,000億円をこえる。その内訳は、金属洋食器や厨房器物が基盤となっているが、その範疇にとどまらず、さまざまな金属加工製品分野に新市場を求めているようだ。

燕が金属洋食器の生産に成功できたのは、金属加工の技術をもった優秀な職人が多数在住していたからにほかならない。これらの職人の存在は、燕にあった金属加工業の歴史と関係が深い。

伝承によれば燕に金物加工業が起こったのは、江戸時代初期のことだという。当時信濃川の度々の氾濫によって、農民たちは苦しい生活を余儀なくされていた。その対策として代官職にあった大谷清兵衛が江戸から釘職人を招いて和釘づくりを農民たちの副業として広めたという。雪深いこの地であって、冬の間の生業を得られたことは大きかったに違いない。この和釘の需要が江戸の大火や地震などで伸び、初期の地場産業が成立していったらしい。また江戸中期には間瀬に幕府直轄の銅山ができ、燕にその精錬所があったことで、鋳起銅器といわれるいわゆる打ち出しの金物づくりの技も根付いていった。今日では伝統工芸品になっている煙管や筆を収納するための矢立などがこの時期の名産品として経済を支えることになった。

だが明治27年の日清戦争を契機に洋式技術の波が押し寄せる。そのことが新たな変化をもたらした。すなわち洋釘が入ってきたことで和釘は使われなくなり、さらには万年筆が筆記具の主流になっていったために矢立は必要とされなくなった。そうした時期に職人たちが新たな生業として目を向けたのが金属洋食器だったというわけだ。

水害という不運から生活を守るために和釘や鋳起銅器へと向かい、その需要衰退と第一次大戦という時代の変化とともに金属洋食器へという流れは、一種、時代のダイナミズムのようなものを感じさせる。さらには朝鮮戦争をきっかけにステンレスへ、その結果、貿易摩擦に直面するなどといった燕の歴史は日本の産業史のひとつの横顔といえる。

近年、燕の金属洋食器は相次ぐ円高や人件費の安い中国などとの競争によって、新たな転換を迫られている。いまやカメラ部品などの精密加工品や医療器具、自動車部品など、金属洋食器の枠をさらにこえた「創造的・複合的金属加工基地」をめざす燕の明日は、やはり時代の荒波に無関係ではありえないことだろう。

あの「洋食」の味は、時代と歴史の味でもあった。

[取材協力・写真提供:日本金属洋食器工業組合、燕市産業史料館、(株)青芳製作所]

燕市産業史料館

大正期、昭和初期の洋食器をはじめ、矢立、煙管、和釘、鋳起銅器など、燕市の産業が成立してくる過程でのさまざまな工芸品や工作機械、作業場などが多数展示されている。月曜日、祝祭日の翌日は休館。

問合せ先：TEL0256-63-7666

上越新幹線 燕三条駅から徒歩15分

車の場合は北陸自動車道三条・燕インターより約5分



展望

酸化物超伝導材料の現状と展望

—新しい応用開発を目指して—

戸叶一正

科学技術庁 金属材料技術研究所
第1研究グループ 総合研究官

Kazumasa Togano

Present State and Future Prospect of Oxide High Temperature Superconductors
—With the View of New Applications—

1 はじめに

電気抵抗ゼロの超伝導は、電力、輸送、医療から通信・情報に至る広範な分野に応用が図られており、21世紀を支えるキーテクノロジーとして期待されている。超伝導の応用が本格的に考えられたのは比較的古くて、Nb-TiやNb₃Sn等の金属系超伝導体が線材化された1960年代からである。しかし、1986年に銅酸化物系物質で高温超伝導性が見いだされたのを契機として起こったいわゆる高温超伝導フィーバーは、超伝導の応用の可能性を飛躍的に高めるものと期待された。

今年で高温超伝導体が発見されてから12年が経過したことになる。開発の初期では、臨界温度の急速な上昇にもかかわらず、実用的に重要な臨界電流密度を向上させることが思いのほか困難である等の、応用開発にとって幾つかの問題に直面した。しかし、これらの困難に見える問題も、酸化物高温超伝導体の物質、材料としての特質が明らかにされるとともに、思ったより早く解決の糸口が見いだされてきた。これは基礎から実用面にわたる多くの研究者が一致協力して研究を進めてきた成果である。

現在では、図1に示すようにイットリウム系、ビスマス系、タリウム系、水銀系などバラエティに富んだ物質を対象として、それぞれの材料の特徴を見極めた材料開発、応用開発が進められている。その結果、線材、素子、バルクの各分野で実用に足る特性が達成され、電力機器、産業機器、エレクトロニクス応用等の多方面で応用開発が進められている。各分野で既に実用性を証明するためのプロトタイプシステムが多く作られ、試験が行われているところである。かつてのフィーバーを脱却して、高温超伝導体の有用性を地道な研究によって客観的かつ冷静に判断する段階に来ている。本稿ではこのような高温超伝導材料の開発とその応用開発の現状を紹介し、さらに今後を展望する。

2 線材の開発とその応用

2.1 線材化プロセスの開発

超伝導の応用として、抵抗ゼロを利用する線材応用はその典型例である。したがって酸化物高温超伝導体についてもその発見直後からその線材化の開発は盛んに進められてきた。線材化にあたっての課題は、1)酸化物は硬く脆くて直接塑性変形させることは不可能である、2)結晶粒界での弱結合の問題を解決するため結晶粒を配向化する必要がある、等である。これらの問題が解決され、現在までに最も開発が進んでいるのはビスマス系の超伝導線材である¹⁾。ビスマス系には臨界温度が80-95KのBi₂Sr₂Ca₁Cu₂O_x(以下Bi-2212と略す)、と臨界温度=100-115KのBi₂Sr₂Ca₁Cu₂O_x(以下Bi-2223と略す)の二つ組成の異なった超伝導相がある。

線材化の手法としては、Bi-2212、Bi-2223ともに粉末を銀管に詰めて加工する銀被覆法(Powder-in-tube Method)

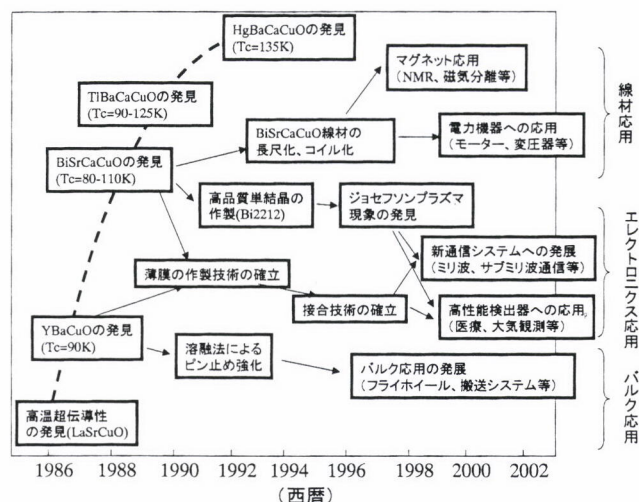


図1 高温超伝導体の応用開発の変遷

が最も一般的である。銀管に詰めた後、線引き、圧延などの方法によってテープ状に加工する。ビスマス系の場合、板状結晶の面を描ることが高い臨界電流密度を得るのに必須であるが、Bi-2212の場合は溶融凝固処理を最終的に加えること、またBi-2223の場合は圧延と中間焼鈍を適宜組み合わせることによって、結晶配向化が達成できる。この銀被覆法では、既に数百メートルから数キロメートル級の長尺線材が製造されるようになっており、米国や欧州では線材を市販するメーカーも出てきている。図2にはBi-2212の銀被覆法による多芯テープとコイルの作製プロセスおよび試作したマグネットの外観を示した。また、Bi-2212の場合は、Bi-2212粉末と有機物を混合して得たスラリーを銀基板テープに連続して塗布するドクターブレードやディップコートなども長尺化に大きな成功を収めている¹⁾。

このように作製したビスマス系線材は非常に大きな臨界電流密度を持ち、充分実用に足る特性をもつ。図3はビスマス系超伝導線材の温度-磁界-臨界電流密度($T-H-J_c$)曲面を、従来の金属系実用超伝導線材であるNb-Ti、Nb₃Sn線材と比較して示した。これから分かるように約20K以下の低温では、高い臨界磁界を反映して極めて強磁界まで臨界電流密度の落ちがほとんどなく、Nb-Ti、Nb₃Sn線材をしのぐ優れた磁界特性を示す。したがってビスマス系線材の一つの利用は、磁界発生への応用である。ただし、良好な磁界特性は20K以下に限定されるので、従来通り液体ヘ

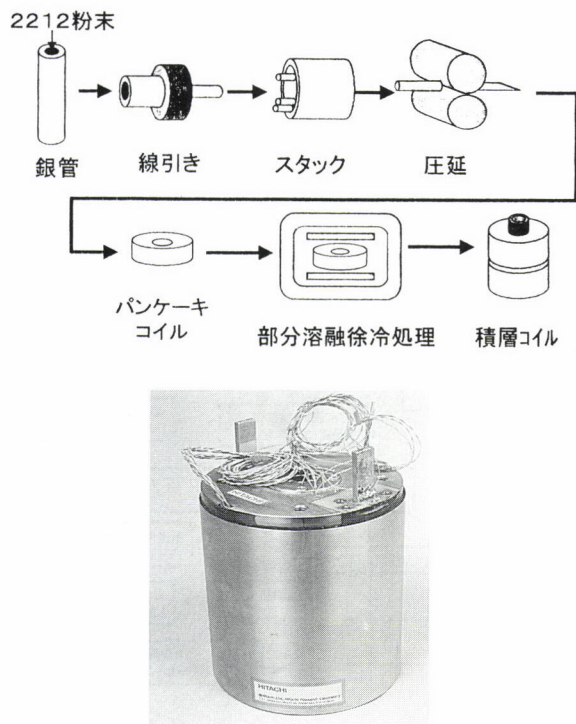


図2 銀被覆(シース)法によるBi-2212多芯テープとコイルの製造工程。下の写真は、試作したマグネットの外観を示す(金材研一日立製作所一日立電線)。

リウムで冷却するか、あるいは最近進展の著しい冷凍機によって20K付近まで冷却することが試みられている。液体ヘリウム中では後述するように、従来のNb₃Sn線材では達成不可能であった高磁界を発生することが可能である。

しかし、図3から分かるようにビスマス系線材の大きな問題は、磁界中での臨界電流密度が、温度が高くなると急速に小さくなってしまふことである。したがって、現段階では液体窒素温度(77K)での利用は、磁界の影響の少ない送電ケーブルやリード線などへの応用に限定されてくる。このようなビスマス系の高温度での磁界特性の悪さは、ビスマス系の構造的な特徴からくる本質的なものである。すなわち2次元的な超伝導性のために、侵入した磁束線の剛性が弱くなり、ピン止めが効きにくくなるためである。このビスマス系の高温度磁界特性の改善は、今後の重要な研究課題である。研究の方向としては、ビスマス系の高温度磁界特性を改善することと、ビスマス系以外の高温度磁界特性の優れた他の物質を線材化する両面での研究開発が進められている。前者に関しては、既に重イオン照射や鉛の高濃度ドーピングが有効なことが分かってきており、また後者に関しては、イットリウム系のテープ化が各種の蒸着技術によって進められている。

2.2 進むビスマス系線材の応用

前章で述べたように線材としては、唯一ビスマス系が実用化に近く各種の応用開発が進められている。大別して磁界発生を目的としたマグネット応用と、大電流輸送を目的とした大容量導体としての応用に分けられる。

マグネット応用は、超伝導線材をコイル状に巻いて磁界

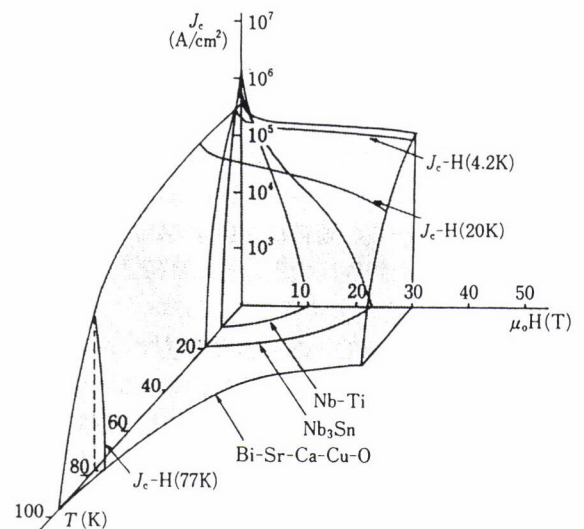
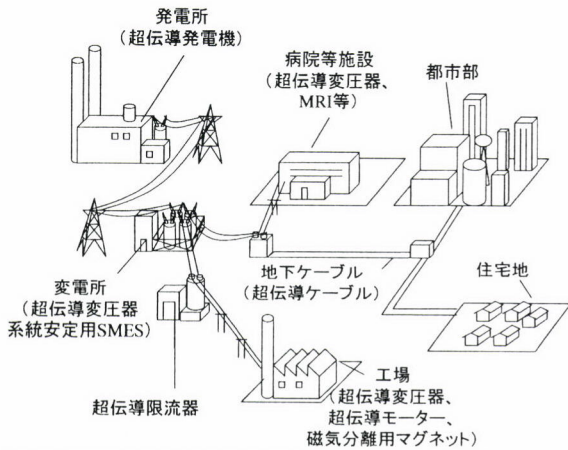


図3 ビスマス系高温超伝導線材の典型的な温度(T)—磁界(H)—電流密度(J)特性。比較のため現在実用になっている金属系のNb-Ti、Nb₃Sn線材の特性も示した。



機 器	・超伝導化のメリット	開発課題
発電機	・効率の向上(0.5-1.0%) ・安定度の向上	・導体の機械強度の向上 ・導体の電氣的安定化
系統安定用SMES	・系統安定性の向上	・導体の安定性の確保
限流器	・系統の安定性の確保	・大電流密度化
変圧器	・小型、軽量化による設置の容易化 ・油未使用による環境保全	・電磁力対策、クエンチ対策
送電ケーブル	・損失の軽減、 ・低電圧、大電流による系統の簡素化	・交流損失の低減、 ・長距離の冷却
モーター	・運転効率の向上 ・小型化、軽量化(1/2)	・高温磁場中の特性向上、 ・機械的特性の向上

図4 高温超伝導線材の電力応用の可能性を示した概念図。各機器へ応用した時の主なメリットと今後の課題も示してある。

発生に使うもので図4に示すように電力機器への応用では極めて重要である。前項で述べたように20K以上の高温では磁界のかかった時の臨界電流密度が急激に悪くなるため、今のところは従来の金属系と同様に液体ヘリウム中(4.2K以下)で使用するか、冷凍機によって20K付近まで冷却して使用することが主に考えられている。このような目的で現在数多くのテストコイルが作製され、あるいはプロトタイプの応用システムが作られて盛んに試験が行われている。

高温超伝導線材をあえて液体ヘリウム中で使用する目的は、従来の金属系超伝導マグネットでは達成できなかった20Tをはるかに越える高磁界を発生するものである。具体的には25T近くの磁界を発生させて1GHz級のNMR(核磁気共鳴)分析器に応用しようとするプロジェクトが日本では科学技術庁金属材料技術研究所や、米国のフロリダ国立強磁場研究所ですでにスタートしている。両者とも実際の構造は、金属系マグネットを外層として出来るだけ高い磁界を発生し、その中にビスマス系マグネットを内層マグネットとして挿入して、目的とする磁界強度を達成しようとする計画である²⁾。

また、最近の冷凍技術の急速な向上は、高温超伝導体を液体ヘリウムと液体窒素の中間温度で使用する新たな可能性を提供している。20K付近の温度は容易に達成でき、従来のように液体ヘリウムをクライオスタットに溜めるやっかいな操作が必要なくなると、マグネットをスイッチを押すだけで運転可能となる。日本では既に物性研究に使われる冷凍機直冷型のビスマス線材のマグネットが市販されるようになっている。米国でも冷凍機を使った直冷型のマグネットシステムは検討されているが、さらに同程度の温度の応用として、軍関係を中心に液体水素、液体ネオンを冷媒にしたコイル試験も行われていて興味深い。例えば、米国の海軍研究所(NRL)ではかつて建造したことのある超伝導電気推進船(Jupitar II)の超伝導単極モーター用Nb-Tiコイルを、Bi系線材のコイルに置き換えるための開発が行われている。既に半分の規模の試験で液体ネオン中で122馬力の、高温超伝導体の回転機器としての出力の記録を達成したことを報告した。

液体窒素のような高温での応用は、前述したようにまだ磁界発生は無理で、磁界の影響の少ない大容量導体としての応用が進められている。主なものとして、液体窒素を利用した地下送電ケーブルの超伝導化と、超伝導マグネットのリード線の超伝導化がある。

電力ケーブルに関しては、東京電力が電線メーカーと協力して、液体窒素中で100MVAクラスの容量の送電ケーブルを作製して、66KV、1000A-1400A級の試験に成功した。このケーブル作製には、絶縁、冷却、交流損失に対する対策など、総合的な技術力が必要で、実用化に大きく前進したものと意義が深い。米国においても電力ケーブルの開発が電力中央研究所(EPRI)を中心に進められている。米国では急速に増大する電力需要に応えるために、現存する地下ケーブルで寿命になったものを次第に高温超伝導ケーブルに置き換えて、将来的には2倍以上の容量アップを達成しようとするものである。現在、このような実証試験とともに、さらに線材の臨界電流を高める努力や、交流損失、接続法などの研究が進められている。

電流リードの応用は、超伝導マグネットのリード部分に従来の銅線に換えて高温超伝導体を使用するもので、これによってジュール熱の発生を抑え、また高温超伝導体の熱伝導率の低さを利用して外部からの熱流入を最小限に抑えようとするものである。この電流リードには、ビスマス線材以外にもビスマスのバルク材料も多く使われている。既に高温超伝導体のリード線を使った小型超伝導マグネットが市販されているが、さらにSR-ring(放射光施設)のNb-Ti超伝導マグネットへの2000A電流リードなどに実際に使用されている。

3 バルク材料の開発と応用

超伝導体をバルク(塊)材のまま応用することは、従来の金属系超伝導体ではあまり考えられなかったことである。バルク材としての応用が考えられるようになったのは、イットリウム系($Y_1Ba_2Cu_3O_x=Y123$)の熔融凝固材が液体窒素温度で強い磁束ピン止め力を有し、結晶粒内の臨界電流密度が磁界中でも大きいことが発見されてからである³⁾。イットリウム系は結晶粒界が内部にあると、そこで電流の受け渡しが阻害されるいわゆる弱結合の問題が大きい難点をもつ。このことは、端から端まで電流を流さなければならない線材の場合は特に大きな障害である。バルク材の応用は、結晶粒内に誘起された電流によって発生する磁界を永久磁石のように利用するものである。すなわち磁界をかけた時に結晶粒内に生じた遮蔽電流は、超伝導状態では磁界を除去しても流れ続けるため、この環流によってバルク材はあたかも永久磁石のように磁界を発生続けることになる。その際、電流が環流する領域が広い程バルク材としての発生磁界は高くなるので、結晶粒サイズはなるべく大きい方(望むらくは単結晶)が良い。また、結晶内部に流れ得る最大電流、すなわち粒内の電流密度が高い程発生磁界は高くなるので、結晶粒内の磁束ピン止めを強くするための努力が続けられている。

熔融凝固プロセスで作製したイットリウム系バルク超伝導体が、液体窒素温度でなぜ高いピン止め力を有するかの理由はまだ完全には明らかとなっていない。分散する211相($Y_2Ba_1Cu_1Cu_5$)を始めとして、双晶、転位、積層欠陥、酸素欠損などの影響が議論されている。このバルク材の開発で最近の大きな話題は、イットリウムをネオジウム(Nd)、サマリウム(Sm)、ユーロピウム(Eu)等の他の希土類元素(RE)に置き換えたRE123超伝導体である⁴⁾。これらの材料は空気中で熔融、凝固させるとREとBaの相互置換が生じて臨界温度が極端に低下する問題があった。しかし最近の研究で、低酸素分圧下で合成するとこの置換が抑制され臨界温度がY123よりも高くなるばかりでなく、ピン止め力、すなわち磁界中での粒内臨界電流密度も大幅に改善されることが分かった。したがって、バルク材料の応用ではこれらの新しいRE123系超伝導体が今後主流になっていくものと予想される。

上述したようにバルク超伝導体の応用は、ピンニング効果による粒内大電流と磁場との相互作用にあり、以下に述べるような応用開発が進められている。まずバルク超伝導体の永久磁石効果と磁石との反発力を利用して、完全に非接触なベアリングを作製することが出来る。特に注目されているのが、フライホイールの磁気軸受けへの応用である。

フライホイールは、円盤を回転させて運動エネルギーの形でエネルギー貯蔵を行うもので、摩擦のある機械式軸受けに比べると、超伝導磁気軸受けは圧倒的に有利となる。既に100Whのシステムが試作され、さらに大容量の試験も計画されている。反発力のもう一つの応用例に磁気浮上搬送システムがある。既にクリーンルーム内でLSIを搬送システムが試作されている。また反発力の利用ではないが、磁気シールドや前項で述べた電流リードでの応用でもバルク材は使われ、その際ビスマス系のバルク材も使われる。これらも高温超伝導体の現実的な応用として注目されており、既に一部では実用化されている。

4 エレクトロニクスへの応用

4.1 素子開発と応用の現状

超伝導ではエレクトロニクスへの応用も一つの重要な応用分野である。高温超伝導体に関してもその発見直後から、ジョセフソン接合を始めとして電子デバイスへの応用に大きな期待がかけられてきた。その理由は単に動作温度が高くなるということばかりでなく、高温超伝導体の大きなエネルギーギャップのために大幅な特性向上が期待できるからである。ジョセフソン現象を利用する超伝導デバイス作製のためには、接合技術の確立が重要な基盤技術となる。金属系では、ニオブ系薄膜を使ったジョセフソン接合が既に実用化されているが、酸化物高温超伝導体の場合は接合の作製は一段と難しくなる。すなわち、酸化物超伝導体自身の構造の複雑さのために特性が優れ、品質の保証された薄膜を作製することが困難なことに加えて、極端に短いコヒーレンス長さに適応した原子層レベルでの平滑な界面と、欠陥が無くて充分薄い絶縁膜を作製するのが困難なためである。したがって、いわゆるSIS(超伝導-絶縁-超伝導)接合の構築は未だに難しい課題となっている。この点に関しては今後さらに研究を進めていく必要があるが、絶縁障壁膜のかわりに結晶粒界を使ういわゆるSNS(超伝導-常伝導-超伝導)接合などは既に使えるところに来ている⁵⁾。

デバイス応用としては、図5に示すように検出技術、通信技術、情報処理技術などへの応用が進められている。

検出技術としては、SQUID(超伝導量子干渉素子)に代表される高性能微弱磁気検出器や、地球環境の観測に利用されるミリ波、サブミリ波検出器がある。この中で最も開発が進み実用に近いものはやはり高温超伝導SQUIDである。磁束の検出感度も次第に向上しており、100fTを切るものが出てきた。高温超伝導体のもう一つの応用である磁気シールドと組み合わせて、高温超伝導体のシステムとして

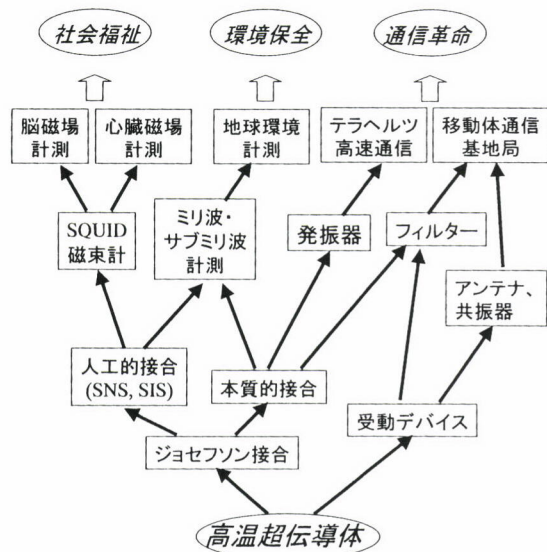


図5 高温超伝導体のデバイス応用への現状と可能性

従来にない検出感度の達成を目指している。今後の課題は、冷凍機を含んだ全体システムとしての完成と応用分野の開拓であろう。医療分野の応用として、心臓や脳からの微弱磁場の検出が注目され、試験が行われている。またミリ波、サブミリ波帯の超高周波電磁波の検出も、後述する通信以外にも、地球環境観測用の新しい高性能検出器として期待されている。すなわち、これらの周波数帯域は分子の回転による吸収スペクトルに位置しており、成層圏の希ガスの観測などに有効性を発揮するものと期待されている。

通信技術の応用では、マイクロ波のフィルター、共振器、遅延線などの受動デバイスが高温超伝導デバイスの現実的な応用として注目されてきた。特に最近の急速に膨張する通信需要に対応するために、ミリ波、サブミリ波領域で有効なデバイス開発が切実に求められている。もちろん従来通り半導体からのアプローチも研究されているが、より高感度で、広帯域化が可能な高温超伝導体に対する期待も大きい。

コンピューターに代表される情報処理への応用も、古くから超伝導の重要な応用分野であった。しかし、ジョセフソン接合を基本とするこの分野への高温超伝導体の応用は、良質な接合の構築という大きな課題を克服しなければならない。しかし、ますます高速化、大容量化する情報処理の分野で超伝導の果たす役割は大きく、根気良く長い目で挑戦すべき分野である。

4.2 注目される結晶内蔵型接合の利用

上述したように、高温超伝導体のデバイス応用で実用化を困難にしている大きな要因は充分薄くて均質、かつ高品質の絶縁層を構築することが難しいことである。一方酸化

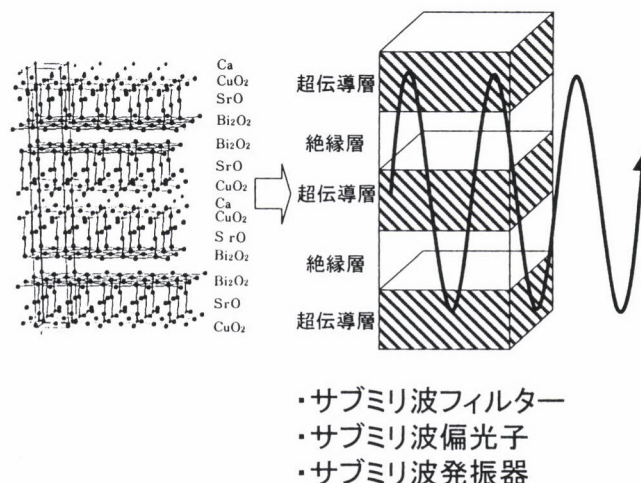


図6 高温超伝導体固有のジョセフソン接合によって生じるプラズマ発振現象を応用したデバイスの可能性。半導体では未踏の周波数帯域であったテラヘルツ帯の新しい高性能デバイスとして大きな期待が持たれている。

物高温超伝導体は結晶構造そのものがSIS結合を構成しているとも考えられる。すなわちビスマス系の高温超伝導体は、CuO面を含む超伝導層とBiOの絶縁層とが交互に積層した結晶構造を持っており、したがって結晶構造そのものが既にジョセフソン接合の配列となっているとみなされる。このような結晶内蔵型の接合を Intrinsic Josephson Junction (日本語では固有ジョセフソン接合あるいは本質的ジョセフソン接合と訳している) と呼び、その存在はドイツや日本のグループによって早くから確認されてきた。この結晶内蔵型接合を使えば困難な薄膜作製や接合の構築を行う必要がなくなり、デバイス応用にとっては画期的なことである。

しかも、最近この結晶内蔵型接合が起因してジョセフソンプラズマという新現象が起こることが立木らによって理論的に予測され、さらにその存在が共鳴実験などで確認されている⁹⁾。この現象は結晶内蔵型接合を流れるジョセフソン電流と電磁場との相互作用によって生じる励起波で、ギガヘルツからテラヘルツ (10^9 – 10^{12} Hz) 帯に現れ、減衰が弱く非常に安定している。また、このプラズマは磁場をかけたときに高温超伝導体の中に侵入した磁束線と強く相互作用する。このジョセフソンプラズマ現象は図6に示したようにサブミリ波のフィルター、偏光子、発振器などへの応用が考えられている。通信関連ではテラヘルツ帯の通信周波数が未開拓領域として残されており、このジョセフソンプラズマを使ったデバイスが有力な候補になりつつある。

5 おわりに

超伝導は現在社会が抱えるエネルギー問題、環境問題を解決する最有力技術の一つとして考えられている。特に1986年の高温超伝導体の出現は、これらの解決に飛躍的な前進をもたらすものとして、その実用化に大きな期待が持たれた。ここまで12年間の歩みは当初の異常と思えるほどの期待感に比べれば、必ずしも順調とは言えなかったかも知れない。このことは、酸化物が示す高温超伝導性やそれに伴う電磁氣的現象が、それまでの古典的な超伝導機構では解釈できない特異な振る舞いを示したことに起因している。しかし、これまでの着実な基礎研究によって酸化物高温超伝導体の正体が次第に明らかにされ、さらにこれらの知識が物質開発、材料開発に適切にフィードバックされるようになって、高温超伝導体の実用性能は飛躍的な向上を見せるようになった。応用開発もこのような高温超伝導体の特徴を考慮したバラエティに富んだ開発が進められており、線材、バルク、デバイスの各分野で既にプロトタイプ

の試作機が作られ、また一部では実用に使われるようになっている。本稿ではこのような高温超伝導体の開発と応用の現状を紹介したが、今後も基礎から応用までの研究者が一体となった開発が続けられていき、さらに大きな進展が得られるものと確信する。

参考文献

- 1) 戸叶一正：応用物理, 65 (1996), 356.
- 2) 木吉 司, 和田 仁：応用物理, 67 (1998), 431.
- 3) M. Murakami : Melt Processed High Temperature Superconductors, World Scientific, (1993).
- 4) S. I. Yoo et al : Appl. Phys. Lett. 65 (1994), 633.
- 5) I. Iguchi : Bismuth based High-temperature Superconductors, (ed. by H. Maeda and K. Togano, Marcel Dekker, Inc., (1996), 595.
- 6) 松田祐司：固体物理, 31 (1996), 159.

(1998年7月7日受付)



入門講座

専門用語—鉄鋼プロセス編-3

エネルギー問題・環境問題を考えるヒント

エクセルギー

秋山 友宏 Tomohiro Akiyama 国立宮城工業高等専門学校 機械工学科 助教授
八木順一郎 Jun-ichiro Yagi 東北大学 素材工学研究所 教授

Hint for Energy- and Environmental Problems
Exergy

1 はじめに

最近、相次いで「エクセルギー」を冠に据える研究プロジェクトが実施され、有意義な研究成果^{*1}が公表されつつある。このようにエクセルギー解析が話題になり、解析の一躍を担うようになってきた原因はどこにあるのだろうか。これまでのエネルギー評価では十分でないのか。エクセルギーとは一体どういう概念なのか。また環境問題に対してもエクセルギー的思想は有望であると言う。本稿では初学者を対象にできるだけ基礎的にこれらの説明を試みたい。

2 エクセルギーを支える本質的な2大法則

エクセルギーを説明する前に歴史的経緯を踏まえ基礎的な2つの法則を再確認する。

2.1 物質は保存される

— Everything is built up of tiny invisible block, each of which is eternal and immutable. Democritus —

古来哲学者は地球は「土」と「空気」と「火」と「水」の4大元素から成り立っていると夢想していた。しかしそれでは不合理が生じ紀元前500年頃にギリシャに現れたデモクリトスは、「すべてのものはそれ以上分割できない、究極的な、目に見えないちっぽけなブロックから構成されている」と考えた。原子説である。そしてそのブロックをアトムと名づける。A-tomはun-cuttableに由来する¹⁾。従って、原子レベルでの物質保存の考えは約2500年前に遡る。

残念ながらこの概念は当時認知されず19世紀初頭のドルトンの出現まで待つことになるが²⁾。

この原子説は、地球はその誕生以来、C, H, O, Nなどの原子の組み替え作業を永遠に行ってきて、そしてこれからも続くことを教える(図1参照)。もちろん、核融合のように原子が変化する例外は除くが、その量は無視できるだろう。したがって、大気圏を境界域とする限られた範囲内で物質は原子レベルで完全に保存されている。廃棄物ゼロ(ゼロエミッション)である。ただ原子のパートナーが変化しているだけである。もちろん、流星やロケットなどその境界を出入する物質はまれに存在するが、地球の質量に対して無限

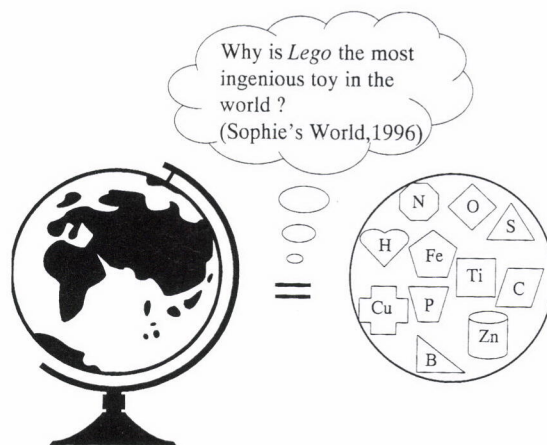


図1 地球上の原子は保存されている。ベストセラー「ソフィーの世界」では「なぜ、レゴ(ブロックのおもちゃ)は世界一超天才的なおもちゃなのか?」と少女に問い掛けた。—(本文抜粋)レゴは分けられない。頑丈で穴なんかあかない。凹凸があってあらゆる形を作れる。このことから自然は組み合わさったり、またばらばらになったりするちっぽけな構成ブロックから成り立っている¹⁾ことを示した。

*1 例えば、文部省科学研究費重点領域研究「エクセルギー再生産の学理」(吉田邦夫(東大)領域代表、平成6—9年度)、日本鉄鋼協会熱経済技術部会「製鉄プロセスにおけるエクセルギー評価とエネルギー有効利用の可能性研究」(福嶋信一郎(NKK)部会長、高橋 務(住金)主査、平成8、9年)、日本機械学会第76期全国大会ワークショップ「エクセルギー解析の可能性」(平成10年度予定)など。

小だろう。そのため恐竜の体内にあった炭素原子が、今自分の体内に存在していても何ら不思議ではない¹⁾。

われわれ人間にとって今や深刻な物質と位置づけられる炭酸ガスやダイオキシシンやフロンも、含有する炭素や塩素やフッ素の総量は地球上において不変であり地球にとっては何ら問題ではない。「雑草」という名の草はないという。同様に「廃棄物」という名の物質も存在しない。「地球にやさしい」とか「地球環境問題」という言葉の裏に人類の思い上がりが見え隠れする。

一では、この46億年の地球の歴史で原子の組み替えは自由気ままに、何の法則にも従わず行われてきたのだろうか。それとも神の意志でも働いたのだろうか。

地球上で生活するものにとって最大の境界線は大気圏となるが、解析においては関心がある特定領域を指定するのが通例である。例えば都市、製鉄所、あるいはもっと小さなプロセス(物理的变化、化学的变化のこと)を対象にしてもよい。プロセスの集合体をシステムと呼ぶ。重要なことは境界線を横切り出入りする物質の量は原子のレベルで完全に収支することである。例えば、炭素(C)と酸化鉄(Fe_2O_3)を混ぜて加熱すると金属鉄(Fe)と燃焼排ガス(CO と CO_2)が発生するプロセスがある。このプロセスに参与する原子はC、Fe、Oの3つであり、それぞれの原子について、システムに出たものから入ったものを差し引くならばゼロとならなければならない。

2.2 エネルギーは保存される(熱力学第1法則)

物質が地表空間内で保存され閉じているのに対して、エネルギーは太陽から境界線を横切り供給されるため開いた系である。水力、火力、原子力はいずれも形を変えた太陽エネルギーと見なすことができる。このエネルギーが保存されることが見出されたのは150年ほど前で、意外と最近のことである(図2参照)。ジュールは1847年に落下する重りにより羽根車を回し、水をかき回す機械的実験を行って熱の仕事当量Jの値を測定した²⁾。この実験結果は位置エネルギー(J)と熱エネルギー(cal)の比率がいつも一定(4.186)であり、このことからエネルギーは量的に保存されることをあきらかにした。現在ではすべての種類のエネルギーに拡張されこの法則の成立が認知されるに至っている。これはエネルギー保存則あるいは熱力学第一法則と呼ばれる。このようにエネルギーは変換こそすれ、不生不滅でその量は一定である。それにもかかわらず、「省エネ推進」とか「エネルギーを大切にしよう」という。

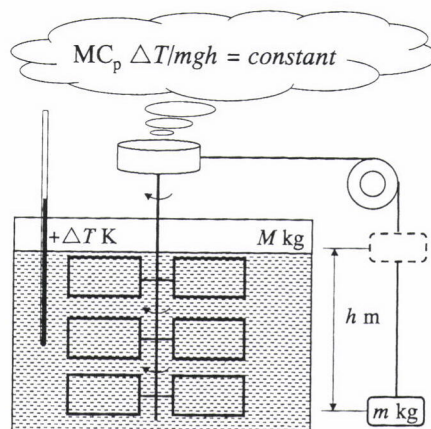


図2 ジュールの実験装置の概略図。位置エネルギーと熱エネルギーは等価であることをはじめて例証した。エネルギー保存則の確立に結びつく。

一では一体この不生不滅のエネルギーをどうやって大切にしたらよいのだろうか。

2 節のまとめ

物質およびエネルギーは保存される。

3 不可逆性に関すること

3.1 エクセルギーとは

数ある法則のうち、経験に基づく法則はめずらしい。熱力学第2法則もそのひとつだろう。そのため表現方法がいくつもあって初学者には全く理解しづらいことこの上もない。一説によると一流大学の熱力学の講義でいかに懇切丁寧に教えたところで、80%以上の学生がこの法則を前にして落ちこぼれるそうである³⁾。

結論から先に言うと、エクセルギー(Exergy)による熱力学第2法則の表現は極めて簡単、明確である。それは「システム内でエクセルギーは必ず減少する。」(エクセルギー減少則)

ことである。システム内でエクセルギーの値はまれに変化しないことはあっても、絶対に増加することはない。エクセルギーとはエネルギーのうち使用可能なものを意味する。「使えば減る」エネルギーこそ、まさにエクセルギーを指す。だから、われわれはエネルギーではなく、無意識のうちにエクセルギーを大切に使うように心がけていることに気づく。

その命名者は東ドイツの熱工学者ラントで、1953年のことであった。この名前はVDI(ドイツ技術者協会)で1956年正式な呼び名として採用され、東欧圏に定着していった⁴⁾。語源はギリシャ語で仕事をあらわすエルゴンに外への意味

を持つ接頭語exをつけたものである。直訳は「取り出せる仕事」とでもすべきかもしれない。逆に使用不可能なものはアネルギー (Anergy) と呼ばれる。エネルギーはGibbsの自由エネルギー ($\Delta H - T\Delta S$) と熱 ($T\Delta S$) から構成される。前者はすべて仕事に変換することができるが、後者はカルノー効率 ($1 - T_0/T$) に制約される。そのため、エクセルギー*2は $\Delta H - T_0\Delta S$ 、アネルギーは $T_0\Delta S$ で表現される。エクセルギー減少則はエネルギー変換において使用可能なものから使用不可能なものへ変化することを示している。

ではどういう時にエクセルギーが減少するのか身近な例を用いて考えてみたい。熱力学第二法則はエントロピーを導入し定量的評価がおこなわれるようになるまでに長時間を要したが、面白いことにこれら議論に科学者が苦勞している間に日常生活においては既にこの法則は確立されていた。例えば、「覆水盆に返らず」、「It is no use crying over spilt milk」、「長いものには巻かれよ」等である。もし、これらの格言をよく知っていて、しかも日常生活でなるほどと思うことが多ければ、それだけで熱力学の第二法則を知っていることになる⁵⁾(図3参照)。

お湯と水を混ぜてぬるま湯ができる場合、エネルギーを表すエンタルピー量は比熱、温度、質量の積で計算でき保存されるが、エクセルギーは保存されない。ぬるま湯 2 kgの方がお湯 1 kgよりも小さな値となる。これはぬるま湯は自然にはお湯に戻ることができないこと、すなわちこの現象が不可逆であることに由来している。このように不可

逆性の度合いによってエクセルギーの減少割合は異なってくる。

3.2 生産活動とは

生産活動におけるエクセルギーの動きを考えてみる。製鉄においては「原料」は酸化鉄 (Fe_2O_3)、「製品」は金属鉄 (Fe) である(図4参照)。ところが、自然界に放置しておいて $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}$ と自ら変化することはいない。この理由は一般的に原料は低エクセルギー物質、製品が高エクセルギー物質であるために、エクセルギー減少則に反するためである。そのため製鉄においては高エクセルギー物質である石炭という「資源」を投入して、流入エクセルギーが流出エクセルギーよりも大きな値として内部で傾斜をつける必要がある。これがエクセルギー理論から見た一般的な「生産活動」である。それに伴い必ず低エクセルギー物質である「廃物・廃熱」が発生する。廃熱の多くは最終的には大気放散や冷却水という形態を取る。

ここでエクセルギーは2つの形態で消費されていることに気づくことは重要である。「廃物・廃熱」の形式で持ち出されるエクセルギー(第1種損失、図中B部)とこの現象を生起させるのに必要なシステム内部でのエクセルギー損失(第2種損失、図中A部)は本質的に異なっている。前者は有効に回収し再利用することにより減少は可能であるが、後者はシステムの本質に関わる、いわばシステムの駆動力といえる。そのため現行のシステム解析においては必要最小限の後者の値をあらかじめ認識しておくことが肝要である。ひとたび理論最小値が求められたならば最終目的が明確になり、現行システムのエクセルギー消費量と比較する

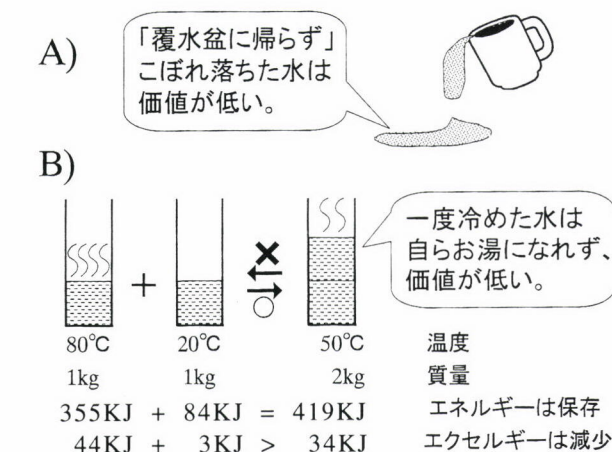


図3 不可逆性を示す2例。A)は諺「覆水盆に返らず」は不可逆性による価値の低下を示唆している。B)は混合によるエクセルギーの減少例。混合前後でエネルギーは保存されるが、一度冷めたものは価値が下がったことは自明である。エクセルギーではその違いを明確に評価できる。

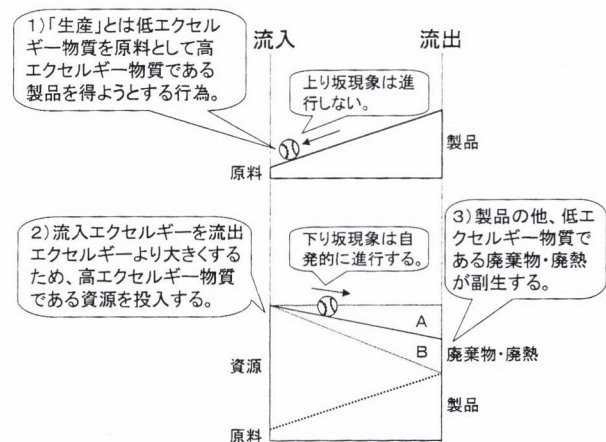


図4 生産活動におけるエクセルギー変化図。ボールは下り坂しか転がらないように、エクセルギーも内部で減少し下りに傾斜していなければならない。

*2 $(\Delta H - T\Delta S) + T\Delta S(1 - \frac{T_0}{T})$ ここでHはエンタルピー(J)、Sはエントロピー(J/K)、Tは温度(K)である。T₀は環境温度25℃(298.15K)を表す。

ことにより到達度が明らかとなる。また成熟産業か否かを判断する一つの切り口にもなり得るだろう。

3節のまとめ

- 1) エクセルギーとは地球環境を基準にした熱および物質のうち使用可能なエネルギーを表す。
- 2) 生産活動とはシステム内に意図的にエクセルギー減少の傾斜をつけることである。

4 システム考察法

4.1 システムにおける物質、エネルギー、エクセルギーの関係

熱力学的にはプロセスとは物理的变化、化学的变化である。加熱、冷却、圧縮、膨張、反応などの単一あるいは複合した形態を指す。場合によっては見えないこともある。炉壁からの放熱による周囲温度の上昇等がこれに該当する。見えない場合も解析においてはプロセスとして認識する感覚を養う必要がある。

図5に3つのプロセスから構成されるシステムを示す。プロセスに流入する物質(図中黒矢印)に特に拘束条件はない。ただし、物質を限定するために、その速度、組成、温度、圧力を知っておく必要がある。その結果、物質収支より流入する原子は等しくなり($\Delta M=0$)、個々のプロセスで完全に閉じていなければならない。エネルギーに関しては体積膨張が可能な系ではエンタルピーで記述できる。流出から流入を減じたエンタルピー差(ΔH)は熱や仕事の放出や取り込みを生じさせる。プロセス間を移動するこのエネルギーは仲介エネルギーと呼ばれる(図中白矢印)。反応プロセスの場合この値が負は発熱、正は吸熱反応を意味する。

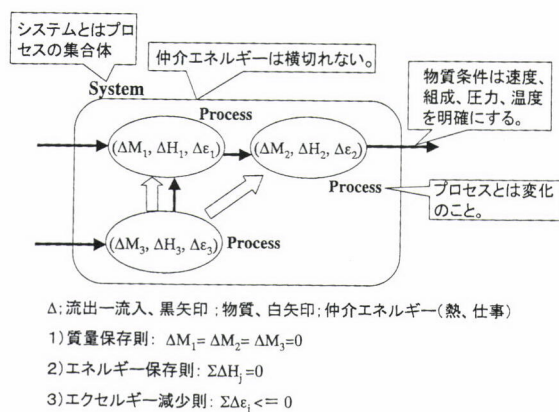


図5 システムにおける物質、エネルギーおよびエクセルギーの関係。3つのプロセスからシステムが構成される場合。

一方システムはいくつかのプロセスから構成される。システム境界は仲介エネルギーが横切らないように設定する必要がある。その結果、システム内において熱力学第1法則より各プロセスのエンタルピー和はゼロ、第2法則よりエクセルギー和はゼロまたは負となる。個々のプロセスにおいてはエクセルギー差($\Delta \epsilon$)は正であっても、負であってもかまわないが、その和は決して正になることはない。一見するとエクセルギーが増加しているようにみえる都市形成、人間成長、自動車製造などの現象もシステムとしてその原料や食料製造等々のプロセスもすべて考慮するならば、必ずエクセルギー和は大きく減少していることになる。

4.2 熱力学コンパス³⁾

物質、エンタルピーおよびエクセルギーの3者の関係を考察する。前2者は保存則のもとで自由に変換できるが、それはあくまでもエクセルギー減少則のもとで行われていたことに気づく。部分(プロセス)的には酸化鉄が還元されて鉄ができたり、燃焼によって高温が得られエクセルギーが増加したとしても、全体(システム)的には不可逆性に逆らうことができずエクセルギーは必ず減少する。

そのようなシステムを考察するとき、物質は各プロセスで収支しているので、 ΔH と $\Delta \epsilon$ についてのみ議論すればよい。2変数の関係を明確にするために、図6に示すように x 軸、 y 軸にそれぞれの値をとると都合がよい。この方法はシステム設計における羅針盤となり得ることから、熱力学コンパスと呼ばれている。グラフ上にはプロセスの数だけベクトルが表示され、それらベクトルの和は y 軸上に必ず鉛直下向きに現れる。これがエクセルギー消費である。ベクトルの位置によりプロセスの分類ができる。 $\Delta H > 0$ 領域(第1, 4象限)はエネルギーを受け取るプロセス、 $\Delta H < 0$ 領域(第2, 3象限)はエネルギーを与えるプロセスとなる。一方、 $\Delta \epsilon > 0$ 領域(第1, 2象限)は自発的には進行しない他力プロセス、 $\Delta \epsilon < 0$ 領域(第3, 4象限)は自発的

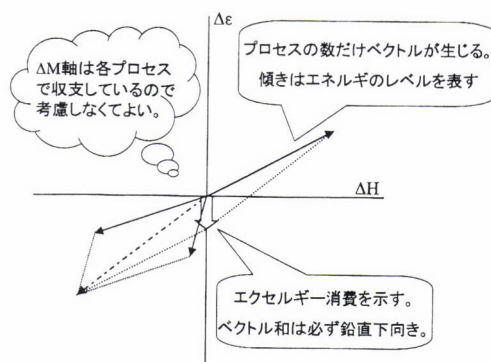


図6 熱力学コンパスの原理図。3つのプロセスの場合。

に進行しうる自力プロセスである。従っていくつかのプロセスを組み合わせ、エクセルギー消費をもっとも小さくなるようなシステムの設計を机上でどんどん自由に行い考察できる。これがこの方法の利点であり醍醐味となっている。ちなみに、ベクトルの傾き^{*3}はエネルギーのレベルを表す。例えば熱に関して言えば傾き 0°が環境温度、45°で温度 $=\infty$ に対応する。傾き45°はエントロピーゼロを表す。混合や分離操作、各化学反応は独自の傾きを持ち、第1, 3 象限に現れる。

4 節のまとめ

エクセルギー解析では部分(プロセス)を見るのではなく、全体(システム)を見よ。

5 省エネルギーとは

環境と異なる状態にある時、環境状態に戻ろうとする現象はすべて不可逆現象でありその時仕事をする事ができる。地球上でその温度、圧力および組成が異なっているため環境状態を一言で定義するのは難しいが、工学的に議論する場合は25℃、1気圧、大気組成(水蒸気飽和)とするのが妥当であろう。厳密にはエクセルギーは化学と熱ばかりでなく、圧力および混合の4つの形態で表現することができる(図7参照)。地球上では物質は最終酸化物になるまで化学エクセルギーを有している。熱及び圧力が常温常圧の状態に乗ることにより仕事ができるのでエクセルギーを有している。極低温や高真空状態も高いエクセルギーを持つ。物質は自然界では混合する一方なので、純物質は高いエクセルギーを持っている。

システム設計においてはこの流れを十分に把握して、段

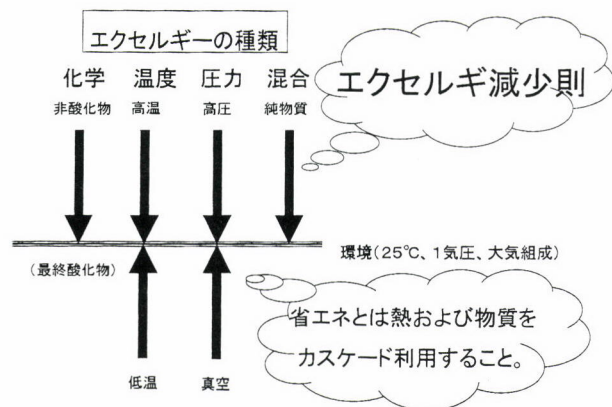


図7 熱および物質の流れはすべて環境へと向かう。

階的に熱および物質を利用することが重要である。いわゆるカスケード利用である。カスケード実現のためにはエネルギー変換、貯蔵、輸送技術が鍵を握ることは異論がない。そこではできるだけ投入エネルギーを減らして生活する知恵を身につけ、現在の炭素中心の生活から徐々に太陽エネルギー社会(そこでは水素が主役となる)到来の準備を進める必要がある。エネルギー変換においてなるべくレベルの近いエネルギー同士、すなわち熱力学コンパス上でいうならば傾きの近いもの同士を組み合わせ、エクセルギー損失が小さくなるようなシステムを設計すべきである。従来の熱効率だけにこだわり、エネルギーレベルを全く考慮しないシステム設計の方法は間違っている。温和なエネルギー変換を志向することこそがカスケード利用のコツと言える。

5 節のまとめ

- 1) 「省エネルギー」とは節約ではなく、熱および物質をカスケード利用すること。
- 2) カスケード利用のためにはレベル差が小さいエネルギーの組み合わせを目指す。

6 おわりに

本稿では学生および若手技術者を対象に基礎的なエクセルギー概念の説明に終始しました。そのため、一切の数式を使用しておりません。文献として優れた出版物^{3,4,6)}が存在することから、関心を持たれた一人でも多くの方が上記図書により「エクセルギー党」に入党していただければ望外の喜びです。また、内容の一部は日本鉄鋼協会熱経済技術部会「製鉄プロセスにおけるエクセルギー評価とエネルギー有効利用の可能性研究」、文部省科学研究費重点領域研究「エクセルギー再生産の学理」(06246103)、「ゼロエミッション」(09247202)のメンバーとの議論の中で生まれました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Jostein Garardor : Sophie's world, a novel about the History of Philosophy, phoenix, London, (1996), 36.
- 2) 岩波理化学辞典第4版, 岩波書店, (1987), 402.
- 3) 石田愈: 熱力学—基本の理解と応用, 培風館, (1995)
- 4) 押田勇雄: エクセルギー講義, 太陽エネルギー研究所 (1986)
- 5) ジェミリー・リフキン, (竹内均訳): エントロピーの

*3 正確には $1 - \frac{T_0}{T - T_0} \ln \frac{T}{T_0}$ で計算される。

法則, 祥伝社 (1982), 29.

6) 信澤寅男: エクセルギー入門, オーム社 (1980)

また、鉄鋼、化学、蓄熱など具体的なシステム解析例として以下のものが挙げられます。

- ・秋山友宏, 高橋礼二郎, 八木順一郎: 鉄と鋼, 73 (1987), 2108.
- ・秋山友宏, 八木順一郎: 鉄と鋼, 74 (1988), 2270.
- ・秋山友宏, 八木順一郎: 鉄と鋼, 77 (1991), 1259.
- ・秋山友宏, 芦沢芳夫, 高橋礼二郎, 八木順一郎: 日本機械学会論文集B, 57 (1991), 2768.

・佐藤弘孝, 村松淳司, 秋山友宏, 八木順一郎: 石油学会誌, 40 (1997), 427.

・町田 智, 秋山友宏, 八木順一郎: 化学工学論文集, 24/3 (1998), 462.

・T. Akiyama, R. Takahashi and J. Yagi: ISIJ International, 29 (1989), 447.

・T. Akiyama, H. Sato, A. Muramatsu and J. Yagi: ISIJ International, 33 (1993), 1136.

・T. Akiyama and J. Yagi: ISIJ International, 38 (1998) 896.

(1998年4月14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 高張力鋼の進歩とそれを支えた科学

邦武立郎

Tatsuro Kunitake

Development of High Strength Steel and Its Underlying Physical Metallurgy

1 はじめに

戦後の復興期を終戦(1945)から1960年前後まで、発展期を粗鋼生産が著しい伸びを示して後、頭打ちに到る1970年代前半までとすると、表題の期間は戦後約30年間となる。この時期、特に1960年代と1970年代前半は鉄鋼の生産の伸びもさることながら、これと平行して鉄鋼の研究がわが国で特に盛況を極めた時期であった。ここでは、高張力鋼の開発を切り口として、その進歩を支えた物理冶金学的な研究を若干の例を挙げて説明する^{*1}。

2 復興・発展期における鉄鋼材料の研究開発の特長

戦後の復興と経済の発展に、造船、土木、建築などの諸用途において、高張力鋼が必要とされた。対象の構造物の実現に必要な鋼材の性能に対する要求は具体的で、開発目標は明確であった。例えば、造船では従来よりも降伏強度の高い降伏強度32~36kg/mm²クラス(315~355MPa)の高降伏点の鋼材が必要とされ、また電源開発に必要な水圧鉄管には引張強さ60~80kg/mm²クラス(580~780MPa)の鋼材が必要とされた。エネルギー関連では輸出向け大径ラインパイプに高強度・高靱性の鋼板が、またLNGの輸入・貯蔵に-162℃の低温に耐える低温用鋼材が必要とされた。単に強度だけでなく、低温靱性や施工上必要な加工性、溶接性、その他諸々の具体的な諸条件を満たすことが必要であった。目標とする鋼材の開発によって実現される対象

が具体的で可視的であり、しかもこのような‘魅力のある’開発対象が次々に現れたという点において、この時代の企業における研究開発を特長付けたといえる。

第二に、鉄鋼業の個々の企業と、鉄鋼材料のユーザー、ファブリケーターとの間にしばしば共同研究会が設けられ、問題の解決に共同して当たったことである。これは、顧客のニーズを把握し理解を深める上で大いに役立った^{*2}。

第三に、第二次大戦を経て新たにスタートしたわが国の前に、すでにある程度まで欧米を主とする先進国の研究成果の蓄積があり、これを手がかりにスタートすることが出来たことである。例えば、わが国で著しく発展した制御圧延・制御冷却には焼ならし省略を目的とするオーステナイトの圧延加工についての欧州の研究が存在した。また、わが国で靱性、溶接性が著しく改善され、極厚化されたいわゆる80キロハイテンの出発点としては、T1鋼が存在した^{*3}。しかしながら、いずれにおいても、急速に先進諸国に追いつき、これを凌駕して、わが国独自の技術に育て上げるに到った。これらの事柄については、以下にのべる。

3 わが国における高張力鋼発展の歴史

わが国における高張力鋼開発の事始めは、戦前の海軍における艦艇用鋼板の開発に遡る^{1,2)}。すなわち、1923(大正12年)には英国からDucol鋼^{*4}を輸入して研究を開始し、1945年(昭和20年)にはSi-Mn系HT50^{*5}の量産化に成功して終戦を迎えている。

戦後の高張力鋼板開発の草創期については諸解説^{3,4)}が

*1 ここで対象とするのは、広い意味での科学ではなく、物理冶金学的(金属組織学的)な、また“応用基礎的な”課題であることをお断りしておく。

*2 研究会には、学識経験者、第三者として学界からの参加もあった。

*3 米国のU. S. Steelが開発した調質HT80。比較的C量の高い(Ni)-Cr-Mo-V-Ti-B鋼。

*4 Si-Mn系(0.25%C-1.5%Mn)の焼ならし型高張力鋼。

*5 HT50は引張強さ50kg/mm²(490MPa)クラスの高張力鋼。以下、HT60、HT80などと同様に表す。

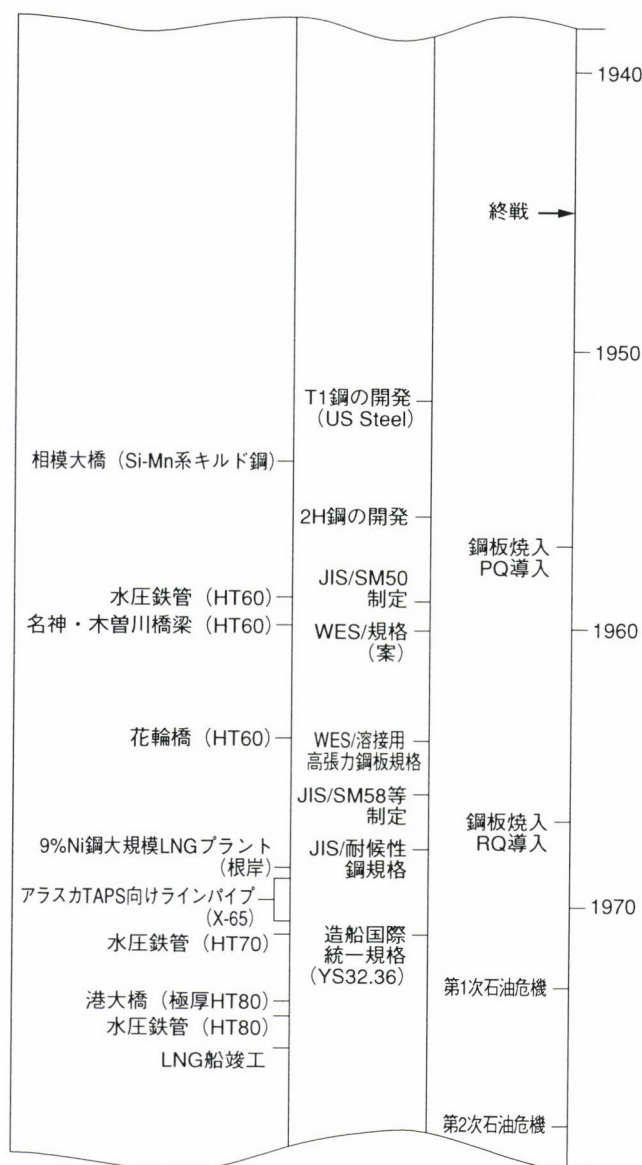


図1 高張力鋼板の発展

あるが、主要な項目を挙げれば図1のようになる³⁻⁵⁾。PQ（プラテンクエンチ）RQ（ローラクエンチ）^{*6)}などの製造設備や、T1鋼など外国から学ぶところから出発したが、短期間の内にこれをマスターした。一方、経済成長に伴う旺盛なニーズを背景とした勢力的な研究開発によって諸外国のものを凌駕する性能や、独自の製品を生み出すことに成功した。その成功の一因として、“材料をつくるだけでなく、諸性質を律している物理冶金学的原理も追求する姿勢”があったことが指摘されている⁴⁾。

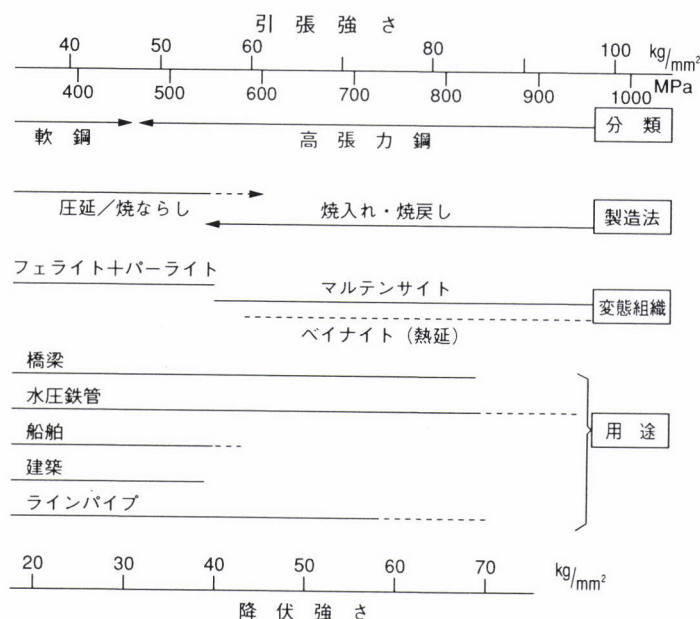


図2 鋼板の強度スペクトル

なお、日本の粗鋼生産は1973年度の1億2000万トン进行ピークとして成熟期に入っているが、高張力鋼は1980年代の半ばまで増加を続けている⁶⁾。

4 復興・発展期における物理冶金学的研究と高張力鋼板の開発

図2に高張力鋼板の強度スペクトルとその変態組織の概略を示した^{*7)}。高張力鋼板は溶接性上の要求からC0.2%以下の低炭素含有量となり、変態組織的には、比較的低強度では主としてフェライト・パーライト組織、高強度では主としてマルテンサイト組織（焼もどしマルテンサイト）である^{*8)}。当初における典型的な強度の開発目標は、前者では降伏強さ32,36kg/mm²(315, 355MPa)クラス、後者では引張り強さ60~80kg/mm²(580~780MPa)クラスであった。以下では、それぞれフェライト系、マルテンサイト系と呼ぶことにする。

4.1 フェライト系の高張力鋼

表1は微量元素を添加したフェライト・パーライト鋼の強化因子を示したものである。大きな効果を現す強化因子は、フェライトの細粒化と炭・窒化物による析出強化であ

* 6 鋼板の噴水による焼入れ設備。PQは鋼板の固定焼入れ方式、RQは鋼板の移動焼入れ方式である。後者は、圧力噴水を用い、冷却能は大。
 * 7 以下主として、厚板、熱延鋼板について述べる。自動車を主な対象とする冷延高張力鋼板についても特筆すべき研究開発が行われたが、ここでは割愛する。
 * 8 その後、ベイナイトを主体とする高張力鋼が熱延鋼板をはじめとして多く開発されている。図2、表2参照。

表1 微量元素添加フェライト・パーライト鋼の強化因子

変態組織	フェライト	固溶原子	侵入型 (C, N) 置換型 (Si, Ni--)	強化因子
		転位		
		結晶粒界 (亜結晶粒界)		
析出物	パーライト	量 存在形態 (層状、粒状など) 分散間隔 (層間間隔など)		子
		種類 析出形態 (整合、不整合) 大きさ 量 析出場所 (粒内、粒界など)		

る。特に前者は強度と靱性が両立し得る点で注目される。そこで、オーステナイト結晶粒の粗大化防止、すなわち成長の抑制因子としての、Al, Ti, V, Nbなどの炭・窒化物の析出・分散が注目された。Al, Nb, V, Tiの炭・窒化物の溶解度積の測定結果が1950年代の半ばから1960年代の半ばに発表されている⁷⁻⁹⁾。図3に各種炭・窒化物の溶解度積を示した⁷⁻¹³⁾。*9。Al, Nbなどについて炭・窒化物の利用が考えられた。例えば、AlNによるオーステナイト結晶粒の微細化である¹⁴⁾、*10。

一方、オーステナイトの加工と再結晶についての研究が制御圧延(Controlled Rolling)の進歩をもたらした。特に、微量添加元素としてNbが注目された。オーステナイトの高温加工については次のような明らかにしなければならない研究課題があった。

- ・高温における再結晶(静的ならびに動的再結晶)
- ・低温(未再結晶領域)における変形欠陥の導入
- ・導入欠陥のフェライト変態への核作用

これを、温度一時間的履歴と圧延量の関係において明らかにしなければならないので、複雑な問題となる。Nbなど微量元素の作用については、次のような明らかにしなければならない諸点があった。

- ・オーステナイト結晶粒成長の抑制作用
- ・炭・窒化物の析出のカイネチックス、加工・変形の影響
- ・炭・窒化物が再結晶におよぼす影響
- ・固溶Nbの変態、その他におよぼす影響
- ・微細析出のフェライト強化作用

など。

図4、図5はオーステナイトの温度—加工—再結晶—ダ

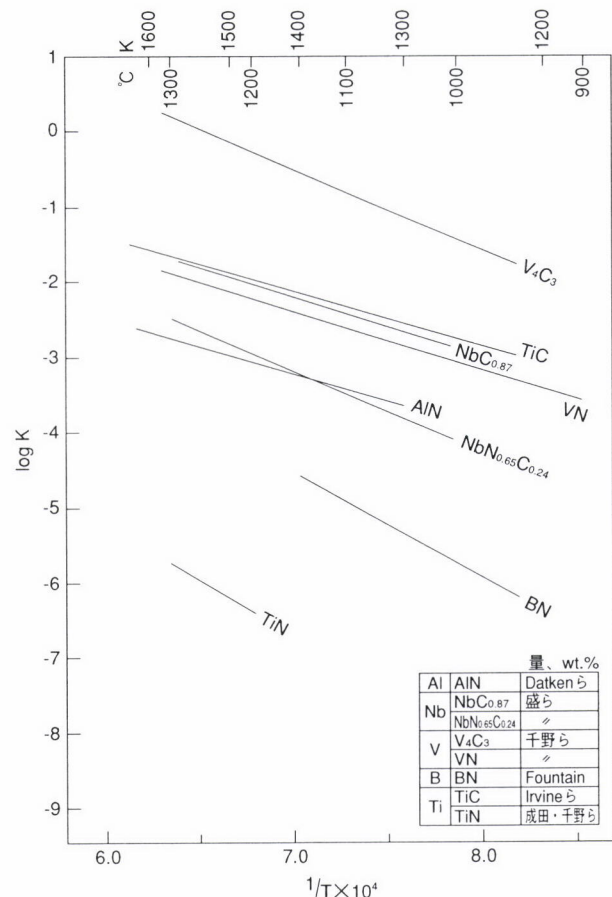


図3 種々の炭・窒化物のオーステナイトにおける溶解度

イアグラムを、Si-Mn鋼、Si-Mn-Nb添加鋼について示したものである¹⁵⁻¹⁷⁾。また、図6は、オーステナイトの未再結晶温度領域における圧延において、圧下量の増大による粒界面積と変形帯密度の増加を示したものである¹⁶⁾。これらの一連の研究は未再結晶オーステナイトの変態による微細フェライト粒生成の知見を生み、制御圧延と制御冷却の組み合わせによる熱加工制御(TMCP: Thermomechanical Control Process)への発展へと導くことになる^{*11}。制御圧延、加速冷却による組織制御の金属学については、例えば牧による解説¹⁸⁾がある。

4.2 マルテンサイト系の高張力鋼

特に発展期においては、橋梁、水圧鉄管などの用途に対して厚肉化、高強度化、高靱性化のニーズは絶えることがなかった。特に引張り強さ80kg/mm²クラス以上では強度達成上、低炭素マルテンサイトを主体とする組織の鋼がベースとなった。

*9 図3において、BNについては、Fountain, Chipmanの研究¹²⁾を示した。なお、AlNについて7)は、Darkenらの研究¹⁰⁾と良く一致するが、TiCについては、9)はIrvineらの研究結果¹³⁾と大きく異なる。

*10 中村らの開発したAlN処理鋼は¹⁴⁾、IN鋼と呼ばれた。IN処理(AlN処理)は調質鋼に対しても適用された。

*11 1980年にNKK福山製鉄所厚板工場にOLAC(On-Line Accelerated Cooling)システムが設置された。その後、逐次、各社でも同様の設備が設置され、TMCPの応用は、1980年代以降、造船、建築、ラインパイプ用に盛んに適用され、大きな成果を挙げた。

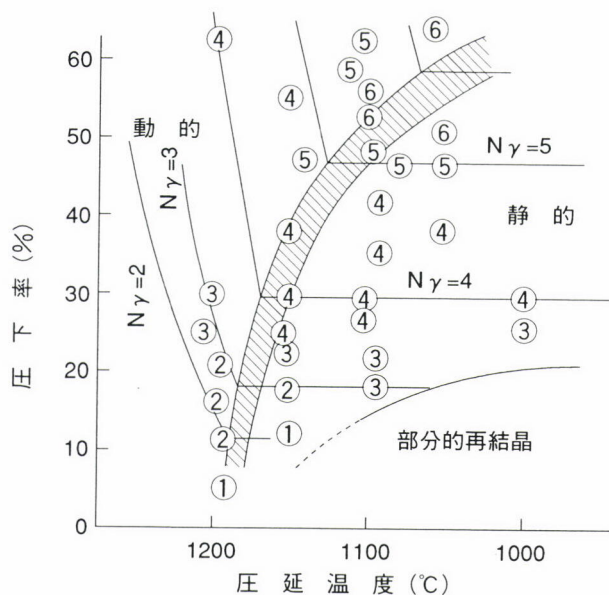


図4 圧延温度、圧下率と再結晶、オーステナイト粒径の関係¹⁵⁾
(0.1C-0.25Si-1.37Mn鋼、初期オーステナイト粒度-0.2番、
圧延から1s後急冷、
図中の数字は再結晶後のオーステナイト粒度番号)

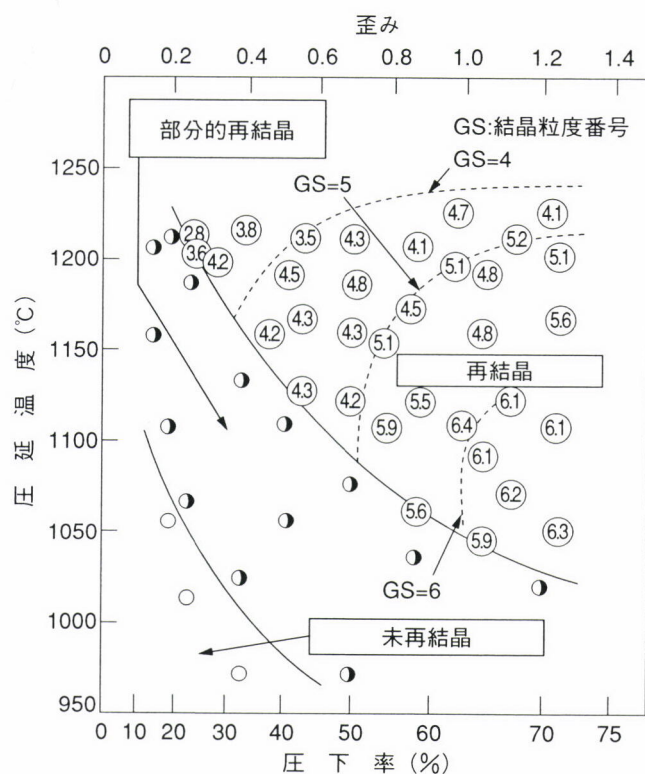


図5 圧延温度、圧下率と再結晶、オーステナイト粒径の関係^{16,17)}
(0.16C-0.36Si-1.41Mn-0.03Nb鋼、初期オーステナイト粒
度1.0番、圧延から3s後急冷)

4.2.1 ボロンの挙動

極微量の添加で焼入性に大きな影響をおよぼすボロンについては1940年代中頃に米国で研究されたが、日本では戦後いち早くこれに注目した研究が行われ、機械構造用合金鋼として実用化されている。ボロンは酸素や窒素との反応性が強いので、安定した焼入性の向上効果を得るには、製鋼時のボロン処理においてAl, Tiを併用しなければならないことは周知のことであった。しかしながら、低温靱性の要求レベルの高い厚板では、Tiは靱性を低下せしめるので、Tiを使用しないボロン鋼の開発が目指された。鋼中のボロンの挙動について明らかにしなければならない課題として次のようなものがあつた。

- ・ BのN, Oとの反応、共存元素(例Ti, Al)の影響
- ・ Bの化合物(BN, $\text{Fe}_3(\text{C}, \text{B})$, $\text{Fe}_{23}(\text{C}, \text{B})_6$, boron constituentなど)の種類
- ・ その安定性—平衡相、非平衡相
- ・ 固溶ボロンの偏析挙動、その温度依存
- ・ 固溶ボロンの拡散速度、再結晶などの粒界移動との関係
- ・ 析出のカイネティクス
- ・ オーステナイトの変態におよぼす効果とその機構(ボロンの偏析、析出物の効果)、など。

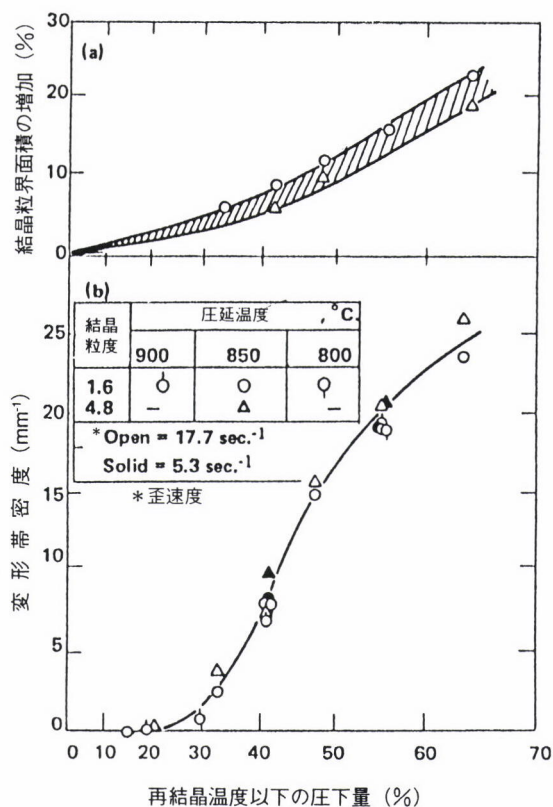
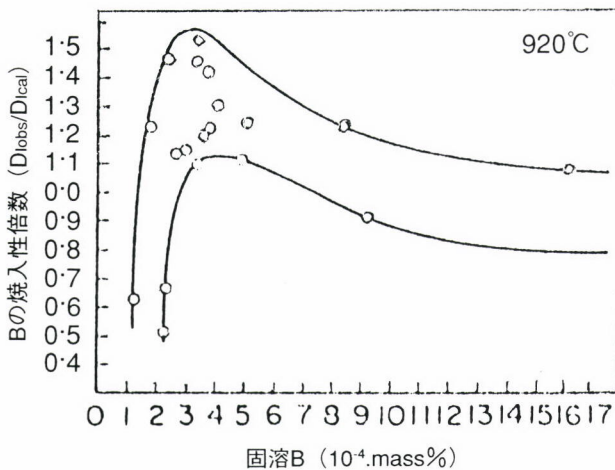


図6 オーステナイトの再結晶温度以下の圧下量と粒界面積、変形帯密度の関係¹⁶⁾
(0.03%Nb鋼)

図7 固溶ボロンの焼入性倍数¹⁹⁾

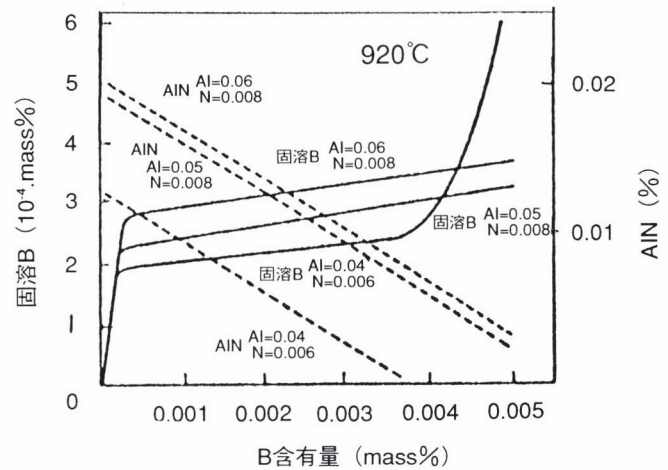
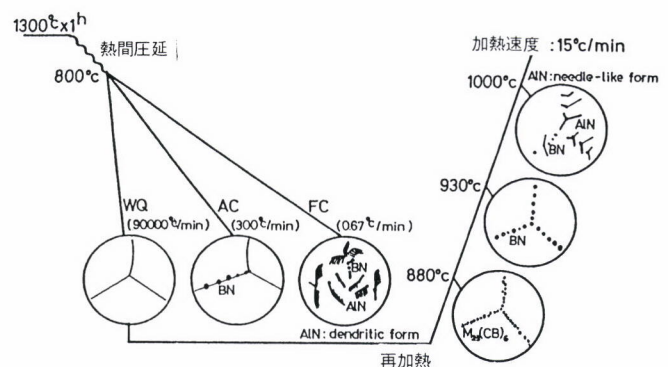
土生ら¹⁹⁾は、Fe-B-Al-N系の熱力学的検討を行い、焼入性向上におよぼすBの最適量は、固溶B量3~5ppmであること、またNの変動範囲0.0040~0.0120%では、Alを0.060~0.080%の範囲内に収めれば、N、Bは相当の変動を許容しても、最適固溶B量が安定して得られることなどを主張した(図7、図8)。

ボロンの化合物の均熱、圧延、熱処理における挙動を明らかにすることは、ボロン鋼の製造時における安定性を確保する上に大切なことであるが、Bのオーステナイト粒界への偏析に続いて、BNが析出し易いこと、適当な温度で加熱すれば、次の反応によってBNのAINへの変化が起こり、Bの焼入性向上効果が回復することなどを見出した²⁰⁾。



図9は、種々のプロセス段階におけるBの挙動を示したものである²⁰⁾。その後、製鋼技術の向上により、低窒素鋼の溶製が可能となったが、窒素の含有量によって、鋼中Bの挙動も異なってくる。低窒素鋼(N量0.0020%前後)では、 $\text{M}_{23}(\text{C}, \text{B})_6$ の挙動が重要となるが、図10は種々の熱処理プロセスにおける $\text{M}_{23}(\text{C}, \text{B})_6$ の挙動、およびその焼入性におよぼす影響を示したもので、適量の固溶B(3ppm程度)の粒界における存在が焼入性の上で最適であることがわかる²¹⁾。

Bという特異な元素は、a)原子半径が小さく、b)鋼中の拡散速度が大きく、c)粒界に偏析し易く、d)NやCとの親和力が強く、反応して化合物をつくり易く、e)これらの化合物はその生成速度と安定性において異なる、ことなどがその特異な挙動の原因である。従って、鋼のB、Al、N量、合金元素の種類と量(特に、Nと反応し易いTiなど)、加工、熱処理履歴などによってその挙動が微妙に影響されることに注意しなければならないことが逐次明らかになった²²⁾。

図8 平衡状態における固溶B, AINとB含有量の関係¹⁹⁾図9 ボロン鋼の熱間圧延後の熱履歴と析出挙動²⁰⁾

4.2.2 低炭素ベイナイト

変態強化組織としてのベイナイトが注目された。例えば、圧延や焼ならしによって製造する鋼において、より高強度を得るには、ベイナイトとの混合組織にするか、またはベイナイトを主とする組織にする必要がある。また、調質鋼においても、特に厚肉となるとしばしばベイナイトの混在は避けられない。すなわち、低炭素低合金鋼のベイナイトの本性を明らかにする必要がある。

大森ら²³⁾は、低炭素低合金鋼のベイナイトの形態学的研究を行い、低炭素ベイナイトを3種類に分類して、B-I, B-II, B-III型(いずれも上部ベイナイト)とした。各々のタイプのベイナイトを模式的に図11に示す。B-Iは平行なベイニチック・フェライトラス間に未変態のオーステナイトが取り残されているもので、この状態から急冷すれば、未変態のオーステナイトはマルテンサイトに変態するか、オーステナイトとして残留する。B-II型はフェライト・ラス間に炭化物の析出を伴うものである。B-III型は前2者とは少しく様相を異にし、フェライト・ラス内に炭化物が析出し

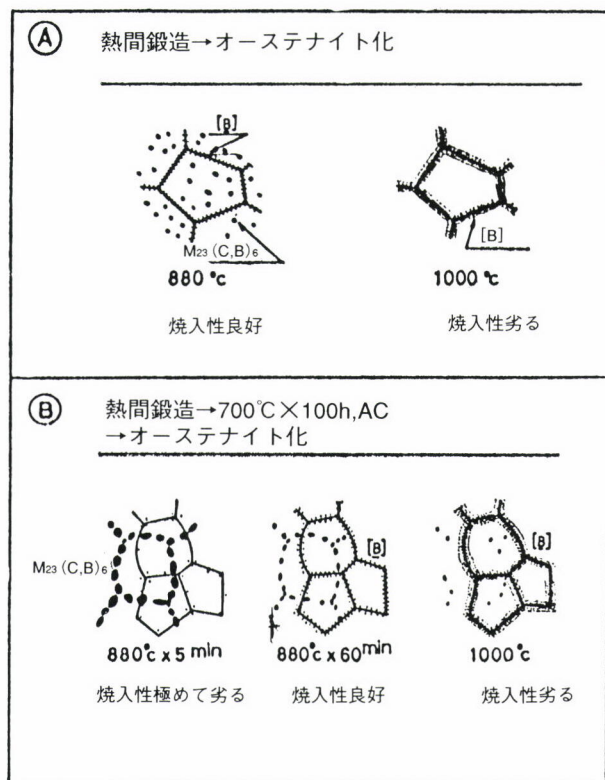


図10 熱履歴による $M_{23}(C,B)_6$ の析出・溶解挙動と焼入性²¹⁾
(低N(0.0020%)－過剰B(0.0030%)鋼)

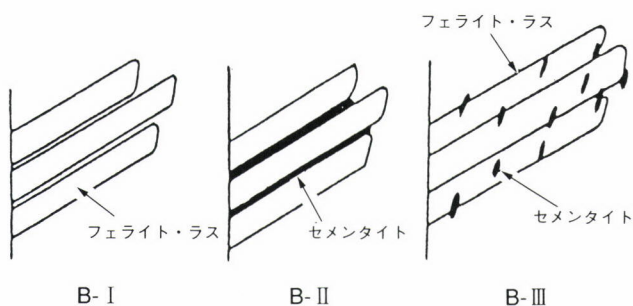


図11 低炭素低合金鋼のベイナイトの3つのタイプ²³⁾

ている。各々の生成領域を、等温変態図の上に示したのが図12である。ベイナイト・ラスの幅の等温変態温度による変化を示すと図13のようになる²⁴⁾。これは、機械的性質にも反映され、例えば等温変態温度を450°Cから400°Cに下げると、ベイナイト組織の強度は上昇し、衝撃遷移温度は低温側にシフトする。低炭素低合金鋼のベイナイトの性質はその生成温度によって大きく異なることが明らかになった。

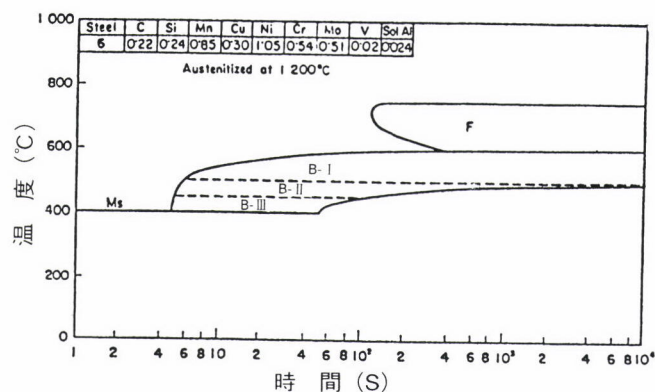


図12 3つのタイプのベイナイトの生成領域（等温変態図上に示す）²³⁾

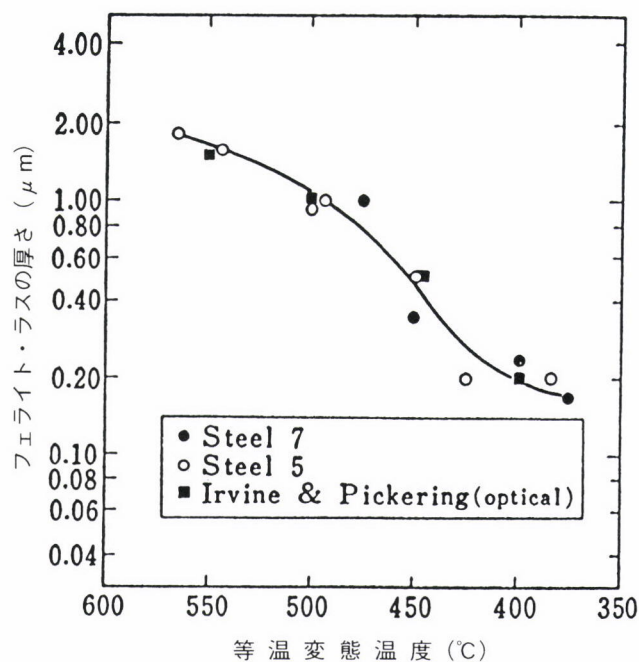


図13 ベイナイト・ラスの厚さと変態温度²⁴⁾

4.2.3 有効結晶粒度

巨視的な変態組織としてではなく、その構成因子、すなわち結晶粒、サブグレインの大きさ、炭化物の析出、分散間隔、転位密度などと鋼の機械的性質の関係について、Conradは²⁵⁾はPetch流の考えを拡張して、多因子の加算的效果を提唱した。焼入れ・焼戻し鋼について組織を構成する多因子の影響を解析したものとして、例えば文献26)～28)を挙げることが出来る^{*12)}。また、焼入れ・焼戻し組織についてもオーステナイト結晶粒に代わって、フェライト・パー

*12 詳細な解説については文献29)参照。

ライト鋼の結晶粒度に相当するものを考えるようになった。すなわち、松田らによる有効結晶粒度の提唱³⁰⁾である。1970年代前半には主として低温靱性を支配する組織因子の研究が盛んに行われた³¹⁻³⁶⁾。有効結晶粒の定義、その測定法にはそれぞれの研究によって差異があるが、いずれも旧オーステナイト結晶粒よりも小さく、これに代わる大傾角境界に区切られた領域が、有効な結晶粒の大きさになるとする考えである。低炭素低合金鋼のマルテンサイトにおいては、これはパケットの大きさとなる。なお、種々の鋼のマルテンサイトの形態学については牧ら³⁷⁾がとりまとめている。

図14は、低炭素・低合金鋼の焼戻しマルテンサイトのほか種々の変態組織について、シャルピー衝撃試験における破面遷移温度と破面単位との関係を示したもので³³⁻³⁵⁾、両者の間にPetch流の関係が成り立つことが示されている。ここで、採用されている破面単位(あるいは、Unit Crack Path^{*13)}という概念は、「(100)面を微小な角度内で共有する領域の大きさ」³⁸⁾で、脆性破面の走査電子顕微鏡観察から求めたものである。すなわち、この領域内では破面単位の境界近傍から破壊が発生し、放射線状に伝播して次の破面単位の境界で停止している³⁸⁾。次いで、大谷ら³³⁻³⁵⁾は、種々の変態組織のうち、マルテンサイトとB-III型ベイナイトの混合組織において破面単位が最も小さく、最も低い優れた遷移温度を与えることを明らかにした。図15は、低炭素Cu-Ni-Cr-Mo-V鋼について、そのCCT図上にこの最適組織を与える最適冷却速度を示したものである。これは、焼入れ冷却時、先行して変態するB-III型ベイナイトによるオーステナイトの分割によるものであることを明らかにした³³⁻³⁵⁾(図16)。これは、高張力鋼開発の合金設計におけるの指針を与えるものであった。

5 研究成果の応用

表2に4章にのべた基礎的課題の研究成果が応用されたプロセスと製品の例を示した。4章では省略したが、残留オーステナイトが低温靱性におよぼす影響についても多くの研究が行われた。9%Ni鋼の焼入れ・焼戻し組織に存在する残留オーステナイトの性格については、Brophy, Millerの研究⁴⁰⁾があるが、これを更に発展せしめ、低温において安定な残留オーステナイトを得る熱処理法についての研究(例えば、41)~43))が行われた。これらの研究は、LNG用低温貯槽の進歩へ貢献した。

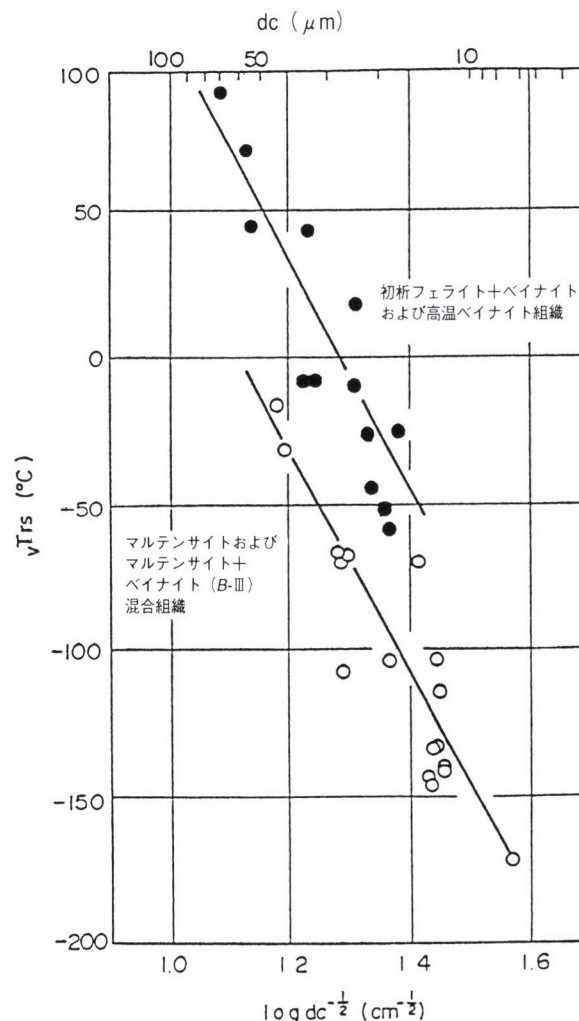


図14 低炭素Cu-Ni-Cr-Mo-V鋼の破面遷移温度と破面単位(dc)の関係³³⁾

6 基礎的研究のその後の発展

高張力鋼板の分野におけるその後の進歩については、前章でも触れたが、極厚化、溶接性能の向上(大入熱の許容、予熱条件の緩和、HAZ靱性の改善)、直接焼入れの実用化、TMCPの適用範囲の拡大(強度範囲の拡張、鋼板から条鋼、線材、ステンレス鋼への適用拡大)、建築用低降伏比型高張力鋼の開発など数多くを挙げることが出来る^{*14)}。

また、ベイナイトについては、その変態機構について内外で多くの研究が行われた。例えば、牧、津崎は一連の研究を行い⁴⁶⁾、「ベイナイト変態は母相オーステナイト中での低炭素領域の形成によって核生成が誘起されたマルテンサイト変態」と結論している。ベイナイトの形態学的研究と

*13 図16にUnit Crack Pathを示す。破面単位はUnit Crack Pathで規定される領域の径である。

*14 制御圧延・制御冷却の過去から現在について最近、小指がとりまとめを行った⁴⁴⁾。また、高張力鋼の溶接熱影響部の靱性など、溶接に関わる問題について、同様に最近上田がとりまとめを行っている⁴⁵⁾。

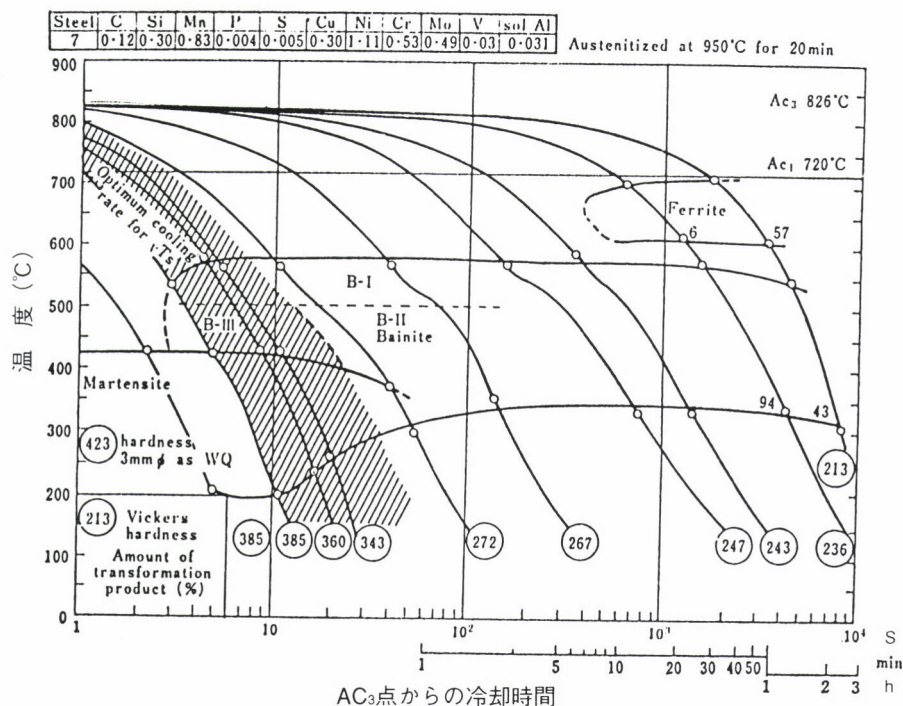
図15 最も優れた靱性を与える焼入れ時最適冷却速度 (CCT図上に表示)³³⁾

表2 基礎的研究課題とその成果の応用

基礎的課題	応用プロセス (例)	応用製品 (例)
オーステナイトの加工・再結晶と微量元素 (Nb, Ti など) の活用	制御圧延 TMCP	造船用降伏点32, 36kg/mm ² 級鋼 大径ラインパイプ用鋼X-65, 70 建築用HT
ボロン (B) の活用		極厚HT80 (橋梁、水圧鉄管など) 圧力容器用焼ならし鋼 溶接HAZの靱性改善
ベイナイト組織	熱延制御冷却*	極厚HT80 (2相混合組織) 熱延ベイナイト鋼板 (590MPa~) 熱延複合組織鋼 (2相、3相-490~590MPa) 自動車用非調質鋼 (780MPa~)
残留オーステナイトとその安定性	2相域熱処理	LNGタンク用厚肉9%Ni鋼 残留オーステナイト利用熱延、冷延鋼板 (590~780MPa)

* ホットストリップミルのランアウトテーブル上の冷却速度を制御することによって組織を制御し、高強度を得るプロセス。熱延仕上温度の制御なども併せて行われる。

して、Bramfittら⁴⁷⁾は主として低炭素低合金鋼(一部、中炭素低合金鋼を含む)の連続冷却時のベイナイトを詳細に観察し、ベイナイトをB₁、B₂、B₃の3つの型に分類している^{*15}。一方、光学顕微鏡下で多様な様相を呈するベイナイト組織についての術語の混乱を解消するため、日本鉄鋼協会・基礎研究会のベイナイト調査部会(部会長：荒木透)は、極低炭素鋼の連続冷却時の中間段階変態組織を、 α_A 、 α_B 、

α_B^0 などに分類することを提案している⁴⁸⁾。

ボロンについては、最近、再び注目されている。例えば、日本鉄鋼協会・材料の組織と特性部会は、第135回(1998.4)春季講演大会予告セッションに“組織と特性におよぼすボロンの影響”を取り上げている。

その後、進歩、発展した多くの基礎的課題の中から、状態図、マイクロアロイングによる結晶粒の制御、オキサイ

*15 B₁、B₂、B₃は、本質的にはそれぞれB-Ⅲ、B-Ⅱ、B-Ⅰに相当する。

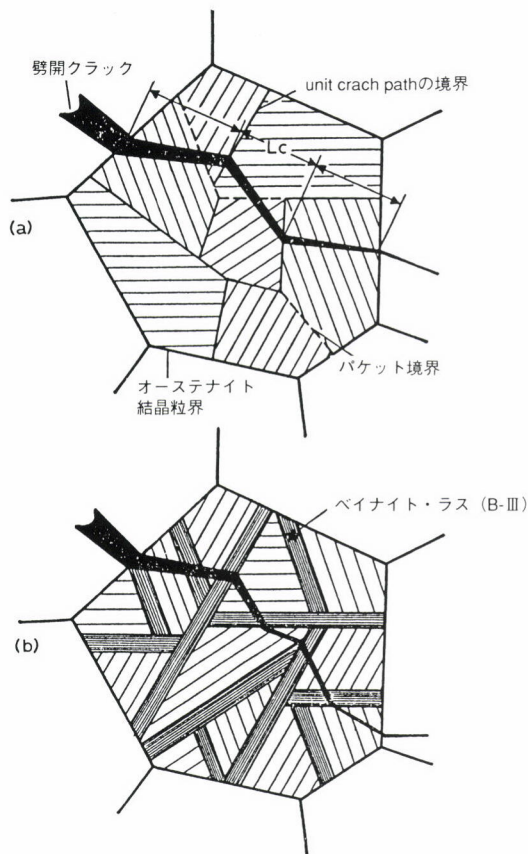


図16 劈開破壊のクラック進展の模式図³⁹⁾
 (a) マルテンサイト
 (b) ベйнаイト／マルテンサイト複合組織
 Lc: unit crack path

ド・メタラジー、鋼の強化機構、材質予測について述べておきたい。

6.1 状態図

日本金属学会、日本鉄鋼協会その他の支持の下、1986年に合金状態図共同研究会が結成され、ASM(アメリカ金属学会)などと国際的な連携を保って、計算機による状態図の作成および編集が行われた⁴⁹⁾。

6.2 マイクロアロイングによる結晶粒の制御

マイクロアロイングとは西沢によると⁵⁰⁾、「結晶粒界、転位などのいわゆる組織のツボを狙って、Nb, Ti, Bなどを効果的に機能させること」である。溶質原子によるドラッグ効果(dragging)、析出原子によるピン留め効果(pinning)、炭化物の粗大化⁵¹⁾、ボロンなどによる毒作用(poisoning)^{*16}について著しく進歩し、多くの知見が得られた⁵⁰⁾。

6.3 オキサイドメタラジー

オキサイドメタラジーは鋼中に微細に分散させた酸化物を析出核として利用することにより、硫化物、窒化物、炭化物などの析出、フェライトの変態を制御しようとする技術である⁵²⁾。例えば複合酸化物をフェライト変態核として利用することにより、大入熱溶接における溶接熱影響部の靱性の改善に適用することができる⁵³⁾。

6.4 鋼の強化機構

マルテンサイトなどの変態組織の強化因子の解析、鉄鋼の強度の限界、高強度化の阻害因子などについて、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で論議が行われ、最近、その結果がとりまとめられている^{54,55)}。

6.5 材質予測

製造プロセスにおける多様な諸条件から鋼の変態、組織、機械的性質を予測する、いわゆる材質予測における著しい進歩がある^{56,57)}。これを可能としたのは、変態、再結晶、析出など物理冶金学のほとんどあらゆる分野における理論の進歩、膨大な実験結果の蓄積に基ずく経験則の導入、コンピュータの利用である。

7 復興・発展期における共研、シンポジウム、国際学会などの果たした役割

応用・開発面におけるユーザー・ファブリケーターとの共研の果たした役割についてはすでに述べた。一方、主として基礎的な面において、学協会における産学の交流が大きく貢献したことはいうまでもない。1960年代半ば以降、とりわけ活発な活動を展開した特筆すべき研究会を表3に挙げた。鉄鋼基礎共同研究会は日本金属学会、日本鉄鋼協会、日本学術振興会の3者の共催によるものである。これらの研究会は時宜を得た研究テーマを取りあげて活発な活動を展開した。内外の学協会の主催した国際会議、シンポジウム、討論会の開催も頻繁であり、これらの場を通じて各国の研究者(例えばU. S. Steel, Bethlehem Steel, Republic Steel, J&L(米)、August Thyssen, Oberhausen, Max-Planck-Inst. für Eisenforschung(独)、KNHS(オランダ)、CNRM(ベルギー)、IRSID(仏)、BSC(英)など)との交流は、研究者へインパクトを与える上でも大きな役割を果たした。国際学会の例を表4に示す。AIME, ASM, BISRAなどが主要な役割を果たしたが、一方、微量添加元

*16 結晶粒の生成場所や、結晶成長のための活性点を覆って、その速度を著しく低下させること⁵⁰⁾。

表3 基礎研究会 (例)

研究会名	主催機関	期 間	部会長または委員長	構 成	報告書
微量元素部会 Nb分科会 V分科会	鉄鋼基礎共同研究会 (日本金属学会、日本 鉄鋼協会、日本学術 振興会)	1966~71	今井勇之進 (東北大)	企・学	1)
強度と靱性部会	//	1969~75	荒木 透 (東大)	//	2)
再結晶部会	//	1970~75	岡部秀夫 (東大)	企・学・研	3)
高温変形部会	//	1977~81	田村今男 (京大)	//	4)
材料研究委員会	日本鉄鋼協会	1970~89	大竹、長嶋 (新日鉄) 天明 (鋼管) 金沢 (新日鉄) 大橋 (川鉄) 邦武 (住金)	企	5)

- 1) 鋼材に及ぼすNbの影響 (講演大会), 鋼材に及ぼすVの影響 (講演大会討論会)
- 2) 鋼の強化組織と延性・靱性 日本鉄鋼協会 他 1975.1
- 3) 鉄鋼薄板の再結晶および集合組織 (I) (II) 1974.7
- 4) 鋼の熱間加工の金属学 日本鉄鋼協会 1985
- 5) 鋼の焼もどし脆性に関する研究 日本鉄鋼協会 1976.3
鋼の焼入性予測に関する研究 日本鉄鋼協会 1980.12
鋼材の破壊靱性に対する高純化の影響 日本鉄鋼協会 1985.11
鉄鋼の変態挙動－実用材料の変態と性質 日本鉄鋼協会 1989.10

表4 主要な国際会議・シンポジウム

名 称	開催年月	開 催 地	主 催 者	プロシー ディングス
Metallurgical Developments in Carbon Steels	1963.5	Harrogate, England	BISRA, ISI	1)
Transformation and Hardenability in Steels	1967.2	Michigan, USA	Climax Molybd. Co. Univ. of Michigan	2)
Strong Tough Structural Steels	1967.4	Scarborough, England	BISRA, ISI	3)
Strength of Metals and Alloys	1967.9	東京	日本金属学会	4)
Steel-Strengthening Mechanisms	1969.5	Zürich, Switzerland	Climax Molybd. Co.	5)
Low-Alloy High Strength Steels	1970.5	Nuremberg, Germany	Metallurg Co. s	6)
Toward Improved Ductility and Toughness	1971.10	京都	日本鉄鋼協会、日本金属 学会、Climax Molybd.	7)
Microalloying 75	1975.10	Washington, D.C., USA	Union Carbide Corp.	8)
The Hot Deformation of Austenite	1975.11	Cincinnati, USA	TMS-AIME	9)
Materials Engineering in the Arctic	1976.9	St. Jovite, Canada	ASM	10)
Alloys for the Eighties	1980.6	AnnArbor, USA	Climax Molybd. Co.	11)
Thermomechanical Processing of Microalloyed Austenite	1981.8	Pittsburgh, USA	TMS-AIME	12)

Proceedings :

- 1) Metallurgical Developments in Carbon Steels, The Iron and Steel Inst., 1963
- 2) Transformation and Hardenability in Steels, Climax Molybdenum Co., 1967
- 3) Strong Tough Structural Steels, The Iron and Steel Inst., 1967
- 4) Trans. JIM, Supplement 9 (1968)
- 5) Steel-Strengthening Mechanisms, Climax Molybdenum Co., 1969
- 6) Symposium : low alloy high strength steels, The Metallurg Co., 1970
- 7) 鋼の強靱性 Toward Improved Ductility and Toughness, Climax Moly. Der. Co., 1971
- 8) Proceedings of an International Symposium on High-Strength, Low-Alloy Steels, ed. M. Korchinsky, Union Carbide Corp, New York, N.Y., 1977
- 9) The Hot Deformation of Austenite, ed. J. B. Ballance, TMS-AIME, New York, 1977
- 10) Materials Engineering in the Arctic, ed. M. B. Ives, ASM, 1977
- 11) Alloys for the Eighties, ed. R. Q. Barr, Climax Molybd Co., 1980
- 12) Thermomechanical Processing of Microalloyed Austenite, ed. A. J. DeArdo, G. A. Ratz, P. J. Wray, TMS-AIME, 1982

素の供給者であったClimax Molybdenum, Union Carbide, The Metallurg, CBMMなども積極的な活動を展開した。日本鉄鋼協会、日本金属学会が共催し、Climax-Mo-lybdenum Co. が後援して1970年に京都で開催した“鋼の強靱性(Toward Improved Ductility and Toughness)”の国際会議、Union Carbide Corp. の主催した“Microalloying 75”は、一時代を画したものとえよう。

また、学協会の主催する講座、講習会は研究・開発に携わる者にとって広く役立つものであった。例えば、日本鉄鋼協会の西山記念技術講座は*17、その時々により時宜を得たテーマを選んで開催されたが、1968年の第1回以来、1975年末までに開催回数35回を数えた。

8 おわりに

戦後復興・発展期における高張力鋼をめぐる物理冶金的研究について概観した。急激な成長期にあっては、技術課題に対してややもすれば拙速、表面的処理に陥り易いことは否めないが、科学的な基礎の裏付けがなくては、問題の抜本的解決には到らないし、また新たな発展もない。最近では、物理分析的手法も進歩し、データは蓄積され、コンピュータの活用は普及している。基礎的な課題解決の土壌は培われている。従来の懸案の解決、新たな発展が期待される。

復興・発展期においては、発表論文、国際会議などを通じて先進諸国に学ぶところが多かった。その後の鉄鋼業の各国における消長、設備導入におけるわが国の有利な立場もあって、急速に先進諸国のレベルに追いつき、この分野において世界をリードするに到った。しかし、1970年代半ばから、わが国の鉄鋼生産は頭打ちとなり、成熟期に入るとされて、すでに久しい。後進諸国の追い上げも急であり、わが国は今やかつての先進諸国と同様の立場に置かれている。一方、鉄鋼材料に対するニーズは高度化している。今、研究者、とりわけ研究指導者に最も求められものは、明確なフィロソフィーに基づいた魅力あるターゲットの設定であろう。環境問題、資源問題などに対処するためには、従来よりもより総合的なアプローチが必要となる。いろいろな境界を超えた共同研究の必要性はますます増大しよう。

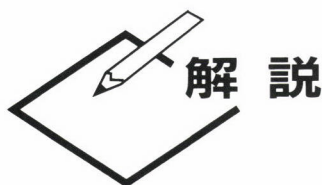
参考文献

- 1) 高張力鋼：鋼材倶楽部新製品紹介編集小委員会，JSSC，3 (1967)，14，25.
- 2) 堀川一男：日本鋼管技報，No.46；金属，51 (1981)，3.
- 3) 荒木 透：金属，50 (1980)，1，73；鉄と鋼，67 (1981)，16，2573.
- 4) 柴田浩司：鉄と鋼，67 (1981)，7，1026.
- 5) 鉄鋼主要分野における製品開発経緯と今後の展望，(社)鋼材倶楽部，(1988)，7.
- 6) 藤野 博ほか高張力鋼板ワーキンググループ：特殊鋼，38 (1989)，1，50.
- 7) 成田 貴一：日化誌，75 (1954)，1041；77 (1956)，1536；78 (1957)，144.
- 8) 盛 利貞，時実正治，中嶋由行，佐伯俊秀：鉄と鋼，51 (1965)，2031.
- 9) 千野博孝，和田 要：製鉄研究，N. 251 (1966)，5817.
- 10) L. S. Darken, R. P. Smith and E. W. Filler：Trans. AIME，191 (1951)，1174.
- 11) K. Bungardt, K. Kind and W. Oelsen：Archiv f. Eisenhüttenw. 27 (1956)，61.
- 12) R. W. Fountain, J. Chipman：Trans. AIME，224 (1962)，599.
- 13) K. J. Irvine, F. B. Pickering and T. Gladman：J. Iron Steel Inst.，205 (1967)，161.
- 14) 中村 素，前田豊生，栗山良員，雑賀喜規，深川宗光：石川島播磨技報，3 (1963)，117.
- 15) 関根寛，丸山忠克，川島善樹果：鉄と鋼，59 (1973)，S636.
- 16) 小指軍夫：制御圧延と厚鋼板の機械的性質，第36・37回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会，(1975)，63.
- 17) C. Ouchi, T. Sampei, T. Okita and I. Kozasu：The Hot Deformation of Austenite ed. J. B. Balance, AIME，(1977)，316.
- 18) 牧 正志：熱処理，29 (1989)，278.
- 19) 土生隆一，宮田政裕，関野昌蔵，合田 進：鉄と鋼，60 (1974)，1470.
- 20) 渡辺征一，大谷泰夫：鉄と鋼，62 (1976)，1851.
- 21) 渡辺征一，大谷泰夫，邦武立郎：鉄と鋼，64 (1978)，113.
- 22) 渡辺征一：日本金属学会会報，19 (1980)，804.
- 23) 大森靖也，大谷泰夫，邦武立郎：鉄と鋼，57 (1971)，1690.
- 24) Y. Ohmori, H. Ohtani and T. Kunitake：Trans. ISIJ，11 (1971)，250.
- 25) 大森靖也，大谷泰夫，邦武立郎：鉄と鋼，58 (1972)，1076.

*17 川崎製鉄(株)西山弥太郎氏記念のために寄贈された資金によって運営される講座。現在も続いている。

- Y. Ohmori, H. Ohtani and T. Kunitake : Trans. ISIJ, 12 (1972), 146.
- 25) H. Conrad : Iron and Its Dilute Solid Solutions, ed. C. W. Spencer, F. E. Werner, Interscience Publishers, (1963), 314.
- 26) A. R. Cox : J. Iron Steel Inst., 205 (1967), 55 ; 205 (1967), 203.
- 27) T. Kunitake : Trans. ISIJ, 7 (1967), 254.
- 28) 門間改三, 須藤 一, 上原紀興 : 日本金属学会誌, 32 (1968), 143.
- 29) 邦武立郎 : 鉄と鋼, 54 (1968), 710 ; 鋼の調質組織の強度 セミナー「鉄鋼における変態と析出」日本金属学会, (1968) 92.
- 30) S. Matsuda, T. Inoue and M. Ogasawara : Trans. JIM, 9 (1968), 343.
- 31) M. J. Roberts : Met. Trans. 1 (1970), 3287.
- 32) 松田昭一, 井上 泰, 三村 宏, 岡村義弘 : Symposium "Toward Improved Ductility and Toughness", Kyoto, Oct, (1971).
- 33) 邦武立郎, 寺崎富久長, 大森靖也, 大谷泰夫 : Symposium "Toward Improved Ductility and Toughness" Kyoto, Oct, (1971).
- 34) 大谷泰夫, 寺崎富久長, 邦武立郎 : 鉄と鋼, 58 (1972), 434.
- 35) H. Ohtani, F. Terasaki and T. Kunitake : Trans. ISIJ, 12 (1972), 118.
- 36) S. Matsuda, T. Inoue, H. Miura and Y. Okamura : Trans. ISIJ, 12 (1972), 325.
- 37) 牧 正志, 田村今男 : 鉄と鋼, 67 (1981), 852.
- 38) 寺崎富久長, 大谷泰夫 : 鉄と鋼, 58 (1972), 293.
- 39) Y. Ohmori, H. Ohtani and T. Kunitake : Metal Science, 8 (1974), 357.
- 40) G. R. Brophy, A. J. Miller : Trans. ASM, 41 (1949), 1185.
- 41) 長嶋晋一, 大岡耕之, 関野昌蔵, 三村 宏, 藤島敏行, 矢野清之助, 桜井 浩 : 鉄と鋼, 58 (1972), 128.
- 42) 桜井 浩, 三村 宏, 長嶋晋一 : 残留オーステナイトの挙動と功罪 鉄鋼基礎共同研究会・強度と靱性部会編, (1972), 5.
- 43) 矢野清之助, 桜井 浩, 三村 浩, 脇田信雄, 小沢 勉, 青木宏一 : 鉄と鋼, 59 (1973), 752.
- 44) 小指軍夫 : 制御圧延・制御冷却, 叢書 鉄鋼技術の流れ 4, 地人書館, (1997).
- 45) 上田修三 : 構造用鋼の溶接, 叢書 鉄鋼技術の流れ 9, 地人書館, (1997).
- 46) 牧 正志, 津崎兼彰 : 低炭素鋼のベイナイト組織と変態挙動に関する最近の研究, ベイナイト調査研究部会編, 日本鉄鋼協会, (1994).
- 47) B. L. Bramfitt, J. G. Speer : Met. Trans. 21A (1990), 817.
- 48) 鋼のベイナイト写真集-I, 日本鉄鋼協会, (1992).
- 49) 西沢泰二 : 日本金属学会会報, 26 (1987), 227.
- 50) 西沢泰二 : 鋼における微量添加元素の機能, 第106回講演大会討論会講演概要, 日本鉄鋼協会, (1983), A289.
- 51) M. Wey, T. Sakuma and T. Nishizawa : Trans. JIM, 22 (1981), 733.
- 52) J. Takamura, S. Mizoguchi : Proc. Sixth Int. Iron and Steel Congress, 1 (1990), 591.
- S. Mizoguchi, J. Takamura : ibid., 1 (1990), 598.
- T. Sawai, M. Wakoh, Y. Ueshima and S. Mizoguchi : ibid., 1 (1990), 605.
- 53) 若生昌光 : まてりあ, 35 (1996), 1311.
- 54) 鉄鋼の高強度化の最前線, 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, 日本鉄鋼協会, (1995).
- 55) 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, 日本鉄鋼協会, (1997).
- 56) 鉄鋼材料の材質予測・制御技術の現状と将来, 第131・132回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, (1989).
- 57) 矢田 浩, 瀬沼武秀 : 日本金属学会会報, 29 (1990), 430.

(1998年4月2日受付)



電磁鋼板の二次再結晶における「Gossのミステリー」

早川康之

川崎製鉄(株) 技術研究所 主任研究員

Yasuyuki Hayakawa

“Mystery by Goss” in The Secondary Recrystallization of Electrical Steel

1 はじめに

昨年末、地球温暖化防止国際会議が京都において開催されたように、環境問題が注目を浴びている。鉄鋼業と言えばエネルギー多消費型産業の最たるものと位置付けられている場合が多い。しかし鉄鋼材料の一品種である電磁鋼板は、電力エネルギーの変換や輸送に必要不可欠な変圧器やモーターの鉄心用材料であり、電力需要の定常的な増加を背景としてこれらの機器の省エネルギーに貢献している。電磁鋼板の技術開発の主目的は磁気特性の向上にあり、連綿たる技術開発の成果により電力エネルギーの損失は大きく減少し続けている。

電磁鋼板の製品開発の歴史および製造法の全体像は岡見氏の解説¹⁾を参照していただき、本稿では学術的な側面から方向性電磁鋼板の製造に特徴的な技術思想を解説する。

2 方向性電磁鋼板の二次再結晶

言葉の定義上「二次再結晶」と使用頻度の比較的高い通常の「再結晶」を比較した場合、語尾は共通するものの内容的には全く異なる。再結晶は加工組織から歪のない新しい再結晶核が形成され、周囲の歪を多く含む加工組織の側へ成長をする現象であり、再結晶は加工組織に蓄えられた歪エネルギーを解放して進行する。二次再結晶は通常の再結晶が完了した後、さらに高温で長時間焼鈍することにより、ある結晶粒のみが爆発的に成長し、他の多くの結晶粒はほとんど成長していない現象である。再結晶が完了した後で二次的に起こるという意味で二次再結晶と呼ばれている。ある結晶粒の爆発的な成長にともない、単位体積あたりの結晶粒の総数は大きく減少する。結晶粒数が減少することは、粒界面積が減少して粒界エネルギーの総量が減少することを意味する。すなわち、ある結晶粒が爆発的に成

長する際に粒界エネルギーの総量が減少することが二次再結晶の駆動力であり、再結晶ではなく粒成長の一形態である。そのため二次再結晶は異常粒成長とも呼ばれるが、同じ現象を積極的な意味合いで使用する電磁鋼板関係者は前者を、機械強度が低下するために忌み嫌う薄板関係者は後者を使うようである。さらに電磁鋼板関係者は、二次再結晶が何らかの原因で起こらずに、通常の意味での正常粒成長が起きてしまった場合に「異常粒」という言葉を俗に使用しており紛らわしいが、どちらの状態を正常と考えているかの違いが端的に表われている。

方向性電磁鋼板は、0.2~0.3mm程度の板厚で、板厚より大きい数mmから数10mmの結晶粒径を有する鋼板に、絶縁被膜コーティングを施してある製品である。鋼板側において特徴的な点は、結晶粒径が μm 単位であるほとんどの鉄鋼材料に比較して例外的に大きいことだけでなく、結晶方位が $\{110\}<001>$ 方位に高度に配向していることにある。図1に二次再結晶組織の写真と、図2に二次再結晶粒方位の配向度合を示すが、ほぼ $\{110\}<001>$ 方位からのずれ角が5度以内に収まっている。この結晶配向度を面方位強度で比較してみると、結晶方位制御が重要である深絞り用鋼板の $\{111\}$ 組織への集積度の5倍以上である。 $<001>$ 方向は α 鉄の磁化容易軸であり、方向性電磁鋼板は圧延方向に容易に磁化されるために、電磁誘導を利用した電力変換に伴って発生する熱によるエネルギー損失が小さい。

電磁鋼板の製造技術はArmco社のN. P. Gossにより1930年代に発明され²⁾、その功績に因んで、 $\{110\}<001>$ 方位は



←100mm→

図1 二次再結晶粒マクロ組織

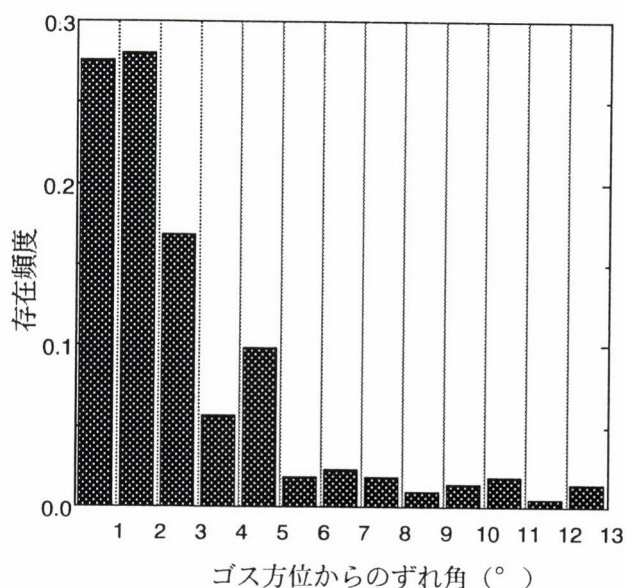


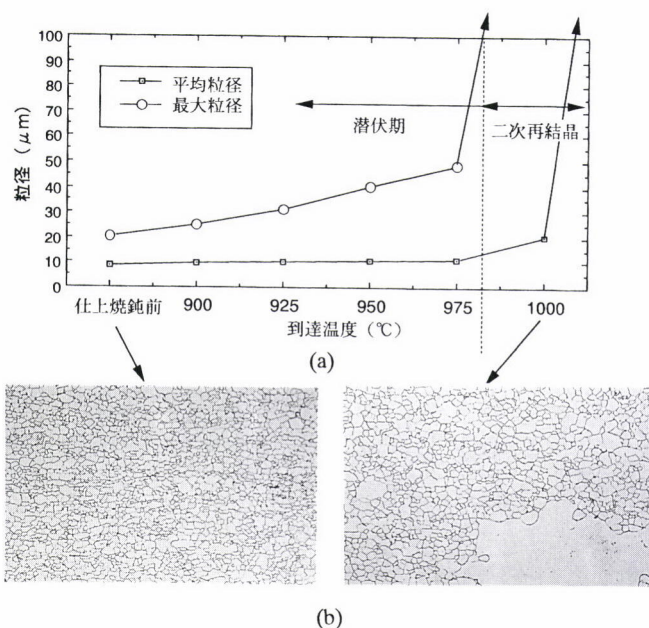
図2 二次再結晶粒の方位分布

ゴス方位と称されている。方向性電磁鋼板の製造工程は、最終板厚まで冷間圧延によって仕上げ、焼鈍によって圧延歪を解放して再結晶させる工程までは通常の冷延鋼板の製造工程との差異はわずかである。方向性電磁鋼板に固有な点は、 $10\mu\text{m}$ 程度である再結晶粒を前述した二次再結晶により数 10mm にまで成長させる仕上焼鈍技術にある。

仕上焼鈍において、再結晶後の鋼板はコイル状に巻取られた状態で、数10時間の時間をかけて最終的には 1200°C 程度にまで昇温される。仕上焼鈍中の温度と結晶粒径の関係の一例を図3 (a)に示す。この場合 975°C 付近で二次再結晶を開始して、 1025°C 到達時には完了した。二次再結晶の開始直前までには、二次再結晶粒の発生は全くなく緩慢な粒成長のみが起こる時期があり潜伏期と呼ばれている。素材の化学成分や処理工程により変動はあるが、二次再結晶を開始して、ゴス方位粒が大きく成長するのはほぼ $850\sim 1050^\circ\text{C}$ 程度の領域であり、最終的な 1200°C 付近までの昇温は不純物元素の除去の目的のために必要である。仕上焼鈍途中でゴス方位粒が他粒を食い進んで成長している断面の状態を図3 (b)に示す。成長中のゴス粒以外の結晶粒はほぼ仕上焼鈍前の粒径を保っている。

3 Gossのミステリー

さて何故二次再結晶が起こり、しかも二次再結晶する方位はゴス方位のみに限るのか？という謎は俗に「Gossのミステリー」として何十年も未解決のまま電磁鋼板研究者の興味を引き付けている。

図3 (a) 仕上焼鈍中での粒成長挙動
(b) 仕上焼鈍中の断面組織の変化

初期に提唱されている説は、大きい粒は小さい粒を食うという「弱肉強食」とも言うべき「サイズ効果」に基づくものが多く、ゴス方位粒は初めから他方位の粒より大きい³⁾、あるいは数個の集合体として存在していて最初にそれらが合体して大きなゴス粒となる⁴⁾と言う説がある。もちろんゴス方位粒がサイズ効果を持てば成長に有利ではあるが、その効果のみで二次再結晶するのか？という点の証明が重要である。サイズ効果説による二次再結晶は、計算機シミュレーション⁵⁾や、解析的な理論⁶⁾でも否定されており旗色は悪い。最近の研究ではゴス方位と食われる側の粒との方位関係を論じる説が主流となっている。

本稿では結晶方位粒測定技術の新兵器とも言えるElectron Back Scattering Pattern (EBSP)⁷⁾を使用して「Gossのミステリー」の解明に迫ってみる。集合組織研究の分野ではX線回折法を応用して得られた、統計的な結晶方位存在量のデータを基に議論することが多い。例えば、ゴス方位の存在量はどのくらいか？マトリックス粒は特定方位への集積を示しているか？などの情報を統計的に得ることは可能である。しかし二次再結晶を理解する上では、粒同士の食い合いがどのように進んでいるかを調査しなくてはならない。従来のX線回折で得られる統計的なデータからは、隣接粒の方位関係等、二次再結晶を理解する上で直接的に必要な情報を得ることはできない。そのため結晶粒一つ一つの方位を測定する技術が必要となる。各種測定法についてのまとめを表1に示す。方位精度及び測定領域の点で粒径数 μm である再結晶粒の方位測定にはEBSPが優れている。

方位測定精度や測定可能な最小結晶粒径も問題ではあつ

表1 結晶粒方位測定法の比較

方法	EBSP法 (Electron Back Scattering Pattern)	CBED法 (Convergent-Beam Electron Diffraction)	ECP法 (Electron Channeling Pattern)	Kossel 法	直視式Laue法
原理	電子線回折 (菊地線)	収束電子回折	電子チャネリング図形 (擬菊地線)	Kossel 図形 (発散X線)	X線回折ラウエ斑点
方位精度	0.2°	3~8°	0.5°	0.5°	0.5°
分解能	0.2μm	1μm	10μm	5μm	200μm
参考文献	7)	8)	9)	10)	11)

たが、方位測定にかかる時間が膨大であった点が最も深刻であり、最近になるまでは、充分な量の測定データが蓄積されていなかった。方位解析をするのに電子線回折パターン等を写真に撮影してから、一枚ずつ手解析を行ったのはそれほど遠い昔ではなく、7、8年前までは筆者の所属する研究室でも良く見られた光景である。現在市販されているEBSPを使用すれば、直径0.2μm程度の微小領域での方位測定を0.2°の精度で1点1秒足らずで行える。これはそれまで1年かかって行った手解析による数百個の方位解析を数時間足らずの自動スキャンで実現できるという画期的な技術である。EBSPの原理自体は比較的古くから知られていたが、コンピューターによる画像処理技術、CCDカメラの発達等のハイテク技術の進歩により飛躍的に装置性能が向上した。自動測定された結晶方位はマッピングされるため、視覚的に結晶方位を理解することも可能である。

まずGoss方位粒は再結晶粒中にどの位存在するのかを、仕上焼鈍前の状態についてEBSPを用いて調査した結果を図4に示す。二次再結晶粒方位として存在するGoss方位からのずれ角が5°以内の粒を示したものである。図4中には約1500個の結晶粒を含んでいるが、Goss方位粒は一つしか存在しない。図4は特にGoss方位粒の少ない部分を取り出した訳ではなく、X線回折により統計的に調べてもずれ角が5°以内のGoss方位粒の存在頻度はわずかに1/2000程度

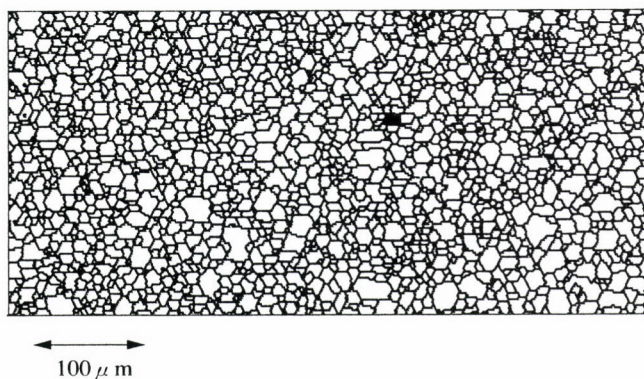


図4 仕上焼鈍前におけるGoss方位粒の存在頻度
(■：Goss方位粒)

でしかない。二次再結晶粒の大きさは約10mm×10mm×0.2mmのオーダーであり、再結晶粒径を10μmとすれば、実に選択確率は $1/1000 \times 1000 \times 20 = 1/2000$ 万である。それ故1/2000の割合でGoss方位粒が存在しても、さらにその中で1万倍の競争率に勝った一つのGoss方位粒のみが二次再結晶するという計算となる。このように熾烈極まる選択が、自然界における自由競争において再現性良く行われ、工業製品として生産されているという事実はまさに驚異的であり「Gossのミステリー」と呼ばれるのにふさわしい。

4 ミステリーの解明に向けて

さてEBSPを用いて二次再結晶途中の状態を解明してみよう。図5は二次再結晶途中の状態をEBSPで方位測定した結果から作成されたマイクロ組織のイメージである。Goss方位粒を■で示すが、マトリックス粒を食って成長中である。

成長中のGoss方位粒と他の結晶粒の間の方位関係と、粒界移動が遅いマトリックス粒間の方位関係には何らかの違いがあるものと考えられる。EBSPの普及に伴って粒界性格分布という言葉がしばしば登場するようになった。粒界は5つの自由度を持つ変数で記述される複雑な系であるが、二つの方位を重ね合わせるのに必要な回転角として定義される回転角と回転軸が最も注目されることが多い。図5

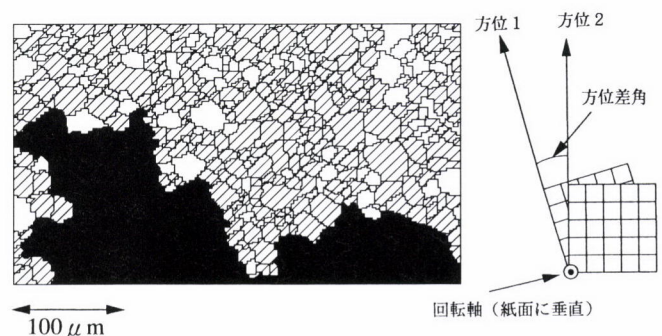


図5 EBSP測定により得られた二次再結晶途中におけるマイクロ組織イメージ
(■：Goss方位二次再結晶粒、斜線部：Goss方位粒と方位差角20-45°をなす結晶粒)

中に方位差関係を模式的に示している。この回転角と回転軸の選び方は立方体格子の場合には24組存在するが、そのうち最小の回転角を方位差角と定義するMackenzieの方法¹²⁾が粒界性格分布の解析で多く用いられている。Mackenzieの方法では方位差角の範囲は $0^{\circ} \sim 63^{\circ}$ である。また小傾角粒界と呼ばれる範囲は方位差角 15° 以下の粒界を指す。

図6にゴス方位二次再結晶粒の周囲の粒界における方位差角分布とマトリックス粒間の方位差角の分布を比較した結果を示すが、両者には明瞭な違いが認められる。ゴス方位粒周囲には方位差角 $20^{\circ} \sim 45^{\circ}$ の粒界が約8割を占め、方位差角が小さい粒界と方位差角が 45° よりも大きい粒界が2割しかない。これに対し、マトリックス粒間の粒界には、方位差角 $20^{\circ} \sim 45^{\circ}$ の粒界は約4割でしかなく、方位差角が小さい粒界と方位差角が 45° よりも大きい粒界が6割もある。このような方位差角 $20^{\circ} \sim 45^{\circ}$ の粒界の存在頻度の特徴がゴス方位に固有であるかどうかを、仕上焼鈍の前の組織について、各方位粒について調査した。その結果を図7に示すが、数ある方位の中で、ゴス方位粒について方位差角 $20^{\circ} \sim 45^{\circ}$ の粒界の存在頻度が最も高い。

このようなゴス方位結晶粒周囲の方位差角分布の違いにより二次再結晶する機構に関しては、方位差角 $20^{\circ} \sim 45^{\circ}$ の粒界の移動速度が大きいと考えることが妥当であり¹³⁾、実験事実として確認されつつある¹⁴⁾。また粒成長の計算機シミュレーション¹⁵⁾でも、定量的に二次再結晶が上記仮定で起こることも示されている。図5中にはゴス方位粒と方位差角 $20^{\circ} \sim 45^{\circ}$ である粒を斜線で示す。全体の8割を超えるマトリックス粒が斜線で塗られており、ゴス方位粒はこれらの

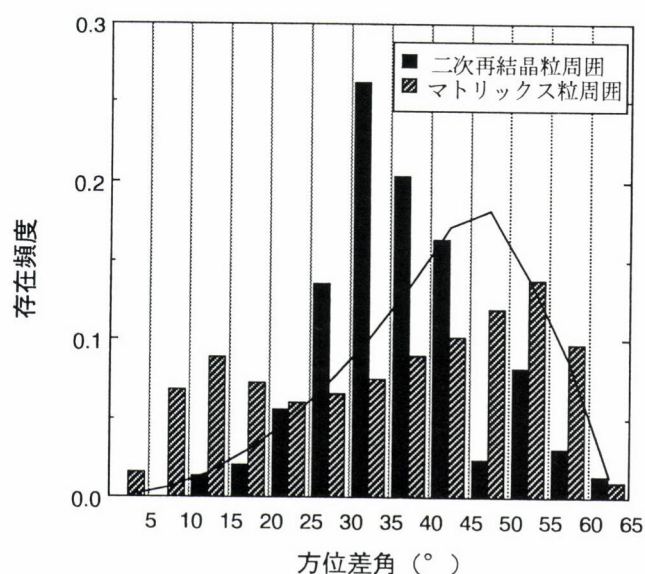


図6 EBSD測定により得られた二次再結晶途中における粒界方位差角分布
(実線はランダム組織における理論値)

粒を優先的に食って成長することが視覚的に理解される。

すなわち「Gossのミステリー」は図6に示されるように、移動速度が大きい方位差角 $20^{\circ} \sim 45^{\circ}$ の粒界をゴス方位結晶粒が最も多く持つという、二次再結晶前での粒界性格の分布の特徴に深く関連しているものと言える。このような粒界性格分布を実現してゴス方位結晶粒を二次再結晶させるために、適正な冷間圧延圧下率と再結晶条件等の製造条件を選択するのである。

ただし方位差角 $20^{\circ} \sim 45^{\circ}$ の粒界の移動速度が大きい理由の解明については、特定の方位差角と $\langle 110 \rangle$, $\langle 100 \rangle$, $\langle 111 \rangle$ のような低指数の回転軸を持つ「対応粒界」の寄与であるとする立場^{16,17)}と、この方位差角に属する粒界が「高エネルギー粒界」であるという見解¹⁸⁾に分かれている。今後EBSDを用いた定量的な粒界性格分布の解析により精密にミステリー解明が進むものと思われる。

5 おわりに

今回は触れなかったが、二次再結晶にはインヒビターと呼ばれる、微細な析出物の存在が必要不可欠であり、方位差角 $20^{\circ} \sim 45^{\circ}$ の粒界が動きやすいという現象も析出物との相互作用を考慮して理解すべきでありこの観点からのアプローチも重要である。

参考文献

- 1) 岡見雄二：ふえらむ，2 (1997)，53.
- 2) N. Goss：U. S. Patent, 1, 965, 559 (1934)
- 3) H. C. Fiedler：J. Appl. Phys., 29 (1958)，361.
- 4) 井口征夫，前田千寿子，伊藤 庸：鉄と鋼，70 (1984)，

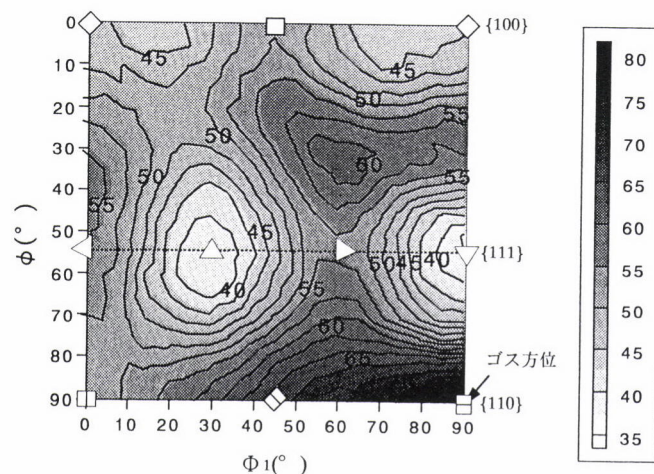
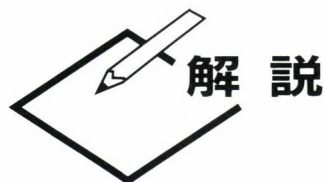


図7 仕上焼鈍前における方位差角 $20^{\circ} \sim 45^{\circ}$ の粒界の各方位の結晶粒に対する存在頻度
(オイラー空間 $\phi_2 = 45^{\circ}$ 断面で表示)

- 2057.
- 5) D. J. Srolovitz, M. Anderson, Sahni, and G. S. Grest : *Acta metall.*, 33 (1985), 2233.
 - 6) C. V. Thompson, H. J. Frost and F. Spaepen, *Acta metall.* 35 (1987), 887.
 - 7) B. Adams, S. Wright and K. Kuroki : *Met. Trans.*, 24A (1993), 819.
 - 8) 田中通義 : 日本結晶学会誌, 21 (1979), 121.
 - 9) D. C. Joy and D. E. Newbury : *J. Mat. Sci.*, 7 (1972), 714.
 - 10) D. L. Vieth and H. Yakowitz : *Rev. Sci. Instr.*, 39 (1968), 1929.
 - 11) 鶴岡一夫, 阿部忠広, 深尾良郎 : 川崎製鉄技報, 1 (1969), 290.
 - 12) J. K. Mackenzie and M. J. Thompson, *Biometrika*, 44 (1957), 205.
 - 13) D. B. Titorov : *Phys. Met. Metall.*, 35 (1973), 165.
 - 14) Y. Hayakawa, M. Muraki and J. A. Szpunar : *Acta mater.*, 46 (1998), 1063.
 - 15) Y. Hayakawa and J. A. Szpunar : *Acta mater.*, 45 (1997), 4713.
 - 16) M. Shinozaki, I. Matoba and T. Kan and T. Gotoh : *Trans., JIM*, 19 (1978), 85.
 - 17) J. Harase, R. Shimizu and D. J. Dingley : *Acta metall.* 39 (1991), 763.
 - 18) Y. Hayakawa and J. A. Szpunar : *Acta mater.*, 45 (1997), 1285.

(1998年5月6日受付)



宇宙開発における構造材料の現状と将来

森野美樹

Yoshiki Morino

宇宙開発事業団 技術研究本部
主任開発部員

Structural Materials in Space Development
— Present Status and Future Potential of Composite Material Applications —

1 はじめに

宇宙開発は地上の物体を地球周回軌道に投入するロケット技術の確立により可能となった。地球の重力に打ち勝ってロケットを打ち上げ、軌道に投入するためには大きな推進エネルギーを必要とする。効率的に宇宙開発を進めるにはより軽く、より強い材料でロケットを製作して軌道投入可能重量を大きくする必要がある。また打ち上げる搭載物もできるだけ軽く作り、より多くのものを宇宙に輸送する必要がある。現在の技術では地球周回軌道に到達するまでに、何段かのロケットを投棄して上段のみを軌道に到達させる多段式の打ち上げ方式を取らざるを得ないが、このためロケットのほとんどの部分は使い捨てとなり、搭載物の単位重量当たりの打ち上げコストも高くなる。現在米国で活躍中のスペースシャトルは機体の大部分を回収することにより宇宙輸送コストの削減をねらった宇宙輸送機であったが、開発当初の目論見と異なり、整備費用を含めた運用コストが予想外に高くなり、従来の使い捨てロケットよりもかえって大幅な打ち上げコスト増となっている。このため、打ち上げコストを現在の使い捨て型ロケット（低軌道で1kg当たり約100万円）の10分の1以下に押さえることを目標として、1段式で軌道まで到達したのち搭載物を放出してから再び地上に帰還する完全再使用型の宇宙輸送機を目指した研究開発が世界的に進んでいる。

このように大幅な技術向上を実現するには材料面での画期的な技術革新が不可欠である。また単一の材料では性能向上への寄与が限られたものになるため、異種の材料を組み合わせて要求される機能を満足する複合材料の技術が積極的に活用されようとしている。最もポピュラーな構造用複合材料は強度・弾性率の大きい各種の繊維状材料を樹脂、金属、セラミックなどで固めた形態である。このなかでも宇宙用途には炭素繊維を用いた樹脂系複合材料(CFRP)が

最も広く適用されており、今後も航空宇宙分野のみならず、民生分野への適用拡大が進むとともに、性能・機能の向上が図られていくものと思われる。本稿では、このような複合材料による軽量化、高性能化に焦点を当てて、現状の技術水準および最近の宇宙分野の材料応用技術の趨勢を述べてみたい。ただし、筆者の知識・経験の範囲内で述べるため、主として宇宙輸送系分野のCFRPの話題を中心とした内容になっていることをお断りしておきたい。

2 現在のロケット・人工衛星の材料

現在の使い捨て型ロケットの構造材料は、基本的には1960年代の月着陸を目指した米国のアポロ計画の超大型ロケットサターン5型ロケットの技術を継承している。サターン5型ロケットの第1段から第3段までの構造材料はほとんどがアルミニウム合金であった。日本の現在の主力ロケットH-2ロケット(図1に示す)の構造体もコア機体(中央の液体ロケット第1段、第2段)の大部分はアルミニウム合金で製作されている。構造体の大部分を占める極低温推進薬タンクでは溶接性のよい2219合金が用いられている。この合金はヨーロッパのアリアン5型ロケットの1段やスペースシャトルの外部タンクなどに用いられ、極低温推進薬タンク用としての現在の標準材料ともみられる。アル

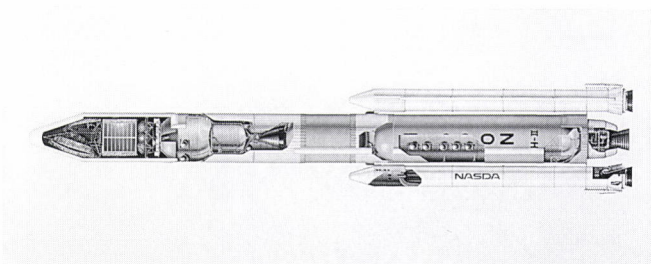


図1 H-2ロケット構造図

ミニウム合金タンクは切削加工、曲げ加工、熱処理、耐食処理、溶接、リベット結合等によって組み立てられ、最も成熟したロケット材料といえる。複合材料の適用は非常に限定されており、軽量化要求の高い上段の一部の構造や、衛星の軌道変換用の固体ロケットモータケースをカーボンやアラミド繊維によるフィラメントワインディングで製作していることが最近までの主な例であった。特殊な用途としては極低温推進薬タンクの共通隔壁のハニカムコアとしてフェノール樹脂系CFRPの使用例、固体ロケットモータノズルや再突入カプセルのアブレーション耐熱材としての使用例などがある。しかし、複合材技術の成熟により、最近では大型部品への適用も目立つようになってきた。その例としてハニカムサンドイッチ製の衛星フェアリングや大型固体ロケットのモータケースがある。後者については、H-2改良型のH-2Aロケットの段間部構造や固体ロケットブースター、M-Vロケット第2段ロケットのモータケース¹⁾などが開発されつつある。一方、人工衛星の構造材料としては、軽量化要求がロケットより厳しいため、とくに大型の衛星においては従来からCFRPをフェース材とするハニカムサンドイッチ構造が主流となっている。また衛星に搭載する大型アンテナにおいては形状精度の要求が厳しいため、熱膨張率の非常に小さいCFRPが多用されている。

3 宇宙往還機の耐熱材料

使い捨て型ロケットは打ち上げられて海上に落下したり、あるいは人工衛星と同じく地球周回軌道に入ったりするが、そのまま放置されて再使用されることはない。これと異なり、地球周回軌道に入って衛星等を軌道上に放出し

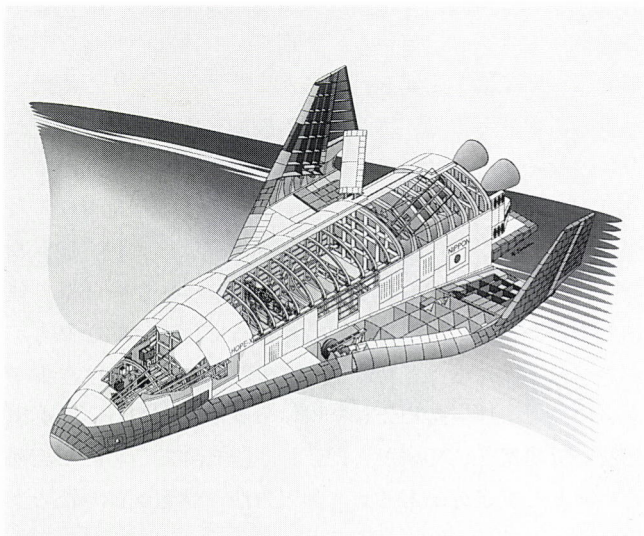


図2 HOPE-X構造図

た後大気圏に再突入して地上まで戻ってくる機体を宇宙往還機というが、このタイプの機体では再突入時の過酷な空気力学的加熱(空力加熱)に耐えるように表面を耐熱材で覆う必要がある。この代表例が米国のスペースシャトルや日本で開発中の宇宙往還実験機HOPE-Xであり、再突入する部分(オービターと呼ばれる)は飛行機状の外形をもっている。図2にHOPE-Xの構造と使用材料を示す。空力加熱の大きさは機体の場所によって異なるが、一般に機体前方のほうが厳しく、また再突入の姿勢の関係から機体上面より機体下面のほうが厳しい。大部分の機体表面の温度は1300℃以下でありセラミックタイルなどの軽量な耐熱・断熱材が適用可能であるが、最も加熱の厳しい機首部や翼前縁の温度は1600℃にも達するためこのような材料は使用できない。このレベルの高温に耐える材料はごく限られており、現状でカーボン繊維とカーボンマトリックスの組み合わせによる複合材料(C/C材料)が実用化されている唯一のものである²⁾。この材料は2000℃を超えても強度特性の劣化が見られないが、空気中で酸化により損耗するという問題がある。これに対処するため、C/C材料の表面にSiCの皮膜(コーティング)を生成するという処理を行なっている(図3参照)。このコーティング処理は高温で行なうので、処理後常温に戻る際にSiCとC/Cの熱膨張率の相違のためコーティング層にクラックが生じる。このクラックを通じて酸素が侵入することによる酸化を防ぐため、SiC表面にガラスの塗布を行なうなどの対策を施している。このような耐熱コーティングを施した材料が大気圏再突入の加熱環境においてどのように損耗して行くかについては、アーク加熱風洞により地上で実験的に調べられている。この現象は高温で希薄な解離空気と材料表面の複雑な化学反応を伴っており³⁾、いまだ十分な解明はなされておらず将来の耐熱設計の高度化のために研究の進展が望まれる分野である。

一方機体の内部構造の材料は大部分がアルミニウム合金となっており、これは米国スペースシャトルと同様である。ただし、主翼の先端のチップフィンと呼んでいる部分の内

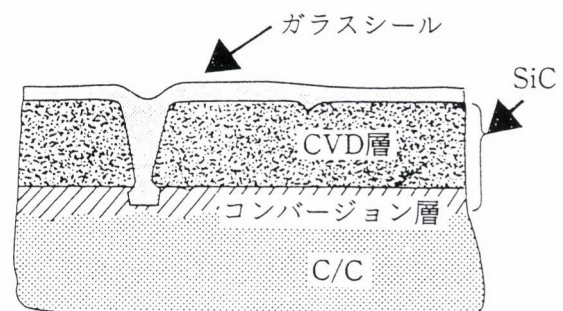


図3 C/C材表面の耐熱コーティング

部構造はカーボン/ポリイミド(C/Pi)複合材料⁴⁾で製作される。CFRPの樹脂としてはエポキシ樹脂系(C/Ep)がもっとも一般的であるが、耐熱温度はせいぜい120℃程度である。これに対しC/Piは、強度・剛性がC/Epと変わらない上に300℃程度までの耐熱性を有しているため、高い加熱を受ける機体の構造材料として大きな利点がある。但しこの材料の欠点として、硬化時に水分やアルコールの除去が必要であること、硬化温度が高いこと等による成形コスト高、熱サイクルによりマイクロクラックが発生しやすいことなどがあり、広く実用化されるにはまだ課題が多いと思われる。耐熱CFRPとしてはこの他にビスマレイミド樹脂を用いたものがあり、米国等で戦闘機などに使用されている。

4 完全再使用型宇宙輸送機を目指した技術開発

スペースシャトルは地球周回軌道への往復・再使用という、宇宙輸送技術においての重要な発展を実現したが、打ち上げの度に大きな燃料タンクを使い捨てており、また再打ち上げのための補修・整備にかなりのコストが費やされている。このため開発当初の使い捨て型を置きかえるという目論見は大きく外れ、使い捨て型よりも大幅にコスト高の打ち上げ手段となっている。宇宙活動を本格的に活発化させるためには、打ち上げコストの画期的な低減化が必要とされており、このために使い捨てる部分のない完全再使用型ロケットの開発の必要性が叫ばれるようになってきた。このようなロケットは1段式や、2段式、またロケットエンジンに加えて空気吸い込み式エンジンを使用するなど色々なタイプが考えられる。1段式で地球周回軌道に到達する機体をSSTO(Single Stage To Orbit)と称しているが、SSTOで且つロケットのみを使用するタイプ(SSTO-R)が、最近NASAが真剣に開発に取り組み始めたせいもあって注目を集めている。このようなロケットを実現するためには、構造材料の徹底的な軽量化が不可欠である。図4にSSTOの構想の一例として宇宙開発事業団で検討中の機体構想図を示す⁵⁾。機体の前方部を始めとするかなりの部分は、再突入時の温度上昇のため往還機と同じく耐熱材を必要とする。ただし多数回の再使用を実現するため耐久性の要求がより高度なものとなる。また打ち上げコストを下げるため点検や補修を最小限に留めなければならない。このためには既存の材料では不十分であり、よりすぐれた耐熱材を開発する必要がある。セラミックタイルの表面の強度を増すことや、また逆に可撓性をもたせて機体外板への装着性の向上を図るなどの改良が検討されている。現在米国で開発中のSSTO実験機X-33では金属製の表皮をも

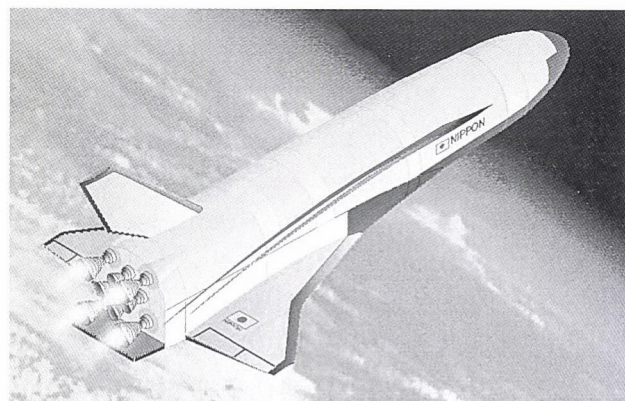


図4 SSTO構想図

つ熱防護材を機体の大部分に採用し、運用性の向上を図っている⁶⁾。機首部等の超高温部にはC/Cの他にC/SiCなどの適用が検討されているが、100回程度まで軽微な補修で再使用できるシステムの実現にはまだ課題が多いと思われる。

SSTOが既存の往還機と大きく異なる点は機体構造のかんりの部分を推進薬タンクが占めるということである。推進薬としては推進効率の向上のため、極低温の液体水素、液体酸素の組み合わせが有力である。このような極低温に使用するロケットタンクの材料としては従来アルミニウム合金の溶接構造が主流であった。最近アルミニウムを主成分としつつ軽量なりチウムを少量含ませ比強度・比弾性率を向上させたアルミリチウム合金が開発され、スペースシャトルの大型外部タンクの軽量化に適用されようとしている。これによる軽量化率は5%から10%程度と考えられる。この程度の軽量化では構造重量削減要求の厳しいSSTOでは不十分であり、さらに大幅な重量軽減を目指すことが求められている。このために比強度・比剛性がアルミニウム合金に比べ2倍以上にも達する先進CFRPに対する期待が大きくなっている。実際にどの程度の軽量化が必要かについては、主翼をはじめとした他の構造体、耐熱システムの性能と重量、エンジンの性能と重量などとの兼ね合いになるが、これらの要素は比較的に技術が成熟しており近未来での画期的技術向上の余地は小さいと見られるため、CFRPによる極低温タンク軽量化率は最大40~50%まで求められる可能性もある。CFRPをこの様な極低温で使用できるかどうかについては数年前までは否定的な見方が多かったように思う。SSTOの初期の検討では液体水素タンクに熱可塑性樹脂PEEKを用いる案が英国のHOTOL構想などで提案されていた。PEEKは極低温まで含めた高靱性材料として定評があるが、加工方法に課題が多いため実用化が進んでいない。ところが、数年前、米国での宇宙航空機構想NASPの研究の一環として高靱性・高耐熱性のエ

ポキシ樹脂系CFRPを極低温タンクに適用する研究が行われ、その実用可能性が認識された。NASP計画はその後中止になったが、CFRP極低温タンクの研究成果は引き続きNASAが実施しているSSTO計画に引き継がれ⁷⁾、米国MDAC社がNASAと共同で実施したDC-XA実験機で飛行試験機の液体水素タンクとして史上初のフライトに成功している。その後、現在まで引き続き実施されているX-33計画でも高靱性エポキシ系のCFRPが液体水素タンクの候補材料として採用されている。これらの高靱性エポキシは極低温用として特別に開発されたものではなく、10年ほど前から大型航空機用のCFRP材料としてボーイング社から高靱性・高耐熱に関する高度なスペックが提示され、航空機材料メーカーがこれを満足するものを開発したものが流用されている。

宇宙開発事業団と宇宙航空研究所は昨年度(平成9年度)より、完全再使用型宇宙輸送機の極低温タンクへのCFRP材料の適用を目指した共同研究を開始した。初年度は有望な数種類の高靱性CFRP材料の極低温特性に関する実験的研究を行なった⁸⁾。図5にこの研究で得られた各種CFRP材料の室温から液体ヘリウム温度までの引張強度を示す⁹⁾。ここで積層は疑似等方性で板厚は約2.2mmとした。この図に見られるように、ほとんどの材料は液体ヘリウム温度で室温と比べ若干の強度低下を示しているが、とくに低温で異常な破壊を示した例はなく、構造材として極低温での使用に大きな問題のないことが分かった。但し、破壊荷重よりもかなり低い荷重で樹脂部分にマイクロクラックが発生することが観察されており、またこのクラック発生時点は低温ほど低い荷重で起こり、液体ヘリウム温度では荷重初期から発生していると思われるため、これが推進薬の漏洩に結びつくかどうか大きな技術課題と考えている。当面は現時点で開発済みの材料の適用性を検討することとしているが、現在の材料ではSSTOの実現に不十分ということ

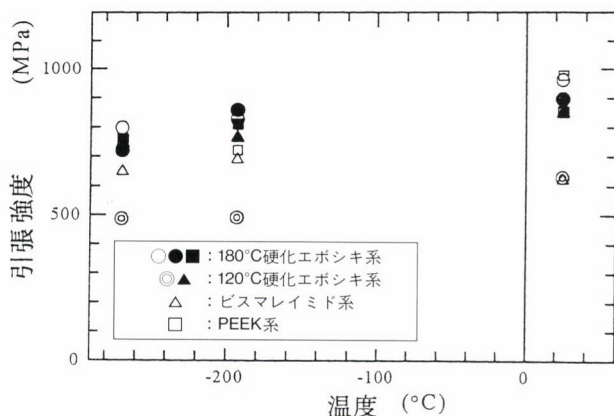


図5 CFRPの極低温強度

になれば、極低温に適した新規の材料の開発に進む必要が生じることも考えられる。SSTOの構想は1960年代から検討されてきていたが、材料面での技術的裏付けがなく単なる机上の計画に過ぎなかった。しかしCFRP材料をはじめとする材料技術の最近の進歩により、もしかしたら近い将来に実現するのではないかと希望が出てきたのが最近の状況だと思われる。最終的に実用的なSSTOを実現するには材料のほかにエンジン技術、耐熱技術、運用技術などの総合的技術進歩が伴わなければならないが、その突破口として最新の材料技術の適用による極低温タンク的大幅な軽量化の達成は重要なステップになるものと考えられる。

5 むすび

本稿では宇宙開発における材料の役割を、特に複合材料の将来性に重点を置いて解説してみた。中でも近年本格的に研究が始まっている単段式宇宙輸送機の実現に向けての材料技術の重要性をできるだけ詳しく述べた。本稿を読まれた方々に、宇宙開発関係者からの材料技術に対する期待の大きさを感じ取っていただければ、筆者の望外の幸である。

参考文献

- 1) J. Onoda, K. Minesugi, M. Nakamura and N. Yanagisawa : Development Status of Second Stage FW Motor Casing of M-V Satellite Launcher, 21st International Symposium on Space Technology and Science, ISTS 98-b-23, Omiya, Japan, (1998)
- 2) Y. Morino, K. Yodate and T. Yoshinaka : Research on C/C Composites for the HOPE Reentry Vehicle, 44th International Astronautical Congress, IAF-93-I. 3. 223, Graz, Austria, (1993)
- 3) Y. Morino, T. Yoshinaka, M. Auweter-Kurtz, G. Hilfer, H.-D. Speckman, A. Sakai : Erosion Characteristics of SiC Coated C/C Materials in Arc Heated High Enthalpy Air Flow, IAF-97-I. 4.02, Turin, Italy, (1998)
- 4) 森野美樹 : カーボンポリイミド複合材料の宇宙機構造への適用性について, 第34回飛行機シンポジウム, 鳥取, (1996)
- 5) H. Taniguchi, A. Kanmuri : Rocket SSTO Concept Study, 21st International Symposium on Space Technology and Science, ISTS 98-o-1-4V, Omiya, Japan, (1998)
- 6) S. Cook : X-33 Reusable Launch Vehicle Structural

Technologies, AIAA 7th International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, AIAA-96-4563, Norfolk, VA, (1996)

- 7) M. J. Robinson : Composite Cryogenic Propellant Tank Development, AIAA-94-1375-CP.
- 8) Y. Morino, T. Ishikawa, T. Aoki, H. Kumazawa and Y. Hayashi : Feasibility Study of CFRP Material Application to the Cryogenic Propellant Tank of

Reusable Launch Vehicles, 21st International Symposium on Space Technology and Science, ISTS 98-b-22, Omiya, Japan, (1998)

- 9) 熊沢 寿, 林 洋一, 石川隆司, 青木隆平, 森野美樹 : 再使用型ロケット推進剤タンク用CFRP複合材料の極低温における破壊強度, 第40回構造強度に関する講演会, 高知, (1998)

(1998年7月3日受付)

本会情報一覧

記事内容	掲載号
第6回日向メモリアル国際会議助成の募集	本号751頁
学術功績賞受賞候補者の推薦募集	本号751頁
平成10年度重点研究採択結果のお知らせ	本号752頁
学会部門からの評議員候補者推薦募集	本号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」	本号754頁
創形創質工学部会フォーラム「建築における鋼・コンクリート合成構造の最新技術動向」	本号754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」	本号755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	本号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
計測・制御・システム工学部会シンポジウム「計測とシミュレーション技術」	9号690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」	9号692頁
材料の組織と特性部会シンポジウム「超塑性材料の組織制御と界面現象および変形の力学」	9号693頁
第8回日本・中国鉄鋼学会会議	9号693頁
日向方斉メモリアル国際会議助成の募集	8号615頁
第4回次世代鉄鋼奨学助成受給者（1999年度支給開始）	8号615頁
ISS主催行事予定	8号617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
インターネットによる行事申込受付開始のお知らせ	7号544頁
「会員名簿」刊行のお知らせ	7号546頁
「記事広告」欄の新設	7号547頁
会報「ふえらむ」に「協会の活動から」「ふえらむの窓」欄新設のお知らせ	6号443頁
「鉄と鋼」「ISIJ International」投稿規程・執筆要領	6号446頁

学会部門

平成10年度重点研究採択結果のお知らせ

平成10年度重点研究採択について7月27日開催の学会部門会議で慎重審議の結果以下の2件に決定しました。

研究代表者	原 茂太（大阪大学大学院工学研究科）	宮崎 亨（名古屋工業大学 工学部）
研究分担者	田中 敏宏（大阪大学大学院工学研究科） 碓井 建夫（大阪大学大学院工学研究科） 小野 英樹（大阪大学大学院工学研究科） 横谷真一郎（日本工業大学） 井口 学（北海道大学大学院工学研究科）	小坂井孝生（名古屋工業大学 工学部） 石田 清仁（東北大学大学院工学研究科） 貝沼 亮介（東北大学大学院工学研究科）
研究テーマ名	旋回運動による鋳型内流動制御と旋回流れを利用した新鉄鋼製錬プロセスの開発	鉄合金の規則化と相分離に関する研究
研究期間	2年間	2年間
交付金額	650万円	350万円

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
1998年		
10月 12日	材料の組織と特性部会シンポジウム「超組成材料の組織制御と界面現象および変形の力学」(東京)	9号693頁
13～15日	ASM'S Materials Solutions Conference/Exposition (USA)	5号384頁
16日	東海支部 本多光太郎記念特別講演会 (名古屋)	9号694頁
19日	計測・制御システム工学部会シンポジウム「計測とシミュレーション技術」(東京)	9号690頁
21,22日	Sensing Forum ―センシング技術の新たな展開と融合― (東京)	7号550頁
21～23日	第19回日本熱物性シンポジウム (福岡)	5号384頁
22日	関西支部 材料セミナー鉄鋼材料の組織制御の原理と方法 (大阪)	9号694頁
23日	創形創質工学部会フォーラム「建築における鋼・コンクリート合成構造の最新技術動向」(東京)	本号754頁
23日	東北支部 プロセス工学研究会「流体中の粒子挙動と材料プロセス」(仙台)	本号756頁
26,27日	The International Symposium on New Frontier of Thermal Studies of Materials (東京)	8号627頁
27日	関西支部 材料セミナー組織観察 (神戸)	9号694頁
27日	東海支部 湯川記念特別講演会 (名古屋)	本号756頁
28～30日	第24回疲労シンポジウム (福岡)	5号384頁
28～30日	第34回熱測定討論会 (横浜)	6号451頁
29,30日	東海支部 第26回若手材料研究会―材料研究における実験と計算― (豊橋)	本号757頁
30日	中国四国支部 第82回金属物性研究会 (岡山)	9号694頁
11月 6日	関西支部 材料セミナーX線解析 (京都)	9号694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)	本号755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回鉄鋼圧延国際会議 (千葉)	4号299頁
10,11日	SICEセミナー 現代制御理論入門 (東京)	本号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
11～13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
12,13日	第8回日本・中国鉄鋼学術会議 (千葉)	9号693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	九州支部 秋季講演会 (長崎)	本号757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 ブレークスルーが生み出す新しい材料の世界 (東京)	本号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 (大阪、東京)	本号759頁
17～19日	第24回固体イオニクス討論会 (仙台)	6号451頁
17～20日	'98国際粉体工業展 (千葉)	本号759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755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)	本号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756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)	本号759頁
21,22日	第2回たたらサミット (名古屋)	本号759頁
21～23日	第49回塑性加工連合講演会 (東京)	7号550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」(大阪)	本号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)	本号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
24,25日	第24回腐食防食入門講習会	本号759頁
25,26日	関西支部 材料セミナー化学評価 (大阪)	9号694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
12月 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
5日	北陸支部 平成10年度総会・連合講演会 (長野)	本号758頁

編集後記

学会誌というのは読者に送付された後しばらく机の上の目立つ場所に並べられておいて、何冊かがたまると目次をパラパラとめくられた後に廃却されるというのが一般的な運命だという話を聞いたことがある。

著名な先生方に無理矢理お願いして貴重な時間をさいて執筆いただくわけであるからこれでは申し訳ない。

幸い、「ふえらむ」は他の学会誌とは一味ちがい表紙を見たら中を開けてみたくなる雑誌だという話も聞いたことがある。確かに両開きのグラビアあり、鉄の歴史あり、他分野のトピックスありとバラエティーに富んでいて、現鉄器時代の文化情報誌といった感がある。

自画自賛をして喜ぶのも気がひけるが、色々な読者の声を聞くにつけ、折角の文章、折角の情報を生かすも殺すも企画と編集次第ということを肝に命じて、著者の先生方にしつこく食い下がっては原稿をお願いしていきたい。

(H.T.)

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㈱)	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㈱)	久保田 猛 (新日本製鐵㈱)
小西 正躬 (㈱神戸製鋼所)	今野 美博 (住友金属工業㈱)	佐藤 駿 (財金属系材料研究開発センター)
下川 成海 (㈱日本鉄鋼協会)	塚本 顕彦 (三菱重工業㈱)	長坂 徹也 (東北大学)
中村 欣弘 (㈱トライ)	日野 義久 (㈱日本鉄鋼連盟)	丸山 俊夫 (東京工業大学)
三浦 和哉 (㈱日本鉄鋼協会)	山下 孝子 (川崎製鉄㈱)	

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10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 (㈱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 口座東京 00170-4-193 番

(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

ふらむ Vol.3 No.10 広告目次

表2 住友金属テクノロジー(株)

試験分析サービス

前1 (株)トライメート 厚板切断火口

2 住友金属工業(株)

エンジニアリング各分野

後1 本誌広告目次

(株)大同分析リサーチ 試験分析サービス

2 (株)ジャパンエナジー 企業PR

後2 高島産業(株)

ブラッシロール

表3 ハルツォク・ジャパン(株)

発光分光分析装置

表4 日本アナリスト(株) 各種分析装置

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

分析・試験・調査

大同特殊鋼グループの
蓄積された技術とノウハウで、
材料開発・品質管理のための
調査および解析データを提供。

材料解析

各種材料の
破断原因調査

環境分析

産業廃棄物の分析
工場排水の測定

化学成分分析

鉄鋼、非鉄金属の
成分分析

機械試験

各種材料の強度・
靱延性の試験

腐食試験

金属、ステンレス等の
沸騰試験薬腐食試験

DBR 株式会社 大同分析リサーチ
DAIDO BUNSEKI RESEARCH, INC., ; DBR

〒457-8545 名古屋市南区大同町2丁目30番地 大同特殊鋼株式会社技術開発研究所内

TEL 052-611-9434-8547 FAX 052-611-9948

詳しくはホームページまで

<http://www.daido.co.jp/dbr/index.html>

ご意見・ご感想等はメールで

E-MAIL:webmaster_dbr@daido.co.jp

JOMO

いつもの緑のステーション。



ジャパンエナジーに関する情報はインターネットでどうぞ。
<http://www.j-energy.co.jp/>

JOMOステーション

株式会社 ジャパンエナジー

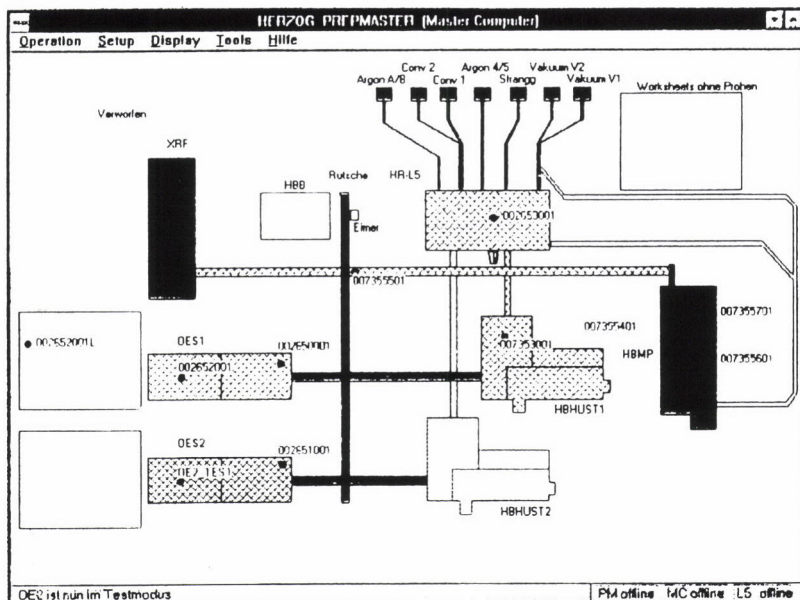
50th

高島産業株式会社

本社 〒112-0012 東京都文京区大塚5-22-10 TEL03-3943-2751代 FAX03-3946-1734
工場 〒997-0341 山形県東田川郡楯引町大字下山添字庄南39 TEL0235-57-4212代

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
ビート成形の完全自動

■運行管理システム (PREPMASTER)

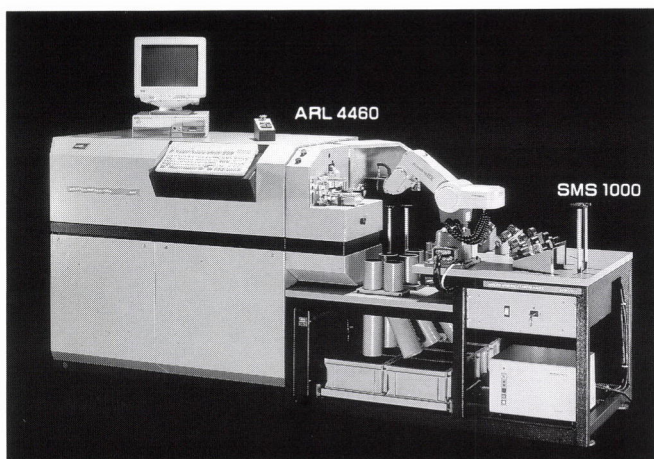
装置管理
ID番号管理
運行管理

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“4460”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ピー）の2つの新技術が加わり、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。

HERZOG
ハルツォク・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



新製品

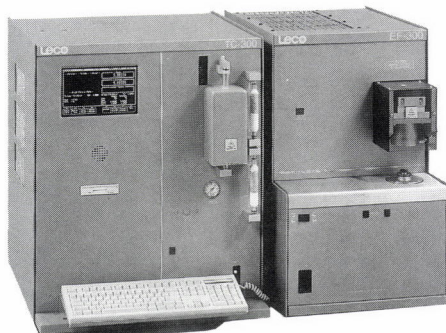
金属中 **酸素・窒素** **炭素・硫黄** 分析装置

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

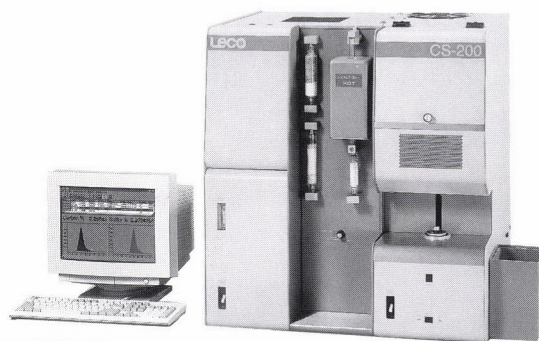
炭素・硫黄分析装置 CS-200型

お客様のニーズに合わせ、分析対象物の炭素・硫黄分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。



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(北九州テクセンター) ☎(093)884-0309 FAX(093)873-1190