

Vol.3 No.2 1998

(社)日本鉄鋼協会会報

ふえらむ

Bulletin of

The Iron and Steel

Institute of Japan



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

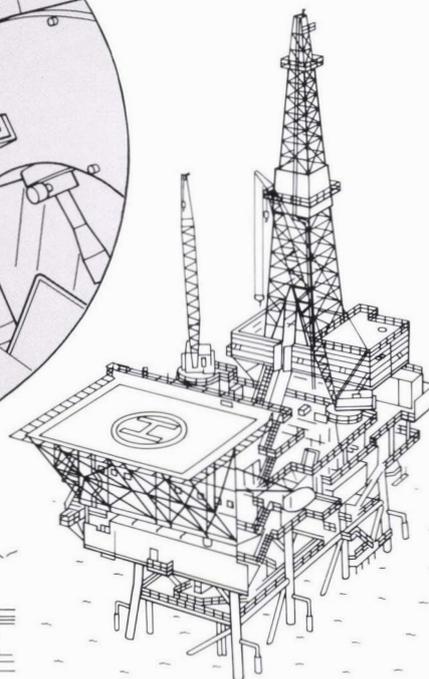
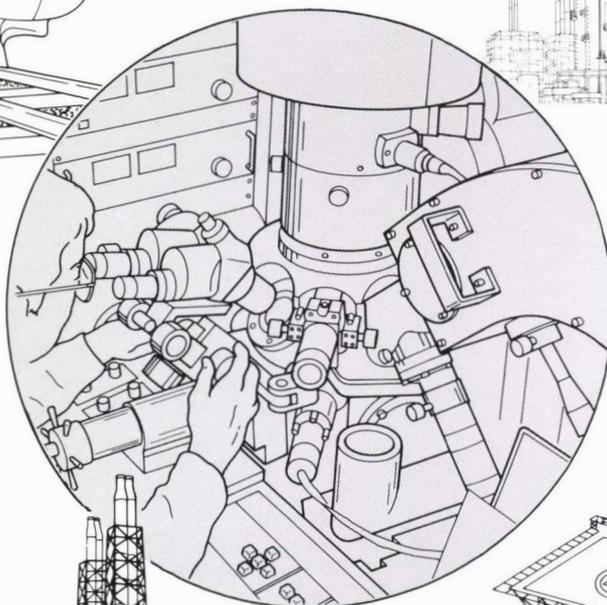
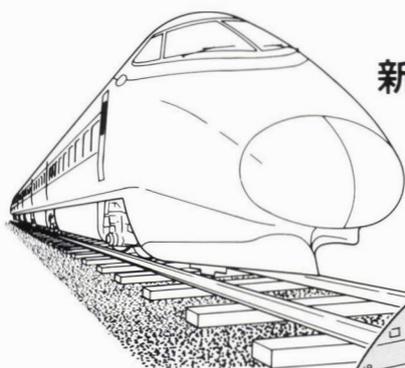
ホームページ <http://www.isij.or.jp>

まだまだ広がる テクノロジーの未来

住友金属工業(株)の永年の技術と経験の蓄積をバックにした

●
総合技術サービス会社として

●
新たな一歩を踏み出しました。

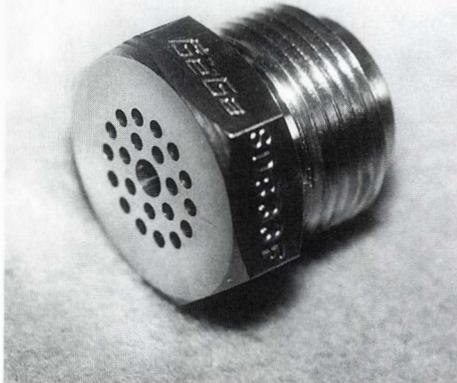


住友金属テクノロジー株式会社

(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)	〒660-0891 尼崎市扶桑町1番8号 TEL.06-489-5779
(関西事業部)	(尼崎) 〒660-0856 尼崎市東向島西之町1番地 TEL.06-41-7663
	(大阪) 〒554-0024 大阪市此花区島屋5丁目1番109号 TEL.06-466-6833
(和歌山事業部)	〒640-8555 和歌山市湊1850番地 TEL.0734-51-2407
(小倉事業部)	〒803-0803 北九州市小倉北区許斐町1番地 TEL.093-581-3289
(鹿島事業部)	〒314-0014 茨城県鹿嶋市大字光3番地 TEL.0299-84-2557
(鉄道産機事業部)	〒554-0024 大阪市此花区島屋5丁目1番109号 TEL.06-466-6176
(OCTG事業部)	〒660-0843 尼崎市東海岸町21番地1号 TEL.06-409-1121

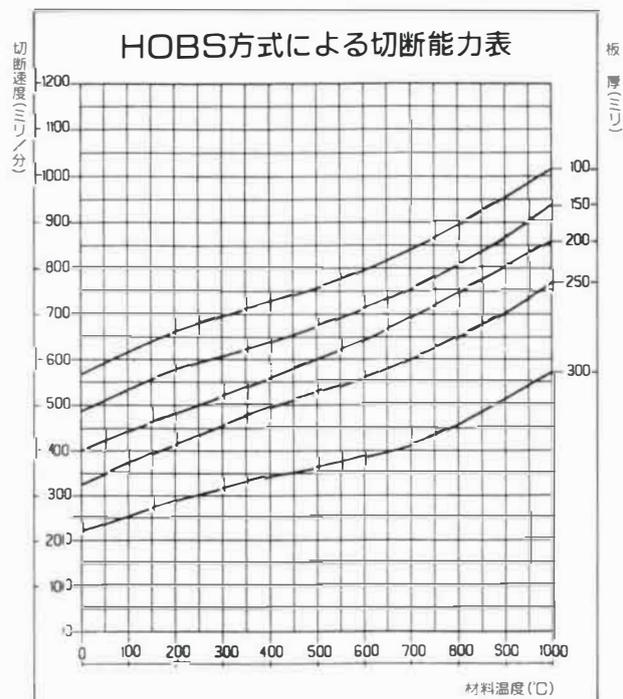
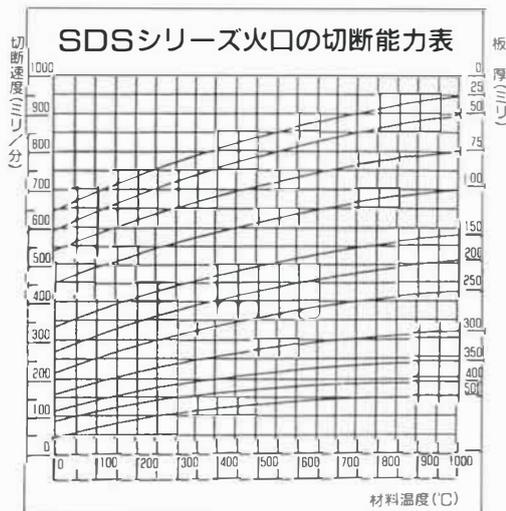
良質で狭いカーフ幅の優れた切断面が得られる ゲガ社が開発した厚板切断火口!!!

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

全世界、
100万社を超える
お客様と
つちかった
ソリューション、

あなたのそばで
待機中。

工業用ガスのイノベーター「エア・リキード」なら、
世界60ヵ国以上を網羅するお近くの
サービスネットワークが、安心をお届けします。

私たちエア・リキードは、お客様のご要望にお応えするため、世界60ヵ国
以上を網羅したサービスネットワークを、お客様のお近くに待機させてい
ます。各地のカスタマーサービスセンターが
それぞれのイニシアチブのもと、世界中で
集積したノウハウをさまざまなカタチでご
利用いただけるシステムを確立しています。



すでに、全世界の100万社以上のお客様に、個々のご要望に添ったカ
スタムメイドの解決策をお近くの拠点がすばやくお届けしてきました。事
業の大小にかかわらず、工業ガスのことならどんなご相談でもお応えす
るエア・リキード。あなたのご相談にもお近くのエア・リキードがお役に立
ちます。日本では、テイサン（日本エア・リキード）がお応えします。

<http://www.jp.airliquide.com>



AIR LIQUIDE

提案します、明日が見える生産性。

テイサン株式会社（日本エア・リキード） ☎ (03) 3502-0551



ふえらむ

Vol.3 (1998) No.2

C O N T E N T S

目 次

Techno Scope	超電導その可能性と課題	66
話題のプロダクト	個人情報端末	74
鉄の点景	種子島	78
展 望	工学における産学人材交流ポテンシャル	
	町田輝史	81
	新世紀構造材料研究プロジェクト	
	佐藤彰	88
	変位型原子無拡散相変態に関する研究の流れと学界の動き	
	清水謙一	95
入門講座	システム技術編 - 2 システム最適化	
	玉置久	101
	専門用語 - 鉄鋼材料編 - 4 電位 - pH図	
	西方篤	107
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 - 技術編 追付け時代の鋼管製造	
	三瀬真作	113
解 説	製鋼における計測・制御技術	
	小西正躬、和佐泰宏	125
会員へのお知らせ		130

ホームページ <http://www.isij.or.jp>



超電導 その可能性と課題

— 応用へと向かう夢の技術 —



電流がまったくロスなしに流れる超電導現象は、人類が発見したひとつの奇跡だった。そしてその奇跡が、比較的高温でもおこせるかもしれないことが分かると期待感は一気に高まり、研究開発に多くの人材と資金とが投入された。やがてブームはおさまったが、播かれた種のいくつかは、芽を出し、あるものはすでにつぼみをつけているかに見える。この先、超電導の畑には、どんな花が咲くことになるのだろうか。全体像を概観してみる。

写真：世界最強の磁場施設を誇る金属材料技術研究所の超電導磁石。

金属合金系はすでに一部実用化、酸化物系はより高温での安定化と生産技術が鍵

液体ヘリウム温度で使用可能な金属合金系の超電導体の応用技術がさまざまな形で研究され、実用まであと一歩というところまでできている。その一方で高温超電導体といわれる酸化物系の素材をいかに実用化していくかの模索が、素材研究や生産技術などの面から地道に続けられている。電気抵抗をゼロにできる超電導技術は、エネルギーの効率利用という側面からも、産業全体のブレイクスルーにもつながるキーテクノロジーであると見ることもできよう。

超電導リニア、時速550kmを達成

平成9年4月に開通した超電導リニアモーターカー山梨実験線は昨年末、初年度の目標であった最高時速550kmを達成した。今年度からは運行のためのより実用的な試験が行われ、来年度には耐久試験などを経て超電導リニアモーターカーの建設基準を設定するためのデータ収集が行われる予定になっている。

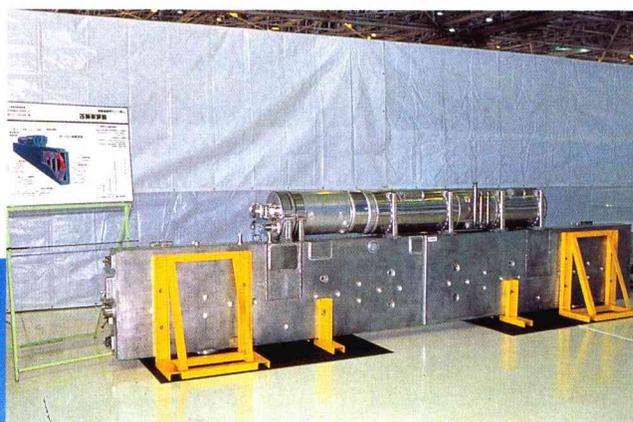
「夢の技術」だと思われてきた超電導による磁気浮上列車が実験段階とはいえ、いよいよ現実のものとなりつつある。その心臓部ともいべき超電導マグネットには、液体ヘリウムと小型冷凍機によって冷却されるニオブ・チタン製の超電動コイルが使用されている。これはおおざっぱな分類でいうと「液体ヘリウム温度」で使用できる「金属合金系」の超電導体の技術ということになる。液体ヘリウムの温度は4K（絶対温度）、つまり摂氏ならマイナス269℃。この極低温が現在のところ超電

導の応用技術を支えている。

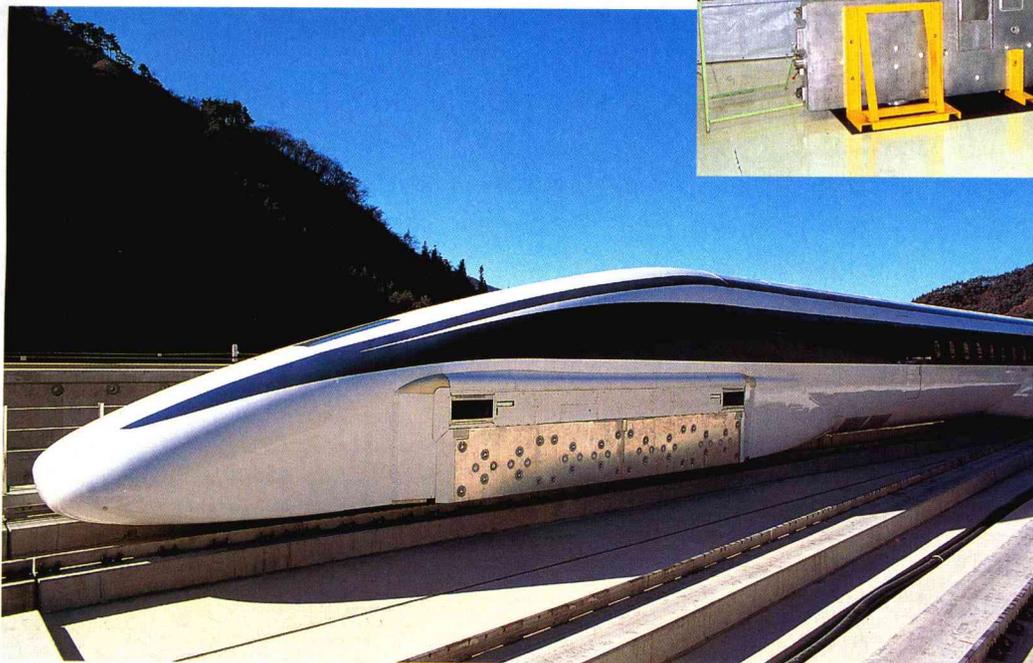
超電導物質には金属合金系以外に、酸化物系（化合物系）のものがある。この酸化物系が、いわゆる「高温超電導」を担う物質として研究開発が行われているものだ。磁気浮上列車は、超電導技術の応用例としてもっとも有名なもののひとつであり画期的なものではあるが、今のところ高温超電導技術を応用する段階には達していないようである。

高温超電導物質の発見が生んだブーム

超電導とは、物質を極低温にした時に電気抵抗がゼロにな



山梨実験線車両に装備された超電導マグネット。



る現象だと一般的には説明されている。電気抵抗がゼロになるということは、電流がロスなしに流れることを意味する。少々粗暴な比喻を用いるとするならば、ごくふつうの常電導状態は、おんぼろバスが走る田舎のデコボコ道のようなもので、エンジンを吹かし続けなければ（電圧をかけ続けなければ）、車——つまり電流は走らない。超電導状態とは、このデコボコ道を舗装したハイウェイのようなものと考えるとイメージとしてとらえやすいかもしれない。さらにいえばデコボコ道の表面に氷がはって、ソリに反動をつけてやるとどこまでも走っていつてしまう状態に譬えられるだろうか。

エネルギーロスがないため、最初に流した電流が減衰することなく流れ続けるのである。このような性質を利用してはじめて、磁気浮上列車の小型軽量で強力な磁石が製造可能になる。もしリニアの電磁石を常電導でつくったとすると、とんでもなく巨大なものになってしまい、とても実用に耐えるものではなくなってしまうはずである。

山梨実験線は順調な滑り出しをみせているが、超電導研究そのものは少し引いた視点から眺めてみると、一時ほどのフィーバーぶりはなくなってきた感がある。1980年代なかば、世界的な超電導ブームといえるような風潮が確かにあった。そのきっかけとなったのは、高温超電導体の発見である（1986年/チューリッヒ）。先に述べたように超電導リニアモーターカーに使用されているのは液体ヘリウム温度で使用する金属合金系の超電導コイルである。だが高温超電導を可能にする素材は、金属酸化物系——つまり陶磁器やセラミックに近いものだった。しかも超電導をえるためには結晶レベルでの微妙な制御を必要とされたり、試料作成に高度な技術やアイデアが求められるなど、解決しなければならぬ課題は山積みだった。

とはいえ絶対零度（ -273°C ）に近い領域でしか起こらないと考えられていた超電導現象が、より高温でも起こせるという期待は研究者や企業を煽り立て、その高揚感が一種のブームへと導いたといっているだろう。

だが「高温」とはいうものの、その温度は35K（ -238°C ）と一般の感覚からすれば極低温であることには変わりがない。この温度の上限をいかに高くできるかが高温超電導物質開発のひとつの焦点になった。さらにその先には加工法や生産技術も含めたさまざまな困難が待ち受けていた。

超電導が持続するぎりぎりの上限温度を「臨界温度」というが、超電導状態を持続するには、温度以外にも、磁界（磁力）の上限や、電流密度の上限があって、ある値をこえると、超電導状態は破綻してしまう。そうした「臨界温度」「臨界磁界」「臨界電流密度」はそれぞれに相関しあっていて、バランスの中で実用域を模索するという作業が必要とされた。より臨界温度の高い新物質を探すだけでは即実用につながるというわけにはいかなかったのである。最初の高温超電導物質発見以



冷凍機を使って直冷するタイプの超電導磁石。

来、「臨界温度」のみの記録は単純に上がっていったが、実用的な臨界値のバランスをもち、製造技術というハードルもクリアすることはさすがに難しく、やがて景気の低迷とともに撤退する企業も増えてゆき、ブームはいまや沈静化したかにみえる。

目標は -196°C で使える高温超電導体

高温超電導の臨界温度を考える場合、ひとつの目安になるのが77K（ -196°C ）という値である。これは液体窒素の沸点であり、77Kで使用できる超電導装置の実現は冷却用に液体窒素が使用できるようになることを意味している。窒素はヘリウムより比熱が100倍も大きいので、冷却がしやすくなるうえ、空気的主要成分であることから資源量もきわめて豊富である。ヘリウムは現状、天然ガスから分離して得ていることから量的に限りがあることは容易に想像がつく。液体窒素なら資源は、ほとんど無限といっている。液体酸素製造時の副産物として得ることもできる。

酸化物による高温超電導物質の有力候補としては、その後ビスマスを含む化合物（ビスマス・ストロンチウム・カルシウム・銅・酸素）が110K（ -163°C ）という臨界温度を記録し、有望視されるようになってきた。ビスマス系の化合物超電導体には化合のパターンによって多種のものがあるが、そのいくつかは臨界温度のみでならば、90～110Kと、たやすく77Kをクリアする。ところがビスマス系は、77K付近で磁界がかかるや雪崩式に流せる電流（臨界電流密度）が激減するという弱点をもっている。超電導の主要な技術のひとつとして電磁石という用途があることを考えると、ビスマス系の磁界に弱いという性質は、見過ごすことができない。そこでビスマス系に代わるものとしてイットリウム系の酸化物超電導体が研究されているが、製造技術などの面で、まだ解決されていない問題は多いようだ。

またビスマス系も77Kまで温度を上げず、20K（ -252°C ）付近でなら安定した特性を示すことが分かっており、ヘリウム

や窒素などを使うのではなく、冷凍機を使って直接20Kに冷却して実用化しようという発想も出てきているようである。20Kでも、4Kの液体ヘリウム温度に比べれば、かなり高温域での超電導が実現することになり、応用上、かなり使いやすいものになることが期待される。

こうした20K／ビスマス系超電導材料を用いた超電導マグネットの産業への応用例としては、半導体用のシリコン単結晶の製造設備用のものが計画されており、2年後の完成をめざして開発が進んでいる。

半導体チップの原材料であるシリコン単結晶は、結晶引上げの際に強磁界をかけて制御するノウハウが一般化している。シリコン単結晶は今のところ8インチ径のものが主流だが、ここへきて12インチへの需要が高まっており、大型のウエハー製造のための強力な電磁石が必要とされてきている。これまでは大量の電力を使用して常電導の電磁石を使用してきたが、12インチの製造設備となると、ムダが大きい。そこで超電導磁石を用いた小型で強力な電磁石が求められている。この半導体製造設備用の超電導磁石がビスマス系酸化物超電導体の産業への応用例第一号になるという。

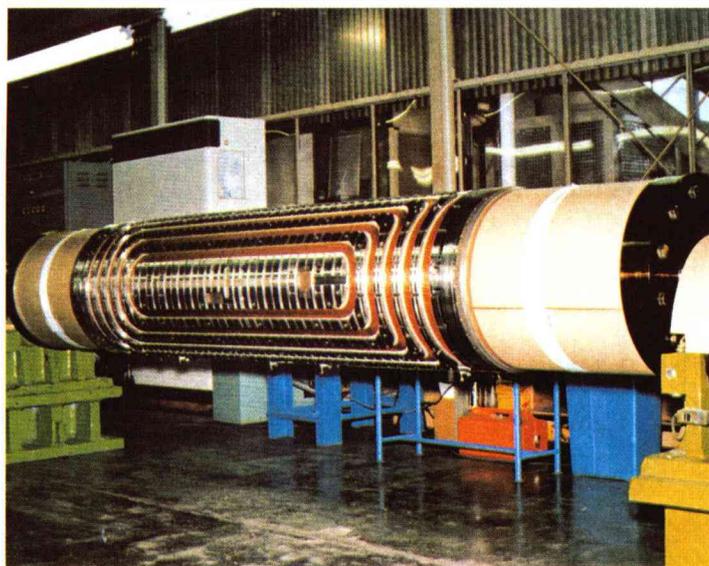
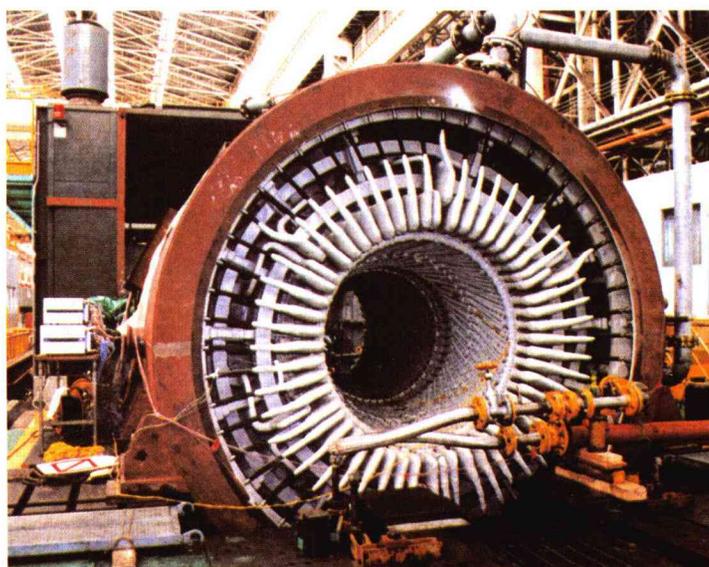
次世代の発電機は超電導に？

金属合金系と酸化物系とを対比する都合上、一気に高温超電導体の応用例にまで飛んでしまったが、現在までのところでは超電導リニアモーターカーにも採用されているように液体ヘリウム温度で利用される金属合金系超電導体を用いた技術がより使いやすく、それを用いた実験や研究開発例も多い。それらの事例は超電導が「何に使えるのか」をイメージとして描くうえでの具体的な手がかりと考えられるので、事例を見てゆくことにしよう。

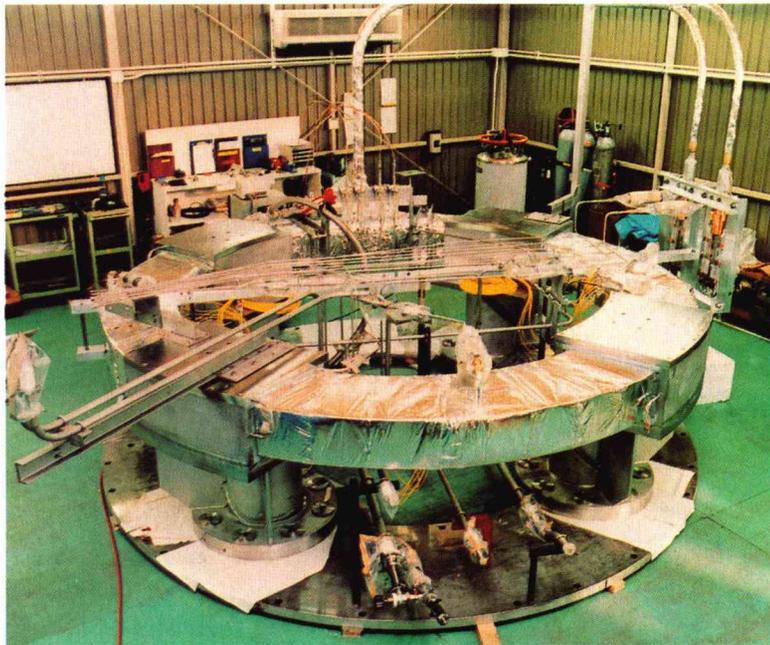
超電導リニア同様、ニオブ・チタンを使った超電導技術で、実用化のための研究開発例として規模が大きいのは工業技術院のニューサンシャイン計画の一環としてNEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）が委託推進するプロジェクトで、89年度から11年計画で行われている超電導発電機の開発である。発電所などで用いる発電機のロータの界磁巻線には、現用では常電導線を水素ガス冷却して使用するものが主となっている。この部分を液体ヘリウム冷却による超電導磁石で代替することでさまざまなメリットが期待できるという。プロジェクトではまず第一段階として超電導磁石を用いた7万kW級の実証試験機が開発され、現在、関西電力大阪発電所構内にある試験センターで実証試験が行われている。20万kW級のパイロット機の開発



7万kW級超電導発電機（モデル機）。



超電導発電機のステータ部（上）とロータ部界磁巻線（下）。



100kWh級のSMES試作要素コイル。この要素コイル12個で100kWhの装置構成となる。



中部電力の1kWhフライホイール・ユニット実験機。

に反映されることになっている。最終目標は100万kW級を可能にすることだという。

超電導発電機のメリットは、設備が小型軽量化できるため設備の建設コストを縮減できることをはじめ、単機あたりの最大容量をこれまでの2倍にできること、電力系統の安定度が向上すること、そして発電機効率が向上し省エネ効果が期待できることなど。超電導発電機では、約1%の発電効率アップが期待され、小幅とはいえ直接CO₂の削減にもつながる。電力というおおもとの話だけに全体量としてはけっして小さくないだろう。

研究が進む電力貯蔵の技術

エネルギーという視点では、「電力の貯蔵」にも超電導は大きな可能性を秘めている。電気はためておくことができないとはよくいわれることであるが、安定した電力供給のためには、なんとか電気を蓄えておける技術が欲しい。そこで現在は夜間の揚水発電や高性能蓄電池開発などといった形で「電力貯蔵」の技術が模索されている。だがもし超電導コイルに流れる「永久電流」の性質をうまく生かせれば、電気を電気のままで貯蔵しておくことが可能になる。電気抵抗がない超電導コイルなら、一度通電すれば、外部に取り出されるまで、ずっと同じ電流が流れ続けることになるからだ。

こうした超電導コイルによる電力貯蔵装置はSMES（スミス/Superconducting Magnetic Energy Storage system）と呼ばれ、超電導の比較的初期の頃から研究が行われてきたが、1991年から資源エネルギー庁のプロジェクトとして8年計画で、100kWh級パイロットプラントの要素技術の開発調査

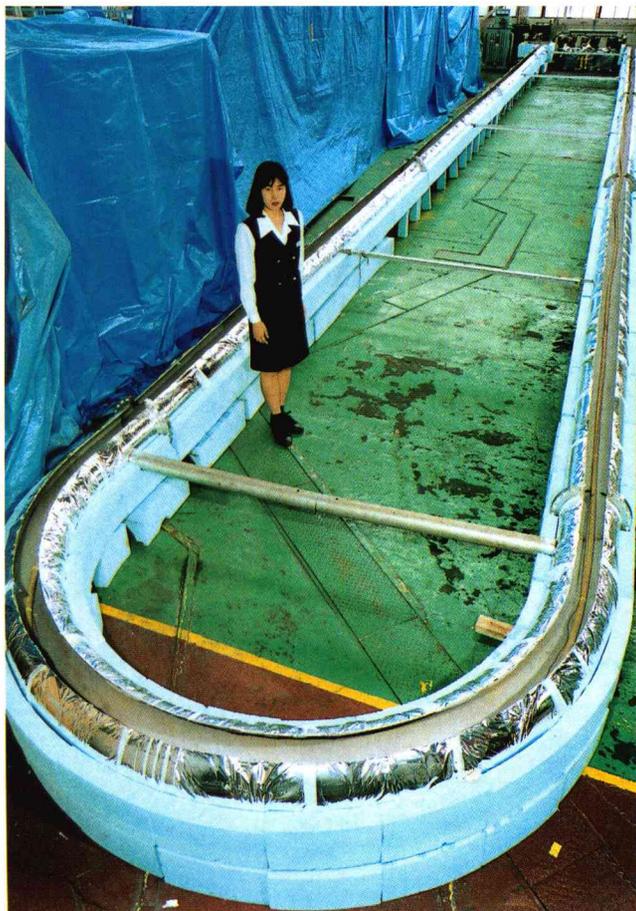
を目的とする試作要素コイルがつけられ、通電実験によってデータ収集が行われている。この試作コイルに使われているのもニオブ・チタンである。

資源エネルギー庁のプロジェクトで開発が進む、もうひとつの有望な電力の貯蔵技術に、フライホイールシステムといわれるものがある。フライホイールとはいわゆる「はずみ車」のことで、電力をホイールの回転運動エネルギーに変換して保存しようというものだ。通常ならば「はずみ車」の運動エネルギーは、軸受けの摩擦抵抗を受けて減衰してしまうが、超電導の特性を生かしてフライホイールを浮上させてしまえば、摩擦抵抗はゼロになる。摩擦によるロスをなくしておいたうえで、必要に応じてホイールの軸を発電機にコンタクトできるようにしておけば、運動として貯えたエネルギーを自由に電力として取り出せる。

プロジェクトでは、0.5kWhの実験機がつけられ、またプロジェクトとは別に中部電力では1kWhのユニット実験機が製作され現在は課題抽出作業が行われている。

フライホイールには大きな遠心力がかかることが予想されるため、軽く丈夫な素材が求められる。中部電力の実験機ではCFRP（炭素繊維強化プラスチック）製の外径60cmのホイールが使用されている。将来的には10MWhのシステムがめざされているが、これは単体のフライホイールを5層に積み上げたシステムを、さらに10基ならべようというもの。遠心力の問題から単体を大きくするには限界があるため、こうしたシステム構成にすることが考えられている。

SMESやフライホイールシステムなどの電力貯蔵装置の使いみちだが、現在のところ、たとえばコージェネシステム（使用

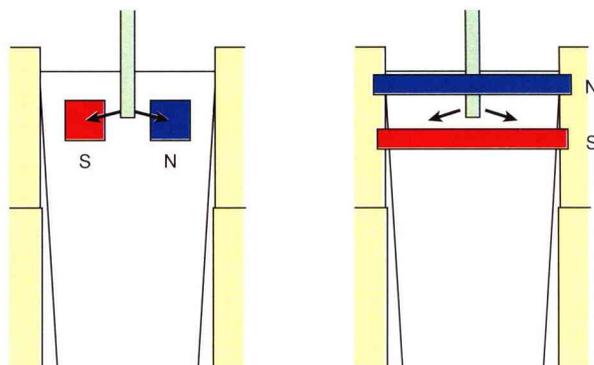


液体窒素を用いた超電導送電実験用ユニット。

地密着型発電)のような小規模な発電設備からの電力を安定化させるために有効だと考えられているようだ。エネルギーの利用効率を高めるうえでコージェネはきわめて効果的だとされているが、貯蔵システムを緩衝装置として組み込んでおけば安定供給の点からもより安心と考えられる。

エネルギー問題という切り口からさらにつけ加えておくと、究極のエネルギーといわれる核融合発電も、実用的なものにできるかどうかの鍵は超電導技術にかかっているといわれる。研究が進められている核融合炉には、いくつかの方式があるが、強力な磁界を使ってプラズマを封じ込める点は、ほぼ共通している。この強磁界を得るためには、どうしても超電導マグネットが欠かせない。現在ある実験設備は強磁界を常電導の磁石によって得ているが、この場合、必要な磁界を得るために大量の電力を投入せねばならず、出力よりも入力のほうが大きくなってしまふ。実験設備ならデータさえ得られればよいが、実用プラントとなればそれでは意味がない。少ない電力で強磁界が得られる超電導マグネットと組み合わせることで、はじめて実用的な核融合への可能性が出てくるというわけだ。

そのほかに電力関連では、液体窒素温度での超伝導送電の研究も進展している。送電時の電力ロスをなくせれば、省エネにも大きな効果が期待できる。



鑄造時に磁界をかけて湯流れを制御するノウハウの模式図。

鉄鋼分野に応用される超電導

交通、エネルギーなど、インフラの根幹で大きな働きが期待できる超電導の技術だが、今後は産業の各分野でも続々と応用例が出てくることが期待されるだろう。先述の半導体引上げ用の超電導マグネットもその一例であるが、鉄鋼分野のプラントでも超電導関連技術を使った新たな技術のシーズは、すでに提案されている。

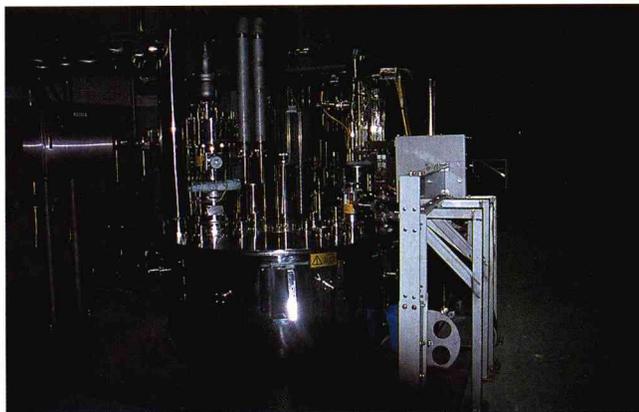
科学技術庁・金属材料技術研究所では、20Kで使える鉄鋼廃水の磁気分離用マグネットの開発プロジェクトが進行している。現行では、むろん常電導の装置が存在しているが、高温超電導磁石を使ったものができればよりコンパクトで電力消費量の少ないものが可能になるという。こうした磁気分離装置は、湖などのアオコを分離するのに使用できる可能性があり、環境ビジネス方面にも応用の可能性が考えられるという。

また近年は連続鑄造で磁界をかけて湯流れを制御したり、モールドに離型用のスラグを使わずに磁界をかけて軟接触状態を確保するノウハウが研究されてきており、そのための強力な磁界を与えるためにも超電導磁石が好適だと考えられている。連続鑄造から冷間圧延の工程での歩留まりや表面キズを減らし、品質向上やキズ処理のためのエネルギーコスト削減などが期待できるという。また同様にニアネットシェイプでも超電導磁石によって磁界をかけるモールドレスのノウハウが研究されるなど、鉄鋼製造技術のイノベーションにも超電導が役立てられそうな気配を見せている。

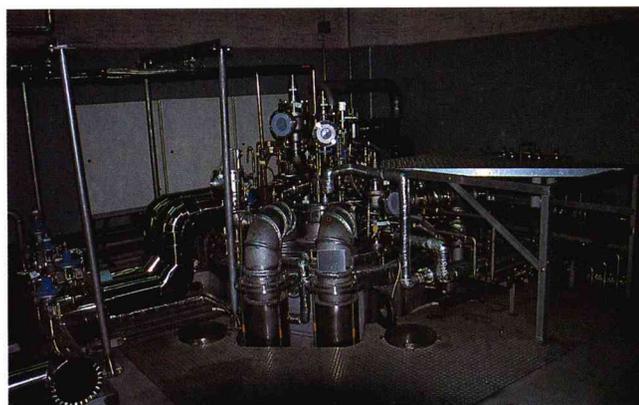
鉄鋼の例を中心にピックアップしたが、超電導関連技術は直接に間接に、基礎産業分野でさまざまに応用されていくことが期待されている。ただし必然的に新たな設備投資が必要と考えられることから、業種によって導入の時期にタイムラグが出ることは予想されそうだ。

極限の強磁界を可能にする

産業への応用という視点以外に、研究目的で強磁界が必要とされる場合にも超電導の技術が欠かせないものとなっている。



超電導磁石の内側に水冷銅磁石を組み合わせた金属材料技術研究所のハイブリッド・マグネット。世界最高の定常的高磁界40テスラの実現をめざす。

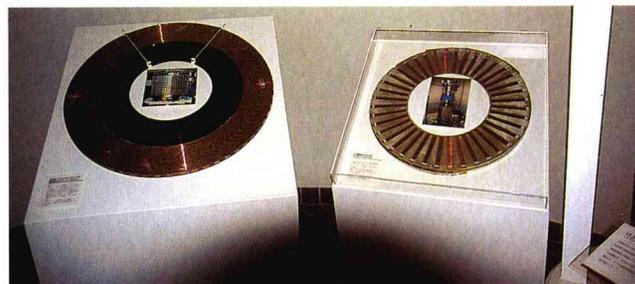


超電導磁石のみで構成されたものとしては世界最高磁界を誇る装置。

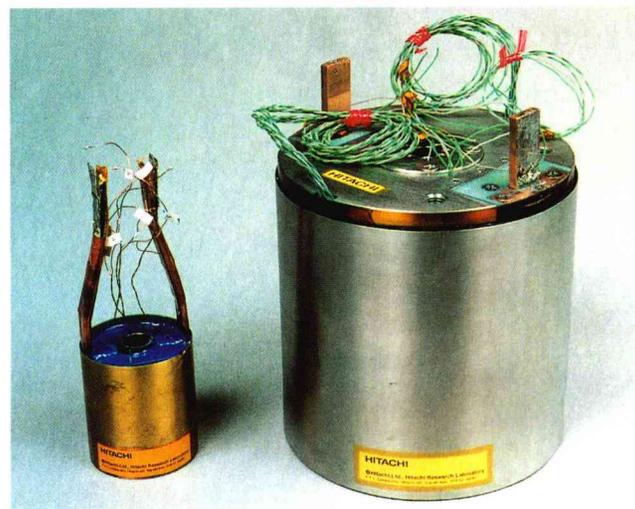
その代表的な例がNMR (Nuclear Magnetic Resonance / 核磁気共鳴装置) である。これは強力な磁界を与えることで原子に起こる共鳴現象をコンピュータで画像などの情報に変換するもので、近ごろ医療分野の先端技術として注目されているMRI (Magnetic Resonance Imaging / 核磁気共鳴映像法) もこの応用である。理化学研究用に用いられるNMRは、とくに強力な磁場が必要とされ、より高度な超電導磁石が欠かせないものになっている。

金属材料技術研究所の極限場研究センターにある強磁場ステーションでは、数種の超電導磁石の組み合わせによって、これまでに22.8テスラという強磁場の世界記録を作っている。この超電導磁石には外層部にニオブ・チタン、その内側にチタンを含むニオブ3スズ、最内層部にビスマス系の酸化物という数層の超電導コイルが使用されており、金属系超電導磁石で21テスラ、酸化物超電導磁石で1.8テスラ、合計で22.8テスラが出せるようになっている。同ステーションには、この超電導磁石をはじめとして強力な磁場を可能にする世界有数の装置があり、強磁場を必要とする世界の研究者に対しオープンにされている (共同利用型研究施設としてテーマを公募している)。

金属材料技術研究所では、新たなプロジェクトとして世界



「パンケーキ」と呼ばれる超電導磁石の本体。これを重ねて大きな磁石にする。



コイルの中心部分に置かれる酸化物超電導体による磁石。

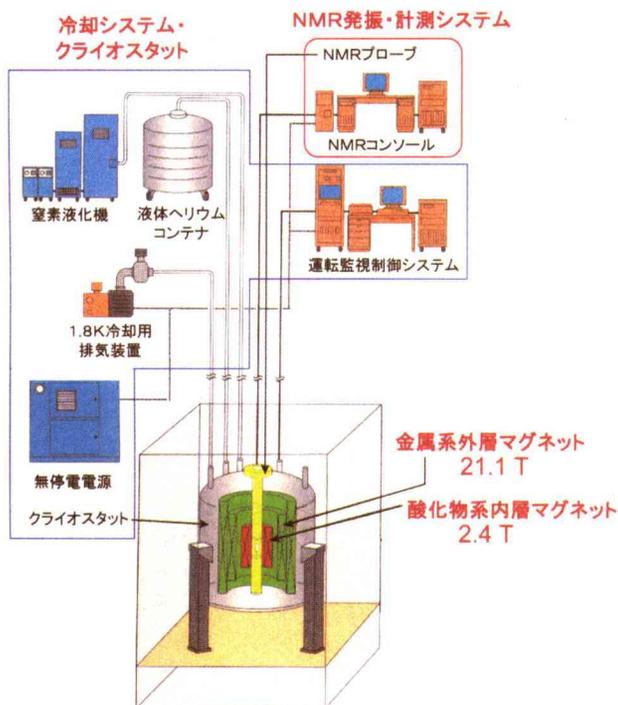
記録を作った超電導磁石をさらに上回る23.5テスラの装置と、それを中心とする1GHz (ギガヘルツ) 級の高磁界NMRシステムの開発に着手している。こうした高磁界NMRの用途例としては、ライフサイエンスの分野での重要テーマである蛋白質構造の解明などがあげられる。蛋白質は遺伝子とその発現の結果である生物固体とをつなぐブラックボックスの部分であり、高磁界NMRはそうした未知の部分に光を当てるうえでの有効な手段になると考えられる。

その他、学術関連では高エネルギー物理の分野で、大型粒子加速器やレールガンなどに強力な電磁石が求められており、超電導磁石が有効だと考えられているようだ。

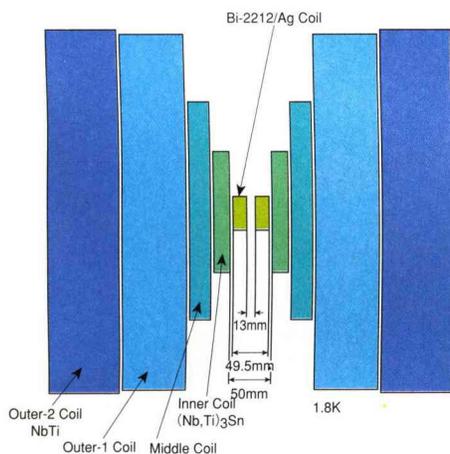
夢へむけ研究が進む超電導素子

超電導の可能性として最後に忘れてはならないのが、コンピュータ素子への応用である。超電導によるジョセフソン素子がコンピュータの処理速度を飛躍的に高めることは、過去さまざまなメディアでとりあげられ、話題を呼んだ。だが開発で先行していた米国の大手コンピュータメーカーが撤退するなど、産業化への見通しは、なかなか立たない状況が続いている。

その一方でそろそろ半導体の限界も見えはじめている。急激な高密度化をくりかえしてきた半導体による集積回路だが、通



1GHz級NMRシステム全体構成図。



22.8テスラを出した超電導磁石の概念図。

電（スイッチング）による発熱の問題などから、これ以上の集積化が苦しくなりはじめてきているというのだ。

超電導素子を用いたジョセフソン接合集積回路が可能になれば、消費電力を劇的に減少させることが可能になる。電力コストを削減できるのはもちろん熱による誤作動の心配がなくなるため、さらに高度な集積化が可能になると期待されており、国のプロジェクトとしていくつかの研究が進められている。

コンピュータのデバイス中では論理回路がもっとも通電の頻度が高く、熱を発生しやすいため、この部分をまず超電導化することがめざされているようである。超電導コンピュータ（ジョセフソン・コンピュータ）は半導体とはまったく異なるアルゴリズム（作動手順）で組み立てられることから、そのための回路設計が具体化のためには必要とされ、現在そのための研

究が推進されている。

しかし実のところジャンクション（素材の接合部分の機能）の特性安定の問題がまだ解決されねばならない課題として残っており、素材面からも超電導コンピュータの実現にはしばし時間がかかりそうである。しかしもしこの技術が実用化されれば、現在の半導体コンピュータとは別の体系をもつコンピュータ技術が成立する可能性も考えられ、より高速で、しかも高密度なチップが製造できるようになる。これはコンピュータ関連分野で日本が遅れをとっているCPUなどでの巻き返しのチャンスにもつながるかもしれない。

超電導素子の省エネルギー効果は画期的といえるもので、たとえば米国が2004年までの完成をめざして開発中のペタフロップ・コンピュータ（スーパー・コンピュータの1000倍の処理機能をもつ）は、約30MW（メガワット）の電力を消費するが、もしこれと同様のものを超電導素子で作りえたとすると消費電力は数10kWですむことになる。今のところあくまでも「夢物語」の段階ではあるというが、研究の進展に期待したい技術である。

2005年には超電導産業成立か？

より高温で機能する超電導素材の開発は、現在もひとつのフロンティアであり続けており、ビスマス系、イットリウム系などの先には、より臨界温度の高いタリウム系、水銀系などの酸化物超電導体といったものも浮上している。しかし実のところ、それらの実用化までにはまだしばしの時間が必要とされるというのが実情のようだ。それでも「酸化物超電導体が発見されてから10年でここまでできたというのは、かなり速い進展」（金属材料技術研究所・熊倉浩明氏）という意見もある。

またそうした比較的現実的で冷静な意見に対して「2005年には超電導産業の目鼻がはっきりしてくる」（超電導工学研究所・田中昭二所長）という力強い見方もある。「大量の電力を消費している半導体工場では超電導を使えば電力コストをかなり削減できるはず。どんどん新しい設備をつくっている業界ですから、この分野からまず広がっていく可能性は高いはず」（同・田中所長）。省エネルギーをはじめとした環境対応への社会的要求も高まっていくことが予期されるが、「そうした動きを規制ととらえるのではなく、新たなビジネスチャンスととらえる」（前に同じ）ところから超電導の応用技術は普及していく可能性があるという。

超電導の技術は今、「夢」から「現実」へという、ちょうど境界線のあたりにある時期なのかもしれない。

取材・写真協力：科学技術庁・金属材料技術研究所、
（財）国際超電導産業技術研究センター・超電導工学研究所、
超伝導発電関連機器・材料技術研究組合、東海旅客鉄道(株)、
東京電力(株)、中部電力(株)

話題の
PRODUCT

プロダクト

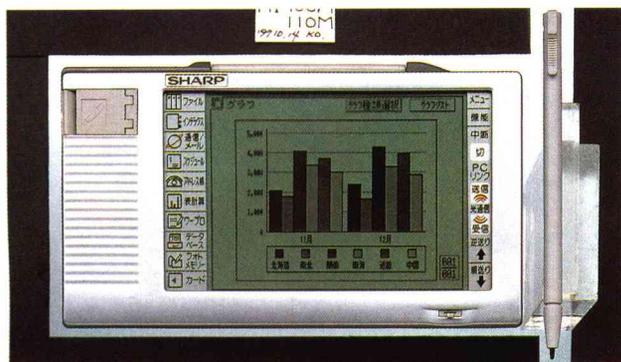
個人情報端末



常に携帯して使用できるのが魅力の 個人用携帯情報端末

市場はまだ黎明期、21世紀の成長分野か

パソコンの売れ行きが落ちているという。
消費税の5%引き上げや経済不況のあおりで、
個人消費が落ち込んでいるのが理由だという。
しかし、Windows95フィーバーでパソコンを購入したが
さっぱり使いこなせなかったという苦い経験が、
購入を思いとどまらせているという声もある。
そんななか、より機能を限定したPDAが静かなブームとなっている。



1997年11月に発売されたシャープの新型ザウルスポケット(MI-100)シリーズ。バックライトが不要なモノクロ液晶を使用することでさらに小型になった。単4アルカリ乾電池で約40時間動く。幅146×奥行83×高さ15mm、重さ195g、価格6万2000円～8万3000円。

女性ユーザー獲得をめざすペン入力タイプPDA

オフィスや研究室におけるネットワーク環境はかなり整備されてきたが、いつでも、どこでも、だれでもが使えるところまでには至っていない。これはパソコンを一人1台用意しても同じこと。人は必ず移動するからだ。もちろん、ノートパソコンを使用することで、ある程度対処することもできる。社内の移動程度であれば、ふだん自分のデスクで使っているノートパソコンを抱えて会議に参加するくらい苦にならないという人もいるだろう。では外出時はどうするか？

汎用性のあるパソコンは確かに便利なのだが、基本ソフトやアプリケーションソフトの肥大化で、快適に使うために必要なハードウェアの条件がどんどん厳しくなっている。補助的ではなしにメインでも使えるノートパソコンとなると、毎日カバンに入れて持ち歩くのは、さすがに遠慮したくなるサイズと重量がある。

いったい移動時や出先でパソコンを使いたい場合というのは、どんなときなのか。なんでもできるパソコンが本当に必要なのだろうか。そんな視点から必要な機能を絞ることで生まれたのが、個人情報端末（personal digital assistant：PDA）である。

一口にPDAといっても、その機能や形はさまざま。またどこまでがPDAで、どこからがパソコンなのかという境界線もあいまいだ。通常は、PDAとして専用開発された製品で、ハードウェアとしてどのような特徴を持っているかで分類されることが多い。

たとえば電子手帳のように個人の情報管理を中心に考えられた機種では、スケジュール管理やアドレス帳・電話帳といった情報管理ツールとしての性格が強くなる。もちろんかつての電子手帳のように、それだけが独立したデータをもっているのでは意味がない。あくまで情報端末であるから、自分のメインマシンであるパソコンとのリンクは不可欠だ。

電子手帳から進化したPDAには、シャープのパワーザウルス、

カシオ計算機のカレイド、セイコーインスツルメンツのBrainPad Tipo、富士通のINTERTop、USロボティックスのPalmPilot、アップルのNewtonなどがある。これらのPDAの最大の特徴は、ペン入力ということだろう。重量を100gの後半から400g程度に納めるために、キーボードを装備していないか、別途接続する必要がある。キーボードに代わる入力デバイスとして、ペン入力を採用されている。

では具体的に、どのような機能を備えているのか、パワーザウルスを例に見てみよう。

1993年10月に発売された1号機の開発コンセプトは、「だれでも簡単に使える個人情報ツール」というものだった。そのためキーボードではなくペン入力を採用し、コンピュータの知識がなくても使えるオペレーションを実現した。それまでの電子手帳から、コミュニケーションツールへと大きく一步を踏み出したといえる。

現在主力モデルとなっているのは、1997年6月に発売された「パワーザウルス MI-500」シリーズ。メーカーではその機能を大きく3つに分類している。1つはパソコンとの連携機能で、表計算ソフトExcel95/7.0のデータを取り込み表示したり、再計算できる。またRTFフォーマットを採用することで、MS-Wordや一太郎といったワープロソフトとも連携が可能になっている。

2つめはコミュニケーション機能と呼ばれ、インターネットなどの電子メール、ファックスを送受信することができる。

3つめは、マルチメディア機能で、35万画素CCD搭載のデジタルカメラを本体に直接装着することができ、ファイルとして保存したりアドレス帳などに貼り込むことができる。またインターネットのホームページをブラウジングすることも可能だ。またオリジナルのデータベースを作成することも可能になっている。

ハードウェア的な特徴としては、このクラスのPDAとしては唯一カラー液晶を採用していること、手書き文字認識によるペン入力が標準だが、オプションでキーボードを装着できるといったことがあげられる。

こうしたタイプのPDAのユーザー層はどのような人たちで、どのような使い方をしているのだろうか。

パワーザウルスについて見ると、ユーザーの約95%が男性のビジネスマンとなっている。特に30歳代46%、40歳代30%と、働き盛りといわれる年齢層が最も大きなボリュームゾーンとなっている。ユーザーの業種や職種にはこれといった特徴が見られない。最も多いのが外勤の営業職・販売員で12.3%、あとは技術職、営業系の管理職、技術系の管理職の順番で、およそ10%前後の割合となっている。ユーザーの使用目的について行ったアンケートでは、主な用途として、アドレス帳の管理76%、スケジュール管理73%、レポートの作成37%（複数回答）となっている（シャープ調べ）。



〈写真上〉パワーザウルスの主力モデル〈MI-500〉シリーズ。カラー液晶を搭載し、インターネットのホームページ閲覧も可能になっている。また購入者の約7割がデジタルカメラ付きのモデルを選択するという。内蔵リチウム電池で約8時間動く。幅161×奥行90×高さ23mm（本体のみ）、重さ315～320g（本体のみ）、価格10万円～16万8000円（デジタルカメラ付き）。〈写真右〉別売の携帯型キーボードは、パワーザウルスだけでなくザウルスポケットにも装着できる。価格9000円。

主なユーザー層から見て、こうした個人情報の管理が目的ということは容易に想像できる。ただ、こうした使用目的による需要は、今後それほど拡大するとは思われない。このためメーカーでは新たなマーケティングターゲットとして、若い女性層を取り込もうとしているわけだ。デジタルカメラの装備などは、そうしたねらいの最たるものだろう。

WindowsCE搭載機でデファクトスタンダードをめざす

一方、パソコンを使い慣れた人には、ペンタイプの入力デバイスは使いづらい。特に日本語の手書き入力になじめない場合が多いようだ。そこでキーボードを標準の入力デバイスとして開発されたPDAも多い。

このタイプとしては、NECのモバイルギアや富士通のインタートップ、カシオ計算機のカシオペアといったものがある。またPDA専用として開発されたものではないが、NECの小型ワープロ機アルデータとか、ミニノートPCに分類される東芝のリブレット、同じくNECのモビオNX、ハンドヘルドPCである日本ビューレットパッカードのHP-200LXなど、PDA的な使い方ができる製品もある。

ただし基本ソフトにWindows95を使用しているリブレットやモビオNXは、通常はPDAではなくパソコンに分類される。またMS-DOS互換の基本ソフトを使用しているHP-200LXも、PDAとして使用するにはユーザーによるカスタマイズが必要になる。

キーボード搭載PDAの主な使用目的は、なんとといっても電子メールだろう。たとえば1996年5月に発売されたNECのモバイルギアは、イントラネット（企業内で情報をやり取りするために構築されたインターネット環境）を前提に、電子メールの利用にターゲットを絞って開発が進められた。

モバイルギアの開発が始まった1992年当時は、まだ日本では企業内LANの整備はそれほど進んでいなかった。しかしアメリカ企業では、さまざまな連絡、会議、依頼書類などを電子メールで済ませる動きが活発になっていた。こうしたオフィスワ



ークの革新は、いずれ日本の企業にも及ぶことが予想される。モバイルギアでは、「いかに電子メールを使いやすくするか」に絞って開発が進められたという。

キーボードによる入力が標準となると、ブラインドタッチでできるキーボードが望ましい。このため昨年発売されたモバイルギア（ラージキーボード版）では、キーピッチ（1つのキーの横幅）を16.5mm取っている。このため全体の幅が245mmと、ペン入力タイプのPDAに比べるとかなり大きい。この傾向はキーボードタイプのPDA全体にいえることだが、携帯性と使いやすさが、どうしてもトレンドオフの関係になってしまうのは致し方ないところだろう。

いまこのタイプで特に注目されているのが、WindowsCEという基本ソフト搭載モデルの登場だ。WindowsCEはPDA専用ではなく、テレビ、電話、カーナビをはじめとする家電製品を制御するためにマイクロソフト社が開発した基本ソフト。Windows95と互換性を持たせながら、キーボードがなくても使用できるようにインターフェースなどが最適化されている。現在、NECとカシオ計算機が発売している。

ラージキーボード版では、機能を切り換えるために〈AP切換〉キーを使って〈アプリケーション切り換えメニュー〉を出し、目的のアプリケーションに割り当てられているキーを押す必要があった。CE版では、付属のペンを使って液晶画面に表示されている〈スタート〉ボタンをタッチするか、ショートカットアイコンをダブルタッチすることで、アプリケーションを起動することができる。ちょうどデスクトップPCのマウスと同じ働きを、ペンで実現していることになる。そのぶんキーボードの使用が減るためか、キーピッチが11.0mmと小さくなっている。

WindowsCEへ期待する声は、秋葉原などの販売店に強いという。現在のPDAのほとんどは、独自の基本ソフトを使っている。そのため一部パソコンとのデータ互換はとれるものの、原則的には同じ機種同士しかデータや機能の連携がとれない。またあるPDAを購入しても、将来その規格の製品が製造中止



モバイルギアは内蔵メモリーを増やした新型が登場した。ラージキーボード版のモバイルギア〈MK-MC32〉(写真左上)はメモリー6MB、モノクロSTN液晶、モデムを搭載し、幅245×奥行122×高さ24.5mm、重さ550g、価格8万3000円。CE版の〈MC-CS13〉(写真右上)は、メモリー16MB、モノクロSTN液晶、モデムを搭載し、幅175×奥行97×高さ27mm、重さ400g、価格9万4000円。どちらもアルカリ単3乾電池2本で約30時間動く。東芝のPHS一体型PDA ジェニオ〈PCV100〉(写真右下)は、幅155×奥行76.5×高さ20.3mm、重さ220gのサイズに、PHS機能やインターネットのホームページ閲覧機能などを詰め込んでいる。価格オープン価格。



になったり、規格が変更されてしまう可能性もある。約20年前のパソコン黎明期に、いくつかの基本ソフトが乱立し姿を消していった情景とオーバーラップしてしまう。PDAの基本ソフトを共通仕様にできないかという期待が、特に販売店サイドに強いというのは、こうした過去の経験に基づくものだろう。

WindowsCEがWindows95のサブセット仕様になっていることから、アプリケーションが作りやすいという理由もある。Windows95用に書かれたプログラムを、それほど大きな変更なしにWindowsCE用に作りなおせる。「パソコンはソフトウェアがなければただの箱」というのは言い古された言葉だが、PDAにもそれは当てはまるということだろう。

市場規模の拡大が当面の課題

3つめの方向は、携帯情報端末と電話との合体である。出先から通信を行うには電話が必須になるが、電話と一体化すればISDN仕様のグレーの公衆電話を探したり、PHSや携帯電話を別に持ち歩く必要もない。電話としてもPDAとしても使えるという一挙両得をねらったものだ。こうした携帯情報端末は、これまでPHSと合体したものがほとんど。PHSは、PIAFS (PHS internet access forum standard) やαDATAといった32200bps (bit per second) で送受信できるデータ通信規格が標準化され通話料も安い。9600bpsでしか送受信できない携帯電話に比べ有利性があるからだ。最近、相次ぐ携帯電話の料金引き下げによってPHSの新規契約台数が減少傾向にあるが、PHSとPDAの合体によって、新たな需要を喚起したいというメーカーの思惑もあるのかもしれない。しかしNTTドコモから携帯電話とPDAを一体化した製品も発表されている。

一体型PDAの問題点の1つは、電話として利用する場合、大きすぎるということだ。最近のPHS、携帯電話は非常に小型化されており、胸ポケットに入れても邪魔にならない。しかしPDAとして利用するには、ある程度の大きさの画面が必要になるため、電話と比べるとどうしてもかさばってしまう。しかし最大の課題は、経済性だ。すでにPHSや携帯電話を持っている人にとっては、2つも電話はいらない。また企業が導入する場合には、公衆電話などの回線利用に比べて通信コストがかなり大きくなってしまふ。ランニングコストの問題は、現在の日本の経済状況から考えても、容易に克服できる問題ではないだろう。

現在、PDA市場は年間販売数が約75万台といわれている。パソコン市場のおよそ10分の1の規模しかない。

NECでは、PDAはこれから成長する市場と見ている。たとえばLANとの接続機能を強化するなどネットワーク全体の環境整備をきちんと行えば、業務用の携帯端末に特化することは簡単だ。従来から、こうした使われ方をしてきた情報機器は数多く存在する。身近なところではファミリーレストランのウエイトレスがオーダーを打ち込んだり、宅配便の運転手が使うハンディターミナルがある。

一方、ペン入力タイプのPDAに多く見られるように、あくまで個人のコミュニケーションツールとして発展する方向もあるだろう。PDAの使い方はユーザーの数だけあるといわれるが、いかに新しい可能性を消費者に示せるかが、市場全体の拡大をもたらす大きなかぎかもしれない。

[取材協力・写真提供：シャープ株式会社、日本電気株式会社、写真提供：株式会社東芝、水越義昌、光文社「月刊ゲイナー」]



ポルトガル初伝銃
(ポルトガルから最初に
伝わったといわれるもの)



伝 八板金兵衛清定作火繩銃
(国産第1号銃といわれるもの)

Steel 鉄の点景 Landscape

天正2年(1574年)、最強といわれた1万5千の武田騎馬隊は、織田・徳川の連合軍の前にわずか6騎を残して壊滅したといわれる。世にいう長篠の合戦である。この戦で猛威をふるったのが、信長が堺の商人から手に入れたといわれる3千丁の鉄砲である。長篠を機に戦の様式が大きく変わったといわれるが、そうした時代の変化の裏側には、技術にたずさわる者の苦闘があった。種子島に伝わった鉄砲が国産に成功するまでのエピソードを、その実物写真とともに、しばしご賞翫の程。

時代を変えた鉄

た　　ね　　が　　し　　ま

種子島

鉄砲づくりの鍵になった「ねじ」のノウハウ

刀鍛冶師・八板金兵衛は、頭を抱えていた。目の前には領主・種子島時堯ときたかが南蛮人から金二千両で買い受けたという鉄砲がある。製造の秘法を会得すべしとの命を受けたものの、どうしても分からないのだ。いったいどうすれば鉄筒の底をふさいでいるこの不思議なからくりを形にすることができるのか。

伝え聞くところによれば、南蛮人たちは、この鉄砲を使って26羽もの鳥を立て続けに撃ち落としたりしたという。寸分の狂いもない鉄筒でなければ、それほどの正確さは望めない。刀しかつかったことのない金兵衛たちにとって筒の製法は、まったく未知の領域だった。しかし筒については軸となる真金しんがねのまわりに平らな瓦金かわらかねを叩いて鍛えるという方法で、苦心の末に何とか同じものをつくることに成功していた。

だが……。どうしても分からないのは、筒の底をふさぐ技術だった。

南蛮の銃には筒底の内側と栓とに凸と凹に噛み合う螺旋の溝が掘ってあり、回し込んで底をふさぐようになっていた。今でいう「ねじ」である。だが、この溝を切り込む方法がどうしても分からないのだった。

しかたなく金兵衛たちは底を焼きしめてふさいではみたのだが、この鉄砲は撃つうちに火薬のカスがたまり、やたらに暴発を起こした。「ねじ」の栓は、ときおり外して筒を掃除するためには、どうしても必要な装置だったのだ。南蛮船でやってきたポルトガル人たちの中には、撃ち方は知っていてもつくり方を知る者はなく、金兵衛の悩みが解決されることはなかった。

ついに金兵衛は、決心をした。秘法のためには、娘の若狭わかさを南蛮船の船長に嫁がせ、南蛮の地より技術者を連れてこさせるしかない。——こうして17歳の娘、若狭は自らの身を挺し、見知らぬ南蛮船に乗って種子島を後にすることとなった。そして翌年、父の悲願に応え、彼の地より鉄砲鍛冶を連れて帰ってきたという。金兵衛たちは、この鍛冶師に底をふさぐ技術を習い、ようやく国産第一号銃が完成した。

金兵衛父娘の話は、伝承としては残っているものの主要な史料にはその記載はなく、わずかに矢板家の家系図に出てくるのみなのだが、この逸話によるかぎり、鉄砲の伝来は同時に

「ねじ」の伝来でもあったことが推論できる。現代を支える巨大な鉄の文明は、ボルト・ナットに代表される「ねじ」の技術なしでは成立しえないが、どうやらこの時、鉄砲とともに「ねじ」のノウハウも伝えられたらしいということが分かる。また、日本人として初めて欧州の地に足を踏み入れ、重要な技術を伝える役割を果たしたのがうら若きひとりの女性であったといわれていることも興味深い。

歴史を伝えた技術者の存在

歴史の教科書にも書かれているように、鉄砲を持ったポルトガル人が初めて種子島に漂着したのは、天文年間／西暦1543年であったとされている（欧州側史料では1542年）。領主・種子島時堯は轟音を発する不思議な飛び道具の威力に驚き、二挺を買取ったという。そして火薬の製法を篠川小四郎に習わせるとともに、刀鍛冶の頭領・八板金兵衛には自らの手で同じ鉄砲をつくり上げてみるよう命ずる。だが、鉄砲そのものの製法を知る技術者は南蛮船の一行の中にはおらず、鍵となる「ねじ」の製法がどうしても分からなかった。

思案する時堯らの元に、技術者の乗った貿易船が着いたのは、翌年のことだったと史料は伝えている。金兵衛らはこの機をのがすまじと、鉄砲の製法を修得し、わずか一年にして数十

挺を製作することに成功した。この技術がやがて紀州や堺に伝えられ、多数の鉄砲鍛冶が生まれ、大量生産へと結び付いていったというのが、旧来からの定説である。

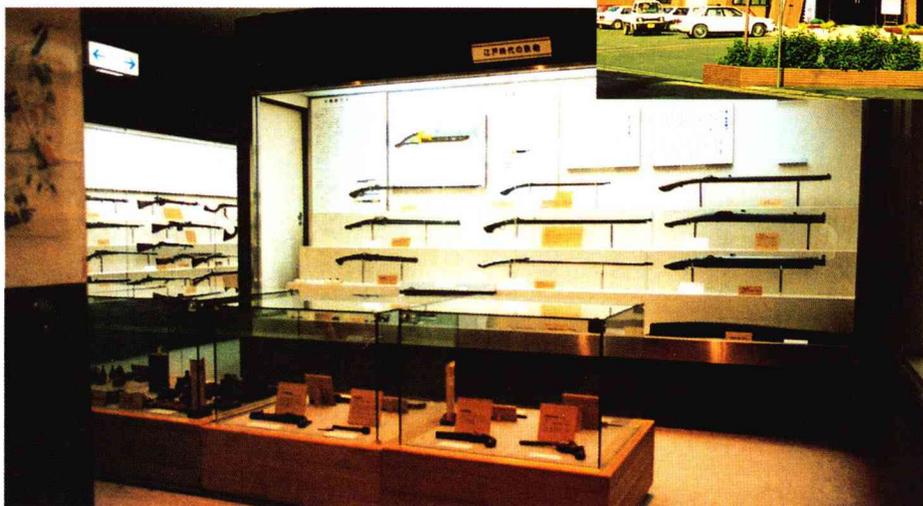
近年の歴史研究の中には、こうした一元論的な鉄砲伝来説に疑問を呈する見方もある。私貿易をしながらしばしば海賊行為も働いた船の民、つまり倭寇が種子島以前から大陸等を経由して鉄砲を知っていたことが史料からも分かっているが、この倭寇による無数の交易行為が鉄砲を伝えるうえでの媒体になったのではないかというのが反論の主たるものである。この歴史観をとるなら種子島のストーリーは、そうした無数にある伝来秘話の中にあってひとときドラマチックなものひとつであるにすぎない。どちらの説が事実に近いのかは、現状ではまだ明確には断定できないようである。

ただいえるのは、歴史の変わり目に八板金兵衛のような熱心な技術者たちが存在し、暗中模索を繰り返しながら、時代を次へと渡したということである。そのことだけは疑うべくもないだろう。現代を担う技術者の中にも、時代の画期をみつめている人々がきっといるはずである。現代の金兵衛たちは、はたして何を見つけ、そして超えようとしているのだろうか。その苦闘の中から時代を解く技術が見出だされることを切に願いたい。

[取材・写真協力：種子島開発総合センター]

種子島開発総合センター／鉄砲館

ポルトガル初伝統、伝 八板金兵衛清定作火縄銃をはじめ、国内外のめずらしい古銃約100丁を展示する。ユニークなデザインは南蛮船を模したもの。鉄砲展示室と郷土資料室からなり、鉄砲と歴史はもとより種子島の民俗、美術工芸などについても見ることができる。鍛冶と製鉄についての資料、種子島家に関する資料などもある。休館日は7月、8月をのぞく毎月25日と12月29日～1月1日の期間のみ。



鹿児島県西之表市西之表7585番地
TEL09972-3-3215
西之表港から徒歩10分
種子島空港からバス45分

展望

工学における産学人材交流ポテンシャル

町田輝史 玉川大学工学部 教授

Terufumi Machida

Present State and Potentiality of Research-engineer Transfer between College and Industry

1 はじめに

工学または工学者は、学院(大学、大学院、高専など)にあって生産科学を探究しつつ、工業を主とする社会に役立つ人材や学術的成果を無償供給する。一方、工業または技術者は、企業にあって製造技術を探求し最適化を計り、主に社会に役立つ商品を有償供給する。このように両者は本質的に異なる役割を担っている。とはいえ工学は、工業を通じてのみ自己表現できること、常に素速く革新を求めなければならないことなどの点で、他の学問領域と異なる面があり、少なくとも技術を担う者の養・育成(理工系学生の教育ならびに企業技術者の能力開発)に関して工業と良い関係を保たなければならないと言えよう。ここでは、産業界と学院の間での人材交流について現状と課題を展望する。

2 工学を取り巻く昨今の事情¹⁾

2.1 学卒への2つの期待

若者人口の減少、児童・生徒の理科離れ²⁾と時間数の大幅減少³⁾、進学率の上昇、学生の幼稚化、大学の大衆化などに伴う教育対象者(顧客)の量と質の低下を念頭に、大学は誰でもいつでも気楽に学べる脱エリート教育の場に変わるべく、魅力あるカリキュラム、単位数削減、自由選択枠拡大、分野の拡大(学際化、国際化)、生涯教育機会の提供など、改革に忙しい。

一方、個人生活重視、転職自由化、高学歴者急増、製造業離れなどの風潮、また企業の事業再構築と安定昇進・雇用制度の崩壊、技術の国際化などを背景に、社会や志高い技術者が、実力ある高質の技術者の育成を一層求め出した。新卒技術者にも初めから、高度専門知識、国際性、創造性(問題解決能力、応用力)、統率力、挑戦意欲、などの即戦

的能力が求められる。

「脱エリート」と「高質技術者」の提供という一見矛盾する要請に対して、大学は大学院重点化で応えつつある。すなわち高等教育の目標に対する認識を改め⁴⁾、学部は、高校までの教育を補完し人間形成も行いつつ専門の基礎を教え工学的素養を持つ社会人を養成する場、大学院は体系的カリキュラムで専門の初歩から教授し、修士課程が高度な専門職業人、博士課程が自立した研究者を養成する場であるとする。

2.2 大学の個性化

いま大学は各種の規制が緩和され一律一様であった運営から、それぞれの大学が競いあい評価を求められるように自らの責任で自由に特徴ある分野(教授陣)や科目を持ち、また地場産業との連携を深めることで、個性を主張しながら人材作りと研究をする場に変貌しつつある。現状に安住することは許されず、対外サービス(有料相談、貸研究室、技術開発協力、認定講座、生産品販売など)を積極的に進め、教育研究資金を得る努力も求められている。

2.3 助成と共同研究

必ずしも十分な成果が得られたとは言い難いであろうが、文部省は大学に教育研究のほか地域社会や産業界への貢献を求めており、大学側には研究の活性化、社会の要請や研究主題の感知、助成の期待など、産業界には基礎研究や萌芽研究の依頼、幅広い知識・研究動向の把握、大学の持つ頭脳と研究設備の活用、などの利点があるとしている。

一般に工学の場は、施設、設備、装置・機器類が古く、数も少ない。研究費や研究補助員も大幅に不足している。これらは工学教員の教育研究効率を低下させ、学生に工学を敬遠させる一因となっている。技術科学は社会還元が重要である点からすると、産学の共同研究開発は好ましいこ

となので、度が過ぎて大学に必要なモラルの低下や時間を要する研究の軽視にならないように、また大学が基本的にそのリソースを社会一般に普及する責務を負っていることを理解したうえで積極的に行いたい。

2.4 実践教育と教材作り

学生の見学、実習、学部・修士・博士の研究や若手教員の研修は、工学の成果が工業に反映さるべきこと(目的意識)や技術研究の必要性(問題意識)を認識させるのに効果的である。技術の進歩が著しい今日、寄付講座ほどの規模でなくとも企業人が寄付講義などで、工業の雰囲気や、技術のロマン、物作りの楽しみ、技術者の誇り、社会人になる心構えなどを語ることは、製造業で活躍できる優れた人材の育成に大いに役立つ。

なお戦後長い間、工学は協調性が高く労を惜しまない要員を大量供給し、工業は企業内教育でこれを効率よく戦力化し、事業・組織拡大により労に見合う地位や給与などを与え処遇した。しかし今日、その図式は過去のものとなった。

今日は協調第一、終身雇用、会社人間などで表された集団の時代から、個性、社会性、海外活動能力、挑戦意欲、学位・資格・免許、などが尊重される個人の時代である。若年者減少・高齢化社会をも見据えて、大学(院)卒に専門性を求め早期に責任を持たせる、一般職と専門職のそれぞれに高度熟練を求める、専門職を管理者の下に位置づけない、など技術者の能力とモラルを最大限に発揮させる方策や学院と協調し教育を継続して、中高年技術者の能力・活力を確保する努力も望まれる。

いま製品は複雑多様化し一種のブラックボックスになっていて、次世代を担う者に利便性だけを享受させ物作り技術への接近を難しくしており、科学技術の成果が科学技術を分りにくくし嫌いにしてしまうという皮肉な状況にある。物作りの科学技術ファンを得るために、まず生産技術や製品の内側を平易に表した視聴覚教材を作り、学校や社会に情報発信したい。現時点では疑似体験の前段階として、ビデオが効果的であろう⁶⁾。物作りのバーチャルリアリティなどの制作も考えられて良い。企業の保有する資料や映像の提供が、学会や大学の教材作りに大いに貢献できる。

2.5 ハイブリッド構成

組織に多様な人材が存在すれば、基盤が広がり、互いが鍛えられ、活性化され、各種の事態に対応できるので混成がよいとされる。近い将来、各大学の理念に基づいて有為の人材を見いだし自由に選考・登用・処遇し、研究環境なども裁量することになる。

大学審議会が、教員採用について公募制を活用し、他校出身者、他大学等での教育研究経験者、民間企業等で多様な経験を積んだ社会人、女性、外国人など多様な経歴・経験を持つ者の積極的採用を勧め(1994)、他の大学・研究機関との人事交流を進め、教育研究活動を活性化するために教員任期制の導入を打ち出した(1995)。経団連も、大学理工系の研究機能強化に関して教員の資質を高め教育研究を活性化する方策として、閉鎖性・保身を排し明確な競争原理と産学双方向交流を導入することとしている(1992)。

端的に言えば、今後の高等教育は、学部では生産の実際を語り勉学の動機づけをすることが大切であり教育者がその経験をもとに教育に当たること、大学院ではその分野の開拓者たらんと野心を持たせる必要があり研究者が価値判断、費用対効果のよく検討された研究を通して教育に当たることがよいと思われる。いずれにしても教育研究が実利や常識に過ぎて先進性を損わない範囲で、企業経験が大いに期待され、後述のように、多くの大学等で産業界の人材を受入れようとしている⁵⁾。

しかし、研究調査ができない(単に企業に不向き)、専門知識に欠ける(学部生に経験だけしか語れない)、唯我独尊(企業離れできない、学界や教育現場に馴染めない、強い管理者指向、人望がない、研究だけを好む)、無気力・無関心・無責任(余生を静かに送りたい、仕方なく転身した、他人依存)、自主管理・自らの手による雑務処理能力欠如、などの属性を持つ者は、大学に適合しないとして敬遠される。

3 学院と企業における研究者の特徴

3.1 技術研究の種別と内容

学院が比重の差はあれ学術研究と人材育成の両方を義務とする以上、その担当者(教員)もまた両方を遂行する能力を持たなければならない。ところが産から学への転身者の場合、しばしば前者に対する意識が後者に比べ弱い、または意識していてもその内容に違いがあると言われる。

学院のあり方に対して様々な議論があるが、あくまでも学院の中心には研究があるべきであろう。図1に概念を示すように、研究が基になって教育(学生、社会人の教育)、協力事業、企業や地場産業に対する奉仕、独自事業(地域への貢献、製品・技術供与、人材派遣等)などができ、工業界や地域社会の活性化に役立てる。図の尺度や割合をどの程度にするかは、それぞれの学院に委ねられてよいと考えられる。

科学技術創造立国を謳い基本計画⁷⁾も定まった今日、技術研究が一層声高に促されている。いま筆者なりに生産科学または技術科学の分野の研究を、大雑把に次の5群に分



図1 大学・大学院の社会への貢献プロセス

類する。このうち学院では、基礎研究がもっとも大切とされ主流で、次に青空研究が好まれる。その境界は明確であろうはずもないが、問題発見の能力(独創性)と問題解決のそれ(創造性)は別物⁹⁾で、前者を学院で、後者を企業で発揮する必要性が高いことから来るものであろう。育成研究は具体的に方向を絞り込むことが難しいので、企業と連携した方が良いと言える。

青空研究：個人の科学的関心により行われ、研究の設定は無目的、青天井、自由放任(無制約)である。学院で行い得る。

基盤研究：自己使命感(貢献したいとする意識)を基に様々な方向を目指して、主に学院人が自己規制に依って進める。あくまでも自らが指揮者で研究遂行者である。

育成研究：指導者の明確な研究指針・テーマに沿って行われる。ニーズに対しての方向づけが強く、戦略研究⁹⁾あるいは種まきの研究と言っても良い。主に企業や国研の研究者によって行われる。

開発研究：経済性を考慮した製品像を設定して具体化技術の開発を計る。企業の経営方針に沿って、強い指揮監督下で技術研究者が担当する。

商品開発：製品の魅力や実用性などを改善・改良して付加価値をつける。開発技術者が、顧客の動向を強く意識して商品化する。

3.2 産学研究者の特性比較

一般に企業の研究者には、①商品・製品を意識した目標を持つ、②強制力によって方向付けされる、③集団で成果を目指す、④専門の部下や補助者が多い、⑤成果の発表は

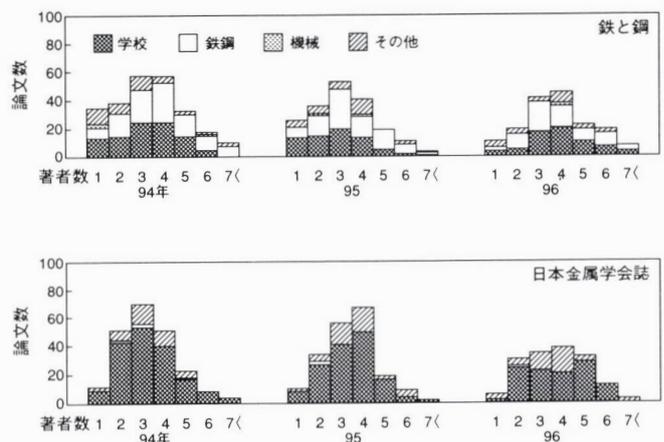


図2 著者数ごとの論文発表数

企業戦略の一環として行われる、などの特徴がある。これに対して、学院の研究者には、①多くの場合個人的関心によって(賛同者がいなくても)科学の探求をする、②学生教育に関する業務の比重が大きい、③個人の業績が評価される、④原則的には単独で研究をする、⑤学界との交流を重視する、などの特徴がある。

研究開発の動機(5傑)は、前者が①製品化の喜び・充実感、②企業業績の向上、③認知・評価・処遇、④成長感、⑤社会人としてのキャリアと続く。後者は確かなデータではないが、①工業への貢献、②名誉・科学技術史上の足跡、③専門家集団の構築、④研究費集め、⑤ステータスというところであろう。

研究環境については、前者が研究補助者、設備などの点で優れている。後者は雑務(しばしば教育業務と呼ばれる)が圧倒的に多い。生産年齢については定年が長く人事異動も強制的には行われないので生涯一研究者として長期間同じ主題で探求できる後者が、一般に高い。他方、大体において具体的製品にしたいという目的意識は強くなく、リスク意識が弱く、マネジメント能力はあまりない。研究費が少ないが、時間の融通性、学会交流のしやすさ、大学院生・助手時代における研究手法の徹底した訓練、などの良さもある。

いま「鉄と鋼」誌に掲載された論文数と著者数を、筆頭者の所属で学院と鉄鋼大手5社を比較した。図2から、各年度とも発表数は圧倒的に企業側が優勢であること、学院の場合には3名程度(多くは大学院生を含む)が多いのに対し、企業の場合にはもっと多数になりがちなこと、などの特徴が見られる。なお、「日本金属学会誌」、「塑性と加工」誌、「日本機械学会論文集(材料篇)」などには、鉄鋼研究者による論文はきわめて少なかった。

これより、鉄鋼の研究成果は組織でなされ、鉄鋼業の中でのみ用いられがちなのが垣間見られる。これは一流業

界に共通する特徴でもあるが、例えば技術水準の向上や産学交流の展開に良いことかという疑問で、研究者が自らを活性化し専門を深化・展開しようとするには、視野の共通するグループ内だけで論じているだけでは物足りず、むしろ他の情報も仕入れられる外界と意識的に接触した方が良いかと思われる。

3.3 学院人の日常

学院(工学)は指揮系統の明確な縦型組織を持たず、何事にも教員の合議を尊ぶ。そのことが教育研究の自由と深化に大切であるとされる。その背後には、すべてを自らの責任において独力で処理すべしとの掟がある。

教授の本務は学術研究と人材育成であるが、会議や研究室管理、就職相談、機器修理、研究費調達、材料器具の発注、工業界と地域へのサービス、学会活動など付帯業務が実に多い。講座制度が崩壊し定員が減少した現在、多くの教員は、年中昼夜も分かたず、あたかも家内手工業的業務に多能工として忙殺されており、それをこなせなければ何事も成し得ない。

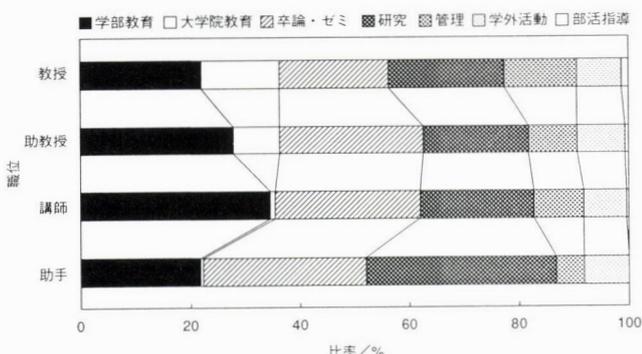


図3 工学系大学教員の業務内容 (首都圏133名、1994)

例えば図3は、首都圏の国公立大学の工学教員133名に対するアンケート結果である。教授の場合、学部教育、大学院教育、卒論ゼミ、研究、管理、学会活動などに広くたずさわること、助手時代は別として学部教育などに大きなエネルギーを投入するわけにはいかないこと、さらに学術研究は日中ほとんどできず放課後や休暇時などにならざるを得ないこと、などの様子が分かる。

また独自性発揮や自己点検のために学科再編やカリキュラム改訂など、大学内は激動の最中にあり、守備範囲の拡大や別分野の科目担当などを引き受けなければならない。さらに、近年の論文数など研究成果が厳しく問われるとともに、顧客の満足度を測るために授業項目の公開や学生による授業評価もなされるようになった。

一方、時代の流れで若者の理工学離れなど、奇妙な理解しがたい顧客が大勢を占める。例えば現在、製造業(特に重厚長大型)よりも、金融、流通などの非製造業のほうが明らかに人気がある。仕事が楽しそう、将来の給与格差が大きい、都会で勤務できない(工場が田舎)、職場に若い女性がいらない、仲間が知らない(パソコンのメーカーを除く)、先輩のおじさんたちが怖そう、作業着が嫌い、などが主な理由である。しかし、学院はこれを許容し、教育に一層努めるしかない。

このように教授は今、好むと好まざるに関わらず、負担が増加してその精神的余裕は失われつつある状況にある。

4 産学人材交流の現状

4.1 工学教員と学生の数

産業界と学界の人材交流には、人事異動(転籍)を伴う交

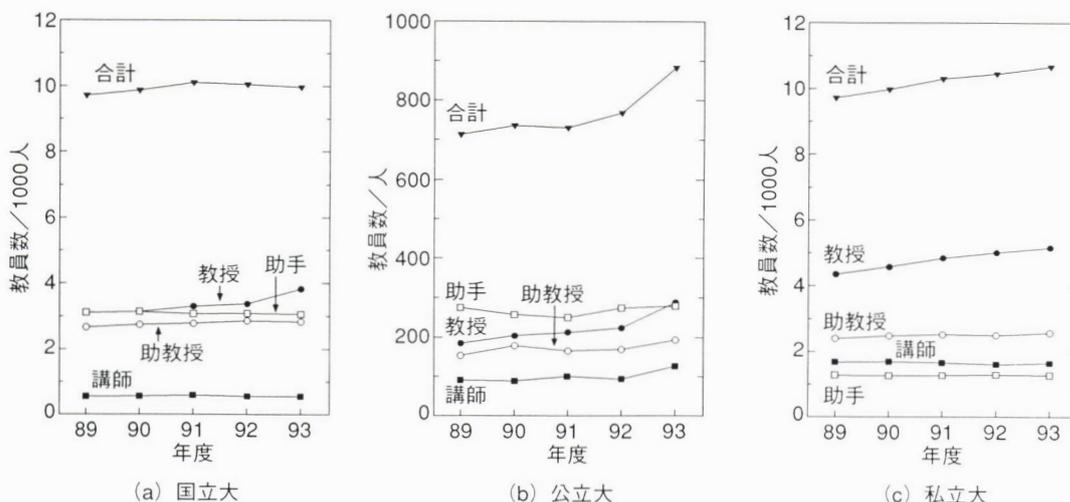


図4 工学系学部における教員数の推移

流のほか、出向、併・兼任などの形もあるが、ここでは産学人材交流(転籍)の動態(1989-1993年度)⁵⁾を見ることにする。

工学系学部の教員数は、図4に示すように、漸増傾向にあったが、今はほぼ横這いで、私立大でごく僅か教授が増加し続けている。国立大では教授、助教授、助手の数がバランスよく増すのに対し、体制の異なる私立大の場合には教授が助手も兼務という実態から、教授数だけが増すことになる。一方、教員当たりの学生数を見ると、図5に示すように、学生数が増加したため教員の負担は若干増加傾向にある。平均値で、国立大は漸増し15人弱(専門だけでは若干上積みされる)、私立大ではそのおよそ2.3倍になる。なお国立大の場合には、助手、技官などのスタッフが厚く負担が軽減されるのに対し、私立大の場合には教授が単独でその数字の学生を持たなければならないことが多いので実質の格差は一層大きい。

4.2 大学等の見方(アンケート回収率71.9%-164校)

多くの大学・高専等で、機会があれば産業界の人材を受

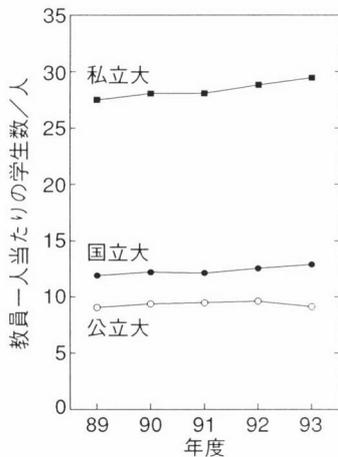


図5 工学系学部における教員一人当たりの学生数

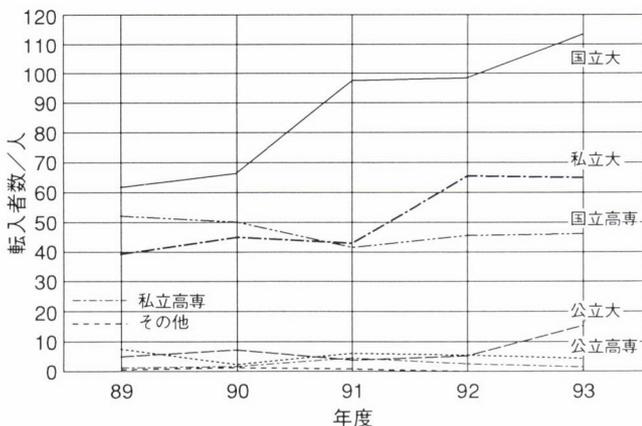


図6 企業からの転入教員数の推移

入れようとしており、図6に示すように、転入者の数は漸増し、93年度に合計245名が企業側から大学へ移動した。94.5%が企業から人材を採用した経験を持つ。逆に教員が企業へ移動した例はほとんどない。

教員を採用した理由として、学科の統廃合(主に国立大)や新增設(主に私立大)に伴う欠員・増員がもっとも多く、大学の活性化(14.4%)、学科増と続く。大学が外部から人を求める主な理由に自らの活性化を挙げているのが、とくに注目される。

募集に当たっては、そのときの状況(年齢構成、将来構想)で、その分野(学科、講座、科目)にふさわしい人材を求めることになる。選考した具体的理由は、図7に示すように、まず専門分野、次いで実務経験が重んじられ、そして教育者としての資質、学位保有の順になる。なお守備範囲が広いハイブリッド型人材の方が、少なくとも教育面で適合しやすく易動性は高くなる。募集方式は公募をするが、結果として図8に示すように、多くは学内で重きをなしている

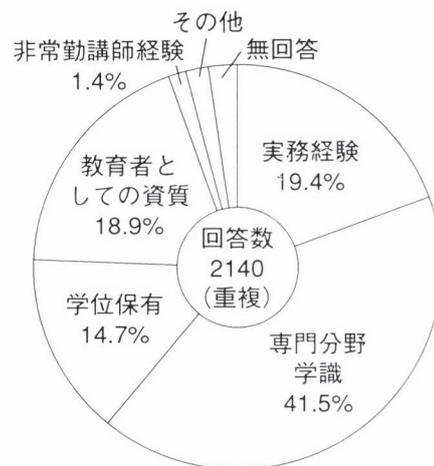


図7 企業から教員を選考した理由

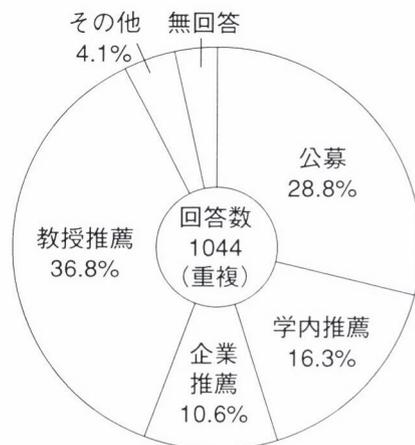


図8 企業から教員を募集した方法

教授の推薦による。企業が教授を通じて推薦するケースも含まれよう。純然たる公募によって決定したものは、30%に満たない。

4.3 企業等の見方(アンケート回収率19.7%—64社)

全体として移籍数は漸増している(データ略)。アンケートは大手(工業)に対して行われたが、移籍経験(多くは5年間で1~2名)を持つ企業は半数を越えていない。しかし110名もの転出者を持つ企業もあった。ベテランクラスが教授・助教授へ転出することが多く、その約60%が博士である。主に本人の希望、企業の推薦、大学の要請、などによる。多くの場合、転出者に対する特別な配慮はしない。大学側に対して、募集の長期計画や分かり易い情報、また任用条件の緩和を求めている。

4.4 転身者自身の見方(アンケート回収率48.6%—402名)

転身者は、大学院を修了した博士号保有の国立大出身が多い。若手の国立大、高専への助手としての転身も少なくなく、それぞれ約41%, 26%を占める。分野は、国立大等では電子・情報系、私立大等では機械系が多い。

転身は、研究・教育への情熱、勤務地などの理由で本人が希望した場合がもっとも多く、次いで大学側からの要請、企業方針となる。その際、障害があったとする者が約30%あり、その内訳は経済的理由(大学は給料が低い)、勤務地、所属企業(辞めないよう説得があったことをうかがわせる)の順になる。採用条件(学位や論文数)の厳しさも挙げられた。

転身に対して、まあまあ納得、我慢している、失敗したという回答も見られたが、多くは総合的に見て、図9に示すように、適性により成功したとしており、十分満足、満足を加え約70%に昇った。しかし約50%のアンケート非協

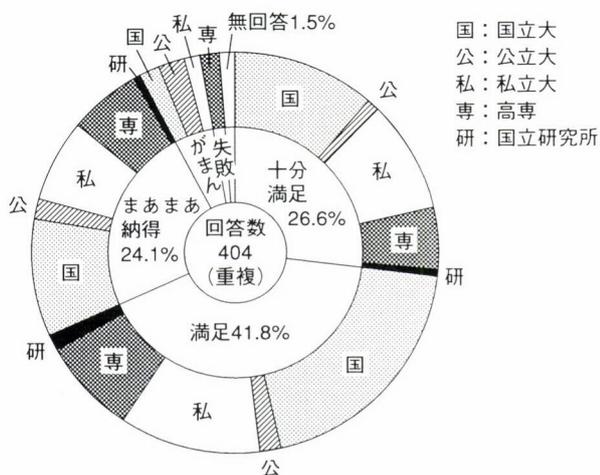


図9 企業から転身した工学教員の満足度

力者の中で面白くないとする割合が高い可能性がある。

なお、成功ではあったが現在が充実・満足したと感じているわけではなく、収入、研究、教育環境、福利厚生、勤務体制等の点で不満足とする者の割合が高かった。

また、教育・研究の難しさや企業と異質の環境などの現実には直面して、困惑し悩むことも少なくない。その主な内容は、多い順に次のようになる。

- ①担当；講義等が多くて準備や後処理が大変、卒業研究生の数が多すぎて目が届かない、テーマを設定できない、生活指導や課外活動指導などにも時間が多く取られる、など。
- ②学生；無目的で千差万別、意欲のなさ・マナーの悪さ、多人数講義、コミュニケーションが難しい、など。
- ③予算；校費が少なく科研費も当たらない、学会出張費が不足、出身企業の支援なし、校費の支出項目に制限、など。
- ④環境；実験設備の不足・老朽化・不安全、研究室・実験室が狭い、など。
- ⑤雑務；会議、書類作成、雑用、など。
- ⑥補助；独力では難しい、助手・補助員が欲しい、など。
- ⑦研究；長い間研究から離れていた、成果を出せない、論文まとめができない、対論相手がいない、情報が入らない、など。
- ⑧職場；管理体制の違い、個人主義、なれ合い社会、人間関係、新人への思いやりの欠如(異質な者が来たとの周囲の目、意見の出しにくさ)、など。

4.5 交流の必要性

高等教育の場としての学院は来世紀へ向けて、その質的

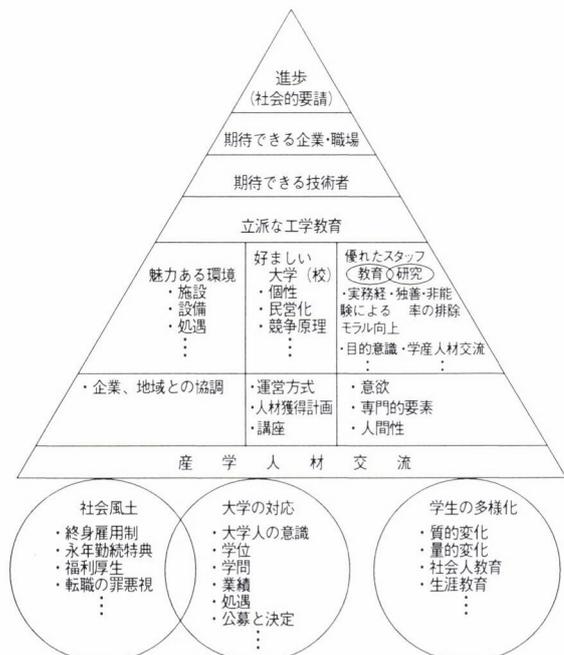


図10 工学における産学人材交流の意義

水準を高く保ち基礎技術科学を追究し優れた教育を実践しようとするために、工業界で技術経験を持つポテンシャルの高い人材をある程度抱える方が好ましく、広い視野で必要十分な条件を早急に整備し、前向きに取り組むべきであろう。

立派な工学教育を遂行するという観点からは、図10に概念を示すように、産学人材交流は、期待できるエンジニアを育て最終的には社会の進歩に応えることである。それ自体に意義があるのではなくて、あくまでも工学を良くするための手段であることを忘れないようにしながら積極的に行いたい。そのために幾つかの重要な視点があるが、別の機会に譲る。

基本的には技術研究者の学院への移動は大いに歓迎されている。現在のところ数が少なく、それも年輩者が多いけれども、工学の活力を維持するためには企業にとって惜しくても将来性のある若手の移籍を進めるべきであろう。なお現在、停年や肩たたき前に他へ移る者を異端とする偏見、給与水準・福利厚生・役職手当などの大きな差異、生涯賃金・退職金・年金などの勤続年数依存、新しい職場でのなじみ不足による仕事のやりにくさ、などがある。しかし能力を買われ、あるいは再挑戦して移動する人材には、物心とも最大の礼を尽くすように、社会制度や環境をも整えたい。

5 おわりに

物作りに直結する工学は工業と不即不離で、しかし良い協調をとって、明日のために優れた人材と知的財産を効率よく供給して行かねばならない。ここでは、工学が直面している幾つかの問題を取上げつつ、産学人材交流の現状と期待される役割について展望した。本稿が幾分でも読者諸兄の意識に触れられるならば幸いである。

参考文献

- 1) 町田輝史：日本機械学会誌，99（1996）934，742.
- 2) 高分子委員会：高分子，42（1993）10，810.
- 3) 松原静郎：科学技術立国を支える人材育成，日本学術協力財団，（1994），33.
- 4) 示村悦次郎：工業教育，38（1990）5，6.
- 5) 日本工学教育協会：産学人材交流と技術教育—その現状と提言—，（1995）
- 6) 田村公男・町田輝史：塑性と加工，36（1995）418，1189.
- 7) 坂本幸一：ふえらむ，2（1997），91.
- 8) 三田村宏：日本機械学会誌，100（1997）944，791.
- 9) 伊藤正男：学術の動向，36（1995）5，56.

（1997年9月8日受付）



新世紀構造材料研究プロジェクト

佐藤 彰
Akira Satou

科学技術庁金属材料技術研究所
フロンティア構造材料研究センター長

Research Project on Structural Materials for 21st Century

1 はじめに

1987年8月に科学技術会議(内閣総理大臣の諮問機関)諮問第14号答申「物質・材料系科学技術に関する研究開発基本計画について」¹⁾が出され、それに基づいて約10年間、物質・材料系科学技術に関する研究開発が行われてきた。革新的な機能を有する物質・材料の創製、原理・現象に立ち返った理論的研究の体系的推進、研究開発のブレークスルーをもたらすような高度な共通・基盤的技術の開発が答申の基本的考え方である。この答申は、新素材の研究開発には順風であるが、大学及び国研における鉄鋼材料や溶接に関する研究には、いささか逆風と受け止めた向きもあったようである。

1995年11月に「科学技術基本法」²⁾が制定された。キャッチアップからフロントランナーへ、産業の空洞化、社会活力の低下、環境問題、食料問題、エネルギー問題、新伝染病、基礎研究水準低下、研究環境低迷、若者の理工科系離れ等の問題を背景としている。世界の科学技術の進歩と人類社会の持続的発展への寄与、および真に豊かな生活の実現が謳われており、「科学技術創造立国」を目指すことが示された。

1996年8月に本法を受けて「科学技術基本計画」³⁾が閣議決定された。社会的・経済的ニーズに対応した研究開発と基礎・基盤科学振興のバランスのとれた推進を基本方向とし、新産業創出、地球規模の諸問題の解決、安心して暮らせる潤いのある社会の構築に資する科学技術の実現の重要性が指摘された。

1997年6月に前記諮問第14号答申のフォローアップ報告書⁴⁾が出された。「構造の制御」についての多くの技術発展が多く派生的研究を生みつつあると評価されることから、答申の策定意義は高いとされた。他方、総合的かつ基礎的な研究・開発が弱いという状況はまだ改善されておらず、遅れの克服がなお必要であることが改めて指摘された。

今後の研究開発の方針として、物質・材料系科学技術の深化そのものへの貢献と、社会的・経済的ニーズに対応した研究開発の両者を推進するための具体的事項を提言している。

1997年3月に「科学技術基本計画」に呼応して、金材研は「第5次長期計画」⁵⁾を策定した。ここでは、研究所のミッションとして①「材料科学の基礎的・先導的研究」を一層強力で推進する、②国立研究所がなすべき責務を抽出し「社会的・経済的ニーズに対して積極的に対応」していく、③「国際的研究開発拠点として、材料研究の中心的地位を確立すべく基盤構築」を図る、を定めた。また、本稿で紹介する「新世紀構造材料(超鉄鋼材料)、STX-21: Structural Materials Xs for the 21st Century or Ultra Structural Steels」研究プロジェクトを目標達成型基礎研究と位置づけた。すなわち、社会的・経済的ニーズが高く、既存技術の改善の積み重ねだけでは解決できず、ブレークスルーが求められる材料開発研究課題において、明確な目標を設定し、産学官の密接な連携を図り、長期的な展望の下で人的結集と資金的集中投入を行い目標達成を目指すプロジェクトである。

2 新世紀構造材料研究プロジェクトの社会的背景と研究開発目標

鉄鋼材料は、金属、プラスチック、セメント、木材等の素材消費の40%を占め、構造材料として極めて重要である⁶⁾。鉄鋼材料は、ビル、橋梁、自動車など国民生活の豊かさと安全を支える基盤材料である。また、多量に生産・使用されるため、性能の改善による社会的・経済的効果が総体として大きくなる。

今後とも鉄鋼材料は主要な構造材料として使用されるだろうが、今までになかった事態に直面することが予測されている。図1は人口、鉄鋼生産量、スクラップ発生量、社

会インフラの全投資に対する更新経費比率、人口に占める高齢者率の動向を予測したものであり、これによるといづれの指標でも2015年頃に大きな変化が到来する。また、その頃は高度成長期に建設した主要インフラ (Infrastructure) が築後50年を経過し、更新期を迎える時期にも当たる。インフラのメンテナンスコスト負担も急激に増大する。

近未来において、膨大な人口を有する開発途上国における国民1人当たりの鉄鋼材料消費量が先進国と同水準となると、鉄鋼の世界生産量は極めて膨大になり、資源・エネルギー問題や地球環境問題が一気に深刻化する。

これらを考慮すると、21世紀を支える鉄鋼材料は、以下の4要求を満たすべきである。①より一層の高強度と高安全性。②より一層の長寿命化。③革新的な製造技術の開発。④環境負担度の低減である。これらの要求を満たすべき新鉄系構造材料を「超鉄鋼材料」と名付けた。そして、「実用強度の2倍化、構造体寿命の2倍化、トータルコストの低減、環境負担度の低減」を超鉄鋼材料の目標に掲げることとした。

新しい素材の開発とその実用化には最短でも20年程度が必要であり、2015年を実用化目途とすれば、今において研究着手のタイミングはない。

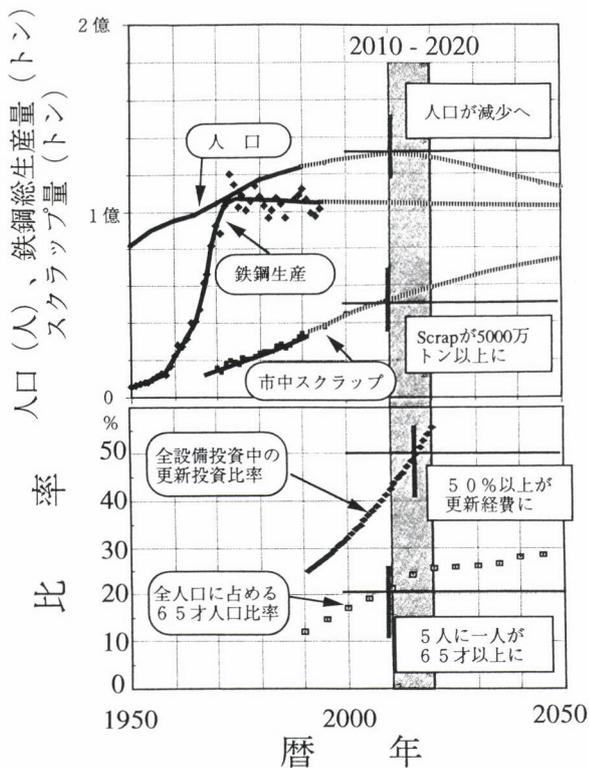


図1 人口、鉄鋼総生産量、スクラップ量、更新投資比率、高齢者比率の予測⁷⁾

3 プロジェクト遂行のための基本的枠組み

鉄鋼材料において日本に蓄積されている技術シーズと研究ポテンシャルを総結集できれば、上記の目標が達成でき、ジェネリックテクノロジー (Generic Technology) としてその成果を発信できる。総結集のためには集中研究サイトが必要である。民間、大学さらに他の国公立研究機関等と協力して、必要な英知の結集を図り、集中研究サイトとして、計画の立案・推進の主体となることは、金材技研の社会的責務であると認識した。そのために、1997年4月から金材技研内に研究組織として「フロンティア構造材料研究センター」を発足させ、任期付き任用職員を含めた研究職員80名、本プロジェクト遂行のために新たに創設された「構造材料特別研究員」制度等による民間研究者等が約20名、さらに客員研究官35名が集結できる場をまず作った。

技術シーズの深化と創製される素材の高性能化を重層的、連続的に履行せしめる、新しい仕組み、スパイラルダイナミズム (図2) を研究推進体制に導入することにした。基礎研究の第1段階としては、目標達成に向けた技術基盤を10~20kgの素材レベルで確立する。そのために、素材の組織の作り込みを研究する「材料創製ステーション」、作り込まれた組織を壊さない接合プロセスを研究する「構造体化ステーション」、素材及びその構造体の諸特性評価を研究する「評価ステーション」の三つの研究組織を専門家集団として設置した。さらに、スパイラルダイナミズムを有効に回転させるため、具体的研究課題の総合的推進のための研究プロジェクトチームとして、課題遂行に必要な研究者

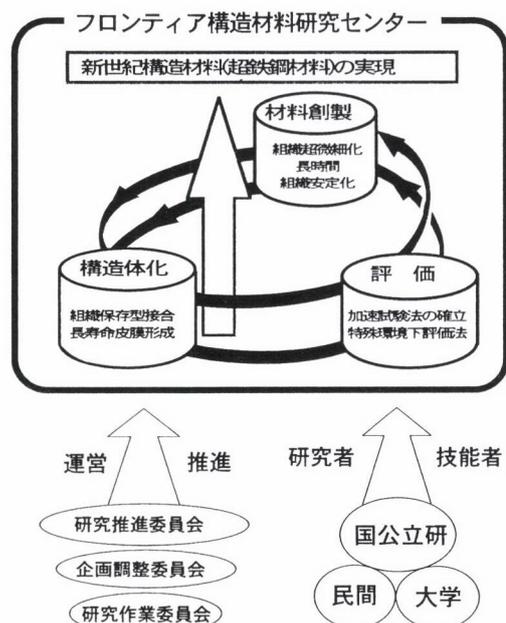


図2 スパイラルダイナミズムと開かれた研究推進体制⁸⁾

を各ステーションから組織し、研究開発情報が容易に交換できるように工夫した(図3)。また、構造材料の研究開発においては、社会的・経済的ニーズや実用化フェーズを常に把握することが必要不可欠であるため、外部委員を含めた諸委員会を設置し、開かれた研究運営体制とした。

4 具体的研究開発課題

研究開発課題は、計画立案段階から企業・大学からの広い分野の専門家の協力を得て、絞り込んだ。結果的には、インパクトの大きさと目標達成の可能性を総合的に判断し、高強度化と長寿命化の2研究テーマとした。しかも、短期的かつ工業化のための研究開発課題は民間等に期待し、長期的、挑戦的研究開発課題に取り組むべきとした。最終的には、800MPa級フェライト・パーライト鋼、1500MPa超級高強度鋼、超々臨界圧発電プラント用フェライト系耐熱鋼、海浜海洋環境耐食鋼に関する研究を取り上げることとした。以下にそれぞれの内容を簡単に紹介する。

4.1 800MPa級フェライト・パーライト鋼への挑戦

建築、土木などの溶接用構造用鋼においては、引張強さ500MPaまではフェライト・パーライト鋼が使われ、それ以上ではベーナイトや焼もどしマルテンサイトを利用して高強度化していく体系がほぼ整備されている。

ところが現状では、500MPa級以上の高張力鋼の溶接継ぎ手疲労強度は、60から100MPaに止まり、母材強度の1割程度という低強度から脱却できていない。また、継ぎ手には疲労強度だけではなく靱性確保も不可欠であり、素材と

溶接プロセスの組み合わせ技術による問題解決のアプローチが望まれている。

大量使用材ではリサイクル性も考慮しなくてはならない。高強度化に利用されている合金元素には、再精製で除去困難なものが多い。資源的にも合金元素は貴重であり、これらの事情から合金化には慎重にならざるをえない。この観点では、組成的には低C-Si-Mn組成が有望である。また、この組成のフェライト鋼であれば溶接容易性も確保しやすい。そこで400MPa級フェライト・パーライト鋼相当の組成鋼をベースに800MPaに高強度化すること、同時に継ぎ手特性を改善する溶接プロセスを併せて開発することを挑戦課題とした(図4)。

着目した素材創製のキーテクノロジーは2つである。1つは、近年の結晶粒微細化技術の大幅な進展であり、もう1つは、オキサイドメタラジーに代表される第2相の積極的利用である。前者の示した端緒的成果は粒径がサブミクロン領域となってもホールペッチ経験則が成立することである。それに基づけば10 μ mから1 μ mへ微細化するとフェライト母相組織でも強度レベルを400MPaから800MPaへ2倍化できることになる。

しかし、単一組織では微細化による強度上昇は期待できても、良好な延性は見込めない。そこで、強度・延性バランスをとるために、フェライト・パーライト微細複相組織の可能性を追求することにした。また、微細化においては、結晶粒方位を制御した微細化を企図している。さらに、非調質鋼を念頭に置いているため、冷却過程での微細化を検討している。先行的な成果として、現在のところ、平均2 μ mの方位ランダム粒を微小サンプルで実現できている⁹⁾。

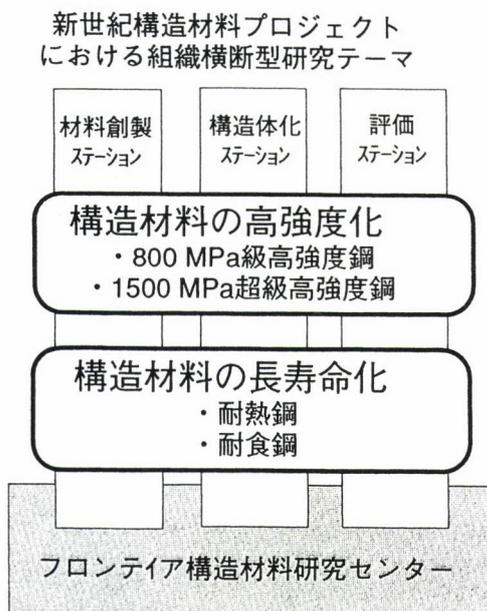


図3 研究組織(縦糸)と研究テーマ(横糸)

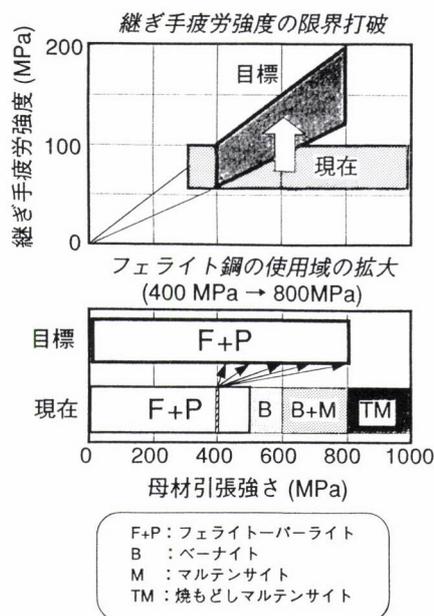


図4 溶接・リサイクル容易な800MPa鋼の研究開発目標

介在物、析出物などの微細第2相にも新たな役割を期待する。オキサイドメタラジでは介在物などを經由してフェライト相が核生成することを利用しているが、ここではその効果の大きい第2相を探索する。さらに期待される効果は、加工ひずみの有効蓄積核、方位ランダム化に寄与する再結晶・変態核、粒界のピンニング核などとしての機能である。さらに、水素トラップ場所としても効果が期待される。溶接加熱時の熱的安定性という観点もこれらの複合効果として含まれる。問題なのは第2相をいかに有効に微細分散させるかである。粉末冶金、凝固プロセスなどの基礎的な研究での意欲的な取り組みを推進する必要があると考えている。

溶接プロセスでは、微細組織の破壊を最小限にとどめ、高効率で、信頼性に優れた技術の開発が必要である。すなわち、小入熱、高速、無欠陥プロセスを開発しなくてはならない。健全な溶接施行仕上がりはもちろん、熱履歴(急速加熱、冷却)に伴う組織変化、内部応力変化などの追随・解析技術の開発、欠陥の有効な検出法の開発も同時に進める。

また、溶接継ぎ手特性の検討も重要である。特に残留応力制御の観点からは、低変態点溶接材を使用すれば、既存の高張力鋼においても継ぎ手疲労強度を大幅に改善できることをセンター内での研究で既に明らかにしている。

4.2 1500MPa超級高強度鋼への挑戦

高力ボルトを用いた新しい建築接合構造の実現、自動車部品の軽量化、超長大橋の建設などのため、1500MPaを越える高強度鋼の開発が求められている。開発の鍵は、1500

MPaを越える強度を実現する方法自体ではなく、強度の増加とともに著しく低下する遅れ破壊特性を向上させる技術や、強度の増加に見合う疲労特性の向上を図る技術などを確立することにある。工業材料として最強であるピアノ線のチャンピオンデータとしては、直径40 μ mの過共析鋼線で5.7GPaの高強度が達成されている¹⁰⁾。しかし、鋼中の微量水素によって遅れ破壊が引き起こされるため、高強度鋼の使用強度は制限されることが知られている。図5は、鋼中の拡散性水素を昇温分析する最近の成果¹¹⁾を基に、ボルトに使用される低合金鋼の遅れ破壊特性を模式的に示したものである。ボルトの締め付けを念頭に引張強度の0.9倍程度の応力を負荷した条件では、実環境からの侵入水素量約0.1ppmと、それ以下では遅れ破壊が生じないとされる限界拡散水素量とが一致する引張強度は、低合金鋼で現状ほぼ1000MPaである。過去に1300MPa級ボルトが規格されたが、現在ではその規格は廃止され、1000MPa級ボルトが多く用いられている。

また、ばね鋼などの高強度鋼の疲労においても(図6)、引張強度が1200MPa、繰返し数が 10^7 回を越えると、介在物等を起点とした内部破壊のため、疲労限の消滅、疲労強度の低下が明らかになりつつある¹²⁾。

本研究では、これら高強度鋼に特有な破壊に強い新金属組織創製を目指す。既に遅れ破壊に対しては、下部ベイナイト組織が優れていることが知られている。これに相当する組織を加工熱処理を工夫して創製し、粒界に炭化物が存在しないマルテンサイト組織を実現する。

疲労破壊に関しては、極低C-高Nマルテンサイト組織

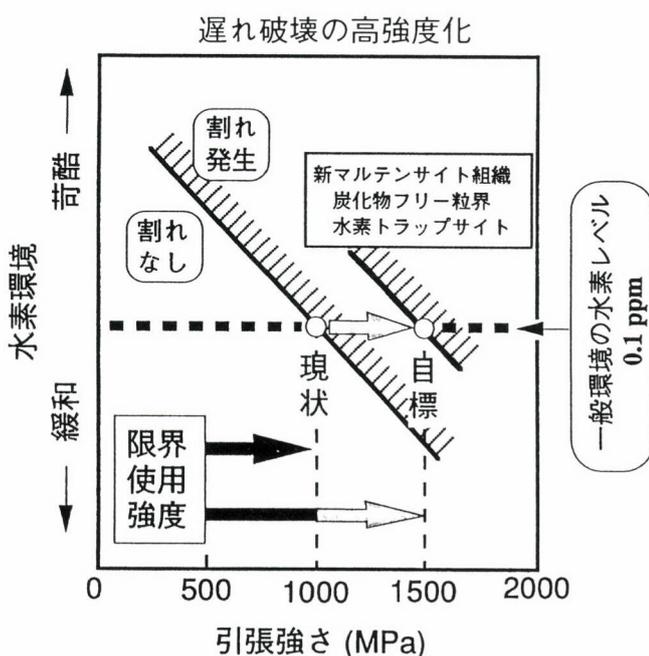


図5 遅れ破壊特性に優れた高強度鋼の研究開発目標

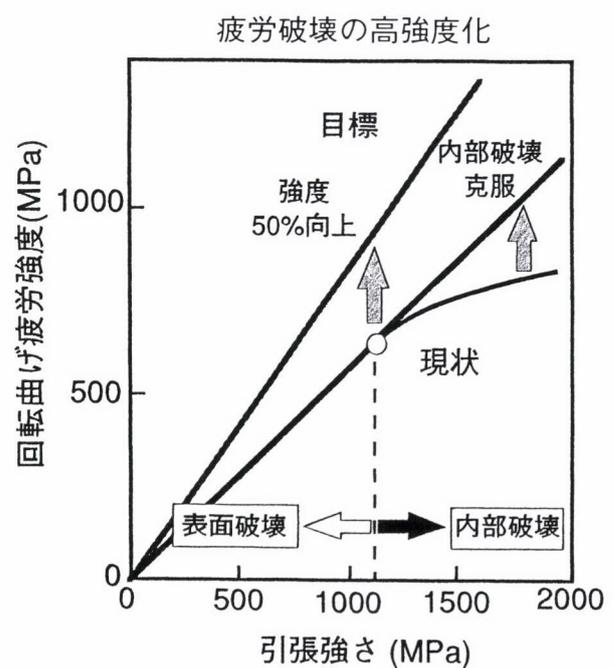


図6 疲労強度特性に優れた高強度鋼の研究開発目標

を検討する。金材技研における一連の疲労研究の成果として、例えば、極低炭素のステンレス鋼SUS316に窒素を添加していくと、窒素量が0.25mass%以上で、疲労き裂進展特性は突然向上し、有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} で約1.5倍、定常領域のき裂進展速度 da/dN で約1/5倍になることがわかってきている。この成果を汎用性の高い低合金鋼に適用したいと考えている。

AP-FIMを用いた原子レベルの微細組織の解析、STMやAFMの走査プローブ顕微鏡を用いたナノレベルの変形・破壊解析を基に、遅れ破壊や疲労破壊の本質を明らかにすることも重要な課題として取り組む。AP-FIMについては、既にピアノ線のFIM原子像を取得し、かつフェライト中のC原子分布を分析している。この手法をピアノ線の高強度メカニズムの解明及び鋼中の水素や窒素の存在状態の解析に適用し、遅れ破壊と疲労破壊の高強度化指針を確立する研究へと展開させる。走査プローブ顕微鏡を用いた破面解析も行っており、粒界上のnmレベルの析出物の形態と分布を明らかにする研究を精力的に進めている。

さらに、1500MPa超級の高強度鋼の長期信頼性を保証するため、遅れ破壊と疲労破壊の評価法の標準化やデータベースの構築をも検討する。これらの研究と併行して、高強度鋼の有効利用を図るため、微細組織を保存できる低温拡散接合技術並びに酸化物繊維と粒子の複合による高剛性化技術にも取り組んでいる。

4.3 超々臨界圧発電プラント用フェライト系耐熱鋼への挑戦

650°C、350気圧の超々臨界圧火力発電プラントの実現に向け、ボイラ系の主蒸気管や管寄せなどの大径厚肉鋼管として長時間使用可能な高Crフェライト系耐熱鋼の開発を目指した基礎研究を行う。1980年代から日米欧で石炭火力発電プラントの超々臨界圧化が進められてきたが、現在は600~620°C級プラントの実用化が検討されている。本研究では、さらにその次の高温プラントを目指す(図7)。650°C級プラントが実現すれば、発電効率は従来プラント(538°C、246気圧)の39.8%から43.0%まで向上し¹³⁾、エネルギー・資源の大幅節約や環境負荷低減・温暖化抑制に寄与できる。

主蒸気管や管寄せに要求される特性は、長時間クリープ破断強度、溶接性、靱性、耐酸化性、疲労特性、高温加工性など多岐にわたる。ボイラ用高Crフェライト系耐熱鋼の開発経緯をみると、600°C、10万hのクリープ破断強度が、1950年代の35MPa級(9Cr-1Mo鋼)から100MPa級(9Cr-1MoVNb鋼)を経て、最近では140MPa級(9~12Cr-MoWVNb(Cu)鋼)に上昇している。これらはいずれも微細な焼戻マルテンサイト組織をベースにしている。140MPa級の耐熱鋼は我が国で開発されたもので、我が国は欧米を相当

リードしているし、今後もフロントランナーとしての役割が期待されている。しかし、これらの140MPa級耐熱鋼も600°Cまでは十分な強度を有するが650°Cでは設計上十分な強度は得られない¹⁴⁾。焼戻マルテンサイト組織は高温長時間になるほど回復が顕著となり強度が低下するため¹⁵⁾、高温化や長寿命化にとって組織の長時間安定化は必須であり、これが基本戦略となる。

一方、鋼管使用の許容限界温度は耐酸化性でも決められ、上記フェライト鋼では620~630°Cが限界と言われている。650°C級耐熱鋼開発にはさらなる耐酸化性向上が不可欠である。クリープ破断強度と耐酸化性はトレードオフの関係にあり、フェライト系耐熱鋼の限界のひとつである。さらに、素材のクリープ破断強度などの性能が溶接部でも確実に発現できるよう継手組織の最適化を行い、構造体の長寿命化に結びつけることも必要である。このためにプラント設計者とも連携し開発課題を明確にしながら研究を進めていきたい。

本研究では第1期5年間を小型インゴットを用いて基礎研究を行い、長時間組織安定化などの指導原理の確立を目指す。この成果を基に、材料大型化やプラント構造体化を計る第2期応用研究へ発展させる。当面、(1)材料設計・創製、(2)溶接継手の高温強度と組織最適化、(3)耐酸化性、(4)クリープ強度特性、(5)疲労特性のサブテーマを設定して進める。

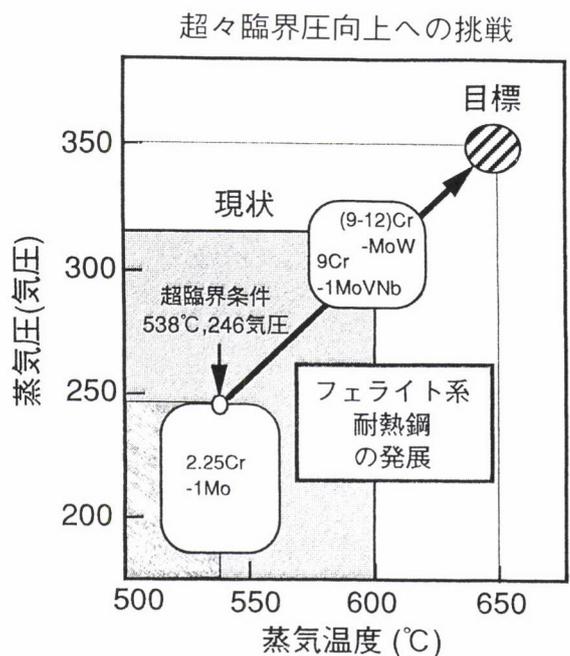


図7 超々臨界圧発電プラント用フェライト系耐熱鋼の研究開発目標

4.4 海浜海洋耐食鋼への挑戦

日本の多くのインフラ構造物は海浜域に集中し、さらに海洋へと向かっているが、海浜海洋域は鉄鋼に対して極めて過酷な腐食環境である。例えば、田園環境に置かれた耐候性鋼は数年たつと保護性のある安定さびを形成し、無塗装でも構造物として十分に実用しうるが、海浜環境ではさびが安定化しないことが多い。耐食鋼の代名詞であるステンレス鋼も海水中では孔食、応力腐食割れ、すき間腐食といったあらゆる局所的な損傷に悩まされる。海浜地域でも無塗装使用可能な汎用低合金鋼、耐海水性に優れたステンレス鋼および耐海水被覆の研究開発が求められるところである。

1) 海浜汎用鋼

大気に曝される構造物は塗装などの表面処理による防食が主流で、定期的な再塗装作業が不可欠である。このため、無塗装使用、メンテナンスフリーの材料が望まれている。耐候性鋼は橋梁等の構造物で無塗装で使用され、健全性を実証してきた。健全な安定さびは、内層部に銅を含む非晶質酸化鉄が生成して物質拡散の障壁になり、耐食性が得られるものと考えられてきた¹⁶⁾。しかし、30年間実環境使用されてきた耐候性鋼の安定さびの調査結果から、Crを含むゲータイト(α -FeOOH)が安定さびを構成する解析結果¹⁷⁾が報告され、耐候性鋼のさびに関する議論が再び活発化している。

図8に無塗装普通鋼の大気腐食に及ぼす大気中海塩濃度

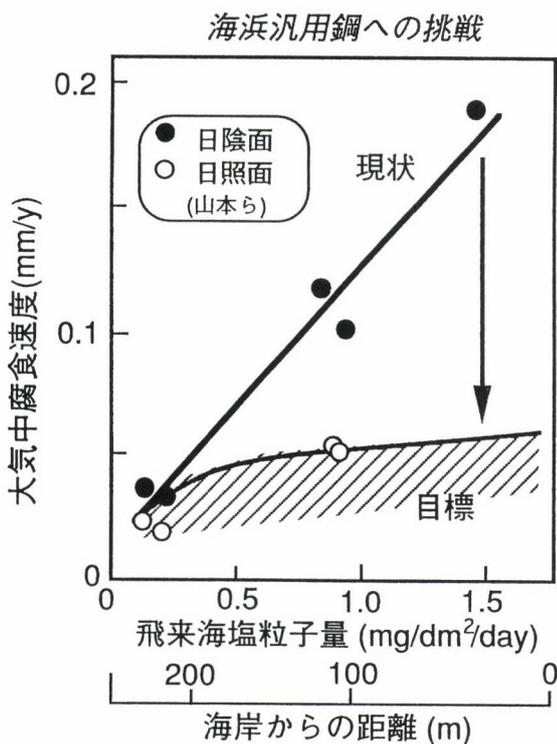


図8 耐食性に優れた海浜汎用鋼の研究開発目標

の影響を示す。海塩粒子が鋼へ付着すると、それに含まれるNaClやMgCl₂等の潮解性物質のため、陰になった部分の金属表面は常に濡れの状態にあり、腐食損傷が集中する。山本らは、海浜環境では特に雨が当たらない日陰部分での腐食量が高いと報告している¹⁸⁾。

海浜環境で無塗装使用可能な耐候性鋼を開発するため、添加元素としてのCu, P, NiやCrの効果の一つずつ明らかにしていく必要がある。これらの元素のさび中の分布、さびの時間による変化、さびのCl⁻等のイオン透過性への効果を調べる。このような目的から海浜性環境を主眼とした長期暴露試験を実施する。最近、注目されだしたさび安定化剤もイオン透過性との関連で解析・開発を進める。すなわち、海塩濃度が高くなっても安定さびができるような鋼あるいはそのための前処理法を開発することが目標である。

2) 耐海水性ステンレス鋼

Cr, Ni, Moなど資源に限りのある合金元素を増加させることなく、ステンレス鋼の耐海水腐食性を改善することに挑戦する。すなわち、窒素加圧雰囲気溶解により、Nを0.6%程度以上含むオーステナイトステンレス鋼の創製を試みる。Nにより不動態被膜が改善され、耐食性は著しく改善されると期待される。さらに、ステンレス鋼の腐食起点となる介在物生成を抑える目的から、C, S, P, Oを極限まで低減化することを試みる。このため金材研が有する超清浄溶解技術(コールドクルーシブル：高周波誘導の電磁力により、溶解金属を浮揚させ、るつぼを用いないで加熱溶解する)を利用する。

5 おわりに

上記のように本プロジェクトの研究開発目標はひとつひとつ極めて挑戦的であるが、超鉄鋼材料の実現のためには、どうしても達成しなければならない。超鉄鋼材料の実現により、安心して暮らせる潤いのある社会の構築に寄与し、21世紀以降の持続的発展に貢献するため、基礎技術研究開発を先頭を立てて推進する決意を固めている。多くの方々のご協力とご支援を重ねてお願いする。

参考文献

- 1) 科学技術会議：諮問第14号「物質・材料系科学技術に関する研究 開発基本計画について」に対する答申、1987年8月
- 2) 科学技術庁：科学技術基本法について、1995年11月
- 3) 科学技術会議・政策委員会・研究開発基本計画等フォローアップ委員会(物質・材料系科学技術)：諮問第14号「物質・材料系科学技術に関する研究開発基本計画

- について」に対する答申のフォローアップ報告書, 1997年6月
- 4) 閣議決定：科学技術基本計画, 1996年7月
 - 5) 科学技術庁金属材料技術研究所：金属材料技術研究所第5次長期計画, 1997年3月
 - 6) 林 明夫：ふえらむ, 2 (1997), 245, 320, 401, 497, 580.
 - 7) 石井利和：ふえらむ, 2 (1997), 863.
 - 8) 石井利和：ふえらむ, 2 (1997), 725.
 - 9) 鳥塚史郎, 梅澤 修, 津崎兼彰, 長井 寿：材料とプロセス, 10 (1997), 1380.
 - 10) 落合征雄, 西田世紀, 大羽 浩, 川名章文：鉄と鋼, 79 (1993), 1101.
 - 11) 「遅れ破壊解明の新展開」, (社)日本鉄鋼協会 材料の組織と特性部会 高強度鋼の遅れ破壊研究会, (1997).
 - 12) 金材技研材料強度データシート資料9「高硬度鋼の疲労特性」, 金属材料技術研究所, (1995).
 - 13) 鴻上享一, 伊坂 弘：鉄と鋼, 76 (1990), 1043.
 - 14) 増山不二光, 石原岩見, 横山知充, 藤田正昭：火力原子力発電, 46 (1995), 498.
 - 15) 田中千秋, 八木晃一：鉄と鋼, 80 (1994), 255.
 - 16) 岡田秀弥, 細井祐三, 湯川憲一, 内藤浩光：鉄と鋼, 55 (1969), 355.
 - 17) 山下正人, 幸 英昭, 長野博夫, 三沢俊平：材料と環境, 43 (1994), 26.
 - 18) 山本正弘, 田辺康児, 宇佐見明, 紀平 寛, 都築岳史, 増田一広：腐食防食, D107 (1995), 393.
- (1997年10月3日受付)

展望

変位型原子無拡散相変態に関する研究の流れと学界の動き

清水謙一

金沢工業大学物質応用工学科
高度材料科学研究開発センター 教授

Ken'ichi Shimizu

A Prospect of Studies on Displacive and Diffusionless Phase Transformations

1 はじめに

表題の変位型原子無拡散相変態は、耳慣れた言葉でマルテンサイト（以下Mと略）型変態のことであり、約20年前までは原子無拡散型相変態とも言われていた。焼き入れ硬化した鉄鋼内に見い出された微細な組織のMは、母相オーステナイト（以下Aと略）が擬せん断変形して生じた変態生成物である。したがって、Mの組成はAのものと全く同じであり、それ故にM型変態は一時、原子無拡散型相変態とだけ呼ばれていたこともある。しかし、その後A相と変態生成相の組成が同じであってもM型変態とは異なる相変態（例えば、マッシュ変態）もあることなどから、M型変態を明確に表現するには原子無拡散のほかにも母相のせん断変形、すなわち変位も表示すべきとすることになり、M型変態を表題のように呼ぶことになった¹⁾。変位型相変態だけでも良さそうであるが、原子拡散型の相変態として知られているベイナイト変態も変位型であることが最近明らかになり、それが変位型原子拡散相変態²⁾と呼ばれているので、それと区別するためにも変位型と原子無拡散の両方が表示されている。

Mの名が世に出た19世紀末期(1885)から既にほぼ一世紀が経過し、数年内には21世紀を迎えようとしている。その間、M型変態は系の化学的自由エネルギーを低下させるために起きる現象で、材料に固有のMs温度に達すると、結晶粒界などの格子欠陥の近くで核生成・成長することが明確になり、またM型変態の結晶学、組織学、熱力学ならびに速度論もかなり明らかになった。これらの知識をもとに開発された強靱な鉄鋼材料、形状記憶効果や超弾性の機能を持った形状記憶合金などは実際にも広範に利用されている。しかし、何故、何時、何処で、どの様にしてM晶核が生成し、どのように成長したかの原子論的変態機構は明らかになったと言い難い。この本質的な問題を抱えたまま、

M組織の発見後、3世紀目に入ろうとしている。この機会にM型変態についての研究の流れと学界の動きを展望して見るのも意義があるだろう。最近、日本金属学会会報などにも似た表題の解説を書いたので^{3,4)}、本解説では別の視点から従来の研究を概観し、特に鉄鋼のM型変態に及ぼす外力（一軸応力、磁場、静水圧）効果に関する研究の現状と課題を述べよう。

本論に入る前に、M型変態研究の分野で長い間、世界の学界をリードして来られた本邦の西山善次先生とロシアのGeorgy V. Kurdjumov先生がそれぞれ1991年3月12日に89才および1996年7月7日に94才でお亡くなりになったが、お二人の先生のご指導に感謝申し上げますとともに、心よりご冥福をお祈りする。

2 M型変態研究のこれまでの歩み⁵⁾

M型変態の結晶学、組織学、熱力学、速度論、さらにはM型変態後の材料の機械的性質など、M型変態に関係したすべての問題を網羅することは筆者の能力を遙に越えており、また紙数の制約からも不可能である。そこで、以下では変態の結晶学と組織学を中心にして、これまでをMが発見された1895年頃から1925年までの30年間、KurdjumovがM型変態の結晶学に関する最初の論文を発表した1926年から1955年までの30年間、その後の1956年から1985年までの30年間に分けて簡単に振り返って見よう。

2.1 1895年—1925年

この最初の30年間には、鉄鋼を焼き入れて緻密なM組織にすると硬化すること、緻密な組織は面心立方格子(fcc)の母相A晶の中に組成が変わらずに変態した体心立方格子(bcc)あるいは体心正方格子(bct)の微細結晶が散在したものであること、などが明らかになった。この時点でbcc

あるいはbctの変態生成物がMと命名され、AからMへの変態はM型変態と定義された。さらには、M晶核の生成と成長に関する熱力学ならびに各種熱処理時の速度論などがおぼろげながら分かってきた。この期間の最後の1924年にはfcc→bccM型変態に関して有名なBainの機構が提案された。

2.2 1926年—1955年

Bainの機構を検証するための研究が始まり、1926年にはロシアのKurdjumovら(当時はウクライナ・キエフで研究)が炭素鋼Mの炭素過飽和度に関して最初の結晶学的論文を発表したり、本邦でも本多がMの結晶学的研究を開始したのを皮切りに、M型変態は鉄鋼だけでなく他の多くの金属・合金を始め金属間化合物やセラミックスにも見られる一般的な相変態現象であること、そしてそれらの材料のM型変態の結晶学、熱力学、速度論ならびにM組織からなる材料の機械的性質など一通りの知識が次々に明らかになった。例えば、bct M晶のc/a軸比の侵入原子濃度依存性、材料毎に異なるM晶晶癖面の存在、母相とM相の間のKurdjumov-Sachs、西山、庄司—西山、Burgersらの結晶方位関係の存在などの結晶学が明らかにされ、1953年から1954年にかけてはM晶の結晶学的生成機構に関して見事な数学的表示方法の現象論が完成された。さらには、M型変態は応力でも誘起され、Ms温度はクラウジウス・クラペイロンの式に従って応力とともに直線的に上昇すること、M型変態にはM量が温度だけに依存する非等温型と温度と時間の両方に依存する等温型のあること、また一個のM晶が瞬時に生成する非熱弾性型と温度の低下および上昇に従って肉眼でも追跡できる程度の速さでそれぞれ成長および収縮する熱弾性型があること、などの速度論的特徴も明らかになった。このようにして、この期間はM型変態研究が一つの学問分野として確立された時期であり、西山先生やKurdjumov先生ならびに米国のM.Cohen先生らがこの分野の研究をリードしてきたと考えられる。

2.3 1956年—1985年

1956年に実物薄膜試料の透過電子顕微鏡観察法が開発されたこともあって、M晶の微視組織と結晶構造に関して多くの知識が飛躍的に充実した。また、形状記憶効果や超弾性の機能を持つ形状記憶合金ならびに靱性のあるセラミックスが見い出され、それらの機能がM型変態と密接に関係していることが究明された。新素材開発のブームに乗ってそれらの材料の開発は勿論のこと、それらの機能性の基本をなすM型変態の基礎研究も世界的規模で活発になり、以前にも増して多くのことが明らかになった。例えば、現象

論で仮定された格子不変変形の痕跡が転位、積層不整あるいは双晶欠陥の形ですべての材料のM晶中に存在すること、従来複雑とされていた非鉄貴金属合金のM晶の結晶構造が底面を共通の稠密面とする種々な長周期積層構造であることが明らかになった。

この期間に形状記憶効果が熱弾性型M型変態を示す規則格子合金に特有の一般現象であること、およびその発現機構が明らかになった。このユニークな特性は工業や医療の分野で多大の関心を集め、応用利用にも供されている⁶⁾。M相が応力により誘起されることは前述したが、形状記憶合金の場合のそれで生じた変形は応力を除去したときの逆変態で消滅する。これが超弾性である。これらの研究を通してM型変態に及ぼす応力効果および幾つかの形状記憶合金の応力—温度空間の状態図が明らかにされた(後述)。一方、鉄鋼材料においても強靱化のための種々な加工熱処理法が開発され、M組織と加工組織の関係ならびにそれらの強靱性との関係が明らかになった⁷⁾。

他にも多くのことが非常な速さで明らかになる一方で、M型変態研究が世界的規模でも活発になったことを反映して、一連のM型変態国際会議(ICOMAT)が開催されるようになった。第一回が1976年に神戸で開催され、それを契機にして1985年までに第2、3、4回がそれぞれ旧ソ連のキエフ、米国・ケンブリッジ、ベルギー・ルーベンで開催された。

3 M型変態に及ぼす外力効果の最近の研究

先ず最近10年間の国際会議の推移から述べよう。ICOMATの第5回は本邦におけるM型変態研究の隆盛を反映して1986年に再び本邦の奈良で、第6、7、8回はそれぞれオーストラリア・シドニー、米国・モンレイ、スイス・ローザンヌで開催され、第9回は来たる1998年にアルゼンチン・バリロッシュェで開催されることになっている。これらとは別に、M型変態を包含する固体内相変態全般についての固体間相変態国際会議もほぼ5年間隔で行われており、第1回が米国・ピッツバーグ(1981年)、第2回が英国・ケンブリッジ(1987年)、第3回が米国・ネマコリンウッドランド(1994年)で開催され、そして第4回が1999年に本邦の京都で開催されることになっている。M型変態を始めとする相変態の研究が世界的な規模でもいかに活発かを伺い知ることが出来るが、本邦の研究者はこれらの国際会議で重要な役割を演じてきた。

さて、最近10年間の研究は、これまでに得られたM型変態の基礎および応用に関する知識がより詳細かつ広範なも

のに発展するとともに、M型変態に及ぼす外力の影響が、一軸応力だけでなく磁場および静水圧のものも系統的に明らかにされたことだろう。一軸応力はその向き（引っ張りあるいは圧縮）や試料の種類に係わらずMs点を高温側に移動させたが、静水圧はM型変態に伴う体積変化が膨張か収縮かによってMs点をそれぞれ低温側あるいは高温側へ移動させ、磁場は一軸応力と同様に試料の種類や磁場の向きに係わらず高温側に移動させることが明らかになった。さらに、これらの外力は非等温型M型変態を等温型に、等温型のを非等温型に変化させることも明確にされ、M型変態の本質解明に迫りつつある。以下に、M型変態に及ぼす磁場および静水圧の影響に関する研究の現状を簡単に紹介する（詳細はそれぞれ文献8）および9）を参照して頂きたい）。

3.1 磁場の影響

(a) 磁場効果の内容：M型変態は系の化学的自由エネルギーが減少、すなわちM相の化学的自由エネルギーがA相のそれより低くなるために起きる現象であるが、殆どの鉄合金のM相の磁化はA相のそれよりも常に大きいので、磁場はA相の化学的自由エネルギーに比べてM相のそれをより多く減少させて、2相間の平衡温度 T_0 あるいは変態開始温度 M_s を上昇させる。このように自発磁化の差が影響していることは証明されたが、それ以外にもA相の高磁場帯磁率および強制体積磁歪によるものが新たに定量的にも確かめられた。

(b) 磁気弾性型M型変態の発現：一軸応力を負荷した時にM相が生成し、除荷した時にそれが消滅して超弾性が発現したように、鉄合金の種類によっては磁場を印加した時にMが生成し、除去した時にそれが消滅する磁気弾性型M型変態が発現する。これは熱弾性型M型変態をする形状記憶合金で発現するので、磁気弾性型M型変態と形状記憶効果を組み合わせた利用法の開発が期待される。

(c) 単結晶における磁場誘起M型変態：純鉄やニッケルの単結晶の磁化に難易方向があることは良く知られているが、磁場誘起M型変態に関する限り、そのような方向性はない。すでに文献8）に掲げたように、磁場を印加せずに M_s 点以下に冷却したFe-Ni合金単結晶内のMは種々な同等の晶癖面に沿って同程度に生成する。しかし、同一合金単結晶の[100]、[110]および[111]方向に平行に磁場を印加した時に生成したMはいずれも磁場方向に長く伸びたものが多い。このことは磁場がM相の形態と組織を制御できることを示しており、今後それを利用した材料特性の制御も可能と考えられる。

(d) 等温型M型変態の非等温型への変化：ノーズ温度が

ほぼ150Kで4.2Kでは全く変態を起こさない（等温型M型変態の）Fe-Ni-Mn合金に4.2Kで強磁場を印加すると、非等温型M型変態における同様に、磁化が急激に上昇してM型変態が起きる。すなわち、図1の実線で示された等温型変態のC曲線が磁場印加によって点線のように低温側および短時間側に移動して、時間に依存しない非等温型変態が起きたと考えられる。なお、一軸応力も同様な影響をもたらす。

3.2 静水圧の影響

(a) 静水圧効果の内容：M型変態は膨張あるいは収縮の体積変化を伴う。静水圧はこの膨張に抵抗したり収縮を助長するので、変態を抑圧あるいは促進するはずである。これに関して、従来にもある程度の知識が得られていたが、より広い範囲の静水圧を負荷した実験によってより詳しいことが明らかになった。すなわち、従来は変態の際の体積変化が温度だけの関数として考えられていたが、それ以外に圧力の関数でもあることおよびインバー合金の場合には自発体積磁歪も大きく影響することが明らかになった。インバー合金と非インバー合金の静水圧誘起M型変態は下記の通りである。

(1) 非熱弾性型M型変態を示すインバー合金の場合：この場合は体積変化は膨張で正、したがって化学的自由エネルギー変化は負であり、 M_s 温度は圧力の増加とともに減少するはずである。数種類のインバー合金の自発体積磁歪と格子定数を測定し、それから求めた体積と既知の体積弾性率を用いて M_s と圧力 P との関係を計算した結果、期待通りに減少しており、実測の結果とも非常に良く一致した。

(2) 熱弾性型M型変態を示す非インバー合金の場合：こ

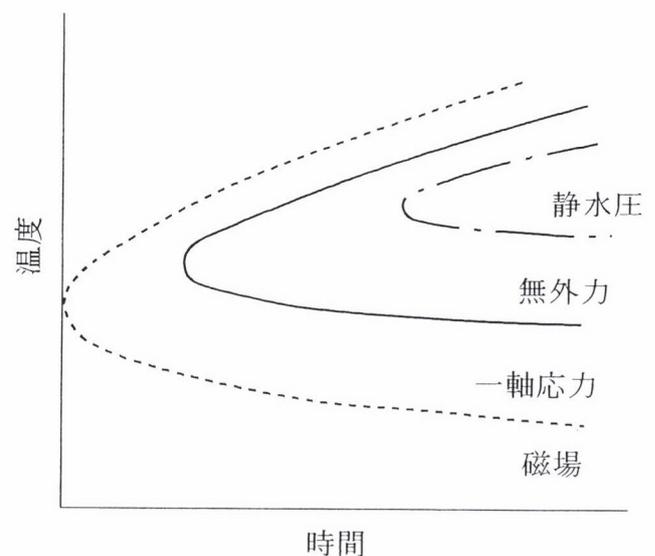


図1 等温変態のノーズ温度および潜伏時間に及ぼす静水圧、一軸応力と磁場の影響⁹⁾

の場合は体積変化の温度と圧力依存性だけを考慮すればよい。この熱弾性型M型変態の体積変化は収縮で負、したがって化学的自由エネルギーは正であるから、Ms温度は圧力の増加とともに上昇するはずである。実測の結果はその通りであり、計算とも非常に良く一致した。

(b) 静水圧誘起M型形態：図2はFe-29.9at%Ni合金の熱誘起、(a)、および静水圧誘起、(b)と(c)、Mの光学顕微鏡組織である。(b)と(c)のMを誘起した時の圧力と温度は図に示したようにそれぞれ0.5と1.5GPaおよび195と108Kである。熱誘起のものの生成温度が213Kなので、(b)と(c)のMはそれぞれ18および105Kだけ低い温度で生成している。しかし、それらの形態はほとんど同じであり、加工誘起Mの形態が生成温度で異なるという以前の観察と異なっている。この差異の原因は分からないが、M品の成長機構を理解する上で解明されなければならない重要な課題と考えられる。

(c) 等温型M型変態に及ぼす静水圧効果：等温型M型変態を示すFe-Ni-Mn合金に0.5MPaまでの静水圧を負荷しながらC曲線をプロットすると、図1の一点鎖線で模式的に示したように、圧力ゼロの時のそれよりもノーズ温度および潜伏期間はそれぞれ高温側および長時間側に移動し、移動量は圧力の上昇とともに増加する。

Fe-Ni-Mn合金のM型変態は等温型であるとともに非熱弾性型であり、体積変化が正で自由エネルギー変化量は負である。同様に自由エネルギー変化量が負の非等温型および非熱弾性型M型変態に対して静水圧は変態を抑圧しMs温度を低下させた(前頁(a)項の(1))ので、等温型のものに対しても変態を抑圧すると考えられる。すなわち、生成温度は低下し潜伏期間は長くなりそうである。しかし、図1によると潜伏期間は期待通りに長くなるが、ノーズ温度は

逆に高温側にずれている。これは体積変化による効果だけでなく、M品の核生成確立過程も考慮すれば説明できることが最近になって証明された⁹⁾。

4 今後の課題

最初の項で述べたM型変態の本質的問題の他にも沢山の課題が残されている。その一部は筆者が日本金属学会会報などの解説に書いたもので、ここでは本解説で力点を置いた外力効果のうちの鉄鋼に関わる課題について考えてみよう。

まず、一軸応力のM型変態に及ぼす影響に関して鉄鋼と形状記憶合金との違いを比較してみよう。図3の(a)¹⁰⁾と(b)¹¹⁾はそれぞれFe-Ni-CとFe-Ni合金における負荷応力とMs点との関係を示している。いずれの図でも、すでに述べたようにある応力までは応力に比例してMs点は直線的に上昇している(ラウジウス・クラペイロンの関係)。それより上の応力では、(a)では塑性変形が先に起きて右下がりになり、(b)では比例定数は異なるがMsは依然として応力とともに上昇している。炭素原子の有無でこのような違いがある理由、(b)の高応力側で現れたMの種類は不明である。図4(a)⁹⁾はCu-Al-Ni合金の応力-温度空間における模式的な平衡状態図である。これによると、負荷応力とMs温度の間には3種類の比例関係があるが、低温側から $\beta_1 \rightarrow \gamma_1'$ 、 $\beta_1 \rightarrow \beta_1'$ 、 $\beta_1 \rightarrow \alpha_1'$ 変態に対応している。また、母相 β_1 を単に冷却して得られる γ_1' Mに応力を負荷すると、 $\gamma_1' \rightarrow \beta_1' \rightarrow \alpha_1'$ の順でMからMへの応力誘起逐次変態が起きる(より詳しいことは原論文を参照)。類似の平衡状態図は図4(b)¹²⁾のように他の幾つかの形状記憶合金でも確かめられている。すなわち、母相を冷却しただけの時に β_1' Mが得られるようなCu-Zn、Cu-Al、Cu-Zn-Ga、Cu-Zn-Al合金の場合

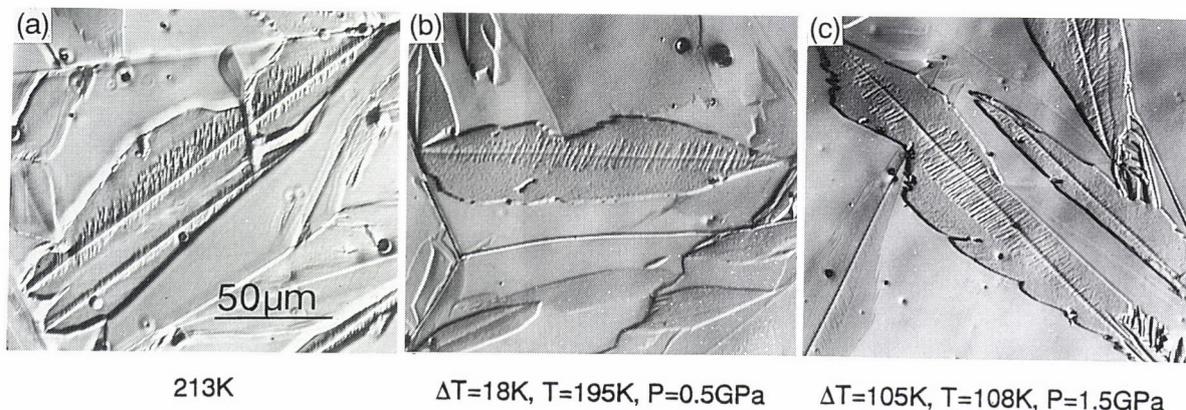


図2 Fe-29.9at%Ni合金における熱誘起マルテンサイト(a)および静水圧誘起マルテンサイト(b)および(c)の光学顕微鏡組織写真。生成温度：T、そのMs温度との差： ΔT 、およびマルテンサイト誘起静水圧：Pが各写真の下に示されている⁹⁾

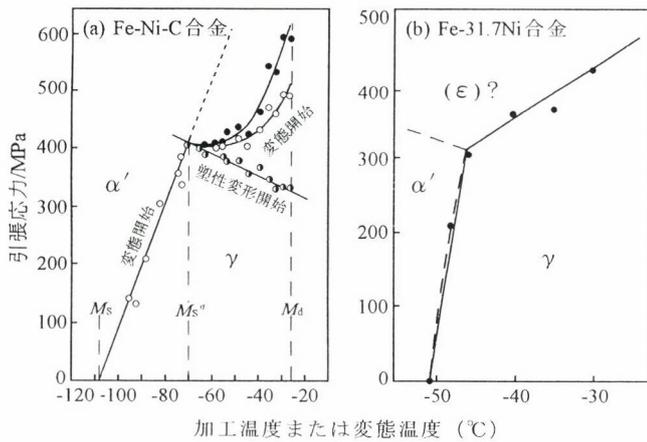


図3 応力誘起変態における変態開始応力と加工温度の関係^{10,11)}

には横の温度軸が点線(1)で、 γ_1 'Mが得られるような上述のCu-Al-NiやAg-Cd、Au-Cd合金の場合には実線で、そして ζ_1 'Mが得られるようなAu-Cd合金の場合には点線(2)で示されるような平衡状態図になる。その内の幾つかの合金についてはM間の応力誘起逐次変態も確認されている。図3と4を比較すると、図3(b)の高応力側で観察された負荷応力と M_s との比例関係は、母相がfcc構造であること考慮すると、 $\gamma \rightarrow \epsilon$ (hcp構造)変態によると考えられる。そうだとすると、静水圧を負荷したときの圧力-温度状態図に類似することになる。また、炭素鋼ではその $\gamma \rightarrow \epsilon$ 変態誘起応力よりも塑性変形に対する臨界応力が低いために図3(a)のように塑性変形が先に起きてしまったのかもしれない。この真偽のほどは今後の課題である。

等温型M型変態のTTT線図がC曲線で特徴づけられることはすでに述べたが、同様のC曲線は恒温変態(パーライト変態など)および時効析出変態などの原子拡散と核生成が支配する変態の場合にも観察される。これら拡散変態におけるC曲線の形成は次のように説明されている。すなわち、核発生頻度が溶質原子の拡散速度および核生成に必要な活性化エネルギーに支配される。変態温度直下では拡散速度は早い、活性化エネルギーが大きいために核発生頻度は小さい。一方、あまり温度が下がり過ぎると活性化エネルギーは小さくなるが、拡散速度も小さくなるために核発生頻度は同様に小さくなる。したがって、適度に冷却された温度で核発生頻度が最大になるためにC曲線が形成されると言うのである。等温型M型変態で観察されたC曲線は温度の関数である体積効果とM晶核の核生成確立過程で説明された。したがって、細かな内容は異なるかもしれないが、相変態が一次のもので核生成・成長によって進行するものであれば、原則的には原子の変位・無変位および拡散の関与・無関与に係わらずC曲線を形成するのが一般

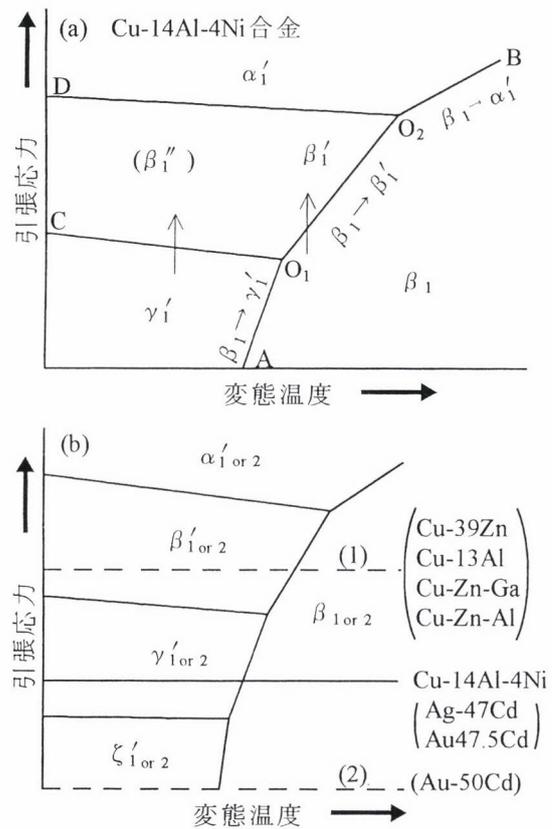


図4 Cu-Al-Ni合金(a)および他の貴金属基合金(b)の応力-温度空間における模式的平衡状態図^{6,12)}

的と考えられる。そして、鉄鋼や他の非鉄金属・合金などで非等温型M型変態が多く観察されるのは、C曲線が温度軸を切り潜伏期間がほとんど無い場合に相当するのかもしれない。このように、等温型マルテンサイト変態が正常なもので、非等温型の方が特異なものとする考えはすでにKurdjumovや西山によっても提案されていた⁵⁾。

そこで、一軸応力、静水圧および磁場が等温型マルテンサイト変態に及ぼしたような影響が同様なC曲線を示す他の恒温変態や時効析出変態などでも観察されるだろうか？一軸応力・磁場および静水圧は等温型M型変態のノーズ温度と潜伏期間をそれぞれ低温側と短時間側、および高温側と長時間側に移動させたが、パーライト変態、ベイナイト変態(フェライトの磁気変態点は780°C)あるいはM晶内のセメントイトの析出(セメントイトの磁気変態点は213°C)に対しても同様な影響を及ぼすのだろうか？このような観点から行われた実験はほとんど無いが、材料開発には必要な資料になると思われる。この種の実験は一部で現在進行中であるが¹³⁾、今後広範に行われることを期待したい。

5 おわりに

変位型原子無拡散相変態としてのM型変態について、そ

の結晶学と組織学を中心にこれまでの研究の流れと学界の動きならびに一軸応力、磁場、静水圧の影響に関する研究の現状と課題を述べた。M型変態に関連する興味ある研究と課題はその他にも沢山ある。また最近は、インテリジェント材の開発が課題になっているが、M型変態はそこでも主役を演じていて、M型変態とインテリジェント性との関係が研究の対象になっている。形状記憶効果や超弾性は熱弾性型M型変態が基本となって温度に感応して発現する現象であるから、形状記憶合金はまさに数少ないインテリジェント材そのものである。かくして、形状記憶合金と他の金属あるいはプラスチックとを組み合わせる複合インテリジェント材を作る試みもなされている。これらの興味ある研究については殆ど触れることが出来なかった。機会があったら、それらの研究成果についても述べたいと思う。

変位型原子無拡散のM型相変態の他に変位型原子拡散(ペイナイト変態など)、非変位型原子無拡散(マッシュ変態など)、非変位型原子拡散(パーライト変態など)相変態もあるが、これらの相変態は組織と物性の制御を通して材料の開発および新材料の創製に役立つと考えられる。それ故に「材料組織制御をめざした相変態の微視的機構の解明」に関する研究が文部省科学研究費の重点研究課題として採択され、本年度から活発な研究が展開されようとしている。折しも、本文中でも述べたように、来年の1998年12月にはM型変態国際会議がアルゼンチン・バリロッシュで、再来年の1999年5月には固体間相変態国際会議が京都で開催されようとしている。上述の重点研究とともに時宜を得た企画と言うことができ、本邦のみならず世界的にも相変態の研究は益々盛んになろうとしている。長い間M型変態の研究に携わってきた筆者にとっては誠に喜ばしい限りであり、重点研究と両国際会議が成功することを心から念願して、稿を閉じることにする。

最後になったが、常日頃M型変態などに関して最近の情報を提供して頂いている大阪大学掛下知行助教授、京都大学牧正志教授、筑波大学大塚和弘教授、大阪大学佐分利敏雄教授および大阪女子大学唯木次男教授に感謝の意を表す。また、図面書きを手伝ってくれた金沢工業大学大学院生の伊林誠君にも謝意を表す。

参考文献

- (1) M.Cohen, G.B.Olson and P.C.Clapp: Proc. ICOMAT-79 held at MIT, (1979), 1.
- (2) J.W.Christian: Metall. and Mater. Trans.A, 25A (1994), 1821.
- (3) 清水謙一：日本金属学会会報, 34 (1997), 546.
- (4) 清水謙一：金属, アグネ出版社, 50 (1996), 459.
- (5) 西山善次：マルテンサイト変態基礎編, 丸善出版社, (1972)
- (6) K. Otsuka and K. Shimizu: Intern'l. Metals Review, 36, (1986), 93.
- (7) 田村今男：鉄鋼材料強度学, 日刊工業新聞社, (1869)
- (8) K. Shimizu and T. Kakeshita: ISIJ Int., 29 (1989), 97.
- (9) T. Kakeshita and K. Shimizu: Mater. Trans. JIM, 38 (1997), 668.
- (10) M. Tokizane: Proc. ICOMAT-76 held in Kobe, (1976), 345.
- (11) 細井祐三, 川上義人：鉄と鋼, 49 (1963), 1780.
- (12) K.Shimizu: Proc. ICOMAT-77 held at Kiev, (1977), 150.
- (13) 掛下知行：私信

(1997年9月25日受付)



入門講座

システム技術編- 2

システム最適化

玉置 久

神戸大学工学部電気電子工学科 講師

Hisashi Tamaki

Optimization

1 はじめに

最適化(optimization)は、システムを効率的かつ合理的に設計・計画・運用・制御したいと考えたときに直面する問題であり、その起源は1947年のD. B. Dantzigによる線形計画問題の定義およびその解法としてのシンプレックス法の提案に遡る。その後、この最適化の分野は大きな発展を遂げ、今日ではシステム工学の中心的課題となっている。

本講座では、最適化問題のモデル化(定式化)や解法について概観してみよう。なお、(広い意味での)最適化全般を取り扱うことは難しいので、数理的アプローチによる最適化を中心に話を進める。また、入門講座ということで、基本的な考え方・枠組みを直観的に把握できるように配慮した結果、厳密性が多少犠牲になっている点についてもご容赦願いたい。

2 最適化問題

一般に最適化問題は、決定すべき数・量(決定変数(decision variable)と呼ぶ)を x で表すことにすると、

$$\min_x f(x) \quad (\text{または} \quad \max_x f(x)) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{sub. to} \quad x \in F \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$F \subseteq X \quad \dots\dots\dots (3)$$

のように記述される¹⁾。式(1)の $f(x)$ は目的関数(objective function)と呼ばれ、決定変数値 x の良さを表す尺度である。また、 x は対象とする問題(システム)の性質から定められる基本空間 X の要素であるが(式(3))、実際にはその部分集合である F の要素しか取ることを許されない(式(2))。この意味で、式(2)を制約条件(constraint)といい、 F を可能領域(feasible region)という。さらに、制約条件(2)を満たす x を可能解と呼び、目的関数(1)の値を最小(あるいは最大)にする可能解 x^* を最適解(optimal solution)と呼ぶ。

ここで、あるシステムを最適に運用したい場合を考えてみよう。最初に必要なことは、実際に上のような形式で問題を捉える(定式化する)ことである。まず、

(a)対象(システム)がどのようなものであって、

(b)どのような解が求められているか、

を正確に記述しなければならない。この(a)と(b)によって問題の制約条件および目的関数が明確にされることになる。現実の大規模・複雑なシステムを対象とする場合、この(a)および(b)を明確にすることすら容易でないといった状況も多いが、この部分を疎かにすることはできない。問題が定式化できてはじめて、(c)どのようにして最適解(あるいは準最適解)を求めるか、に進むことができる。この(c)の部分の達成するためには、問題についての十分な理解だけでなく、一般に最適化手法についての深い知識が必要とされることが多い。

さて、まず最適化問題としての定式化例を見ておこう。いずれも現実問題に比べると極めて単純化されたものではあるが、最適化問題の本質を把握するには十分なものであろう。

例1(生産計画問題)： m 種類の資源 $R_i(i=1, \dots, m)$ を用いて n 種類の製品 $P_j(j=1, \dots, n)$ を生産することを考えよう²⁾。問題は、各資源の利用可能量に関する制約の下で、価値の総和が最大となるように各製品の生産量を定めることである。なお、製品 P_j を1単位生産するのに必要な資源 R_i の量 a_{ij} 、資源 R_i の利用可能量 b_i 、製品 P_j を1単位生産した場合の価値 c_j は、あらかじめ与えられているものとする。このとき、各製品 P_j の生産量 x_j を決定変数に選ぶと、問題は以下のように定式化される。

$$\max_x \quad \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{sub. to} \quad \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \quad (i=1, \dots, m) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$x_j \geq 0 \quad (j=1, \dots, n) \quad \dots\dots\dots (6)$$

例2 (化学平衡問題)：混合気体の平衡状態における分子組成を求める問題を考えよう³⁾。混合気体は m 種類の原子 $A_i(i=1, \dots, m)$ からなり、各気体の原子数を b_i とする。化学反応の結果、この気体は混ざりあって平衡状態で n 種類の分子 $M_j(j=1, \dots, n)$ がそれぞれ x_j モルずつできるものとし、1モルの分子 M_j に含まれる A_i の原子数を a_{ij} とする。このとき問題は、化学反応前後の質量が保存されるという制約の下で、自由エネルギーを最小化するという問題として捉えることができる。すなわち、 x_j を決定変数として、以下のような問題に定式化される。

$$\min_x \quad \sum_{j=1}^n c_j x_j + \sum_{j=1}^n x_j \log x_j - \left(\sum_{j=1}^n x_j \right) \log \left(\sum_{j=1}^n x_j \right) \dots\dots\dots (7)$$

$$\text{sub. to} \quad \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = b_i \quad (i=1, \dots, m) \dots\dots\dots (8)$$

$$x_j \geq 0 \quad (j=1, \dots, n) \dots\dots\dots (9)$$

ただし、 c_j は温度と圧力によって定まる定数である。

例3 (ナップサック問題)： n 個の荷物を袋に入れる問題を考えよう。各荷物 $B_j(j=1, \dots, n)$ の重量 a_j とその価値(重要度) c_j 、および袋の許容重量 b が与えられており、すべての荷物を袋に入れることはできないものとする。問題は、価値の総和ができるだけ大きくなるように、袋に入れる荷物を決めることである。いま、決定変数 x_j を導入し、荷物 B_j を袋に入れることを $x_j=1$ 、入れないことを0で表すと、問題は以下のように定式化される。

$$\max_x \quad \sum_{j=1}^n c_j x_j \dots\dots\dots (10)$$

$$\text{sub. to} \quad \sum_{j=1}^n a_j x_j \leq b \dots\dots\dots (11)$$

$$x_j \in \{0, 1\} \quad (j=1, \dots, n) \dots\dots\dots (12)$$

ここで、上で紹介した3つの最適化問題をもう少し詳しく見てみよう。まず例題1で紹介した問題では、決定変数が実数であって目的関数および制約条件がともに線形式で記述されている。このような問題を線形計画問題(linear programming problem)という。これに対して、例題2では目的関数が非線形となっている。このように、目的関数あるいは制約条件に非線形の式が含まれる問題を非線形計画問題(nonlinear programming problem)という。さらに、例題3では決定変数が整数値(離散的な値)に限られるものとなっており、この形式を整数計画問題(integer programming problem)という^{*1)}。また、整数計画問題に定式化される、すなわち可能領域が離散的となる問題を組合せ最適化

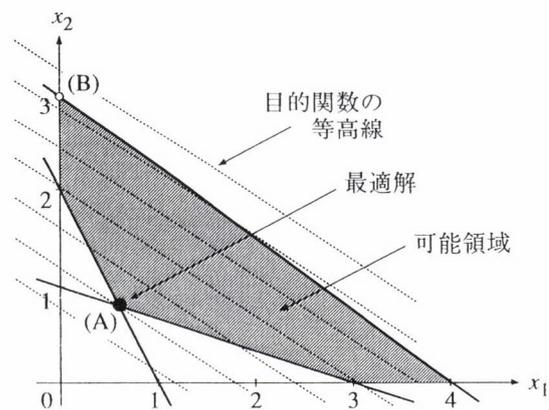


図1 線形計画問題の例

問題 (combinatorial optimization problem) という^{*2)}。

以下では、線形計画問題、非線形計画問題および組合せ最適化問題に対する代表的な解法について、その基本的な考え方を中心に概説しよう^{1,2,5)}。

3 線形計画法

いま、次の線形計画問題を考える。

$$\min_{x_1, x_2} \quad 2x_1 + 3x_2 \dots\dots\dots (13)$$

$$\text{sub. to} \quad 2x_1 + x_2 \geq 2 \dots\dots\dots (14)$$

$$x_1 + 3x_2 \geq 3 \dots\dots\dots (15)$$

$$3x_1 + 4x_2 \leq 12 \dots\dots\dots (16)$$

$$x_1, x_2 \geq 0 \dots\dots\dots (17)$$

図1に、この問題の可能領域および目的関数の等高線を示す。この図からわかるように、2変数の線形計画問題の可能領域は凸多角形となる。また、目的関数の等高線は平行な直線となるので、最適解は可能領域である凸多角形の境界上に存在することがわかる。したがって、その凸多角形の端点(頂点)のうちの一つが必ず最適解になる^{*3)}。さらに、この性質は一般の n 変数の問題についても成り立つことがわかっている。すなわち、線形計画問題の可能領域は一般に凸多面体となり、最適解はその凸多面体の端点の中に必ず存在する²⁾。

これより、線形計画問題の最適解を見出すためには、可能領域の端点(有限個)だけを調べればよいことがわかる。しかしながら問題の規模(変数や制約条件の数)が大きくなると、端点の数はたとえ有限個であっても膨大なものとなり、すべての端点を調べ尽くすのではなく、一部の端点だけを調べて最適解を見つけるような効率的な手順(ア

*1 例題3では、決定変数が0または1の値しか取らないので、特に0-1整数計画問題とも呼ばれる。

*2 これらはいずれも目的関数が唯一に定まる問題であるが、現実には必ずしも一つだけ、あるいは一つにまとめられるとは限らない。このように複数の目的関数を考慮しなければならない問題は多目的最適化問題(multiobjective optimization problem)と呼ばれ、最適化の一分野を形成している⁴⁾。

*3 目的関数の等高線が凸多角形の一つの辺と平行になる場合、その辺上の点(端点を含む)がすべて最適解となる。

ルゴリズム)が必要である。その代表的な手法が、冒頭でも触れたG. B. Dantzigによるシンプレックス法(simplex method:単体法ともいう)である。

ここで、端点を調べる(あるいは端点から端点に移動する)という手順を形式的(数学的)に表現してみよう。一般に、線形計画問題はいくつかの線形不等式や等式で表される制約条件および最小化あるいは最大化すべき目的関数によって記述される。しかしながら、このままでは種々の形式の問題表現が可能となるので、以下のような定義を考える。

$$\min_x \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$\text{sub. to } \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = b_i \quad (i=1, \dots, m) \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$x_j \geq 0 \quad (j=1, \dots, n) \quad \dots\dots\dots (20)$$

この表現形式を線形計画問題の標準形(standard form)と呼ぶ。任意の線形計画問題を標準形に変換する場合、

- (a) 最小化すべき目的関数が与えられること
 - (b) すべての変数に非負条件が課されること
 - (c) 制約条件がすべて等式で与えられること
- を満足するようにしなければならない。それぞれ以下に示すような方法で簡単に解決できる。

まず(a)については、例えばもとの問題が目的関数を最大化する形:

$$\max_x \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad \dots\dots\dots (21)$$

になっている場合、目的関数全体に -1 を掛けることによって、

$$\min_x \sum_{j=1}^n -c_j x_j \quad \dots\dots\dots (22)$$

と変形できる。次に(b)について、ある非負制約のない変数 x_j に対して、新たに2つの非負変数 x'_j および x''_j を導入し、

$$x_j = x'_j - x''_j \quad \dots\dots\dots (23)$$

とすればよい。最後の(c)については、不等号で与えられる制約条件、例えば

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \quad \dots\dots\dots (24)$$

となる場合、新たな非負変数(スラック変数と呼ばれる) λ_i を導入し、

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j + \lambda_i = b_i \quad \dots\dots\dots (25)$$

のように書き換えることができる。

ここで、式(13)~(17)に示した例題を標準形に変換してみよう。この例の場合、スラック変数 λ_1, λ_2 および λ_3 を導入し、制約条件(14)~(16)を等式条件に書き換えるだけで、次の標準形が得られる。

$$\min_{x_1, x_2} 2x_1 + 3x_2 \quad \dots\dots\dots (26)$$

$$\text{sub. to } 2x_1 + x_2 - \lambda_1 = 2 \quad \dots\dots\dots (27)$$

$$x_1 + 3x_2 - \lambda_2 = 3 \quad \dots\dots\dots (28)$$

$$3x_1 + 4x_2 + \lambda_3 = 12 \quad \dots\dots\dots (29)$$

$$x_1, x_2, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \geq 0 \quad \dots\dots\dots (30)$$

上の等式制約条件(27)~(29)を満たす変数の組 $x=(x_1, x_2, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ は無数に存在するが、2つの変数を適当に選んでそれらの値を0とおくと、残りの3つの変数の値は一意に定められる。このようにして定められる解 x を基底解(basic solution)といい、基底解の中で $x \geq 0$ を満たすものを基底可能解(basic feasible solution)という。さらに、基底解を定める際に値を0とおいた変数を非基底変数(non-basic variable)といい、それ以外の変数を基底変数(basic variable)という。

基底解に関する重要な性質を紹介しておこう。それは“ x が基底解であることと、可能領域の端点に対応することとは等価である”というものである(証明略)。例えば、 $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$ とおいて定められる基底可能解

$$x = (0.6, 0.8, 0, 0, 7) \quad \dots\dots\dots (31)$$

は図1中の端点(A)に、また $x_1 = \lambda_3 = 0$ とおいた基底可能解

$$x = (0, 3, 1, 7, 0) \quad \dots\dots\dots (32)$$

は端点(B)にそれぞれ対応していることがわかる。

これ以上の詳しい説明は省略させていただくが、シンプレックス法の数値計算においては、ある初期基底可能解からスタートして最適性の条件が満たされるまで、目的関数値が減少するように基底変数を入れ替える(すなわち基底可能解を更新する)という手続きが繰り返される。さらに、線形計画問題に関しては、

(a) 双対問題(dual problem)とシンプレックス乗数(simplex multiplier)

(b) 計算の効率化のための改訂シンプレックス法(revised simplex method)

なども重要である。また、最近の話題としては、

(c) KhachiyanやKarmarkarなどによって提案された方法に端を発した多項式時間アルゴリズムの研究

が挙げられる。これらについては参考文献^{1,2,5)}を参照されたい。

4 非線形計画法

前節では、目的関数および制約条件のいずれもが線形であるような特別な場合について、典型的な解法の基本的考え方を紹介した。ここでは、目的関数と制約条件のいずれかあるいは双方が線形ではない非線形計画問題を考える。

ところが、この非線形計画問題となると取り扱いが途端に難しくなるので、ここでは、制約のない非線形最適化問題：

$$\min_x f(x) \dots\dots\dots (33)$$

$$x \in R^n \dots\dots\dots (34)$$

を取り上げ、解法の基本的考え方を示そう^{1,3)}。

この問題では、もちろん大域的最小点(global optimum)、すなわち任意の $x \in R^n$ に対して $f(x^*) \leq f(x)$ となる解 $x^* \in R^n$ を求めることが要求されているのであるが、 $f(x)$ の凸性が保証されているような特殊な場合を除いて一般には難しい。そこで、以下では局所的最小点(local optimum)、すなわち x^* の近傍にあるすべての $x \in R^n$ に対して $f(x^*) \leq f(x)$ となる解 $x^* \in R^n$ を求める方法を考えることにし、局所的な最小点を単に最適解と呼ぼう。

線形計画問題の場合と同様、制約のない非線形最適化問題についても最適解を閉じた形の計算で求めることは一般には不可能である。そこで、以下の枠組みに基づいた繰り返し計算によって、最適解に収束させる手順が必要となる。0° 適当な x の初期点 $x^{(0)}$ を与え、繰り返し回数 $k=0$ とする。1° $x^{(k)}$ の最適性を判定し、最適であれば3°へ。最適でなければ2°へ。

2° 目的関数 f の値を減少させる新しい点 $x^{(k+1)}$ を生成する。
 $k=k+1$ として1°へ戻る。

3° 計算終了。 $x^{(k)}$ が最適解である。

この際、

$$f(x^{(0)}) > f(x^{(1)}) > \dots > f(x^{(k)}) > \dots \dots\dots (35)$$

となり、かつこの数列が最小値に収束するように手順を定めることが肝要である。この点に留意し、上の手順の2°で $x^{(k)}$ から $x^{(k+1)}$ を定める更新式として、探索方向(ベクトル) $p^{(k)}$ および歩み幅(step size) $\alpha^{(k)}$ を用い、

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \alpha^{(k)} p^{(k)} \dots\dots\dots (36)$$

とする方法が一般的に用いられる。

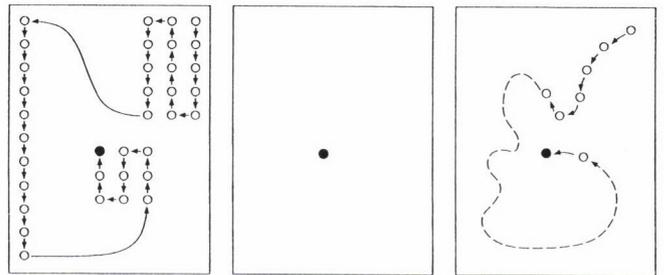
さらに、探索方向 $p^{(k)}$ の決め方として最も簡便なものは、目的関数の勾配：

$$\nabla f(x^{(k)}) = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n} \right)_{x=x^{(k)}}^T \dots\dots\dots (37)$$

のみを用いる最急降下法(steepest descent method)で、この場合、

$$p^{(k)} = -\nabla f(x^{(k)}) \dots\dots\dots (38)$$

のように探索方向が決められる。この最急降下法以外にも、目的関数のHesse行列(2階微分)までも用いるNewton法、Newton法におけるHesse行列を近似的に求めることによって計算の手間を減らした準Newton法、連続する探索方向が互いに一次独立となるようにして収束性を改善した



(a) 列挙的手法 (b) 発見的的手法 (c) 探索的手法

図2 組合せ最適化手法の基本的考え方

枠が可能領域、丸が一つの可能解をそれぞれ表す。また、黒丸は最終的に選ばれる解を表す。

共役方向法(conjugate direction method)あるいは共役勾配法(conjugate gradient method)などが代表的である³⁾。歩み幅 $\alpha^{(k)}$ については、いずれの探索方向を用いる場合においても、一次元探索：

$$\alpha^{(k)} = \arg \min_{\alpha > 0} f(x^{(k)} + \alpha p^{(k)}) \dots\dots\dots (39)$$

によって $\alpha^{(k)}$ を定めるといった方法が一般的である。

以上、本節では制約なしの非線形最適化問題に対する解法を概観した。非線形最適化問題に関する理論等を含めて、より詳細については参考文献^{3,5)}を参照されたい。

5 組合せ最適化

これまで扱ってきた線形計画問題および非線形最適化問題はいずれも連続変数を対象とするものであり、問題の可能領域は実数集合であった。一方、ここで取り上げる組合せ最適化問題に対しては、実数集合を対象とした連続性や微分概念に基づく方法を直接利用することはできない。したがって、組合せ最適化問題の解法は連続変数の最適化手法と本質的に異なるものとなり、一般に解を調べ上げるというアプローチとならざるを得ない。しかし、可能領域 F の要素(可能解)の総数は有限ではあっても膨大な数にのぼることが多く、実際に列挙・探索する範囲をいかに限定するかが重要となる^{*4)}。

ここで、最適解あるいは準最適解を探索するという観点から組合せ最適化手法を捉えると、その基本的な考え方は、図2に示すように、

- (a) 列挙的手法：全ての解を列挙して(またはこれと等価な手続きによって)厳密な最適解を見出す
- (b) 発見的的手法：(準)最適解を生成するためのアルゴリズムまたはルールを利用して、ただ1つの解を求める

*4 線形計画問題に対するシンプレックス法は基本的に列挙法であるが、連続性に基づく効率的な基底変数の入れ替え(端点の移動)と最適性の判定(計算の終了)が可能となっている。

表1 ナップサック問題の例

荷物番号 j	1	2	3	4	5	6	7	8	許容量 b
重量 a_j	3	6	5	4	8	5	3	4	25
価値 c_j	7	12	9	7	13	8	4	5	

(c)探索的手法：列挙的手法と発見的手法の中間に位置する方法で、解空間の部分空間内を探索することによって、(準)最適解を探し出す

の3種類に分類される。それぞれの考え方に基づく代表的な手法としては、

- (a)分枝限定法(branch and bound method)、分枝カット法(branch and cut method)、動的計画法(dynamic programming method)など
- (b)欲張り法(greedy method)、ヒューリスティック・ルール(heuristic rule)など*5
- (c)ランダム探索法(random search method)、メタ・ヒューリスティクス(meta-heuristics)など

が挙げられよう。厳密な最適解が求められることを保証しているという点において(a)に属する手法は重要であるが、一般に膨大な計算時間を必要とする点において非現実的である(ただし、計算機の能力の飛躍的な向上に伴って最近再び見直されつつあるが...)。そこで、以下では実用的という点から(b)と(c)に焦点を当て、欲張り法の構成例およびメタヒューリスティクス手法の概略を紹介する。

まず、1節で紹介したナップサック問題を例題として取り上げ、欲張り法の構成例を示そう。なお、各荷物の重量(a_j)と価値(c_j)、袋の許容重量(b)がそれぞれ表1のように与えられている問題を考える。さて、欲張り法とは目的関数への貢献度を局所的に評価し、この評価値に基づいて可能解を直接構成していく方法である⁷⁾。ナップサック問題に適用する場合、以下のような手順が考えられる。

0° n 個の荷物を c_j/a_j の非増加順に並べ、この順に番号を付け直す。また、カウンタ $j=1$ 、袋に残されている許容量 $s=b$ および入れられた荷物(番号)の集合 $A=\phi$ と初期化しておく。

1° $a_j \leq s$ ならば、荷物 B_j を袋に入れることに決め、 $A=AU\{j\}$ および $s=s-a_j$ とする。

2° $j=n$ または $s=0$ ならば3°へ。そうでなければ、 $j=j+1$ として1°へ戻る。

3° 計算終了。 A の要素が、袋に入れるべき荷物の番号を表している。

表1に示した例題(もともと c_j/a_j の非増加順に荷物の番

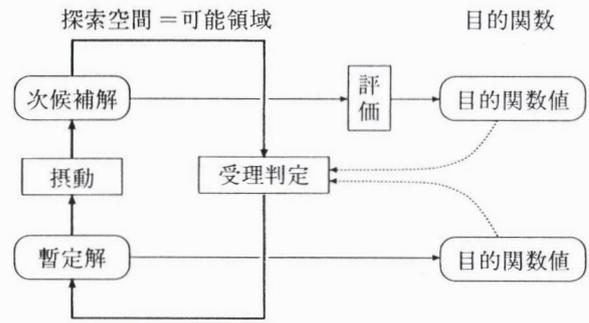


図3 メタヒューリスティクスによる探索の枠組み
メタヒューリスティクスの具体的なアルゴリズム(LS,SA,TS,GAなど)によって、外側のループが特徴づけられる。

号が付けられている)にこの手順を適用すると、荷物 B_1, B_2, B_3, B_4 の順に袋に入れられ、この段階で袋の残り許容量が $s=7$ となる。したがって、次の荷物 B_5 を入れることができない。その次の荷物 B_6 を調べると $a_6=5$ なのでこれを入れることができ、残り許容量が $s=2$ となる。このような手順を繰り返していくと、結局、

$$x=(1,1,1,1,0,1,0,0) \dots \dots \dots (40)$$

すなわち荷物 B_1, B_2, B_3, B_4 および B_6 を選んで入れるという解が得られる。このときの目的関数値は43となる。

なお、この問題の最適解は、例えば分枝限定法などを適用することによって(この例題の場合は手で全列挙することもできるが...)

$$x=(1,1,1,0,1,0,1,0) \dots \dots \dots (41)$$

と求められ、目的関数の最適値は45であることがわかる。この例からもわかるように、欲張り法などの近似解法では比較的良い解が求められるが、最適な解が求められる保証はない。

次に、探索的手法の中でも最近特に注目されつつあるメタ・ヒューリスティクスを取り上げよう。大雑把に言うと、探索的手法は計算時間および求められる解の良さの両面において、列挙的手法と発見的手法の中間に位置するものである。すなわち、ある限られた計算時間の範囲内で、ある程度良い解を求めることが期待できる方法である。

図3に、メタヒューリスティクスによる探索の枠組みを示す。この枠組みでは、

- (a)現時点での候補解(暫定解)に摂動を加えることによって次候補解を生成する手続き、および、
- (b)新たに生成された次候補解の目的関数値を暫定解のものと比較することによって、暫定解を更新するかどうかを決める手続き(受理判定)

*5 特定の問題に対する多項式時間アルゴリズム(例えば、2機械フローショップ・スケジューリング問題に対するJohnsonアルゴリズム⁸⁾)もこの範疇に入る。

によって、探索の過程が特徴付けられる。このとき、(i) 良い解を見つけるためには、できるだけ広い領域を探索すること (diversification, exploration)、および (ii) 計算時間を短縮させるためには、探索履歴等を利用してできるだけ探索領域を狭めること (intensification, exploitation)、といった相反する要求をうまくバランスさせ、解の精度向上と計算時間短縮の高バランス化が実現するように (a) および (b) の手続きを定めることが肝要である。

ここで、まずメタヒューリスティクスの基本形であると考えられる局所探索法 (local search method: 反復改善法 (iterative improvement method) ともいう) を紹介しよう⁶⁾。いま、候補解 (暫定解) x に摂動を加えて得られる解の集合を x の“近傍” (neighborhood) と呼び $N(x)$ と記す⁶⁾。局所探索法は、 $N(x)$ 内に x より良い解があれば、それを改めて暫定解とする操作を、可能な限り繰り返すという方法である。

0° 初期解 x^* を求め、これを暫定解とする。

1° $N(x^*)$ 内に x^* より良い解 y があれば、暫定解を $x^* = y$ のように更新して 1° へ。なければ、現時点での暫定解 x^* を最終解として終了。

局所探索法を実現するためには、近傍 $N(x)$ の定義とともに、 $N(x)$ をどう探索し暫定解の更新をどのように行うか、などの細部を定める必要がある。いずれにしても、局所探索法によって最終的に選ばれた解 x^* は、近傍 $N(x^*)$ により良い解が存在しないという意味で局所的最適解 (local optimal solution) であり、未探索の領域にさらに良い解が残されている可能性がある。この可能性を少しでも低減させるため、

- (a) 初期解をいろいろと変えてみる
- (b) 探索に確率的動作を導入する
- (c) 暫定解より悪い解への遷移を許す
- (d) 複数の候補解を保持する

などの工夫が考えられている。これら (a) ~ (d) に着目した方法についての詳細は参考文献^{7,8)}を参照していただくことにして、代表的な手法とその要点だけを紹介しておこう。

- (a) 多スタート局所探索法 (multi-start local search): 局所探索法の初期点 (通常はランダムに生成される) を多数選んで、より大域的な最適解を得ようとする方法。
- (b) シミュレーテッド・アニーリング (simulated annealing): 受理判定の手続きに確率的要素を取り入れた方法で、改悪であっても確率的に暫定解が更新される。さらに、“焼き鈍し (annealing)” における温度制御にならっ

て、受理確率を温度パラメータ t で制御する。

- (c) タブー・サーチ (tabu search): 近傍 $N(x)$ 内での最良の解 y を求め、これが改悪であっても、現時点での解を $x = y$ のように更新することを基本とする。しかしながら、この操作をそのまま実行すると循環 (cycling) が生じやすい。そこで、タブーリスト T を用意しておき (例えば、過去何回かの繰り返して訪れた解のリスト)、 T 内への遷移を禁止することで循環を抑制している。
- (d) 遺伝アルゴリズム (genetic algorithm): 自然界における生物・生体の集団遺伝に基づく進化の過程を模倣した最適値探索法であり、複数の候補解 (集合) を保持して探索を進めるという点に特徴がある。摂動に対応する手続きとしては、交叉 (crossover) や突然変異 (mutation) などの遺伝的操作 (genetic operation) が用いられる。

6 まとめ

本講座では、数理的なアプローチによる最適化問題を対象として、その典型例である線形計画問題、非線形計画問題および組合せ最適化問題のモデル化・定式化および代表的な解法を概観した。冒頭でも述べた通り、基本的な考え方や枠組みを中心に紹介しているので、わかり難い点が少なくないと思われるが、適宜参考文献を参照していただくとしてご容赦いただきたい。本講座をきっかけとして最適化について多少なりとも興味を持たれば幸いである。

参考文献

- 1) 西川禎一, 三宮信夫, 茨木俊秀: 最適化, 岩波書店, (1982)
 - 2) 福島雅夫: 数理計画入門, 朝倉書店, (1996)
 - 3) 今野浩, 山下浩: 非線形計画法, 日科技連, (1978)
 - 4) 中山弘隆, 谷野哲三: 多目的計画法の理論と応用, 計測自動制御学会, (1994)
 - 5) 伊理正夫, 今野浩, 刀根薫監訳: 最適化ハンドブック, 朝倉書店, (1995)
 - 6) 今野浩, 鈴木久敏: 整数計画法と組合せ最適化, 日科技連, (1982)
 - 7) 茨木俊秀: 離散最適化法とアルゴリズム (岩波講座応用数学 [方法 8]), 岩波書店, (1993)
 - 8) 茨木俊秀: 計測と制御, 34 (1995) 5, 340.
- (1997年11月19日受付)

*6 近傍の具体的な構成 (すなわち摂動の具体的な手続き) に関する一般的・汎用的とも言える手法はなく、問題例に応じて種々の摂動手続きが構成されている。



入門講座

専門用語-鉄鋼材料編-4

電位-pH図

西方 篤 東京工業大学工学部金属工学科 助教授
Atsushi Nishikata

Potential - pH Diagram

1 はじめに

電位-pH図は、縦軸に電極電位、横軸にpH(水素イオン指数、 $\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$ 、 $[\text{H}^+]$:水素イオン濃度)をとり、金属の水溶液中での熱力学的安定領域(金属、金属イオン、金属水酸化物あるいは金属酸化物)を書き込んだ等温平衡図である。この図は金属の水溶液腐食を平衡論の立場から検討する際にしばしば用いられる。M. Pourbaixが金属の電位-pH図を集大成したことからプルベ・ダイアグラム(Pourbaix diagram)¹⁾とも呼ばれる。本稿では電位-pH図の作成方法と使い方について解説する。

2 平衡電位とネルンストの式

ある金属を電極(電子伝導体)として水溶液(イオン伝導体)に浸漬したとき、両者の界面ではある電位差を生じる。この電位差(厳密には内部電位^{*1}差)を電極電位あるいは単に電位と呼ぶ。特に、平衡反応により電極電位が決定される場合を平衡電極電位(あるいは単に平衡電位)と呼ぶ。電位-pH図を作成する際、平衡電位と反応に含まれる物質の活量(濃度)の関係式が必要となる。そこで、次の平衡反応を例にとり、この関係式を導出してみよう。



ここで、Oxは酸化体(Oxidant)、Redは還元体(Reductant)、 n はこの反応に含まれる電子数、 e^- は電子を表す。この平衡反応で、左から右への反応は電子を受け取る反応、すなわち還元反応であり、その逆は電子を放出する反応、すなわち酸化反応である。平衡状態では式(1)の両辺の化学ポテンシャル μ の和が等しい。

$$\mu_{\text{Ox}} + n\mu_{\text{e}^-} = \mu_{\text{Red}} \quad \dots\dots\dots(2)$$

化学ポテンシャルは次式のように活量に依存しない項 μ^0 と依存する項 $RT\ln a$ に分けられる。

$$\mu = \mu^0 + RT\ln a \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 R は気体定数(8.31J/molK)、 T は絶対温度、 a は活量で、 μ^0 を標準化学ポテンシャルと呼ぶ。また、電子の化学ポテンシャル μ_{e^-} は平衡電位 E により次のように定義できるものとする。

$$\mu_{\text{e}^-} = -FE \quad \dots\dots\dots(4)$$

式(3)、(4)の関係を式(2)に代入して整理すると式(5)が得られる。

$$E = E^0 - (2.303RT/nF) \log(a_{\text{Red}}/a_{\text{Ox}}) \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$E^0 = -\Delta G^0/nF \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$\Delta G^0 = \mu_{\text{Red}}^0 - \mu_{\text{Ox}}^0 \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここで、 E^0 は反応に含まれるすべての物質が標準状態にあるときの平衡電位で、標準電極電位(standard electrode potential)と呼ばれ、自由エネルギー変化 ΔG^0 により式(6)で与えられる。式(5)、(6)はネルンストの式と呼ばれ、平衡電位と反応に含まれる物質の活量そして反応の標準自由エネルギー変化との関係を表す重要な式である。

電位-pH図では、平衡反応式を H_2O と H^+ を含めた形式で表すため、一般式である式(1)を式(8)のように書き換えておく。



この平衡反応により決定される平衡電位 E はネルンストの式により次のように与えられる。

$$E = E^0 - 2.303RT/nF \log(a_{\text{Red}}^b a_{\text{H}_2\text{O}}^c / a_{\text{Ox}}^a a_{\text{H}^+}^m) \quad (9)$$

$$E^0 = -\Delta G^0/nF \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$\Delta G^0 = (b\mu_{\text{Red}}^0 + c\mu_{\text{H}_2\text{O}}^0 - a\mu_{\text{Ox}}^0 - m\mu_{\text{H}^+}^0) \quad \dots\dots(11)$$

電極電位は、以上述べたように、金属/水溶液界面の内部電位差として定義されるが、異なる相間の内部電位差を

*1 真空無限遠を基準としたときの物質内部の電位²⁾

直接測定することは不可能である²⁾。そこで、実際には標準水素電極を基準電極とし、これに対する相対的な電位を電極電位として用いる。すなわち、金属Mと金属イオンMⁿ⁺の平衡反応(Mⁿ⁺+ne⁻⇌M)を例にとると、電極電位は図1で表される電池の起電力として与えられる。ここで標準水素電極(SHE: Standard Hydrogen Electrode)とは水素イオンの活量a_{H⁺}=1(pH=0)の電解液に1atmのH₂を吹き込み、そこに白金電極を浸漬したガス電極である。平衡反応式は次式となる。



水素電極の電極電位E_(H₂/H)はネルンストの式により次のように与えられる。

$$E_{(H_2/H)} = E^0_{(H_2/H)} - (2.303RT/2F) \log(P_{H_2}/a_{H^+}{}^2) \dots\dots\dots (13)$$

$$E^0_{(H_2/H)} = -1/2F(\mu^0_{H_2} - 2\mu^0_{H^+}) \dots\dots\dots (14)$$

P_{H₂}=1atm, a_{H⁺}=1で、μ⁰_{H₂}=0より、SHEを基準(E_(H₂/H)=0)にするということはE⁰_(H₂/H)=0であり、標準状態(1atm)における水素イオンの標準化学ポテンシャルをゼロ(μ⁰_{H⁺}=0*)と約束(convention)することである。すなわち、H⁺の標準状態での化学ポテンシャルを全イオンの化学ポテンシャルの基準としている。金属M/金属イオンMⁿ⁺平衡系(Mⁿ⁺+ne⁻⇌M)のE⁰を表1に示す。イオン化傾向の小さい金属ほど高いE⁰値をとることがわかる。

3 電位-pH図の作成

3.1 金属、金属イオン、金属水酸化物の安定領域

25°Cにおける鉄の電位-pH図を実際に作成してみよう。

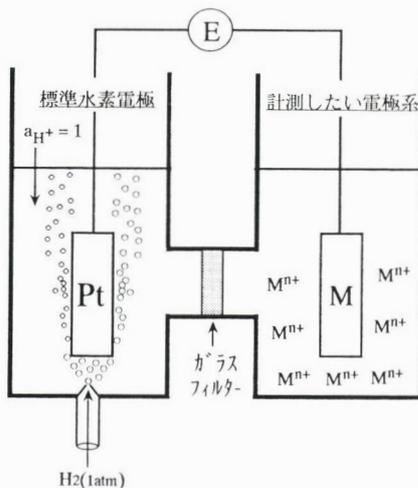


図1 電極電位を計測するための電池
電極電位は標準水素電極に対する電池の起電力として与えられる

単純化のため、鉄は金属(Fe)、金属イオン(Fe²⁺)、金属水酸化物(Fe(OH)₂)のいずれかの状態をとるものとしよう。電位-pH図上にそれぞれの安定領域を書き込むためには、Fe/Fe²⁺、Fe/Fe(OH)₂、Fe²⁺/Fe(OH)₂の3つの境界線を決定する必要がある。

① Fe/Fe²⁺の境界線

式(8)の平衡反応にOx=Fe²⁺、Red=Fe、a=b=1、m=c=0、n=2を入れることによりFe/Fe²⁺の平衡反応式が次のように得られる。



この反応の平衡電位Eは式(9)、(10)、(11)から

$$E_{(Fe/Fe^{2+})} = E^0_{(Fe/Fe^{2+})} + (2.303 RT/2F) \log a_{Fe^{2+}} \dots\dots (16)$$

$$E^0_{(Fe/Fe^{2+})} = -(\mu^0_{Fe} - \mu^0_{Fe^{2+}})/2F \dots\dots\dots (17)$$

表2^{1,3)}のμ⁰_{Fe}、μ⁰_{Fe²⁺}の値を式(17)に代入すると、E⁰_(Fe/Fe²⁺)=-84900/2×96500=-0.440Vが得られる。E_(Fe/Fe²⁺)はa_{Fe²⁺}に依存することから、境界線を決定するときには、Fe²⁺の活量を決める必要がある。電位-pH図では、希薄溶液を

表1 金属/金属イオン系の標準電極電位E⁰(25°C)

M/M ⁿ⁺	E ⁰ (V)	M/M ⁿ⁺	E ⁰ (V)
Li / Li ⁺	-3.045	Co / Co ²⁺	-0.277
K / K ⁺	-2.925	Ni / Ni ²⁺	-0.250
Ca / Ca ²⁺	-2.866	Sn / Sn ²⁺	-0.136
Na / Na ⁺	-2.714	Pb / Pb ²⁺	-0.126
Mg / Mg ²⁺	-2.363	H / H ⁺	0.000
Al / Al ³⁺	-1.662	Cu / Cu ²⁺	0.337
Zn / Zn ²⁺	-0.763	Hg / Hg ⁺	0.789
Cr / Cr ³⁺	-0.74	Ag / Ag ⁺	0.799
Fe / Fe ²⁺	-0.440	Au / Au ³⁺	1.50

表2 Cu、Fe、Ni化合物およびH₂Oの標準化学ポテンシャルμ⁰(25°C)ただし、Ni₃O₄、Ni₂O₃、NiO₂は水和した酸化物の値

	化学種	μ ⁰ (kJ/mol)		化学種	μ ⁰ (kJ/mol)
Cu	Cu	0	Ni	Ni	0
	Cu ²⁺	+65.0		Ni ²⁺	-48.2
	HCuO ₂ ⁻	-257.0		HNiO ₂ ⁻	-349.2
	Cu ₂ O	-146.3		Ni(OH) ₂	-453.1
	Cu(OH) ₂	-356.9		Ni ₃ O ₄	-711.9
				Ni ₂ O ₃	-469.7
Fe	Fe	0	NiO ₂	NiO ₂	-215.1
	Fe ²⁺	-84.9		H	H ₂
	Fe ³⁺	-10.6	H ⁺		0
	HFeO ₂	-379.2	O		O ₂
	Fe(OH) ₂	-483.5		H ₂ O	-237.2
	Fe(OH) ₃	-694.5			

*2 イオンの化学ポテンシャルの絶対値は求まらないが、相対値を求めることはできる。イオンを扱う電気化学では、水溶液系における共通イオンである水素イオンの標準化学ポテンシャルを基準とし、各イオン種の相対的な化学ポテンシャルを用いる。

仮定して活量係数 $\gamma=1$ とし、 $a_{\text{Fe}^{2+}}$ を濃度 $[\text{Fe}^{2+}]$ に置き換えて扱う。ここでは $[\text{Fe}^{2+}]=10^{-6}\text{kmol/m}^3$ のときの境界線を描いてみよう。式(16)より、この濃度での平衡電位は $E_{(\text{Fe}/\text{Fe}^{2+})} = -0.440 + (2.303 \times 8.31 \times 298 / 2 \times 96500) \log(10^{-6}) = -0.617\text{V}$ となる。すなわち図2の①線が Fe/Fe^{2+} の境界線となる。この線が Fe と 10^{-6}kmol/m^3 の Fe^{2+} が平衡状態(式(15)の右方向の反応速度と左方向の反応速度が釣り合っている状態)にあることを意味する。そして、この線より上の領域(高電位側)が Fe^{2+} の安定領域、下の領域(低電位側)が Fe の安定領域となる。これは Fe^{2+} を含む水溶液中での Fe の電気分解を思い浮かべると理解しやすい(図3)。図3(a)は Fe 電極を陽極(高電位側)にして電気分解した場合で、 Fe は酸化されて Fe^{2+} になる。逆に、図3(b)は陰極(低電位側)として電気分解した場合で、還元反応が起こり Fe^{2+} は Fe として析出する。すなわち、この平衡線より上では式(15)の反応は左方向に進み Fe^{2+} が安定となり、下では逆に右方向に反応が進み Fe が安定となる。

② $\text{Fe}/\text{Fe}(\text{OH})_2$ の境界線

式(8)中に $\text{Ox}=\text{Fe}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Red}=\text{Fe}$ 、 $a=b=1$ 、 $m=c=2$ 、 $n=2$ を入れることにより $\text{Fe}/\text{Fe}(\text{OH})_2$ の平衡反応式が次のように得られる。



式(9)によりこの反応の平衡電位を書き表すと

$$E_{(\text{Fe}/\text{Fe}(\text{OH})_2)} = E^0_{(\text{Fe}/\text{Fe}(\text{OH})_2)} - 2.303\text{RT}/2F \log(1/a_{\text{H}^+}{}^2) \quad \text{.....(19)}$$

$$E^0_{(\text{Fe}/\text{Fe}(\text{OH})_2)} = -1/2F (\mu^0_{\text{Fe}} + 2\mu^0_{\text{H}_2\text{O}} - \mu^0_{\text{Fe}(\text{OH})_2} - 2\mu^0_{\text{H}^+}) \quad \text{.....(20)}$$

ただし、 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 、 Fe は純粋な固相なので $a_{\text{Fe}(\text{OH})_2} = a_{\text{Fe}} = 1$ 、 $a_{\text{H}_2\text{O}}$ は厳密には純水の蒸気圧に対する水溶液の蒸気圧の比として表されるが、電位-pH図では希薄溶液を仮定して

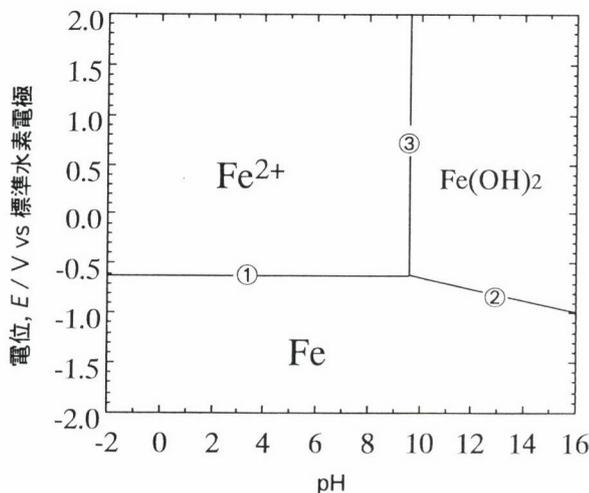


図2 Feの電位-pH図(25°C) Fe 、 Fe^{2+} 、 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ のみを考慮、 $[\text{Fe}^{2+}]=10^{-6}\text{kmol/m}^3$

$a_{\text{H}_2\text{O}}=1$ として計算される。式(20)中の各物質の μ^0 に表2の値を代入して $E^0_{(\text{Fe}/\text{Fe}(\text{OH})_2)}$ を計算すると -0.047V となる。従って、式(19)は式(21)となる。

$$E_{(\text{Fe}/\text{Fe}(\text{OH})_2)} = -0.047 - 0.059\text{pH} \quad \text{.....(21)}$$

ただし、25°Cでは $2.303\text{RT}/F=0.059$ で、 $\text{pH}=-\log[\text{H}^+]$ である。この境界線は図2の②線に相当する。この線より上では酸化方向(式(18)の左方向)に反応が進行するため $\text{Fe}(\text{OH})_2$ が安定になる。一方、下側では還元方向(右方向)に反応が進行するため Fe が安定になる。

③ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}(\text{OH})_2$ の境界線

Fe^{2+} と $\text{Fe}(\text{OH})_2$ はともに Fe の酸化数は+2をとり、電子の授受を含まない次のような化学平衡反応となる。



平衡条件(両辺の化学ポテンシャルの和が等しい)から

$$\Delta G^0 = -2.303\text{RT} \log K = -2.303\text{RT} \log(a_{\text{Fe}^{2+}}/a_{\text{H}^+}{}^2) \quad \text{.....(23)}$$

$$\Delta G^0 = \mu^0_{\text{Fe}^{2+}} + 2\mu^0_{\text{H}_2\text{O}} - \mu^0_{\text{Fe}(\text{OH})_2} - 2\mu^0_{\text{H}^+} = -75.8\text{kJ/mol} \quad \text{.....(24)}$$

ここで K は平衡定数である。同様に、 $a_{\text{Fe}^{2+}} = [\text{Fe}^{2+}] = 10^{-6}\text{kmol/m}^3$ とおき、式(24)を式(23)に代入すると式(25)が得られる。

$$\text{pH} = 9.65 \quad \text{.....(25)}$$

この平衡は電子授受がないため境界線は電位軸に平行(③線)となる。この線より酸性側では、式(22)から平衡は右側に進むため Fe^{2+} が安定になり、アルカリ性側では逆に $\text{Fe}(\text{OH})_2$ の安定領域になる。

以上、 Fe 、 Fe^{2+} 、 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ のうちの2つずつの組合せの安定領域について述べたが、全体としては次のようになる。例えば、 Fe の安定領域は①線より下で、かつ②線より下の領域である。そして Fe^{2+} の安定領域は①線より上で、かつ③線の左の領域となる。残った領域が $\text{Fe}(\text{OH})_2$ の安定領域である。

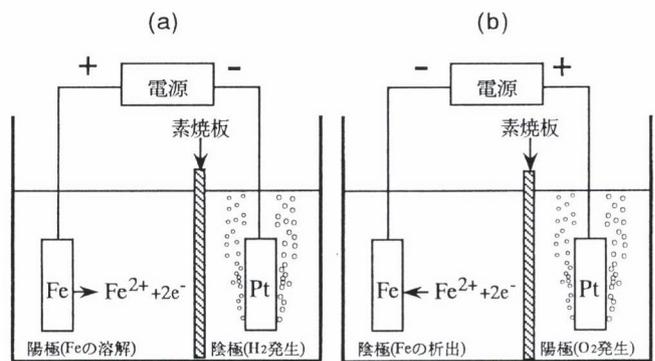


図3 Fe^{2+} を含む水溶液中での電気分解の模式図 Fe 電極を(a)陽分極、(b)陰分極

3.2 水の安定領域

腐食反応が進行するためには環境中に存在する酸化剤の酸化力が重要となる。一般環境での酸化剤としては、 H^+ と O_2 が考えられる。これらは H_2O と平衡反応を形成するため H_2O の状態図を作る必要がある。ここで、水の電気分解を思い浮かべよう。例えば、2枚の白金電極を硫酸溶液中に浸して両電極間に電圧を印加する。印加電圧が小さいときには何も起きないが、ある電圧に達すると陰極から H_2 、陽極から O_2 が発生し始める。この電圧が H_2O の分解電圧である。すなわち、 H_2O は分解電圧以下では安定であり、それ以上では分解して H_2 と O_2 に変わる。従って、 H_2O の安定領域を考える場合、④ H_2O/H_2 (実際には水の解離による H^+/H_2)平衡と⑤ O_2/H_2O 平衡を考える必要がある。以下に、それぞれの平衡反応および平衡電位を示す。

④ H^+/H_2 の境界線



$$E_{(H^+/H_2)} = E^0_{(H^+/H_2)} - (2.303RT/2F) \log P_{H_2}/a_{H^+}^2$$

$$= -0.059pH \dots\dots\dots (27)$$

⑤ O_2/H_2O の境界線



$$E_{(O_2/H_2O)} = E^0_{(O_2/OH^-)} - (2.303RT/4F) \log a_{H_2O}^2/P_{O_2}a_{H^+}^4$$

$$= 1.228 - 0.059pH \dots\dots\dots (29)$$

ただし、 $E^0_{(H^+/H_2)} = 0$ で、 $P_{H_2} = P_{O_2} = 1 \text{atm}$ としている。式(27)、(29)は図4の④、⑤線となる。すなわち④線より上では式(26)は酸化方向に進み H^+ (H_2O)*³が安定となる。一方、④線より下では逆に、還元方向に進むため H_2 が安定となる。同様に、 O_2 に関しては、⑤線より上では O_2 が安定となり、

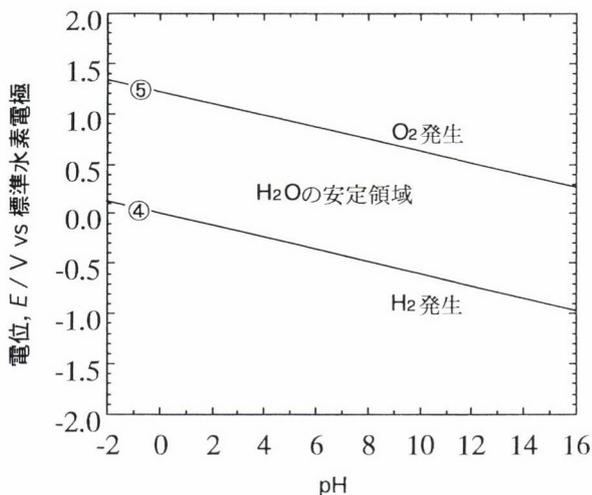


図4 H_2O の電位-pH図(25°C)
 $P_{O_2} = P_{H_2} = 1 \text{atm}$

下では H_2O が安定となる。つまり④線と⑤線間の電圧が H_2O の分解電圧に相当する。④線と⑤線間の領域は H_2O の安定領域であり、④線より下では H_2O は H_2 に、⑤線より上では H_2O は O_2 に変わる。

以上の結果から、水素イオンが酸化剤(自らが還元される)として働くのは④線より下の領域で、一方、酸素が酸化剤として働くのは⑤線より下の領域となる。

4 電位-pH図の見方

4.1 金属の熱力学的安定状態

鉄を例にとり、電位-pH図の読み方について説明しよう。図5は3価の鉄のイオン種および化合物まで含めた鉄の電位-pH図である。図2では単純化のため Fe 、 Fe^{2+} 、 $Fe(OH)_2$ のみを考えたが、ここでは Fe^{3+} 、 $Fe(OH)_3$ 、 $HFeO_2^-$ を含めて電位-pH図を作成した*⁴。これらの物質の標準化学ポテンシャルが既知なので、図2と同様に境界線が決定できる。電位-pH図は大きく3つの領域(金属、イオン、水酸化物)に分けられる。金属(Fe)状態での安定領域を不活態(immunity)、イオン(Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、 $HFeO_2^-$)状態での安定領域を活性態(active)、水酸化物($Fe(OH)_2$ 、 $Fe(OH)_3$)状態での安定領域を不動態(passive)と呼ぶ。不活態領域は熱力学的に金属がまったく腐食しない領域、活性態領域は金属がイオンとして水溶液中に溶け出し腐食が進行する可能性のある領域、不動態領域は金属が酸化され水酸化物(あるいは酸化物)となる可能性のある領域である。活性態および不動態領域はいずれも熱力学的には腐食

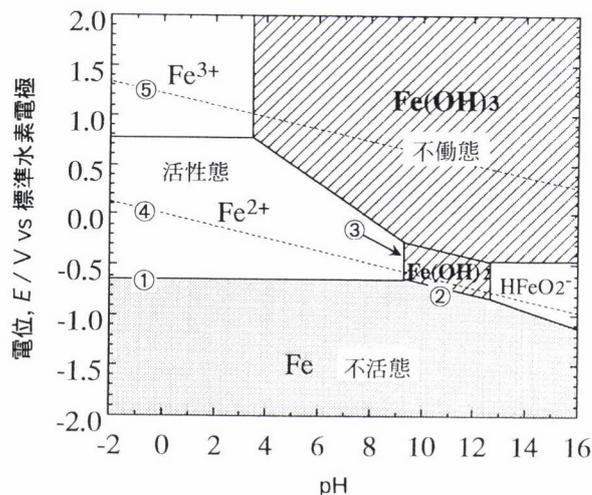


図5 $Fe-H_2O$ 系の電位-pH図(25°C)
 $[Fe^{2+}] = [HFeO_2^-] = 10^{-6} \text{kmol/m}^3$ $P_{O_2} = P_{H_2} = 1 \text{atm}$

*³ H^+ と H_2O の間には、 $H_2O \rightleftharpoons H^+ + OH^-$ の解離平衡が存在するため、 H^+ の安定領域は H_2O の安定領域でもある。
*⁴ 電位-pH図では、固相の化合物を金属水酸化物あるいは水和酸化物として描く場合と、非水和の金属酸化物として描く場合がある。例えば Fe では、 $Fe(OH)_2$ 、 $Fe(OH)_3$ あるいは Fe_3O_4 、 Fe_2O_3 等とする。

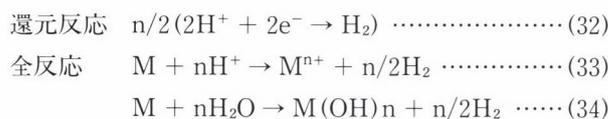
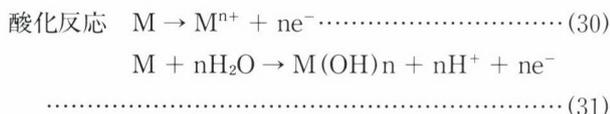
が進行する可能性のある領域である。ただし、活性領域では金属表面は裸のままであるため、かなり大きな速度で腐食することが予想される。これに対して、不動態領域では表面が水酸化物あるいは酸化物皮膜により覆われているため、もし緻密で保護性ある皮膜が生成されれば大幅な腐食速度の減少が期待できる。(ただし、どのくらいの速度で腐食が進行しているかは平衡論からは知ることができない。実際の腐食速度が知りたい場合には速度論的検討が必要となる。)

以上述べたように、環境のpHとその金属の基準電極^{*5}に対する電位(腐食電位と呼ぶ)を測定してやれば、現在、金属が不動態、活性、不動態のうちどの領域にあるかを電位-pH図から簡単に読み取ることができる。

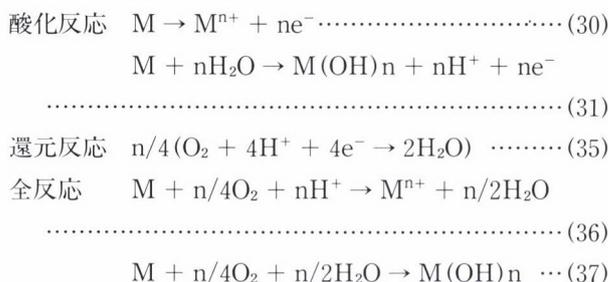
4.2 腐食反応の進行の可能性

前節では金属(材料側)の水溶液中での安定状態について述べたが、実際には腐食は材料と環境の組合せにより生じる。そこで水(環境側)の安定性についても考えなければならない。金属が金属イオン(式(30))あるいは金属水酸化物(式(31))になる反応は酸化反応である。従って、この反応を自発的に進めるためには酸化剤が必要となる。一般環境ではH⁺(式(32))およびO₂(式(35))が金属腐食の酸化剤となり、金属Mの腐食反応は以下のように表される。

・水素イオンが酸化剤となる場合：



・酸素が酸化剤となる場合：



金属が腐食するためには金属の酸化反応と酸化剤の還元反応とが同時に進行する必要がある。次に、Fe、ニッケル(Ni)および銅(Cu)を例にとり、腐食反応の進行する領域を説明しよう。

図5、6、7は、Fe、Ni、Cuの電位-pH図(これらの図も表2のμ⁰の値を使って図2と同様な手順で作図することができる。)を示す。それぞれの図中には図4のH₂Oの安定図を重ね書きしている。式(32)のH⁺の還元反応が進行する領域は前述したように④線より下の領域である。従って、H⁺が酸化剤として腐食が進行する領域、すなわち式(33)あるいは式(34)の反応で腐食が進行する領域は、図中の①線あるいは②線より上で、かつ④線より下の領域となる。Feの場合、-2 < pH < 16のすべてのpH領域で、H⁺との反応による腐食が熱力学的に進行する可能性があることをこの図は意味している。一方、Niの電位-pH図(図6)をみると、①線、②線より上で、かつ④線より下の領域はpH < pH_{①④}とな

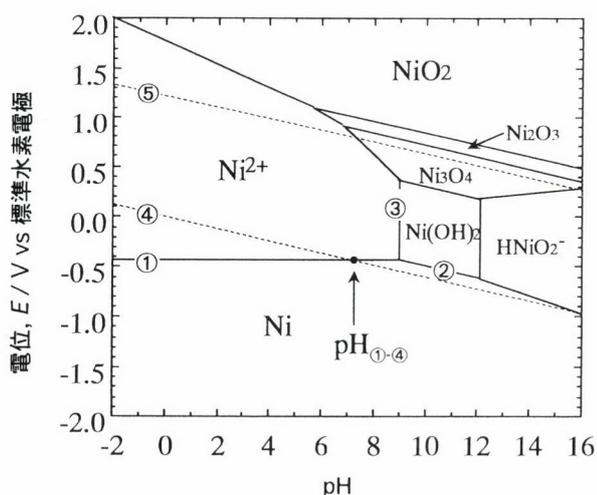


図6 Ni-H₂O系の電位-pH図(25°C)
[Ni²⁺] = [HNiO₂⁻] = 10⁻⁶ kmol/m³ P_{O₂} = P_{H₂} = 1atm

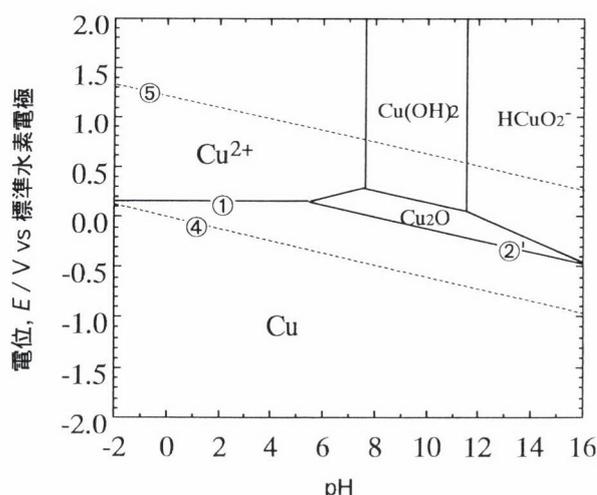


図7 Cu-H₂O系の電位-pH図(25°C)
[Cu²⁺] = [HCuO₂⁻] = 10⁻⁶ kmol/m³ P_{O₂} = P_{H₂} = 1atm

*5 電位の安定性や取り扱いの困難さから、標準水素電極のようなガス電極は実際には基準電極としては使わず、飽和銀/塩化銀電極や飽和カロメル電極が基準電極として使われる。これらの基準電極の電位は25°Cにおいて標準水素電極に対してそれぞれ0.199V、0.241Vであることがわかっているので、測定された電位は標準水素電極基準に換算できる。

る。すなわち、①線と④線の交点で決まる $\text{pH}_{①④}$ より酸性側でのみNiと H^+ との腐食反応(式(33))が起こる可能性があることをこの図は意味している。ただし、①線が Ni^{2+} の濃度により変化するため(式(16))、①線と④線の交点である $\text{pH}_{①④}$ は Ni^{2+} 濃度により変わる。また、Cuの電位-pH図(図7)では、①線、②'線より上で④線より下の領域は、すべてのpH範囲で存在しない。これは H^+ によるCuの腐食反応は熱力学的には進行しないことを意味する。これに対して、 O_2 が還元される電位(⑤線より下)は H^+ に比べて高いため、金属の酸化反応(式(30)および式(31))が進行する領域(①線、②線より上の領域)と酸素が還元される領域(⑤線より下の領域)との共通領域が、Fe、NiおよびCuのすべてのpH範囲で存在することから、式(36)および式(37)の反応は、すべてのpH範囲で起きる可能性があることを読み取ることができる。

5 おわりに

電位-pH図は電気化学の教科書や腐食工学の入門書でよく解説されている。これらの中では、電解質溶液論、電極平衡論に関する電気化学の基礎や腐食工学の基礎をまず解説し、その応用として電位-pH図の説明が登場するケースが多い。本稿では紙面の都合上、これらの基礎の部分の詳細な説明なしで電位-pH図の解説に入ったためわかりに

くい部分があったかもしれない。より詳しくは電気化学の教科書等^{2,4,5)}を見ていただきたい。また、本稿では、鉄、ニッケルそして銅の電位-pH図を紹介したが、その他の金属に関してはM.Pourbaixによる平衡図集を参考にさせていただきたい。

電位-pH図を使った腐食の平衡論の解説を行ったが、前述したように、平衡論からは材料の腐食速度に関する定量的な情報は得られない。腐食・防食の研究に興味のある方は、是非、腐食の速度論について書かれた解説、入門書等^{2,4,5)}も参考にさせていただきたい。

最後に、本稿を執筆する機会を与えていただきました本誌編集委員会の関係者の方々に感謝いたします。

参考文献

- 1) M. Pourbaix : Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions, Pergamon Press, N.Y., (1966)
- 2) 喜多英明, 魚崎浩平 : 電気化学の基礎, 技法堂, (1983)
- 3) W. M. Latimer : The Oxidation States of the Elements and their Potentials in Aqueous Solutions, Prentice-Hall, N.Y., (1952)
- 4) 増子昇, 高橋正雄 : 電気化学-問題とその解き方-, アグネ, (1993)
- 5) 水流徹 : 現代の電気化学, 新星社, (1990), 89.

(1997年9月26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—技術編 追付け時代の鋼管製造

三瀬真作 住金大径鋼管(株) 社友
Shinsaku Mise

Pipe and Tubes Making Technologies during "Catch up Era" after World War II

1 まえがき

1.1 はじめに

本記事は終戦の昭和20年から昭和30年代までの20年間に区切って、日本の鋼管製造の発展状況を体験を通じて随筆風に記述する要望であり計画である。しかしこの広範囲を一人の技術者の体験で覆いきれないから私以外に2~3人のその道のベテランの談話や記事を載せさせてもらっている。

所で主体になる筆者自身のことである。筆者は大戦勃発の昭和16年12月に大学を繰上げ卒業し17年1月住友金属に入社したが、直ちに海軍短期現役に2年間服役し19年1月から住友金属尼崎の冷間引抜工場で鋼管製造のスタートを切り、22年1月から熱間継目無鋼管の主流であるスチーフエル・マンネスマン工場で働き戦後復興発展の過程を身を持って体験させてもらった。しかも鉄鋼協会共同研究会の主査部会長を代々住友金属の役員が勤めて来た経緯から、筆者は早くから幹事等をやらされ他社との見聞交流は人一倍多かったように思う。戦後共同研究会が発足したのが昭和24年で第一回は24年2月16日住友金属尼崎と尼崎製鋼で開催され私はこれに出席している。その後筆者の守備範囲は順次広がったが、そのなかに常に鋼管部門があり今日現在の勤め先もスパイラル鋼管製造会社であるため、鋼管部会に出席出来る。昭和44年6月から7年間部会長を勤めた事もあり昨年平成8年6月の部会にも出席して長老扱いされている。この事が今回本稿の執筆を不肖を顧みず敢えて引受けた次第でもある。

1.2 終戦直後

昭和20年8月15日終戦を迎えあらゆる工場の生産が全てとまった。どうなるのか、どうすればよいのか皆目分らない。学徒動員、徴用工の人々は郷里に帰り尼崎工場の13,000

名は2,700名位になった。3日後抽伸機を動かしてみたが飛行機用鋼管を抽伸してみても無意味なのが分り民需用の鍋釜を作ったりした。

各工場共に離職者や帰還者でゴタゴタしたあと、少しずつ再建に向けて稼働を始めた。その状況を主要工場についてみると継目無し管工場で動きだしたり廃却したのは

昭和20年

住金尼崎マンネスマン 8 1/2"工場 10月稼働
住金尼崎鎖式抽伸機 11月稼働
満洲住友(鞍山) スチーフエル式製管機 5 1/2"工場
" " ジンガー式クランク・プレス 2 3/8"工場
上記2機をソ連が撤去奪取
NKK川崎マンネスマン 6 1/2"工場 稼働
NKK川崎エルハルト式 6 1/2"工場空爆被弾により廃却
東京コンチット(東芝鋼管) マンネスマン3"工場廃却

昭和21年

住金尼崎エルハルト式 26"工場 4月稼働
住金尼崎ジンガー式 2 3/8"工場 10月稼働
NKKマンネスマン 2 1/2"工場 稼働
NKKピルガー式 14 1/2"工場 稼働
日本特殊鋼管 6 1/2"工場 4月稼働

昭和22年

尼崎製鋼ブッシュベンチ式 3 1/2"工場 稼働

昭和23年

住金和歌山 マンネスマン工場 8 1/2"工場 8月稼働

溶接鋼管では

NKKベルマウス式 60.5mm 鍛接管工場 21年7月
東洋鋼材(三機工業) 60.5mm、127mm 電縫管工場
東京コンチット(東芝鋼管) 38.1mm 電縫管工場
日亜製鋼 48.6mm ガス溶接管工場

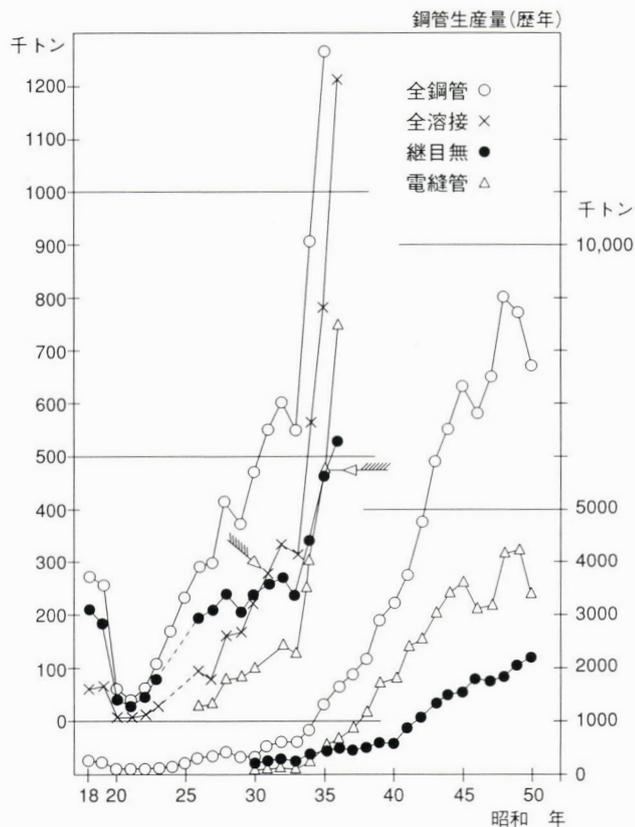


図1 鋼管生産量の推移 (歴年)

日本パイプ 48.6mm ガス溶接管工場
 東京コンチット (東芝鋼管) 48.6mm ガス溶接管工場

が稼働を始めた主要な工場であった。これで戦後が始まったといえる。

1.3 鋼管生産高の推移

我が国の鋼管生産量の推移を図1に示した。全体の傾向を見易くするために戦前の昭和18年から昭和50年迄を表示したが、その32年間の分を右座標で示し、昭和18年から35年迄の17年間の分を左座標で拡大して示している。これで見ると生産量は26年に既に戦前を凌駕しているが、40年代の著しい伸びをみると33年までは未だ復興期ともいえるものであろう。

継目なし鋼管だけを見ても伸びてはいるが、31年に熔鍛接鋼管全体が26.9万トンとなり継目なし鋼管より多くなり、次いで35年には電縫管のみで46.1万トンとなり継目なし管の45.4万トンを凌駕している。あとは驚異的に伸び49年には鋼管全体で900万トンを越す所までになっている。

表1 出来事年表 □: 鋼管関連項目

年	記 事	年	記 事
S		30	神武景気 鉄鋼2次合理化
20	終戦	31	スエス中東戦争・勃発
21	商用周波数ERW(中津)設置	32	金融引締不況 マンネスマン・ダブルピアサー設置(和歌山)
22	日本鉄鋼連盟発足	33	なべ底不況 ユジーン押出機(長府), 14"ERW(光)新設 ラインスタッフ組織(八幡)
23	ロータリオンERW(東芝)設置	34	岩戸景気 米国スチールストライキ スパイラル表管機(久保田)新設
24	ドッジライン 1\$=360円 API/Pアラムコ出荷	35	U-0大径管(鶴見)設置
25	朝鮮戦争勃発 高温高压ボイラーチューブ出荷	36	鉄鋼3次合理化 3ロールストレッチ・レデューサー(尼崎)設置 16"ERW(和歌山)設置
26	鉄鋼一次合理化 高周波ERW4½"(和歌山)設置 APIケーシング出荷	37	
27	日米安保発効 米国スチールストライキ53日間 APIチューブ出荷	38	ERW+ストレッチ・レデューサー(名古屋)設置
28	デミング賞受賞始まる 65%ERW(三機)改造	39	新幹線開通、東京オリンピック 20"ERW(知多) 20"ERW(NKK)設置
29	フレッツ・ムーン(川崎)設置	40	ベトナム戦争 いざなぎ景気 18"ERW(和歌山)改造

2 導入発展期のスタート

2.1 総括

現在本稿を執筆したのは平成9年(1997年)である。52年前の終戦の昭和20年(1945年)から昭和40年(1965年)までの20年間の世状と鋼管製造の発展状況はどうであったか？一応世の中の出来事や設備新設の状況のあらましを参考までに年代毎に一覧表にし、表1に示した。

2.2 継目無熱間工場の一例

私のいたマンネスマン工場の加熱炉は傾斜式ロールダウン方式の石炭ストーカーであった。粗悪炭で扱い難く、しかもなかなか入荷しない。そこで21年暮れから炭鉱へ応援に行っている。40人位が2班に分かれて行きフンドシー一枚で地底で採炭した。これで石炭の配給もふえた。この応援隊の中から会社の取締役以上が3人もでている。スタッフと作業員が一体となっていた証拠である。

当時世の中は産業復興のための傾斜生産で鋼管についてはまず石炭増産のための炭鉱用排水管需要のために大径ガス管が要望された。材料の丸鋼としては日本鋼管のピルガーを真似てインゴット・ダイレクトで穿孔した。インゴットの内部に大きなキャビティがあるのに結構パイプになる

におどろいたものだ。次は電力確保のための火力発電用ボイラー管の製造、次いで食糧増産のための硫酸製造用厚肉高合金鋼管の生産、続いて輸送機関復旧のための機関車用缶管と時代の脚光をあびている鋼管製造の骨の折れる毎日であった。これが昭和23年頃までの状況であった。

2.3 当時の技術者

当時のスタッフ・課長工場長クラスの人々は大変忙しい事で何から何までやらされた感じである。先輩から教えられる事よりも、みんなで初めて経験する事ばかりであった。圧延技術者としての当然の知識以外に勉強した事項を次に列挙してみた。

1. 労働組合との協調への対応
同一労働同一賃金思想と職階制理論
2. 昭和24年来日したヘイズ氏 (USスチール本社熱管理部長) 指導による熱管理と技師資格取得
燃焼効率向上のための炉内正圧操業、廃ガス分析、断熱材や対流加熱、放射加熱の勉強
3. 昭和25年来日したデミング博士指導による統計的手法と実験計画法の勉強
標準化と品質管理
4. ラインとスタッフ組織導入と対応
5. 精整設備としてストレートナー、切断機、ねじ切り機、アプセッターの機構習得
6. ユーザー対策として発電所ボイラーの構造使用条件 OCTG用として油井掘削、ラインパイプ施設の勉強
7. 非破壊検査、火花試験の習得
8. 規格JES、JISの改訂PRやロイド、ABS、APIの認定作業
9. 冶金管理、工程管理とクレーム処理への対応

2.4 共同研究会のスタート

共同研究会が戦後始まったのが昭和24年2月16日である。議題に取上げられたのが工具だった。工場稼働で現場の技術者の直接の関心事は日々使われる工具と故障対策である。ピアサー穿孔に使われるプラグの材質と形は重要で、現在は内面水冷で100回以上連続使用できるが当時は10個位を輪番に使っても7パス位で駄目になる。お互いに他社のはどうかと比較調査する。米国の文献にピアサーの現場の写真がありプラグが並べてある。側にドラム缶が写っていた。ドラム缶の寸法を基準にしてプラグの形状を割出して試作試用したりした。また材料のピレットにステンレスのピンを埋込みピアサー途中止め材を作りメタルフローを調べて内面きずの発生機構を調べたり、NKKが先頭をきってプラスチックを模型ピアサーで穿孔している情報を得て大至急準備したりしたものだ。

次はプラグミルのロールである。各社の状況を交換するが要するにグレンロールは噛みこみは良いが肌あれが速く困る。チルドロールは肌は良いが滑って噛みこみが悪く欠ける事も多い。各社が日立金属の若松工場に日参していた。私は米国のルイスから試験的にロールを輸入してもらったがこれがグレンロールでそれ程良くない。米国では寿命抜群との事であったが、結論はピアサーが薄肉穿孔しているし素管の温度も高いからだろうという事とお客が肌あれを余り問題にしないらしいと言うことで終わってしまった。

2.5 海外出張調査

戦後復興期には新設備導入が各部門でおこなわれたが、それに平行して各社の技術者が欧米に活発に技術調査にかけたものである。最初は昭和25年に第一回スチールミッションとして鉄鋼各界から代表者がかけている。

そのメンバーとして第一班は

団長 小平 勇 (日本製鉄)
田中 国雄 (日本鋼管) 外島 健吉 (神戸製鋼)
富山英太郎 (日本鋼管) 市田左右一 (尼崎製鋼)
小田 助男 (住友金属) 植山 義久 (川崎重工)
和田 亀吉 (日本製鉄) 田畑新太郎 (通産省)
岡本 勇 (日本製鉄)

と当時の錚々たる人物が出掛けている。

筆者も遅ればせながら昭和34年に欧米に出掛けた。各社に工場見学のアポイントを取るのに苦労したが、先方は弟分が勉強にきたなと心良く教えてくれた。よくデータを整理して持っていて感心もしたが、知らないことは知らないとハッキリ言い即座に例えばニューヨークからヒューストンに電話して聞いてくれる。当時の我々としては長距離電話が直ぐかかるのに感心したものだ。現場を見学するにしてもノートを取るのには遠慮すべきだということで、ポケットの中に手をいれて人知れずメモを取った。ホテルに帰っても忘れないうちに夜遅くまでレポートを書き、日本に帰ってもその報告書のページの厚みを競ったものだ。

3 マンネスマン工場での体験

3.1 生産量

話の始まりとして戦後より生産量がどのように伸びたか一つの例として筆者のいた住金マンネスマン工場の立上がりから昭和55年までの月間ロール量を図2に示す。本誌が取上げる昭和35年頃までは活力充填の時期で以後飛躍的に伸びている。他社も同じようなものと思う。

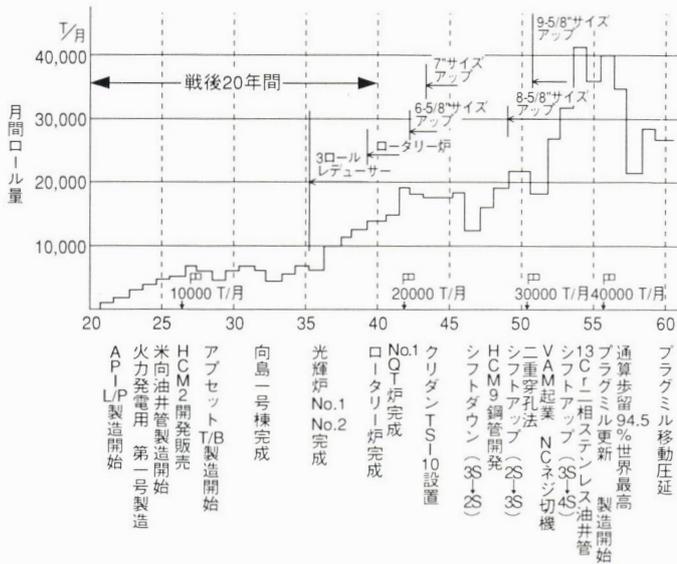


図2 マンネスマン製管工場のロール量

3.2 油井管

昭和26年の後半から油井ケーシング、チューブの輸出が軌道に乗りはじめた。同時にoil country tubular goodの略であるOCTGと言う言葉が営業仲間で盛んに使われだした。boiler tubeやsmoke tube、石油化学用等の小口多寸法の注文と違って注文ロットが極めて大きい。3交替で3~4日間同じ寸法の圧延を行うのは初めての経験で、当時流行し始めた品質管理の手法を発展さす格好の場となった。しかし作業は現在とは違ってバラツキが大きく寸法をAPI規格に入れるだけで苦労の連続であった。次に一例として5½"ケーシングの外径管理を述べてみたい。

外径公差は139.70mm±0.75% (138.65~140.75)だが両端にネジを切る時にテーパねじの切れ上がりに不完全山が残る。このねじ部を黒山と呼び3山~5山残らねばならない。管の外径が大きすぎても小さすぎても不可で外径目標は140.3~140.7と管本体の外径公差より一段ときびしくなる。所がサイザーに入る前の管即ちローラーを出た管の頭は当時は680℃、尻尾は750℃と温度差が70℃もある。サイザーを通過して常温になる時に100℃につき0.15mm縮むのだが、尻部の外径は頭端より小さくなる。しかもサイザーロールの溝底は2日間の圧延で0.3mm摩耗するから取替える。新品ロールになると圧下を調整しなければならない。下手な作業員が圧下をいじると外径調整以外にロールエッジマークがついたり、管が曲がって出てきたりして神業みたいな事が要求された。ある日出勤したら昨日の夜勤で作ったものの外径が小さすぎてねじ切りが出来ないので明日の立会いに30本不足すると言う。一策を案じポンチを6箇所ほど準備して管端に打込み管端のみ0.2mm程広げた。これでやっと急場をしのいだが毎日何かの問題がおきる日々に

あった。

一つ失敗談がある。2⅜"チューブを作っていた。現在の様に4~5本取りではなく1本取りである。偏平試験があり、これで不合格になると切下げて再びテストをせねばならず大変手間であった。冷却台でみる伸ばし長さで肉厚を管理している。バラツキがあって長く伸びたもの即ち両端の切り代が長く肉厚も少し薄い目のものは偏平試験が非常に良い。そこで伸ばし長さを標準より100mm長くした。肉厚公差にも入っており単重も少し軽くなるが-3.5%の中に十分入っている。喜んでいたら4日後になり検査課長が青くなって飛込んできた。外人検査官の立会いも済んだものを船に乗せるためあるロットの束で重量を計る。これをcar loadというが、その公差-1.75%より全て軽いという。私は一本一本が-3.5%に入っている事を確認したがcar loadの方がキビしい事を忘れてしまっていたためである。大きすぎになったが、やっとLimited Serviceとして出荷は一応できた。初めての事だが高い授業料を払った。

3.3 ボイラー・チューブ

発電所用のボイラーチューブは熱交換機のカタマリの様なもので外径の大きいヘッダーと蒸気管をエルハルト式製管機で製造する以外は全てマンネスマン式製管機で作った。住友金属は戦前から艦船用の缶管を一手に引受けていて、管は曲げたり拡管したりするため軟かい鋼として指定されていたリムド鋼に馴れていた。しかし高温高压ボイラーになるとクリープ性能を要求されキルド鋼に転換するようになった。戦後で熱効率のよい高温高压ボイラーといわれる第一号機は九州電力の築上発電所のもので温度470℃、圧力58気圧で、この管の製造には筆者も現場で直接働いた。その後、炉壁管、過熱器管、節炭器管と使用部位によって材質寸法も異なりクロームモリブデン鋼も多く使われだした。只油井管と違い一缶の鋼管重量は600トン~1000トンとあるが寸法が多岐にわたり、特に長さが千差万別である。一例として小野田発電所の注文寸法を示す。

外径60.3×肉厚4.3×長さ4815mm	=	44本
長さ4540	=	48本
4305	=	48
)	
3495	=	48
3560	=	23

と11種類約15トンである。

1本でも足りない納期遅れとなり、1本でも余ると歩留りが下がる。コンピューターは無い時代であるから担当は

現場を走り回り手作業で集計把握していた。月間1万トン生産時代に千トンの納期遅れを抱えて苦勞した事を昨日のように覚えている。

3.4 3ロールストレッチレデューサー

レデューサー作業では出来るだけ大きな母管から小径管に絞り圧延すると能率が30~40%上がる。筆者は昭和34年に欧米を調査して回り3ロール・ストレッチレデューサーを採用することにして昭和36年に設置してもらった。レデューサーの泣所は管の両端の肉厚が厚くなることである。ストレッチをかけて全体の肉厚を薄くし、かつ管端の厚肉部分の長さを短くする必要がある。3ロール式は従来の2ロール式に較べてロールスタンド間隔を小さくできるし外径圧下も大きく取れる。またロールキャリバーは2ロール式では個々にキャリバーを切ってから組むが、3ロール式ではスタンドにロールを組んでしまってからキャリバーを切るのだからロールセットの調整は一切不要である。このため最近ではサイザーロールにもこの3ロールが採用されている。当時西独では3ロールが既に稼働し始めていたが全て電縫管用で薄肉用に使われていた。継目なしの厚肉用には筆者の場合が始めてであった。従って西独式のキャリバーデザインでは管の内面が角張ってしまう。稼働してから2ヶ月間改良を重ねた結果、満足するものになった。その対策の要点はキャリバーの長径をA、溝底の短径をBとし、スタンド番号をiとすると

$$\xi = B_i / A_{i+1} > 1$$

とする事である。西独での薄肉用では $\xi < 1$ であった。簡単なこの説明では理解し難いと思うが、要はキャリバーの円をあまり三角形に絞らずに外形落としを大きくして管がロール面に触れる部分を多くするという事であった。現在では解析が進み理論的に計算されている。

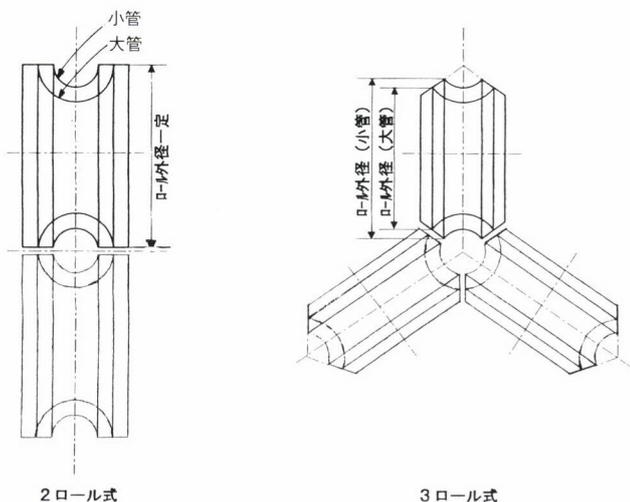


図3 レデューサーロールの比較

要するに2ロール式に比して、強度も十分にあるしスタンド間隔も小さく、外径も絞り率も大きくとれ、両端肉厚部も短かく、全体伸ばし長さも数倍になりedge markにも悩まされる事も解消した。2ロール式に比しスタンド間隔を小さくとれる状況を図3に示す。

3.5 設備更新状況

継目なし鋼管製造の花形ミルはマンネスマン式工場である。これらは戦後新技術導入に努力してきたが、その大まかな事柄を列記しておきたい。

住金（尼崎）ミル

- 昭和28年 更新大改造
- 〃 36年 3ロールストレッチレデューサー設置
- 〃 40年 ロータリー炉設置

住金（和歌山）ミル

- 昭和29年 プラグミル・プラグ自動抜取り装置設置
- 〃 32年 二重穿孔方式採用
- 〃 43年 海南に5½"マンドレルミル新設

新日鐵（東京）ミル

- 昭和27年 プラグミル更新
- 〃 28年 サイザー更新
- 〃 36年 管材加熱炉ウォーキングハース化
- 〃 41年 ピアサー更新
- 〃 42年 レデューサー更新

日本鋼管

- 昭和32年 中径7"ミル新設し、2製管工場と称した2½"ミルを閉鎖
- 〃 43年 5½"マンドレルミル新設し、1製管工場と称した6"ミルを閉鎖

4 押出製管

継目無製管法の特種な分野として押出法がある。住友金属は戦前昭和11年より、ジンガー式クランクプレスで稼働させていた。その後ユジーン法に取って替わられたが、当時のジンガー式とユジーン式に若き青春時代の情熱を燃やした小島浩氏（昭和18年9月住友金属工業株入社、当時鋼管製造所配属、元住友金属副社長）に回想文をもらったので次に記す。

4.1 ジンガー式押出製管機

この製管法は継目無鋼管の製造法としては特種な分野に属しており、日本に1機、ドイツに2機、ブラジルに1機位の稼働を見るのみであった。

非鉄金属の製管法では水圧プレスによる押出が主流であり、広く普及していた。これと異なって加工温度が高く、変形抵抗も大きい鋼となると、加工に数秒を要する水圧押出では、工具温度が上昇してしまい押出は不能である。

ジーン式クランクプレスでは、クランクシャフトの回転によるクロスヘッドのストロークにより、1秒以内の短時間で加工が終結できる。従って鋼の押出が可能となる。しかしながら、クランクプレスで大きな押出力と長いストロークを得るには、巨大なクランクシャフトが必要となり、これの製作上の制限から大型化は望めず、押出力が最大でも1200トンどまりであった。このため、使用するピレット重量も小さく、管の寸法も外径2"が精一杯のところであった。取り柄といえば、戦後需要の出始めたステンレス管や精練不十分で内質の悪い鋼の加工には適していた事である。これは加工性の悪い材料でも、圧縮応力の下で加工を行うと疵が出にくいという塑性加工上の特性が活かされたからである。

このプロセスが世に広く使用されなかったのは、前述の製造寸法の制約の外に使用工具のコスト高が大きな理由であった。極短時間加工とはいえ、高温での押出条件は苛酷であり、高価な耐熱工具の消耗は実に激しかったからである。

従ってコストダウンの最重点は工具材質（表面処理を含む）の改善と潤滑剤の開発にあった。

潤滑剤としては、固体潤滑剤である黒鉛をベースとして、これに油を混合したものが使われていた。黒鉛は、よい潤滑性能を示すが、管に浸炭を起こさせるといふ泣き所もあった。クランクプレス操業者にとっては、潤滑剤は最大の開発目標であり、雲母、珪藻土けいそうどから鉛屑のこくずに至るまで数多くの実験を繰り返しては、ことごとく失敗に終わっており、黒鉛以上のものは遂に発見できなかった。

4.3 ユジーン、セジュールネ法

昭和29年頃、フランスでユジーン、セジュールネ法と称するガラスを潤滑剤とする水圧押出技術が発明された。当時、増加するステンレス管の需要にも刺激され、日本でも昭和32年山陽特殊製鋼に始まり神鋼長府工場、住金(尼崎)、新日鐵(光)四社が相次いでこの方法の導入を行った。ガラスは常温では固体だが、高温になると粘稠な液体となるから摩擦抵抗の少ない液体潤滑が行える。さらに断熱性があるので、加工に数秒を要する水圧押出でも鋼の押出が可能となるのである。鋼の押出加工法としては、実に画期的な発明であった。

しかも、水圧プレスでは、押出容量にも、ストロークにも、大きな制限はないから2,000トン級から4,000~6,000トン級へと逐次大容量化し、管の製造範囲も次第に拡大をし

て行った。

しかしながら、クランクプレスにせよ、ユジーン法にせよ、押出加工という点では何の変わりもないからコストダウンの重点は、やはり潤滑性能の向上にあった。

多くの人々がガラスの成分や形状に数多くの改善を行ったが、その一例をあげてみよう。デュアルパッドと称するもので、ダイス潤滑に使用するガラスパッドを、成分の異なるガラスの二層とする。押出初期には、とけやすい低粘度ガラスが働き、押出中は強いガラス膜が働く様にしたものである。

筆者が体験した潤滑剤に関する素朴な昔話を2つ紹介しよう。

昭和31年頃、筆者はドイツのクランクプレス工場を初めて見学する機会が与えられた。先方には、私は招かれざる客であったらしいが、持参した当方の技術データを一たたき台として議論を行った。これにより双方大いに意気投合した後に工場を見せてもらうことができた。

懸案の潤滑剤を見せてもらうと同じ黒鉛でも、日本のとは少し、様子が違う。案内者の目を盗んで使用中の油でこねた黒鉛を一つかみ、一張羅の背広のポケットに押しこんだのである。その後の旅行の間、ポケットの汚れには大いに苦労したが、日本に持ち帰って調べると、それは粉状黒鉛、油以外に塩が入っていたのである。混合割合を適当に選ぶと、押出力の一割程度の減少が出来たし、浸炭の大幅な減少も認められて、大いに喜んだものである。

もう一つ昔話は、昭和33年頃、ユジーンセジュールネ、ライセンシー各社の見学会の時のことである。

オーストリアのある工場で、ガラス以外の何か、白い粉をピレット表面に散布しているのを見た。何かと聞いても、ノーコメント。まさか、青酸カリでもあるまいと思ひ、とっさに粉をつまんで口の中にほりこんだ。塩の味がした。ふと見ると同じことをやっているフランス人技術者がいた。お互いに塩を吐き出しながら顔を見合わせてニヤリと笑ったものである。

文献も少なく技術交流も、あまり歓迎されなかった当時としては、与えられた僅かなチャンスを活かして、必死の思いでノーハウを盗んだものである。

5 溶接鋼管

戦後20年間の我が国の溶接鋼管の歩みを一言で言うならば、戦前から先駆けていたアメリカの溶接技術を専ら習得しつつ、やがて昭和40年代に追い付き追い越すに到るまでの体力作りに、精魂を傾けた20年であったと思う。

この20年間の溶接管の主役は電縫鋼管である。昭和26年

に倍数サイクル法が導入され、昭和30年代後半に高周波法に転換して生産量と需要を大いに拡大していった。この時期に直接技術開発や製造を担当した馬場善祿氏（昭和30年住友金属工業㈱入社、和歌山製鉄所配属、元住金ステンレス鋼管㈱及び住金溶接工業㈱社長）に回想してもらった一文を次に載せる。

5.1 電縫管の揺籃期

電縫管の発端である低周波電気抵抗溶接管の歴史は古い。昭和9年に旧東洋鋼材（三機工業川崎）が、当時アメリカでも完全には成功していなかったJohonston式溶接（機上の固定トランス一摺動回転の電極輪）の特許とフォーミング・ロールの図面（4½”）とをRepublic Steel社の子会社から購入し、トランス以外の設備をすべて国産で賄いながら試作を始めたのが、我国の電縫管の草分けである。苦心惨憺のすえ、やっと目途のついた昭和12年、更に2”ミルを設置し、困窮した戦時下の諸事情のなかで、終戦直前の19年に、7千トンの年間生産量を挙げた。

戦後の昭和21年・22年、同社が戦中より発注したままとなっていた2”ミルを、中津と川崎とに各1基設置したのと相前後して、旧東京コンジット（東芝鋼管・現日鉄鋼管）が、東芝の初の国産機を2基設置した。（昭21-1½”、昭25-3½”）この1基目はJohonston式であったが、2基目はトランスと電極輪とが一体となった新しいYoder式であった、これと同様のものが、日本パイプ市川（昭26）及び日新パイプ（昭27）にも納入されていった。

ここまでの溶接電源は、すべて50%、60%の商用サイクルである。しかし既にアメリカでは、商用サイクルをMGによって3倍にアップして回転トランスに供給する倍数サイクルの新型溶接機が開発されていたので、この新鋭機をまず住友金属和歌山が導入し（昭26・3月、Yoder社、4½”）、続いて三機工業川崎（昭26・6月、Fusion社、3½”）と川崎製鉄西宮（昭27、同、同）も稼働に入った。この倍数サイクルの回転トランス型溶接機が、高周波の出現するまでの10年強の間、当時として最も信頼された溶接管製管法として君臨するのである。

昭和30年には、低周波溶接機の台数は、はや20基を超えるに到った。しかし一方では、ガス吹管による造管機（俗称ハーモニカ）も、まだ120基以上もあって健闘を続けていた。ガス溶接の速度を低周波の最高速度に劣らぬレベルにまで改善した日本パイプのごとき例もあった。

5.2 低周波溶接の苦勞

商用・倍数いずれのサイクルを問わず、数万アンペア以上の大電流を、電極輪から材料へ円滑に流すのが、低周波

の最大の苦心であった。電極輪の切削が、成形後の管の形状と合致せず、接触状態に不完全な箇所があれば、バーニングやアーキングと称する一種のスパーク現象が生じて、管も電極も肌荒れとなってしまう。肌荒れになれば、停機して電極輪を削り直さねばならぬ。電極輪は長く持って2時間、下手な切削だと数分も持たぬ。

電極と管との接触が最良でも、酸洗コイルに汚れやスケール残りがあれば、同様にバーニングが発生する。当時は、ルーズニングされたコイルをマストに吊って酸洗していたので、隙間の不十分な箇所に酸洗不良の残るのは、珍しくなかった。

ともかく、フォーミング・ロールの調整と電極の削り方とが、電縫管の製造の生命であって、工場の中で最も勘と腕の良い者が、この作業に従事した。電極輪を削ったあと、カーボン紙を紙にはさんで、電極と管との接触面積をしばしば調べたが、このような接触を通して流し得る電流密度の限界は、ほぼ200Amp/mm²であることが分った。この限界を突破するのに、どうすれば良いか、昭和30年頃の溶接管屋には、高周波の導入によって、この壁がいつも簡単に

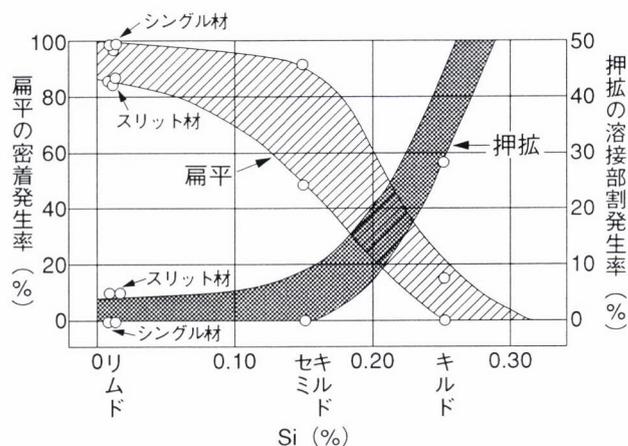


図4 電縫管の鋼質と実用試験結果（小径管）

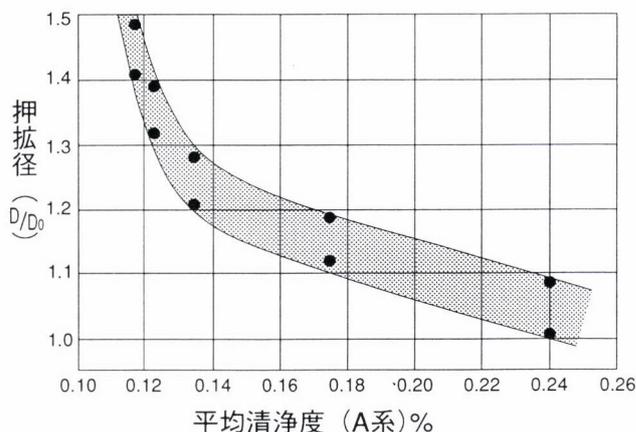


図5 電縫管の鋼質と押拡げ試験結果（小径管）

破れるとは夢想もできなかった。

また低周波溶接では、電流の方向の変わる点に、いわゆるStitchと称するミシンの縫目が必ず存在する。十分な溶接強度を得るためのStitchの間隔は、材質によって異なるけれども、2.5mmないし3.5mm以下に抑えねばならぬことを、多くの現場実験からつかんだのである。したがって、製管速度は60%で20%_{min}、180%でも前記の電流密度の限界があって、45%_{min}が当時の最高速度であった。

低周波溶接の基本的な弱点は、突き合わせのエッジに温度と圧力との鋭い傾斜の無いことである(図6参照)。低周波によって常に安定して溶接のできた材料と言えば、帯鋼エッジが純鉄に近い低炭素リムド鋼のシングル材ぐらいであった。これが、スリット材のRim-Core溶接やCore-Core溶接になると、現場の実用試験の成績にバラツキが出て困った。もちろん、当時の鋼塊の偏析には極端なものもあり、時には電極輪に巻き付くほどの二枚割れもあったほどである。鋼質と成品の実用試験の関係を図4、図5に示す。

5.3 中径管ミルとラインパイプの初期

倍数サイクルの溶接電源が定着した昭和30年代は、各社は中径ミルの建設に、しのぎをけずった時代である。昭和33年に三機工業川崎の12"Yoder(現新日鐵名古屋14")と日本特殊鋼管光の14"Yoder(八幡鋼管を経て現新日鐵光24")とが、まず稼働したのに続いて、昭和36年に住金和歌山の16"Etna(現24")がこれを追い、更に昭和39年にNKKの20"(現24")と川鉄知多の20"(現26")とが稼働し、次々と最大径を更新していった。なお、最後の2基の建設時には、高周波溶接機が間に合ったのである。

中径ミルの操業に大きく貢献したのは、輸出のラインパイプである。1件5千トンを超えるX46の受注の始まったのは、昭和37年頃からである。従来の国内品には無かった難しい超音波検査が規定され、多量の超音波不合格品を抱えて、関係者はその対策に奔走した。

低周波溶接の入熱量と突き合わせ形状との調整に連日連夜、苦闘を重ねたが好転されず、結局超音波検査に決定的に影響を与えるのは、アプセットのメタル・フローに沿って伸びた非金属介在物や、それが起点となったHook Crackであることが、現場に顕微鏡を持ち込んで、ミクロのサンプルを覗きまくった結果分かったのである。当時の、高MnのSiあるいはSi+Alのセミキルド鋼には、とりわけ延性の介在物がおびただしく、また低周波溶接ではアプセット量も巨大であったため、介在物による被害が格段と著しかった。

介在物の形態制御や清浄鋼の必要性などの鋼質改善、鉄鋼業のなかで最も早くから要望した背景には、低周波時

代におけるラインパイプの大量受注があったのである。

私が昭和40年の秋、世界で最も早くから電縫管のX52を手がけていたカナダのAlberta PhönixのEdmonton工場を訪問したとき、既に数年前より早々とサマツール社の高周波に切り替えたほか、ライン超音波の標準化、エンドレス製管、アプセットのミクロ管理等を徹底するのと平行して、材料メーカーへの強力な折衝を通して、良質の材料を入手する努力を続け、その結果、X52の通算の歩留が93%と、当方より約10%も高いのに感心させられたものである。

5.4 高周波溶接への転換

昭和33年頃、我々が知識の源泉として毎月読んでいたアメリカのWelding Journalに、ラジオ・サイクルの高周波抵抗溶接(サマツール社)や高周波誘導溶接の記事が載り出した。低周波溶接に手古ずっていた者にとって、地獄で仏に出会った感動であったことを、今も覚えている。

同じ頃、横須賀や尾鷲の、アメリカから輸入された大型の火力発電設備を見せてもらったとき、そのボイラー管に立派な電縫管が多く使われているのを知って、大ショックだった。

その後しばらくして日本では、まず高周波でなければ溶接不可能な非鉄管の製造に、三宝伸銅がこれを採用し、間もなくして昭和36年には、主として小径管を製造していた東洋鋼管、日本パイプ、丸一鋼管、東芝鋼管、松下電工等が、サマツールの高周波抵抗(VT60、VT140)あるいは国産の高周波誘導を導入し、速やかに成果を上げていった。

一部には、平滑な内面ビードを出すために、セレン整流のDC溶接を採用した東芝鋼管の例(昭36、Yoder社)もあったが、大容量の高周波電源が開発されると、高炉メーカーもようやくして腰を上げ、そして味をしめると急ピッチで低周波を高周波に切り替えていった。中には、新設の低周波ミルを、僅か1年未満で高周波に変えたところもあった。

昭和36年より設置し始めた高周波は、昭和39年末には実に67基となり、低周波の49基をはるかに凌駕した。低周波に切り替えることには若干ためらっていたガス溶接も、高周波には急速に転換し、昭和40年には遂に、ガス溶接は皆無となった。

5.5 高周波の勝利

低周波溶接の現場の苦労を、ほぼ一挙に解決してくれた高周波溶接への転換は、電縫管の全歴史60年の中で、最も画期的な革新である。高周波の特徴は、図6に示すように電流が突合わせエッジに集中することに尽きるのであるが、現場作業としては低周波時代に想像もできなかった利

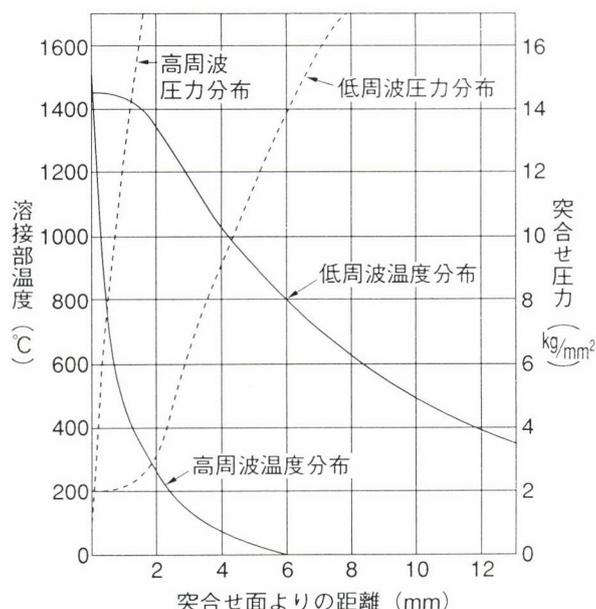


図6 電縫管の溶接時の温度・圧力の分布 (48.6×2.4、低炭素鋼)

点が多くあった。すなわち、

- (1) 材料の表面処理が不要である。
- (2) 溶接上の速度に制限がない。
- (3) 極めて広範囲の材質が溶接できる。
- (4) 極小径・厚肉・中大径を含めて、可能寸法範囲が広い。
- (5) 内外面ビードが小さく、特に内面ビードの切削が容易である。

高周波溶接によって、電縫管の信頼度が高まり、需要が拡大したために、低周波時代には全く手がけることのできなかった寸法と材質への挑戦が、新しく始まってゆくのである。この新しい闘いのなかで、最も難渋した問題は、小径高級管の内面ビード除去である。昭和38年頃より、3/4"の熱交チューブの輸出が始まったが、その内面の良品率が50%に達するまで、何ヶ月苦闘したことか。

昭和40年冬、ボイラー管やメカニカル管の高級品の製造で世界一を自他共に認めていたBabcock and WilcoxのAlliance工場を、許されて見学したとき、彼等の過去20年間、最も時間と人材とを投入してきたのは、内面のビード除去であることを聞き、またその立派な現物を見て、彼我の差を実感したものである。もちろん、溶接そのものの工夫にも学ぶべきことが多く、全数両管端より押抜け試験・扁平試験を余儀なくされていた当方との技術力の差に、歯ぎしりする思いであった。ちなみに、ボイラー管の通算歩留では、当方の75%にたいし、Allianceの85%と、10%の差があった。

高周波溶接によって、低周波の苦手とする厚肉の溶接が可能となり、また厚肉の新規需要が広く出てきたので、成

形ロールやシーム・アニーラー・冷却ゾーン等に特別の配慮を行った特殊電縫管ミルの計画が、この30年代末に検討された。まず、昭和41年に住金和歌山の6"ミルが稼働し、続いてNKK、川鉄、富士三機（現新日鐵名古屋）、新日鐵君津が、これを導入していった。

5.6 その他の溶接管

電縫管ミルの段取替回数を減らし、生産性を高める有力な方法として、溶接後にHot Stretch Reducerを設けたプロセスが、ドイツで開発され、昭和38年に富士三機名古屋、昭和39年に八幡鋼管光が、これを導入した。溶接管としてのコストと品質との両面を考慮して、Hot Stretch ReducerかAs Weldの多列化か、どちらが優利かは常に議論の対象となった。

ガス管・水道管等の需要の増大に対処したフレツムーン式連続鍛接管ミルが、戦後アメリカで開発され、まずNKKがこれを導入し（昭29）、そして10年後の昭和39年、Stretch Reducerをつけた鍛接管ミルが、住金和歌山およびNKK 2号機において稼働に入った。初めての鍛接管ミルを操業するにさいし、アメリカに実習に行った当時の工場長が、アメリカの作業員がサンドイッチを食べながらの完全な連続作業に面喰らったという、カルチャー・ショックもあった。

各種の溶接技術の開発を、古くから進めていたアメリカでは、戦前より大径管の製造法として、UOプレスとサブマージ・アーク溶接の基礎技術が確立されていた。我が国も、アーク溶接の大径ミルを、いつ設置するか、模索と学習の30年代であったが、NKKはいちはやく昭和35年に36" UO (Kaiser社) を導入し、続いて住金和歌山が昭和41年、連続成形一仮付の48"ミル (Torrance社) を導入した。高強度の中・大径ラインパイプは、電縫管からサブマージ溶接管に重点を移しながら、やがて、世界最初の酷寒向け長距離パイプラインとして脚光を浴びたアラスカのTAPS 48"、X60・X70、50万トンの全量を、日本ミルが欧米ミルを抑えて、昭和44年より生産に入るのである。このプロジェクトの後半には、昭和45年から稼働した新日鐵君津、NKK福山の56"UOも参加することになった。

上記のサブマージ・アーク溶接管以外に、スパイラル方式、3ロール・ベンダー方式、プレス・ベンド方式もあり、いずれも昭和20・30年代に完成された技術である。また、タングステン・イナートガス・アーク溶接によるステンレスやチタンの溶接管も、同時代に導入され、開発された技術であることを考えると、昭和20年・30年代は、現在の溶接管のすべての原型が出揃った意義深い時代であったのである。

6 冷間抽伸

6.1 抽伸初期の話

筆者が入社して実質的に作業についたのは住金尼崎の冷間抽伸工場であつた。工場は空襲に備えて全ての窓ガラスは黒く塗りつぶされ薄暗い工場の中で、鎖式抽伸機36チェーン、バッチ式焼鈍炉10基がずらりと並んでいた。係員として管理を見よう見まねで始めた。銅管の束が抽伸油にザブンと漬かってクレーンで抽伸機の傍らに運ばれてくる。道具出しと称する班長が寸法をノギスで測ってダイスとプラグを選んでそばに置く。作業員はその工具を使って管の外径を絞り肉厚を薄く抽伸する。これを繰返して所定の寸法に仕上げるのだが、気の弱い班長は断面減少率即ち荷重のかけ方を少なくする。すると引抜回数は増えるが、トラブルは少ない。気の強い班長は荷重を大きくとって引抜回数を減らす。しかしやりすぎると管の頭が切れたり、プラグを支える筈が飛んでしまったり、大きな振動音を出す不安定操業となる。そのころあいは難しい。抽伸中の管を手でさわって握れない位に熱いと我々係員は安堵する。湯気も出ないようでは荷が軽すぎる証拠である。とにかく20%以上のリダクション（減面率）をかけて欲しい。このリダクションをまず知らねばならない。そこで10cm位の円盤コロをダイスの入側と出側の管の上にチョンと置く。入側のコロが1回転した時に出側のコロが1,2回転していたらリダクションは20%となる。この二つの回転板を一つの板にセットし糸で回転を伝えその差を読み取るようにした。この考えは板の圧延時では当り前の事だが、当時の抽伸職場の新入社員にしては面白い考えだという事で、賞品をもらい特許も取ってくれた。しかし現場に持ち出してみたら、班長間で不評であまり使われなかった。

次の話は空引抽伸である。管の外径が小さくなると中にプラグを入れられないから空で外径のみ絞る。内面はフリーだから肉厚がどうなるかわからない。先輩に聞いても厚くなったり薄くなったりするもので班長が経験で道具を出しているという。これは技術としておかしな話だし、面白い研究テーマと考え、一人でデータを取り始めた。抽伸の前後の寸法とかけられたリダクションと使用されたダイスの形状を記録する。定時の勤務後に追跡測定して回り半年後に膨大なデータを紙にプロットして一つの傾向をつかんで非常に喜ばれた。その後若干の理屈をつけて日本金属学会で昭和21年秋と22年春に論文として発表させてもらった。図7にその傾向を示す。このデータは後に住金の岡本豊彦氏が研究所で精密試験を行い、昭和29年に大成発表している。

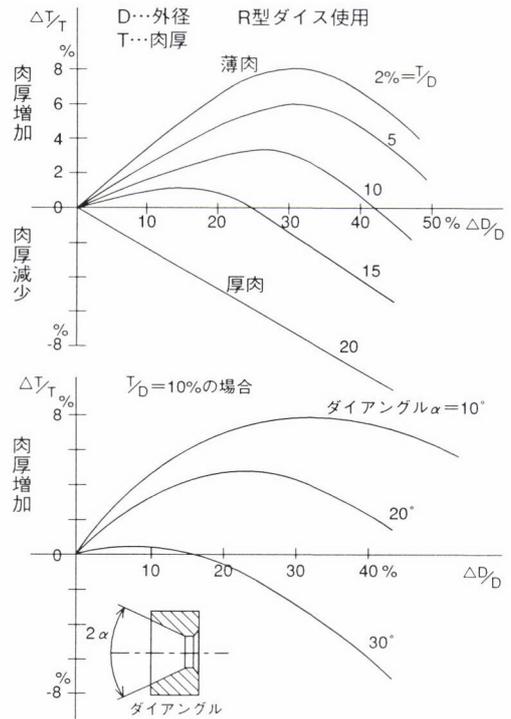


図7 鋼管空引における肉厚変化

6.2 製品・品種

以上は初期の抽伸スタートであるが、総体として冷間仕上鋼管は熱間製管された原管に冷間加工を加えて 1) 熱間では得られない寸法、2) 寸法精度向上、3) 表面グレード向上、4) 加工硬化特性利用等々が得られる特徴がある。この冷間加工の項を私の仕事を引き継いだ中村久司氏（昭和24年住友金属工業㈱入社、当時鋼管製造所勤務、元大阪鋼管専務）に書いてもらったものを半分に圧縮加筆して次に記す。

戦後は資材の欠乏から焼け残りや解体船舶内の鋼管を材料として引抜加工により造られた再生管が重宝された。当時報告されているだけでも40社以上がりロールメーカーとして存在しており生産量を見ると

昭和19年	23,910 ^T	昭和30年	28,213 ^T
20年	16,268 ^T	昭和35年	6,793 ^T
21年	12,272 ^T		

のように戦後の混乱期に健闘し、30年をピークにして復興と同時に主たる使命を終えた感じである。

復興の推移は熱間仕上管と似ている。先ず脚光をあびたものが蒸気機関車用煙管、水管。次いで船舶用缶管、自転車フレーム、自動車のバルブ・ロッカーシャフト等が主流となった。次に食糧増産用の肥料製造用高压管、熱交換器用として5%Cr鋼も手掛け、昭和26年頃からは高温高压用

ボイラー用の過熱器管等の大量需要に応じたものである。更に石油化学の花形ポリエチレン製造用の使用圧力2,000気圧の繰返し内圧のかかる超高压管の国産化に成功している。外径/内径比最大3という厚肉管で材質は高C—Cr—Mo鋼の油焼入れで最大外径90mm近く、しかも高压の繰返しに対する疲労破壊対策として内面疵の除去のため、内面研磨、内面鏡検査を行い当時の最高品質の要求に応えた。

昭和30年前半には東海村原子力発電研究用に細径ステンレス鋼管の試作納入に始まり、蒸気発生用給水加熱器管の製造も開始された。

またメカニカルチューブとしてはまず油圧シリンダー用高強度管に始まり自動車用メカや更に軸受用合金鋼鋼管も生産量を逐次伸ばしていった。これらの変遷に現場の係員は作業員としばしば居酒屋で身銭を切って飲みながらコミュニケーション向上にも対処したものである。

6.3 抽伸設備

鎖式抽伸設備の初期のものは引抜力 17^T 、引抜速度のM/分で回転する1本のチェーン毎に鋼管をダイスに通す型持ち役と、管をつかみチェーンにフックを引掛ける猫持ちと称するキャリッジ操作役の2人がついていた。かなりの多人数になる。改良はまずこの手作業を機械化する事から始まった。時経列別にみると

昭和25年頃：猫のリターンと管のつかみの自動化

動力源としてエヤーシリンダーとエヤーモーター採用

昭和32年 管の芯金挿入を効率化した引抜 25^T のドラム回転式採用

33年 引抜力 45^T シーソー型、速度15M/分出現

38年 3本引 35^T ドラム回転型速度30M/分DCモーター使用

43年 引抜力 135^T ドラム回転型シングルチェーン式

46年 5本引ダブルチェーン、ドラム式、速度60M/分

以上のように年毎に能率アップすると同時に設備は大型化したのは、米国ブローノックス社製の効果が大きい。また管端口絞もロータリースエージャーが開発され人力装作はなくなった。

これ以外に1パスの加工度(75%程度)の大きいコールドピルガー圧延機がドイツのマンネスマン・メーア社より昭和28年導入されステンレスや軸受鋼の加工に威力を発揮し、次いで肉厚加工を主としたソ連製HPTRが導入され原子力用管製造に大いに使われ出した。

6.4 工具・熱処理

終戦直後は工具は炭素工具鋼に硬質クローム鍍金したダイスとプラグが使われたが、昭和30年になるとタングステンカーバイトの超硬工具が広く使われるに至った。ダイスはテーパー型やR型を使い、プラグは専ら円筒型だが、小径長尺管に対しては

昭和34年頃 マンドレルドロー方式としてマンドレル

昭和39年頃 フローティングプラグ方式としてテーパー型プラグ

が使われた。

熱処理は抽伸のための軟化処理と最終製品のための熱処理とに分れるが、炉の形態は逐次大いに改善されている。その推移を見ると

昭和20年 石炭焚バッチ炉で鉄板の上に鋼管の束を乗せウインチで炉に押し込み引き出した。

昭和31年 台車炉採用

昭和32年 バレル炉、ローラーハース光輝焼鈍炉出現DXガス使用

昭和40年 雰囲気調節炉にNXガス使用

これらは全て合金鋼の需要増加で加工のための完全焼鈍や、クリーブ強度向上のための焼準一焼戻、または恒温焼鈍が必要となる外、給水加熱器用鋼管のように表面スケールをさけるために雰囲気調節技術が進歩した。

ステンレスに対しては従来バッチ炉で加熱後、一本ずつ水槽に入れて急冷していたがバレル炉が32年に導入されて以来連続的で且つ水冷作業も自動化された。

6.5 デスケールと油滑

デスケールとしては炭素鋼・合金鋼には現状通り稀硫酸を用い、ステンレスに対しては当初は硫酸と塩酸の逆王水型組成で行っていたが、昭和34年以降は弗酸を用いている。

抽伸の潤滑剤には管の表面を塩酸で塩化鉄被膜を作ったあと、乳化ソリュブル油に浸漬し、時には石灰を併用した。昭和30年に米国パーカーライジング社開発の燐酸被膜の上にステアリン酸系の金属石鹼をコーティングして現在に致っている。ただ機械構造用のように表面粗度を美しくする磨き引にはソリュブル油や直接オイルが使われた。

ステンレスに対しては当初は錆にくい材料を錆させようと工夫し、濃塩酸をふりかけ^{むしろ}覆って蒸して発錆させ、乳化油に石灰粉を内外面に付けて引抜いていた。昭和33年パーカー社開発の蔞酸塩被膜と金属石鹼の組合せによりスムーズな引抜が可能となった。この他パーカー法導入前には米国ハングスターファー社製の樹脂系被膜の上にCl—S

系の重合油を使って、急場を乗り越えたり苦勞の連続であった。

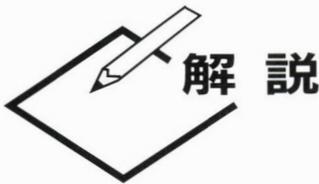
この外、精整設備、非破壊検査は冷間引抜高級品に対して精密なものが使われ出したが紙面の都合で記述は省略する。

おわりに

日本の鉄鋼製造技術は終戦直後から、技術導入—実機立ち上げ—改良—技術熟成—開発とつながって現在は世界のトップクラスを走っていると思う。その中の鋼管分野に焦

点を当て、昭和30年終り迄の技術変遷の状況を記述したのだが、その学術的な詳細は既に多くの論文があるのでなるべくさげ、編集委員会の要望に従い体験を通じて随想風にした積もりである。従って個人的な事が随所に出て来るのは致し方のない事であろう。ただ、当時の人々はみんな同じような想いで社会のため技術のために時には家庭を省りみず戦後の使命感にあふれて働いたと思う。本記事は短かい制限された紙面なので日本の鋼管界全体としては片手落ちの個所も多いと思われるが、同時代の人々が共感を感じ、また現在の若い人々が何かを汲んで戴ければ幸である。

(1997年7月11日受付)



製鋼における計測・制御技術

小西正躬 (株)神戸製鋼所 生産技術研究所 研究首席
Masami Konishi

和佐泰宏 (株)神戸製鋼所 生産技術研究所 主任研究員
Yasuhiro Wasa

Instrumentation and Control in Steel Making Process

1 はじめに

製鉄所では種々の計測・制御システムが介在して設備の自動運転や品質向上を支えている。中でも製鋼工程は下工程での品質を左右する重要なプロセスである。一貫製鉄所における製鋼工程は、高炉で生産される溶銑を脱炭処理して各種金属元素を調節して客先の要求に応じた特性を持った鋼を製造するものである。この工程は、極めて高温の操業であることから計測が困難なプロセスであるが、各種の開発により計測・制御が実施され品質制御が行われている。すなわち、所定の目標品質を得るために、溶鋼温度と溶鋼中の合金成分を計測しその変動を把握し制御する。高炉から供給される銑鉄は温度・成分といった特性のばらつきが避けられないため、計測値をもとに種々の副原料を投入して溶鋼の成分を調節する。その目的のため、各種の計測・制御がおこなわれている。

本稿ではこれまでの公表文献や、当社での事例を引用し

つつ製鋼における計測・制御技術の現状と課題の一端を紹介する。

2 製鋼における計測技術

転炉等、製鋼工程の計測は温度計測と溶鋼成分の分析が主たるものである。以下では紙面の都合上、温度計測については省略し、近年関心の高い溶鋼成分の迅速分析に的を絞って最近の技術を紹介する。

2.1 迅速分析の目的

製鋼プロセスの高精度化、低コスト化を実現するために、溶鋼成分の分析を迅速に行うことが要求されている。現状、一般的に行われている成分分析では、溶鋼をサンプリングし、凝固、研磨した後放電発光を分光器で観測し、その発光スペクトル強度から成分毎の検量線による定量化を行っている。この方法を用いると、ほとんどの金属元素が分析

表1 溶鋼成分迅速分析法の分類

分類	概要	励起方法	特徴	課題	開発・導入企業例
直接発光	外部励起源の作用により溶鋼表面を励起発光させその光を用いて分光分析する	酸素ガス(火点)	・湯面変動に比較的強い ・測定距離を大きくできる	・分析可能元素種に制限 ・短波長側紫外光の制限	新日鐵5)
		レーザー	・分析可能元素種が比較的多数 ・測定距離を比較的大	・湯面変動に弱い ・短波長側紫外光の制限	住金6)、川鉄7,8) Krupp 9,10)
		放電	・分析可能元素種が多い	・測定距離が短い ・湯面変動に弱い ・短波長側紫外光の制限	新日鐵11)、 神鋼12)
ガス分析	溶鋼成分を含むガスを採取しガス分析して成分量を測定する。	塩素ガス	・分析は既存装置が利用可能 ・多元素が分析可能	・プローブの耐久性	NKK13)
		水素	・溶鋼中の水素成分を測定	・浸漬ツブの消耗 ・水素のみ	新日鐵14)、住金15) 神鋼16)
		排ガス ガスト	・Mn、Oなどが測定可能	・成分が限定される	新日鐵17)、NKK18)
起電力	溶鋼中の成分と電気反応する電極を浸漬し成分に応じた起電力を測定する。		・Si、Mnが測定可能	・成分が限定される ・浸漬電極の消耗	日新製鋼19,20)、 新日鐵21)、NKK22)
微粒子発生+ICP	外部励起源の作用により溶鋼から微粉体(ガス)を発生し外部分析器(ICP)へガス搬送し定量分析する。	不活性ガス	・分析は既存装置が利用可能 ・湯面変動に強い	・ガス搬送中の汚染 ・搬送遅れ ・分析値の代表性	新日鐵23)
		レーザー	・分析は既存装置が利用可能 ・湯面変動に比較的強い	・不活性ガス法と同じ	NKK24)
		放電	・分析は既存装置が利用可能	・不活性ガス法と同じ ・湯面変動に弱い	新日鐵25)

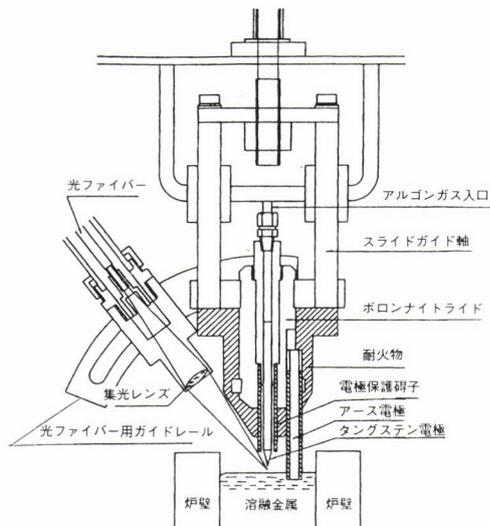


図1 放電による直接発光法¹²⁾

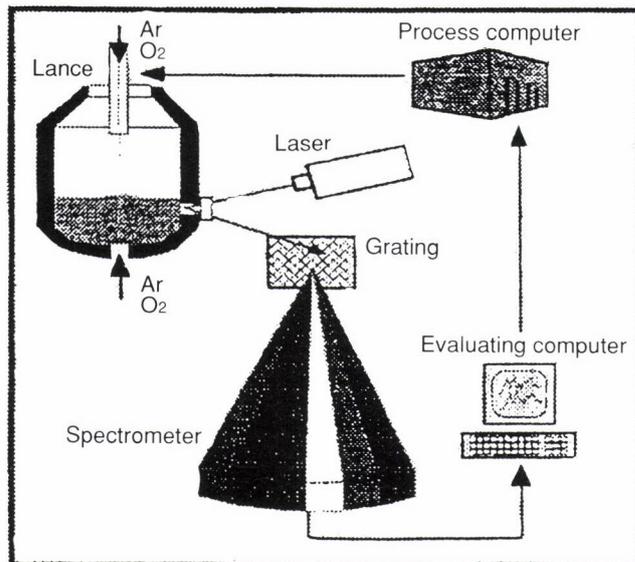


図3 レーザ励起法による成分分析⁴⁾

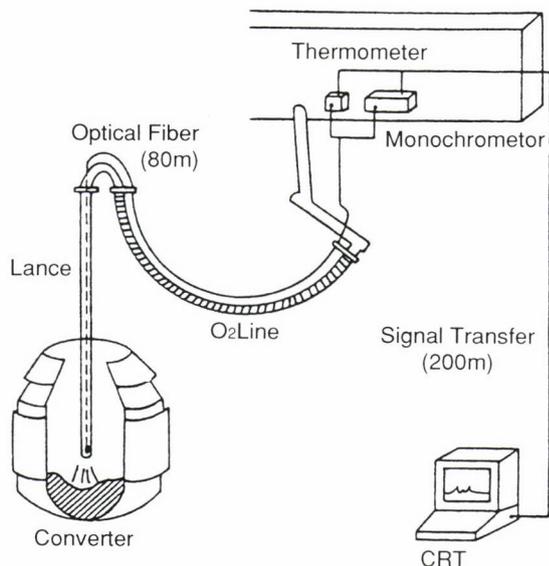


図2 火点法による成分分析⁵⁾

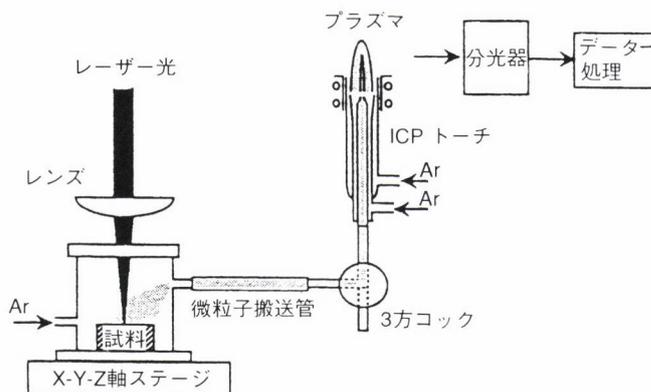


図4 レーザ ICP法による成分分析²⁴⁾

可能である。しかし、オンサイトで分析するなどの改善が進められていても、なお1回の分析に数分の時間を必要とする。したがって、溶鋼の迅速分析が実現できれば、成分調整のフィードバック制御による高精度化や、耐火物の損耗軽減によるコストダウンなど波及効果は大きい。

2.2 溶鋼成分迅速分析技術の開発状況

溶鋼迅速分析の技術開発の歴史は古く、多くの報告がある¹⁻⁴⁾。これらの報告から、各社が開発してきた主な溶鋼成分迅速分析法をまとめたものが表1である。以下でその内容について解説する。

表1に示すように、当初は直接発光法が開発されてきた。たとえば、図1に示すような電極と溶鋼間でスパーク放電させ、その発光を光ファイバーで分光器まで導光し分析す

る方法が研究されたが、実用化には至っていない。これは、溶鋼表面が揺動するとともにスラグで覆われているという事情から、十分な精度を確保するのが困難なためである。また、溶鋼に浸漬する放電部分の損傷が激しくランニングコストが高くなる問題点もある。

さらに、分析に重要な260nm程度以下の短波長での軽元素の発光スペクトルが光ファイバーでの導光では減衰してしまい分析できないことも問題である¹⁾。直接発光法の中で実用化またはそれに近いものとしては、転炉において酸素吹付点(火点)での発光を光ファイバーで導光し、FeとMn、Crの発光スペクトルを分光分析してMn、Cr濃度を測定する方法(図2)がある⁵⁾。

さらに、スラグの影響を受けないために転炉側壁に穴を開けアルゴンガスで溶鋼表面を保ちながら大パワーYAGレーザを照射し、そのときの発光を分析する方法(図3)がある^{9,10)}。この場合、装置が非常に大がかりになるとともに、溶鋼面の変動を抑えないと発光スペクトルが大きく変

動する問題点がある。以上のように、直接発光は原理的には理想ではあるが、精度、安定性やコスト面で問題がある。

分析元素は限定されるが、ガス分析の一部では実用化が進んでいる。転炉の排ガスやダストを分析して溶鋼成分を推定する方法や、溶鋼中に塩素ガスを流し溶鋼成分を塩化物ガスとして取出し分析する方法¹³⁾、またガス中に溶鋼の水素成分を取出して濃度分析する方法が開発され実用化されている¹⁴⁻¹⁶⁾。

また、Si、Mnに限定されるが、電極を溶鋼中に浸漬し、起電力を測定して成分濃度を分析する手法もある。幅広い元素を分析できる方法として、溶鋼中から溶鋼成分を代表した微粒子を発生させ、不活性ガスの形で搬送し、分析技術として確立しているICP(Inductive Coupled Plasma)発光分析装置に導入して、成分分析する手法が開発されつつある。微粒子の発生方法として、溶鋼中に不活性ガスをバブリングして発生させたり、図4に示したように大パワーレーザを照射してアブレーションにより微粒子を発生させる方法²⁴⁾や、放電による方法がある²⁵⁾。成分分析はICP分析装置でできるため、安定した分析が可能であるが、いかに溶鋼成分を代表する微粒子を発生させるかが鍵になる。また、ICP装置が離れている場合、搬送に要する時間や搬送路中での微粒子の汚染の問題が考えられる。

2.3 溶鋼成分迅速分析の今後の課題

過去、様々な迅速分析技術が開発されてきたが一部を除いて実用化されている技術は少ない。このような状況であるが、たとえばレーザ励起ICP法が鋼板を対象に実用化されつつあり、溶鋼に対する本手法の適用が期待される。現在の放電発光分析の代替として溶鋼を対象にするのは課題が大きすぎるので、たとえば多少精度は劣るが連続オンライン分析可能という利点を生かして、従来の分析法を補完する分析手法というような位置づけでの技術開発が必要である。

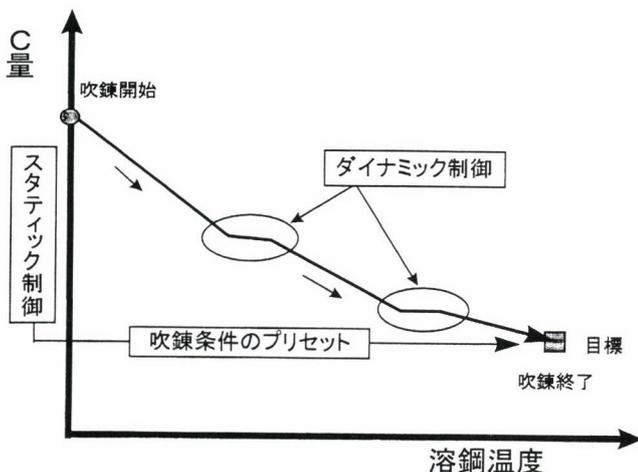


図5 ダイナミック制御とスタティック制御

3 製鋼における制御技術

3.1 転炉吹錬における温度・成分制御

転炉に溶銑が注入された後、酸素を溶鋼に吹き付けることによる脱炭がおこなわれる。この際、事前に成分と温度の調整を目的として副原料鉱石が挿入される。転炉において吹錬開始の前に総送酸素量と挿入副原料量を計算し設定する制御を、吹錬中の温度・成分の動的制御と対比してスタティック制御と呼ぶ。

総送酸素量は吹錬時間に対応し、投入副原料量が吹錬中の脱炭反応や吹錬終了後の溶鋼中の各種合金成分の濃度に関連する。一方、吹錬途中では溶鋼温度と成分を計測して当初の予定値と比較し誤差を補正するための再調整を行う。吹錬途中で行われるこの操作はダイナミック制御と呼ばれる。スタティック制御とダイナミック制御の関係は、図5のようである。本稿では紙面の関係からスタティック制御に的を絞って紹介する。ダイナミック制御については文献²⁶⁾を参照されたい。

3.2 スタティック制御による溶鋼の温度・成分調整

転炉での温度および合金成分の調整のための制御手段は総送酸素量と副原料投入量である。鉄鉱石と石灰石および蠟石等の副原料は溶鋼の温度および、脱炭、脱りんといった成分濃度の調節に用いられる。転炉での吹き止め時の目標温度を T 、各成分元素の目標値を C_j ($j = 1, m$) とする。これを実現するための操作量として、総酸素流量を y_1 、副原料の投入量を x_i ($i = 1, n$) とすると、一般に

$$(T, C_j)^t = F(y_1, x_i) \dots \dots \dots (1)$$

の関係が成り立つ。ここで、右辺の F は炉内の反応式から導かれる $(m+1)$ 次元の非線形関数で、操作量 (y_1, x_i) と吹き止め時での炉変数 (T, C_j) の関係を表す。吹き止め時の炉変数 T および C_j を、それぞれの目標値 T_f, C_{fj} に制御するための操作量 y_1, x_i を求めるには、(1)式の逆関数 F^{-1} を用いて

$$(y_1, x_i)^t = F^{-1}(T_f, C_{fj}) \dots \dots \dots (2)$$

とすればよい。しかし、(1)式の関数 F の次数が $(m+1)$ であるのに対し、変数(求める操作量の数)は $(n+1)$ となり、一般には式の次数と変数の数は等しくならず、非線形関数 F の逆関数は解析的には求まらない。したがって、実用上は非線形計画法を援用して操作変数を求めている。すなわち、(1)式を制約条件にしつつ、適当な評価関数 $J(T, C_j)$ を定義してこれを最大または、最小にする操作変数 (y_1, x_i) を求めるというものである。転炉の操業においては、副原料の投入に関してはフレコンと呼ばれる袋単位となるものもあるため、操作変数のいくつかは整数となる。この場

合、上記最適化は混合整数計画問題となって計算が一層複雑となってくる。

実際には、以下に示すように2段階に分けて操作量を決定している場合が多い。

1) 総酸素流量と副原料鉄鉱石量の計算

第1次近似として(1)式を総酸素流量 y_1 と副原料鉄鉱石 x_1 のみの関係式と考えると、(2)式は2つの式から2つの未知変数 y_1 、 x_1 を求める問題となり簡単に解けて、総酸素流量と副原料鉄鉱石量を求めることができる。

2) 成分調整のための副原料(焼石灰、蠟石)投入量の計算

溶銑中の過剰なP成分等を除去する目的で投入される焼石灰(x_2)、蠟石(x_3)の投入量計算を例に非線形計画法の適用を紹介する。成分元素 C_2 (P)の分配モデルとして、物理的な構成式をベースにした次式が与えられている。

$$C_2 = f(x_2, x_3) \dots\dots\dots (3)$$

成分調整の目的は、(3)式の C_2 がその目標値 C_{f2} に一致するような副原料 x_2 および、 x_3 の値を決定する事である。(3)式の左辺の値 C_{f2} を与えた場合、(3)式を満たす非負の解(x_2, x_3)は無数に選べるため、それらの間に何らかの関係を規定する必要がある。ここでは、副原料の投入コストを最小に抑えることを目的とする。すなわち、(3)式の等式制約の下で、コスト関数

$$J(x_2, x_3) = a \cdot x_2 + b \cdot x_3 \dots\dots\dots (4)$$

を最小にする変数 x_2 および、 x_3 を求める問題を解けばよい。ここで、 a および b は焼石灰と蠟石のコスト係数である。さて、実炉操業においては焼石灰や蠟石の投入によるスラグの量や塩基度の変化に着目し、それらが良好なスラグ形成や吹錬中のスロッピング抑制の条件を満足するよう留意する必要がある。

これらの制約は

スラグ制約

$$SLG(x_2, x_3) > S_1 \dots\dots\dots (5)$$

スロッピング制約

$$SLP(x_2, x_3) < S_2 \dots\dots\dots (6)$$

のように表される。なお、ここで S_1 と S_2 は操業から定まる制約値である。

結局、副原料の決定のためには、(3)式の等式条件と、(5)、(6)式の不等式条件下で(2)式のコスト関数を最小にする変数 x_2 と x_3 が求まれば良いわけである。大森らは(3)式から(6)式までを総合した新しい非線形の評価関数 J^* を以下のように定義して、これを最小化する方法を提案している²⁷⁾。すなわち、

$$J^*(x_2, x_3) = J(x_2, x_3) + w_1 \cdot (C_{f2} - f(x_2, x_3))^2$$

$$-w_2 \cdot \exp(S_1 - SLG(x_2, x_3)) + w_3 \cdot \exp(S_2 - SLP(x_2, x_3)) \dots\dots\dots (7)$$

を最小にするような変数 x_2 と x_3 を非線形最適化法により求めるものである。ここで、 w_1 から w_3 はコストや各操業制約を評価関数に反映させるための非負の重み係数をあらわす。なお、この事例では非線形最適化法としてフレキシブルポリヘドロン法を用いている²⁸⁾。

3.4 2次精錬開始前の合金鉄投入制御

2次精錬開始前にMn、Si、Cr、C等の各元素の成分調整のために各種の合金鉄を混合投入する。各合金鉄 k に含まれる元素 l の構成比を γ_{lk} 、各合金鉄の投入量を z_k とすると、混合投入後の各元素の成分 s_l は

$$s_l = \sum_{k=1}^N (\gamma_{lk} \cdot z_k) + (\text{吹止成分推定値}) \dots\dots (8)$$

となる。また、この合金鉄投入のコスト I は各合金鉄の単価 p_k と投入量 z_k の積和として計算できる。すなわち、

$$I = \sum_{k=1}^N (p_k \cdot z_k) \dots\dots\dots (9)$$

である。基本的には(8)式の s_l がその目標値に一致するとの制約条件を満たしつつ、(9)式のコストを最小にする合金投入量 z_k ($k=1, N$)を線形計画法を用いて求めることになる。合金投入が袋(フレコン)単位のものがあり、その合金に対応する投入量 z_k は整数変数となるため混合整数計画問題となる。その場合は分枝限定法を用いて解を求めることになる。投入コストについてあらかじめ予算値があり、それを極力守りたいような場合には、大塚らが提案している目的計画法を援用することになる^{29,30)}。なお、ここでの記述は簡略化しているが、実際の運用に際しては(8)式の条件以外に、投入ホッパーの重量制約、投入に伴うB等の不純物ピックアップ制約等が満たされる必要があり、これらの制約をも考慮しつつ投入量 z_k を決定する必要がある。

4 おわりに

本稿では、転炉での精錬工程における計測・制御技術の一端を紹介した。計測技術に関しては、溶鋼の成分分析的を絞って非接触迅速測定技術の現状を概説した。現在試験的に行われている溶鋼成分の迅速分析が高精度で実用化されれば、吹錬中のダイナミック制御のための数学モデルも精度良く構築でき、現代制御理論の適用も可能となるであろう。スタティック制御については、本稿で述べたような多変数の連立式を満たしつつ、各種の制約条件の下に特定の評価関数を最適化する形が定着し、人間では出来ない多くの因子を考慮した制御がコンピュータの力で実現し

ている。制御に用いられている数学モデルについては、炉操業の進行に伴う炉の特性変化に追従するよう学習する仕組みが準備されているが、完全なものとは言えず、今後の開発課題である。

製鋼工程においても、今後他分野の新しい知見も取り入れ、より高度な計測・制御技術を構築することが求められており、製鋼技術者と計測・制御技術者が相互啓発し連携を深める必要がある。

参考文献

- 1) 石橋耀一, 岩田英夫: 鉄と鋼, 77 (1991), 46.
- 2) 小野昭絃: 鉄と鋼, 77 (1991), 1809.
- 3) 小野昭絃: 分析化学, 41 (1992), 289.
- 4) 千葉光一, 小野昭絃: 材料とプロセス, 8 (1995), 826.
- 5) 千葉光一, 小野昭絃, 佐伯正夫: 分析化学, 37 (1988), 365.
- 6) 本田達郎, 田村洋一, 山本俊行, 古賀隆治: 材料とプロセス, 5 (1992), 445.
- 7) 角山浩三, 谷本亘, 久田秀雄, 浅川久夫: 鉄と鋼, 71 (1985), A133.
- 8) 谷本亘, 山本公, 角山浩三: 川崎製鉄技報, 21 (1989) 2, 100.
- 9) C. J. Lorenzen, C. Carlhoff, U. Hahn and M. Jogwich: J. of Analytical Atomic Spectrometry, 7 (1992), 1029.
- 10) C. Carlhoff and S. Kirchoff: Laser und Optoelektronik, 23 (1991) 4, 50.
- 11) 小野昭絃, 佐伯正夫: 鉄と鋼, 67 (1981), S403.
- 12) 野々村英造, 小谷直美, 徳田利幸, 成田貴一, 吉田康夫, 矢場田武: 鉄と鋼, 71 (1985), A125.
- 13) 秋吉孝則, 高橋隆昌, 近藤隆明: 分析化学, 38 (1989), 486.
- 14) 早川泰弘, 小野昭絃, 妹尾健吾, 務川進: 分析化学, 39 (1990), 617.
- 15) 大塚正俊, 中川敬太, 朱宮徹, 山田統明, 人見康雄, 永幡勉: 材料とプロセス, 7 (1994), 1116.
- 16) 瀬村康一郎, 松尾勝良, 中島慎一, 西口克茂, 高橋正光: 材料とプロセス, 7 (1994), 244.
- 17) 金本通隆, 岡島正樹, 山根博史, 山内雅夫: 鉄と鋼, 76 (1990), 1964.
- 18) 辻猛志, 望月正, 石橋耀一, 郡司直樹, 秋吉孝則, 村本靖徳: 材料とプロセス, 3 (1990), 599.
- 19) 岩瀬正則, 北口仁, 一瀬英爾, 中村一, 森谷尚玄, 丸橋茂昭: 鉄と鋼, 71 (1985), S1595.
- 20) 岩瀬正則, 北口仁, 一瀬英爾, 中村一, 森谷尚玄, 丸橋茂昭: 鉄と鋼, 71 (1985), S1594.
- 21) 米澤公敏, 原田俊哉, 田淵敏, 高本久, 小倉利弘, 藤原龍次: 鉄と鋼, 78 (1992), 74.
- 22) 鷺見郁宏, 高岡利夫, 菊池吉輝, 古田周良, 長塚利男, 雀部実: 材料とプロセス, 5 (1992), 1010.
- 23) 小野昭絃, 千葉光一, 佐伯正夫, 仁部晴美, 笠井茂夫: 鉄と鋼, 71 (1985), S1210.
- 24) 望月正: 鉄と鋼, 79 (1993), N783.
- 25) 早川泰弘, 小野昭絃, 辻野良二, 中島潤二, 仁部晴美: 材料とプロセス, 2 (1989), 153.
- 26) 山名寿: 鉄と鋼, 81 (1995), 301.
- 27) 大森知美, 西野都, 北村章, 木村世意, 瀬村康一郎, 三角龍平: 材料とプロセス, 10 (1997), 1009.
- 28) D. M. Himmelblau: Applied Nonlinear Programming, McGRAW-HILL, (1972), 148.
- 29) 大塚喜久, 瀬村康一郎: 神戸製鋼技報, 46 (1996) 2, 19.
- 30) 大森知美, 大塚喜久, 岩谷敏治, 瀬村康一郎: 第41回システム制御情報学会講演論文集, (1997), 123.

(1997年10月7日受付)

本会情報一覧

記事内容	掲載号
第83回通常総会開催案内	本号130頁
第135回春季講演大会 懇親会のお知らせ	本号130頁
第167・168回西山記念技術講座「伸びゆく薄鋼板/表面処理鋼板」のお知らせ	本号131頁
論文誌投稿規程改訂のお知らせ	本号132頁
本会会員への大学研究支援設備紹介のお知らせ	本号132頁
ISS主催行事予定	本号133頁
公的資金による提案公募型研究開発推進制度等のご案内	本号134頁
切削・切断フォーラム講演討論会および見学会開催案内	本号135頁
シンポジウム「薄板エコプロセスの現状と課題」開催案内	本号135頁
「ステンレス鋼の成形性と利用技術」自主フォーラム研究会開催案内	本号136頁
第35回白石記念講座「地球環境・地域環境問題と鉄鋼業」開催のお知らせ	1号54頁
第4回「次世代鉄鋼奨学助成(1999年度から交付)」の募集案内	1号55頁
セミナー「鉄鋼プロセスにおける移動現象とその右脳理解」開催案内	1号56頁
「鉄と鋼」特集号「評価・分析・解析」原稿募集のご案内	1号57頁
課題抽出ワーキンググループ活動紹介	1号57頁
計測・制御・システム工学部会フォーラムのご案内	12号895頁
講演大会参加方法のご案内	11号834頁
第13回理工学系学生のための研究所・製鉄所見学会および第2回学生セミナーのお知らせ	11号837頁

学会部門

公的資金による提案公募型研究開発推進制度等のご案内

科学技術基本法にもとづき、研究開発基盤の整備・充実、研究開発投資の拡充に必要な施策として、平成8年度より科学技術庁、通産省などから新たな研究開発推進制度等が導入されています。それらの公的資金による提案公募型研究開発推進制度等の内、鉄鋼協会と関連のあるものを以下に紹介します。現在、このような公的資金を利用し、鉄鋼協会内にて4つの研究プロジェクトチームが活発な活動を展開しています。会員からの積極的な提案をお願いします。

1. 科学技術庁

1) 科学振興調整費

研究領域	物質・材料、ライフサイエンス、地球・環境 等
予算	約260億円/年 1～5億円/件・年
研究期間	第1期 3年 第2期 2年
採択件数	6～8件/年
応募時期	10月初旬

2) 戦略的基礎研究推進事業

研究領域	環境低負荷型の社会システム、極限環境状態における現象、極微細領域の現象 等
予算	約250億円/年 ～2億円/件・年
研究期間	Max. 3年
採択件数	50件/年
応募時期	6月下旬

2. 通産省

1) 大学連携産業科学技術研究開発プロジェクト

大学等に存在する産業化の芽となる知見等を発掘し、産業化につなげていくため、大学を軸とした民間企業との連携による研究開発を支援する。

予算	約20億円/年
対象者	大学と産業界等の研究者
研究期間	5年以内

関連学協会情報

原子力構造機器の材料、設計、施工、
検査に関する講習会

1. 日本溶接協会
2. 1998年2月9日(月), 10日(火)
10:00~17:00
3. 化学会館ホール (お茶の水)
4. 日本溶接協会 原子力研究委員会
〒101-0025 東京都千代田区神田
佐久間町1-11
Tel.03-3257-1521 Fax.03-3255-5196

温度計測基礎講座

1. 計測自動制御学会
2. 1998年2月12日(木)
3. 弘済会館 東京都千代田区麴町5-1
Tel.03-5276-0333
4. 計測自動制御学会
〒113 東京都文京区本郷1-35-28-303
Tel.03-3814-4121 Fax.03-3814-4699

第53回シンポジウム「どこまで進む自動車のアルミ化
~軽量化のためのアルミニウム材料と加工技術の進展」

1. 軽金属学会
2. 1998年3月9日(月)10:00~16:30
3. 品川区立総合区民会館“きゅりあん”
6階大会議室 東京都品川区東大井
5-18-1
4. 軽金属学会
〒103-0027 東京都中央区日本橋2-1-3
日本橋朝日生命館
Tel.03-3275-3688 Fax.03-3213-2918

行事等予定

太字は本会主催の行事

開催期日	行事(開催地)	締切	掲載号及び頁
1998年			
2月 9,10日	原子力構造機器の材料、設計、施工、検査に関する講習会(東京)		本号138頁
12日	温度計測基礎講座(東京)		本号138頁
19,20日	HPI技術セミナー第21回「石油等貯槽技術基準と安全性」(東京)		12号901頁
25日	第35回白石記念講座「地球環境・地域環境問題と鉄鋼業」(東京)		1号54頁
3月 4~6日	第2回学生セミナー(知多)	1998/1/19	11号838頁
6日	東海支部 第24回若手材料研究会「半導体・セラミックスと環境」(名古屋)		本号136頁
6,10~12日	第13回理工学系学生のための研究所・製鉄所見学会	1998/1/19	11号837頁
6~16日	学生会員向け'98年カナダの大学・研究所・鉄鋼会社めぐり	1997/12/25	12号894頁
9日	第53回シンポジウム「どこまで進む自動車のアルミ化~軽量化のためのアルミニウム材料と加工技術の進展」(東京)		本号138頁
10日	東海支部 総会・湯川記念講演会(名古屋)		本号137頁
13日	第167回西山記念技術講座「伸びゆく薄鋼板/表面処理鋼板」(東京)		本号131頁
16日	第14回塗料・塗装研究発表会(東京)	1997/10/20	10号771頁
17~19日	第27回FRPシンポジウム(京都)		12号901頁
18日	切削・切断フォーラム講演討論会・見学会(神奈川)	1998/3/6	本号135頁
20日	第168回西山記念技術講座「伸びゆく薄鋼板/表面処理鋼板」(神戸)		本号131頁
20日	九州支部 総会・湯川記念講演会・講演討論会(福岡)		本号137頁
31日	「ステンレス鋼の成形性と利用技術」自主フォーラム研究会(東京)		本号136頁
4月 1~3日	第135回春季講演大会(東京)	1998/1/8	11号831頁
1日	第83回通常総会(東京)		本号130頁
1日	第135回春季講演大会懇親会(東京)	1998/3/20	本号130頁
2日	シンポジウム「薄板エコプロセスの現状と課題」(東京)		本号135頁
5月 13~15日	平成10年度(第29回)塑性加工春季講演会(大阪)		1号58頁
21~23日	表面技術総合展-METEC'98-(東京)		1号58頁
26~28日	第3回日本計算工学会講習会(東京)		1号58頁
6月 23~25日	第10回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム(蔵王)		1号58頁
7月 16,17日	第14回海洋工学シンポジウム-海洋新世紀 夢から実現へ-(東京)		1号58頁
9月 28~30日	第136回秋季講演大会(愛媛)		
11月 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
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
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

編集後記

昨年の第32回東京モーターショーを見学し、改めて自動車と鉄との関係が深いという認識を持ちました。車のスタイルはその時代を反映しています。10年前の車のスタイルは、もうクラシックカーの様相を呈しています。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—技術編」にみるように、現在主流の流線型のスタイルの車が製造出来るのも、鉄の品質が向上し、思いのままに曲げたり、プレスしたり出来るようになったためです。車の創世期のスタイルは、鉄板を曲げただけの単純なものでした。時代を追う毎に二次元から三次元の形状に変わっています。この変化で車の受ける空気抵抗係数は20年前と比べ、約1/2

と大幅に低減し、燃費の削減に大いに貢献しています。一時期、レーシングカーといった特殊な車のみを採用されていたスタイルが一般車にも普及したのも、高品質な鉄が安く製造出来るようになったためです。

新たな時代要求に対し、調和のとれた技術を開発するに必要な、最先端の技術、先人の知恵、他業界の技術開発状況、計測等の基礎技術の紹介など、鉄に関する情報発信のマザー誌として、鉄に関する情報をいろんな角度からお届けするのが編集委員の役目であり、いま以上に読みやすく、役に立つ情報誌に読者の皆様と一緒に育てていきたいと思っています。(T.U.)

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 石井 邦宜 (北海道大学)	梅本 実 (豊橋技術科学大学)	大河内春乃 (東京理科大学)
上村 正 (いすゞ自動車(株))	川田 豊 (株神戸製鋼所)	北村 高士
久保田 猛 (新日本製鐵(株))	小林 正人 (株日本鉄鋼連盟)	今野 美博 (住友金属工業(株))
下川 成海 (株日本鉄鋼協会)	手塚 誠 (株日本鉄鋼協会)	成島 尚之 (東北大学)
古田 修 (愛知製鋼(株))	丸山 俊夫 (東京工業大学)	柳 謙一 (三菱重工業(株))
山下 孝子 (川崎製鉄(株))		

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

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

1996年5月10日第三種郵便物認可 1998年2月1日印刷納本・発行 (毎月1回1日発行)

編集兼発行人 東京都千代田区大手町1-9-4 経団連会館内 内仲康夫

印刷人/印刷所 東京都文京区白山1-33-15 (株)トライ

発行所 社団法人日本鉄鋼協会 〒100-0004 東京都千代田区大手町1-9-4 経団連会館3階

TEL: 総合企画事務局: 03-3279-6021(代)

学会部門事務局: 03-3279-6022(代)

生産技術部門事務局: 03-3279-6023(代)

FAX: 03-3245-1355(共通)

郵便振替 口座東京 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 001-1-508-750-8400 FAX 001-1-508-750-4744

Institute for Scientific Information

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

表紙デザイン 出澤 由野

くらむ Vol.3 No.2 広告目次

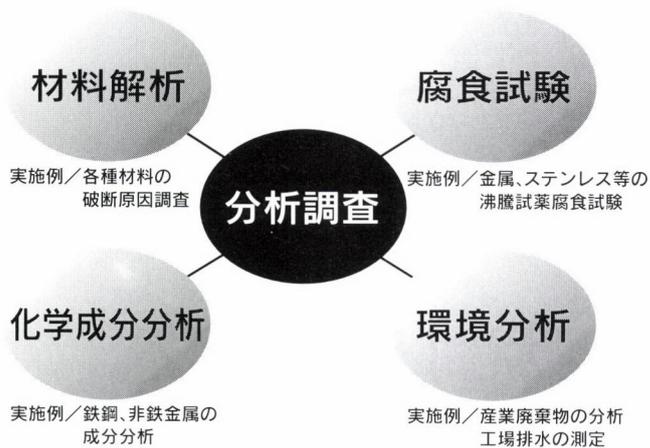
表2 住友金属テクノロジー(株) 試験分析サービス	後1 本誌広告目次 (株)大同分析リサーチ 試験分析サービス	後2 (株)協会通信社 広告案内
前1 (株)トライメート 厚板切断火口	2 耐火物技術協会 書籍	表3 ジャパンマシナリー(株) レーザー速度計
前2 テイサン(株) エア・リキード		表4 日本アナリスト(株) 炭素分析装置

本誌広告取扱 (株)協会通信社 TEL.03-3571-8291 / FAX.03-3574-1467 / (株)共栄通信社 TEL.03-3572-3381 / FAX.03-3572-3590 / (株)スノウ TEL.03-3257-9565 / FAX.03-3257-9568

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

— 80年の歴史と実績 —
大同特殊鋼グループ

プロの目でお応えします。



大同特殊鋼で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します。

大同特殊鋼グループの総合試験分析研究会社
 **株式会社 大同分析リサーチ**
 DAIDO BUNSEKI RESEARCH, INC. ; DBR
 〒457-8545 名古屋市中区大同町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
 E-MAIL:jshimogo@dbr.daido.co.jp

好評発売中!!

耐火物手帳 '97 編集委員会編

耐火物手帳 '97

耐火物技術協会創立50周年記念事業の一環として、15年振りに耐火物手帳の全面改訂版『耐火物手帳 '97』が発行されました。本書は馴染みのある耐火物手帳の書名を継承しておりますが、内容を全く一新した全面書き下ろしです。また関係者には常時座右に置かれ、ハンドブックとしても長く愛用されるよう、内容・構成を吟味しております。耐火物関係者のご購入をお勧めします。

『耐火物手帳 '97』概要 (B5版、本文512頁)

内 容：耐火物概論、耐火物各論、耐火物と工業炉、耐火物規格、耐火物用語、耐火物関係資料

発 行 日：平成8年12月5日

頒 価：5,090円 (消費税込み) 送料：500円 (ただし2冊以上一律1,000円)

購入方法：送付先 (住所、所属、ご担当者氏名、電話、FAX)、注文冊数、送金方法を明記の上、
ファクシミリまたは郵送でお申込下さい。請求書を添えてご送付致します。

申込先・送金先：耐火物技術協会 FAX 03-3572-0175 〒104 東京都中央区銀座7-3-13

送金方法：

①現金書留 ②郵便振替口座 東京00160-8-26794 ③第一勧業銀行数寄屋橋支店 普通預金 034-1076021

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

ふえらむ

ferrum

Bulletin of The Iron and Steel Institute of Japan

Monthly.

Circulation: 11,000 Copies. Written in Japanese.

鉄と鋼

TETSU-TO-HAGANE

Monthly.

Circulation: 3,000 Copies. Written in Japanese.

ISIJ International

ISIJ International

Monthly.

Circulation: 5,500 Copies. Written in English.

日本鉄鋼協会講演論文集

材料とプロセス

Report of the ISIJ Meeting

Current Advances in Materials and Processes

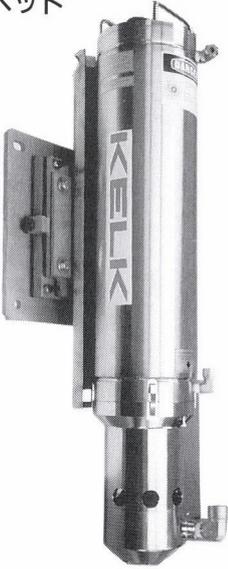
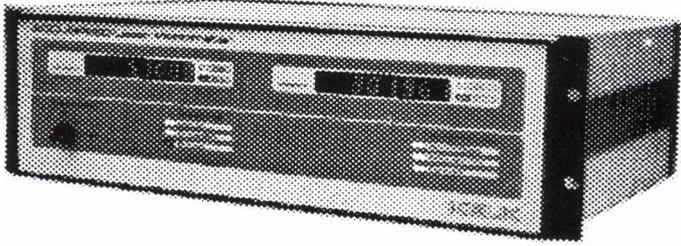
Spring: No. 1, 2, 3. Autumn: No. 4, 5, 6.

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

*For more Information,
Write or Facsimile.*

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

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

<p>光学ヘッド</p>  <p>コンパクトな一体型の エアージャケットと水冷ジャケット モデルASD2100A</p>	<p>エレクトロニクスユニット</p> 
<p>防水、防塵、冷却用 エアージャケットと水冷ジャケット モデルASD2100B モデルASD2100C モデルASD2100D</p> 	

アキュスピードレーザー速度計は、ケルク社(カナダ)の鉄鋼用測定機の長年の経験と実績を生かして、今回新開発した非ドプラレーザー速度計です。

■仕様

- 半導体可視レーザー(30mW)
- 精度±0.02%
- 測定距離(2100mm)
- ユーザーアクセスプログラムの完備
- 取り付け位置により4タイプ用意

■応用例

- 長さ測定
- マスフローコントロール
- 先進率計測
- クランプシャートラッキング
- 表面検査トラッキング
- 連铸コントロール
- ストリップ形状(幅計と組み合せ)
- 板幅コントロール

★御問合せは下記までお願いします。

ケルク社(カナダ)
日本総代理店



ジャパンマシナリー株式会社

JAPAN MACHINERY COMPANY

JMCハイテックセンター

システム営業二部	〒144-0046 東京都大田区東六郷2-4-12	TEL03-3730-6061(代表) FAX03-3730-3737
広島支店	〒730-0017 広島市中区鉄砲町8-18	TEL082-221-8871(代表) FAX082-228-8660
神戸営業所	〒650-0032 神戸市中央区伊藤町119	TEL078-332-6391(代表) FAX078-332-6393
本社	〒104-0061 東京都中央区銀座8-5-6	TEL03-3573-5261(代表) FAX03-3571-7865

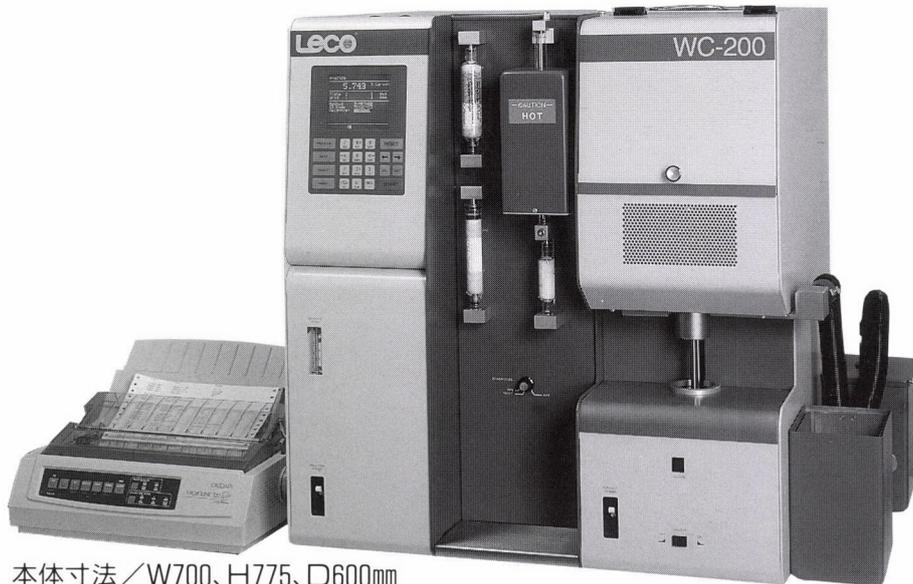
米国 LECO 社製 WC-200

— 最新型 —

炭素分析装置

高炭素含有量域の精度向上

分析対象物質：各種セラミックス・耐火物(SiC、TiC)
鉄、鉄鋼、フェロアロイ、非鉄金属、鉱石、触媒等



本体寸法 / W700、H775、D600mm

製造プロセスの工程管理や製品の品質管理に威力を発揮します。

■ 広く高精度な分析範囲

測定範囲：40ppm～4.0% (1g試料)

測定範囲は、試料重量を変えることにより広がります。

分析精度：20ppmまたは0.15%RSD

(いずれか大きい方)

■ 分析時間 3 分以内

■ 高周波燃焼法/赤外線吸収方式

姉妹炭素分析装置

IR-412型

高感度(0.1ppm)分析用

C-400、C-200型

ルーティン分析用

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きます。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

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