

isenra

*Bulletin of
The Iron
and Steel
Institute of
Japan*

Vol.16 / No.5 / 2011

(社)日本鉄鋼協会会報

ISSN1341-688X

鉄と鋼

Tetsu-to-Hagané

Vol.97 / No.5 / 2011

ISSN0021-1575

測定結果の正確さ、簡単操作で 豊富なラインナップ。金属分析に差をつけます。

材料中酸素・窒素・水素分析装置 EMGAシリーズ

NEW

酸素・窒素・水素の3成分を自動化機構により簡単、高速、高精度測定。

- | | |
|--------------------------|----------------------|
| 酸素・窒素・水素分析装置
EMGA-930 | ● O/N/H同時分析 |
| 酸素・窒素分析装置
EMGA-920 | ● 世界最高の分析性能(精度) |
| 水素分析装置
EMGA-921 | ● 高速分析メンテナンス性向上 |
| | ● オートクリーナ/るつぼロータ標準装備 |



炭素・硫黄分析装置 EMIA-920V2

NEW

高周波加熱炉方式で、極微量炭素硫黄成分を高精度測定。

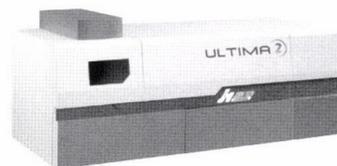
- 高周波誘導加熱炉方式の採用で燃焼コントロールを実現
- 分析目的に応じた適切なプレート電流コントロールにより、各種サンプルの高精度分析が可能
- 測定中に加熱条件を変える事で、炭素の分別定量にアプローチ可能
- 高周波炉オートクリーナ機構の採用で、省力化を実現



ICP発光分析装置 ULTIMA2

高感度・高分解能を実現したシーケンシャルICPの最高峰。

- 大型回折格子を搭載した、高感度・高分解能分光器
- 120nm~の測定でCl、Brも測定可能独自のシーガス機構により、高塩試料の長期安定分析が可能
- 40MHzプラズマの採用で低バックグラウンドと低ランニングコストを実現
- イメージナビゲータ(定性ソフト)により全波長領域を最短2分で分析



マーカス型高周波グロー放電発光表面分析装置 (GD-OES)

表面分析に新たなラインアップ深さ方向分析が簡単・迅速に。

- 迅速分析が可能なので、1日10検体以上の分析が可能
- バルスパッタリングを用いれば、サブnmオーダーの深さ方向分析も可能
- 水素やリチウムなどの軽元素の分析も可能
- 測定元素：H~U



株式会社堀場製作所 本社 〒601-8510 京都市南区吉祥院宮の東町2 TEL(075)313-8121 ● 仙台(022)308-7890 ● つくば(0298)56-0521
● 東京(03)3861-8231 ● 横浜(045)451-2091 ● 名古屋(052)936-5781 ● 大阪(06)6390-8011 ● 広島(082)288-4433 ● 福岡(092)472-5041

科学システム営業部 TEL: 03-3861-8234 <http://www.horiba.com/jp/scientific/>

ふえらむ

Vol.16 (2011) No.5

C O N T E N T S

目次

Techno Scope	微細加工を実現するレーザー加工	272
鉄の点景	遊技球	277
連携記事	超短パルスレーザーによる微細加工技術の進展と展望 杉岡幸次	279
名誉会員からのメッセージ	溶鋼の清浄性を高めるSiのクラスター現象と過飽和固溶体凝固への遷移 —溶鋼の過冷研究の反省が、高度な清浄性を得る要因となる— 高橋忠義	286
2010年鉄鋼生産技術の歩み	日本鉄鋼協会 生産技術部門	289
展 望	産業政策としてのレアアース資源開発 —中国脅威論への警鐘として— 上條水美	309
入門講座	鋼を接合する—巻頭言 鋼を接合する (Joining Steels) シリーズ企画にあたって 会報委員会	316
	鋼を接合する—1 高力ボルト接合 —接合法— 山口隆司	317
解 説	受賞技術—5 高い船体安全性を備え地球温暖化防止に寄与する高強度鋼板の開発 金子雅人	324
	受賞技術—6 変形性能に優れた高強度鋼管の開発 石川信行、鈴木信久	327
会員へのお知らせ		332
海外鉄鋼関連最新論文		348

微細加工を実現する レーザー加工

半世紀前に発明されたレーザーは、現在さまざまな分野で応用されている。ごく狭い範囲に、高いエネルギーを集中できるレーザーは、材料加工の手段として用いられてきた。近年、高出力、短パルスのレーザーの開発が進み、従来の加工法では実現できなかった微細加工がレーザーによって可能になっている。



直径90μmのステンレス管に直径20μmの孔を貫通させることができるレーザー電解複合加工は、極細管の複雑形状を実現する加工法として、普及が期待されている。(写真提供: (独)産業技術総合研究所)

多彩な分野で応用が進むレーザー

レーザー (LASER) とは、Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (輻射の誘導放出による光増幅) の頭文字から名付けられ、その基礎となる理論は1917年に、アインシュタインの「放射の量子論について」で提示された。1953年にはマイクロ波増幅器 (メーザー) が発明され、1960年にヒューズ研究所のセオドア・メイマンによって、ルビーレーザーが発明された。20世紀の偉大な発明のひとつと評価されるレーザーは、現代の生活のさまざまな分野で利用されている。

レーザーの特徴は、指向性・干渉性・単色性に優れていることに加え、高いエネルギー密度にある。そのため、レーザーは加工手段として、マクロな加工から微細な加工にまで適用されるが、レーザーの利用はそれだけではない。

レーザーの応用分野は、軍事利用からコンサートの演出までその利用範囲は多岐にわたる。もっとも身近なレーザーの応用例としては、情報・家電分野が挙げられる。CDやDVD、ブルーレイディスクなどの読み取りや書き込み、レーザープリンターなどの光源として利用されているほか、プレゼンテーションでは、レーザーポイン

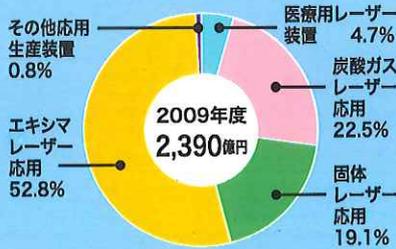
ターが使われるようになった。計測分野でもレーザーが広く利用されており、レーザー水準器は建築現場などで広く一般に利用されている。大がかりなものではアポロ宇宙船が月面に設置した反射鏡を利用して、レーザーで地球と月の距離が測定されている。その他、光ファイバーとレーザーを用いて、原子力発電所などのプラント配管の歪みを検出する研究なども行われている。

医療分野でもレーザーはなじみのある存在といえるだろう。よく知られているレーザーメスの他、眼球の水晶体がレーザーを吸収しないことを利用した眼底治療に利用されたり、レーザーを光ファイバーで誘導する内視鏡治療など、患者の負担が小さくて済むような治療を実現している。

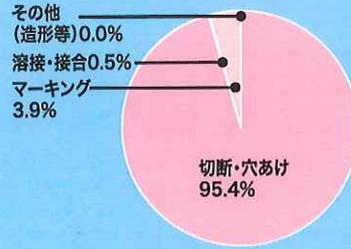
利用が拡大するレーザー加工

レーザープロセスとも呼ばれるレーザー加工は、レーザー光を細く絞って工作物に照射することにより、表面を局部的に加熱し熔融、蒸発させて加工する方法であり、穴あけ、切断や溶接などの高温のプロセスと、マーキングやガラス内部を加工する材内変質などの低温のプロセスがある。既に広く応用が進んでいる高温プロセスに

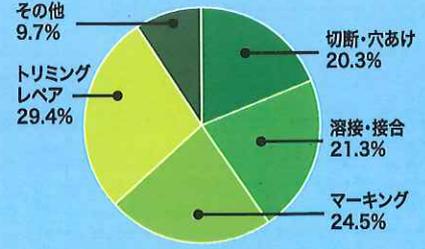
■2009年度レーザー装置生産額の分野別シェア



■炭酸ガスレーザー生産装置の分野別シェア



■固体レーザー装置の分野別シェア



(財)光産業技術振興協会「2009年度光産業国内生産額調査」より

■産業用微細プロセスレーザーの分類

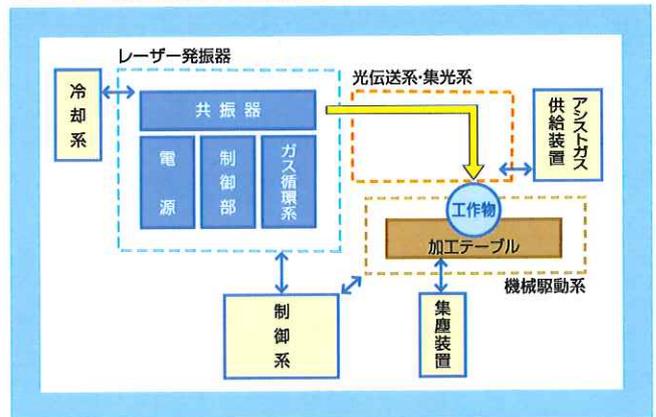
分類	波長領域	波長/nm	レーザー媒質
赤外レーザー	中赤外	10600	CO ₂ (CO ₂ +N ₂ +He)
	近赤外	1064	Nd:YAG
可視光レーザー	可視光	532	YAG第2高調波
紫外レーザー	近紫外	355	YAG第3高調波
		266	YAG第4高調波
	遠紫外	248	エキシマレーザー (KrF)
		193	エキシマレーザー (ArF)
超短パルスレーザー (ピコ秒)	近赤外	1064	Nd:YVO ₄ , YAGモードロック
超短パルスレーザー (フェムト秒)	近赤外	800	チタンサファイア

(出典:「絵とき「レーザー加工」基礎のきそ」新井武二,日刊工業新聞社)

■レーザー加工の種類



■レーザー加工装置の構成概念図



対して、低温プロセスは比較的新しい応用分野といえる。

レーザー加工装置の市場規模は景気による増減はあるものの、拡大傾向にある。その利用分野は、従来からの機械・金属加工分野に加えて、電子・半導体分野、自動車・鉄道分野、エンジニアリングプラスチック、樹脂などの高分子材料分野にも広がっている。生産額の分野別シェアでは、エキシマレーザーが約50%を占めているが、これはエキシマレーザーの用途の大部分が高額の半導体リソグラフィ装置に用いられているためである。加工用には炭酸ガスレーザーと固体レーザーが主に利用されている。炭酸ガスレーザーでは切断や穴あけ用途が多いことに対し、固体レーザーは溶接・接合やマーキングなど多様な分野で利用されている。この理由の一つとして、例えば溶接分野では、固体レーザーが光ファイバーで伝送可能であることが挙げられる。また、近年、固体レーザーでは、従来までのロッド (棒) 状の結晶の他に、ファイバー状やディスク状の結晶を用いるファイバーレーザーやディスクレーザーなども用いられるようになってきた。

レーザー加工装置は、レーザー発振器の他にも様々な装置が組み合わされていることから、加工システムと呼ばれることもある。レーザー発振部は、レーザーを生み出す共振器、電源、制御部、冷却装置などから構成される。炭酸ガスなどのようにレーザーを発生す

る媒質がガスの場合には、ガス循環系も必要である。発振したレーザーは光伝送系・集光系を介して、工作物に到達する。加工テーブルなどの機械駆動系は、レーザーと工作物の位置を定める微細加工では、重要な部分である。さらに、これらを連携して動作させる制御系や、アシストガス供給装置や集塵装置などの補助システムが組み合わされて、全体のシステムが構成されている。

最近のレーザー加工技術はさらに応用範囲が広がり、CADデータなどを利用することで、ガラスの内部に三次元の複雑な形状を描写するレーザー工芸や、3Dプリンターともいべきレーザープロトタイプングなど、新しい利用分野も開拓されている。

微細加工へのレーザーの適用

小さな範囲に大きなエネルギーを集中できるレーザー加工は、微細加工に適した加工法である。加工するサイズがミリメートル以下のマイクロメートルオーダーである場合に、微細加工やマイクロ加工と呼ばれることが多い。半導体製造をはじめとした分野では、ナノメートルオーダーの加工も可能になっているが、レーザーを利用した微細加工は、マイクロメートルオーダーからナノオーダーをカバーするメゾ領域の加工方法として注目されている。

特に高集積化が進む半導体分野では、半導体ウエハーを切削し、チップ化するダイシング技術でレーザー加工が期待されている。半導体ウエハーに対して透過性のある波長のレーザーを半導体の内部で焦点を結ぶように集光することで、従来のブレードダイシングと比較して、より精密な切削が可能になる。また、小型化・高機能化が進む携帯電話の回路基盤の穴あけなどの分野でも、従来までの微細加工方法では対応が難しい場合が増えてきており、レーザー微細加工が用いられている。

微細加工に用いられるレーザーの波長は、紫外～赤外であり、

いっそうの短波長化、短パルス化、エネルギーの高密度化を目指して開発が行われてきた。近年、レーザー微細加工では、パルス幅がピコ秒やフェムト秒である超短パルスレーザーが主流になりつつある(詳細は連携記事を参照)。

レーザー加工と電解加工を組合せた加工機の開発

メゾ領域での微細加工への利用に期待されているレーザー加工であるが、それを具現化する手段として、極細金属管を複雑形状に加工するレーザー電解複合加工装置が開発されている。例えば、医療用のカテーテルやステントは、脳などの細い血管に挿入できるサイズの製品ニーズが高まっている。心臓外科で使用するステントの直径が数mmであるのに対し、脳外科用ステントの直径は200 μ m以下であることが求められる。また、電子回路を検査するためのコンタクトプローブでは、回路の高密度化に伴いより細いプローブが必要であり、要求されている直径は100 μ m以下である。

従来の機械加工による複雑形状加工の限界は直径300 μ m

日本のレーザー加工の経緯と鉄鋼分野への導入

1960年に発明されたレーザーは、1960年代に炭酸ガスレーザーやYAGレーザーが発明され、1970年代にはエキシマレーザーが発明された。また1970年代には、炭酸ガスレーザーの高出力化に伴って、金属やプラスチックの切断などにレーザー加工が普及していった。

1970年前後から日本でもレーザー加工についての研究が行われはじめ、1978年には国のプロジェクトとして「超高性能レーザー応用複合生産システム」の開発が進められた。このプロ

ジェクトによって、20kWクラスの大出力炭酸ガスレーザーの国産化が可能になった。1971年に初めてレーザー加工装置が輸入された10年後の1981年には、国産の金属切断用の炭酸ガスレーザー加工機が商品化されている。

鉄鋼の分野では、いち早く1980年代の始めに当時の川崎製鉄(株)がシートコイルの突き合わせ溶接にレーザー加工を導入している。シートコイルの溶接では、従来までフラッシュバット溶接やシーム溶接が用いられていた。しかし、ビード余盛を避けたい冷延鋼帯や溶接入熱を抑えたいケイ素鋼帯の溶接には、これらの溶接法は適用が難しく、また、TIG溶接では生産性に課題が

あった。これに対し炭酸ガスレーザーによる溶接は単位入熱あたりの溶込み深さが大きく、低入熱高速度溶接が可能で、溶接変形や熱影響部の結晶粒粗大化が少ないという特徴を持ち、シートコイルの溶接に適した溶接法であった。現在、製鉄所で利用されているレーザー加工の例として、シートコイルの溶接の他に、自動車用薄板の表面に凹凸をつけるダール加工などが挙げられる。

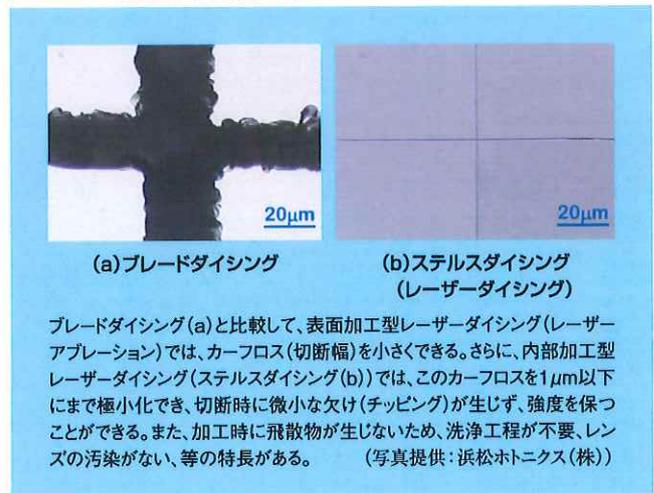
■レーザー技術の変遷

年代	1960	1970	1980	1990	2000	2010
主要な発明	●1960 レーザーの発明 ●1961 He-Neレーザー ●1962 Nd:ガラスレーザー ●1962 半導体レーザー ●1964 炭酸ガスレーザー ●1964 YAGレーザー	●1970 エキシマレーザー				
国のプロジェクト			●1978~1983 超高性能レーザー応用複合生産システム		●1997~2002 フォトン計測・加工技術	
主な用途			表面加工 穴あけ	切断 溶接		極厚板加工 微細加工 非熱加工

であった。これには、大きく3つの理由がある。それは①工作物と工具の相対位置の精密な制御が難しい、②加工点以外で工作物と工具が接触し、加工できない形状が存在する、③機械加工では工作物に力を加えるため、変形を抑えるために細管化に限界がある、の3つである。さらに、極細管を精度よく保持することも、極細管の複雑形状加工を行ううえで課題となっていた。

これらの課題を解決するために、開発されたのが、「レーザー電解複合加工機」である(独)産業技術総合研究所による。レーザー加工は非接触であるために、工作物とレーザー照射位置の相対位置を検出・設定することが難しい。通常は計測用のレーザーを使用するが、その場合、計測用と加工用のレーザーの光軸を合わせる必要がある。この作業は複雑で、測定と加工の誤差要因となっていた。「レーザー電解複合加工機」では、計測用と加工用のレーザーを同一の光源とすることで、この問題を解決している。同一光源の使用は、同時に装置の小型化の実現にも大きく寄与している。さらに、レーザー電解複合加工機では、レーザー加工を施した後に、工作物を保持したままで、電解加工を行うことができる。この際、工作物の位置制御は、先にレーザーで計測した姿勢計測結果を用いるため、仕上げ加工を施す位

■レーザーによる微細加工の例

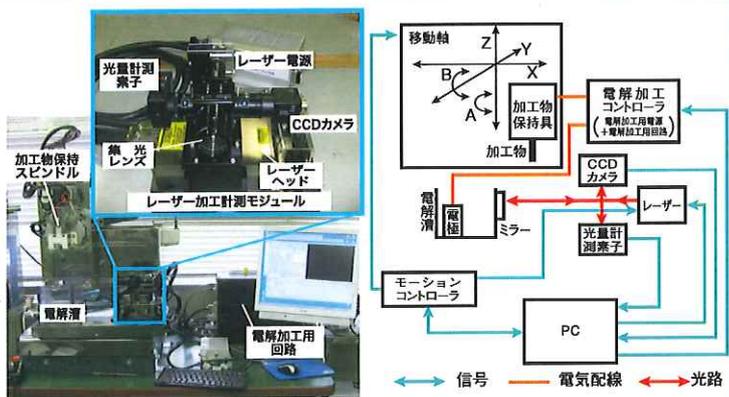


置や加工量の高精度な制御が可能になった。

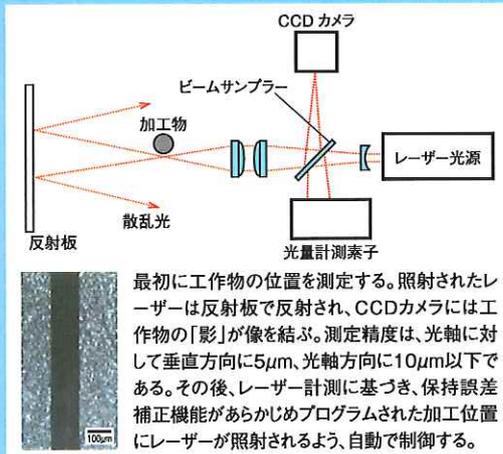
レーザー測定による高精度の位置情報と高度な保持誤差補正機能によって、微細レーザー加工(形状加工)と微細電解加工(仕上げ加工)を連続して行うことによって、加工時間の最小化・効率化が実現できる。このような複合加工機は、レーザー加

■高精度位置制御と加工の効率化を図ったレーザー電解加工機

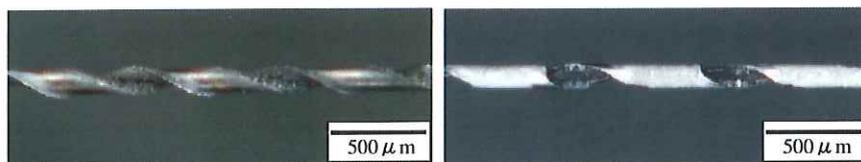
●レーザー電解複合加工機の外観と構成図



●レーザーによる計測と加工の仕組み

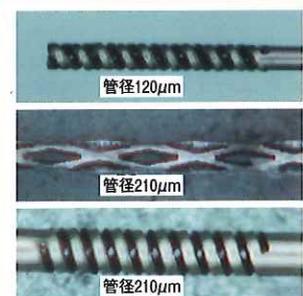


●レーザー電解複合加工の結果



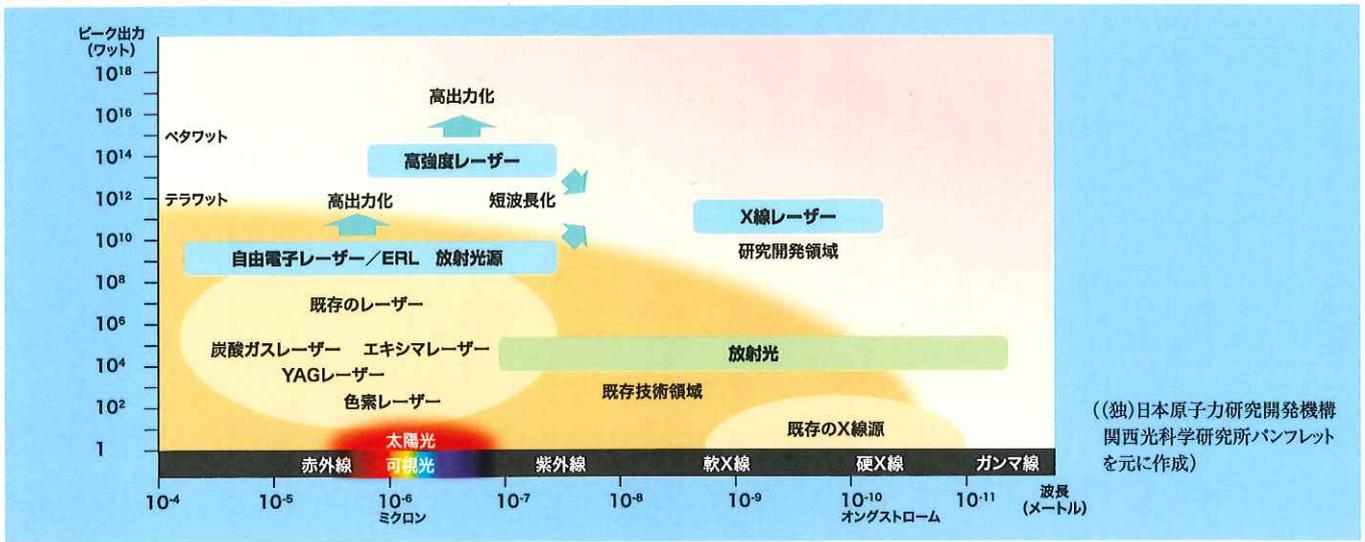
(a) はレーザー加工を施したもの。加工断面などにバリや再凝着物が認められる。
(b) は電解加工を施したもの。バリや再凝着物は認められず、平滑な表面を実現している。

●レーザー電解複合加工装置による加工例



(資料提供: (独)産業技術総合研究所)

■各種レーザーの波長と強度



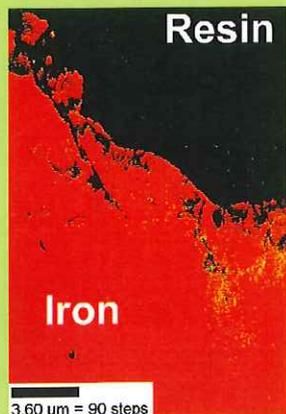
((独)日本原子力研究開発機構 関西科学研究所パンフレットを元に作成)

フェムト秒レーザーによる鉄の高圧相凍結

フェムト秒レーザーは、新物質(高圧相)の生成という、新しい学問領域や新しい産業分野を開拓するツールとして注目されている。

鉄の平衡状態は、低温低圧領域のα相(bcc)、高温低圧領域のγ相(fcc)とδ相(bcc)、高圧領域のε相(hcp)が知られている。フェムト秒レーザーを鉄に照射することで、従来の衝撃圧縮法では実現できなかった高圧相のε相が凍結されていることが、確認されている。

フェムト秒レーザーを材料に照射すると、表面の影響を受ける領域はごく短時間だけ高温高圧状態になる。この手法は、鉄やその他の材料にも適用が可能と考えられ、高圧相の生成・研究に大きく役立つものと期待されている。



鏡面研磨した鉄表面に、アルゴン雰囲気中でフェムト秒レーザー(強度 10^{14} W/cm²)を照射した試料の断面のEBSP(電子線後方散乱回折パターン)法による分析結果。α相(赤色)中にε相(黄色)が点在していることが分かる。(佐野ら「フェムト秒レーザー駆動衝撃による鉄の高圧相凍結」プラズマ・核融合学会誌 Vol.80, No.6(2004)482)

(資料提供:大阪大学大学院・佐野智一准教授)

工と電解加工の組み合わせだけでなく、機械加工、放電加工なども組み合わせることが可能で、デスクトップ複合加工機として、普及が期待される。

新たな産業を生み出すレーザー

極短パルスレーザーによる微細加工分野は、今後、大きな発展が期待される分野であるが、特に欧米を中心に医療分野でのレーザー利用にも関心が高まっている。現在わが国は、レーザー発振器など、レーザー関連機器の多くを国外メーカーからの輸入に頼っている。レーザー技術の発展を促し、国際的な競争力を高めるために、例えば文部科学省では「光・量子科学研究拠点形成に向けた基盤技術開発」プロジェクトを開始し、関東と関西にそれぞれネットワークを構築して、研究体制の強化を図り新しい光源の開発などに取り組んでいるところである。

また、レーザー発振器などデバイス面では欧米にやや後れをとっているが、それらを組み合わせた応用面では、先進的な成果を上げていることも指摘しておきたい。一例として、(独)理化学研究所・高輝度光科学研究センターに建設されたX線自由電子レーザーでは、世界最強クラスのレーザーを用いて、これまで観察することができなかった物質の反応過程が観察可能になっている。

レーザーは材料科学をはじめとして基礎科学の分野でも重要なツールであり、加工をはじめとした幅広い応用分野を持っている。さらに今後、国際的な競争力をもつ産業として育成していくためには、レーザーの応用分野まで含めた研究の裾野を拡げていくことが重要であろう。

- 取材協力 (独)産業技術総合研究所、(独)理化学研究所
- 文 杉山香里

遊技球



正しくは、パチンコ玉は遊技球という。盤面上にはじき出された遊技球は、無数の釘にあたり、跳ね返りながら勢いよく落下していく。複雑な球の動きに一喜一憂しながら、最後の穴に入り込む球はほんのわずか。つややかに銀色に光る遊技球は、落下時の衝撃に耐えながらよく跳ねるよう、高精度に作り込まれている。

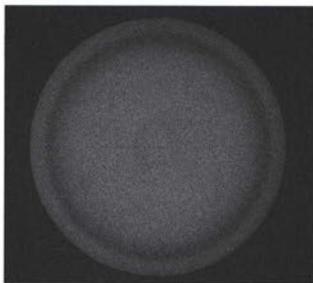
派手な盤面のなかでも目立つよう、あえて球の平滑度を低めにして研磨し、乱反射によって白っぽく光るようにしている(表面が鏡面に近いベアリング用鋼球は黒光りする)。

3層構造で内はやわらかく、外は硬く

遊技球は規則*によって、サイズが直径11mm、重量5.4~5.7g、材料は鋼製であることが定められている。ちなみに釘は、ピッカーズ硬度が150~230Hvの真鍮かこれと同等の硬度を持つ金属と定められている。

パチンコは昭和5年、名古屋でパチンコ遊技場第1号が営業許可されたのをきっかけに広がった。終戦を迎えると軍用ベアリング用鋼球が大量に放出され、パチンコ用遊技球に流用されるようになった。当時の遊技球は熱処理や表面処理が行われていなかったため、錆びやすく耐久性も低かったが、焼入れ処理やクロムめっきが施されるようになって、耐食性や耐久性は向上していった。

現在の遊技球は、その小さな球の中が3層構造になっている。中心部は素材に由来する0.2%炭素を含有しており、熱処理後はフェライト+マルテンサイト組織となり、外周部に比べて軟質である。外周部は浸炭処理により更に高炭素となるため、熱処理後はマルテンサイト組織となり、高硬度になっている。そしてさらに表層には硬質クロムめっきが施されている。この構造によって、表面は硬く衝撃に強く、内部は衝撃を吸収して割れを防ぐ機能を発揮するようになっている。



遊技球を大円に沿って切断した断面

優れた材料が高い品質をつくりだす

複雑な構造を持つ遊技球はどのようにつくられるのだろうか。材料は、冷間圧造用炭素鋼線材が用いられる。まず線材を伸線して所定の線径に加工した後、圧造する。圧造とはボールヘッダーを用いて、線材を切断するとともに、冷間鍛造によって両端から圧力をかけ球体に成形する工程である。圧造された原球にはバリがあるので、研磨を経て真円に近づける。次に刻印後に熱処理を施し、最後に研磨してクロムめっきし、完成品となる。刻印や表面処理等は異なるが、基本的にはベアリング用鋼球と同様の工程で製造される。

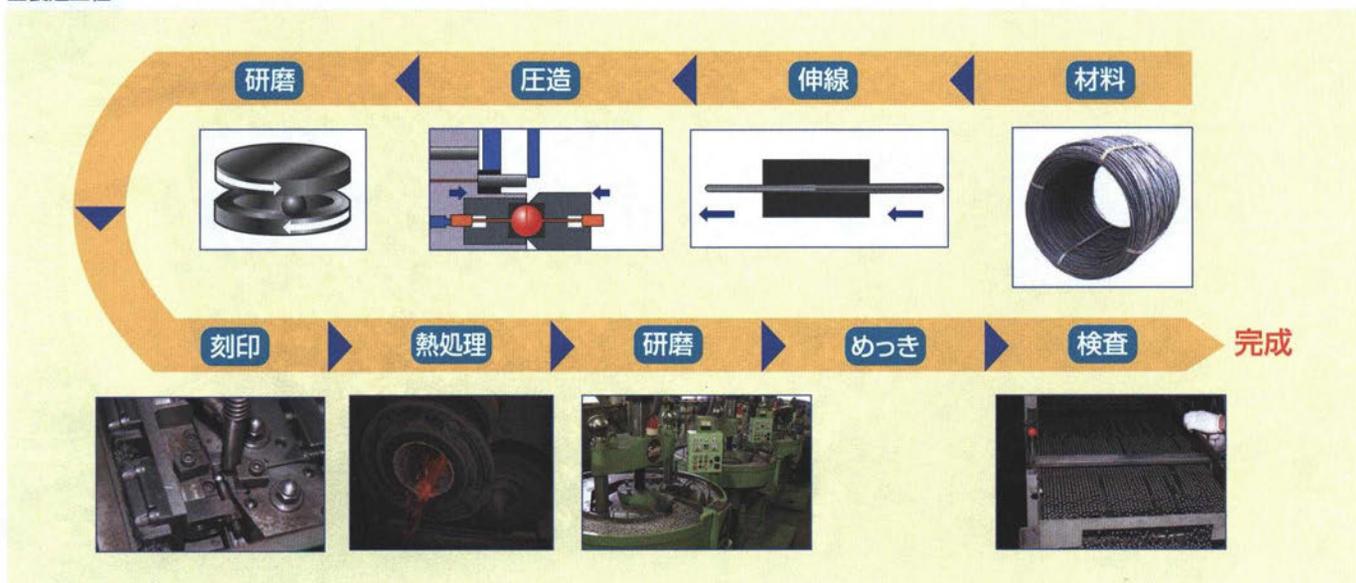
中心部はやわらかく、表層部は硬くという遊技球の構造は、熱処理によってつくられる。浸炭焼入れで表層部に硬い浸炭層をつくり、中心部は焼戻しによってムラのない粘りのある状態にする。表面の硬さと内部の粘りのバランスによって遊技球はよく跳ねるのである。

この跳ねるという性質は、ベアリング用鋼球には求められないが、遊技球には重要となる。釘にあたってどれくらい跳ね返るかは出玉に影響してくるため、釘に衝突した時の反発力が一定になるように、表面はHv800以上の硬さが保持されている。

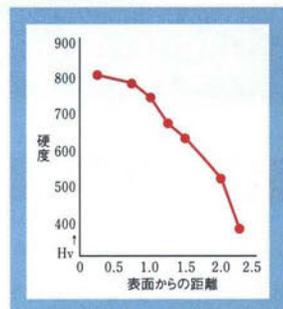
硬度は表面から1mm程度の深さまで硬度800Hv程度の浸炭層となっており、以降は中心部に向けて徐々に低くなっていく。この硬度分布が、中心部に向けて硬度がゆるやかに低下していくのではなく、急激に硬度が低くなる場合、稀に浸炭層の

*「遊技機の認定及び型式の検定等に関する規則」(昭和六十年国家公安委員会規則第四号)

■製造工程

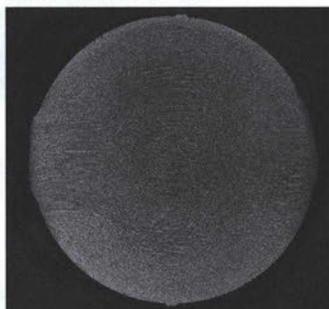


■浸炭層深さ



表面から0.8mm程度の深さまで硬度800Hv程度の浸炭層となっており、以降は中心部に向けて徐々に低下する。

■圧造後のメタルフロー



乱れなく、フローが流れている。優れた材料を用いると良好なメタルフローが得られる

剥離が生じることがある。そのため硬度分布が理想的なカーブを描くよう熱処理条件等が確立されている。しかし品質が不安定な材料を用いると、求める硬度が得られないことがあり、材料の選定が重要となっている。

材料は、鉄鋼メーカーにおいて遊技球の製造工程に合わせて調整された線材が使用されている。この遊技球専用の線材を用いて加工すると良好なメタルフローが得られる。圧造後のメタルフローをみると、均一に圧力がかかっていることがわかる。刻印加工は自店の球と他店のものを区別するために遊技球には欠かせない工程であるが、刻印時、球のどの向きに印が打たれるか特定できないため、メタルフローが乱れていると、すぐに印の刃が折れてしまう。鋼材に含有する成分のわずかな違いによって、加工や熱処理のしやすさが変化し、球の硬さや粘り強さ、反発力等に影響を与える。熟練の釘師は、球の跳ね返る様子がいつもと異なると、材料を変えたのかと聞いてくるほど、安定した品質を確保するには、優れた鋼材が欠かせない。

技術が支える日本独特の娯楽

手間ひまをかけてつくられる遊技球は、日本では1個あたり約1円50銭程度の製造コストがかかる。近年、中国製の遊技球が出回り、中国製の製造コストは1個1円程度である。そこで国内メーカーは製造コストを低減するため、例えば新たに金型を開発してバリを抑え、バリ取りの工程を減らすとともに、線材から取れる遊技球の数を増やすなど、全工程にわたって見直しを図ってきた。

それでも、最近では大幅に需要が減少し、生産を一時停止している工場が増えている。平成元年頃、全国でパチンコ店は約2万件あった。遊技球はおよそ1店あたり450万個、全国では900億個も使用されていたと推測される。それが現在、さまざまな娯楽が増えたことで来客数が減少し、店舗数は1万件に半減している。さらに収益の減少から、1台毎に球を使用するのではなく、複数台を球が循環し共有するシステムができ、従来、1台あたり1万5千個必要であった遊技球は3千個で済むようになっている。

すぐに決着のつくスロットマシンは海外でも人気だが、時間をかけてチャンスが巡ってくるのを待つパチンコは日本独特の娯楽と言われている。最近、パチンコの演出が派手になってきてはいるが、いつの時代も変わらず、遊技球と釘、この二つの組み合わせによってパチンコは遊ぶものだ。遊技球の「ぎ」の表記は遊戯の「戯」ではなく、技術の「技」を用いる。優れた材料と製造技術によって生まれた遊技球は、日本の娯楽に相応しい、高い品質を備えている。

●取材協力・写真提供 佐藤鉄工(株)
●文 藤井 美穂

連携記事

超短パルスレーザーによる 微細加工技術の進展と展望

Progress and Prospect of Ultrafast Laser Microprocessing

杉岡幸次

Koji Sugioka

(独) 理化学研究所 基幹研究所

緑川レーザー物理工学研究室

専任研究員

1 はじめに

超短パルスレーザーはパルス幅が概ね10ps以下のパルス幅のレーザーであり、フェムト秒レーザーおよびピコ秒レーザーの総称である。超短パルスレーザーは、その極短パルス性から加工領域に発生した熱の周囲への拡散を無視することができ、加工部周辺に熱影響をほとんど与えない加工を実現することができる¹⁾。一方その高強度性は、ガラスなどの透明材料に対して多光子吸収による加工を実現する。特にレーザー光を適当な強度で透明材料内部に集光すると、集光点でのみ多光子吸収を誘起でき、材料内部の3次元加工を行うことができる²⁾。これらの特長により、超短パルスレーザーは従来にない高品質・高解像度・高機能加工を実現することができ、近年国内外を問わず研究・開発が盛んになっている。本稿では、今日レーザー微細加工の主流になりつつある超短パルスレーザー加工について、その黎明期から今日までの進展と今後の展望を解説する。

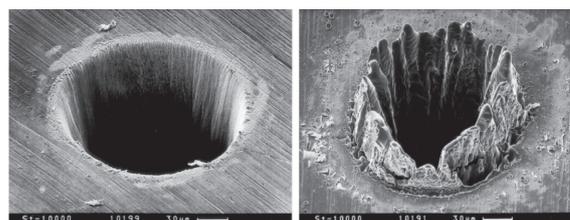
2 超短パルスレーザー加工の始まり

超短パルスレーザー加工は、1987年のSrinivasan等による160fsのXeClエキシマレーザー(308nm)を用いたポリメチルメタクリレート(PMMA)のアブレーション³⁾と、同年のKüper等による300fsのKrFエキシマレーザー(248nm)によるPMMAのアブレーション⁴⁾が最初である。アブレーションとは、強度の強いレーザー光を物質に照射することにより、物質の分解・蒸発が爆発的に生じ、物質がエッチングされる現象を言う。フェムト秒レーザーを用いると、ナノ秒レーザーを用いた場合と比較してアブレーションしきい値(アブレーションが生じる最小のレーザー強度、通常単位はmJ/cm²)が大幅に低下すること、加工部に熱変成が観られないことが示された。また加工メカニズムとして、多光子吸収による解離状態への励起が予想されることが報告された。実際超短パルスレーザー

は非常に強度が強いため、透明材料であってもあたかも仮想準位を介したかのように束縛電子を複数の光子で伝導帯に励起する(多光子吸収)ことが可能であり、透明材料の加工を実現する。その後、NaClやテフロン(PTFE)の加工に応用され⁵⁾、多光子吸収によって透明材料に対しても良好な加工が行えることが示された。このユニークな加工結果により、これ以降超短パルスレーザー加工の研究は活発になっていった。

3 金属加工

1987年のSrinivasan等ならびKüper等の論文の発表以降しばらくの間は、これまで高品質な加工が困難であった透明材料の加工が多光子吸収によって行えるといった興味から、透明材料の加工に関する研究がほとんどであった。その後1990年代半ばになると、レーザー波長に対して強い吸収のある金属やセラミックスでも、熱変成のない加工ができることが示され注目を集めた。超短パルスレーザーを金属に照射した場合、レーザーのエネルギーは逆制動放射過程によって自由電子に吸収される。その後吸収されたレーザーエネルギーは、電子系の加熱、格子系へのエネルギー移乗、金属内部への熱拡散に分配される。レーザー光のパルス幅が電子・フォノン結合時間(通常ピコ秒オーダー)よりも短い場合、金属内部への熱伝導による損失過程を無視できるため、レーザーエネルギーを格子系に効率良く注入できる。図1は、鋼箔をパルス幅(a)



(a) フェムト秒レーザー

(b) ナノ秒レーザー

図1 鋼箔のアブレーション加工

200fs と (b) 33ns のレーザー (波長 780nm) でアブレーションした結果である¹⁾。フェムト秒レーザーによる加工では加工穴の周辺に熱変成相の形成は観られないが、ナノ秒レーザー加工では溶融の痕が顕著に観察される。これはナノ秒パルスアブレーションでは熱が金属内部を伝導して、比較的大きな溶融相をつくり出すのに十分な時間があるためである。非熱加工は超短パルスレーザー加工の重要な特長の一つであり、今日では金属はもとよりセラミクスや半導体への加工にも応用されている。

4 透明材料内部加工

超短パルスレーザーによる多光子吸収過程は、透明材料に対しあるしきい値以上のレーザー強度の場合効率よく生じる。従って適当なエネルギーのレーザー光を試料表面ではなくバルク透明材料の内部にレンズで集光すれば、その領域でのみ多光子吸収が生じ、固体内部の改質・加工が可能となる。この特徴を利用して、1990年代半ばにフェムト秒レーザーによりガラス内部が加工できることが初めて示された²⁾。これは超短パルスレーザーでのみ可能な加工であり、石英ガラスやカルコゲナイドガラスなどの無機透明非晶質材料に対して、局所的イオン価数変化、金属微粒子析出、微結晶析出、屈折率制御等が可能であることが示された⁶⁾。さらにレーザー光の集光点を固体内部で走査すると連続的な屈折率増加領域を形成することができ、各種ガラス材料やポリマー内部への光導波路形成に応用された⁷⁾。今日フェムト秒レーザーによる透明材料内部への光導波路描画は最も活発な研究分野の一つであり、数多くの研究がなされている⁸⁻¹⁰⁾。またガラス内部の屈折率制御による3次元フォトニックデバイスの作製も広く試みられており、光結合器・分波器¹¹⁾、ブラッググレーティング¹²⁾、回折型レンズ¹³⁾、導波路レーザー¹⁴⁾などが実際に試作されている。一方2000年代に入ると、フェムト秒レーザーを用いてガラス

内部に3次元中空マイクロ構造を形成し、マイクロ流体デバイス作製に応用する研究が盛んになってきた。3次元中空マイクロ構造は、まずガラス内部をフェムト秒レーザーにより改質し、その後フッ酸溶液を用いたウェットエッチングにより改質領域を選択的に除去することによって実現される^{15,16)}。さらにマイクロ流体素子に光導波路やその他のマイクロ光学素子を集積化したマイクロ光学流体素子 (Optofluidics) も作製されており、高感度のバイオ化学分析¹⁷⁻¹⁹⁾や微生物の動態・機能解明²⁰⁾に応用されている。一例として、図2 (a)、(b) に作製されたマイクロ流体デバイスの3次元模式図および光学顕微鏡写真を示す。基板表面より 150 μm 下に矩形断面形状のマイクロチャネルが埋め込まれていることがわかる。本マイクロ流体デバイスはミドリムシの動態観察に利用されたが、図2 (a) の①の方向より光学顕微鏡で観察することにより、ミドリムシを前方から観察することを可能にした。その結果、図2 (c) に示すようなこれまで誰も見たことのない進行方向正面からミドリムシが遊泳する映像を高速撮影することに成功した²⁰⁾。このような微生物観察用のマイクロチップはナノ水族館と呼ばれ、観察したい微生物の種類や調べたい内容により、異なる構造や機能を持ったナノ水族館が既に複数作製されている。

最近では、超短パルスレーザーによる多光子吸収を利用し、ガラス基板同士のマイクロ溶接の研究も行われている^{21,22)}。

5 3次元光造形、3次元リソグラフィ

透明材料の多光子吸収においては、非線形な吸収・反応のしきい値を利用することにより、波長よりもはるかに小さい 100nm 程度の加工解像度を達成する。この特長を利用したフェムト秒レーザーによる2光子光造形および2光子リソグラフィ技術による3次元ナノ造形が、2000年以降脚光を浴びている²³⁾。

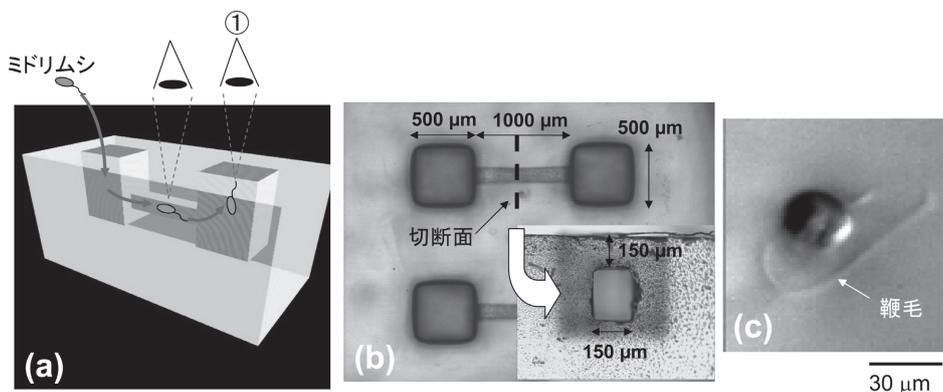


図2 フェムト秒レーザーにより作製された微生物動態観察用マイクロ流体デバイス (ナノ水族館) の (a) 3次元模式図、および (b) 光学顕微鏡写真、(c) ナノ水族館を用いて前方から観察したミドリムシの光学顕微鏡写真

主な応用としては2つあり、1つはフォトニック結晶の作製²⁴⁾、もう一つはMEMSやマイクロ流体デバイス作製である²⁵⁻²⁷⁾。図3に、2光子光造形によりマイクロタービンおよびナノピンセットを作製した例を示す^{25,26)}。作製したマイクロ・ナノデバイスは光トラッピング技術により可動部を遠隔駆動することが可能であり、実際マイクロタービンでは数百rpmの回転数を実現している。

また最近ではメタマテリアルやマイクロ医療機器の作製への応用も検討されている²⁸⁾。

6 ナノ加工

前章でも簡単に述べたが、多光子吸収を用いた透明材料の加工では、レーザー光の回折限界をはるかに超える加工解像度を実現することができる²³⁾。それは、通常フェムト秒レーザー光はガウスビームであり、 n 光子吸収の場合実効的なビーム径は実際のビーム径の $n^{-1/2}$ 倍になるからである。一方、不透明な物質では1光子吸収で加工を行うため実効的なビーム径が小さくなることはないが、超短パルスレーザーはパルス幅が非常に短いために加工部周辺への熱拡散を無視することができる。その結果、金属のような熱伝導率の高い材料においてさえ波長オーダー程度あるいはそれ以下のナノ加工を実行することができ、近年フェムト秒レーザーを用いたナノ加工技術が注目されている。フェムト秒レーザー光を回折光学素子で多ビームに分離し、その中の所望のビームを多光束干渉照射させることにより、金薄膜にナノ構造が作製されている²⁹⁾。2光束干渉ではナノペルトが、4光束干渉では照射強度により図

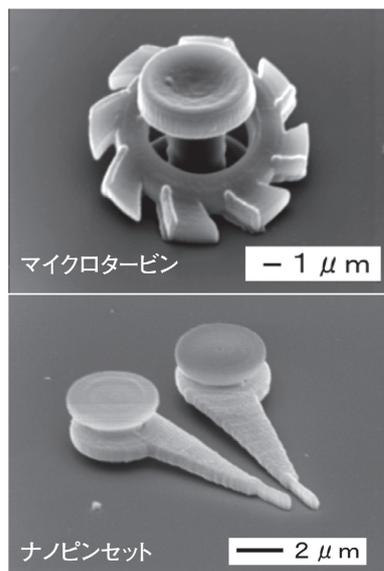


図3 2光子光造形によって作製されたマイクロタービンおよびナノピンセット

4に示すようなナノバンプやナノメッシュが形成される。一方、3次元光造形、3次元リソグラフィの場合と同様、高開口数の対物レンズを用いることにより、GaN表面にナノクレータを2次元に周期的に配列した例を図5に示す。この場合はフェムト秒レーザーの2次高調波(387nm)を対物レンズで集光し、塩酸溶液中のGaNに照射することによりアブレーション加工を行っている。2次元周期構造はレーザー光を走査することによって実現される。形成されたナノクレータの直径は約106nmである³⁰⁾。このようなGaN表面への2次元ナノ周期構造の形成は、青色・紫外発光ダイオードの光取り出し効率向上への応用が期待されている。

さらに加工解像度を向上することを目的として、AFM(原子間力顕微鏡)チップ、SNOM(走査型近接場光学顕微鏡)チップあるいは誘電体や金属の微小球等とフェムト秒レーザー光を組み合わせたナノ加工も最近のトピックスである³¹⁻³⁴⁾。

7 表面ナノ構造化による固体表面機能付与

フェムト秒レーザーを固体表面にアブレーションしきい値程度のフルエンスで照射すると、照射領域にナノ周期構造が形成されることが知られている³⁵⁾。形成される周期構造の向きはレーザーの偏光方向に対して垂直であり、その周期は波長の半分から数分の一程度である。これまでにすでに多くのグ

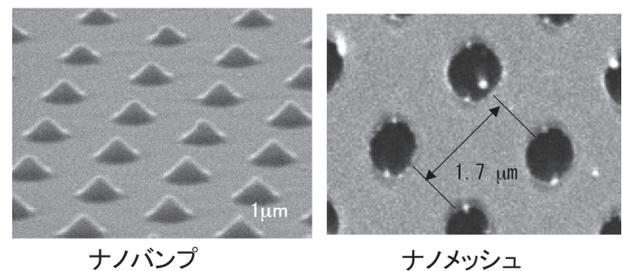


図4 フェムト秒レーザー4光束干渉による金薄膜へのナノバンプおよびナノメッシュの作製

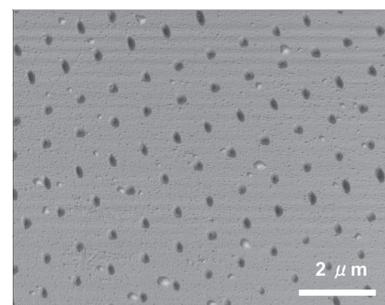


図5 塩酸溶液中フェムト秒レーザーアブレーションによるGa_N表面への2次元ナノ周期構造の形成

ループが石英ガラス、Si、DLC (ダイヤモンド様カーボン) 薄膜、BaF₂、CaF₂、金属等多様な材料に周期的ナノリップル構造を形成できることを確認している。このような固体表面への周期的ナノリップル構造形成技術は、しゅう動部の摩擦低減、塑性加工特性の向上、微小物体の凝着力低減、薄膜の密着性向上、細胞の配向、濡れ性向上、無反射面の形成など広範囲な応用が期待されている。キャノンマシナリー(株)では、ナノリップル構造形成を行うフェムト秒レーザー表面改質装置を既に製造、販売している³⁶⁾。

一方、SF₆ガス雰囲気中でフェムト秒レーザーをSi基板表面に照射すると、図6 (a) に示すようなマイクロ～ナノスケールの周期的なピラー構造を形成することができる³⁷⁾。その後アルキルシランの単分子層でナノ構造化表面を被覆すると、図6 (b) に示すような超疎水表面が実現される。特に水よりも親水度の高いヘキサデカンでさえも、超疎水表面を実現できることは興味深い。このような表面は自浄作用がある。例えば超疎水表面を持つ建築資材で建物を建造できれば、常に外壁をきれいな状態に保つことができ清掃の必要がなくなる。

8 ビーム整形技術

特に最近研究が盛んになっているのがビーム整形技術である。ビーム整形技術には、空間的整形と時間的整形の2種類がある。

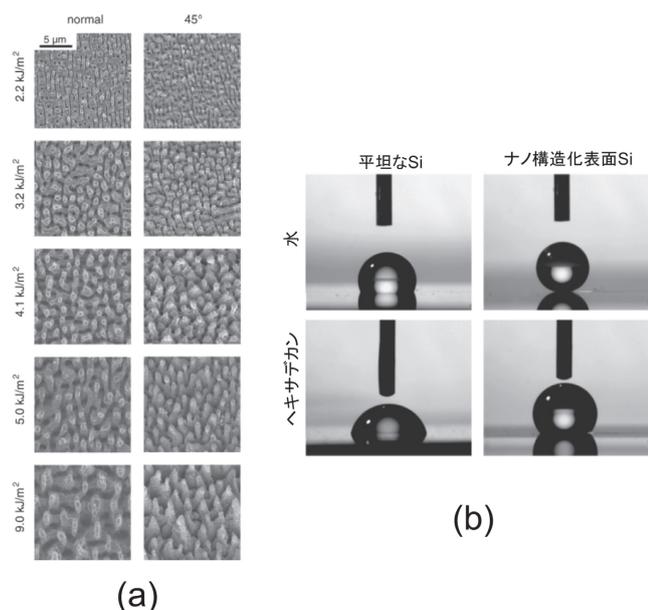


図6 (a) SF₆ガス雰囲気中でのフェムト秒レーザー光照射によってSi基板表面に形成されたマイクロ～ナノスケールの周期的ピラー構造
(b) ナノ構造化表面をアルキルシランの単分子層で被覆することにより得られた超疎水表面

空間的整形とはレーザービームの空間強度分布を制御することを意味する。超短パルスレーザーの空間的整形に最近よく用いられるのは、空間位相変調器 (SLM) である。SLMを用いると、パターン投影加工や多点一括加工を容易に実行することができ、加工の効率化を計ることができる³⁸⁾。

一方、ガラスの内部加工においては、レーザー光をレンズで集光した時の集光径とレイリー長が一致しないため、加工領域の断面形状が常にレーザー光進行方向に伸びた楕円形状になるといった問題点がある。これを解決するために、2枚組のシリンドリカルレンズ³⁹⁾、あるいは幅数百マイクロンのスリット⁴⁰⁾を用いてレーザー光を細い矩形に整形し、レンズに入射する手法が開発された。これにより断面形状が真円に近い光導波路やマイクロ流体チャンネルが作製されている。この手法は簡便であるが、レーザー光の走査方向が整形を行ったビームの長尺方向にのみ制限されるため、レーザー光の走査方向を変える場合、シリンドリカルレンズあるいはスリットの向きを走査方向に合わせてその都度調整する必要がある。この問題点を解決する手法として、最近フェムト秒レーザーの時空間ビーム整形技術が提案された⁴¹⁾。図7に、フェムト秒レーザー時空間整形ビームを用いた透明材料内部加工装置の概略図を示す。時空間ビーム整形を行うには、まずフェムト秒レーザー光の周波数成分を2枚組のグレーティングにより空間的に分散し、対物レンズに入射する。対物レンズ入口では各周波数成分は空間的に重なり合っていないので、パルス幅は長くなる。分散された各周波数成分は対物レンズによって集光され集光点で重なり合うため、集光点で最短のパルス幅が実現される。なぜなら超短パルスは、異なる周波数の発振線の位相をそろえ (モードロック)、空間的に重ね合わせた場合に発生するからである。その結果、集光点で空間的にも時間的にも最大のピーク強度が得られる。一方、光軸方向において集光点からずれてくると、急速にパルス幅が長くなるためピーク強度も急速に減少する。図8に、本手法を用いてガラス内部にマイクロチャンネルを作製した結果を示す。対物レンズへの

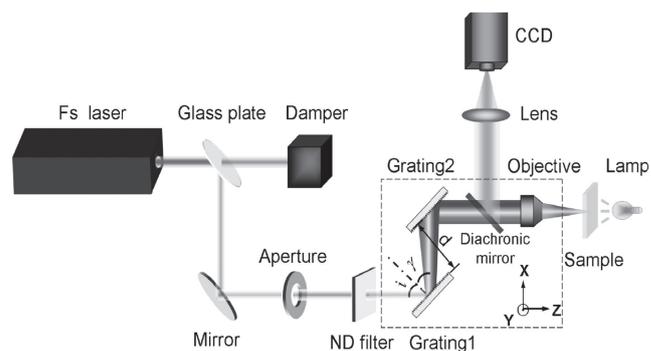


図7 フェムト秒レーザー時空間整形ビームを用いた透明材料内部加工装置の概略図

入射径を調整し、適当なレーザー出力で照射すると、x、yいずれの方向に走査してもほぼ円形の断面形状が得られている(図8(c)、(g))。

時間的整形とはパルス波形整形を意味する。フェムト秒レーザーパルス整形における最初の実験として、ダブルあるいはトリプルパルス照射(パルス間隔0.3ps)によってクラックの発生のないCaF₂の高品質アブレーション加工が報告されている⁴²⁾。図9に、シングルパルス照射とトリプルパルス照射によってアブレーションされたCaF₂の電子顕微鏡像を示す。トリプルパルス照射により明らかに加工品質が改善されている。さらに、一つのフェムト秒レーザー光を隣接した複数のパルス列に整形して石英ガラスに照射すると、照射径が1μm程度にもかかわらず直径100nm程度の加工痕が得られ

ることが示された⁴³⁾。石英ガラスなどの誘電体にフェムト秒レーザー光を照射すると、まず多光子吸収あるいはトンネルイオン化により自由電子が生成される。生成された自由電子はさらなるフェムト秒レーザーの光子を吸収しさらに上準位(真空準位)に励起されイオン化されるか、あるいは生成された自由電子がフェムト秒レーザーの強い電界によって加速され周囲の原子に衝突することによって2次電子(アバランシェ電離)が生成される。フェムト秒レーザー加工においては、これら複数の過程を経て加工へと進展すると考えられている。それぞれの過程は数百フェムトから数ピコ秒のオーダーで起こるといわれており、ダブル、トリプルパルス照射あるいはパルス列照射によってそれぞれの過程をある程度独立して制御することにより、優れた加工結果が得られたのではないかと推察される。

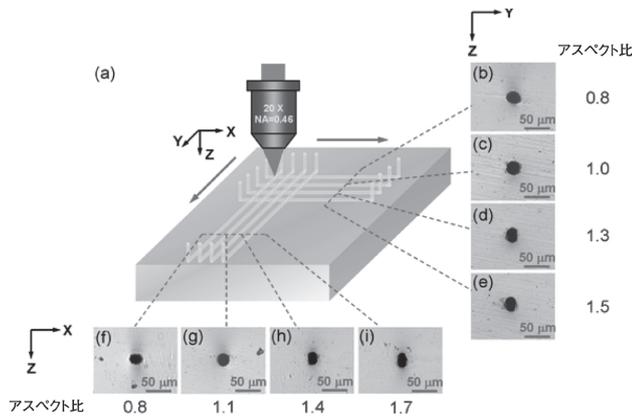


図8 (a) 時空間ビーム整形を用いた石英ガラス内部へのマイクロ流体チャンネル作製模式図
(b)~(i) 作製されたマイクロチャンネルの断面形状を光学顕微鏡で観察した結果
(b)~(e) : x軸方向に走査
(f)~(i) : y軸方向に走査
(b)、(f) : 入射ビーム径2mm、レーザー平均出力4mW
(c)、(g) : 3mm、3.5mW
(d)、(h) : 4mm、2mW
(e)、(i) : 5mm、2mW

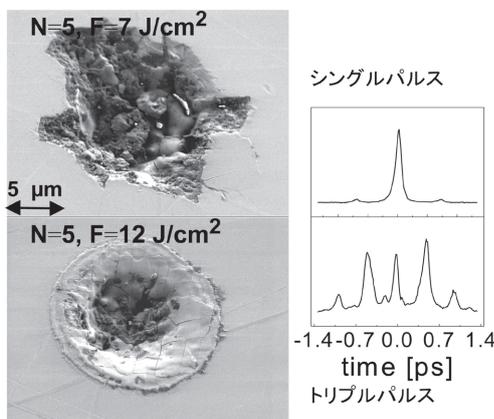


図9 フェムト秒レーザーのシングルパルス(上)およびトリプルパルス(下)照射によるCaF₂のアブレーション加工

9 産業応用

超短パルスレーザー加工の研究が始まって既に二十数年が経過し、今日では産業応用への検討もなされている。レチクルといわれる深紫外リソグラフィ用フォトマスク(石英基板にCrのパターンが施されたマスク)のリペアが、半導体デバイス製造業において最初のフェムト秒レーザー加工の応用である。これはフォトマスクの黒欠陥である余分なCr薄膜をフェムト秒レーザーアブレーションにより除去するものであるが、「6.ナノ加工」で述べたフェムト秒レーザー加工における超解像度の特長を利用して、80nm程度の解像度をもつリペアを実現している⁴⁴⁻⁴⁵⁾。本技術は、米国ヴァージニア州バーリントンにあるIBMマスク製造部門において実用化されている。

大量生産における最初の実用例は、ピコ秒レーザーによるインクジェットノズルの穴あけである。パナソニックUSAでは、ピコ秒レーザーとPC制御のガルバノミラーを用いて、高再現性、高精度、かつ高速にステンレス鋼に穴をあけることに成功している⁴⁶⁾。

一方ドイツでは、ピコ秒レーザーを自動車部品の製造に応用している。図10(a)に自動車の排ガスセンサの作製にピコ秒レーザートリミングが、(b)にディーゼルエンジンインジェクタ作製にピコ秒レーザーマイクロ加工が応用された例を示す⁴⁷⁾。また欧州では、近年ピコ秒レーザーによる太陽電池のスクライビングならびにパターニングの研究も精力的に行われている⁴⁸⁾。

10 まとめ

1980年代後半に、Srinivasan等やKüper等により初めてフェムト秒レーザーアブレーションに関する報告がなされて以

来、年々超短パルスレーザー加工の研究は活発になっている。その間多様なプロセスが開発されることにより応用分野も広がってきた。今日超短パルスレーザー加工はレーザー加工分野において最も活況な研究・開発分野であり、実用化もされつつある。本稿では超短パルスレーザー加工におけるこれまでの進展と主な研究のいくつかを紹介したが、数ある超短パルスレーザー加工に関する研究の全てを網羅するわけにはいかず、重要なものも多数漏れていることをお詫びする。

超短パルスレーザー加工がこれほど盛んに研究されるようになったのは、従来のレーザー加工にはない超短パルスレーザー加工特有の優れた特長によるところが大きいのはいうまでもない。さらには、超短パルスレーザー自体の性能向上も重要な要因の一つである。初期においてはエキシマレーザーをフェムト秒パルスにしたものが用いられたが、1990年代に入りチタンサファイアレーザーの出現がフェムト秒レーザー加工の研究を加速した。今日ではファイバレーザーやYb:YAGも超短パルスレーザーの媒質として広く使われている。価格も以前に比べてから比較的安くなり、高出力で高安定性のものが提供されている。また超短パルスレーザーの内部のことをよく知らなくてもスイッチ一つで容易に発振できるようになっており、確実にユーザの拡大に寄与している。一方産業応用においては、現時点ではフェムト秒レーザーは高出力性、安定性、信頼性の点から未だ開発の余地が残されており、多くの場合ピコ秒レーザーが優勢である。実際産業用ピコ秒レーザーも既に数社から販売されている。今後フェムト秒レーザーも含め超短パルスレーザーの性能はますます向上することが予想され、基礎研究だけでなく産業にも広く利用されることが期待される。

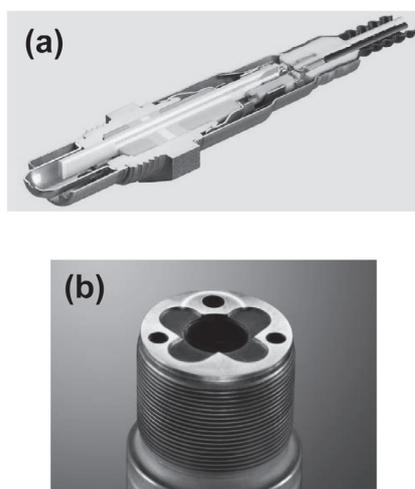


図10 超短パルスレーザーの自動車部品作製への応用
 (a)自動車の排ガスセンサのピコ秒レーザートリミング
 (b)ディーゼルエンジンインジェクタのピコ秒レーザーマイクロ加工

参考文献

- 1) C.Momma , B.N.Chichkov, S.Nolte, F.Alvensleben, A.Tünnermann, H.Welling and B.Wellegehausen : Opt. Commun., 129 (1996) , 134.
- 2) K.M.Davis, K.Miura, N.Sugimoto and K.Hirao : Opt. Lett., 21 (1996) , 1729.
- 3) R.Srinivasan, E.Sutcliffe and B.Braren : Appl.Phys.Lett., 51 (1987) , 1285.
- 4) S.Küper and M.Stuke : Appl.Phys., B44 (1987) , 199.
- 5) S.Küper and M.Stuke : Appl.Phys.Lett., 54 (1989) , 4.
- 6) 平尾一之：応用物理, 67 (1998) , 950.
- 7) K.Miura, J.Qiu, H.Inoue, T.Mitsuyu, and K.Hirao : Appl. Phys.Lett., 71 (1997) , 3329.
- 8) K.Yamada, W.Watanabe, T.Toma, K.Itoh and J.Nishii : Opt.Lett.26 (2001) , 19.
- 9) M.Will, S.Nolte, B.N.Chichkov and A.Tünnermann : Appl.Opt.41 (2002) , 4360.
- 10) G.Cerullo, R.Osellame, S.Taccheo, M.Marangoni, D Polli., R.Ramponi, P.Laporta and S.De Silvestri : Opt. Lett.27 (2002) , 1938.
- 11) W.Watanabe, T.Asano, K.Yamada, K.Itoh and J.Nishii : Opt.Lett., 28 (2003) , 2491.
- 12) L.Sudrie and K.A.Winick : J.Lightwave Technol., 21 (2003) , 246.
- 13) E.Bricchi, J.D.Mills, P.G.Kazamsky, B.G.Klappauf and J.J.Baum-berg : Opt.Lett., 27 (2002) , 2200.
- 14) G.D.Valle, S.Taccheo, R.Osellame, A.Festa, G.Cerullo and P.Laporta : Opt.Exp., 84 (2007) , 3190.
- 15) A.Marcinkevicius, S.Juodkazis, M.Watanabe, M.Miwa, S.Matsuo and H.Misawa : Opt.Lett., 26 (2001) , 277.
- 16) K.Sugioka, Y.Cheng and K.Midorikawa : Appl.Phys., A81 (2005) , 1.
- 17) R.Osellame, V.Maselli, R.M.Vazquez, R.Ramponi and G.Cerullo : Appl.Phys.Lett., 90 (2007) , 231118.
- 18) Z.Wang, K.Sugioka and K.Midorikawa : Appl.Phys., A93 (2008) , 225.
- 19) R.Vazquez, R.Osellame, D.Nolli, C.Dongre, H.Vlekkert, R.Ramponi, M.Pollnaub and G.Cerullo : Lab.Chip, 9 (2009) , 91.
- 20) Y.Hanada, K.Sugioka, H.Kawano, I.S.Ishikawa, A.Miyawaki and K.Midorikawa, Biomed.Microdevices, 10 (2008) , 403.
- 21) T. Tamaki, W. Watanabe, J. Nishii and K. Itho : Jpn J. Appl. Phys., 44 (2005) , L687.
- 22) I.Miyamoto, A.Horn, J.Gottmann, D.Wortmann and F.Yoshino : J.Laser Micro/Nanoeng., 2 (2007) , 57.

- 23) S.Kawata, H.B.Sun, T.Tanaka and K.Takada : Nature, 412 (2001) , 697.
- 24) B.H.Cumpston, S.P.Ananthavel, S.Barlow, D.L.Dyer, J.E.Ehrlich, L.L.Erskine, A.A.Heikal, S.M.Kuebler, I.-Y. S.Lee, D.McCord-Maughon, J.H.Qin, Röckel, M.Rumi, X-L.Wu, S.R.Marder and J.W.Perry : Nature, 398 (1999) , 51.
- 25) S.Maruo, K.Ikuta and H.Korogi : J.MEMS, 12 (2003) , 533.
- 26) S.Maruo, K.Ikuta, and H.Korogi : Appl.Phys.Lett., 82 (2003) , 133.
- 27) J.Wang, Y.He, H.Xia, L-G.Niu, R.Zhang, Q-D.Chen, Y-L. Zhang, Y-F.Li, S-J.Zeng, J-H.Qin, B-C.Lin and H-B.Sun : Lab.Chip, 10 (2010) , 1993.
- 28) M.Farsari and B.Chichkov : Nature Photonics, 3 (2009) , 450.
- 29) Y.Nakata, T.Okada and M.Maeda : Jpn.J.Appl.Phys., 42 (2003) , L1452.
- 30) S.Nakashima, K.Sugioka and K.Midorikawa : J.Laser Micro/Nanoeng., 5 (2010) , 21.
- 31) A.Chimmalgi, T.Y.Choi, C.P.Grigoropoulos and K.Komvopoulos : Appl.Phys.Lett., 82, (2003) , 1146.
- 32) Y.Lin, M.H.Hong, W.J.Wang, Y.Z.Law and T.C.Chong : Proc.SPIE, 5662 (2004) , 77.
- 33) Z.B.Wang, M.H.Hong, L.Yin and T.C.Chong : Proc.SPIE, 5662 (2004) , 215.
- 34) P.A.Atanasov, H.Takada, N.N.Nedyalkov and M.Obara : Appl.Surf.Sci., 253 (2007) , 8304.
- 35) 例えばJ.Reif, F.Costache, S.Eckert, S.Kouteva-Arguirova, M.Bestehorn, I.Georgescu, A.Semerok, P.Martin, O.Gobret and W.Seifert : SPIE, 5662 (2004) , 737.
- 36) <http://www.canon-machinery.co.jp/new-business/SUB2/surfbeat/sub.htm>
- 37) T.Baldacchini, J.E.Carey, M.Zhou and E.Mazur : Langmuir, 22 (2006) , 4917.
- 38) H.Takahashi, S.Hasegawa, A.Takita and Y.Hayasaki : Opt.Exp., 16 (2008) , 16592.
- 39) G.Cerullo, R.Osellame, S.Taccheo, M.Marangoni, D.Polli, R.Ramponi, P.Laporta and S.D.Silvestri : Opt.Lett., 27 (2002) , 1938.
- 40) Y.Cheng, K.Sugioka, K.Midorikawa, M.Masuda, K.Toyoda, M.Kawachi, and K.Shihoyama : Opt.Lett., 28 (2003) , 55.
- 41) F.He, H.Xu, Y.Cheng, J.Ni, H.Xiong, Z.Xu, K.Sugioka and K.Midorikawa : Opt Lett., 35 (2010) , 1106.
- 42) R.Stoian, M.Boyle, A.Thoss, A.Rosenfeld, G.Korn, I.V.Hertel and E.E.B.Campbel : Appl.Phys.Lett., 80 (2002) , 353.
- 43) L.Englert, B.Rethfeld, L.Haag, W.Wollenhaupt, C.Sarpe-Tudoran and T.Baumert : Opt.Exp., 15 (2007) , 17855.
- 44) R.Haight, D.Hayden, P.Longo, T.E.Neary and A.Wagner : Proc.SPIE, 3546 (1998) , 477.
- 45) R.Haight, D.Hayden, P.Longo, T.E.Neary and A.Wagner : J.Vac.Sci.Technol., B17 (1999) , 3137.
- 46) C.H.Chen and X.B.Liu : Proc. of ICALEO 2005 (Laser Institute of America) , M401.
- 47) T.H.Bauer and J.König : Technical Digest of LPM, 2010 (2010) , 127.
- 48) H.J.Booth : Technical Digest of LPM, 2010 (2010) , 45.

(2011年1月24日受付)

名誉会員からのメッセージ

溶鋼の清浄性を高めるSiのクラスター現象と過飽和固溶体凝固への遷移

—溶鋼の過冷研究の反省が、高度な清浄性を得る要因となる—

Cluster Phenomena of Si for Enhancing Cleanness of Molten Steel and Transition to Supersaturated Structure

北海道大学 名誉教授 高橋忠義



1 はじめに

自動車用鋼板をはじめ、高度な品質の鋼製品が要求されていた。鋼板の表面に介在物があれば、プレス加工などの際に割れの起点となる。本研究の端緒は、熔融金属 (Al-4%Cu合金) の一定量 (10g) を急冷によってどれだけ過冷させて、それによる結晶組織はどのように変化するかを追求したものであった¹⁾。急冷するポイントは、インキュベーションタイムの間の抜熱速度であり、溶湯を入れた良質の1mm厚みの黒鉛るつぼから効果的なスプレイ冷却によって熱を奪うことであった。この研究は予想以上の成果をあげ、最大で138Kまで過冷凝固し、微視的な球状のCuAl₂の θ 相が均等に分布する組織が得られた。この方法を、そのまま量的に多い実用鋼へ適用するのは無理であったので、溶鋼から結晶核生成要因を排除して、徐冷しても過冷し、溶鋼の液相状態を一気に均一な相分布となる固相状態に相変態させる過冷凝固法を開発することが重要となった^{2,3)}。そのため、引用文献^{2,3,4)}で報告したように多角的な研究を進め、本文でも述べるが、多くの重要な事実を把握した。その中であって、過冷度を増大させる要因を明確にできなかった。その後実験に用いた注入管が熔融することが過冷を促進させる要因であるというひらめきを得た。その後過冷研究を本質的に進展させることができた。

2 過冷度を増加させる溶鋼処理

結晶核要因を排除して、徐冷しても大きな過冷度が得られ、過飽和固溶体凝固となることを期待して適用したのは、La (35wt.%) Ce (46wt.%) のREMの添加である。

(1) 試料の溶解と凝固はタンマン炉内で行なった。内径40mm、外径50mm、高さ150mmのるつぼで1.5kgの試料を溶解した。

(2) 試料溶解用るつぼの材質

再熔融アルミナ質るつぼが最適であった。(ポーラスアルミナるつぼ、ポーラスマグネシアるつぼは不適當であった。)

(3) La、Ceを溶鋼に添加するための注入管の材質

Mulite (Al₂O₃: 55, SiO₂: 41) 質添加管を用いた場合は、始めから過冷度が大きく、溶解—凝固の3回の繰り返りで110Kの過冷度が得られた。(アルミナ管では、20K以下にとどまった。) このMulite質管の材質がこの研究の重要な要素となった。

(4) REMの添加方法

REMは1mm以下に粉碎して分割した後、間欠的にアルゴンで、溶鋼中に保持されている注入管から添加した。

(5) REM添加の最適温度

1893K (1620°C) が最適で、過冷度75Kから120Kまで得られた。これより20K添加温度が上下すると、過冷度25Kから最大50Kにとどまった。この最適温度はクラスター現象を考える上で、成分的に非常に重要な意味を持つ。

(6) REM添加後の介在物除去のための溶湯保持温度と攪拌

溶鋼の保持温度を変え、攪拌操作を行なったときの過冷度変化では、1853K (1580°C) の温度が反応生成物を除去するのに最適であった。

(7) 過冷度による溶鋼上部のミニスカスにおける反応生成物の融解温度の相違

過冷度32Kの場合のミニスカスの生成物の融解温度1743K (1470°C)、過冷度126Kの場合では、生成物の融解温度1653K (1380°C) である。高い過冷度の場合には、反応生成物の十分な受け入れ時間があることが予想された。

3 過冷現象が生ずる本質的背景

(1) 長い間、La、Ceを添加するときの注入管は Al_2O_3 、 SiO_2 を主とする成分であり、最も取り除くべきものであるものが、注人中にLa、Ceと一緒に鋼浴に溶けこむことは避けなければならないと思いながら、比重が軽いので浮上して、あまり害をなさないのではないかとも思っていた。停滞していた研究の活路を開いたのは、10年程前に我が家に行ったときに、！突然過冷度を増大させるのは注入管が溶けてその成分が遊離することが大事な現象⁴⁾であるとの閃きがあった。それから、 Al_2O_3 の特性について検討を進めた。 Al_2O_3 の融点は $2054^{\circ}C$ であるので、これまでの注入温度では融解しないことが判明した。一方、 SiO_2 の融点は $1620^{\circ}C$ 前後であることが判明した。これにより溶鋼中の介在物を吸着する表面活性なクラスター集団のその中心的な役割をSiが担って、介在物を捕捉し、溶鋼の清浄化を促進したことにより、溶鋼の過冷度が増大したものと推論した。非常に特徴的なのは、 SiO_2 の密度は $2.2g/cm^3$ で、La、Ceの1/3程度であり、生成物の浮上性は非常に良好であることである。

(2) Siがクラスター現象の中心的な役割を担っていると考えると、その本質的理由は何か⁵⁾、溶鋼の中で SiO_2 が溶融(本研究では $1620^{\circ}C$ が最適)することは、共有結合の破壊を意味し、Si原子は原子核の最外殻にある電子4個(周期律表の原子番号11から18の中間に位置する14の珪素が最も共有結合に有利である)を総動員して、4方向に涉って、共有結合を求め、共有を含めて8個の安定した構造をつくらうとする。この表面活性な活動の行動が基本となって、結果として、溶鋼の清浄性を高める結果になっているものと考えられる。

(3) 15kgの普通炭素鋼を高周波炉で溶解したときの恐怖
高橋が定年間近の2月に、15kgの炭素鋼(0.23wt.%C)をはじめ高周波炉を用いて溶解し、正規の添加処理を行い、溶鋼を徐冷した。溶鋼中の测温は高橋が行っていた。溶鋼量も多いことなので、比較的に浅い過冷却で凝固が行なわれるのではないかという心情が優先していたのが、実際は $1723K$ ($1450^{\circ}C$)を過ぎても溶鋼状態に変化はなく、流動性が維持されていた。 $1693K$ ($1420^{\circ}C$) (約80Kの過冷である) 近くになってきたとき、私に恐怖感が生まれ、実験を継続できなくなり、溶鋼の表面に酸素を吹きつけて中断した。いま思い起すと、そのまま継続すると、これまでのタンマン炉の成果より、より容易に $1673K$ ($1400^{\circ}C$)より温度が下がり、液体から固体への相

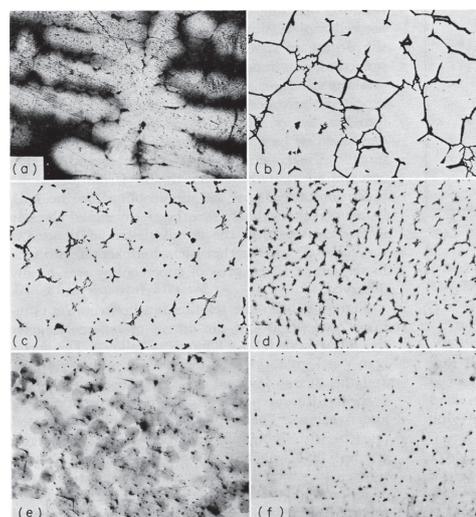
変態が急激な潜熱の放出と共に生じ、過飽和固溶体凝固をすることになったものと判断される。高周波溶解で、何故容易に過冷度が増大したのか、その大きな要因の一つは、高周波溶解では溶鋼内に対流が生じ、クラスター現象と生成した介在物の浮上性が有効に働く結果になったものと考えられる。

(4) 原子・分子にかかわるクラスター現象の特性について⁶⁾「クラスター」とは原子・分子が数個から数千個が集合した直径数nm(ナノ・メートル、100万分の1mm)以下の超微粒子である。クラスターを構成する原子・分子の数が増加するにつれて、その特性は顕著に変化し、100程度(粒子径1nm程度)で変化が緩くなり、固体や液体の性質に次第に近づき、原子・分子と固体や液体などの中間に位置する第4の物質系と考えられる。

クラスターは構造のゆらぎが大きいなど、原子・分子や固体・液体とも異なった独特の性質を示すとされている。クラスターのもっとも注目すべき特徴は、クラスター表面を構成する原子数の割合がバルクに比べて圧倒的に高いことである。このようにクラスターでは表面原子の結合不飽和性が高いことから、バルク表面とは異なる触媒活性が発現する可能性がある。

(5) 過飽和固溶体凝固(本実験では過冷度100Kで溶鋼が一気に固体に相変態する)

この現象は、溶鋼の緩冷却過程で生じたことで、明らかに結晶核生成要因を排除した結果であると考えられる。過冷度による組織変化の写真を図1に示す。



(a): $\Delta T=2K$, (b): $\Delta T=6K$, (c): $\Delta T=38K$, (d): $\Delta T=60K$, (e): $\Delta T=80K$, (f): $\Delta T=100K$ 200 μm

図1 Fe-C合金の過冷凝固組織。(a)はREM無添加

4 本研究の反省と進展

結晶核要因を排除する要諦を把握するまで、随分と長い経過を歩んだ。当初はLa、Ceに基点があると思って研究を進めたが、注入管が溶けるという偶然性に助けられ、かなりの過冷度の進展をみたが、疑問を投げかける点がいくつかあった。注入管の使用に Al_2O_3 でできたものでは、20K以下の抑制された過冷度であった。また溶鋼上部のミニスカスにできるスラグが、過冷度の低いときは線分析ではAlが主流であり、高いときはSiが主流になっていた。注入温度が1893K (1620°C) が適当であることの意義を見過ごしていた。前文でも述べたが、長い年月の後に得た閃きが、より確実性の高い方向に導くことができた。

SiO_2 の融解によって生じたSi原子は原子論的に非常に表面活性で、三次元の巨大分子をつくることなどが予想され、比重が軽くて、浮上性が良いことが大きなメリットである。La、Ceは重く、単独では浮上性が良くない。今後は SiO_2 の分解による短命であるSiクラスターの活動の場を溶鋼の対流などで効果的に活用することが重要であると思う。

5 おわりに

北海道大学 (2010) での学会やふえらむへの発表に協力された秋田大学材料工学専攻の大笹憲一教授に厚く感謝致します。

参考文献

- 1) 高橋忠義, 鈴木敏夫, 市川冽: 日本金属学会誌, 32 (1968) 9, 821.
- 2) T.Takahashi, M.Kudoh, K.Ohsasa and J.Tanaka : J.Iron Steel Inst : 27 (1987) 936.
- 3) 高橋忠義, 大笹憲一, 田中順一: 鉄と鋼, 74 (1988) , 8, 83.
- 4) 高橋忠義, 田中順一, 工藤昌行, 大笹憲一: 鉄と鋼, 76 (1990) 5, 65.
- 5) 槌田龍太郎: 化学概論 上巻 共立出版, (1944) , 2.
- 6) 近藤保: クラスタ科学 (分担), 日本化学会編, 丸善, (2003)

(2010年11月15日受付)

2010年鉄鋼生産技術の歩み

Production and Technology of Iron and Steel in Japan During 2010

日本鉄鋼協会 生産技術部門

The Technical Society, the Iron and Steel Institute of Japan

1 日本鉄鋼業の概況

我が国の経済は、2008年の世界金融危機を克服し、一昨年
から昨年に掛けて、外需や政府の経済対策による需要創出や
雇用の下支え効果により、だいぶ持ち直してきた。この結果、
2010年度の国内総生産の実質成長率は3.1%程度、国民の景
気実感に近い名目成長率でも1.1%程度と3年ぶりのプラス
成長が見込まれている(図1)。しかしながら、2010年の後半
から、急速な円高の進行や海外経済の減速懸念により、経済
情勢の足踏み状態が続いている。(内閣府：月例経済報告(平
成23年1月)、平成23年度の経済見通しと経済財政運営の基
本的態度(平成23年1月24日))

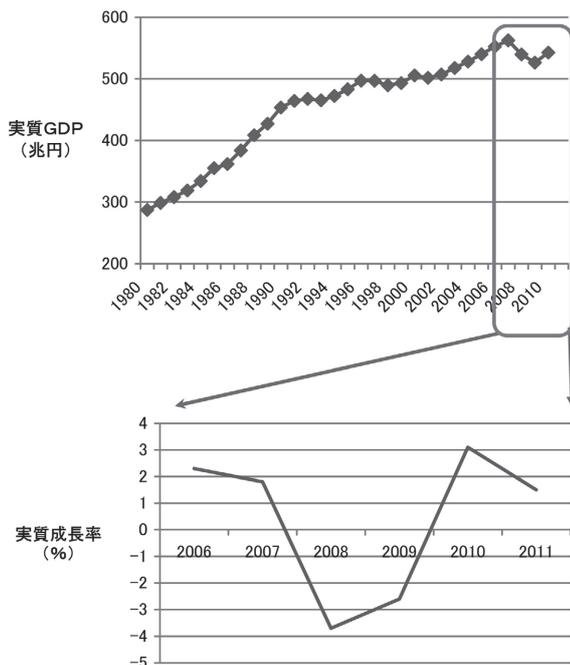


図1 我が国の国内総生産(GDP)、実質成長率の推移
出所：内閣府資料から作成

また、2010年の中国の国内総生産は、実質で対前年10.3%
増加し、我が国を抜いて米国に次いで世界2位になった。

我が国の長年にわたる成長率の低迷、デフレ傾向を脱する
新たな成長戦略が喫緊の課題となっている。政府では、2010
年6月に経済、財政、社会保障の強化を図るために、グリーン
イノベーション、ライフイノベーション等の7つの戦略分野
における国家戦略プロジェクトを定めた「新成長戦略」を取
りまとめた。戦略を早期に実現するための諸施策の推進が望
まれる。

このような中、2010年の我が国の鉄鋼業は、高い成長率を
示すアジア諸国を中心とした新興国向けの輸出の回復や政府
の景気刺激策による内需の回復等により粗鋼生産量は暦年で
は2年ぶりに1億トンレベルを回復し、世界金融危機以前の
約90%を超える水準となった(図2)。

しかし、足元では、景気対策の終了や急激な円高の影響等
により昨年の夏以降は足踏み状態が続いており、予断の許せ
ぬ状況となっている。一方で、昨年には2011年度税制改正
において法人実効税率が5%引き下げられることが閣議決定
されたこと、地球温暖化問題ではCOP16において京都議定
書の延長回避が図れたこと、資源問題では資源大手サプラ
イヤーの統合問題が断念されたこと等の鉄鋼業にとって重要な
展開があった。

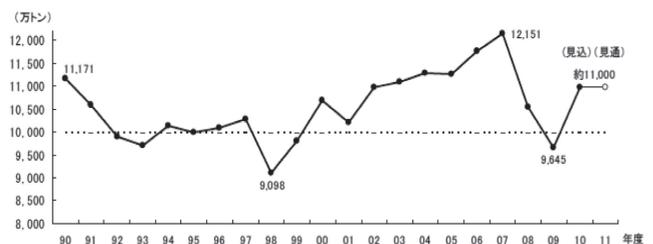


図2 我が国の粗鋼生産量の推移
出所：日本鉄鋼連盟資料より抜粋

我が国の鉄鋼業としては、継続して地球温暖化や資源問題を克服しつつ、国際競争力を確固たるものにしながら、更なる成長を図っていく必要がある。

以下に、2010年の鉄鋼生産技術の歩みを振り返る。

1.1 世界の鉄鋼業の概況

2011年1月21日に世界鉄鋼協会(WSA: World Steel Association)が発表した2010年の世界粗鋼生産量は14億14百万トンで、国別では表1に示す通りとなった。この情報によると、以下のような特徴点をあげることができる。

- ①最近の世界粗鋼生産量は、2007年の13億46百万トンがピークであったが、2008年後半の世界金融危機の影響で2008年、2009年は対前年比マイナスであった。2010年には、この影響を克服し、対前年比15%の伸びとなり、世界粗鋼生産量の新記録となった。
- ②2009年は、世界金融危機の影響で粗鋼生産量は減少したが、2010年は、ほぼ全ての主要国が対前年比2桁を超える伸びとなった。日本、韓国やEU主要国では20%代の伸びであったが、特に米国は38.5%の大幅な伸びとなった。
- ③一方で、中国、インドの粗鋼生産量の推移は特徴的である。2009年には、世界的な経済情勢の悪化の影響を受けて、軒並み減少であったが、中国、インドは逆に増加し金融危機等の影響が強く見られなかった。2010年に関しても、対前年比1桁の伸びであるが、着実な成長を窺わせる結果となった。中国の2010年の粗鋼生産量は6億27百万トンとなり、世界の粗鋼生産量の約44%となった。

次に、主要鉄鋼企業における粗鋼生産量の状況について、見てみる。Metal Bulletinのレポートによると、2009年(2010年6月公表) 暦年では、1位のArcerol Mittalの73.2百万トン

表1 世界各国の粗鋼生産量推移
出所: WSA資料より作成

順位	国・地域	2005	2006	2007	2008	2009	2010	対前年 増加率
1	中国	353.2	419.1	489.3	500.3	573.6	626.7	9.3
2	日本	112.5	116.2	120.2	118.7	87.5	109.6	25.2
3	アメリカ	94.9	98.6	98.1	91.4	58.2	80.6	38.5
4	ロシア	66.1	70.8	72.4	68.5	60.0	67.0	11.7
5	インド	45.8	49.5	53.5	57.8	62.8	66.8	6.4
6	韓国	47.8	48.5	51.5	53.6	48.6	58.5	20.3
7	ドイツ	44.5	47.2	48.6	45.8	32.7	43.8	34.1
8	ウクライナ	38.6	40.9	42.8	37.3	29.9	33.6	12.4
9	ブラジル	31.6	30.9	33.8	33.7	26.5	32.8	23.8
10	トルコ	21.0	23.3	25.8	26.8	25.3	29.0	14.6
11	イタリア	29.3	31.6	31.6	30.6	19.8	25.8	29.7
12	台湾	18.9	20.0	20.9	19.9	15.9	19.6	23.7
13	メキシコ	16.2	16.4	17.6	17.2	14.0	17.0	22.1
14	スペイン	17.8	18.4	19.0	18.6	14.4	16.3	13.6
15	フランス	19.5	19.9	19.2	17.9	12.8	15.4	20.1
16	カナダ	15.3	15.5	15.6	14.8	9.3	13.0	39.9
17	イラン	9.4	9.6	10.1	10.0	10.9	12.0	10.0
18	イギリス	13.2	13.9	14.3	13.5	10.1	9.7	▲3.7
19	南アフリカ	9.5	9.7	9.1	8.3	7.5	8.5	13.3
20	ベルギー	10.4	11.6	10.7	10.7	5.6	8.1	43.5
	その他計	128.6	135.4	142.0	131.8	104.0	119.8	
	世界合計	1144.1	1247.2	1346.1	1327.2	1229.4	1413.6	15.0

(百万トン) (%)

に続いて、中国の河北鋼鉄集団、上海宝鋼集団、武漢鋼鉄がいずれも30百万トンを超える規模で続く結果となった。我が国では、韓国のPOSCOに続いて新日鐵が6位、JFEスチールが9位だった(表2)。

特に、中国では鉄鋼企業の再編により、企業グループでの規模が拡大し、世界の上位30社に12社が入る状況となっている。中国1位の河北鋼鉄集団は2008年に河北省に本拠を置く、唐山鋼鉄集団等の企業再編によって発足した。中国では、前述のように国内総生産も2桁成長という高い経済成長を持続しており、顕著な事例として自動車生産台数(乗用車、バス・トラック)を見てみると、2009年に1,379万台で世界トップとなったが、更に2010年には対前年比32%増加の1,826万台となり、我が国の963万台の概ね倍の規模となった((社)日本自動車工業会:自動車統計月報(vol.44 No.10))。

このような動向により、世界粗鋼生産設備稼働率は、2008年秋以降の世界金融危機前における約90%超レベルから、2008年末には約58%へ低下したが、2009年末には約70%超のレベルに回復し、昨年2010年の前半には約80%を超える水準に回復した(図3)。

1.2 日本の鉄鋼業の概況

我が国の経済情勢は世界金融危機の影響を克服し、2010年の前半は諸対策の効果により持ち直してきたが、急速な円高等により2010年の後半からやや足踏みの状態にある。以下に、我が国の鉄鋼業の概況を振り返る。

表2 主要鉄鋼企業の粗鋼生産上位30社
出所: Metal Bulletin資料より作成

順位	会社名	国・地域	2008年	2009年	対前年 増加率
1	Arcelor Mittal	ルクセンブルグ	103.30	73.20	▲29.1
2	河北鋼鉄集団	中国	33.28	40.24	20.9
3	上海宝鋼集団	中国	35.44	38.87	9.7
4	武漢鋼鉄	中国	27.73	30.34	9.4
5	Posco	韓国	34.70	29.53	▲14.9
6	新日本製鐵	日本	36.88	27.61	▲25.1
7	江蘇沙鋼	中国	23.30	26.39	13.3
8	山東鋼鉄	中国		26.38	
9	JFEスチール	日本	33.80	26.28	▲22.2
10	Tata Steel	インド	24.39	21.90	▲10.2
11	鞍山鋼鉄	中国	16.04	20.13	25.5
12	首鋼集団	中国	12.19	17.29	41.8
13	Severstal	ロシア	19.21	16.74	▲12.9
14	Evrz	ロシア	16.30	15.28	▲6.3
15	US Steel	アメリカ	23.22	15.23	▲34.4
16	馬鞍山鋼鉄	中国	15.04	14.83	▲1.4
17	Gerdau	ブラジル	19.60	13.50	▲31.1
18	Sail	インド	13.66	12.69	▲7.1
19	Nucor	アメリカ	18.20	12.68	▲30.3
20	湖南華菱鋼鉄	中国	11.25	11.81	5.0
21	Riva Group	イタリア	18.03	11.32	▲37.2
22	Thyssen Krupp	ドイツ	16.00	11.00	▲31.3
23	住友金属工業	日本	13.88	10.81	▲22.1
24	Novolipetsk(NLMK)	ロシア	10.40	10.61	2.0
25	Imidro	イラン	9.54	10.52	10.3
26	中国鋼鉄	台湾	12.76	10.11	▲20.8
27	包頭鋼鉄	中国	9.83	10.07	2.4
28	日照鋼鉄	中国	7.47	9.91	32.7
29	Magnitogorsk(MMK)	ロシア	11.90	9.61	▲19.2
30	太原鋼鉄	中国	9.20	9.47	2.9

(百万トン) (%)

1.2.1 鉄鋼需要産業の動向

土木建築関係では、道路、下水道、治山治水等の公共土木工事受注額が連続して前年同月比マイナスであったが、民間土木工事受注額が不動産業や運輸通信業でプラスとなったため、年後半から回復基調となった。また、新設住宅着工戸数がローン金利優遇策や住宅エコポイント制度等の諸施策の効果によりプラスに転じ、年後半から年率換算着工戸数が80万戸超となり持ち直してきた。

自動車関係では、前半はエコカー補助金制度等の効果により国内新車販売台数は対前年比増加の傾向であったが、9月初旬に補助金制度が終了したため減少傾向に転じた。生産台数は、2010年暦年では、年前半の販売好調に支えられ、963万台に回復した。

産業機械関係では、年初から内外需ともに回復傾向となり、特に外需が好調なボイラ・原動機、土木建設機械、金属加工工作機械において増加傾向が続いている。

電気機械関係では、重電機、薄型テレビ等の需要が好調な民生用電子、電子部品等が年間を通じて回復基調となり前年水準を上回る見込である。

造船関係では、新たな建造許可が年末には170万グロスト

ン/月レベルとなっており、手持ち工事量も2008年度の約6,400万グロストンレベルから約4,800万グロストンへ減少している。造船の活動水準は2010年も微増ながら、横ばいの状況が続いている(表3)。

1.2.2 鉄鋼生産状況

2011年1月20日の(社)日本鉄鋼連盟の発表によると2010年の我が国の粗鋼生産量は1億960万トンで、前年2009年の8,753万トンから2,207万トン増加して、2年振りに1億トン台を回復した。これまでの最高水準であった2007年の1億2,020万トンには及ばないが、かなりの回復となった。ただし、四半期毎の推移でみると、年初のペースに比較して年後半では経済情勢を反映して停滞気味となった。炉別生産では、転炉鋼が8,576万トン、電炉鋼が2,385万トンで、いずれも前年比約25%の増加となった。また、鋼種別では、普通鋼が8,492万トン(前年比約26%増加)、特殊鋼が2,468万トン(前年比約53%増加)となった。特に、特殊鋼では機械構造用炭素鋼、構造用合金鋼、工具鋼、高抗張力鋼等の殆どの鋼種で増加となったため、前年比で大きな増加となった。日本鉄鋼連盟では、2011年度の粗鋼生産量は1億1,000万トン程度水準を維持する見通しとしている(図2)。

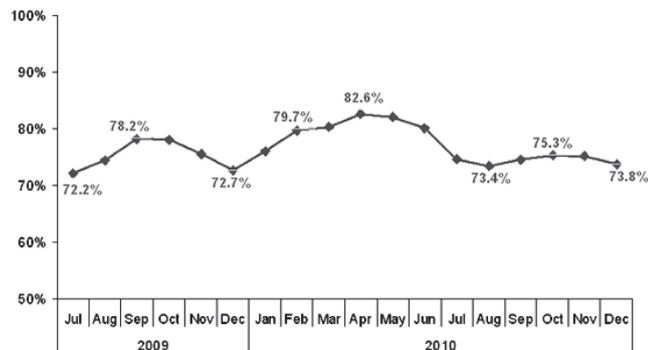


図3 鉄鋼設備稼働率の推移
出所：WSA資料より抜粋

1.2.3 鉄鋼原材料の動向

2010年は、中国、インド等のアジア地域の経済成長に伴う実需の伸びに加えて世界的な経済情勢の回復に伴って、粗鋼生産量は過去最高レベルとなった。このため、主要な鉄鋼原材料である鉄鉱石、原料炭ともに供給がタイトな状況になった。

2004年以降、毎年高騰が続いていた鉄鉱石や原料炭の価格は、世界金融危機の影響で粗鋼生産量が減少したため、2009年度に一旦低下したが、2010年に入ってから粗鋼生産の伸びとともに再び高騰した。鉄鉱石では、年後半には、塊鉄石、粉鉄石(豪州ヘマタイト鉄対日価格)とともに2008年レベルを遥

表3 鉄鋼需要産業の動向
出所：日本鉄鋼連盟資料より作成

	建設(土木)				建設(新設住宅)				自動車		産業機械		造船			
	公共工事 受注額	前年 同期比	民間工事 受注額	前年 同期比	着工戸数	前年 同期比	年率換算	前年 同期比	生産台数	前年 同期比	受注額	前年 同期比	建造許可 実績	前年 同期比	手持ち 工事量	前年 同期比
2008年度	73,161	1.2	22,809	5.7	1039.2	0.3	—	—	10,006	▲15.1	101,691	▲21.9	22,693	44.4	63,755	▲2.8
2009年度	68,541	▲6.3	18,344	▲19.6	775.3	▲25.4	—	—	8,865	▲11.4	82,951	▲18.4	18,257	▲19.5	51,504	▲19.2
2009年 7-9月									2,144	▲26.6	19,177	▲37.5	4,904	18.3	59,108	▲2.8
10-12月	17,816	▲10.6	3,702	▲21.7	204.6	▲20.9	791.4	11.0	2,468	▲4.9	21,223	1.0	4,010	▲39.0	55,904	▲5.4
2010年 1-3月	17,315	▲19.0	5,333	▲19.7	186.5	▲6.6	837.1	5.8	2,541	57.8	25,425	37.7	4,227	▲41.6	51,504	▲7.9
4-6月	8,623	▲24.5	4,817	7.4	195.2	▲1.1	759.7	▲9.2	2,301	34.5	21,389	24.9	4,243	▲17.1	49,765	▲3.4
7-9月	18,264	▲16.9	4,778	▲0.9	212.7	13.8	812.3	6.9	2,482	15.8	26,655	39.0	4,799	▲2.1	49,237	▲1.1
10-12月																
2010年 9月									925	11.4	9,321	16.5	2,299	27.1	49,237	▲1.3
10月	5,184	▲25.0	1,752	31.6	71.4	6.4	813.4	▲2.8	752	▲8.4	7,519	20.0	2,000	77.6	48,310	▲1.9
11月	4,987	▲8.4	1,668	48.6	72.8	6.8	847.1	4.1	802	▲8.2	7,455	29.8	1,739	25.7	47,718	▲1.2
12月																

※自動車生産台数(2010暦年):963万台

かに超えトン当たり150\$レベルになった。また、原料炭についても同様の傾向にあり、強粘結炭(豪州産対日価格)ではトン当たり220\$レベルに高騰した。(鉄鋼会社HP資料等)

また、年後半には豪州での記録的な洪水により、特に原料炭では操業停止や減産による多大な影響を生じ、鉄鋼各社による代替ソースの確保努力を行うもののスポット購入等により価格への影響も懸念されるとの報告もあった。

1.2.4 鋼材輸出入の動向

2010年の鉄鋼輸出実績は4,340万トンで2008年の3,813万トンを超えて史上最高となった。鋼材の内訳は、普通鋼鋼材が2,931万トン、特殊鋼鋼材が778万トンで、特に特殊鋼の増加が顕著であった。最大の輸出先は韓国(1,096万トン)で、以下、中国(751万トン)、タイ(484万トン)台湾(396万トン)であった。

一方で、鉄鋼輸入実績は、721万トンで主要な仕入れ先は韓国、台湾、中国であった(日本鉄鋼連盟公表)。

2010年暦年の粗鋼生産量は、1億1千万トンレベルと世界金融危機前の90%を超える水準まで回復し、企業収益も改善の兆しが見られるようになった。2011年も同レベルの粗鋼生産量が見込まれるが、現下の円高の影響や資源高騰、地球温暖化への対応を図りつつ、グローバルな市場での国際競争力の強化を図ることが一層重要な課題になるものと考えられる。

2 技術と設備

2.1 日本鉄鋼業の技術的環境

一昨年、2009年は世界金融危機の影響により、大幅な減産から増産への対応が必要であったが、2010年は概ね1億トン強のレベルで推移した。技術的には、ますますグローバル化するユーザーに対応した高度な製品技術を追求するとともに原燃料資源の劣質化、価格高騰への対応、エネルギーや地球温暖化問題への対応技術が引き続き重要な課題となっている。

一方で、2010年には、鉄鋼各社のこれまでの海外展開に加えて、インド、タイ、ベトナム、マレーシア等のアジア諸国、ブラジル、メキシコ等の中南米諸国に対して、自動車用鋼板・

表面処理技術、各種鋼管製造技術、新鉄源技術等で新たな海外展開が積極的に行われた。

鉄鋼技術分野での大型国家プロジェクトとしては、引き続き、抜本的なCO₂削減を狙った「環境調和型製鉄プロセス技術開発(COURSE50)」プロジェクト、製鉄プロセスの効率化や省エネルギーを目標とする「資源対応力強化のための革新的製鉄プロセス技術開発」、鉄鋼材料及び鋼構造体を高機能化する基盤的研究開発を行う「鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発」(いずれも経済産業省)が推進された(第3.3項参照)。

政府の科学技術政策に関しては、総合科学技術会議で2011年度からスタートする第4期科学技術基本計画の検討が進められ、鉄鋼技術分野との関連では、課題達成型のイノベーションとして、地球温暖化対策に向けたグリーンイノベーションの推進、我が国の産業競争力の強化等の重要課題に関する施策が盛り込まれた。

以下に、各分野別に主要な技術動向を概説する。

2.2 製鉄

2010年の鉄生産量は、2008年末から2009年にかけての大幅な減産から回復したため、8,228万トンと2009年の6,694万トンと比べ22.9%増となった(2008年は8,617万トン)。平均出鉄比は2009年の1.73トン/m³・日に対して、1.95トン/m³・日と、大幅に増加した。

個別高炉改修と休止・バンキングなどの動きを表4に示す。2010年末の稼働状況については、2009年末が26基に対して27基と1基増加した。内容積5,000m³以上の高炉は1基増加し13基となった。

JFEスチール(株)西日本製鉄所倉敷地区第3高炉は、2009年10月より改修に入り、2010年2月11日に火入れを行った。内容積を4,359m³から5,055m³に拡大し、高炉制御室および制御システムを全面更新した。また、高耐蝕性レンガの採用、炉体冷却設備の強化等の炉寿命延命対策も施し、従来以上の長寿命化を図っている。

同社ではまた、2009年2月から休止していた西日本製鉄所福山地区第3高炉の改修工事を決定し、2011年5月に工事を完了する予定である。炉容積の拡大もあわせて、福山地区に

表4 個別高炉の動き(2010年)

月日	吹き止め(一時休止)高炉 炉内容積	火入れ高炉 炉内容積	備考
2月11日	—	JFEスチール 倉敷3高炉 5055(m ³)	改修期間: '09年10月1日~'10年2月11日 炉内容積増加: 4359(m ³)→5055(m ³)

今後の高炉改修予定
JFEスチール 福山3高炉(2011年5月改修工事完了予定)

おける粗鋼生産能力は年間1,300万トンとなり、西日本製鉄所粗鋼生産能力2,300万トン、全社粗鋼生産能力3,300万トン体制が確立することになる。

コークス炉に関しては、JFEスチール西日本製鉄所倉敷地区第6コークス炉(B団)増設部が12月15日に稼働を開始した。「SCOPE21」で開発された要素技術である低NOx燃焼システムを採用し、環境負荷低減にも十分配慮したものとなっている。

2.3 製鋼

2010年の粗鋼生産は、製鉄同様、前年より大幅に回復している(図2)。

圧延用鋼塊に占める連铸鋼片の比率を図4に示す。毎年順調に連铸比率が増え、普通鋼が99.9%、特殊鋼は96.4%に達している。

新設備としては、新日本製鐵(株)君津製鐵所にて、真空脱ガス設備が設置された。これはエネルギー向け厚板製造や自動車用鋼板等の高級鋼需要への製造対応力を強化するため、鋼の二次精錬設備である脱ガス設備を増設し、2010年4月より本格稼働を開始したもので、設備能力は約200万トン/年である。

JFEスチール西日本製鉄所福山地区では、総額約500億円を投入し、第3製鋼能力増強工事(第7連铸機建設・スラブ手入設備建設・5RH増強)を実施した。第7連铸機は単ストランドとしては世界最大級の240万トン/年の能力で、これまでに培った操業技術を集積し2010年4月稼働以降ノーブレードアウトを継続し、業界トップクラスの垂直立ち上げで10月には21万トン/月の世界最高レベルのストランドあたり粗鋼生産量を達成した。さらに高度なモールド内溶鋼流動制御技術を導入し、自動車用鋼板等、国内外の高級鋼需要に対応している。また、連铸機建設に合わせて、スラブ手入設

備(能力100万トン/年)・第5真空脱ガス設備の増強(能力310万トン/年)も実施した。同社東日本製鉄所京浜地区では、製鋼能力増強(No2RH建設など)を行った。すなわち高級鋼の需要拡大に対応するため、総額180億円を投入し、第2真空脱ガス設備の増設(能力95万トン/年)、第1連続铸造機の機長延長を実施した。第1連続铸造機は垂直曲げ型の铸片軽圧下設備を保有する連铸機で、本設備投資によりさらに約70万トン/年の高級鋼製造が可能となった。

(株)住友金属小倉では、2010年10月に脱りん炉を稼働させて、環境・品質・コスト・物流をキーワードとした一連の製鋼革新投資を完成させた。脱りん炉ではスラグ排出量の抑制に加え、同社開発の粉体上吹き法の導入により、短時間での高効率脱りん処理が可能となっている。

新技術としては、住友金属工業(株)鹿島製鉄所および(株)住金鋼鉄和歌山では、RH酸素上吹き用スパイクノズルを開発・適用した。スパイクノズルは、数値解析により設計されたRH酸素上吹き用新型ノズルであり、高酸素流量でもスピitting発生抑制が可能という特徴を有している。これにより、二次精錬が高速化され、生産効率向上が可能となった。

トピックスとしては、住友金属工業の、低りん鋼の高効率生産と環境負荷低減の同時実現、があげられる。これは、溶銑脱りん剤として用いていた高融点の塊生石灰を、粉体にして酸素ガスとともに上吹きランスから溶銑浴面上の高温の火点へ吹き付けて、生石灰の溶解と脱りん反応を促進できる「新溶銑脱りん法(SRP-Z)」を開発したものである。更に、取鍋スラグを脱りん剤としてリサイクルすることで、脱りん率の顕著な向上とスラグの路盤材化を実現している。

その他、日本金属工業(株)衣浦製造所では、電気炉で発生するスラグを再生碎石として製品化することで下層路盤材を製造し、愛知県のリサイクル資材制度「あいくる」の認定を取得した。自然碎石の代替として資源節約の観点から、あいくる材として登録された資材は県の公共工事で率先利用される。

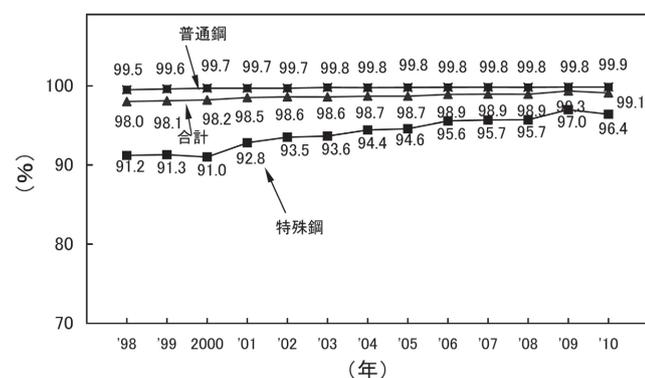


図4 圧延用鋼塊に占める連铸鋼片の比率
出所：経済産業省 経済産業政策局 調査統計部鉄工業動態統計室「鉄鋼・非金属・金属製品統計月報」

2.4 厚板・条鋼・鋼管

2.4.1 厚板関連

JFEスチールは、東日本製鉄所京浜地区厚板工場の仕上げ圧延機の直後に、高度エンジニアリング技術を用いた冷却システムを配置し、従来に比べて圧延能率や目的の温度的中精度を著しく高めた世界初の水冷中圧延を実現した(呼称:スーパーCR)。

住友金属工業は、鹿島製鉄所の厚板用加速冷却装置を全面更新した(呼称: DAC-n)。これによりグレードX100以上の超高強度ラインパイプ母材の量産化対応や厚板品質高度化を推進しエネルギー分野での一層の差別化が可能となった。本装置は2010年8月に完工し、2011年1月に本格商業生産に入る。

新日本製鐵は、大分製鐵所の厚板製造ラインに対し一貫生産能力および高機能鋼製造能力向上のため、粗圧延機と第2剪断ラインを新設。これらにより、生産能力が大幅に向上し、月産23万トン達成した。

2.4.2 条鋼関連

- ・棒鋼の設備に関しては、合同製鐵(株)船橋製造所にて、直送圧延率向上のため、①連鑄機から粗圧延機の間にビレット搬送装置を新設、②保温カバーを連鑄機シャー以降に設置、③中間圧延機1基のモーター容量を1.4倍にアップさせた。これにより粗圧延投入時のビレット温度が従来と同等になり直送率が50%強まで上昇した。2011年初頭には80%まで引き上げて燃料原単位を50%圧縮する予定である。JFE条鋼(株)仙台製造所では、表面欠陥の出やすい鑄片角部を重溶削できるホットスカーフに更新してスカーフニングの効率化とビレットの表面品質向上を図った。
- ・形鋼の設備に関しては、トピー工業(株)豊橋製造所にて、LNGサテライトを建設して加熱炉の燃料を重油からLNGへ燃料転換し、CO₂排出量を年間13万5千トン削減した。
- ・線材の設備に関しては、新日本製鐵釜石製鉄所にて、加熱炉出口側にフラッシュバット溶接機を設置して製造ライン上でビレットを接合し、エンドレス圧延法を確立した。これにより大単重コイルが供給可能になり、効率生産にも寄与した。現状の適用率は20%であるが、50%まで高める予定である。
- ・線材の製造技術に関しては、住友金属小倉で高炭素Cr鋼線の製造に適用されていたダイス伸線と焼鈍処理に替わり、3方ロール圧延機のロール形状を最適化することで製造途中での断線を抑制し、寸法形状が安定した冷間圧延法を開発し、これにより圧延での製造が可能となりコスト削減とリードタイム短縮を達成した。

2.5 計測・システム・分析

住友金属工業において、自動車の衝突安全性を評価するための落錘試験装置に対し、錘体吊り下げ台車と高精度ガイドレールを導入して改良して高精度化を行った。これにより、試験体に一定の角度で荷重を加える試験が高精度で実施できるようになった。

JFEスチールでは、鋼管に内圧をかけた状態で曲げ変形を与え、外径48インチ(1219mm)の高強度鋼管の曲げ座屈限界変形量と曲げ破壊限界量が調査できる検査装置を世界で始めて開発した。

2.6 環境・エネルギー

2.6.1 政府の取組み

2010年11月29日から12月10日までメキシコのカンクンにおいて、気候変動枠組条約第16回締約国会議(COP16)、京都議定書第6回締約国会合(CMP6)が開催された。本会議および会合における成果としては概ね以下のとおりである。

- ①COP16では、「コペンハーゲン合意」に基づく、2013年以降の国際的な法的枠組みの基礎になり得る、包括的でバランスの取れた決定が採択された。その一部として、同合意の下に先進国および途上国が提出した排出削減目標等を国連の文書としてまとめた上で、これらの目標等をCOPとして留意することとなった。これにより、我が国が目指す、すべての主要排出国が参加する公平かつ実効的な国際枠組みの構築に向けて交渉を前進させることとなった。
- ②CMP6では、京都議定書第二約束期間に対する各国の立場を害しない旨脚注で明記しつつ、COPと同様に先進国の排出削減目標をまとめた文書に留意することとなった。

2.6.2 日本鉄鋼業の取組み

日本鉄鋼連盟の統計(出典：平成22年12月、『鉄鋼業における地球温暖化対策の取組』、自主行動計画参加会社の実績値集計)によれば、2009年度の粗鋼生産量は9,372万トンと、1990年度比10.5%減となった。このような中、省エネ対策を積極的に推進することにより、2009年度のエネルギー消費量は2,018PJと、1990年度比で17.2%の減少となった。また、エネルギー起源CO₂排出量は165.6百万トン-CO₂と、1990年度比17.5%の減少となった。

日本鉄鋼連盟は、2010年12月に「鉄鋼業の環境保全に関する自主行動計画」として、以下の取組み内容を明らかにした。

a) 鉄鋼生産工程における省エネルギーへの取組み

- ①粗鋼生産量1億トンを前提として、2010年度の鉄鋼生産工程におけるエネルギー消費量を、基準年の1990年度に対し、10%削減(エネルギー消費量の10%削減に見合うCO₂排出量は9%削減として設定)。
- ②ただし、粗鋼生産が1億トンを上回る状況においても京都メカニズムの活用等も含め目標達成に最大限努力する。
- ③上記目標は、2008～2012年度の5年間の平均値として達成する。

b) 社会における省エネルギーへの貢献

- ①集荷システムの確立を前提に、廃プラスチック等を100万トン活用。
- ②製品・副産物による社会での省エネルギー貢献
- ③国際技術協力による省エネルギー貢献
- ④未利用エネルギーの近隣地域での活用

⑤民生・業務・運輸における取組みの強化

c) 革新的技術開発への取組み (COURSE50)

- ①高炉ガスからのCO₂分離回収技術
- ②コークス炉ガス改質水素による鉄鉱石の還元技術

また、日本鉄鋼連盟は、2009年11月に「日本鉄鋼業の地球温暖化問題への取組みの考え方」として「日本鉄鋼業は、世界最高水準のエネルギー効率の更なる向上を図るとともに、日本を製造・開発拠点としつつ、製造業との間の密接な産業連携を強化しながら、エコプロセス、エコプロダクト、エコソリューションを世界に発信し、日本経済の成長や雇用創出に貢献するとともに、地球温暖化対策に積極的に取り組む」ことを明らかにした。

このうち、エコプロダクトについては、2020年の目標として、3,000万トンのCO₂排出削減効果を推定しており、2009年度で1,881万トンの貢献をしていると推定している。

また、エコソリューションについても、2020年の目標として、7,000万トンのCO₂排出削減効果を推定しており、2009年度で3,300万トンの貢献をしていると推定している。

2.6.3 鉄鋼各社の取組み

新日本製鐵棒線事業部釜石製鐵所は、経済産業省系の補助制度を活用し、林地残材バイオマスの既設石炭火力発電所（発電出力149,000KW）での石炭混焼試験を2010年10月から開始した。今後は、操業状況を見極めながら段階的に混焼率を上げていき、2011年3月まで実証試験を継続する。将来は混焼率2%で年間5,000トンの林地残材バイオマス資源を活用し、年間約7,000トンのCO₂削減を見込んでいる。

新日本製鐵と(株)神戸製鋼所は、「製鉄ダスト系副産物のリサイクル及び還元鉄の生産・利用に関する共同事業の推進」の一環として、新日本製鐵広畑製鐵所構内に回転炉床式還元炉(RHF)、ホットブリケットマシンを新たに建設し、関西圏全体での効率的な製鉄ダストのリサイクルとゼロエミッション推進に取り組む。今回建設のRHFは、原料処理能力が約22万トン/年、2011年10月の稼働を予定。

JFEスチールは、2010年8月にインドネシアにおいて「マリブロック™」を用いたサンゴ礁再生の本格的な実証試験を開始した。「マリブロック™」は、鉄鋼製造工程で副産物として生じる鉄鋼スラグに二酸化炭素を吹き込み固化したもので、サンゴや貝殻と同じ主成分を有し、海草やサンゴ着生効果を持つ藻場・サンゴ礁造成用ブロックである。

なお、環境改善に貢献する新製品が、各社から幾つか発表されている。詳細は新製品項を参照されたい。

2.7 その他

2.7.1 スラグ、ダスト関連

- ・スラグ：2010年は、高炉各社がスラグの海洋利用を目指した実証試験を拡大している。高炉スラグや製鋼スラグを用いて、新日本製鐵が藻場再生用ブロック、JFEスチールがサンゴ再生用ブロック、住友金属工業と神戸製鋼所が人工漁礁を製造し実証試験を展開中である。
- ・ダスト：スチールプラントック(株)が電炉から発生するダストからZn、Feの回収と無害化を実現した溶融還元方式の処理プロセスを実用化し、その1号機を台湾で稼働させた。

2.7.2 大型油圧式自由鍛造プレス関連

2010年は、世界的エネルギー需要の成長を見越した原子力発電関連、あるいは石油精製関連や船舶関連の大型鍛鋼品事業拡大のため、(株)日本製鋼所では1万4千トン油圧プレス、神戸製鋼所では1万トン油圧プレス、日本鑄鍛鋼(株)では1万3千トン油圧プレスが竣工した。これに合わせ日本製鋼所と日本鑄鍛鋼では世界最大の650トン鋼塊実用化開発にも着手した。

これ以外でも、山陽特殊鋼(株)では5千トン油圧プレス、太平洋製鋼(株)では8千トン油圧プレスの導入が決定している。

2.7.3 その他

愛知製鋼(株)では、急拡大が予想されるネオジウム系異方性ボンド磁石用磁粉の量産工場が竣工した。粉体の特性を生かした流体搬送技術を開発して連続工程・自動化生産を可能とし、完全無酸化雰囲気での製造も可能となった。生産能力は、2012年度で月産100トンを目指す。

3 技術貿易・技術開発

3.1 技術貿易

2010年の1年間における技術貿易の内訳について、本会維持会員企業(79社)を対象に調査した結果を表5に示す。技術輸出は2009年の17件に対して15件と減少した。輸入は2010年には実施されなかった(2009年は1件)。

輸出対象地域は、アジアが全体の33%を占め、次いで北アメリカ、中南米が続く。技術分野では鋼管分野が100%を占めている。

図5に鉄鋼業の2009年度までの技術貿易収支を示す。技術輸出対価受け取り額は前年度よりも3%増加し、技術輸入対価支払い額は大きく減少(-59%)した。

3.2 研究費支出・研究者数

総務省統計局「科学技術研究調査結果」にある企業等第1表のデータに従い、以下の3項目に関する推移を図6～図8に示す。

3.2.1 売上高対研究費支出比率

全産業・鉄鋼業とも支出比率が前年対比増加した。両者とも売上高と研究費が減少したが、売上高減少額に比較し研究費減少額がさほど大きくないためである。

2010年の鉄鋼業は売上高減少額が大きく、これを反映して支出比率が1.39と増加した（前年対比+0.42）。

表5 技術輸出・技術輸入状況（期間：2010年1月1日～12月31日）

技術分野	地域	アジア	北アメリカ	中・南アメリカ	ヨーロッパ	その他	計	
技術輸出	A. 原料・製鉄	1. 原料処理						
		2. 高炉						
		1. 溶銹処理						
	B. 製鋼	1. 溶銹予備処理						
		2. 転炉						
		3. 電炉						
		4. 連鑄・造塊						
		5. 付帯設備						
	C. 加工・処理	1. 条鋼・線材						
		2. 鋼管	5	4	3		1	2
		3. 厚板						
		4. 薄板						
		5. 表面処理						
		6. 熱処理						
		7. 成形加工						
8. 溶接棒・加工部品								
D. 操業全般（研究を含む）								
E. 製鉄所全般	1. フェージング/スケール							
	2. 製鉄所計画・設計							
	3. 総合的操業指導							
	4. その他							
計	5 (7)	4 (3)	3 (2)	(2)	1	2 (3)	15 (17)	
技術輸入	C. 加工・処理	1. 条鋼・線材						
		計						0 (1)

調査範囲：日本鉄鋼協会維持会員企業 79社
 ()内は2009年1月1日～12月31日実績を示す。

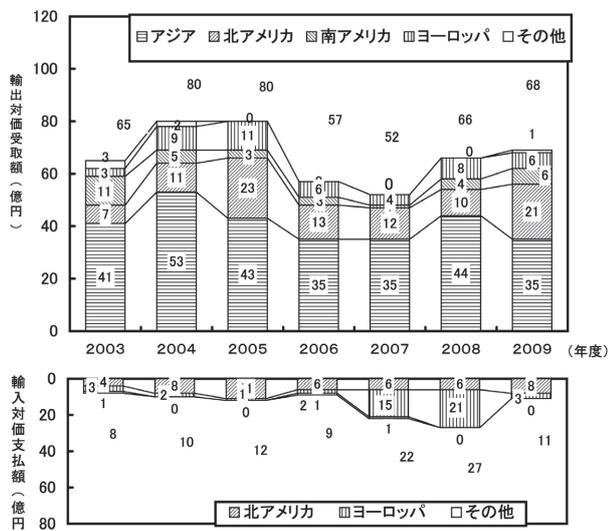


図5 鉄鋼業の技術貿易収支
 出所：総務省統計局統計センター「科学技術研究調査報告」

3.2.2 従業員1万人あたりの研究本務者数

鉄鋼業では従業員数の減少が大きかったため、2009年の345人から2010年は396人と大きく増加した。一方、全産業も増加傾向が継続した。全産業の研究本務者数は、約49万人

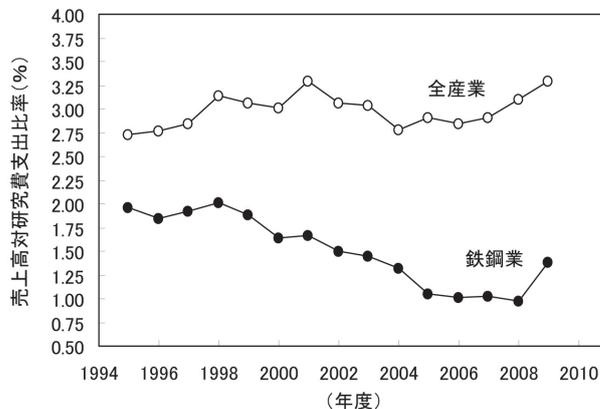


図6 売上高対研究費支出比率の推移
 出所：総務省統計局統計センター「平成22年科学技術研究調査結果」

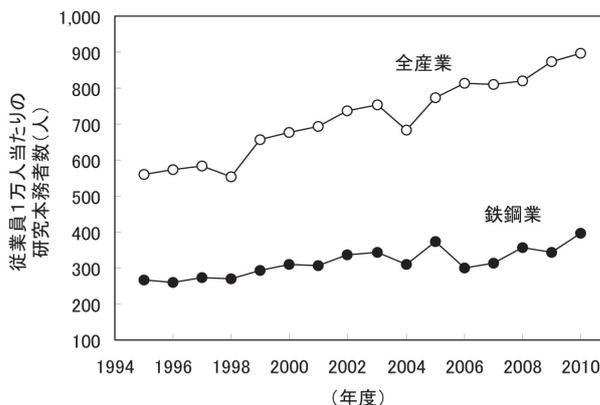


図7 従業員1万人当たりの研究本務者数の推移
 出所：総務省統計局統計センター「平成22年科学技術研究調査結果」

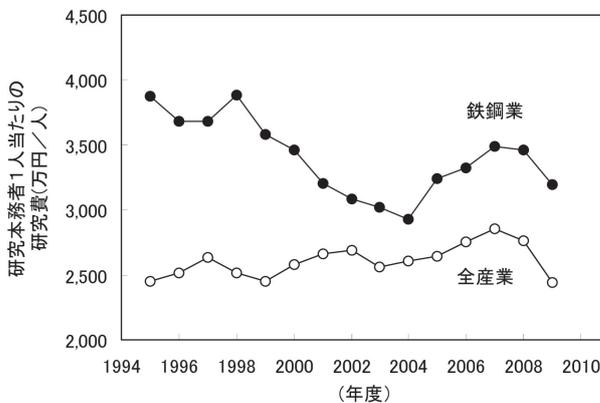


図8 研究本務者1人当たりの研究費の推移
 出所：総務省統計局統計センター「平成22年度科学技術研究調査結果」

と前年度とほぼ同等であった。

3.2.3 研究本務者1人あたりの研究費

2009年の経済環境の影響で、全産業・鉄鋼業とも研究費が大きく減少した反面、研究本務者数の減少が少なかったため、研究本務者1人あたりの研究費は、いずれも大幅に減少した。

3.3 公的資金を活用した研究開発の動向

鉄鋼関連の技術開発プロジェクトに関しては、2010年度終了テーマは、①「腐食試験装置に関する調査」、②「チタン革新製造プロセス開発」などである。

2010年度着手の主なプロジェクトとしては、①「難利用鉄系スクラップの利用拡大のための研究開発」(2010～2012年度)、②「水素製造・輸送・貯蔵システム等に使用する金属材料開発および国際標準化、規制見直しに資する評価試験法の開発、材料データの取得に関わる研究開発」(2010～2012年度)、③「複雑系数理モデル学の基礎理論構築とその分野横断的の科学技術応用」(2010～2012年度)、④「収束イオンビーム/レーザーイオン化法による単一微粒子の履歴解析装置」(2010～2012年度)、⑤「超急冷遷移制御噴射技術で非晶質/ナノ組織金属の大面积薄膜開発」(2010～2011年度)などである。

また、主要継続プロジェクトは、①「資源対応力強化のための革新的製鉄プロセス技術開発」(2009～2011年度、低廉次世代コークスの製造とそれを利用した高炉操業プロセスの開発、2010年度4.2億円)、②「戦略的原子力技術利用高度化推進」(2009～2011年度、主要原子力資機材研究開発等の支援、2010年度14.8億円)、③「環境調和型製鉄プロセス技術開

発」(2008～2012年度、高炉からのCO₂排出量削減技術と高炉ガスからのCO₂分離技術の開発、2010年度18.6億円)、④「鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発」(2007～2011年度、高級鋼材の革新的溶接接合技術の開発と先端的制御鍛造技術の基盤開発、2010年度3.5億円)、⑤「先進超々臨界圧プラント(A-USC)技術開発」(2008～2016年度、2010年度7.4億円)などである。

公的資金を取得して行っている鉄鋼関連の研究・技術開発テーマについて、本会の主要な維持会員会社に調査した結果を表6に示す。プロセス、環境・エネルギー分野、材料開発分野などで多くのテーマが取り組まれている。

4 技術人材育成

本会では、これまでも業界横断的な技術系中核人材育成を目的として、各種の育成事業(鉄鋼工学セミナー、鉄鋼工学セミナー専科、鉄鋼アドバンスセミナー、学生鉄鋼セミナー)を実施しているが、2010年には2011年度から開始する以下の新事業の企画立案を行った。

一つは、大学と産業界の人材育成のギャップを埋め、連携することで我が国の産業競争力の維持、向上を図る目的で、2008年度から、経済産業省の施策として実施してきた「産学連携人材育成パートナーシップ」事業の継承である。この事業の中では、基礎教育強化事業や目的型インターンシップ事業、開発マネジメント事業を試行してきたが、2011年度から、主に基礎教育強化事業を本会の育成事業に取込んで実施する予定である。

また、大学学部生の低学年を対象に、ものづくり産業であ

表6 鉄鋼業における公的資金取得研究テーマの一例

分類	事業名称	委託元	開始年度	終了年度
プロセス・製品	難利用鉄系スクラップの利用拡大のための研究開発	(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構	2010	2012
	低炭素型雇用創出産業立地推進事業	経済産業省	2010	2010
	平成21年度「生産効率向上の研究」：「腐食試験装置に関する調査」	(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構	2009	2010
	戦略的原子力技術利用高度化推進	経済産業省(資源エネルギー庁)	2009	2011
	チタン革新製造プロセス開発	(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構	2009	2010
	資源対応力強化のための革新的製鉄プロセス技術開発	(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構	2009	2011
要素技術	農工循環資源を利用した亜寒帯沿岸域藻類によるCO ₂ 吸収実証モデル事業	経済産業省(北海道経済産業局)	2009	2010
	水素製造・輸送・貯蔵システム等に使用する金属材料開発および国際標準化、規制見直しに資する評価試験法の開発、材料データの取得に関わる研究開発	(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構	2010	2012
	収束イオンビーム/レーザーイオン化法による単一微粒子の履歴解析装置	(独)科学技術振興機構	2010	2012
	超急冷遷移制御噴射技術で非晶質/ナノ組織金属の大面积薄膜開発	(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構	2010	2011
	次世代パワーエレクトロニクス技術開発(グリーンITプロジェクト)	(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構	2009	2012
製品	低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト	経済産業省	2010	2014
	先進超々臨界圧プラント(A-USC)技術開発	経済産業省(資源エネルギー庁)	2008	2016
	FCA鋼の鉄道台車枠適用開発に関する技術	国土交通省((独)鉄道・運輸機構)	2009	2012
その他	複雑系数理モデル学の基礎理論構築とその分野横断的の科学技術応用	(独)日本学術振興会	2010	2014
	産炭国共同基礎調査 コークス製造適用性評価(インドネシア)	(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構	2010	2010

る鉄鋼産業の魅力を伝えて業界への関心を喚起する目的で、鉄鋼企業の経営幹部が順番に講義を行う大学特別講義を新たなプログラムとして実施する予定である。

5 協会における技術創出活動

5.1 技術部会

本会では、鉄鋼生産技術に関する研究および技術開発課題発信を生産技術部門が中心となって行っている。その活動の種類および内容を表7に示す。

特に本会特有の活動を推進している技術部会は、部会大会を定期的に開催し、現時点で重要な課題を共通・重点テーマとして調査等を行い、活発な議論を行っている。2010年度の部会大会は、2009年度とほぼ同様に35の大会（春季17大会、秋季18大会）が開催された。参加者延べ人数は2,860名（2009年度2,667名）であった。部会大会への大学研究者の延べ参加人数は64名（2009年度61名）と、2009年度と同水準であった。

また、技術部会は、学術部会との産学連携が定着し、部会大会への大学研究者の参加や、学術部会との合同企画など交流が推進されている。

特定技術課題を共同で重点的に検討する技術検討会も、2010年度には16技術検討会が活動し、「耐火物の破壊モデル構築」（耐火物部会）等6件が終了、「熟練技能が必要な分析手法の技術伝承」（分析技術部会）等10件が新規にスタートした。

また、若手技術者対象の講演会や異業種見学・講演会など部会活性化を狙った企画が2009年度に引き続き実施された。

5.2 技術検討部会

分野横断的、業際的技術課題を検討する技術検討部会は期間を3年以内として活動している。

「実用構造用鋼における環境対応」を共通テーマとした技術検討部会の活動が2009年度から活動を開始し、今年度は

引き続き溶接構造用鋼、機械構造用鋼における環境対応（省資源・省エネルギー／CO₂削減）技術の調査研究が行われた。

「自動車用材料」検討部会は、2010年度から第Ⅵ期の活動を開始した。特に、CO₂削減の主要技術となるパワートレーンの改善、ハイブリッドカー、電気自動車などの環境対応車における技術開発やライフサイクルアセスメントでの評価などに対する鉄鋼材料へのニーズ抽出することを重点課題としている。

5.3 研究助成・研究会

「鉄鋼研究振興助成」では、2011年度の助成対象者として新たに41件（若手20件）が採択され、2010年度に採択された33件と合わせて2011年度には合計74が助成されることになった。

「研究会」は、2010年度23研究会が活動し、その内の6研究会が2011年3月に終了した。

2010年度には、知識集約型（A型）、技術開発型（B型）、鉄鋼関連新分野探索型（C型）の各研究会で、6件が新規に活動を開始した（表8）。なおA、B、C型研究会制度は2010年度で終了し、2011年度からは新たに研究会Ⅰ（シーズ型）、研究会Ⅱ（ニーズ型）制度が導入されることとなり、新規案件として6研究会が採択された（表9）。

「産発プロジェクト展開鉄鋼研究」では、2007年度採択の2件が2010年度で終了した。2009年度は、残念ながら新規採択がなかったが、2010年度採択の1テーマが活動中である。2011年度案件としては、新たに1件の採択が決まっている（表10）。

謝辞

本稿の起草にあたって各段のご協力をいただいた日本鉄鋼連盟および本会関係者の労に対し、深く感謝の意を表します。

(2011年3月2日受付)

表7 技術部会の活動内容

技術創出活動の種類	活動内容
技術部会	現場技術水準の向上を目指し、鉄鋼生産に関する技術交流を図るとともに、各分野における技術課題を抽出、研究の実行を行っている。鉄鋼製造全般にわたる19部会*が活動し、各部会には鉄鋼企業の技術者、研究者の他大学研究者も参加している。年1～2回部会大会を開催し、また下部組織には技術課題を重点的に議論する「技術検討会」が置かれ、技術創出を担う活動が行われている。
技術検討部会	鉄鋼生産プロセスの各分野にまたがる分野横断的、または業際的技術課題に対して、技術の方向と課題解決のための技術討議、調査等の研究活動を行っている。現在2部会**が活動している。また、来年度からは新たに日本压力容器研究会が压力容器用材料技術検討部会となる予定である。
研究会	鉄鋼企業からのニーズと大学等研究機関からのシーズに基づき、重要なテーマについて産学協同で研究を行っている。2011年2月末現在23研究会が活動している。

* 技術部会 …………… 製鉄部会、コークス部会、製鋼部会、電気炉部会、特殊鋼部会、耐火物部会、厚板部会、熱延鋼板部会、冷延部会、表面処理鋼板部会、大形部会、棒線圧延部会、鋼管部会、圧延理論部会、熱経済技術部会、制御技術部会、設備技術部会、品質管理部会、分析技術部会

** 技術検討部会 …… 自動車用材料検討部会（第Ⅴ期）、実用構造用鋼における環境対応技術検討部会

表8 2010年度活動 研究会

No.		型	研究会名	部会	主査	研究期間
1	終了	A	鉱石・炭材の近接配置による高炉の還元平衡制御	高プロ	清水正賢(九大)	H19～H22年度
2	終了	A	マテリアル・ビジョン2100	環境社会	稲葉 敦(工学院大)	H19～H22年度
3	終了	A	加工硬化特性と組織	材料	東田賢二(九大)	H19～H22年度
4	終了	C	エージェント技術による製鉄所「現場力」の維持・発展	計測	玉置 久(神戸大)	H19～H22年度
5	終了	C	バイオフィルムと鉄鋼材料との相互作用	材料	佐藤嘉洋(大市大)	H19～H22年度
6	終了	B	マルチフェーズ利用による溶銑脱磷プロセスシミュレーション	製鋼	伊藤公久(早大)	H20～H22年度
7	終了	B	リスクアセスメント手法による設備管理方法	設備技術	酒井信介(東大)	H20～H22年度
8	継続	A	非金属介在物の固相内組成組織制御	高プロ	北村信也(東北大)	H20～H23年度
9	継続	A	高温材料のフィジカル・メタラジー	材料	土井 稔(愛知工大)	H20～H23年度
10	継続	A	鋼管二次加工性評価試験方法の標準化	創形	三原 豊(香川大)	H20～H23年度
11	継続	C	グリーンエネルギー製鉄	環境社会	月橋文孝(東大)	H20～H23年度
12	継続	A	水素脆化研究の基盤構築	材料	高井健一(上智大)	H21～H24年度
13	継続	A	ミクロ・マクロ偏析制御	高プロ	江阪久雄(防衛大)	H21～H24年度
14	継続	A	低炭素焼結技術原理の創成	高プロ	葛西栄輝(東北大)	H21～H24年度
15	継続	B	鉄鋼スラグ中フリーCaOのキャラクタリゼーション技術の標準化	分析技術	田中龍彦(理科大)	H21～H24年度
16	継続	C	ばらつきのない製造を実現する大量データ活用型モデルベース制御技術	計測	藤崎泰正(阪大)	H21～H24年度
17	継続	C	新世代中性子源を利用した鉄鋼元素機能	分析	大沼正人(NIMS)	H21～H24年度
18	新規	A	合金化溶融亜鉛めっき鋼板の皮膜特性に及ぼす鋼中Si添加の影響	材料	山口 周(東大)	H22～H24年度
19	新規	A	計算工学による組織と特性予測技術Ⅱ	材料	小山敏幸(名工大)	H22～H24年度
20	新規	A	劣質・未利用炭素資源コークス化技術	高プロ	青木秀之(東北大)	H22～H24年度
21	新規	A	精錬反応プロセスにおける混相流・多重スケール解析技術の開発	高プロ	熊谷剛彦(北大)	H22～H24年度
22	新規	A	鋼中非金属介在物粒子の多面的評価	分析	井上 亮(東北大)	H22～H24年度
23	新規	B	熱延ROT冷却モデル構築	圧延理論	大久保英敏(玉川大)	H22～H24年度

表9 2010年度採択 研究会

No.		型	研究会名	部会	主査	研究期間
1	採択	I	鉄鋼材料の組織と延性破壊	材料	高木節雄(九大)	H23～H25年度
2	採択	I	低炭素高炉実現を目指した固気液3相の移動現象最適化	高プロ	植田 滋(東北大)	H23～H25年度
3	採択	I	炭素循環製鉄	環境社会	加藤之貴(東工大)	H23～H25年度
4	採択	I	素材産業から見た自動車リサイクル	環境社会	松八重一代(東北大)	H23～H25年度
5	採択	II	粒子法による製鋼プロセス解析ツール開発	製鋼	鈴木俊夫(東大)	H23年度
6	採択	II	鉄鋼分析における技術基盤の再構築を指向した統合型データベース開発	分析技術	上原伸夫(宇都宮大)	H23～H25年度

表10 産発プロジェクト展開鉄鋼研究の研究テーマ

採択	研究テーマ	主査	研究期間	研究目的
2008年度	鉄鋼材料を対象とした凝固過程のその場観察手法の開発と応用	安田秀幸 (大阪大)	H20～22年度 (3年間)	連続製造をはじめ凝固プロセスは、鑄片品質に大きな影響を与えるプロセスで、品質向上、生産性向上のために、偏析とそれに関連する割れなど革新すべき課題がある。本研究では、課題解決の基礎となる放射光を用いた鉄鋼材料のその場観察手法を開発、Fe-Si、Fe-Al、炭素鋼における凝固現象のダイナミクスを明らかにする。
"	ダストメイキングテクノロジーの開発	長坂徹也 (東北大)	H20～22年度 (3年間)	ダストの形態制御と強磁場適用によるダストメイキングテクノロジーを開発し、オンサイト型の新しい製鋼ダスト処理エコプロセスの基礎を確立する。研究期間終了後は、実用レベルでのプラント試験を行うためにNEDO等の大型プロジェクト獲得を目指す。
2010年度	海洋環境での製鋼スラグの利用技術開発	月橋文孝 (東大)	H22～24年度 (3年間)	製鋼スラグの有効利用のため、製鋼スラグ及びその混合材による、海洋域造成材、海洋植物成長促進のための材料としての利用、海洋環境の修復・保持材としての利用効果を明らかにする。
2011年度	4Dイメージング実現による鉄鋼材料研究の飛躍的高度化	戸田裕之 (豊橋科技大)	H23～25年度 (3年間)	軽金属で開発されてきたX線トモグラフィーを活用した3D/4Dイメージングと応用技法を鉄鋼材料に適用可能にし、鉄鋼の変形・破壊過程を4D「その場観察」、局所的な変形挙動や3Dミクロ構造との関係を定量評価して塑性変形・破壊機構を解明する。

★新製品★

本会維持会員企業において2010年に開発が終了した新製品を表11に示す。

表11 新製品一覧表

分類	会社名	製品名	内容	発表時期
建築向け製品	J F E スチール	建築構造用 550N/mm ² TMCP 鋼材「HBL385B-L」	最適な化学成分と熱加工制御の組合せによって降伏比 80% 以下、降伏耐力 385N/mm ² 以上、引張強度 550N/mm ² 以上を実現。	2010. 8
		建築構造用低降伏比 780N/mm ² 鋼材 「JFE-HITEN780TB」 「JFE-HITEN780TC」	最適な化学成分と製造工程の組合せによって降伏比 85% 以下、降伏耐力 630N/mm ² 以上、引張強度 780N/mm ² 以上を実現。	2010. 3
	住友金属工業	建築構造用 1000N/mm ² 級 熱間圧延鋼材「SSS1000」	建築構造用圧延鋼材（鋼板）では世界初の従来鋼比で 2 倍の引張強さを持つ 1000N/mm ² 級の建築用鋼材。	2010. 6
	日本金属工業	塗装ステンレス鋼板 「スワンカラー F 遮熱」	従来の耐候性はそのままに遮熱性能を高めた新しいフッ素樹脂 塗装ステンレス鋼板	2010. 4
土木向け製品	J F E スチール	高強度 SC 杭 高強度「つばさ杭」	国内最大強度となる 570N/mm ² 級鋼管杭『JFE-HT570P』を用いた 高強度 SC 杭を開発。『JFE-HT570P』を適用した『つばさ杭』の 国土交通大臣認定も取得。	2010. 12
自動車向け製品	J F E スチール	ユニハイテン	自動車外板パネル部品向けに開発した 440MPa 級 BH 鋼板。 部品の降伏強度を高めて耐デント性を向上させ、軽量化に寄与。	2011. 1
	住友金属工業	高強度電磁鋼板「SXRC」	マイクロ組織制御により、高強度と低エネルギー損失を両立した ハイブリッド車等の高効率モータ用電磁鋼板。	2010. 1
		トラック・バス用 新アルミホイール	ポスト新長期排ガス規制適合車に使用される高輝度・軽量かつ 耐久性に優れた新・ISO方式の一体鍛造アルミホイール。	2010. 6
	神戸製鋼所	高強度懸架ばね用鋼 「ACROS1950」	高い腐食耐久性と、合金コスト高騰リスクの低減を両立できる 1200MPa 級懸架ばね用鋼。	2010. 12
日新製鋼	自動車エンジン・スタマホールド [®] 用 フェライト系ステンレス鋼 「NSSEM-C」	高価な元素の Mo を含まないで SUS444 系と同等の耐熱性を有 する。熱疲労特性に優れ、自動車エンジン・スタマホールド [®] に採用。	2010. 1	
産業機械向け 製品	新日本製鐵	Ni 低減型 LNG タンク用鋼 (6%Ni 鋼)	極低温使用環境から従来は 9%Ni 鋼が使用されていたが、TMCP 技術との組み合わせなどから Ni 量を 6% にまで低減した。	2010. 9
	J F E スチール	「JIP FM1300」	Ni を含有せず、Mo 合金鋼粉の表面に Mo を被覆した鉄粉。焼結 し浸炭焼入れで引張り強さ 1300Mpa 以上を得られる。	2010. 8
エネルギー分野 向け製品	新日本製鐵	高変形能 UOE ラインパイプ	極低温 (-40℃) 環境下の地震地帯で使用可能な高変形能及び 極低温靱性を兼ね備えた UOE ラインパイプ。	2010. 12
	J F E スチール	マイティーシーム [®]	電縫溶接部の酸化物の形態や分布を制御し、アレイ UT による 高精度の全長保証した溶接部品質に優れた高性能電縫鋼管。	2010. 12
その他製品	J F E スチール	カブテンコート TM AQUA	開発処理剤から発生する VOC 量を 80% 以上削減した、環境に やさしい耐候性鋼の水系さび安定化補助処理剤。	2010. 6
		「SP3」	パーライトラメラ組織を極限まで微細化させた重貨物鉄道用 高耐摩耗レール。	2010. 4
	住友金属工業	電磁式動揺防止制御装置	鉄道車両の横揺れを打ち消す方向に電磁アクチュエータを配備 ・動作させることで、乗り心地を大幅に改善する装置。	2010. 9
	神戸製鋼所	スチールコード用 SD 線材	スチールコード製造工程における中間熱処理省略やダイス寿命 改善を実現できる、高い伸線性を実現した線材。	2010. 12
	新日鐵住金 ステンレス	省資源型高耐食高純度 フェライト鋼 NSSCFW シリーズ [®]	Sn 添加技術により、高耐食性と極めて高い加工性に加え、さら なる省資源化・価格安定化を実現したステンレス鋼。	2010. 7 2010. 12
		日立金属	「DAC-MAGIC」	耐ヒートクラック性、耐冷却孔割れ性、被削性の 3 つの特性を 高次元で満足した高性能ダイカスト金型材料
	日本金属工業	下層路盤材 (クラッシュラン 鉄鋼スラグ)	鉄鋼スラグから下層路盤材を製造。愛知県リサイクル資材評価 制度「あいくる」の認定を取得。	2010. 6
	日本冶金工業	「NASNM17」	独自開発の加工性に優れた 17Cr-17Mn-7.3Ni 組成の非磁性軟質 ステンレス鋼。	2010. 4

☆生産技術のトピックス☆

2010年の注目すべき技術開発、新設備、新製品などの概要をご紹介します。

1. 低りん鋼の高効率生産と環境負荷低減の同時実現

住友金属工業（株）

住友金属工業は、溶銑脱りん工程において、脱りん剤である高融点（2000℃以上）の生石灰を粉体にして酸素ガスとともに溶銑へ吹き付けて生石灰の溶解を促進させることにより、高効率で溶銑脱りんできる技術（SRP-Z）を開発し、世界で初めて実用化に成功した。現在、本技術は住友金属工業／鹿島製鉄所、住金鋼鉄和歌山、住友金属小倉で実施されている。

また、鹿島製鉄所では取鍋スラグの脱りん炉へのリサイクルを実現した。取鍋スラグ中の Al_2O_3 は生石灰の溶解を促進することが知られていたが、スラグの泡立ちを促進するため炉口からのスラグ横溢が生じ操業が困難だった。生石灰粉体を吹き付ける本技術はスラグの泡立ちが抑制できるため、取鍋スラグを脱りん促進剤として有効利用することが可能になった。

さらに、新プロセスSRP-Zは脱りん能力の向上に加えて、以下の副次効果を生み出している。

- (1) 生石灰利用率向上による生石灰原単位の削減
- (2) 生石灰の溶解率向上による脱りんスラグの路盤材化負荷軽減（養生時間の短縮）
- (3) 粉体上吹きによるダスト低減

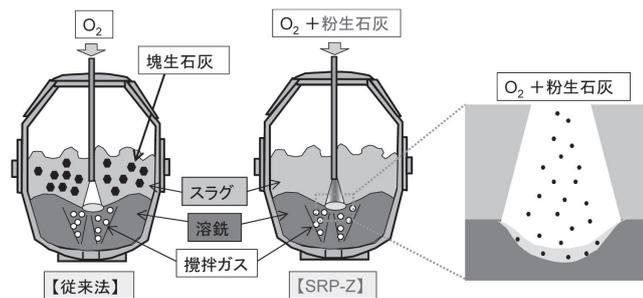


図 粉体上吹き溶銑脱りん法の概念図

2. 原油タンカー用高耐食性鋼板「NSGP®-1」

新日本製鐵（株）

新日本製鐵と日本郵船（株）は、原油タンカーの貨物油タンク底面の腐食を防ぐ高耐食鋼性鋼板「NSGP®-1」を共同で開発した。日本郵船は、NSGP-1を原油タンカーに世界で初めて全面的に採用しており、新日本製鐵の累計出荷量は6隻分で1万トンを超えた。

NSGP-1材は、腐食防止のための塗装を省略することが出

来ることから、船舶の安全性を高めるとともに地球環境に優しい鋼板である。

一般に耐食鋼は多量の合金を添加するため、溶接性が低下するが、本鋼材は少量の合金を最適に組み合わせることで、従来の鋼板に比べ約5倍の耐食性を実現しながら、溶接や加工を従来の鋼材と全く同等に施すことが可能である。

2010年に原油タンカーの貨物油タンクの腐食防止措置を規定した国際条約が採択され、塗装とともに日本提案の耐食鋼が有効な耐食技術として認められた。これは1999-2002年に産学官共同で実施された（社）日本造船研究協会第242研究部会「原油タンカーの新形コロージョン挙動の研究」による貨物油タンク内の腐食の基礎的実態の明確化、NSGP-1の5年に渡る実船適用結果と日本郵船の全面的採用が大きな役割を果たしている。2013年1月以降の契約船から腐食防止措置が義務化されるため、本格的な需要増大が期待されている。



図 NSGP-1を採用した超大型原油タンカー（日本郵船（株）提供）

3. 橋梁用高降伏点鋼板「SBHS」JIS化後初採用

新日本製鐵（株）

新日本製鐵製造の橋梁用高降伏点鋼板SBHS（Steels for Bridge High Performance Structure）が、東京都福生市とあきる野市を結ぶ多摩川に架かる「永田橋」（東京都建設局発注）に採用された。SBHSがJIS規格材として制定されて以降、初の物件（鋼重約600トン）である。

SBHSは従来鋼と比べ、高強度・高韌性で、溶接性、冷間加工性にも優れた橋梁用高性能鋼材である。構造設計上の基準強度である降伏強度が従来鋼より10～20%高く、軽量化など経済的な設計が可能となる。また、強度向上を溶接性や加工性を阻害する合金類の添加ではなく、制御冷却プロセス（CLC- μ ）を駆使した鋼材組織の造り込み技術で実現しているため、溶接性や冷間加工性にも優れている。

「永田橋」は、国内初となるスペーストラス構造形式で、4径間連続・全長約250mの大型橋梁。パイプトラス構造で

あることから、極厚かつ冷間曲げ加工、現場溶接可能な鋼材が必要となり、最大板厚67mm、高靱性200J、降伏強度500N/mm²のSBHS500が採用され、曲げ半径5トンの強冷間曲げ加工により鋼管を製造した。発注者によると複合トラス形式を採用することで透明感が増し、自然との調和が図れ、軽量化によるコスト縮減が可能となった。新日本製鐵製造のSBHS500はこの軽快感のある美しい橋梁の実現に貢献している。

SBHSの前身であるBHS (Bridge High Performance Steel) は、産学共同で開発され2004年に(社)鉄鋼連盟橋梁用鋼材研究会により日本鉄鋼連盟製品規定が策定された。BHS500は“東京ゲートブリッジ”等に約17千トン採用され、新日本製鐵は約16.5千トンを製造している。これら実績を踏まえ2008年にJIS G3140“橋梁用高降伏点鋼板”が制定された。橋梁用厚板に関するJIS規格鋼材としては、実に40年振りとなる新規格制定である。また、「橋梁用高性能鋼BHSの開発・実用化」として2010年度JSSC業績表彰協会賞を受賞(東工大三木教授、橋梁用鋼材研究会)した。



図1 永田橋(東京都西多摩建設事務所提供)



図2 東京ゲートブリッジ(国土交通省東京港湾事務所提供)

4. 省資源型高耐食高純度フェライト系ステンレス鋼 NSSC FWシリーズ

新日鐵住金ステンレス(株)

新日鐵住金ステンレスは、独自に開発した世界初の微量Sn(錫)添加によるフェライト系ステンレス鋼の耐食性を飛躍

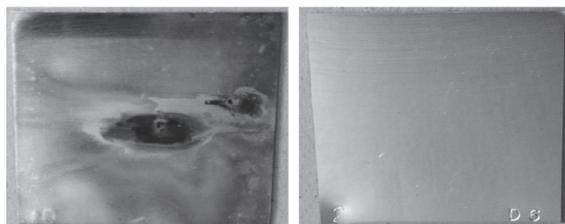
的に向上させる技術(図)を用いて、新たに「省資源型高耐食高純度フェライト系ステンレス鋼NSSC®FW(フォワード)シリーズ」を開発・商品化した。

NSSCFWシリーズ(FW1、FW2)は、当社の高純度化技術と微量Sn添加技術の組合せによるものであり、Snは、不働態皮膜の安定性を高め、また不働態被膜の再生能にも寄与しているものと考えている。

NSSCFW1(14Cr-0.1Sn鋼)は、既存の17%Cr鋼であるSUS430、SUS430LX以上の耐食性と高加工性を実現しており、Cr含有量を約20%削減している。NSSCFW2(16Cr-0.3Sn鋼)は、SUS304と同等もしくはそれ以上の耐食性と優れた加工性を有していると同時に、CrおよびNiの含有量をSUS304に対し、合わせて約40%削減することに成功している。

FWシリーズは、大幅な省資源化を達成したフェライト系ステンレス鋼で、価格安定性にも優れており、2大代表鋼種(SUS304、SUS430)に続く、第3の代表鋼種とすべく、適用拡大を図っている。なお、NSSCFW1は2010年日経優秀製品・サービス賞/最優秀賞(日経産業新聞賞)を受賞した。

浸漬試験, 168時間後の外観



14Cr

14Cr-0.1Sn
(NSSCFW1)

80°C, 0.5%NaCl水溶液, 168hr浸漬
30mm×30mm, #600研磨仕上

図 Sn(錫)添加効果

5. 自動車外板用440MPa級BH鋼板(ユニハイテン™)

JFEスチール(株)

自動車ボディ外板の中でもドア、フード、ルーフなどの蓋物部品には、耐デント性(耐へこみ性)が要求され、340MPa級BH鋼板が多く用いられている。蓋物部品のハイテン化による薄肉化では、高い耐デント性、張出し成形性、およびパネル面品質(耐面ひずみ性)が必要となる。JFEスチールは、このような要求に対し、フェライトとマルテンサイトからなるDP鋼をベース組織とし、第二相の分率・分散形態を制御することで低降伏強度、高EL、高n値、高BHを同時に確保した外板パネル用440MPa級「ユニハイテン™」を開発した。

下図はプレス加工によりドアモデルに成形し耐デント性を検証した結果で、ユニハイテンで340MPa級BH鋼板から同

等の耐デント性を維持しつつ薄肉化が可能である。ユニハイテンは、2011年1月発売の新型車のドアに、440MPa級としては国内で初めて採用され車両の軽量化に貢献しており、今後、さらなる適用拡大が期待される。

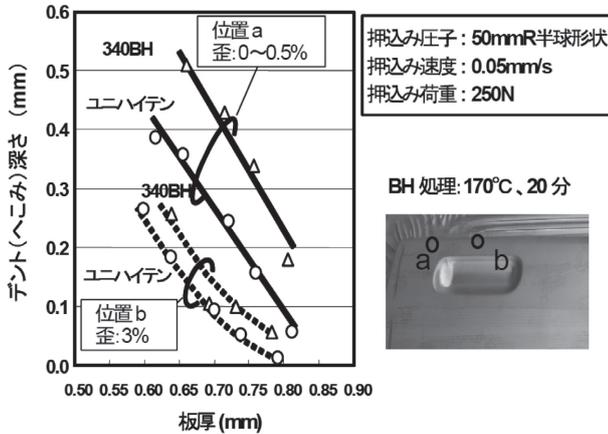


図 340MPa級BH鋼板とユニハイテンの耐デント性比較

6. 高機能溶融亜鉛めっき鋼板（スーパーダイマ）がメガソーラー架台に大量採用

新日本製鐵（株）

太陽光発電設備向けに新日本製鐵の高機能溶融亜鉛めっき鋼板「スーパーダイマ®」が大量に採用され、2010年以降メガソーラーたけとよや扇島太陽光発電所など5件を受注、受注総量は2000トンを超える。ソーラーパネルを支える架台用鋼材としてスーパーダイマの持つ高耐食性、トータルコスト削減などが評価されたもので、政府のクリーンエネルギー政策である太陽光発電関連で貢献している。

スーパーダイマはめっき層成分が亜鉛を主に、約11%のアルミニウム、約3%のマグネシウム、微量のシリコンからな



図 メガソーラーたけとよ完成予想図 ((株) 東芝提供)

る高耐食性めっき鋼板であり、2000年に販売を開始し、これまでに各種土木建築製品として使用されてきた。

太陽光発電設備の架台として、電力会社は従来、後めっき材を設計仕様としていたが、スーパーダイマは後めっき材に比べ耐食性が高いこと、プレめっき鋼板であり後めっき時の熱変形を考慮しなくてもよいという利点があり、ゲージダウン（重量削減）によるコストダウンが図れた。（後めっき材の鋼板板厚4.5-6.0mmに対してスーパーダイマでは同2.3-3.2mmで採用）

7. 重貨物鉄道用高耐摩耗熱処理レール“SP3”

JFE スチール（株）

JFE スチールでは、耐摩耗性を向上させた重貨物鉄道用の熱処理レール“SP3”を開発した。

耐摩耗性向上には、パーライト組織を構成する層状のセメントタイト相とフェライト相の間隔（ラメラ間隔）を微細化することによる高硬化が有効である。共析組成の0.8%炭素鋼について、パーライト変態の駆動力を最大化させるための合金設計と、圧延後のオンライン加速冷却条件の最適化を図ることで、SP3では0.07μmという微細ラメラ間隔を達成した。ちなみに、国内の普通レールでは0.25μm程度である。その結果、レール頭部の硬度はブリネル硬さでHB420、レール寿命を支配する内部（25mm深さ）でもHB390と最高水準の高硬度を有している（図1）。

北米の重貨物鉄道において2008年より実路線による評価試験を進めてきた。摩耗の激しい複数の曲線区間にSP3を敷設し（図2）、レール摩耗や表面状態を観察した結果、SP3は従来型のプレミアムレールと比較して、さらに10%以上摩耗

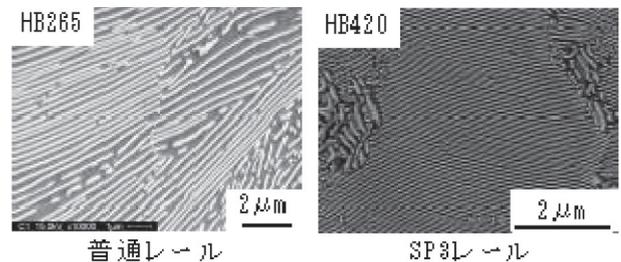


図1 普通レールとSP3のラメラ組織の比較



図2 SP3の実線敷設状況

量が減少すること、レール表面に剥離などの大きな損傷は見られず良好な耐疲労損傷性を有することが実証された。SP3適用によりレールの長寿命化を図ることで、メンテナンスコスト低減に大きく寄与するものと期待している。

8. 細径高炭素クロム鋼線の製造技術の開発

(株)住友金属小倉

住友金属小倉と住友金属工業は、ニードルベアリングなどに用いられる細径の高炭素クロム鋼線の製造に関して、従来に比べ、製造工程の削減と、製品出荷のリードタイム短縮を可能にする製造技術を開発した。

これまでの製造方法では、直径2ミリ程度の高炭素クロム鋼線は、ダイス伸線で製造するのが一般的でした。従来のダイス伸線方法には、高い形状精度、寸法精度が得られるという長所があるが、軸受用鋼材のように、球状化焼なましを行った鋼材を、連続して伸線すると内部割れによる断線に発展するケースがある。そのため、一旦ある程度伸線した後に、再度、焼きなまし処理を施して材料の加工性を高くしてから、さらに目標のサイズまで細く伸線する必要があった。そのため、製造工程は複雑化し、製品出荷までのリードタイムも長くなっていた。

本開発では、仕上げ加工前までの中間加工を、従来のダイス伸線法から、内部の引張応力が小さい冷間圧延法に変更した。細径材の冷間圧延法には、従来、形状と寸法管理が難しい問題があった。今回、3方ロール圧延機を採用し、さらにロール形状の最適化などにより、内部割れ断線が発生しにくく、形状と寸法の安定した製造技術の開発に成功した。この開発により、中間加工工程を冷間圧延で代替可能となり、大幅な工程省略が可能となった。

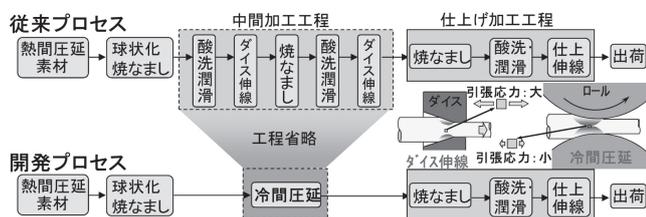


図 従来の製造プロセスと開発プロセスの比較

9. 国内最大の設計基準強度をもつ高強度鋼管杭が実プロジェクトで初採用

新日本製鐵(株)

新日本製鐵は、国内最大の設計基準強度400N/mm²をもつ建築構造用の高強度鋼管杭「NSPP®520」の開発を行い、国内で初めて、2007年12月26日付で国土交通大臣認定を取得

し、大型物流倉庫の基礎杭として約2000トンが採用され、杭施工を完了した。

建築構造用の鋼管杭としては、一般的に設計基準強度235N/mm²であるSKK400 (JIS規格) および設計基準強度325N/mm²であるSKK490が用いられる。本高強度鋼管杭はSKK490と比べて設計基準強度を23%向上させたものであり、板厚を最大で21%、鋼材重量を最大で20%削減することができる。また、板厚を削減することにより鋼管杭の現場縦継ぎ溶接にかかる施工時間を短縮し、鋼材重量を削減することで杭のハンドリング等の施工性を向上することができることから施工コスト削減が図れる。

本プロジェクトでは、先端拡大根固め杭工法「TN-X工法」の鋼管杭として採用されたが、今後は回転圧入工法「NSエコパイル®」、SC杭、一般中掘り工法及び打撃・振動工法などに、経済性に優れた高強度鋼管杭の適用が期待される。

表 高強度鋼管杭「NSPP®520」の機械的性質
出典：新日本製鐵(株)資料

鋼種	基準強度 F値 (N/mm ²)	機械的性質				
		降伏点 YS (N/mm ²)	引張強さ TS (N/mm ²)	降伏比 YR (%)	伸び EL (%)	シャルピー vEo (J)
高強度鋼管杭 NSPP®520	400	600以下 400以上	720以下 520以上	90以下	20以上	27以上
(参考) SKK400	235	235以上	400以上	規定なし	18以上	規定なし
(参考) SKK490	325	315以上	490以上	規定なし	18以上	規定なし

10. NSエコパイル® (回転圧入鋼管杭) が市街地での道路橋基礎工事推進に大きく貢献

新日本製鐵(株)

静岡県内で建設が進む東駿河湾環状道路の高架橋基礎工事において、新日鉄エンジニアリング(株)と新日本製鐵が開発し、これまで主に建築、鉄道分野で実績を積み重ねてきた回転圧入鋼管杭「NSエコパイル」工法が本格採用となり、被圧水や工事に伴う騒音・振動の問題解決に大きく貢献し、無事完了した。

東駿河湾環状道路は、伊豆縦貫自動車道の一部で現東名・新東名および国道1号と伊豆地域を結ぶ環状道路として建設が進められている。このうち、三島塚原ICから大土肥区間(3.0km)は国土交通省沼津河川国道事務所が、大土肥から函南塚本IC区間(1.9km)については国土交通省から委託された静岡県が事業主体となり、地域の協力を得ながら早期の供用開始を目指して順調に事業を進めている。静岡県が事業主体となっている大土肥・函南塚本IC区間では橋脚の基礎工事が2008年10月から2010年8月末まで約2年に渡り施工されてきており、このほど無事完了した。当該現場の特徴は、

杭を施工する地盤が、箱根山系を水源とした高い圧力（参考：被圧水頭最大GL+10m）を受けている豊富な地下水を含んでいること、径の大きい玉石が混ざった土層であり、一部では非常に硬い支持層（参考：凝灰角礫岩）となっていることである。さらに、現場は家屋が近接した市街地内であるため、騒音・振動や地下水といった住環境に十分配慮した工法が求められていた。



図 NSエコパイル
提供：新日鉄エンジニアリング（株）

11. 大径鋼管（鋼管径1400mm）を用いた「TN-X工法」の施工領域を拡大

新日本製鐵（株）

新日本製鐵と（株）テノックスが共同開発した「TN-X工法」は、先端拡大根固め杭工法としては国内初となる大径鋼管（鋼管径1300～1400mm）を用いた施工深度70mまでの施工技術を確認し、2010年8月付で（財）ベターリビングの技術評価を取得した。

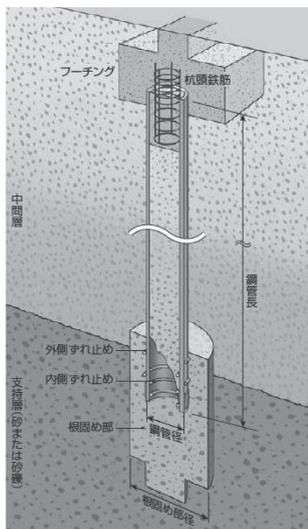


図1 TN-X工法概略



図2 拡大根固め部

出典：カタログ「TN-X工法」（新日本製鐵（株）、（株）テノックス）

「TN-X工法」は、鋼管杭と杭先端に築造した拡大根固め部が一体として鉛直荷重に抵抗することで、国内最大クラスの支持力性能を発揮できる低騒音・低振動・低排土の杭工法である。これまでは、鋼管径600mm～1200mmでは施工深度75m、鋼管径1300mm～1400mmでは施工深度50mが限界であったが、今回、新たに本工法の技術評価を取得したことにより、東京湾臨海地域をはじめ支持層が深い地域へ、耐震性に優れた大径鋼管を用いたTN-X工法の適用範囲が広がり、経済性に優れた基礎構造を構築することが可能となる。

12. 溶接部性能を飛躍的に向上させた

ラインパイプ用電縫鋼管「マイティーシーム®」

JFEスチール（株）

JFEスチールでは、従来品に比べ溶接部の信頼性を飛躍的に向上させた電縫鋼管「マイティーシーム®」を開発した。「マイティーシーム®」はこれまで主にシームレス鋼管やUOE鋼管が使用されていた寒冷地などの石油・ガス用のラインパイプに適用される。本技術は京浜地区の24インチ電縫鋼管工場に導入済み。知多地区の26インチ電縫鋼管工場にも導入予定である。

JFEスチールでは従来から電縫鋼管の溶接部の性能向上に取り組み、高級ラインパイプ用電縫鋼管を製造してきた。しかし極寒冷地の低温下では、溶接時に発生する酸化物の影響で靱性が局部的に著しく低下する可能性があるため、電縫鋼管の使用を避ける傾向があった。そこで酸化物の形態や分布を制御することにより溶接部の特性を改善した電縫溶接技術を開発・商品化した。

商品化にあたっては以下の独自技術開発を行った。

- ①電磁伝熱有限要素法による電縫溶接現象の解析。
- ②上記解析結果による安定溶接条件の確立。
- ③溶接シームのシャルピー衝撃試験値を評価可能な酸化物探傷条件の調査。
- ④上記探傷条件をオンラインで実現する高感度フェイズドアレイ超音波検査技術の開発。

技術的には以下の特色がある。

- ①管全長にわたって良好な低温靱性を確保する製造技術。
- ②電縫溶接部に存在する酸化物の分布をフェイズドアレイ超音波検査でオンライン測定、機械的性質を全長評価。

13. 世界初の大口徑・高強度鋼管の実管曲げ試験装置

JFEスチール（株）

JFEスチールは、外径48インチのパイプライン用高強度鋼管の曲げ変形性能を実証する実管曲げ試験装置を世界で

初めて開発した。この試験装置は、鋼管に内圧を負荷した状態で曲げ変形を与え、座屈限界と破壊限界の変形量を調べるものである。当社は他社に先駆けて高強度で変形性能に優れたラインパイプ「HIPER®」を開発し、これまで多くの実証試験を行ってきたが、今回の開発により、外径48インチの高強度「HIPER®」の変形性能を実管で実証することが可能になった。

天然ガスパイプラインは地震地帯や凍土地帯に敷設されることがあり、パイプラインの安全性を向上させるため、鋼管には外力に抵抗する強度だけでなく、地盤の変形に追従するしなやかさが要求されるようになってきている。「HIPER®」はこの要求に応えるために開発された鋼管で、材質設計によって曲げ変形性能を向上させている。このため、管厚を増加させることなくパイプラインの安全性を向上させることが可能であり、建設コストを削減させることができる。実管の性能を実証(写真)することにより、第二西気東輸パイプラインの地震地帯には、外径48インチ、X80グレードの「HIPER®」が採用された。

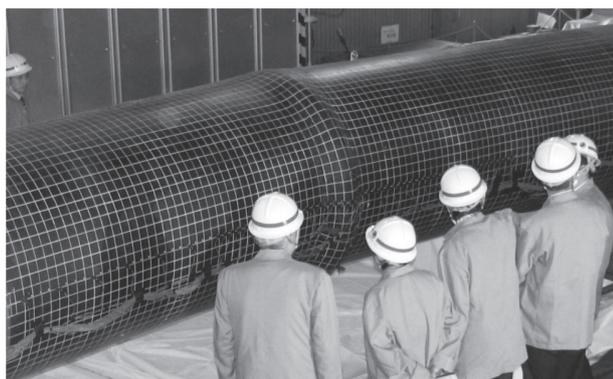


写真 48インチ鋼管の実証実験の結果

14. 衝突安全性能を評価する高精度落錘試験技術

住友金属工業(株)

住友金属工業は、自動車衝突安全性能の向上に貢献すべく、2002年から落錘試験装置を開発し、自動車車体・部品の衝突試験データを蓄積してきた。

近年、事故の実態をより正確に反映するため、衝突安全規則も多様化・複雑化しており、落錘試験装置の更なる進化が求められている。今般、これらのニーズに対応し、より錘体の発射姿勢の精度を高めた落錘試験装置を開発した。主な開発内容は以下の通り。

- 超高精度錘体吊上台車の新設：落錘試験装置の筒体先端から伸びるワイヤーは、新設の錘体吊上台車に接続し、この台車の下にマグネットをつないだ。
- 高精度ガイドレール新設：筒体側壁に上下方向に新たな高

精度ガイドレールを設置し、錘体吊上台車の姿勢を制御する。

この装置により、錘体を常に“まっすぐ”正確な位置で試験体に当てることが可能となった。また、試験体を必要角度傾けて設置するか、錘体の下面を必要角度傾斜した形状にするだけで、斜突試験を非常に高精度で実施可能となった。これにより、方向による強弱の無い衝突性能(ロバスト性能)を有する部材の開発・評価が可能となった。



図1 波崎1号落錘試験装置の外観

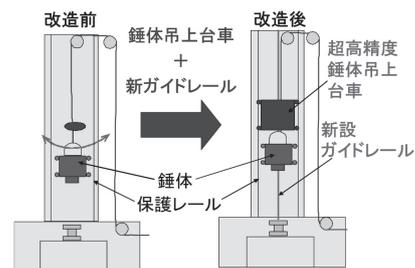


図2 落錘試験装置高精度化の概要

15. 14,000トン自由鍛造プレスの新設

(株)日本製鋼所

日本製鋼所室蘭製作所は海外を始とした大型鍛鋼品の需要に対応するため2007～2011年度で総額800億円を投入する大型設備投資を進めている。新たに建設された第2鍛錬・第2熱処理工場(15,830平方メートル)に同計画の主力設備である世界最大級の14,000トン自由鍛造プレスが設置され2010年4月に生産を開始した。これにより既設鍛錬工場の14,000、8,000と3,000トンの3基のプレスと合わせて鍛錬能力が3割向上する。



図 14,000トン自由鍛造プレス

新プレスは最大650トンの鋼塊から原子力発電プラントの原子炉圧力容器部材や蒸気発生器部材など主に大径鍛鋼素材を鍛錬成形する。

製鋼、機械工程の増強を含めたこれら一連の設備投資計画は2011年内に完了し、これにより原子力発電プラント向け部材の年間製造能力は2007年度と比較して2011年度には約3倍になる。

16. 新しい高性能ダイカスト金型用鋼DAC-MAGIC

日立金属(株)

近年、ダイカストのハイサイクル化、製品の大型化および型製作リードタイムの短縮が求められる中で、金型材料の特性としては韌性と高温強度だけでなく、耐大割れ性、耐ヒートクラック性、内冷孔割れ特性および被削性がもとめられている。そこで、これらの特性を兼備した高性能ダイカスト金型用鋼DAC-MAGIC[®]を開発した。従来、汎用のSKD61クラスのDAC[®]とDAC-Pに対し、高性能鋼としては高温強度の高いDAC10と韌性が高いDAC55が使用されてきた。今回開発したDAC-MAGICは高温強度がDAC10と同等で、かつ韌性はDAC55レベルであり、従来の高性能鋼の優れた特性を兼備させている。これらの特性は炭化物析出強化の利用を低減し、粗い針状ベイナイトの割合を低減させることにより実現させた。

耐ヒートクラック性について試験片にてテストした結果を図1に示す。4000サイクル試験後、SKD61とDAC55において深いクラックが発生しているのに対し、DAC-MAGICは深いクラックが発生しておらず、良好な耐ヒートクラック性を示していることがわかる。内冷孔割れ特性については内冷孔を模擬した環境で試験を行い、DAC-MAGICがSKD61とDAC55に比べ優れていることが確認された。実際のユーザにおける金型評価においても2倍以上の寿命が得られている。また、型製作の際に必要な被削性についても従来の高性能材DAC55よりDAC-MAGICが優れることを確認している。

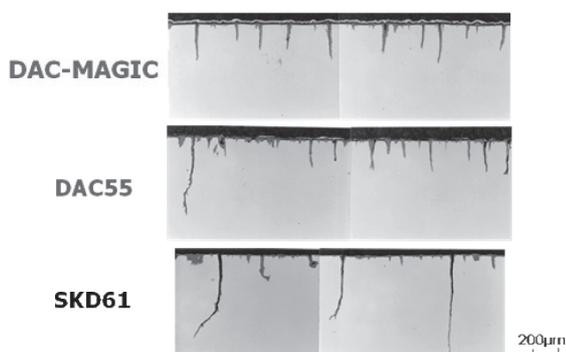


図1 ヒートクラック試験後(4000Cycle) 断面マイクロ組織

る。なお、本鋼は日刊工業新聞社の2010年十大新製品賞を受賞した。

17. SOFC用金属インターコネクタ材の開発

日立金属(株)

日立金属は、高温(700～1000℃程度)で作動する高効率の燃料電池として実用化が期待される固体酸化物形燃料電池(以下、SOFC)の耐久性向上という課題に対応するため、耐酸化性等を大幅に向上させたインターコネクタ用合金ZMG[®]232J3、ZMG[®]232G10を開発し、2011年4月よりサンプル提供を開始した。

金属インターコネクタ(図)は、セラミックス製のセル(燃料電池の単位)間を作動温度で電氣的に接続するために用いられる。このため、作動温度での「①良好な耐酸化性」、「②良好な電気伝導性」、「③セル材料等に近い熱膨張係数」が必要とされる。

日立金属はこれらの特性を満たすべく、Fe-22Cr系フェライト合金ZMG[®]232Lを2005年に開発し、国内外の燃料電池メーカーに評価を頂いている。

さらに、寿命4万時間を目標としたSOFCの耐久性向上を狙って、ZMG232Lをベースに、スピネル層、クロミア層から成る導電性のある酸化皮膜の薄膜化・緻密化を図った合金設計に取り組み、耐酸化性、導電性を約2倍に向上させた新合金ZMG232J3、ZMG232G10を開発した。

本稿の一部は、新エネルギー・産業技術総合開発機構からの委託研究「固体酸化物形燃料電池システム要素技術開発」にて実施した内容を含む。

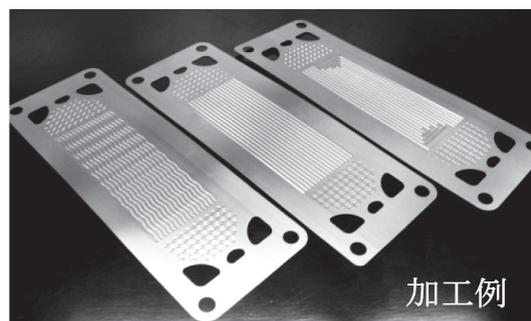


図 金属インターコネクタ(加工例)

18. プレス成形法による

二重管式エキゾーストマニホールドの開発

(株)住友金属直江津・住友金属工業(株)

住友金属直江津と住友金属工業は、トヨタ自動車(株)および(株)三五と共同で、難加工性ながら耐熱性に優れるス

ステンレス鋼板 (NAR-AH-4) を用いたプレス成形法によるエキゾーストマニホールド (以下、エキマニ) を開発し、部品の薄肉・軽量化と排気ガスの清浄化を達成した。

AH-4は火力発電設備の高温構造部材として開発された高性能な耐熱合金だが、高強度の難加工材のため、複雑なプレス成形が要求されるエキマニには採用することが困難だった。

本開発では、数値解析を駆使して薄肉化したAH-4でのプレス加工法を開発することにより、エキマニへの適用を実現した。AH-4の適用により、従来の耐久性を維持したまま25%の薄肉化・軽量化を達成し、同時に熱容量低減で冷間始動直後に排出される排気ガスの清浄化に大きく貢献した。

エキマニへの高耐熱ステンレス鋼板の適用は、低燃費化のために上昇する排気ガス温度への対応を可能とするので、自動車の環境性能向上への寄与が期待される。

本開発は、(財) 素形材センター会長賞 (2009年) を受賞した。



図 二重管構造のエキマニ
左：外観、右：NAR-AH-4製のエキマニ内管

19. 乗り心地を向上させる電磁式動揺防止制御装置の開発

住友金属工業 (株)

鉄道は大量輸送の代表であり、ECOな乗り物である。その便利さゆえに多くの乗客の安全を守り、乗り心地の快適さが求められる。住友金属工業では、鉄道車両の横揺れを打ち消

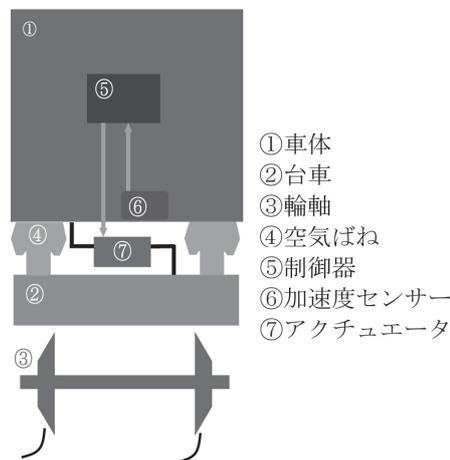
す方向に電磁アクチュエータ (図1) を配備・動作させることで、高速でも安全に、かつ乗り心地を大幅に改善する動揺防止制御装置を開発した。

動揺防止制御装置とは、鉄道車両で問題となる車体左右方向の振動 (横揺れ) を加速度センサーで検知して、その振動を打ち消す方向にアクチュエータで制御力を発生させるシステムである。住友金属工業では、このシステムに新規開発した電磁アクチュエータを採用した。電磁アクチュエータはモータの回転をローラーねじで直線運動に変換するため、従来の空気圧式アクチュエータに比べて応答性に優れており、高速鉄道車両の厳しい環境下でも飛躍的に乗り心地を向上させた。

開発した電磁式動揺防止制御装置は、今後さらにスピードアップする鉄道車両の顧客サービス拡大への必須装置として採用されていくと考えている。



図1 電磁アクチュエータ



- ①車体
- ②台車
- ③輪軸
- ④空気ばね
- ⑤制御器
- ⑥加速度センサー
- ⑦アクチュエータ

図2 動揺防止制御装置の概要



産業政策としてのレアアース資源開発 —中国脅威論への警鐘として—

Resource Development of Rare-earth Metals as an Industrial Policy – Substantial Background of China Threat –

上條水美 豊田通商(株) 渉外広報部 渉外グループリーダー
Miyoshi Kamijo

1 はじめに

昨年の秋、尖閣諸島沖で海上保安庁巡視船に衝突した中国漁船の船長が、公務執行妨害の容疑で拘束されたことをきっかけに、中国からのレアアースの輸出審査が厳格化され、大きな問題となった。中国側はこの事実を否定しているが、実際10月の中国から日本へのレアアースの輸出量は急減し、事実上の禁輸状態となったことから、外交上の武器として経済資源であるレアアースの輸出が使われたことが日本社会に衝撃をもたらし、マスコミでも頻繁に取り上げられた。

しかし、産業界の関係者が中国からのレアアースの輸出規制に危機感を持ったのは、それ以前の7月、中国が2010年下期の輸出割当量を発表した時点である。中国のレアアース輸出は2003年から年間の割当量が当局により定められているが、昨年7月に発表された2010年下期の割当量は前年同期比約7割減の大幅な減少となり、調達サイドの混乱とレアアースの価格高騰を招いた。

中国のレアアース年間生産量は120,000トンであり、世界の年間総生産量：124,000トンの実に97%を占める(表1、図1)¹⁾。世界のレアアース消費量のうち中国を除いた量：約5万トンのうち約40%に相当する約2万トン在日本が消費している。そして、日本はその消費量の92%を中国からの直接および間接輸入に依存している(図2、3)¹⁾。尖閣諸島問題の報道とともに、この数字が広く一般にも知られるようになり、

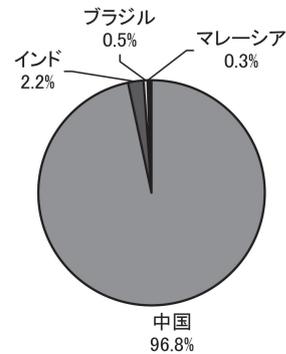


図1 世界のレアアースの国別生産量比率 (2009年)
出所：USGS, Mineral Commodity Summaries, January 2010

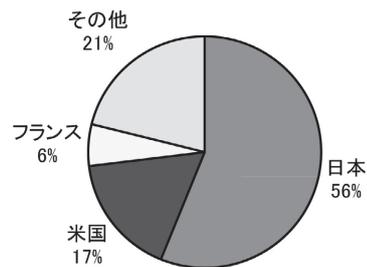


図2 中国のレアアース輸出量の相手国別比率 (2009年)
出所：経済産業省

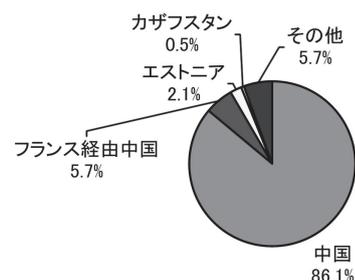


図3 日本のレアアース輸入量の相手国別比率 (2009年)
出所：経済産業省

表1 世界のレアアースの国別生産量 (2009年)
出所：USGS, Mineral Commodity Summaries, January 2010

	(単位:トン)
中国	120,000
インド	2,700
ブラジル	650
マレーシア	380
世界	124,000

中国へのレアアースの依存度が極端に高いことに対する問題意識と同時に、韓国などの新興国に圧倒されがちであった先端技術分野において、日本の生産シェアが依然として大きいことも認識された。この報道は、中国による資源ナショナリズムへの危機感だけではなく、日本側のナショナリズムもくすぐったのではないだろうか。しかし、むやみに中国脅威論をあおることは、問題の本質を見誤らせることになる。レアアース供給の問題は、外交問題というよりは、むしろ日本の産業政策の問題として考えるべきであろう。

レアアースの世界消費量は年間約12万トン、金額にして約1,000億円²⁾であり、この規模の資源では大規模な鉱山開発は割があわず、有利な条件を備えた特定の産地に寡占化しがちである。探鉱に始まる鉱山開発は、時間がかかる上、千三と言われるように開発リスクが高く、一定規模の市場がないと新たな開発は難しい。

レアアース供給の問題は、確かにその資源埋蔵量の偏在性にもあるが、それ以上に市場規模が小さいため開発におけるインセンティブが低くなってしまふ点にある。レアアースは、資源としてよりも、むしろ生産工程における一つの部材として考えるほうが適切なのではないだろうか。後述するレアアースの鉱山開発の難しさや短期的な経済性の低さは、レアアースを国際市場におけるコモディティとして見るから問題になるのであり、生産工程の一部としてサプライチェーンの中で捉えれば、また違った取り組み方が見えてくる。

“ふえらむ”という鉄鋼業界の伝統のある専門誌に、小員のような素人が寄稿してよいものだろうかと思んだが、世界経済のグローバル化を舞台として事業を展開してきた商社の立場で、レアアースを巡る昨今の動向に対して、なんらかの示唆を投じることができればと思っている。

2 中国によるレアアース生産の寡占化と輸出規制

中国によるレアアース生産の寡占化については、そもそも初めからそうであったわけではなく、1990年代前半までは米国が主要生産地であった(図4)。しかし中国でレアアース鉱山が開発され、その製品が安価で流通するようになると、他の鉱山の生産は採算があわなくなり、ほとんどが閉山または休山に追い込まれてしまい、その結果、中国の寡占化が一気に進んだ。この事実は、最近では広く知られるようになり、そのため、中国が戦略的に安値攻勢をかけて他国の鉱山を閉山に追い込み、その後で資源の出し惜しみをして価格をつりあげているといった論調で語られ、中国に対する感情的な脅威論を生んでいる。しかし、必ずしも中国が意図して市場を席卷したわけではなく、中国自身もレアアースという貴重な

資源を安値で大量に放出してしまい、経済的損失を被ったと言えなくもない。最近の中国のレアアース輸出規制は、資源をこれまでのように安値で放出するのではなく、付加価値をつけて輸出するという中国の産業政策の変化の一環としてみるべきだろう。安い労働力を求めて中国へ工場進出してきた日本の製造業が、中国の労働コストの上昇で戦略の見直しを迫られていることと、レアアースの中国依存からの脱却の問題は、底辺のところであつた。安い労働力と安い資源開発コストで世界の工場となった中国は、より付加価値の高い製造業へと機軸を移しつつある。

この中国の政策変更が、日本の製造業に対して戦略の見直しを迫っている。日本がこれからも技術立国としての競争力を維持しようとするのであれば、原料調達の確保、技術の維持・継承、優秀な労働力の確保をどのように担保していくのか、日本全体の産業政策、外交政策の中で考えてみる必要があるだろう。

そこで、中国の輸出規制の推移をその背景とともにみておきたい。

中国は、レアアースの戦略物資としての有効性を早くから認識にしていた。1992年には鄧小平が「南巡講話」の中で、「中東有石油、中国有希土、一定把我国希土的優勢發揮出来」(中東には石油があり、中国にはレアアースがある。我国はレアアースにより必ず優位性を発揮できるだろう)と述べている³⁾。この南巡講話により、中国が開放経済へと政策転換を図り、その後の社会主義市場経済としての急成長を遂げるようになったのは周知の通りだ。現在のレアアースの中国による輸出規制とそれによる価格高騰を見ると、鄧小平の言葉通りになったとも言えるが、しかし、90年代の中国は、必ずしもレアアースを戦略物資として有効に利用してきたとは言えず、むしろ、乱開発による値崩れで、貴重な資源の市場価値を下げてしまった。1998年には、中国の廉価輸出の結果と

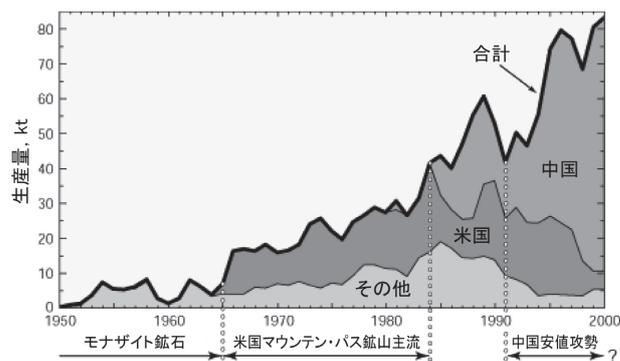


図4 1950年～2000年におけるレアアースの国別生産量の推移
出所：米国内務省地質調査所

して、米国の主力鉱山であったマウンテン・パスが閉山に追い込まれ、中国への寡占化の流れが一気に進むことになったが、最初から中国側がそれを意図していたわけではないだろう。

中国のレアアースの乱開発は江西省など、比較的採掘が容易な南部の産地で特に横行しており、供給が需要を大きく上回り、価格の低下を招いてきた。この地域では、小規模採掘業者が乱立し、環境を無視した安易な採掘方法により深刻な環境問題も生じている。

中国政府も廉価輸出を問題視し、1989年には輸出許可枠を設定され、1998年にはレアアースの輸出に割当制が導入された。しかし、工業情報化省がレアアースの生産量を監督し、国土資源省が鉱山の採掘量を監督し、商務省が輸出量を監督するという分権体制であったため、各官庁がばらばらに動き、全体としてのレアアース業界の秩序は整備されず、輸出枠は遵守されなかった⁴⁾。

輸出に対する規制が本格化するの、やっと2003年に「鉱物資源政策白書」が発表されてからのことである。この白書の中で中国は、それまでの輸出促進による外貨獲得の政策を改め、自国が強みを持つ資源については輸出調整を行い、中国国内でより付加価値の高い最終製品を組み立て・加工することで、中国企業の競争力強化に結びつけようとしている⁵⁾。

これを踏まえ2003年以降、輸出許可枠は毎年10%程度ずつ削減され、1998年に7万2千トンあった輸出許可枠は2005年には5万トンに、さらに2010年には3万トンにまで削減されている(図5)⁶⁾。2003年は、新興国の台頭による景気回復で原油をはじめとする資源価格が高騰し始めた年でもあり、長く続いた資源安の時代が終わり、資源高の時代が始まった年として、世界経済のターニングポイントでもある。

中国政府は、輸出だけでなく、生産そのものに対する規制の強化にも踏み切り、2006年にはレアアースの新規採掘許可証の発行を停止し、採掘割当量の厳守を徹底しようとした。

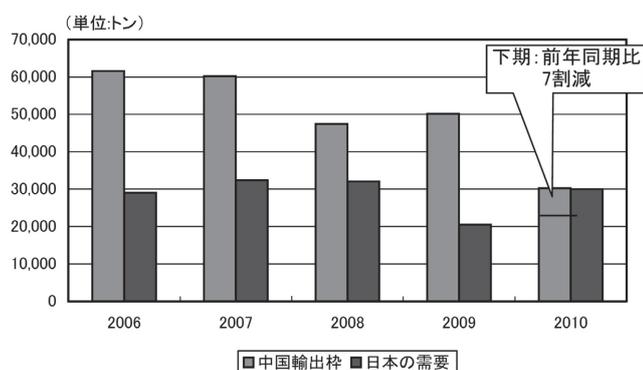


図5 2006年以降の中国のレアアース輸出枠と日本の需要量の推移
出所：中国商務部HP、新金属協会

小規模生産者の乱立による乱開発とダンピングを避けるため、レアアース産業の集約化も進めており、2010年8月に発表された「レアアース計画改定案(2009-2015希土鉱業発展計画)」では、全国で1,000以上ある鉱床や鉱山地を3地区に集約することを打ち出した。つまり、北部(内蒙古自治区、山東省)、西部(四川省)、南部(江西省、広東省、福建省、湖南省、広西省等)の3つのグループにおける生産を、それぞれの地区の大手国有企业に集約しようというものだ⁷⁾。

北部の内蒙古自治区は、世界的にも最大のレアアース産地であるが、製鉄大手の包頭鋼鉄グループが鉱区内の有力民営企業を買収し、レアアースの採掘から加工、販売までのプロセスを一貫して手がけている。この地区は中国で50年の歴史を持つレアアース生産地域であり、生産設備なども他の地域に比べ整備されており、中心都市である包頭市にレアアースの川下産業を誘致してレアアースの一大工業区へと成長させることを目指している。

一方、南部の産地では、小規模の鉱山が分散しており、1社への集約が難しい。この地域の鉱山は採掘が容易であるため、農民が勝手に採掘を始めるような状態にあり、環境汚染の問題も生じている。それでも最近では少しずつ、コングロマリットである五鉱グループによる集約が進んできているようだ。

しかし、輸出や生産を制限しても、精製体制が過剰である限りダンピングの流れを断つことはできない。この過剰生産体制は中国の製造業が常に抱える大きな問題のひとつだ。2010年のレアアースの採掘総量規制8万9千トンに対し、実際の採掘量は12万トン程度に達していたと言われるが、中国でのレアアース精製能力はそれよりもさらに大きく、年間鉱石20万トン分にもなるといわれる⁸⁾。つまり、精製能力の約40%に及ぶ8万トンの原料が不足していたことになるが、不足分の原料は違法採掘による鉱石が用いられたとみられている。こうして違法に精製されたレアアースは、輸出枠の制限から逃れるため、合金などの形で輸出されているようだ。違法採掘が行われているのは主に中国南部の山間部に散在するレアアース鉱山であり、前述したように環境汚染の問題が著しい地域でもある。

中国の輸出規制・生産規制は、中国の外交戦略によるものではなく、国内におけるレアアースの乱開発による過当競争を改善するという意味合いが大きいことを理解しておかないと、いたずらな中国脅威論を生むことになる。

中国の輸出規制に対し、日本でも2005年ごろから中国以外の国での鉱山開発が検討されてきた。しかし、その開発の進捗度が必ずしもはかばかしくないのは、中国の輸入規制が厳格に守られてこなかったことによる危機感の薄さや、取引規模の小ささによる開発インセンティブの低さなどによる。

また、変化の著しい先端技術の世界においては、レアアース需要の持続性に対する懸念もあり、長期的な商業生産に対して慎重にならざるを得ない面もある。

根本的な開発の阻害要因は、レアアースが単一な資源ではなく、いろいろな元素が少量ずつ混在している点にあり、しかも、元素ごとに需要がまちまちであることだろう。多種類の岩石中にいろいろな元素が薄く広く分布していて、純粋な単一元素を大量に入手することが困難である。つまり、欲しい資源を効率よく大量に採掘することができない。レアアースと一口に言っても、どういう元素がいつどのくらい必要とされるのか、その開発にどの程度の投資が必要なのか、あらかじめ詳細な計画を立てることが必要だ。また、レアアースの需要は技術革新にも左右されるため、投資の見極めが難しい。

しかし、そうした懸念による取り組みの遅れは、日本の先端技術の開発とその普及を遅らせ、日本の技術の国際競争力の低下につながりかねない。レアアースの開発は市場原理にまかせておくのではなく、将来のための先行投資として、産業政策の視点から取り組まねばならないと考えるのはそのためだ。

この点について具体例をあげてみたい。

3 需要サイドから見たレアアース

レアアース（希土類元素）は、スカンジウム（Sc）、イットリウム（Y）の2元素に「ランタノイド」と総称される15元素を加えた17元素のことをさしている。周期表の第3族元素に属し、化学的性質が似ているため、自然界では同じ鉱物の中に混ざって存在している。

レアアースの中で、最近、特に注目されているのは、ネオジウム（Nd）とジスプロシウム（Dy）だ。ネオジウムは、コンピューターのハードディスクや家電、自動車のモーター部分に使われる永久磁石の材料として、近年、生産量が飛躍的に伸びている。さらに、HEV（ハイブリッド車）やEV（電気自動車）といった次世代自動車では、このネオジウム磁石にジスプロシウムを加えた永久磁石が大量に使用されており、その安定供給が自動車産業における最重要課題になっている（図6）。

ネオジウム磁石は、鉄にネオジウムを添加することで大きな保磁力が得られるため、永久磁石として強い威力を発揮する。1983年に当時の住友特殊金属の佐川真人博士によって発明され、当初はVCM（ボイス・コイル・モーター）向けや医療用MRI（磁気共鳴イメージング）向け、音響向けの利用がメインであったが、2002年ごろからモーター用としての利用が増加し、現在では、家電、産業・一般機器、自動車などで

広く使用されている。例えば、普通乗用車では、ABS（アンチロックブレーキシステム）やEPS（電動パワーステアリング）、エアコンコンプレッサーなどにこのネオジウム磁石が使用されている。家電分野では、エアコンコンプレッサーに小さくて強力なネオジウム磁石を使うことで大幅な省エネが可能になるため、2003年以降、日本国内で生産するすべてのエアコンメーカーがネオジウム磁石を採用するようになった。また、リニューアブルエネルギーの普及促進で開発が進んでいる大型風力発電にもネオジウム磁石が使用されている。

ネオジウム磁石は熱に弱いという欠点があったが、これにジスプロシウムを加えることで耐熱性が増し、自動車のモーターへの使用が可能になった。次世代自動車戦略においては、ジスプロシウムを加えたネオジウム磁石が大量に使用される。車1台当たりのネオジウムとジスプロシウムの使用量は、ガソリン車およびディーゼル車ではそれぞれ90g、9gとされるが、これがHEVやPHV（プラグインハイブリッド車）になるとそれぞれ、320g、60gに増加し、さらにEVになると、530g、80gに増加する。次世代自動車の開発と普及は、日本の自動車産業の将来にとって極めて重要であり、その開発の鍵を握るのがレアアースだ⁹⁻¹¹⁾。

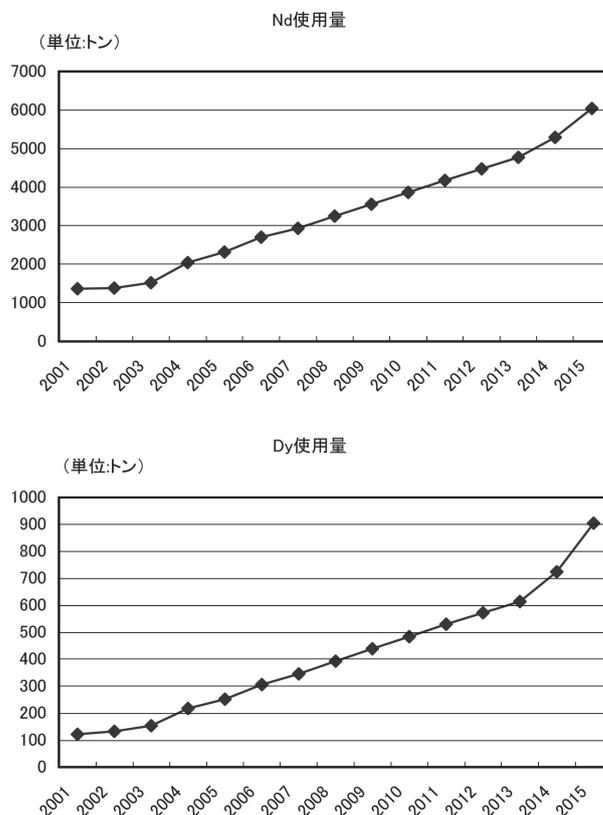


図6 日本におけるネオジウムとジスプロシウムの需要量の推移 (2010年～2015年は予測)

レアアース開発において最近問題視されているのは、後述するように、このジスプロシウムを産出する鉱山が限定されていることにある。

4 供給サイドからみたレアアース

レアアースの生産量については、現時点では97%を中国が占めているが、埋蔵量については実はそれほどクリティカルな状況にあるわけではない。中国の埋蔵量は世界の36%であり、CISに19%、米国に13%の埋蔵量があるとされている(表2、図7)¹²⁾。中国以外の国の採掘コストはこれまでの中国の生産コストに比べて高くなるが、そもそもレアアースは使用する絶対量が少ないため、価格変動による影響度は相対的に小さい。しかし、その微量原料の供給が途絶えただけで、生産全体がストップすることになり、その結果もたらされる影響は極めて大きい。

前述したように、レアアース開発の難しさは、いろいろな鉱石の中に、多種類のレアアース元素が少量ずつ混じって存在しているため、欲しい元素だけを効率よく生産することができない点にある。ネオジウムやジスプロシウムとともに産出されるセリウム等の元素についても、いかにその販路を開

拓するかにより、生産コストが変わってくる。従って、レアアース鉱山の開発においては、その鉱床から精製されるレアアースの種類を精査し、それぞれの元素のマーケットをどのように確保するかを検討しながら進める必要がある。

レアアースの元素は、ネオジウムを含む軽希土類と、ジスプロシウムを含む中・重希土類に分けられるが、軽希土類を含む鉱床が比較的多く存在するのに対し、中・重希土類を含む鉱床は少ない。また、レアアースの鉱床の種類にも主に2種類あり、ひとつは軽希土類を多く含むマグマ由来の鉱床で、もうひとつが中・重希土類を多く含むイオン吸着型の鉱床だ。レアアース鉱山といってもどれも同じではなく、いろいろな種類があり、世界での分布状態と種類についてはまだわかっていない点が多い。

マグマ由来の鉱床は、地下深くのマグマだまりが冷えて固まって地表に現れたもので、このタイプの鉱床は世界中に存在しているが、ウランなどの放射性物質も一緒に採掘されるため、取り扱いが難しいとされている。このマグマ由来の鉱床からはモナザイト鉱石やバストネサイト鉱石などの鉱石が産出される。

モナザイト鉱石は、インド、ブラジル、南アフリカ、豪州、東南アジアなどに存在する。軽希土類を多く含むが、中・重希土類の含有量は少ない。モナザイト鉱石はウラン、トリウムなどの放射性物質を含む場合が多く、取り扱いが難しいが、原子力発電の普及で、ウラン、トリウムの需要も高まっており、副産物としてのレアアースの生産の可能性がある。またマレーシアなどではこのモナザイト鉱石が錫の原料としても用いられており、その残渣からのレアアース回収も期待されている。

生産量・埋蔵量ともに世界最大である中国のバヤンオボーはバストネサイト鉱石の鉱山として有名だ。バヤンオボー鉱山は、ネオジウムの含有量が5-9%と高く、また核分裂の終期に当たる鉱石のため、放射能が低く精製が容易である¹³⁾。

バヤンオボーの生産で閉山に追い込まれた米国のマウンテン・パスもバストネサイト鉱石である。こちらは放射性元素の処理に費用がかかるため、中国の安値攻勢に耐えきれず生産を休止していた。最近のレアアースの価格上昇により、かつての鉱石の残渣などからネオジウムなどのレアアースの回収を始めており、さらに2012年からは新型の溶媒抽出設備の導入などにより年間1万トン体制で生産再開予定だ。

レアアースの鉱床のうち、イオン吸着型鉱床はジスプロシウムを多く含むことで最近、特に注目を浴びている。レアアースを多く含む花崗岩が数百万年かけて風化され粘土層になった鉱床であり、放射性元素を含まず、弱酸性の液体を粘土層にかけるだけで、比較的簡単にレアアースを採取できる。中国の南部にあるのがこのイオン吸着型鉱床で、直接、

表2 世界のレアアースの国別埋蔵量 (2009年)
出所: USGS, Mineral Commodity Summaries, January 2010

	(単位:トン)
米国	13,000,000
豪州	5,400,000
ブラジル	48,000
中国	36,000,000
CIS	19,000,000
インド	3,100,000
マレーシア	30,000
その他	22,000,000
世界	99,000,000

出所: USGS, Mineral Commodity Summaries, January 2010

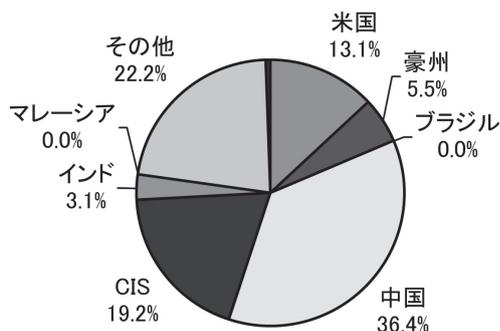


図7 レアアースの国別埋蔵量比率 (2009年)
出所: USGS, Mineral Commodity Summaries, January 2010

硫酸アンモニウムを地表にかける採掘法で農民が勝手に採掘を始めるケースもあり、環境破壊が問題視されている。

現在発見されているイオン吸着型鉱床は中国南部のものだけであり、この地域以外にジスプロシウムなどの中・重希土類を多く含む鉱床は発見されておらず、これが現在のレアアース供給の最大の問題となっている(図8、表3)¹⁴⁾。

2010年のレアアースの世界市場は約13万トンであり、そのうち12万トンが中国で生産されている。これに対し、現在開発中の米国や豪州の鉱山がすべて生産を開始すると約7万

トンの供給量となるため、中国がかつて輸出していた5万トンを補うことができる。ただし問題は、これらの鉱山にはネオジウムなどの軽希土類は比較的豊富に含まれているが、ジスプロシウムはほとんど含まれていないことにある。

しかし、ジスプロシウムを多く含むイオン吸着型の鉱床は、花崗岩の分布や気象条件を調べると中国南部に続く東南アジアにも存在することもわかってきている。この開発が進めば、レアアースの中国依存度の問題が本当の意味で解決することになる。

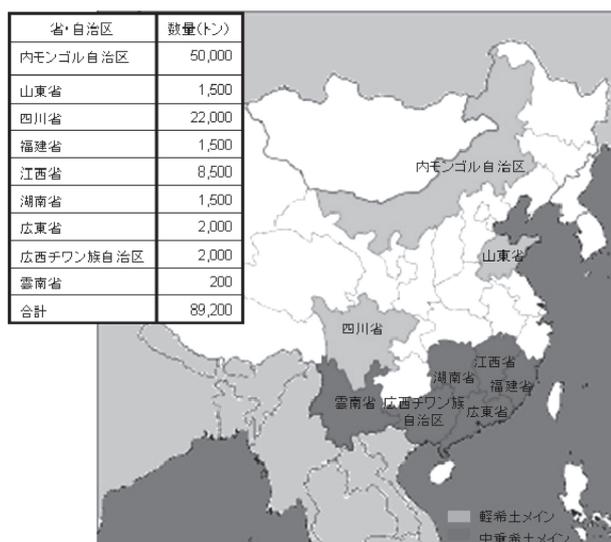


図8 中国のレアアース鉱石分布
出所：中国国土資源部ホームページ

5 レアアース開発における商社の役割

レアアースは性質の似通った元素が薄く広く混ざり合って存在しており、それを何段階もの精錬工程を経て抽出しなければならない。ジスプロシウムが特に不足しているといっても、ジスプロシウムの開発によって何倍もの軽希土類が一緒に産出されるため、新たにその販売も検討しなくてはならない。そもそも鉱石全体として品位が低いため、必要とされるレアアースを生産するためには膨大な鉱石を処理しなければならず、そうした開発においては環境への特段の配慮が必要だ。つまり、原油や石炭のような大規模な開発ではないが、同じ規模の鉱山から産出される資源の量が非常に少なく、開発にかかる手間隙を考えると単位生産量当たりのコストは決して安くはない。

これまでレアアース市場は、専門商社や総合商社が、中国からの相対取引として取り組んできた。市場規模が大きいことや広く薄く存在するという特性から、資源メジャーが規模を生かして参入する市場ではない。しかしあらたに資源開発するとなると、たとえ小規模であっても大きなリスクが伴い、一企業の単独の取り組みでは難しい面がある。

また地質調査から始まる鉱山開発は、生産開始までに時間とコストがかかり、さらに奥地での開発になるため、資源道路や港の整備なども必要になってくる。ベースメタルの場合は、これらを、民間企業が一手に引き受けても十分に採算が合う市場があるが、レアアースのようにいろいろな元素を少量ずつ含んでいる鉱石から、何段階もの製造工程をかけて元素を取り出し、それぞれ異なるユーザーに販売するというタイプの資源は、一企業の単独開発では限界がある。レアアースの開発を、産業政策として考えねばならない理由のひとつがそこにある。

以上から、レアアースの資源開拓を可能にするためには、大きく分けてふたつの条件があると考えている。

ひとつは、生産全体のバリューチェーンの一環で検討する

表3 中国の主要鉱床で採掘されるレアアース鉱石中の成分含有割合
出所：Newton (2011) 3

マグマ由来の鉱床でとれるレアアースの比率
(中国、バヤンオボ鉱床のデータ)

セリウム(CeO ₂)	50.0%
ランタン(La ₂ O ₃)	25.0%
ネオジウム(Nd ₂ O ₃)	16.7%
プラセジウム(Pr ₆ O ₁₁)	5.1%
サマリウム(Sm ₂ O ₃)	1.2%
ガドリニウム(Gd ₂ O ₃)	0.7%
ユウロピウム(Eu ₂ O ₃)	0.2%
イットリウム(Y ₂ O ₃)	0.2%

イオン吸着型鉱床でとれるレアアース
(中国、竜南鉱床のデータ)

イットリウム(Y ₂ O ₃)	65.0%
ガドリニウム(Gd ₂ O ₃)	6.9%
ジスプロシウム(Dy ₂ O ₃)	6.7%
エルビウム(Er ₂ O ₃)	4.9%
ネオジウム(Nd ₂ O ₃)	3.0%
サマリウム(Sm ₂ O ₃)	2.8%
イッテルビウム(Yb ₂ O ₃)	2.5%
ランタン(La ₂ O ₃)	1.8%

出所：Newton(2011)3

ことであり、開発から分離精製、電解工程、合金工程など多くの工程を経て、磁石などの最終製品となるまでの一連のバリューチェーンの中で、レアアース開発のコストや流通を見る必要がある。その意味で、製造業の部材調達と見なされ、エネルギー系の資源開発とはビジネスモデルが異なってくる。規模で稼ぐトレードでなく、付加価値で稼ぐ製造業の考え方で資源開発を行う新しいビジネスモデルが求められている。付加価値で稼ぐという点においては、精製技術によって川上での製品の加工度をあげるだけではなく、一緒に産出されるさまざまな元素、セリウム、イットリウムといった元素をどのように効率よく販売するかということも、付加価値として考えることができる。

もうひとつの重要な点は、資源産出地域の産業振興に貢献することであろう。これは、レアアースに限らず、すべての資源開発の基本として考えねばならないことだ。

資源ナショナリズムは、権益を自国で保有して利益を確保するというタイプから、輸出そのものを制限し、自国内で産業を育成するという傾向が強くなっている。日本のように資源を海外に依存する国は、その義務として、資源産出国の雇用を創出し、安定した地域経済を作ることには貢献しなければならない。また、それが最終的には資源の安定供給にもつながる。日本は製造業のアジア進出において、地元雇用を創出し、技術や生産方式の指導と伝達により、アジア経済の発展に貢献してきた。レアアースの開発においても取り組み姿勢は同じであり、そのことを産出国に理解してもらう努力も必要だ。

6 おわりに

豊田通商にとって、レアアース事業は重要な戦略分野のひとつである。短期的な経済性から見れば、ほかの事業投資と比べて優位にあるとはいえない場合もあるが、レアアースは、新しい産業のバリューチェーンの重要なアイテムであり、商社の総合力を生かすことができる分野である。この分野での先行投資は、新しい市場のリーダーとなる可能性を秘めている。

豊田通商が現在進めている案件のひとつに、ベトナム、ドンパオにおけるレアアースの開発がある。予定されている生産量は年間約7,000トンと、現在の日本の輸入量の約15%の規模であり、主にネオジウムが産出される。この事業は、単に鉱山を開発するだけではなく、分離工場を建設し、日本が持つ最新の環境技術とそれに伴う公害防止や安全対策などのソフト面でのノウハウも提供する予定であり、ベトナムの産業育成に大きく貢献するものであると自負している。

また、ドンパオのあるライチャオ州はベトナムでも2番目

に貧しい州であり、インフラが未整備であるため産業誘致も進まず、新興国が直面する典型的な地域格差の問題を抱えている。ドンパオのレアアース鉱山開発は、この地域の社会経済開発と一体で考えられており、円借款による道路、橋梁、給水システムなどのインフラ整備も検討されている。日本の官民連携による取り組みで、資源開発と経済協力が効果的に結びつき、実現すれば地域への裨益効果が非常に大きい。従来、資源開発は貧富の差を生むことが多く、資源の呪いといった言葉もあるが、レアアースの開発は地域開発や産業育成にも貢献するものであることを示すことができれば、世界の資源の安定供給にも貢献する。

レアアースの供給の問題は、技術立国日本のこれからの成長戦略の中で考えねばならない問題であり、商社としてこの分野に取り組むことは、産業イノベーターとしてのミッションでもある。さらに、限られた資源を世界の持続的発展のために有効に利用していく新しい資源開発のビジネスモデルを、日本が官民連携で示すことができれば、それは、経済面でも外交面でも大きなメリットになるだろう。

参考文献

- 1) 安永裕幸：鉱物資源確保と日本の資源政策 経済産業省 資源エネルギー庁鉱物資源課, (2010) 11/24.
- 2) 小野まな美：産調レポート 岡三証券企業調査部, (2011) 1/16, 17.
- 3) 同上, 21.
- 4) 財新メディア, (2011) 1/17.
- 5) 小野まな美：産調レポート 岡三証券企業調査部, (2011), 22.
- 6) 安永裕幸：鉱物資源確保と日本の資源政策 経済産業省 資源エネルギー庁鉱物資源課, (2010) 11/24.
- 7) 小野まな美：産調レポート 岡三証券企業調査部, (2011), 24.
- 8) 財新メディア, (2011), 1/17.
- 9) Newton, (2011) 3, 18-19, 30-31.
- 10) 杉浦誠司, 氏原義裕, 吉田篤：来るべきEV社会とレアメタル問題, みずほ証券株式会社, (2011), 1/7.
- 11) 小野まな美：産調レポート 岡三証券企業調査部, (2011), 9-10.
- 12) U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, (2010) January, 129-130.
- 13) 小野まな美：産調レポート 岡三証券企業調査部, (2011), 25.
- 14) Newton, (2011) 3, 40-41.

(2011年3月10日受付)



入門講座

鋼を接合するー巻頭言

鋼を接合する (Joining Steels) シリーズ企画にあたって

会報委員会

近年、省資源化、省エネルギー化そして二酸化炭素排出量削減を目的とした輸送機器の更なる軽量化や次世代構造物の実現を目指し、鉄鋼材料をはじめとする構造用金属材料のより一層の高強度化、安全・安心化・長寿命化への要求が高まっている。開発した高強度材料を実用化に結びつけるためには材料の性能を最大限に引き出すことができる加工・成形技術、表面処理技術の開発とともに接合技術の開発もまた不可欠である。

金属材料の接合方法はボルトやリベットなどを用いた機械的接合、溶接、接着に大別される。それぞれの接合方法には長所と短所があり、材料の構造体化にはこれらの接合方法がその特徴に応じて適材適所に組み合わせて用いられる。それぞれの接合方法において、接合にともなう金属組織の変化やその後の経年変化も様々であり、要求される材料の性能も当然異なっている。したがって、材料開発の視点からは、これらの接合方法の原理や特徴を基礎から体系的によく理解して、材料開発にフィードバックすることも重要である。

そこで、本入門講座シリーズでは、鉄鋼材料 (他の金属材料も含む) の接合の現状と課題を、接合法の原理も含めて本会の学生会員などの材料分野の初級者にも分かりやすく概説して頂くことを目的とし、以下のように企画している。

1. 機械的接合では、
 - ・高力ボルト接合の接合方法、ボルトの種類と用途、
 - ・セルフピアシングリベット・メカニカルクリンチ接合、
2. 溶接では、
 - ・溶接の全体の解説に引き続いて、
 - ・アーク溶接
 - ・レーザー溶接
 - ・抵抗スポット溶接
 - ・摩擦攪拌接合 (非溶融接合)

などのテーマを取り上げていく予定である。

本企画により、鉄鋼材料をはじめとする構造用金属材料の接合技術に関する理解が深まり、構造用金属材料の新たな機能創成を考える上での一助になれば幸いです。



入門講座

鋼を接合する-1

高力ボルト接合 ー接合法ー

High Strength Bolted Joints -Connecting Methods-

山口隆司

大阪市立大学 大学院工学研究科
都市系専攻 教授

Takashi Yamaguchi

1 はじめに

我が国における大規模社会インフラ構造物の多くは、耐震性などを考慮して鋼構造物として建設されることが多い(図1)。鋼構造物は一般に工場で鋼板等を組み合わせた部材を製作し、それを現地に運搬し、現地でこれらの部材を接合し、建設される。接合技術は、工場内での部材組み立てや現地で部材接合において重要な役割を果たしており、計画、設計、建設、維持管理といった鋼構造物のライフサイクルマネジメントにおいて考慮すべき重要な要素となっている。

インフラ鋼構造物における鋼部材の接合方法は、図2に示すように、溶接接合と高力ボルト接合とに大別される。高力ボルトが登場する以前には、リベットによるリベット接合が高力ボルト接合に変わるものとして主流であったが、昭和39年にJIS B 1186摩擦接合用高力六角ボルト・六角ナット・平座金のセットが制定された後には、リベット締め作業に熟練を要すること、騒音が激しいこと、火気を必要とすることなどの施工・環境・安全上等の問題からリベット接合はほと

んど使われていない。インフラ鋼構造物における接合方法の分類を図2に示す。

高力ボルト接合は、工場で作られた部材を架設現場で接合する際に最も多く採用される接合法であり、荷重伝達メカニズムの違いにより、摩擦接合、支圧接合、引張接合に分類される。一方、溶接接合は、部材の組み立て時、すなわち、工

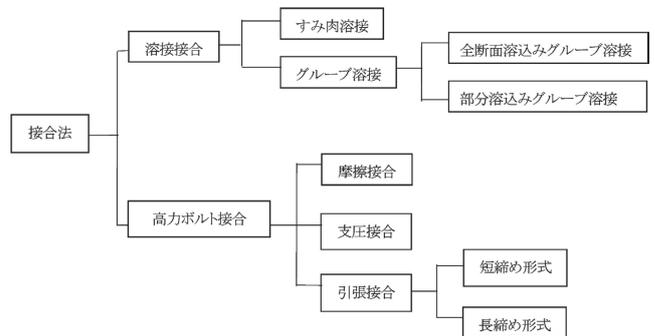


図2 インフラ鋼構造物における接合法の分類



図1 大規模社会インフラ構造物の例

場製作時に多く用いられる。

高力ボルト接合におけるいずれの接合形式においても、使われるボルトは高強度のボルトで、高い軸力（降伏ボルト軸力またはその付近）を導入して使用する。なお、高力ボルトに導入される軸力を管理せず、単にとじあわせのボルトとして使用する場合は、我が国では高力ボルト接合とは呼ばず、区別している。高力ボルト接合のインフラ鋼構造物における事例を図3に紹介する。左図は、人道橋のトラス格点部であり、右図は道路橋の鋼桁の現場継手部分である。いずれも摩擦接合形式であり、多数の高力ボルトが配置されている。

本稿では、インフラ鋼構造物の接合に使われている高力ボルト接合を対象に、接合形式ごとの荷重伝達メカニズムやその特徴について解説する。

2 摩擦接合

摩擦接合は、図4に示すように、ボルト軸と直角方向の作用力を伝達する接合形式であり、鋼構造物の現場接合形式として最も多用される。摩擦接合の適用事例は既に図3に示した。部材の板厚が厚く、作用断面力が大きい場合、ボルトの列数が10列程度となることも多い。

摩擦接合は、高力ボルトを締め付けて接合面間に発生させた接触力により作用力に抵抗する摩擦力を発生させ、作用力の伝達を行う。同じように材片を重ねて接合するリベットや軸力を導入しない普通ボルトによる接合法は、リベットおよびボルト軸部と材片との間の局所的な支圧力やせん断力によって作用力を伝達しており、摩擦接合と異なる。

摩擦接合では、作用力が摩擦力を超えて作用し、材片間にすべりが発生するまでは、静的摩擦力により作用力に抵抗し、材片間にずれは生じない。このように摩擦力を介して荷重伝達を行うことから、ボルト孔周辺の鋼板に高い応力集中

も発生せず、ボルトの軸力変動も小さい。そのため、疲労に対しても有利な接合形式である。また、摩擦力により被接合材と連結板とが一体となるため接合部の剛性は高い。ただし、静的摩擦力を超えた作用力が作用すると材片間にずれが発生し、作用力の増大とともに、残った摩擦力とボルトのせん断力および支圧力で作用力を伝達する。最終的には作用力のすべてをボルトのせん断力および支圧力で伝達する状態（支圧状態）へと移行する。なお、材片間のずれをすべりと呼び、このすべりが発生する限界をすべり限界と呼んでいる。我が国のインフラ鋼構造物の設計では、このすべり限界を終局限界として設計されることが多い。しかしながら、すべり限界以降、すべりによる相対ずれが発生し、接合部は支圧状態となるが、接合部の耐力は増加することから、欧米では、構造物の種類によっては、すべり限界を終局限界とせず、支圧状態においてボルトのせん断耐力もしくは、孔壁の支圧耐力に到達する限界状態（支圧限界状態）を終局限界とする場合もある。摩擦接合における作用力 P と相対変位 δ との関係の概念図を図5に示す。

摩擦接合では、前述した荷重伝達メカニズムから材片間（接合面）の摩擦力が重要となる。この摩擦力を確実に発生させるためには、高力ボルトに所定の軸力を確実に導入するこ

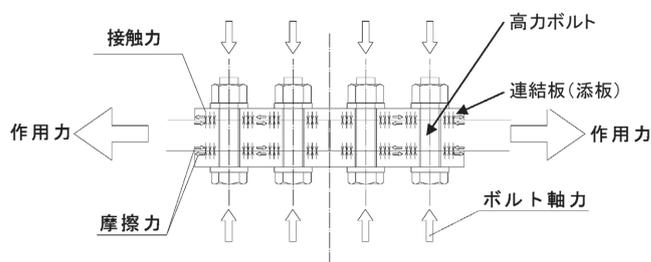


図4 摩擦接合の荷重伝達メカニズム

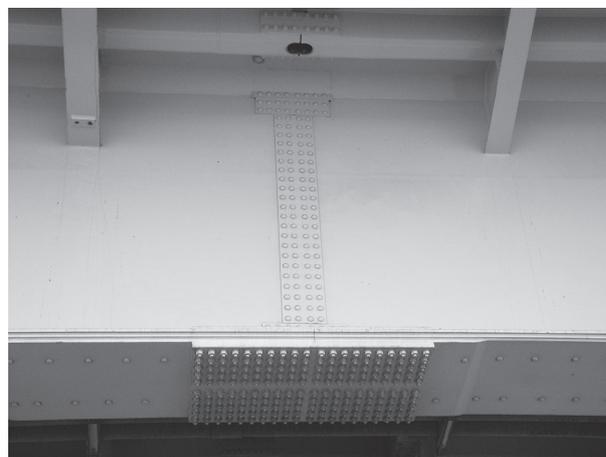
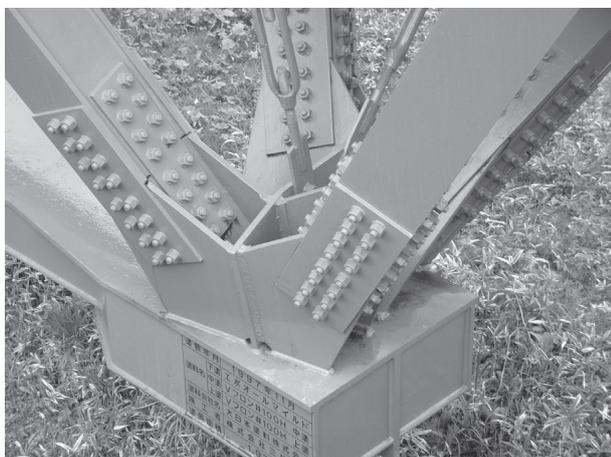


図3 インフラ構造物における高力ボルト接合の事例（摩擦接合）

と、および所定のすべり係数 μ を確保できる接合面処理を行うことが必要であり、これらの管理が重要となる。そのため、接合面では、これらのすべり係数値以上を確保できるよう、十分な配慮がなされる。

摩擦接合における一接合面あたりの摩擦力は次式で表され、作用力がこの摩擦力を超えた段階ですべりが発生する。

$$F = \mu N \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

F ：ボルト1本、1接合面あたりの摩擦力

N ：設計ボルト軸力

μ ：すべり係数

ここでいう、すべり係数とは、式(1)からわかるように、接合面にすべりが生じた時の荷重(作用力)を、設計ボルト軸力で除した値である。つまり、接合面にすべりが生じた時の

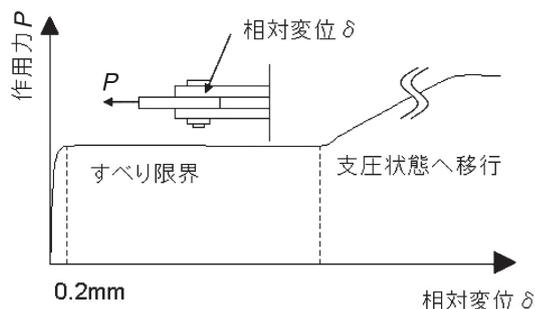


図5 摩擦接合における作用力と相対変位の関係の概念図

ボルト軸力で除すのではないということであり、それ故、摩擦係数と呼ばずにすべり係数と呼んでいる。また、あくまで、接合部に作用した荷重に着目した平均的な摩擦係数であり、この意味からもすべり係数と呼ばれる。なお、実際の施工では、接合面におけるリラクゼーション等を考慮して、設計ボルト軸力を1割増しとした標準導入軸力を目標値として軸力を導入・管理し、リラクゼーションによりボルト軸力が設計ボルト軸力を下回らないよう配慮している。

すべり係数 μ はすべり試験の結果から求められるものであるが、その値は締付けられる接合面の処理状況で異なる。しかしながら、設計・施工上の簡便さから、日本道路協会道路橋示方書・同解説²⁾では0.4、日本建築学会鋼構造設計規準³⁾では、0.45と一律の値をすべり係数として規定している。

一方、現在では、接合部のコンパクト化(ボルト本数の低減)などの観点から、接合面処理に見合った高いすべり係数を採用したいとのニーズもあることから、過去の実験結果を参照し、接触面の処理状態に応じてすべり係数の推奨値を提案している。例えば、土木構造物を対象としている文献⁴⁾では、これらすべり係数の推奨値を表1のように規定している。また、建築構造物についても、文献⁵⁾で接合面処理に応じたすべり係数が提案されている。

土木構造物では、継手部が防錆上の弱点となりやすいこと、錆汁などの発生から外観が損なわれることなどから、接合面にプラスト処理後、厚膜型無機ジンクリッチペイントを塗布する接合面処理が一般的である。一方、建築構造物では、プラスト処理後、赤さびを発生させる接合面処理が一般的である。

高力ボルトは、接合面間に高い接触力を生じさせる役割を担うため、大きな引張力に耐え得るものが必要となる。現在、

表1 土木鋼構造物におけるすべり係数の推奨値⁴⁾

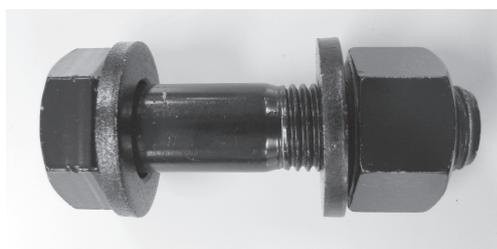
接合面の処理	すべり係数	備考
赤錆状態	0.55	粗面仕上げの後に、健全な赤錆を発生させたもの。
薬剤による発錆	0.45	化学薬剤によって、健全な赤錆を発生させたもの。
粗面状態	0.25	ディスクグラインダーによって粗面とし、錆がないもの。
粗面状態	0.35 (表面粗さの指定なし)	ショットプラストまたはグリッドプラストによって粗面とし、錆がないもの。
	0.40 (10 μ m > Ra \geq 5 μ m)	
	0.45 (Ra \geq 10 μ m)	
無機ジンクリッチペイント	0.40 (塗膜厚 \leq 65 μ m)	合計塗膜厚を90~250 μ mとする。塗料中の乾燥亜鉛含有量は80%以上を原則とする。
	0.50 (塗膜厚 > 65 μ m)	合計塗膜厚を150~250 μ mとする。塗料中の乾燥亜鉛含有量は80%以上を原則とする。
有機ジンクリッチペイント	個別にすべり試験を行うなど、継手の性能を確認して決定する。	
溶融亜鉛めっき		
金属溶射		
機械的な粗面加工		

一般的に使用されている高力ボルトは、JIS B 1186摩擦接合用高力六角ボルト、ナットおよび座金のセットに規定される第1種 (F8T) および第2種 (F10T) 高力六角ボルト、摩擦接合用トルシア形高力ボルト・六角ナット・平座金のセット、同解説^{6,7)}に規定されるトルシア形高力ボルトである。なお、ここでFはfor Friction Grip Joints (摩擦接合用) を意味し、Tはボルトの引張試験による引張強さとTensile Strengthを表している。例えば、F10Tは引張強さ $100\text{kgf}/\text{mm}^2 = 10\text{tonf}/\text{cm}^2$ の摩擦接合用を表している。両者のボルトの例を図6にそれぞれ示す。後者のトルシア形高力ボルトは、ねじ部の縁端部にあるピンテールをつかんでナットを回転させ、所定のトルクに達するとピンテール部の溝が破断するボルトであり、容易に一定のトルクでボルト締めが可能となっている。図6に示すとおり、摩擦接合用高力六角ボルトでは、2枚の座金を使用するが、トルシア形高力ボルトでは、頭部側の座金を用いない。実際の架設現場では、所定の軸力が導入されているかなどの施工管理上の容易さから、トルシア形高力ボルトの採用が主流となっている。いずれも、ボルト、座金、ナットを組み合わせたセットとして製造、出荷される。これは高力ボルトに一定の軸力を確実に導入するためにセットとして、その性能が保証されているからである。

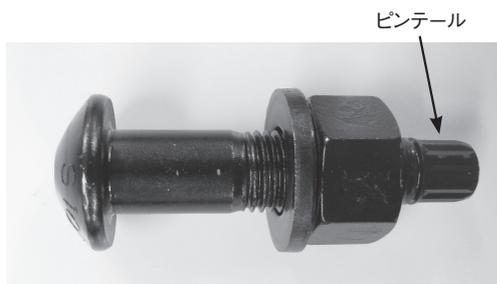
摩擦接合におけるボルト孔径は施工性も考慮して、ボルトの呼び径+2から2.5mm (M20からM24の場合) となっている。

3 支圧接合

支圧接合は、摩擦接合同様に、ボルト軸と直角方向の作



(a) 高力六角ボルト



(b) トルシア形高力ボルト

図6 摩擦接合用高力六角ボルトとトルシア形高力ボルト

用力に対し、ボルト軸部のせん断抵抗およびボルト軸部とボルト孔壁部材の支圧抵抗によって作用力を伝達する接合形式である。支圧接合の荷重伝達メカニズムを図7に示す。支圧接合は摩擦接合や後述べる引張接合と異なり、高力ボルトを締め付けることによって生じる材片間の接触力を利用するのではなく、高力ボルトそのものの高い強度を利用する接合形式であり、荷重伝達メカニズム上はボルトの締め付けを必要としない。

設計上、支圧接合の耐力は、ボルトのせん断耐力と鋼材孔壁の支圧耐力のいずれか小さい方で定義される。支圧耐力が鋼材の一軸降伏耐力よりも大きいこと、摩擦力よりもボルトのせん断耐力が大きいことから、支圧接合の耐力は摩擦接合のそれよりも高くなる。そのため、摩擦接合に比べ、少ないボルト本数で接合部を構成することも可能となり、十分なボルトを配置するだけのスペースがない時など、補修・補強時の接合法として現在、注目されている。

道路橋示方書・同解説²⁾では、支圧接合でも摩擦接合の場合と同様な軸力を高力ボルトに与えて継手性能の改善を図るよう規定している。ただし、設計上は、摩擦による力の伝達は考慮せず、ボルトに対してはボルト軸部のせん断応力、被接合材および連結板に対しては、それらの降伏応力に対して安全となるよう設計するものとしている。

既に述べたように、支圧接合ではボルトのせん断抵抗とボルト軸部とボルト孔壁部材の支圧抵抗によって荷重伝達を行うことから、ボルト孔壁とボルト軸部との密着性が重要となる。したがって、用いる高力ボルトは、それに対応した、図8に示すような突起付きの支圧接合用打込み式高力ボルトを採用することが多い。ただし、摩擦接合用高力六角ボルトや摩擦接合用トルシア形高力ボルトを用いる場合もあり、この場合、ボルト孔とボルト軸との隙間をできるだけ小さくし、すべりが生じても接合部のずれが小さくなるように配慮する。このため道路橋示方書・同解説²⁾では、支圧接合に用いるボルトは、支圧接合用打込み式高力ボルト、六角ナット、平座金暫定規格⁸⁾によるものとし、ボルト孔径については、ボルト軸径と等しいとし、打ち込み作業の難易も考慮して、工作上許容できる限界を孔加工の精度として規定している。さらに、打ち込みの作業性(打ち込み難易度)や、ボルト孔周縁の傷、

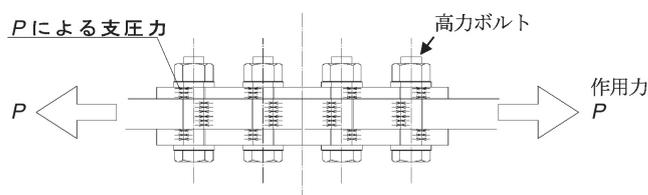


図7 支圧接合の荷重伝達メカニズム

被接合材の厚さと打込み強さ、ボルト孔の大きさと食い違いなどの部材精度についても十分検討するよう規定している。実際の施工にあたっては、作業者はもちろん、周辺環境、周辺住民への施工時騒音に対する配慮が必要となる。

支圧接合で用いられる孔径は高力ボルトの呼び径 (M20 から M24) に対し、+1.5mm となっている。

このようなことから支圧接合は我が国の鋼構造物での使用実績は多くはないが、最近では、大きな断面力が作用する鋼製ラーメン橋脚隅角部の補修・補強工事のあて板補強に用いられるなど、有効な接合法として注目されている。

4 引張接合

引張接合は、高力ボルトを締め付けて接合面間に発生させた接触力により作用力の伝達を行うことは摩擦接合と同じであるが、図9に示すように、伝達すべき作用力はボルト軸方向に作用し、作用力の増加分と接触力の減少分とがつり合って作用力を伝達する。引張接合の荷重伝達メカニズムを図9に示す。

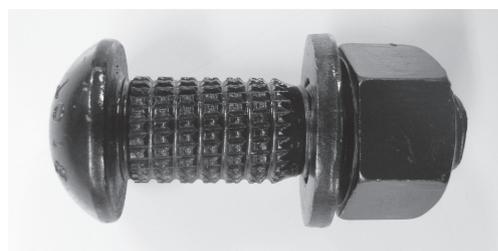
引張接合には、接合面を向かい合わせに直接接触させて、高力ボルトで締め付けて接合する短縮め形式と、リブプレートおよびアンカープレートなどを介して締め付ける長縮め形式とがある。短縮め形式と長縮め形式とは、リブプレートを介して作用力を伝達するか否かで分類されており、単にボルトの長さで短縮め、長縮めと分類するのではない。短縮め形式では、接合用材片の形状から、スプリットティー接合やT接合とも呼ばれる。作用力が主として接触力の減少とつり合

うという基本的なメカニズムは短縮め形式でも長縮め形式でも同一である。接触力によって発生する摩擦力を利用する摩擦接合と引張接合とを比較すると、すべり係数が関与しない引張接合は、接触力を直接利用するため、大きな荷重 (ボルト1本あたり) を伝達することができ、効率的である。また、高力ボルトに導入される高い軸力によってもたらされる接触力のために接合部の剛性は高い。さらに、この接触力の存在により、作用荷重の変動に対してボルト軸力の変動はきわめて小さく、耐疲労性にも優れている。ただし、摩擦接合では荷重に伴うボルト軸力の増加はほとんどないが引張接合では荷重に伴い、短縮め形式か長縮め形式かによるが、ボルト軸力の増加を伴う場合がある。

引張接合にせん断力が作用する場合には、摩擦接合と同様の荷重伝達機構によってせん断力に抵抗する。このように見ると、引張接合は、引張力とせん断力、それぞれの作用力に対応した、異なる荷重伝達メカニズムにより荷重伝達を行う接合形式であると言える。

引張接合は高力ボルトの高い引張強さを活かした合理的な接合方法ではあるが、その力学的挙動に対する理解が一般的でないことや施工時誤差の吸収が困難であることなどから、広く普及するには至っていない。

短縮め形式の場合は、いわゆる、てこ作用と呼ばれる現象が発生し、作用力の増加に伴ってボルト軸力が増加する。作用力が初期ボルト軸力より大きい場合のてこ作用およびてこ反力の概念図を図11に示す。Tフランジの剛性が無限大でないため、Tフランジ先端部分には作用力の増加に伴うTフランジの変形に伴って、てこ反力 R が発生する。このようなTフランジの変形に伴って接合面間に発生する接触力をてこ反



(a) 丸頭



(b) 皿頭

図8 支圧接合用打込み式高力ボルト

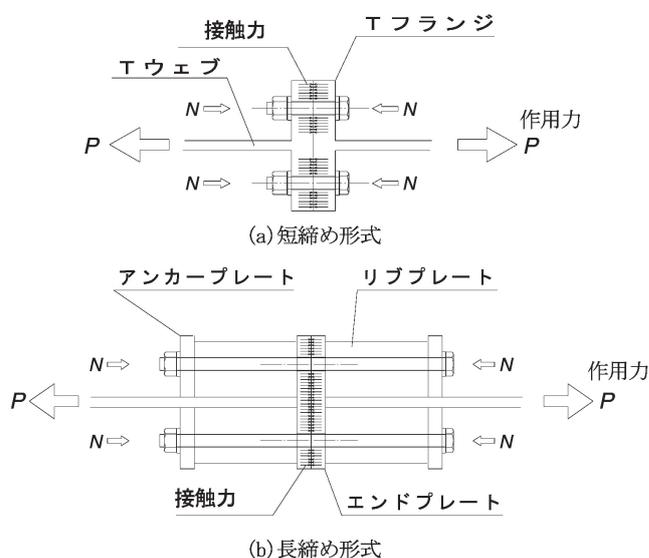


図9 引張接合の荷重伝達メカニズム

力 R と呼んでいる。短縮め形式の引張接合の設計では、このてこ反力の発生は無視できない重要な項目である。Tフランジの板厚が大きくなればなるほど、Tフランジの剛性が大きくなり、てこ反力の発生を少なくすることができる。設計では、作用力に対して、てこ反力を考慮したボルト軸力がボルトの限界軸力を越えないように設計する。

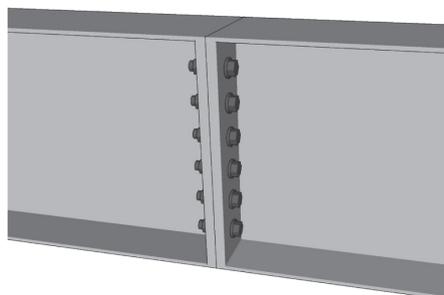
T接合における作用力（荷重）と離間量（Tウェブ位置）の関係の概念図を図12に示す。図に示すように、Tフランジ

（フランジ板）の板厚によりその挙動は異なる。すなわち、Tフランジ（フランジ板）が薄いほど離間開始の荷重レベルも低く、Tフランジの降伏が支配的となり、Tフランジの曲げ崩壊で終局状態となる。一方、Tフランジ（フランジ板）が厚い場合、離間開始の荷重レベルは高く、離間量も小さい。この場合、Tフランジではなく、高力ボルトの挙動が支配的となり、高力ボルトの降伏、そして破断により終局状態となる。

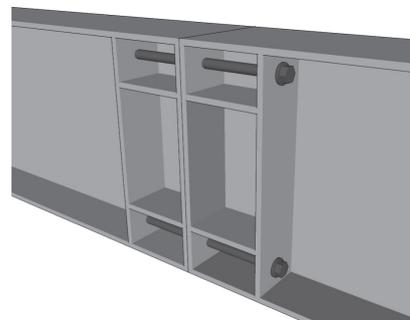
一方、長縮め形式の場合は、図13に示すように、短縮め形



(a)短縮め形式 (○部分) (上)
(b)長縮め形式 (右)



(c)短縮め形式を適用した事例



(d)長縮め形式を適用した事例

図10 引張接合を用いた継手構造の例

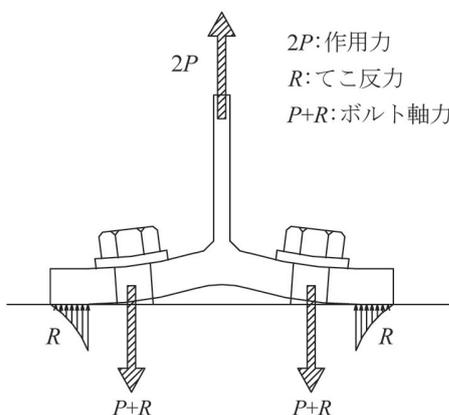


図11 てこ作用とてこ反力

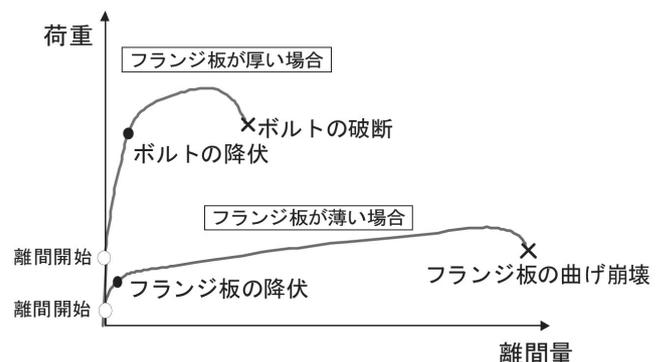


図12 T接合における作用力と離間量の関係

式と異なり、短縮め形式のTフランジに相当するエンドプレートがリブプレートで補剛されること、また、その結果、作用力と発生する接触力の作用位置の偏心が少なくなることから、てこ作用は考慮しなくてよいほど小さくなる。そのため、設計にあたってそれを考慮する必要はない。しかし、短縮め形式と異なり、接合部の弾性変形によってボルト軸力が増加することは無視できず、これを考慮する必要がある。

短縮め形式に用いるボルトには、摩擦接合に用いる摩擦接合用高力六角ボルトや摩擦接合用トルシア形高力ボルトを採用する。特に、短縮め形式では作用力によってボルト軸力が初期ボルト軸力よりも増加するので、トルシア形高力ボルトを使用する場合には、ボルト頭の鋼材へのめりこみによる初期ボルト軸力の減少が摩擦接合に比べ大きくなることが予想される。そのため、日本鋼構造協会橋梁用高力ボルト引張接合設計指針⁹⁾では、ボルト頭部側にも座金を用いることとしている。

一方、長縮め形式に用いるボルトは、短縮め形式に用いるボルトのほかに、六角ボルト (JIS B 1180¹⁰⁾ で規定される強度区分8.8、10.9の2種) および棒鋼をねじ加工したボルトを用いる。素材としては、炭素鋼や合金鋼 (強度区分10.9以下の範囲) を使用することができる。

高力ボルト引張接合におけるボルト孔径は、摩擦接合と同様であり、M20からM24の高力ボルトに対して、ボルトの呼び径+2.5mmとなっている。

5 まとめ

以上のように、高力ボルト接合は、高力ボルトに高い軸力を導入してその結果得られる接触力を利用する摩擦接合と引張接合、さらに、主として高力ボルトそのものの高い強度を

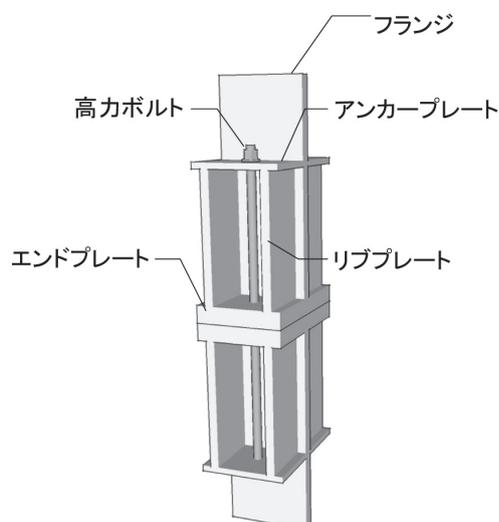


図13 長縮め継手の構造詳細の例

利用する支圧接合に分類される。いずれも、高力ボルトの高い強度を利用した接合形式である。

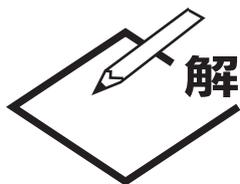
現在、社会インフラ構造物には、我が国の経済・社会情勢を踏まえ、建設費や維持管理費を含めたライフサイクルコストの縮減が強く求められている。鋼構造物は、主として、構造のシンプル化、高耐久性化によってそれを実現しようとしている。したがって、部材と部材とを接合する、代表的な接合形式である高力ボルト接合においても同様なことが求められている。高力ボルトの一層の高強度化はボルト本数の低減をもたらす、継手構造をシンプルにし、省力化、高耐久性化に大きく貢献する。特に、高力ボルト接合部は、塗装の面から防錆上の弱点となっており、ボルト本数の低減が高耐久性化にもたらす影響は小さくない。社会インフラ鋼構造物における高力ボルトの高強度化は、F11T、F13Tのボルトで発生した過去の遅れ破壊の問題から、あまり進んでおらず、部材を構成する鋼材の高強度化とのアンバランスが設計上問題となる場合がある。実際、建築構造物ではF14T高力ボルトの使用が認められているが、橋梁などの土木構造物においては、F14Tの使用は認められておらず、橋梁構造物の接合部設計を難しくしている場合がある。

したがって、高力ボルトに適した、高強度で高耐久な鋼材の開発とその高力ボルトへの加工技術、そして、性能評価技術の開発が、社会インフラ鋼構造物の接合部において強く求められており、これらを用いた大規模社会インフラ鋼構造物の一日も早い出現を期待したい。

参考文献

- 1) 日本規格協会：JIS B 1186-1995 摩擦接合用高力六角ボルト・六角ナット・平座金のセット, (1995)
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, (2002)
- 3) 日本建築学会：鋼構造設計基準, (2005)
- 4) 土木学会：高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針 (案), (2006)
- 5) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針, (2006)
- 6) 日本道路協会：摩擦接合用トルシア形高力ボルト・六角ナット・平座金のセット, (1983)
- 7) 日本鋼構造協会：JSS II 09-1996 構造用トルシア形高力ボルト・六角ナット・平座金のセット, (1996)
- 8) 日本道路協会：支圧接合用打込み式高力ボルト・六角ナット・平座金暫定規格, (1971)
- 9) 日本鋼構造協会：橋梁用高力ボルト引張接合設計指針, (2004)
- 10) 日本規格協会：JIS B 1180-2004 六角ボルト, (2004)

(2011年2月16日受付)



解説

受賞技術-5

高い船体安全性を備え 地球温暖化防止に寄与する高強度鋼板の開発

Development of High Strength Steel Plate with Higher Resistance to Hull Destruction for Prevention of Global Warming

金子雅人 (株) 神戸製鋼所 鉄鋼事業部門
技術開発センター
Masahito Kaneko 厚板開発部厚板開発室

1 緒言

近年、地球規模での物流量の増大から船舶の大型化が進んでいるが、船体軽量化によるCO₂低減のため、高強度鋼板の採用が広がっている。一般的に造船用鋼板としては、強度の他にも溶接施工性、靱性といった特性を確保することが重要となるが、それら全てを満足するような鋼板を製造するためにはNi、Mo等の合金元素の添加が必要となり、コスト削減の観点から製造技術による達成が強く求められていた。

本開発は、これらの課題を解決した造船用鋼板最高強度クラスのYP460MPa級鋼板(図1) 製造技術の確立を行ったものである。本鋼板の採用によって、軽量化に伴うCO₂削減効果のみならず、(1) コストの低減 (2) 大入熱溶接による溶接施工の効率化 (3) 供給安定性やリサイクル性の向上といった多くのメリットが享受できる。本鋼板は、現在、国内造船メーカーで使用されているものであり、平成22年度第42回市村産業賞を受賞した。本稿では、開発技術の内容と特性について概説する。

2 開発技術

本開発技術は、高強度かつ高靱性の母材金属組織を造り込む技術と微量添加元素の最適化による大入熱溶接時の靱性劣化を防止する溶接熱影響部(HAZ: Heat Affected Zone)

	YP(MPa)	TS(MPa)	
YP315	≧315	440~590	船体構造用鋼規格
YP355	≧355	490~620	
YP390	≧390	510~650	
YP420	≧420	540~690	2ランク高強度化
YP460	≧460	570~720	

図1 船級の規格体系

組織制御技術から構成される。具体的には、①低成分でも高強度化を達成する均一強冷却が可能なTMCP (Thermo-Mechanical Control Process) 技術¹⁾、②結晶粒径微細化による高靱性を達成する多段冷却による圧延時の温度制御と圧下率の厳密制御が可能なプロメ (Plate Rolling system for Mechanical property control)²⁾ 技術、③大入熱溶接継手特性に寄与するHAZ部組織の微細化を達成するTiN微細分散技術と破壊の起点となる島状マルテンサイト (MA) を抑制する成分系を確立した。

2.1 均一強冷却を可能とするTMCP技術

従来、加速冷却では巾端部の過冷や板上面の冷却能増大による板内の不均一冷却から残留応力の発生が起り、冷却後の熱処理による残留応力除去が必要となる場合があり、それによる強度低下が問題となっていた。これに対し図2に示す

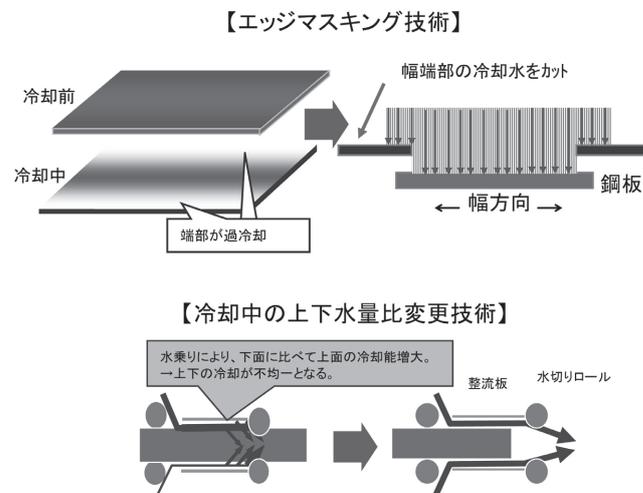


図2 均一強冷却技術の模式図

* 第42回市村産業賞(貢献賞)受賞技術

ような端部過冷を防ぐエッジマスキングや板上面の冷却能増大を防ぐ上下水量比可変技術を開発することにより、残留応力発生による問題を解決できる均一強冷却技術を実現した。

2.2 多段冷却による温度制御と圧下率制御を可能とする 圧延技術（プロメ技術）

一般に材料は、すべり変形を起こさない場合、へき開亀裂が発生し、脆性亀裂として表面エネルギーの低い結晶面に沿って進展し破壊する³⁾。そのため万一船体に亀裂が発生した時に亀裂を停止させるアレスト特性は、脆性亀裂伝播抑制効果の高い結晶方位差15°以上の大傾角粒を細粒化し、抵抗箇所を増やすことで向上すると考えられる。それには結晶粒径微細化に有効である再結晶、未再結晶温度域にて一定以上の圧下を付与することが必要条件となるが⁴⁾、厚肉材においては板厚方向の温度傾斜が大きい。そこで温度予測シミュレーションで板厚方向温度分布を予測するとともに、多段冷却の適用によって、板厚中心部が結晶粒径微細化に最適な温度域に制御された状態での圧下を可能にするプロメ技術を活用した。EBSP (Electron Back Scattering Pattern)⁵⁾ による組織観察をした結果、図3に示すように大傾角粒界径を従来の1/2以下に制御できることを確認した。

2.3 Ti窒化物の微細分散によるHAZ部の組織微細化技術

大入熱特性は成分系による影響が大きい。入熱量が40kJ/mmを超える超大入熱溶接では、HAZにおいて旧 γ 粒径が粗大化し、靱性を劣化させる。これを防止するために、図4に示す神戸製鋼所のTiNの微細分散によるHAZ組織の

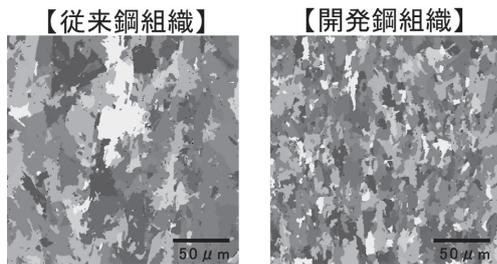


図3 従来鋼と開発鋼のEBSP組織

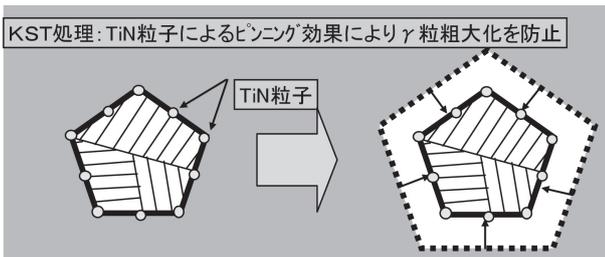


図4 TiN微細分散による γ 粒粗大化防止効果

細粒化技術であるKST (Kobe Super Toughness) 処理⁶⁾を用いた。この処理は従来のTiN技術を発展させたもので、TiNの多量分散を可能にし、かつ溶接時のTiN固溶により靱性に悪影響を及ぼす固溶N量を最小限化するTi、N量およびTi/N比に成分制御する技術である。またMA防止の観点から、強冷却の活用により強度を確保した上で、可能な限りの低C化や合金元素削減による低Ceq化を行った。その結果、図5に示すように従来鋼よりMAが低減できていることが確認できた。

3 開発鋼の性能

板厚60mmの開発鋼板を製造した。以下に開発鋼の特性を記載する。

3.1 均一強冷却による高強度化

開発鋼板の化学成分を表1に示す。2.3節の考えに基づき合金元素を削減しているため、Ceqは0.34%とYP355MPa級鋼板と同程度の低い値である。開発鋼板の母材引張特性を表2に示す。機械特性は、均一強冷却技術の適用により、低成分系にもかかわらず目標強度を満足している。

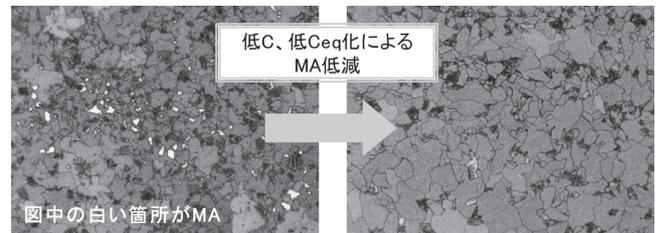


図5 低C化、低Ceq化による島状マルテンサイト (MA) 生成抑制

表1 開発鋼の化学成分

	化学成分 (mass%)				その他 添加元素	Ceq
	C	Si	Mn	Ti		
開発鋼	0.08	0.13	1.54	0.011	Nb,B,Ca	0.34
YP355	0.15	0.20	1.10	-	-	0.34

$$Ceq = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15$$

表2 開発鋼の母材引張特性

	YP (MPa)	TS (MPa)	EL (%)
開発鋼	487	582	27
YP460 spec.	≥460	570~720	≥17

※ 引張試験片形状: NK14A

3.2 組織微細化によるアレスト特性の確保

アレスト委員会設計指針にて温度勾配型脆性破壊試験 (ESSO) での最低使用温度 (-10℃) における応力拡大係数 Kca を 6000N/mm^{1.5} 以上確保することにより、安全性を確保できると報告されている⁷⁾。大傾角粒の細粒化により、表3に示すように開発鋼は7000N/mm^{1.5} 以上と十分高い値を確保している。

3.3 1パス大入熱エレクトロガスアーク溶接における機械特性確保

開発鋼板の溶接条件および溶接継手特性を表4に示す。造船における実際の施工を模擬して、入熱量が42kJ/mmの1パス大入熱エレクトロガスアーク溶接を行った。継手強度は母材強度を高強度化させることにより、目標値を十分に満足している。また継手靱性においてもTiN微細分散技術とMA低減により、Vノッチシャルピー試験、試験温度-20℃において全てのノッチ位置で53J以上と良好な値を確保している。またこの1パス大入熱エレクトロガスアーク溶接が適用可能となることにより、従来鋼と比較して、溶接における工数比は1/9以下に低減することができる。

4 開発技術の効果および今後の展望

高強度化に伴う船体の軽量化を通して、低燃費化・CO₂削減が可能である。具体的には、本開発鋼板をコンテナ船の

ハッチサイドコーミングに適用することを前提とした場合、約1000トン/年・隻のCO₂削減効果が期待できる試算結果が得られている。また、本開発鋼板は①TMCP技術、②プロメ技術、③溶接部の組織制御技術を活用することによって、レアメタルであるCu、Ni、Cr、Moを添加せずに(1)コストの低減 (2)大入熱溶接による溶接施工の効率化 (3)供給安定性やリサイクル性の向上を達成することができており、今後想定されるレアメタルの入手性に左右されず、安定して供給できるものと考えられる。将来的には、本開発鋼板および製造技術を船舶以外にも橋梁、建設・運送機械、エネルギー等へ適用することにより、地球環境への更なる貢献が期待できる。

参考文献

- 金子雅人・泉学・古川直宏・安部研吾：超大型コンテナ船向け大入熱溶接用YP460MPa級厚肉鋼板の開発，R&D 神戸製鋼技報，58 (2008) 1, 39-41.
- 藤内秀人，森本禎夫，藤本雅人，島田信太郎，中西逸雄，前田恭志：厚板圧延におけるオンライン材質制御技術の開発—厚板プロメシステムの開発—材料とプロセス，14 (2001)，1040.
- 粟飯原周二：結晶粒超微細化鋼の諸特性と応用，第177回西山記念講座，日本鉄鋼協会編，(2003)，159-160.
- 金子雅人，谷徳孝：低カーボンベイナイト組織に及ぼすTMCP条件の影響，CAMP-ISIJ，22 (2009)，1315.
- 鈴木清一：まてりあ，40 (2001) 7, 612.
- 山内学：大入熱溶接用厚鋼板の進歩，R&D 神戸製鋼技報，50 (2000) 3, 39-41.
- 超大型コンテナ船の構造安全対策の検討に係る調査研究報告書，財団法人日本船舶技術研究協会，(2009)

(2011年1月13日受付)

表3 開発鋼のアレスト特性 (ESSO 試験結果)

	Kca (-10℃) (N/mm ^{1.5})
開発鋼	7400
従来鋼	3000
YP460 spec.	≥6000

表4 開発鋼の溶接条件および溶接継手特性

板厚 (mm)	溶接条件								溶接継手部機械特性				
	開先 角度 (°)	ルート ギャップ (mm)	溶接材料	パス 回数	溶接 電流 (A)	溶接 電圧 (V)	溶接 速度 (cm/min)	入熱量 (kJ/mm)	TS ^{※1} (MPa)	vE-20 ^{※2} (J)			
										板厚方向 位置	溶接金属	溶融線 (Fusion line)	FL+1mm
60	20	8	ワイヤー: DW-460L(1.2mmφ) シールドガス: CO ₂	1	400	43	2.5	42	578	表面	117	247	266
										t/2	83	131	182
										裏面	94	158	199
			YP47 spec						570 ~720		≥53 (Ave.) ≥37 (Each.)		

※1 引張試験片形状: NKU2A ※2 衝撃試験片形状: NKU4



受賞技術-6

変形性能に優れた高強度鋼管の開発

Development of High Strength Linepipe with Excellent Deformability

JFEスチール(株) スチール研究所 鋼材研究部
主任研究員

石川信行 Nobuyuki Ishikawa

JFEスチール(株) スチール研究所*1
主席研究員

鈴木信久 Nobuhisa Suzuki

1 はじめに

大規模な地震や凍土地帯で発生する地盤の大変形に対してパイプラインの安全性を確保するために「ひずみベース設計」の開発とその適用が進んでいる。「ひずみベース設計」では、埋設鋼管の局部座屈性能を評価、予測する技術と、それに対応した変形性能に優れた鋼管が必要である。従来から、鋼管の局部座屈性能を向上させる一般的な方法は管厚を増加させることであると認識されているが、管厚を増加させればパイプラインの建設費用が増加することは周知である。材料特性を改良することにより、鋼管の変形性能を向上させることが可能ならば、建設費用の増加を最小限に抑えながら、地震地帯や凍土地帯におけるパイプラインの安全性を確保することができる。また、近年のパイプラインの長距離化、高圧化に対応して、より高強度の鋼管の適用が求められており¹⁾、API-X80 (降伏強度550MPa以上) 等の高強度パイプラインのひずみベース設計とそれに対応した鋼管の開発が強く求められている。

本開発では、最初に材料特性を考慮した鋼管の局部座屈ひずみの定式化やFEM解析により鋼管の変形挙動を評価し、実管を用いた大型曲げ実験により検証するとともに、必要な材料特性を明確にした。次に、局部座屈性能を高めるための材料特性と鋼材のミクロ組織の関係を解明することにより材質の最適化を行い、そして最新の厚鋼板製造技術を活用して、高強度かつ高変形能の鋼管の大量製造技術を確立した。本稿ではその開発の概要について紹介する。

2 鋼管の局部座屈性能と材料特性

鋼管の局部座屈特性は鋼管の形状や操業圧力または変形モードによって複雑に変化するだけでなく、鋼管の材料特性の影響を大きく受ける。はじめに、軸圧縮を受ける鋼管の限界座屈ひずみから概説する²⁾。限界圧縮ひずみは応力ひずみ曲線にべき乗硬化則を用いると (1) 式で示される。

$$\epsilon_{cr} = \frac{4}{3} \sqrt{n} \frac{t}{D} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ϵ_{cr} : 限界圧縮ひずみ、 t : 管厚、 D : 平均管径、 n : 硬化指数である。X65以下の鋼管について $n=0.11$ とし安全率1.25を考慮すると $\epsilon_{cr}=35t/D$ (%) が得られる。これが、高圧ガス導管耐震設計指針³⁾の圧縮許容ひずみを表す式(ガス耐震式)である。これに対して鋼管の変形性能をより適切に推定するためには、以下に示す解析解⁴⁾を適用することができる。

$$\left(\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_0}\right)^N = -\frac{1}{2\alpha} \left(1 + \frac{1}{N}\right) + \frac{4}{3\alpha\sqrt{N}} \frac{E}{\sigma_0} \frac{t}{D} \dots\dots (2)$$

$$\epsilon_{cr} = \frac{\sigma_0}{E} \left(\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_0}\right) + \frac{\alpha\sigma_0}{E} \left(\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_0}\right)^N \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 ϵ : 公称ひずみ、 σ : 公称応力、 E : ヤング率、 α 、 σ_0 、 N : Ramberg-Osgoodの式の定数、 σ_{cr} : 限界圧縮応力、 ϵ_{cr} : 限界圧縮ひずみである。

表1にAPI材(X60、X70、X80)の代表的な引張特性を示す。これらは何れも規格最小値であり、一様伸びは6%とした。これらのAPI材について得られたR-Oパラメータを(2)式と(3)式に代入して得られた限界圧縮ひずみ曲線を図1に示

* 平成22年度文部科学大臣表彰科学技術賞開発部門受賞テーマ
*1 現 JFEテクノリサーチ(株)

す⁴⁾。3本の曲線を比較すると、X60の限界圧縮ひずみはX80よりも大きい。X60とガス耐震式の曲線を比較すると、D/tが40よりも大きい範囲で両者は一致している。一方、X70およびX80の曲線はガス耐震式よりも小さい。この計算例は、応力ひずみ曲線をSMYSとSMTSで定義した特別の条件であるが、軸圧縮を受けるX80の変形性能に関する課題を的確に抽出している。

変形性能に関する上記の課題を解決するためには、高変形性能を有する材料の開発と同時に、鋼管の変形挙動を理解し必要な材質指針を明確化することが重要である。次に、鋼管の圧縮座屈性能と材料の引張変形特性の関係を解析した結果を示す。表2に、種々のX80の引張特性を示す。規格最小値で定義した材料特性をX80-SM、降伏比(Y/T)を0.85~0.75の範囲で変化させた材料をX80-A、B、Cと表す。これらの鋼管の圧縮限界座屈ひずみを式(2)(3)から求めた結果を図2に示す⁵⁾。ガス耐震式はX80-SMよりも上側にあり、X80-Aとほぼ重なっている。また、X80-BとX80-Cはガス耐震式よりも上側にある。したがって、降伏比を低減させることにより、

表1 API 5L 下限強度材の引張特性

API 5L Grade	SMYS (MPa)	SMTS (MPa)	Y/T	R-O parameters	
				α	N
X60	413	517	0.80	1.48	18.99
X70	482	565	0.86	1.13	27.13
X80	552	620	0.89	0.86	37

※SMYS：規格下限降伏強度、SMTS：規格下限引張強度

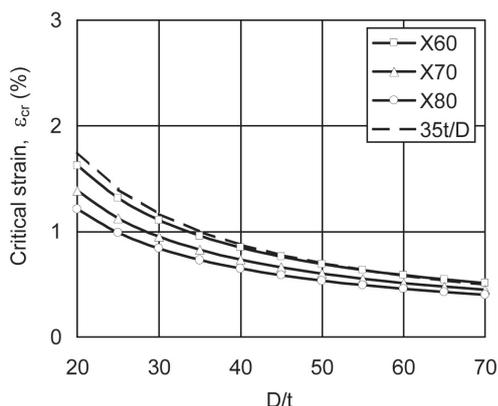


図1 軸圧縮での限界座屈ひずみとD/tの関係⁴⁾

表2 各種X80鋼管の引張特性

API 5L Grade	SMYS (MPa)	SMTS (MPa)	Y/T	R-O parameters	
				α	N
X80-SM	552	620	0.89	0.86	37.0
X80-A	552	650	0.85	0.86	19.0
X80-B	552	690	0.80	0.86	12.0
X80-C	552	736	0.75	0.86	9.0

管厚を増加させることなく、鋼管に要求される圧縮変形性能を向上させることが可能である。つまり、製造可能な範囲で材料特性を変化させることにより、耐震設計で要求される鋼管の変形性能を向上させることができる。

一方、曲げ変形における限界圧縮ひずみを求める解析解はなく曲げ座屈実験データに基づいて幾つかの実験式が提案されているのが現状である⁴⁾。そのため、曲げ変形を受ける鋼管の限界座屈歪を正確に予測するためにはFEM解析の利用が不可欠となっている。

次に、FEMによる曲げ変形解析の一例を紹介する。外径762mm、管厚15.6mm、長さ4000mmのX80鋼管を4節点シェル要素でモデル化し、モーメントアームを介して曲げ変形を加える解析を行った^{6,7)}。このとき、鋼管の幾何学的初期不整として、外径(OD)、管厚(WT)、軸方向不陸(BL)(図3)を実際の鋼管で測定し、それぞれを考慮したFEMモデルを作成した。曲げ変形のFEM解析で得られた曲げ角度(θ_e)と曲げモーメント(M)の関係を図4に示す。同一サイズのX80鋼管を用いた曲げ実験結果も合わせて示した。なお、FEM、実験のいずれも12MPaの内圧を負荷した条件で行った。初期不整を考慮しないFEM結果は実験データと限界変形まではよく一致しているが、それ以降も変形が増加し限界ひずみを過大に評価している。一方、幾何学的初期不整を考慮することにより限界変形量が実験値に近づき、(BL+WT)不整と

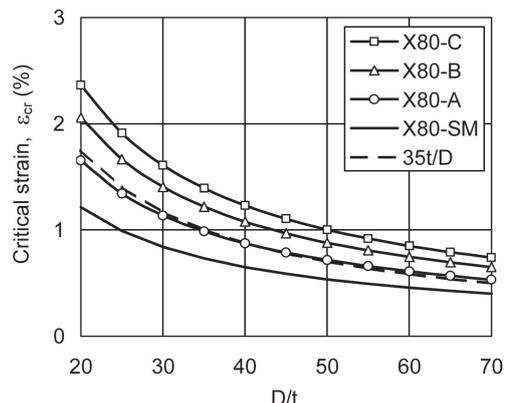


図2 各種X80鋼管の限界座屈ひずみとD/tの関係⁴⁾

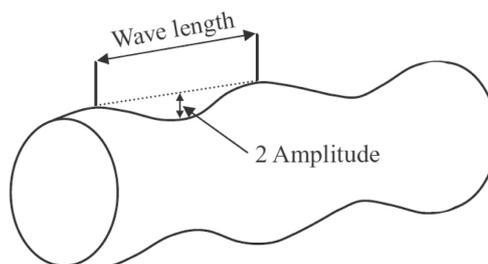


図3 鋼管の軸方向不陸

(OD+WT+BL) 不整を考慮した場合に同一の結果が得られた。また、座屈波形の発生状況について計算と実験結果の比較を図5に示す。座屈波形は鋼管の外側で試験体中心から125mm左側に発生しており、実験結果とほぼ同一である。

このように適切な解析モデルを適用することによって、FEM解析により極めて精度良く鋼管の曲げ変形挙動を予測することが可能となる。次に、引張特性の異なる2種類のX80鋼管を用いた曲げ変形解析結果を行った。表3に解析に用いた鋼管の引張特性と限界圧縮ひずみの計算結果を示す。ここで、 f_D は設計係数で内圧による周方向応力と規格下限降伏応力の比である。限界圧縮ひずみは座屈波形を中心として管軸方向に分布する圧縮ひずみを平均管径の2倍の標点距離内で平均化したものである。より降伏比の低いX80鋼管の限界圧縮ひずみは設計係数0.0で1.87%、0.72で2.82%となっており設計係数に従って増加している。しかし、一般的なX80鋼管の限界圧縮ひずみはいずれの条件も低い値である。よって、これら2種類の鋼管の局部座屈に対する安全性を考えた場合、一般的な耐震性能が要求される場合には両者ともに採用可能であるが、1.5%程度の平均限界曲げひずみが要求さ

れる地域においてはより降伏比の低い高変形能のX80が選択される。

以上のように、地震等の地盤変動による変形に対して埋設パイプラインの安全性を確保するためには、敷設される鋼管が高い耐座屈性能を有していることが必要であり、材料としては表2のX80-Cや表3のHigh strain X80で代表されるような高変形能の鋼管が要求される⁸⁾。また、材料特性としては加工硬化性能(n 値)が重要であるが、加工硬化性能を表す指標として、図6に示す応力比 σ_r (ある歪範囲での応力の上昇率)を適用することができる。ここで重要な点は、座屈が発生するひずみ領域に応じて評価するひずみ範囲を設定することであり⁹⁾、実際の埋設パイプラインの材料要求性能としても適用されている^{10,11)}。

3 変形能向上のための組織制御技術

本章では、高い加工硬化性能を得るための鋼材の材質制御方法とそれに基づき開発された高変形鋼管について紹介する。

連続降伏型でかつ高 n 値の応力歪曲線を得るための最適なマイクロ組織形態を探索するために、実験のみならずFEM等の解析的手法による検討も行われている。図7に単位セルモデルというFEMモデルによって解析した、応力歪曲線に及ぼすベイナイト分率の影響を示す¹²⁾。フェライト相そのものは降伏棚を有しているが、ベイナイトを含んだ二相組織とすることで連続降伏型の応力ひずみ曲線が得られる。また、図8はMicromechanicsによる二相組織鋼の解析結果であり、第二相

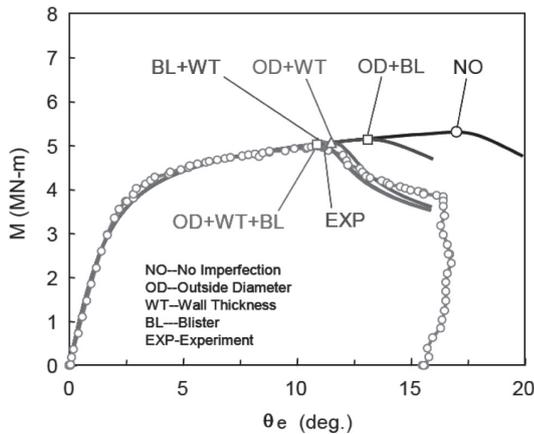


図4 X80鋼管の曲げ変形のFEMと実験結果の比較

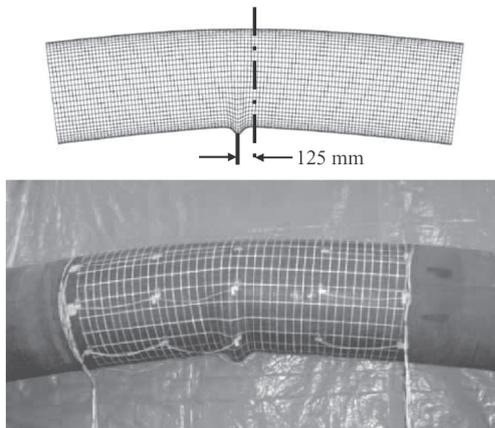


図5 座屈波形の発生状況 (上: FEA、下: 実験)

表3 X80鋼管の材料特性と限界圧縮ひずみ

X80 pipes	Tensile properties			Critical compressive strain (%)			
	YS (MPa)	TS (MPa)	Y/T (%)	$f_D=0$	0.4	0.6	0.72
High strain	535	696	77	1.87	2.00	2.41	2.82
Conventional	552	619	89	1.14	1.30	1.74	2.27

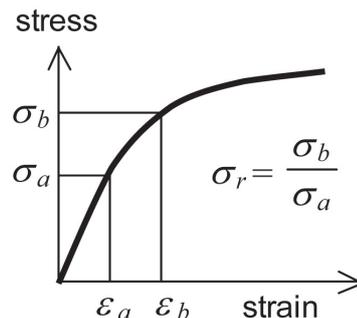


図6 応力比

の体積分率の増加または強度上昇によって n 値が上昇する¹³⁾。

上記に示されたフェライト-ベイナイト二相組織は、鋼板製造プロセスにおける加速冷却温度を高精度に制御することにより得られる。図9に高変形能を有する鋼管のマイクロ組織を示す¹⁴⁾。同様の組織制御技術により製造した各種グレードの鋼管の応力-歪曲線を図10に示す。いずれの鋼管も低降伏比で従来鋼管の応力歪曲線と比べると一様伸び性能も大きく向上していることがわかる。上述のようなフェライト-ベイナイト組織の高変形能ラインパイプの他に、鋼板製造において加速冷却直後にオンライン熱処理を適用した新しいプ

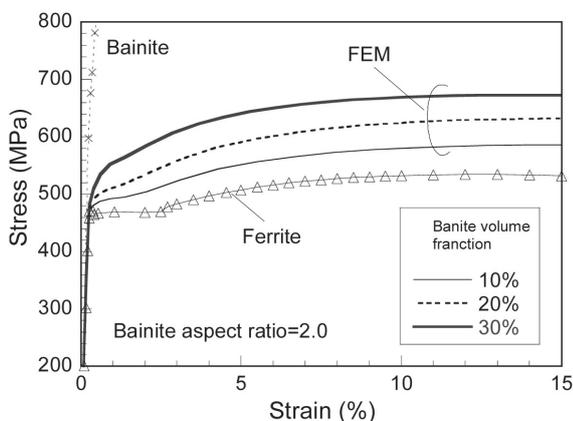


図7 応力ひずみ曲線に及ぼすベイナイト分率の影響¹³⁾

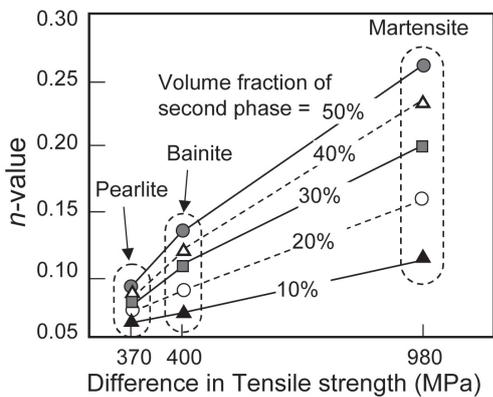


図8 n 値に及ぼす硬質第2相の影響¹³⁾

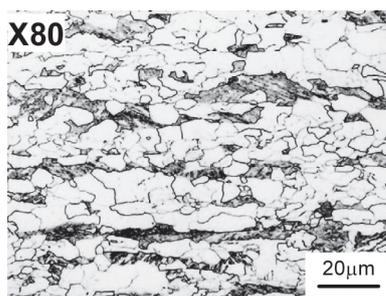


図9 F-B型高変形能鋼管のマイクロ組織の例¹⁴⁾

ロセス¹⁵⁾ (HOP ; Heat treatment On-line Process) によりベイナイト-MA (島状マルテンサイト) 組織を得ることが可能である¹⁶⁾。これは、加速冷却後の加熱処理によって未変態オーステナイトへの炭素濃縮を促進されることにより、微細で粒状のMAが得られることによる。オンライン熱処理を適用したX80グレードの高変形鋼管のマイクロ組織を図11に示す¹⁷⁾。体積分率で8%程度のMAがあり、マトリクスはベイナイト組織となっている。図12にベイナイト-MA型高変形

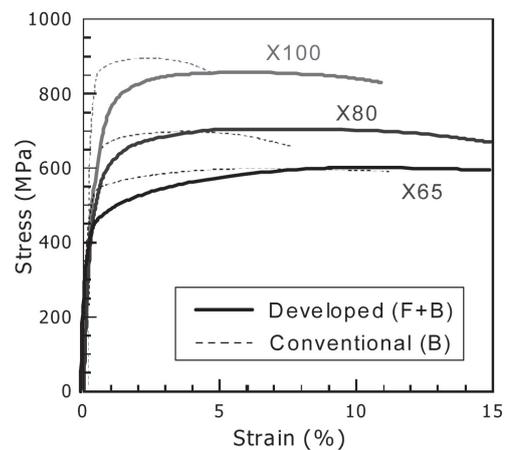


図10 F-B型高変形能鋼管の応力ひずみ曲線¹⁴⁾

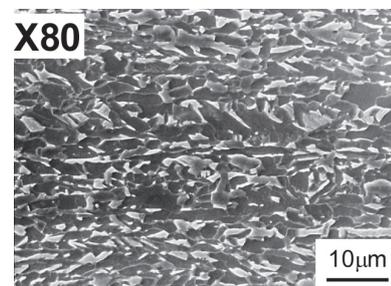


図11 B-MA型高変形能鋼管のマイクロ組織の例¹⁷⁾

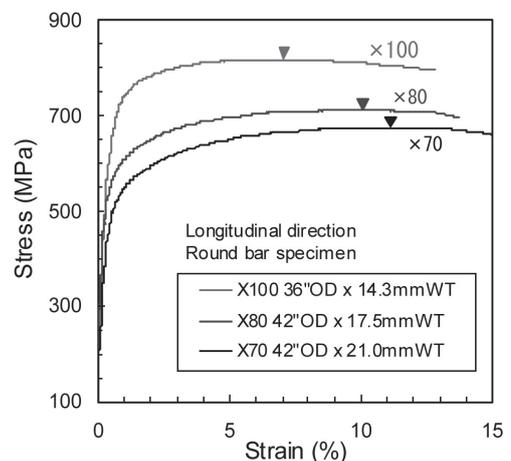


図12 B-MA型高変形能鋼管の応力ひずみ曲線¹⁷⁾

鋼管の管軸方向応力歪曲線を示す。前述のフェライトーベイナイト型の高変形鋼管と同等以上の高い一様伸びが得られている。これらの複相組織を有する鋼管は軸圧縮及び曲げ実験により従来材と比べ高い耐座屈性能が得られることが実証されている^{16,17)}。

4 まとめ

本開発により、ひずみベース設計に適合できる高強度鋼管をはじめ工業化することができた。これにより、国内では天然ガスパイプラインの地震時における安全性の向上、カナダ、ロシア、中国では、ひずみベース設計に基づいた地震地帯と凍土地帯における長大天然ガスパイプラインプロジェクトの実現に寄与している^{10,11)}。

参考文献

- 1) 鈴木信久, 伊木聡, 正村克身 : JFE 技報, 17 (2007) , 14.
- 2) A.Glover : Proc. Pipe Dreamers' Conference on Application and Evaluation of High-Grade Linepipes in Hostile Environments, (2002)
- 3) 日本ガス協会 : 高圧ガス導管耐震設計指針, (2004) , JGA 指-206-03.
- 4) N.Suzuki and M.Toyoda : Proc. 21st Int. Conf. OMAE, (2002) , OMAE2002-28253.
- 5) T.Zimmerman : Proc. Pipeline Technology, 5 (1995) , 365.
- 6) N.Suzuki, N.Ishikawa, M.Okatsu, J.Shimamura, S.Endo and J.Kondo : Proc. 6th Int. Pipeline Conf., (2006) , IPC2006-10070.
- 7) 鈴木信久, 近藤丈, 嶋村純二 : JFE 技報, 17 (2007) , 31.
- 8) 鈴木信久, 加藤昭彦, 吉川正樹, 栗原正好, 遠藤茂 : NKK 技報, 167 (1999) , 44.
- 9) N.Suzuki, J.Kondo, M.Okatsu and S.Igi : Proc. 18th Int. Offshore and Polar Engineering Conf. (2008) , 111.
- 10) N.Ishikawa, M.Okatsu, J.Shimamura, S.Endo, R.Muraoka, J.Kondo and N.Suzuki : Proc. 7th Int. Pipeline Conf., (2008) , IPC2008-64506.
- 11) R.Muraoka, J.Kondo, L.Ji, H.Chen, Y.Feng, N.Ishikawa, M.Okatsu, S.Igi, N.Suzuki and K.Masamura : Proc. 8th Int. Pipeline Conf. (2010) , IPC2010-31556.
- 12) 石川信行, 遠藤茂, 栗原正好 : CAMP-ISIJ, 14 (2000) , 573.
- 13) T.Huper, S.Endo, N.Ishikawa and K.Osawa : ISIJ Int., 39 (1999) , 288.
- 14) N.Ishikawa, M.Okatsu, S.Endo and J.Kondo : Proc. 6th Int. Pipeline Conf. (2006) , IPC2006-10240.
- 15) 藤林晃夫, 小俣一夫 : JFE 技報, 5 (2004) , 8.
- 16) M.Okatsu, T.Shinmiya, N.Ishikawa, S.Endo and J.Kondo : Proc. 24th Int. Conf. On OMAE, (2005) , OMAE2005-67146
- 17) N.Ishikawa, M.Okatsu, J.Shimamura, S.Endo, N.Shikanai, R.Muraoka, J.Kondo and N.Suzuki : Proc. 7th Int. Pipeline Conf. (2008) , IPC2008-64507.

(2011年1月20日受付)

会員へのお知らせ目次

行事等予定	332頁
総合	
第161回春季講演大会開催中止に伴う講演等の扱いについて	335頁
第162回秋季講演大会講演募集案内	336頁
討論会/予告セッション/国際セッション募集案内	337頁
オンラインPDF原稿提出要領	337頁
講演大会参加方法のご案内	338頁
第162回秋季講演大会学生ポスターセッション発表募集案内	338頁
効果的な講演発表のためのPower Point作成方法	339頁
イベント情報	
スラグ・ダストの利材化技術と新しい展開	343頁
報告事項	344頁
日本鉄鋼協会事務局人事異動	345頁
人材募集案内	345頁
次号目次案内	346頁
海外鉄鋼関連最新論文	348頁

行事等予定

太字は本会主催の行事。

開催期日	行事(開催地/詳細掲載号および頁)	主催者	問合せ・連絡先
2011年5月			
18~20日	第23回「電磁気関連のダイナミクス」シンポジウム(愛知)	日本AEM学会	名古屋工業大学 井門康司 sead23@nitech.ac.jp http://ffr.web.nitech.ac.jp/sead23/
22~27日	第8回新材料とデバイスに対する原子レベル・キャラクタリゼーションに関する国際会議(ALC'11)(韓国)	日本学術振興会	マイクロビームアナリシス第141委員会 http://alc.surf.nuqe.nagoya-u.ac.jp/alc11/
22~27日	第12回 工業材料と構造物のクリープと破壊国際会議(Creep2011)(京都)	日本金属学会	東北大学材料科学総合学科内 渡辺久美子 Tel. 022-795-7326 http://www.material.tohoku.ac.jp/creep2011
23, 24日	第1回マルチスケールモデリングシンポジウム(第16回分子動力学シンポジウム)(大阪)	日本材料学会	Tel. 075-761-5321 jimu@jsms.jp http://www.jsms.jp
23~25日	トライボロジー会議2011春(東京)	日本トライボロジー学会	Tel. 03-3434-1926 jast@tribology.jp http://www.tribology.jp
24日	腐食防食部門委員会第280回例会 主題:『応力腐食割れと水素脆化』(大阪)	日本材料学会	Tel. 075-761-5321 jimu@jsms.jp http://www.jsms.jp
23~26日	2011 SE AISI Conference & Exhibition(Singapore)	SE AISI	http://www.seaisi.org/html/
24~27日	第47回真空技術基礎講習会(大阪)	大阪府技術協会、他	Tel. 0725-53-2329 yamanaka@tri.pref.osaka.jp http://www.tri.pref.osaka.jp/dantai/g-kyoukai
25~27日	第16回計算工学講演会(千葉)	日本計算工学会	Tel. 03-3219-3541 jscs@ics-inc.co.jp http://www.jscs.org/koenkai/16/
25~27日	表面改質展2011(大阪)	日刊工業新聞社	Tel. 06-6946-3384 sizumi@media.nikkan.co.jp
26日	日本塑性加工学会創立50周年記念「第290回塑性加工シンポジウム」(東京)	日本塑性加工学会	Tel. 03-3435-8301 jstp@jstp.or.jp http://www.waseda.jp/jp/campus/waseda.html
27~29日	平成23年度(第42回)塑性加工春季講演会(東京)	日本塑性加工学会	Tel. 03-3435-8301 tatemukai@jstp.or.jp
31~2日	6th International Conference on High Strength Low Alloy Steels (HSLA Steels2011)(China)	The Chinese Society for Metals	hsla@csm.org.cn http://hy.csm.org.cn/hsla2011/eu/
2011年6月			
1~3日	第48回日本伝熱シンポジウム(岡山)	日本伝熱学会	nhts48@cc.okayama-u.ac.jp http://heat6.mech.okayama-u.ac.jp/nhts2011/index.htm
2, 3日	第120回塑性加工工学講座(愛知)	日本塑性加工学会	Tel. 03-3435-8301 jstp@jstp.or.jp http://www.jstp.or.jp
5~9日	The 11th International Conference on the Mechanical Behavior of Materials(ICM11)(Italy)	Politecnico di Milano	http://www.icm11.org/
6~9日	The Guthrie Honorary Symposium(Canada)	MMPC	http://www.mmpc.mcgill.ca/theGuthrieSymposium/
11日	環境・エネルギー・社会工学部会 「鉄の技術と歴史」フォーラム 「鉄一人と道具とその技術」研究Gr. 第5回例会(東京 4号263頁 申込締切6月3日)	日本鉄鋼協会	「鉄一人と道具とその技術」研究Gr. 主査 香月節子 FAX. 03-5382-1512 k-setsu@k5.dion.ne.jp
14日	創形創質工学部会 第34回トライボロジーフォーラム研究会 テーマ:「熱間圧延におけるスケールとトライボロジー」(大阪 4号263頁 申込締切5月30日)	日本鉄鋼協会	協同油脂(株) 加工油剤技術部 須田三孝 Tel. 0466-33-3112 mitsutaka-suda@kyodoyushi.co.jp
15日	第205回西山記念技術講座「スラグ・ダストの利材化技術と新しい展開」(東京 本号343頁)	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-5209-7014

開催期日	行事(開催地/詳細掲載号および頁)	主催者	問合せ・連絡先
16~17日	第52回塗料入門講座(東京)	色材協会	色材協会 関東支部 Tel. 03-3443-2811
17日	第291回塑性加工シンポジウム(愛知)	日本塑性加工学会	Tel. 03-3435-8301 jstp@jstp.or.jp
19~22日	International Symposium on the Recent Developments in Plate Steels (U.S.A.)	AIST	http://www.aist.org/conf/11_plate_steels.htm
19~25日	The 12th World Conference on Titanium (TI-2011) (China)	The Nonferrous Metal Society of China	http://www.ti-2011.com/
23, 24日	No.11-13 第16回動力・エネルギー技術シンポジウム(大阪)	日本機械学会	Tel. 03-5360-3502 kasawaki@jsme.or.jp http://www.jsme.or.jp/pes/Event/symposium.html
22~24日	8 th International Conference on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet (GALVATECH2011) (Italy)	AIM他	http://www.aimnet.it/galvatech2011.htm
24日	第206回西山記念技術講座「スラグ・ダストの利材化技術と新しい展開」(神戸 本号343頁)	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-5209-7014
27~11日	METEC InSteel Con 2011 (Germany)	VDEh	http://www.metec-insteel2011.com
28, 29日	第21回圧力設備の材料、設計、施工、維持管理(東京)	日本高圧力技術協会	Tel. 03-3255-3486 hpi@hpj.org
29~1日	第30回電子材料シンポジウム(EMS-30) (滋賀)	運営委員会	ems-query@ems.jpn.org http://ems.jpn.org/
29~1日	第21回環境工学総合シンポジウム2011 (宮城)	日本機械学会	Tel. 03-5360-3500 murayama@jsme.or.jp http://www.env-jsme.com/
30日	ISIJ International 特集号「水素脆化研究の基盤構築」原稿締切(2号106頁)	日本鉄鋼協会	編集グループ Tel. 03-5209-7012
2011年7月			
2, 3日	スケジューリング国際シンポジウム2011 (International Symposium on Scheduling 2011) (大阪)	日本機械学会	大阪大学 森田研究室 iss11@ist.osaka-u.ac.jp http://www.sys.ist.osaka-u.ac.jp/iss11/
4~6日	粉末X線解析の実際2011 (東京)	日本結晶学会	Tel. 03-5389-6372 crsj-xray@bunken.co.jp
6, 7日	第39回日本ガスタービン学会定期講演会(長野)	日本ガスタービン学会	Tel. 03-3365-0095 gtsj-office@gtsj.org http://www.gtsj.org/
7, 8日	第31回防錆防食技術発表大会(東京)	日本防錆技術協会	Tel. 03-3434-0451 jacc@mbf.sphere.ne.jp http://www1.sphere.ne.jp/jacc
7, 8日	第45回X線材料強度に関するシンポジウム 講演募集(東京)	日本材料学会	日本原子力研究開発機構 秋田貢一 Tel. 029-282-5478 http://www.jsms.jp
6~8日	第48回アイソトープ・放射線研究発表会(東京)	日本アイソトープ協会	Tel. 03-5395-8081 gakuju@jrias.or.jp http://www.jrias.or.jp/
10~14日	The First World Congress on Integrated Computational Materials Engineering (ICME) (U.S.A.)	TMS	http://www.tms.org/Meetings/Specialty/ICME2011/
13日	平成23年度計測自動制御学会関西支部講習会(大阪)	計測自動制御学会関西支部	奈良先端科学技術大学院大学 野田 賢 Tel. 0473-72-5361 http://www.sice.or.jp/~kansai/index.html
13~15日	SURTECH2011 (東京)	表面技術協会	Tel. 03-3663-0456 info@surtech.or.jp http://www.surtech.or.jp/
19~21日	NIMS Conference 2011 (茨城)	物質・材料研究機構	Tel. 029-851-3354 (内線3886) http://www.nims.go.jp/nimsconf/2011/
24~29日	第37回鉄鋼工学セミナー(蔵王 3号196頁 申込締切5月9日)	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-5209-7014
25~27日	The Making, Shaping and Treating of Steel (Australia)	AIST	http://www.aist.org/conf/11_mst.htm
2011年8月			
6~8日	日本混相流学会年会講演会2011 (京都)	日本混相流学会	Tel. 075-753-5842 kawara@nucleng.kyoto-u.ac.jp http://www.jsmf.gr.jp/nenkai2011/index.html
31日	ISIJ International 特集号「Cutting Edge of Mathematical Models for Predicting Microstructures and Mechanical Properties of Steels」原稿締切(1号40頁)	日本鉄鋼協会	編集グループ Tel. 03-5209-7012
2011年9月			
4~9日	International Conference on Martensitic Transformations (ICOMAT) (大阪)	日本金属学会	http://www.mat.eng.osaka-u.ac.jp/icomat/
5~9日	Dynamics and Design Conference 2011 (高知)	日本機械学会	Tel. 03-5360-3505 otake@jsme.or.jp http://www.jsme.or.jp/dmc/DD2011/
7~9日	The 6 th European Oxygen Steelmaking Conference (EOESC2011) (Sweden)	JERNKONTORET	http://www.jernkontoret.se
8~10日	平成23年度工学教育研究講演会(北海道)	日本工学教育協会	Tel. 03-5442-1021 kawakami@jsee.or.jp http://www.soc.nii.ac.jp/jsee/
20~22日	第162回秋季講演大会(大阪 本号336頁)	日本鉄鋼協会	学術企画グループ Tel. 03-5209-7013
25~28日	International Symposium on Liquid Metal Processing and Casting (France)	Institut Jean Lamour	日本製鋼所 室蘭研究所 梶川耕司 Tel. 0143-22-0147 http://www.lmpc2011.org/
26~28日	2 nd International Conference and Exhibition on Clean Technologies in the Steel Industry (Hungary)	OMBKE	http://www.cleantech11.com/
2011年10月			
2~5日	50th Anniversary of MetSoc's Annual Conference of Metallurgists (COM2011) (Canada)	MetSoc	http://www.cim.org/com2011/
5~7日	European Conference on Aluminium Alloys (Euro ECAA2011) (Germany)	DGM	http://www.dgm.de/ecaa

開催期日	行事(開催地/詳細掲載号および頁)	主催者	問合せ・連絡先
2011年10月			
7～9日	第2回工学教育に関するアジア会議(徳島)	実行委員会	徳島大学工学部 英崇夫 Tel.088-656-8235 http://www.me.tokushima-u.ac.jp/ACEE2011/
16～20日	Materials Science & Technology 2011 Conference and Exhibition (MS&T'11) (U.S.A.)	TMS、他	http://www.matscitech.org
19～21日	第55回材料工学連合講演会(京都)	日本学術会議材料工学委員会	日本材料学会 Tel.075-761-5321
30～2日	第12回耐火物統一国際会議(京都)	耐火物技術協会	Tel.03-3572-0705 yoshii@tarj.org http://www.unitecr2011.org/
2011年11月			
2～5日	6th ISEM'11-Sendai(宮城)	日本実験力学会	東北大学 高橋 弘 Tel.022-795-7394 htaka@mail.kankyo.tohoku.ac.jp
7, 8日	Asian Thermal Spray Conference2011(茨城)	日本溶射学会	東北大学 小川和彦 Tel.022-795-7542 kogawa@rift.mech.tohoku.ac.jp
10日	第207回西山記念技術講座「鋼板製造プロセス技術の進歩と今後の展望」(東京 4号262頁)	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel.03-5209-7014
16, 17日	INCHEM TOKYO 2011(東京)	化学工学会、日本能率協会	Tel.03-3434-0587 http://www.jma.or.jp/inchem/index.html
17日	第208回西山記念技術講座「鋼板製造プロセス技術の進歩と今後の展望」(神戸 4号262頁)	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel.03-5209-7014
22～25日	Plasma Conference2011(石川)	JSPF	http://www.jspf.or.jp/PLASMA2011/eng/index.html
28～30日	国際シンポジウム「持続可能社会のための材料科学と技術革新-地球環境持続性のためのエコマテリアルズとエコイノベーション-」(大阪)	大阪大学先端科学イノベーションセンター	Tel.06-6879-4193 maeda@casi.osaka-u.ac.jp http://www.casi.osaka-u.ac.jp/ecomates2011
19, 20日	第54回自動制御連合講演会(愛知)	計測自動制御学会	豊橋技術科学大学 寺嶋一彦 Tel.0532-44-6699 http://rengo54.me.tut.ac.jp/
30～2日	EcoDesign 2011 -第7回 環境調和型設計とインバースマニュファクチャリングに関する国際シンポジウム-(京都)	エコデザイン学会連合	Tel.03-3500-4891 ecd11@mstc.or.jp http://www.ecodenet.com/ed2011/index.htm
2011年12月			
4～7日	Fray International Symposium(Mexico)	Flogen Technologies Inc	http://www.flogen.com/FraySymposium/
12～17日	The 16th International Conference on the Textures of Materials (第16回材料集合組織国際会議 ICOTOM 16) (India)	Indian Institute of Technology bombay	http://www.icotom16.in/ icotom16@gmail.com
2012年1月			
20日	International Workshop on CO ₂ Reduction Insteel Industry (東京)	日本鉄鋼協会	http://www.isij.or.jp/Bukai/Gakujutsu/Kopuro/112103.html
2012年3月			
28～30日	第163回春季講演大会(横浜)	日本鉄鋼協会	学術企画グループ Tel.03-5209-7013
2012年6月			
3～7日	1st International Conference on Ingot Casting, Rolling and Forging (ICRF2012) (Germany)	Steel Institute VDEh	http://www.ICRF2012.com
10～13日	4th International Conference on Progress Development in Iron and Steelmaking (SCANMET IV)	MEFOS	http://www.scanmet.info
2012年9月			
10～12日	IFAC Workshop on Automation in Mining, Mineral and Metal Industries (IFAC MMM 2012) (岐阜)	日本鉄鋼協会	http://www.ifacmmm2012.org/
2012年10月			
14～18日	2012年粉末冶金国際会議(略称:PM2012 YOKOHAMA) (神奈川)	日本粉末冶金工業会、他	Tel.03-3219-3541 pm2012@ics-inc.co.jp http://www.pm2012.jp/

「ISIJ International」電子投稿・審査システムによる投稿一元化に関するお願い

日本鉄鋼協会論文誌編集委員会

論文誌編集委員会では、欧文誌「ISIJ International」に関して2010年4月より、紙原稿での投稿と併用して、電子投稿・審査システムの正式運用を開始いたしました。

その結果、紙原稿での投稿が激減したため、2011年4月1日以降の投稿原稿は、電子投稿・審査システムによる電子投稿に一元化いたしました。

会員各位のご理解とご協力をいただきますようお願い申し上げます。

編集後記

一千年に一度とも言われる大地震とそれによる大津波が発生した。まずは、被災された方、また直接被災されていなくても不自由を強いられている方々にお見舞いを申し上げるとともに、一刻も早く普通の生活が戻ることを心よりお祈りいたします。

震災からほぼ一ヶ月後の4月上旬、ふえらむの編集委員会に参加のため震災後初めて東京を訪れた。空港や駅に着いたとき、また夜間に街中を歩いていて、たびたび外国にいる感覚を覚えた。節電のため空港や駅の照明は1/3以下に、また街の明かりも減らされ薄暗いのである。そう、

諸外国の大都市もやはり薄暗いのである。以前、日本に滞在中の外国人研究者から聞かれたことを思い出した。「なぜ日本の夜はこんなに明るい？」薄暗くても、不自由さは全く感じなかった。今こそ改めて電気の使い方を考え直す時かもしれない。それとも、復興が終われば日本の夜はまた明るくなってしまふのだろうか。

今年度から新編集委員長のもと、これまでとは異なるカラーのふえらむができあがると思います。私の編集委員の任期もあと一年となりましたが、皆様に楽しんでもらえる誌面を作れるよう努力いたします。(S. H.)

会報委員会(五十音順)

委員長 細谷 佳弘(JFEスチール(株))

副委員長 森田 一樹(東京大学)

委員

韋 富高(日本冶金工業(株))

小野 嘉則(物質・材料研究機構)

梶野 智史(産業技術総合研究所)

芝田 智樹(大同特殊鋼(株))

杉本 卓也(愛知製鋼(株))

埜本 敏江(日新製鋼(株))

田嶋 淳平(住友金属工業(株))

戸高 義一(豊橋技術科学大学)

中嶋 宏(三菱重工業(株))

野崎 精彦(UDトラックス(株))

早川 朋久(東京工業大学)

林 重成(北海道大学)

林 幸(東京工業大学)

前田 恭志((株)神戸製鋼所)

三木 貴博(東北大学)

山内 昭良((社)日本鉄鋼協会)

横井 龍雄(新日本製鐵(株))

ふえらむ/鉄と鋼 合本誌 定価 4,000円(消費税等込・送料本会負担)

Bulletin of The Iron and Steel Institute of Japan/Tetsu - to - Hagané : Unit Price ¥4,000 (Free of seamail charge)

1996年5月10日第三種郵便物認可 2011年4月25日印刷納本、2011年5月1日発行(毎月1回1日発行)

編集兼発行人 東京都千代田区神田司町2-2 新倉ビル2階 (社)日本鉄鋼協会 専務理事 小島 彰

Tel: 学会・生産技術部門事務局: 03-5209-7012(代) Fax: 03-3257-1110(共通)

(会員の購読料は会費に含む)

印刷所 東京都新宿区高田馬場3-8-8 (株)国際文献印刷社

©COPYRIGHT 2011 社団法人日本鉄鋼協会

複写をご希望の方へ

本会は、本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、(社)学術著作権協会より許諾を受けて下さい。但し、企業等法人による社内利用目的の複写については、当該企業等法人が社団法人日本複写権センター((社)学術著作権協会が社内利用目的の複写に関する権利を再委託している団体)と包括複写許諾契約を締結している場合にあつては、その必要はございません(社外頒布目的の複写については、許諾が必要です)。

権利委託先: 一般社団法人学術著作権協会

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル

TEL.03-3475-5618 FAX.03-3475-5619 E-mail:info@jaacc.jp

複写以外の許諾(著作物の引用、転載、翻訳等)に関しては、(社)学術著作権協会に委託致しておりません。直接、本会へお問い合わせください。

また、アメリカ合衆国において本書を複写したい場合は、次の団体に連絡して下さい。

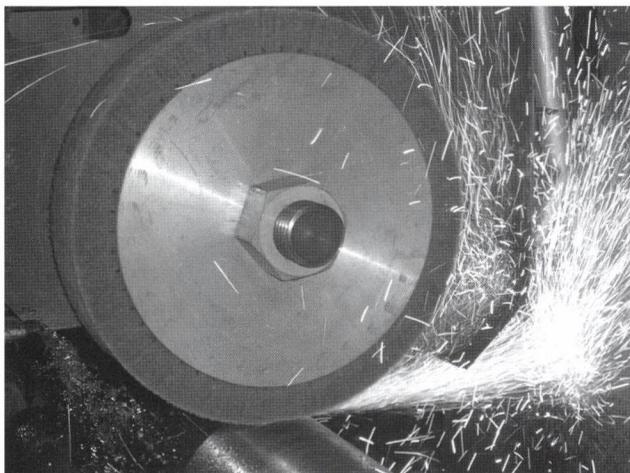
・ Copyright Clearance Center, Inc.

222 Rosewood Drive, Danvers, MA01923 USA

TEL.1-978-750-8400 FAX.1-978-646-8600

「世界にひとつ」を届けたい

高研削性研磨材 GF ホイール



GF ホイールはスリーエフ技研が開発した高研削タイプの研磨布ホイールです。高耐食油井管やインコネルパイプといった難削材の研磨の現場で、永年高い評価を得てきました。

一般的なフラップホイールのようなバタつきが無く、弾性砥石感覚で使える研磨布ホイールです。馴染み性が高く、特にセンタレス研磨で高評価を頂いています。

お客様ごとに仕様を決める徹底した顧客志向。世界のオンリーワン製品を是非お試し下さい。



ISO9001 認定工場 研磨材料製造販売

RED HORSE 株式会社 **スリーエフ技研**

〒571-0002 大阪府門真市岸和田1-3-11

TEL 072-881-8400 FAX 072-881-8590 E-Mail info@tfg.co.jp

URL▶▶▶<http://www.tfg.co.jp>

◀ 海外出荷実績 ▶

中国、韓国、台湾、タイ、マレーシア、インド、ブラジル、アルゼンチン、オーストラリア、アメリカ、イタリア、ドイツ、スペイン

日本鉄鋼協会発行誌 広告のご案内

ふえらむ・鉄と鋼

- 前付1色 1頁/120,000円
- 後付1色 1頁/100,000円 1/2頁/60,000円
- 2色刷り/上記金額に40,000円加算
- 4色刷り/上記金額に140,000円加算

ISIJ International

- 1色 1頁/120,000円
- 1色 1/2頁/70,000円
- 2色 1頁/170,000円
- 4色 1頁/250,000円

※料金に消費税は含まれておりません。

※上記広告についてのお問い合わせ、お申し込みは下記までご連絡下さい。

詳しい資料をご用意しています。

株式会社 **明報社**

〒104-0061 東京都中央区銀座7丁目12番4号(友野本社ビル)

TEL.03(3546)1337(代) FAX.03(3546)6306

<http://www.meihosha.co.jp> E-mail: info@meihosha.co.jp

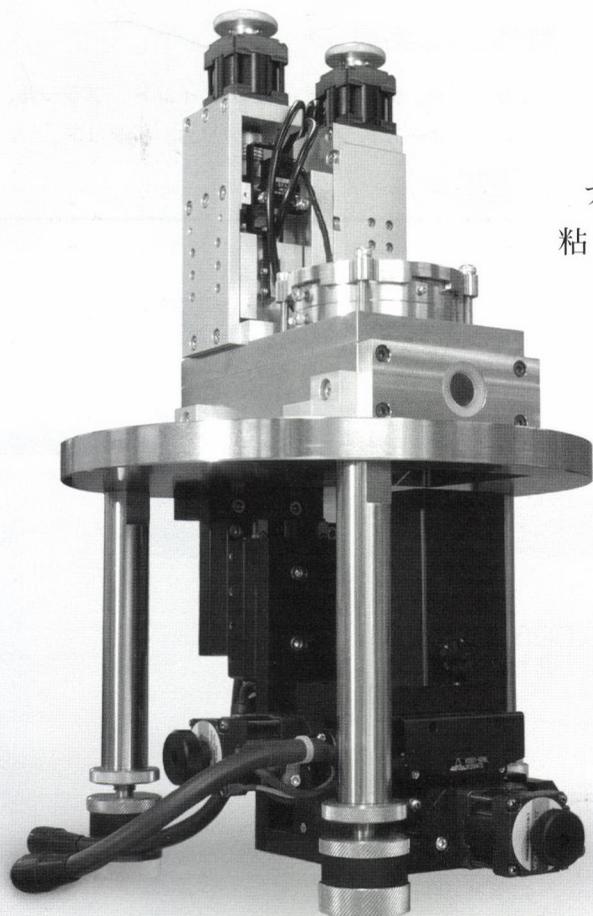
ULVAC

東北大学多元物質科学研究所 栗原和枝教授との共同開発

アルバック理工(株)は、独立行政法人科学技術振興機構の独創モデル化事業を利用し、学校法人 東北大学多元物質科学研究所 栗原和枝教授が世界で初めて独自に開発した、微細空間の液体の特性を評価する手法である共振ずり測定法、不透明基板間の表面力を測定するためのツインパス型表面力測定装置の技術移転を受け、マイクロメートルから接触まで連続的に微細空間の液体の厚みを変えながら、共振ずり・表面力測定ができる汎用装置を完成した。

Resonance Shear Measurement System RSM-1

共振ずり測定装置



共振ずり測定

ナノメートルの空間中の液体の構造化挙動、粘性、摩擦・潤滑特性を距離の関数として評価

表面力測定

電気二重層力・表面電位・接着力・吸着特性・分子間相互作用の評価など

世界初

— サンプリングを開始しました。—
— お気軽にお問合せください。—

アルバック理工株式会社
ULVAC-RIKO, Inc.

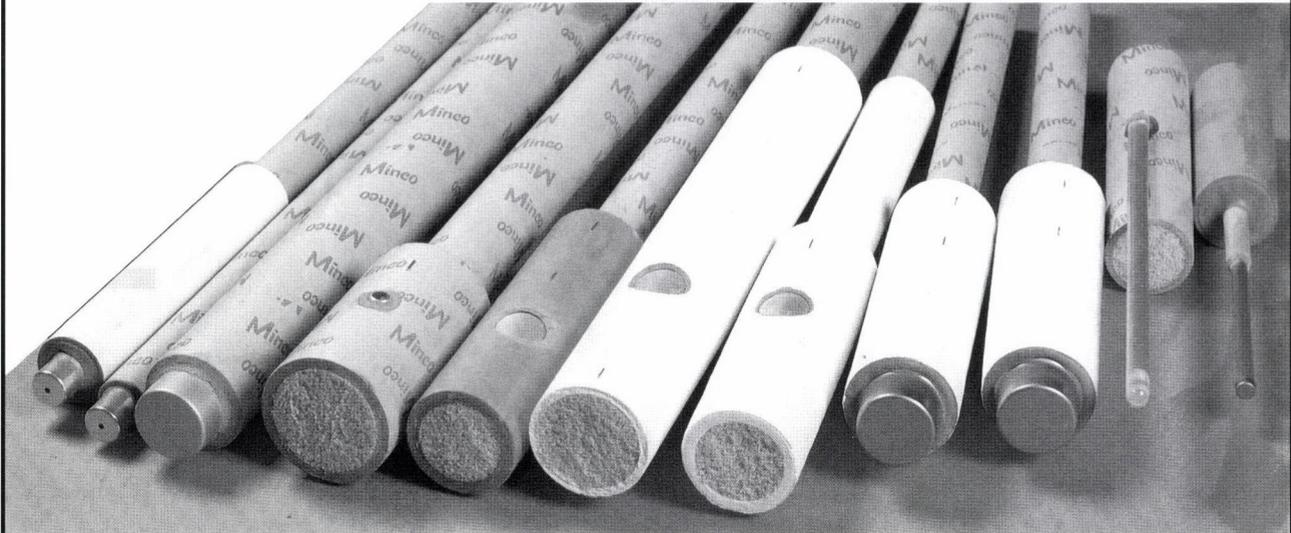
本社 〒226-0006 横浜市緑区白山1-9-19
TEL045-931-2285(代) FAX045-933-9973
大阪営業所 〒532-0003 大阪市淀川区宮原3-3-31上村ニッセイビル
TEL06-6397-2770(代) FAX06-6397-1171

URL <http://www.ulvac-riko.co.jp>

Minco ミンコ・熱電対とサンプラー

品質向上のパイオニア

■ ミンコサンプラー (製鋼 製鉄 試料採取用)

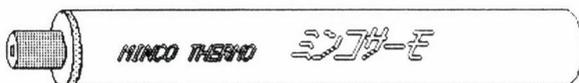


ミンコサンプラーの3つの大きな特徴 信頼性、作業性、安全性。
炉外精錬装置 脱ガス装置 電気炉 レードル タンデyshu CCモールド
高炉出鉄樋 トピードカー 溶銑予備処理などあらゆる場所から採取できます

■ ミンコサーモ 消耗型熱電対

for IRONS, STEELS, FERROUS ALLOY

MMJ型 消耗型熱電対



TYPE R(13%) IPTS 1968
白金・白金ロジウム

■ 標準試料

世界各国各社の製品を取り扱っております。
化学分析用、発光分光分析用、蛍光X線分析用、英国BAS、米国NBS、
BRAMMER、ALPHA、MINCO、カナダALCAN、ドイツBAM、
フランスIRSID、スウェーデンSKF、他 ご用命下さい。

日本ミンコ株式会社

ISO9001:2000 認証取得

※お問い合わせは

本社 〒341-0032

埼玉県三郷市谷中398番地1

TEL.048(952)8701 FAX.048(952)8705

URL <http://www.minco.co.jp>

東京事務所 〒166-0012

東京都杉並区和田3-36-7

TEL.03(5306)6265 FAX.03(5306)6268

MINCO U.S.A (WISCONSIN)

MINCO GERMANY (DÜSSELDORF)

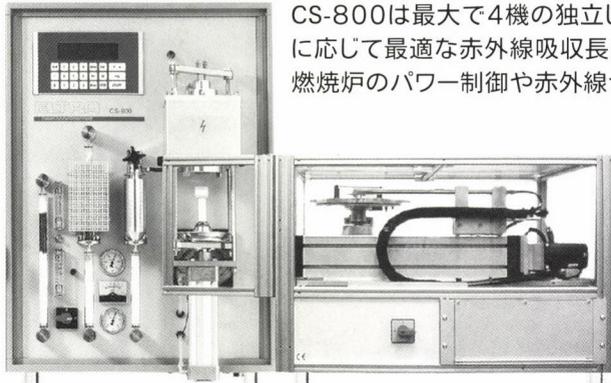
MINCO AUSTRALIA (WOLLONGONG)

ELTRA
Analysers made in Germany

業界注目!!
この機能で低廉価格(500万～)発売中!!

炭素/硫黄分析装置 CS-800

システム概要



CS-800はJIS燃焼—赤外線吸収法に準拠した炭素/硫黄分析装置です。鋼、鋳鉄、銅、鉍石、セメント、セラミックスその他の材料中の炭素及び硫黄を高速同時定量します。CS-800は最大で4機の独立した赤外線セルを備えることができ、それぞれが分析用例に応じて最適な赤外線吸収長に設定されます。16ビットマイクロプロセッサにより誘導燃焼炉のパワー制御や赤外線セル検出器のゼロ及び感度調整を行います。

特 徴

- ソリッドステート赤外線セル 4 機搭載
- 燃焼炉の自動クリーニング機構
- 誘導炉出力制御
- 単独及び外部PC制御による運転
- 助燃剤なしでの最大20gまでのCu試料分析

DSI

Dynamic Systems Inc.



グローバル試験機シリーズ

熱・機械プロセスの物理シミュレーションのための業界基準となります。

高速加熱と広範囲の機械能力により、溶接HAZシミュレーション、ゼロ強度、熱サイクル、熱処理研究、低力試験、高温引張り試験、さらには高速圧縮・引張り試験、多衝撃高温変形試験、溶融および凝固、そしてストリップ焼なましなどの試験に理想的です。

性能パラメータ	Gleeble 3800	Gleeble 3500	Gleeble 3180 (New)
最高加熱速度	10,000°C/sec	10,000°C/sec	8,000°C/sec
最高焼入れ速度	10,000°C/sec	10,000°C/sec	8,000°C/sec
最大ストローク	100 mm	100 mm	100 mm
最高ストローク速度	2000 mm/sec	1000 mm/sec	1000 mm/sec
最大力	20 tons	10 tons	8 tons
最大サンプル寸法	20 mm diameter	20 mm diameter	20 mm diameter

※加熱方式：直接抵抗加熱システムを採用しています。



日本総代理店
ジャパンマシナリー株式会社
JAPAN MACHINERY COMPANY

システム営業部 〒143-0015 東京都大田区大森西 5-27-4
TEL.03-3730-6061(代表) FAX.03-3730-3737
大阪支店 〒530-0002 大阪府大阪市北区曽根崎新地 1-3-16(京富ビル)
TEL.06-6342-1551 FAX.06-6342-1555