

いそらむ

Bulletin of The Iron and Steel
Institute of Japan

Vol.22 / No.5 / 2017

(一社)日本鉄鋼協会会報

ISSN 1341-688X

DSI

Dynamic Systems Inc.



金属材料特性試験 グリーブル試験機シリーズ

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。

高速加熱速度 (MAX.10,000°C/sec.) ストローク (MAX.100 mm)
ストローク速度 (MAX.2,000mm/sec.) 荷重 (MAX.20 TON)



DYNAMIC SYSTEMS INC. (米国) 日本総代理店
ジャパンマシナリー株式会社
JAPAN MACHINERY COMPANY
第二営業部

産業機器一課 〒144-0046 東京都大田区東六郷2-19-6 (JMCビル)
TEL (03) 3730-6061 (代表) FAX (03) 3730-3737
関西営業所 〒658-0015 神戸市東灘区本山南町8-6-26 (東神戸センタービル)
TEL (078) 411-3312 FAX (078) 411-3313

日本鉄鋼協会発行誌 広告のご案内

ふえらむ 鉄と鋼 (同一原稿・同時掲載、2015年1月号より)

- 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/上記料金の20,000円加算
- 4色刷り/上記料金の50,000円加算

ISIJ International

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

★広告掲載社様のバナー広告を本会ホームページに無料掲載致します。★
※料金は消費税別です。※広告データ製作費は別途です。

広告ご掲載についてのお問い合わせ・お申込み

株式会社 明 報 社

〒104-0061 東京都中央区銀座7-12-4 友野本社ビル
TEL (03) 3546-1337 FAX (03) 3546-6306
E-mail info@meihosha.co.jp HP www.meihosha.co.jp

ふえらむ

Vol.22 (2017) No.5

C O N T E N T S

目次

Techno Scope	ステンレス鋼のレアメタルは減らせるか?	220
連携記事	汎用ステンレス鋼を代替する省資源鋼開発の事例と展望	
	柘植信二	224
	Moフリー型高耐熱フェライト系ステンレス鋼の開発	
	中村徹之	229
2016年鉄鋼生産技術の歩み		
	日本鉄鋼協会 生産技術部門	234
入門講座	材料の構造を見る回折現象-1 回折現象の動力学 —透過電子顕微鏡学における動力学的回折理論の基礎—	
	赤瀬善太郎	253
躍動	徐々にマイクロへ	
	大塚貴之	259
私の論文	マクロ偏析予測と透過率評価	
	棗 千修	263
会員へのお知らせトピックス		268

Techno Scope

ステンレス鋼の レアメタルは減らせるか？



幅広い用途で使用されるステンレス鋼において、レアメタルを削減した新鋼種の開発が進んでいる。写真はシステムキッチンの構造材に使用された例 (写真提供:クリナップ(株))

ステンレス鋼にはクロム、ニッケル、モリブデンなどのレアメタルが使用されているが、レアメタルには2000年代以降、価格変動や供給不安への懸念が高まっている。そこで期待されるのがレアメタルの使用量を減らした省資源型ステンレス鋼である。最近では、特長ある開発鋼が次々と登場している。

高まるレアメタルの供給リスク

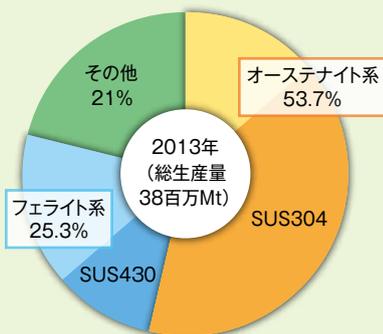
真っ赤に輝く宝石、ルビー。その美しさにレアメタルが関わっていることをご存じだろうか。そのレアメタルとはクロムである。ルビーは酸化アルミニウムの結晶であり、美しい色を決めるのはわずか1%程度入っているクロムのはたらきといわれている。クロムの量が少ないと色はピンクになり、逆に多すぎると灰色になり宝石としての価値がなくなる。他に、エメラルドの緑色の美しさもクロムの量で決まるそうだ。クロムは18世紀に発見され、いろいろな色の化合物があることから、ギリシャ語のクロマ(色の意味)に因んで名付けられた。クロムイエロー、クロムレッドなどの顔料もクロムの化合物である。

現代ではクロムの最大の用途は、ステンレス鋼を始めとする特殊鋼である。鋼にクロムを添加したステンレス鋼が発明された

のは、1910年代のことであった。最大の特徴は、Stainlessの名のとおりさびにくいことである。ステンレス鋼とは「クロムを10.5%以上含む特殊鋼」と定義されているが、クロム以外にもニッケル、モリブデンなどのレアメタル元素が添加される。JISでは約90種類のステンレス鋼が規格化されており、開発鋼種を含めると200種類にも達するといわれる。用途も、日用品、構造材、機械部品など幅広く、世界のステンレス鋼の粗鋼生産は3,800万tに達している(2013暦年)。

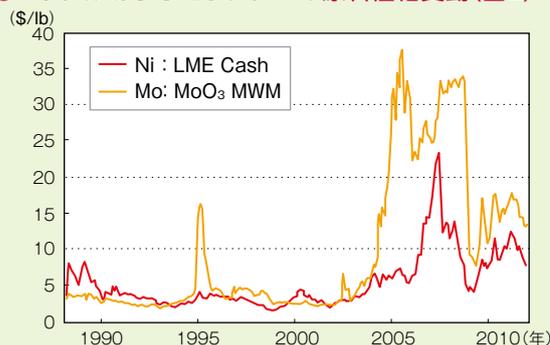
2000年代半ば、多くのレアメタルの価格が高騰する事態が発生した。例えばニッケルは、以前の5\$/lb前後から急騰し、2007年に20\$/lbを超えるまでになり、2008年のリーマンショック後に急落した。同様なことは、他のレアメタルでも起こっている。レアメタルの生産国は特定の資源国に偏在しており、生産する企業が限定されていることなどから、高い供給リスクを抱えてい

●世界のステンレス鋼の粗鋼生産(図1)



(まてりあ第54巻第7号(2015)、p356を基に作図)

●ニッケルおよびモリブデンの原料価格変動(図2)



2005年ごろからニッケル、モリブデンなどの価格が高騰し、その後のリーマンショックなどを経て、激しい価格変動が続いている。

(出典: 第215-216回西山記念技術講座(2013)、p21)

省クロム
省ニッケル

新たにスズに着目し、耐食性と使いやすさを両立(省クロム型フェライト系ステンレス鋼)

●微量スズ添加によるレアメタルの節減効果(図3)



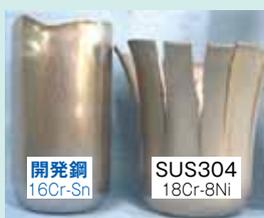
レアメタルのクロムを節減するため、開発鋼では微量のスズを添加した。これによりSUS430(17%クロム)と比較して開発鋼(14%クロム-スズ)はクロムを約2割削減することができた。



クロムの使用量を減らした省資源型ステンレス鋼が採用されたシステムキッチンの構造材(写真提供: クリナップ(株))

●円筒深絞り加工後の外観の比較(図4)

SUS304では3段円筒深絞り後に時期割れが発生するが、開発鋼(16%クロム-スズ)では深絞り加工性を向上し、さまざまな形状への適用が期待される。



(資料提供:新日鐵住金ステンレス(株))

る。これを解決するため、新たな鉱山開発による供給源の多様化や、リサイクルや資源備蓄の推進、代替材料の技術開発などが進められてきた。鉄鋼業から見れば、大きな需要のあるステンレス鋼を安定的に生産することは重要なミッションである。そこで取り組んでいるのが、レアメタルの使用量を減らした、いわゆる省資源型ステンレス鋼の開発である。今回は、特徴ある開発鋼の例を紹介する。

SUS304の代替を目指し耐食性を確保

省クロム、省ニッケル

ステンレス鋼は金属組織により「フェライト」「オーステナイト」「マルテンサイト」の3つがある。このうち、粗鋼生産の5割以上をオーステナイト系ステンレス鋼が占めており、代表的な鋼種がSUS304である。スプーンなどに「18-8」と刻印されていることからわかるように、成分は18%クロム-8%ニッケルである。SUS304は、優れた耐食性、耐熱性、低温韌性などの特性を持ち、加えて深絞りや曲げ加工などの冷間加工性にすぐれ、溶接性もよいなど多くの特徴を持つ。日用品や建築内外装材、自動車部品、化学プラント設備など、多くの製品に広く用いられており、ステンレス鋼全体の約40%を占めている。

しかもSUS304はレアメタルの一種であるニッケルを多く含んでおり、価格や供給リスクの問題からニッケルを含まない省資源型ステンレス鋼の開発が望まれていた。

そこで注目されたのがフェライト系ステンレス鋼である。もともとフェライト系ステンレス鋼はニッケル成分を含んでおらず、省資

源型のステンレス鋼である。これまでも日本の鉄鋼メーカーは、高い精錬技術を生かし、鋼中の不純物元素を低減した省資源型ステンレス鋼の製造技術を蓄積してきた。この結果の一例として、2010年にはSUS304と同等の耐食性を持つSUS443J1がJIS化された。

しかしこれまでのフェライト系ステンレス鋼では、耐食性を高めるためにクロムを活用し、用途や目的に応じてクロム量を調整し、必要な耐食性能を確保してきた。

そこで、重要な成分のクロムを削減した、省クロム型フェライト系ステンレス鋼が開発された。ポイントとなったのは、スズの活用である。

そもそもスズは、昔から耐食性に優れる元素として知られている。有名な15世紀の名画「最後の晩餐」に描かれている卓上の食器は、いつまでも美しいスズでできているといわれている。また身近な用途では、缶詰の内側表面のスズめっきがあるが、缶の耐食性を維持し、食品を長期保存することができる。

そこで、これまで鉄鋼材料の生産性を阻害することから顧みられなかったスズを、積極的に活用する技術開発を推進し、クロムを減らしても十分な耐食性を確保できるような材料を開発した。スズの添加により、従来のフェライト系ステンレス鋼(SUS430)と比較して、クロム量は約2割削減を果すことができた。またSUS304と比較した場合には、ニッケルとクロムを合計して約4割削減を果すことができた。

同様のシリーズでクロム量がやや多い鋼種は、より高い耐食性と加工性を両立している。たとえば円筒の深絞り加工をした場合、SUS304では時期割れが発生するが、開発鋼では滑らかな深絞り形状が実現する。



窒素を活用し、優れた耐食性と溶接性を兼ね備えた開発鋼(省合金型二相系ステンレス鋼)

●二相ステンレス鋼の金属組織(図5)



高クロム鋼に適量のニッケルを添加することにより、オーステナイトとフェライトの二相が混合した組織を持つステンレス鋼を開発した。



海水淡水化装置タンク

●省合金型二相ステンレス鋼の薄肉軽量化の例(図6)



同等の強度を持つH形鋼の重量を比較した場合、SUS304は10kgに対し、開発鋼は6kgで、45%程度の軽量化が図れる。耐食性を保ちつつ軽量化と材料コスト削減を実現し、プラント設備やケミカルタンカー部材などに適用されている。



ケミカルタンカー

(資料提供:新日鐵住金ステンレス(株))

この材料はすでに、システムキッチンの構造部材に採用されている。導入当初からキッチンメーカーのアピールするところとなり、環境配慮型商品として消費者からも好評を得ているという。省資源だけでなく、比較的安価で加工性がよいため、SUS304に替わる汎用ステンレス鋼としての適用が進んでいる。

そこで開発されたのが、省合金型(リーン)二相ステンレス鋼である。ニッケルおよびモリブデンの量を減らす一方で、クロム、マンガン、窒素を添加することにより、SUS304と同等の耐食性を確保した。その結果、例えばニッケルについては、SUS304の8%から鋼種によっては2%以下にまで大幅に減らすことができ、材料コストを大きく削減することができた。

構造材として期待される二相ステンレス鋼
省ニッケル、省モリブデン

SUS304は土木構造物や化学プラント部材などにも使われるが、このような用途では日用品などと比べると要求される耐食性レベルはやや厳しくなる。このような分野で期待される材料に二相ステンレス鋼がある。

この材料の開発のポイントは、窒素をうまく活用した点である。空気にも含まれる窒素は安価であり、強度や耐食性の向上のために有用な元素である。しかし溶接構造材として使用する場合、大入熱溶接では耐食性が低下するという問題があった。そこで開発鋼では、耐食性劣化の原因となる窒化物の析出プロセスを分析し、性能低下の原因となる窒化物の析出を抑制できるような最適成分を見出した。

二相ステンレス鋼は、オーステナイトとフェライトという2つの金属組織が混合したステンレス鋼である。特性も、それぞれの良い点を併せ持っている。例えば、二相ステンレス鋼は厚板として使用できるが、これはオーステナイト系ステンレス鋼が韌性に優れるためだ。フェライト系ステンレス鋼は韌性が低いため、厚板としては使われない。また二相混合の微細組織と窒素添加によって優れた強度を有するため、二相ステンレス鋼は、フェライト系ステンレス鋼やオーステナイト系ステンレス鋼に比べ約2倍の強度を発揮する。さらに溶接性にも優れており、溶接構造用材料として使用できる。

また窒素を添加すると製造時に表面疵が発生しやすいなどの問題があったが、 casting 条件や熱間工程での条件最適化などにより、一般のステンレス鋼と同等の生産性を確保した。

この材料では、厚板の生産が可能であり、すでにケミカルタンカー用タンク材、海水淡水化プラント部材、ソーラーパネル架台などに採用され、JIS規格になっている。

しかし、従来の代表的な二相ステンレス鋼である SUS329J3Lは、モリブデンを多く含むことから高価であり、その用途は特殊なものに限られていた。

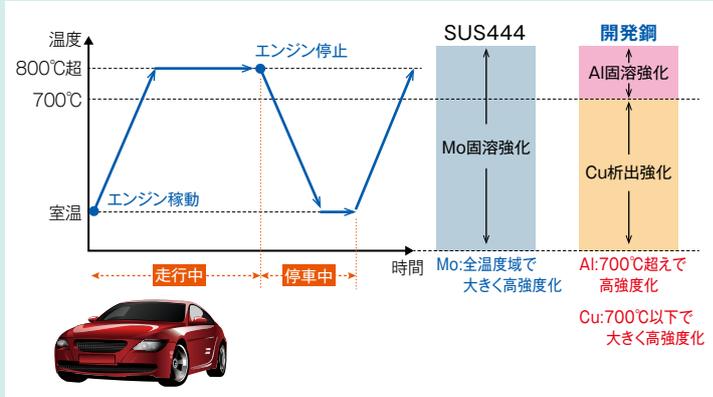
自動車部品の熱疲労に有効な元素の探索
省モリブデン

ステンレス鋼の代表的な用途に自動車排気系部品があるが、これには高いレベルの耐食性と耐熱性が求められる。例えばエンジンからの排気ガスを集めるエキゾーストマニホールドは、エ

省モリブデン

銅とアルミニウムにより自動車排気系部品の高温度強度を確保(省資源型高耐熱ステンレス鋼)

●実使用環境に応じた熱疲労特性の向上の考え方(図7)



自動車の実使用環境を想定した熱履歴を考慮し、銅の析出強化とアルミニウムの固溶強化を組み合わせることで、全温度域で鋼を強化し、熱疲労特性が向上するように設計している。

●開発鋼の成形例(図8)



排気系部品であるコンバータケースでは、従来はカップ形状を分割し、それぞれの部材をステンレス鋼薄板でプレス成形して曲面形状を作り、溶接組立していた。この開発鋼は加工性が優れているため、分割することなく一体でプレス成形することができ、自動車部品メーカーの部品点数削減、溶接工数低減に寄与することができた。

(資料提供:JFEスチール(株))

エンジン稼働時には約800°Cを超える高温となり、停止時には室温まで下がる。このような昇温と降温の繰り返しに伴う破壊は「熱疲労」と呼ばれ、これに耐えるため材料には優れた高温強度が求められていた。

排気系部品には1980年代以前は鋳鉄が使われていたが、その後自動車の軽量化要求が高まり、ステンレス鋼板に代替された。その後も燃費向上を目的としてエンジンの高温化が進み、それまでの汎用ステンレス鋼からさらに耐熱性に優れたSUS444(19%クロム-2%モリブデン-ニオブ)などが使用されるようになった。この鋼種では、高温強度を発揮するため、モリブデンの添加が有効であった。

ところが2000年代中ごろ、モリブデンは世界的な供給不足に陥り、自動車メーカーからモリブデンの使用量を減らした開発鋼へのニーズが高まった。

そこで開発されたのが、モリブデンをまったく使用しない省資源型高耐熱ステンレス鋼である。この鋼種は、実際の自動車の使用環境における温度の変化を考慮して開発された。自動車がスタートし、走行、停車という一連の流れの中で、排気ガスの温度は、室温から上昇し、走行中には700°Cを超え、停車時には再び室温にもどるといった熱変化を経る。

従来のSUS444では、室温から高温までの全温度域でモリブデンが高強度化に寄与していた。そこで、これに代わる元素として注目されたのは銅である。銅を添加すると600~700°Cで微細な析出物が生成され、析出強化により700°C以下の温度域でモリブデンを含む従来材に比べて強度が向上する。また、銅が固溶する700°Cを超える高温域において、固溶強化能が優れる元素はモリブデンの他にタンゲステン、ニオブなどがある

が、いずれもレアメタルである。そこで、これらの元素と同様な効果を発揮する元素として注目されたのがアルミニウムである。アルミニウムは従来、強化元素としてあまり注目されていなかったが、700°Cを超えた高温域で、大きな固溶強化能を発揮する。しかもレアメタルでなく、経済性の点からも有利である。

この銅とアルミニウムの組み合わせにより、銅が析出する温度域では従来材よりも高強度で、銅が固溶する温度域ではアルミニウム添加により従来材と同等の強度を有するステンレス鋼が開発された。

加工性については、モリブデンが含まれていないため、自動車部品メーカーにおいて高い成形加工性を発揮する。含まれている銅は部品製造時には固溶しているが、自動車に搭載されて初めて温度が上がり、その後析出し、強化されることになる。

ちなみに、海外では排気系部品を、特性の異なるステンレス鋼パイプを二重にして使用するなどして対応している例もあるという。これに対し日本では、新しい鋼種を開発し、最適な生産技術を編み出している。海外とは異なるアプローチから生まれた省資源型ステンレス鋼。このような取り組みが、ステンレス鋼の需要拡大をもたらす、新たな世界を開拓していく原動力になっていく。

●取材協力 新日鐵住金ステンレス(株)、JFEスチール(株)
●文 杉山 香里

連携記事

汎用ステンレス鋼を代替する 省資源鋼開発の事例と展望

Examples and Prospects of Some Resource Saving Steel Developments
Substituting for General Use of Stainless Steel

柘植信二
Shinji Tsuge

新日鐵住金ステンレス(株)
リサーチ・フェロー

1 はじめに

急速な経済発展は、その発展に必要な資源の価格高騰と資源枯渇の危機意識をもたらし、その結果として省資源を指向する経済活動を活発化させてきた。この経済活動のひとつと位置づけられる省資源型ステンレス鋼の開発は、ステンレス鋼の誕生以来、幾重にも繰り返されてきた。

今世紀に入ってからの中国の経済発展によるステンレス鋼の消費と生産拡大は著しいものがあり、2015暦年では世界消費の33%、粗鋼生産の52%を一国で占めるようになって¹⁾いる。振り返ると2008年下期のリーマンショックによる世界経済の急減速に到るまでの2004~2008年にかけては、ステンレス鋼の原料であるMo, Ni, Mn, Crの資源価格が著しい高騰を見せた。この高騰の引き金がこのステンレス鋼需要の急増にあったと言えるであろう。

本特集のタイトル「ステンレス鋼のレアメタルは減らせるか」は、製造メーカー等で進められる省資源鋼開発が将来のレアメタルの枯渇を防いで、ステンレス鋼の生産と消費を永続的に繰り返す社会実現のために寄与できるかを問う大きな設問であると思われる。これは、筆者の回答能力の範囲を超えていると思われるが、「減らせる」という答えであるべきことを前提に、ステンレス鋼における省資源鋼開発の歴史、当社開発の事例と展望を以下に述べていきたい。

2 ステンレス鋼の鋼種分類と 省資源鋼開発の歴史

ステンレス鋼はNiを含有するNi系と、Niを含有しないCr系の2種類に大きく分類される。1912~1915年のステンレス鋼の誕生期にNi系およびCr系のステンレス鋼が発明さ

れた^{2,3)}。さらにNi系にMnを添加してNiを低減したMn系ステンレス鋼が1930年代にドイツで誕生した^{3,4)}。これらの3つの系統に属するステンレス鋼を、Feに添加している主要な合金を表記してCr-Ni系、Cr-Mn系、Cr系としておおきく3つに分類することが多い。Cr-Mn系はMnを5~15%含有させNiの含有量を5~1%に低減した、またCr系はNiがほぼ無添加のステンレス鋼であり、両者はいずれも典型的な省資源型のステンレス鋼種である。

2.1 Cr-Mn系ステンレス鋼

Cr-Mn系のステンレス鋼は1950年代にアメリカ、1990年代にインドで普及が進んだ⁴⁾。2001年の世界ステンレス粗鋼生産に占めるCr-Mn系の割合は5.5%であったが、2015年には22%にまで増加している。これはCr-Mn系の需要が大きいアジアでの著しい生産量の増加に起因するものである。

Mnはステンレス鋼の耐食性を低下させる元素であり、Cr-Mn系のステンレス鋼は一般にCr-Ni系に比べて低い耐食性を示す^{4,6)}。ともに磁性を有さないステンレス鋼であるため、同一の鋼種と誤解して使用され腐食等のトラブルを発生することがある。このようなトラブル防止のため、ステンレス鋼を生産するメーカーで構成する団体であるISSF(国際ステンレス鋼フォーラム)では、Cr-Mn系ステンレス鋼の正しい使用方法に対する知識を広める活動をおこなっている⁴⁾。

日本ではCr-Mn系としてSUS201と202の2鋼種がJISに規格化されており、外国の規格と比べCr, Niの下限は16%、3.5%と比較的高い。Ni原料価格が高騰した時期に、外国から輸入された低品位のCr-Mn系の製品がCr-Ni系と詐称され、早期に発錆する事例が発生したことがあった。また磁気選別できないなど、スクラップのリサイクル性を毀損するという課題もある。日本でのCr-Mn系の生産比率は1%程度であ

り、当社でも特定の機能性を高めるためにMnを含有させる鋼種以外のCr-Mn系鋼種の製造販売をおこなっていない。

Cr-Mn系鋼種の普及においては地域間格差が大きく、欧米、日本でのCr-Mn系の生産比率は2012～2014年において0.5～6%、アジアは27%となっている。Cr-Mn系鋼種が発揮する耐食性や加工性に応じた正しい利用を図ることで、省資源鋼としての普及が途上国主体に進むものと思われる。

2.2 Cr系ステンレス鋼

Cr系ステンレス鋼はNiをほとんど含まない究極に近い省資源鋼と言える。また、常温の組織によりマルテンサイト系とフェライト系の2種に分類される⁷⁾。マルテンサイト系は焼入れにより高い硬度が得られ、JIS規格ではCrが最大で18%までの比較的耐食性が低い鋼種である。フェライト系はCr系ステンレス鋼のCを低減することで得られる鋼種であり、Crが10.5～32%の幅広い鋼種が存在する。図1に2015年のJIS規格に定められているフェライト系およびマルテンサイト系ステンレス鋼のCr, Ni含有量範囲をオーステナイト系と二相系(ともにCr-Ni系)と比較して示した。フェライト系鋼種は0.60%以下のNi量で規格化されており、マルテンサイト系と比べてもNi含有量が低い優れた省資源鋼となっている。

1960年代末に欧米で開発された炉外精錬法である真空酸素脱炭(VOD)法、およびアルゴン酸素脱炭(AOD)法により、低C, Nのステンレス鋼が容易に得られるようになり、1970年代には極低C, NでTiやNb等の炭窒化物を形成する元素を含有する組成を特徴とする高純度フェライト系ステンレス鋼が欧米や日本で多く開発され普及が進んだ。この鋼はフェライト系ステンレス鋼の弱点であった加工性や溶接性を大幅に改善した画期的な鋼種であり、Cr-Ni系の一部を代替してCr系の需要を拡大する原動力となった。Cr系鋼種の世界粗鋼に占める生産比率はNi資源価格の高騰にともない2001年の23%から2010年には30%まで増加したが、Ni高騰の沈静

化にともない低下し、2015年は23%となっている。

日本におけるCr系鋼種の比率は世界で最も高い水準にあり、アジア、欧米地域で24～30%であるのに対して、約48%と5割に近い比率である。このようにNiをほとんど含まない省資源鋼の適用が世界で一番進んでいる国が日本であり、フェライト系ステンレス鋼生産技術の高い水準と国内市場における利用技術の進化の実態を示していると言える。

さて、当社は新日本製鐵と住友金属工業のステンレス事業を分離・合併して2003年に発足したステンレス鋼専門メーカーであり、設立当初より積極的に省資源鋼の開発を進めてきた。以下に、当社の省資源鋼開発の事例として省Cr型フェライト系ステンレス鋼および省合金型二相ステンレス鋼について述べる。

3 当社における開発事例

3.1 省Cr型フェライト系ステンレス鋼

3.1.1 これまでの省資源型フェライト系ステンレス鋼開発

ステンレス鋼の耐食性に対して、古くからMoが有効なことが知られており、Fe-Cr-Mo系の高純度フェライト系ステンレス鋼の開発が1970年代以降に進捗した。その結果、耐食性および溶接性が改良されたMoを含有する434(17Cr-1Mo)、444(18Cr-2Mo)、447(30Cr-2Mo)等の鋼種が開発された^{8,9)}。このような高耐食フェライト系鋼種開発の中、1979年のMo価格の高騰は省Mo鋼の開発を促し、434と同等の耐食性を有し、Moを含有しない17Cr-0.5Cu-0.5Nb鋼(のちのSUS430JIL)が開発された^{10,11)}。この開発はフェライト系の中で、高価なMoを節減する省資源鋼開発の一例と位置づけられる。

3.1.2 Snを含有させCr含有量を大幅に削減したフェライト系ステンレス鋼の開発と適用拡大

錫(Sn)は古来より人類に知られている金属であり、青銅は銅とSnの合金である。また、Snは政府の定めるレアメタル31鉱種、47元素には含まれていない。微量のSnがNi系ステンレス鋼の硫酸に対する耐食性を高めることが知られていた¹²⁾が、Snは鋼の熱間加工性を害する元素として認知されていたため、Sn含有の実用鋼は未開発であった。したがって、積極的にSnを添加して、Cr含有量を低減したこの鋼種開発は世界初の画期的なものであると言える。すなわち、Sn添加鋼の熱間加工割れを回避し、高い歩留りで製品を製造する技術開発、Sn添加による耐食性の改善機構の研究と適用技術開発を通じて、省Cr型の省資源鋼が開発された^{13,14)}。図2は14Cr、14Cr-0.1Sn(開発鋼)と17Cr鋼の30℃脱気5%硫酸中でのアノード分極曲線を示している¹³⁾。0.1%のSn添加

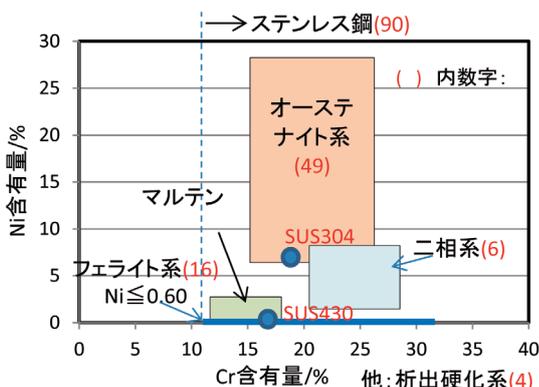


図1 JISに規格化されたステンレス鋼のCr, Ni量の範囲

により臨界不動態化電流密度 i_{crit} が低下し、2つのピークを持つようになるが、17Cr鋼の i_{crit} とほぼ同じ電流密度となっており、不動態化しやすいこと¹⁴⁾ が明らかにされている。さらに、4.9% NaCl, 30°Cの溶液中で17Cr鋼と同等の脱不動態化pHを示すこと¹⁵⁾ などの基礎的データの積み重ねと、本開発鋼の各種腐食環境での適用性を評価することを通じてSUS430、430LXおよびSUS304を代替しうる数種の改良鋼が開発されている。これらの鋼種はSUS304、430等の既存汎用鋼種の適用先の一部を置換しながら年間数万トン規模まで適用拡大が進んでいる。

3.2 省合金型二相系ステンレス鋼

3.2.1 これまでの二相系ステンレス鋼開発

Cr-Ni系ステンレス鋼にはオーステナイト系、二相系、析出硬化系の3分類があり、二相系ステンレス鋼 (Duplex Stainless Steel) はCr-Ni系の一部に分類されている。二相とは常温でオーステナイト相とフェライト相の二相混合組織を示すことから命名されている。その成分の特徴として、オーステナイト系に比べてNiが少なくCrが多く含まれる (図1)。二相系ステンレス鋼は1930年頃に北欧とフランスで開発され、オーステナイト系の弱点である耐粒界腐食性、耐力力腐

食割れ性が優れる耐食鋼としての位置づけでCr-Ni-Mo系の鋼種が開発されてきた¹⁶⁻¹⁸⁾。初期の二相系ステンレス鋼は溶接部の耐食性劣化が大きく、316 (17Cr-12Ni-2Mo) を代替するには溶接後の熱処理を必要とするものであったが、Nを合金元素として活用することにより、1970年代以降に溶接部の耐食性が改善され、優れた機械的性質も有する二相系ステンレス鋼が開発された。これらの鋼を第二世代の二相系ステンレス鋼と分類している^{6,18)}。この頃に開発された二相系鋼種は316L以上の耐食性を有する鋼種であり、ここでは汎用二相鋼と呼ぶ。

ステンレス鋼の耐孔食性を示す指数として、孔食指数 (PRE : Pitting Resistance Equivalent) があり、一般にCr, Mo, N, Wの含有量を用いて $PRE = Cr + 3.3Mo + 16N$ もしくは $PRE_w = Cr + 3.3(Mo + 0.5W) + 16N$ で表記される。この指数が40以上を示す鋼種をスーパーステンレス鋼と呼んでいる。二相系ステンレス鋼ではPREが40以上の鋼種が1990年代に開発された。代表鋼種はサンドビック社のSAF2507[®] (25Cr-7Ni-4Mo-0.3N) であり、これらの鋼種を第三世代^{6,18)}、もしくはスーパー二相鋼 (Super Duplex Stainless Steel) と呼ぶ。

二相系ステンレス鋼の省資源鋼開発の流れは1980年代半ばにはじまった。これもサンドビック社の開発になるSAF2304[®] (23Cr-4Ni-0.1N)¹⁹⁾ であり、316鋼とほぼ同等の耐孔食性を有する画期的な二相ステンレス鋼であり、省合金型二相系ステンレス鋼の代表鋼種である。その後、実用的に304鋼適用先の一部を代替しうる二相系ステンレス鋼として、アウトクンプ社によりLDX2101[®] (21.5Cr-5Mn-1.5Ni-0.22N) が2000年代に入ってから開発された。これらの316、304鋼を代替しうる省合金型二相系ステンレス鋼を第四世代^{6,18)}、もしくはリーン二相鋼 (Lean Duplex Stainless Steel) と呼ぶ。

二相系ステンレス鋼の分類とASTM規格鋼種の主な成分範囲およびBS EN, JIS SUS規格との対応を表1に示した。リーン二相鋼はMnを添加することでNi削減を図っている鋼種が多いため、その耐食性は前記したCr-Mn系と同様の

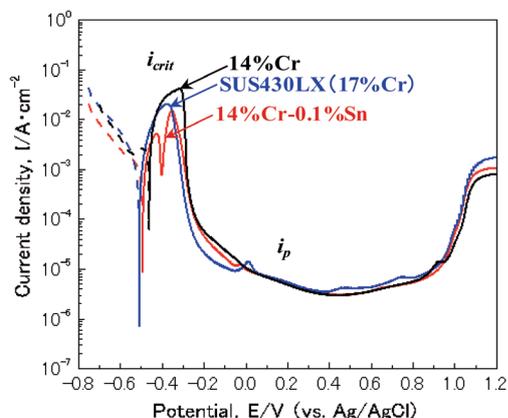


図2 30°C、5% H₂SO₄ 中アノード分極曲線

表1 二相系ステンレス鋼の成分規格

分類	商品名	ASTM UNS番号	主な化学成分の範囲または上限値 (mass%)							PRE _{w,Mn}	対応する規格	
			Cr	Ni	Mo	Mn	N	Cu	W		BS EN	JIS SUS
リーン二相鋼	Nitronic19D	S32001	19.5-21.5	1.00-3.00	0.60	4.00-6.00	0.05-0.17	1.00		18		
	LDX21201	S32101	21.0-22.0	1.35-1.70	0.10-0.80	4.00-6.00	0.20-0.25	0.10-0.80	21	1.4162		
	NSSC2120	S82122	20.5-21.5	1.5-2.5	0.60	2.0-4.0	0.15-0.20	0.50-1.50	22		821L1	
	SAF2304	S32304	21.5-24.5	3.0-5.5	0.05-0.60	2.50	0.05-0.20	0.05-0.60	24	1.4362	323L	
汎用二相鋼	-	S31803	21.0-23.0	4.5-6.5	2.5-3.5	2.00	0.08-0.20		33	1.4462	329J3L	
	-	S32205	22.0-23.0	4.5-6.5	3.0-3.5	2.00	0.14-0.20		34	1.4462	329J3L	
	DP3	S31260	24.0-26.0	5.5-7.5	2.5-3.5	1.00	0.10-0.30	0.20-0.80	0.10-0.50	37		329J4L
スーパー二相鋼	SAF2507	S32750	24.0-26.0	6.0-8.0	3.0-5.0	1.20	0.24-0.32		42	1.4410	327L1	
	Zeron100	S32760	24.0-26.0	6.0-8.0	3.0-4.0	1.00	0.20-0.30	0.50-1.00	0.50-1.00	41	1.4501	
	DP3W	S39274	24.0-26.0	6.0-8.0	2.5-3.5	1.00	0.24-0.32	0.20-0.80	1.50-2.50	42		

$$PRE_{w,Mn} = Cr + 3.3(Mo + 0.5W) + 16N - Mn$$

注意が必要となる。たとえば、リーニ二相鋼の耐孔食性へのMnの悪影響を考慮し、Mnの係数を-1とした孔食指数 $PRE_{W,Mn} = Cr + 3.3 (Mo + 0.5W) + 16N - Mn$ が提案されており⁶⁾、表中ではこれを記した。リーニ二相鋼はNi, Moを節減した鋼種であり、304, 316鋼を代替する省資源鋼として適用が拡大していくことが期待される。

次項では当社のNSSC[®] 2120鋼 (SUS821L1) の開発の特徴について述べる。

3.2.2 構造用素材として優れた経済性を持つ省合金型二相系ステンレス鋼の開発と適用拡大

大気中に豊富に存在する窒素はステンレス鋼の合金元素として活用されるが、多量に含有させるとCr窒化物として析出し、耐食性や靱性を損なう場合がある。これまでに開発された304を代替するクラスのリーニ二相鋼は溶接入熱上限を1.5~2MJ/mとするよう推奨されている鋼種²⁰⁾がほとんどであった。当社では窒化物が平衡的に析出しはじめる温度に着目し、この析出温度を適正化する²¹⁾ことで溶接入熱の上限を3MJ/m以上に高めたNSSC2120を開発した²²⁻²⁴⁾。NSSC2120はCr量を21%に高める一方で、高価なNiを2%に低減し、Moは0.6%以下とした省合金鋼である。また降伏強度の規格は400MPa以上とSUS304 (18Cr-8Ni) の205MPaの2倍を有するため、薄肉化による鋼材使用量削減を図ることができる。さらに従来のリーニ二相鋼の溶接入熱範囲を拡大することにより、SUS304が使用されている適用先に対する代替範囲拡大を狙った鋼種である。図3にフラックスコアードアーク溶接 (FCAW) およびサブマージアーク溶接 (SAW) にて作成した10mm厚のNSSC2120とSUS304の溶接継手孔食電位測定結果 (JIS G0577, 1M/L NaCl 30°C) を示す。NSSC2120の溶接継手はSUS304同等以上の耐孔食性を示しており、溶接構造用耐食材料として優れた経済性を有する鋼であると言える。本鋼種の窒化物析出に対する感受性が

相対的に小さい特徴を生かして、炭素鋼を母材とするクラッド鋼板などの溶体化熱処理を省略した厚板商品も開発されている。これまでの厚板の適用先として、海水淡水化装置の蒸発缶体、ケミカルタンカーのタンク、水門扉体などがあり、高強度を生かした薄肉設計により、経済的メリットを享受できることから採用されたものである。さらに冷延鋼板や棒線材、形鋼、鍛造品などの開発が進行中であり、各種鋼材の品揃えによりSUS304代替鋼材としての実力向上が着実に進んできている。

4 展望

オーステナイト系ステンレス鋼を基準にとると、その主要原料はほぼレアメタルであり、Cr-Mn, Cr, 二相系の鋼種開発が示すように、ステンレス鋼においては歴史的に省資源化を常に目指して開発が進められてきたと言える。

さて、2001年に1900万トンであった世界のステンレス粗鋼生産は2016年に4500万トンに達する勢いである²⁵⁾。2015年の世界生産における鋼種比率は、製造および利用が比較的容易なCr-Ni系とCr-Mn系ステンレス鋼の生産と消費が約75%を占め、より省資源であるCr系は約25%程度に過ぎない¹⁾。このようなレアメタルを大量に使用するステンレス鋼の消費と生産の急拡大が、世界的なレアメタル資源枯渇の危機意識と資源価格の乱高下を生み出してきており、今こそ地球規模での秩序あるステンレス鋼の生産と消費、省資源鋼開発と利用に向けた取り組みが重要であると考えられる。

ここで、環境保全で使われる3R (Reduce: 発生抑制、Reuse: 再使用、Recycle: 再利用) の視点をステンレス鋼の生産と消費の活動にあてはめて考えてみたい。①貴重なレアメタル資源の使用量を削減 (Reduce) しうる省資源鋼を開発していくこと、②ステンレス鋼を長期に亘って繰り返し再使用 (Reuse) しうる利用技術開発を進め、廃棄量 (Scrap) を減らすこと、③スクラップを最大限に再利用 (Recycle) し、フェロアロイの使用量を削減してステンレス鋼の再生産をおこなうこと、このような視点が「ステンレス鋼のレアメタルを減らしていく」ことに繋がるものと考えられる。以下にステンレスメーカーに求められる取組みの視点から再度整理して記してみる。

- ①省資源鋼開発：マイクロアロイ、高純度化、組織の微細化等の材料研究・製造技術開発などにより、省資源でありながら耐久性が高いステンレス鋼の開発⁶⁾。
- ②利用技術開発：メンテナンス費用削減のメリット享受も含めて、長期にわたり使用でき、低いライフサイクルコスト (LCC) を消費者が享受しうる適正な利用技術の開発。
- ③レアメタルの再利用を促進する資源循環：ステンレス鋼の

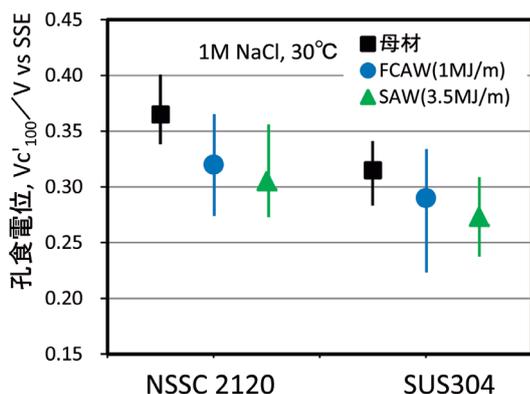


図3 NSSC2120とSUS304の溶接部の孔食電位

原料に占めるスクラップ利用の割合は鉄スクラップ18%、ステンレススクラップ32%をあわせ、50%程度であり、残りの50%がフェロアロイ (Raw Material) であって、一方で廃棄されたステンレス鋼の80~95%がリサイクルされている²⁶⁾。①使用するフェロアロイ中のレアメタルを削減し、②再使用 (長期使用) し、③再利用 (リサイクル) を促進するという視点での資源循環を実現できるようなステンレス鋼の生産技術とリサイクル技術開発などの取り組みが重要であろう。

ステンレス鋼の生産と消費を繰り返す社会の中で、地球環境にやさしい省資源鋼の開発と利用によるLCC削減、これらを通じたレアメタル使用削減の取組みがわが国のステンレス業界に求められている。最も省資源の高純度フェライト系ステンレス鋼製造と利用を進めてきた日本の省資源鋼開発力は他国より一歩進んでおり、レアメタルを削減する省資源鋼開発が今後も進められていくものと考えられる。

当社で開発した上記の優れた特性を持つ省資源ステンレス鋼の適用拡大には、耐久性のさらなる改善、鋼材の品揃えや溶接材料のコスト削減、入手の容易化など、製造メーカーとして果たすべき課題がまだ多く存在する。一方で使用者の側から、省資源ステンレス鋼適用によるメリットに目を向けていただき、ステンレス鋼のレアメタル削減が実質的に進むように共に協力しあって鋼種開発と利用技術開発を進めていきたい。

参考文献

- 1) ISSF : ISSF Stainless Steel in Figures 2016, http://www.worldstainless.org/publications/brochures_and_posters.
- 2) 遅沢浩一郎 : 材料, 60 (2011), 680.
- 3) 細井祐三監修 : ステンレス鋼の科学と最新技術, ステンレス協会, 東京, (2011)
- 4) ISSF : ISSF New 200-series steels.
- 5) 大嶋貴之, 濱田辰巳, 斎田知明, 羽原泰裕, 黒田光太郎 : CAMP-ISIJ, 20 (2007), 431.
- 6) 梶村治彦 : 第215・216回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, (2013), 17.
- 7) 梶村治彦 : 材料, 60 (2011), 862.
- 8) H.Abo, T.Nakazawa, S.Takemura, M.Onoyama, H.Ogawa and H.Okada : Stainless Steel '77, London, (1977), 35.
- 9) R.F.Steigerwald, H.J.Dundas, J.D.Redmond and R.M.Davison : Stainless Steel '77, London, (1977), 57.
- 10) 直江津研究所 : 日本ステンレス技報, 15 (1980), 75.
- 11) 清水敏治, 小林未子夫, 鋸屋正喜, 小池正夫, 岩瀬圭伍 : 日本金属学会報, 22 (1983), 335.
- 12) 遅沢浩一郎 : 防食技術, 20 (1971), 221.
- 13) 秦野正治, 松山宏之, 石丸詠一郎, 高橋明彦 : まてりあ, 51 (2012), 25.
- 14) 松山宏之, 平出信彦, 松橋透, 梶村治彦, 原信義 : 材料と環境2012講演集, B-308 (2012)
- 15) H.Matsuyama, M.Hatano, T.Matsushashi and E.Ishimaru : Proceedings of 7th European Stainless Steel Conference, (2011), Presentation No.83.
- 16) M.Liljas : Proceedings of 6th European Stainless Steel Conference Science and Market, (2008), 535.
- 17) J.Charles : Duplex stainless steels '91, eds. by J.Charles and S.Bernhardsson, 1 (1991), 3.
- 18) 腐食防食部門委員会 : 二相ステンレス鋼の上手な使い方, 日本材料学会, 京都, (1999)
- 19) S.Bernhardsson : Duplex Stainless Steels '91, eds. by J.Charles and S.Bernhardsson, 1 (1991), 137.
- 20) B.Holmberg, M.Liljas and F.Häag : Duplex 2007 International Conference & Expo.
- 21) S.Tsuge, Y.Oikawa, H.Kajimura, H.Inoue and R.Matsushashi : Proceedings of 7th European Stainless Steel Conference, (2011), Presentation No.42.
- 22) 柘植信二 : JSSC 日本鋼構造協会誌, (2012) 11, 34.
- 23) 及川雄介, 柘植信二, 梶村治彦, 井上裕滋 : 溶接学会誌, 82 (2013), 435.
- 24) 及川雄介, 柘植信二, 江目文則, 本村洋, 井上裕滋 : まてりあ, 55 (2016), 71.
- 25) ISSF : Statistics of Meltshop Production.
- 26) ISSF : Stainless steel and CO₂ : Facts and scientific observations.

(2017年3月2日受付)

連携記事

Moフリー型高耐熱フェライト系 ステンレス鋼の開発

Development of Mo-free Heat Resistant Ferritic Stainless Steel

中村徹之

Tetsuyuki Nakamura

JFEスチール(株)

スチール研究所 ステンレス鋼研究部

主任研究員

1 はじめに

ステンレス鋼とは、Crを10.5%以上含む合金鋼のことを指し¹⁾、使用環境中で鋼表面にCr主体の保護性のある皮膜(酸化物)を形成することで優れた耐食性や耐酸化性を有している。ステンレス鋼には、Crに加えてNiを含有したオーステナイト系と、Niを含まないフェライト系の2つがあるが、さらに、用途や使用環境に応じてMo等の元素を含有させることで、より特性が高められたステンレス鋼が種々開発されてきた^{2,3)}。しかし、CrをはじめNi、Moといったステンレス鋼の特性を高めることができる元素は、その多くが地球上の存在量が稀であるか、技術的・経済的に可採年数が限られたレアメタルであり、資源の偏在性も手伝って価格変動が大きくなっている。そのため、ステンレス鋼メーカー各社では、これらレアメタルの使用量を低減したステンレス鋼の開発を推進してきた。例えば、JFE443CT (21%Cr-0.4%Cu-0.3%Ti)⁴⁾は、Niを含まない代わりに比較的安価な原料であるCuとTiをそれぞれ微量含有することで、最も汎用的に使用されているステンレス鋼であるSUS304 (18%Cr-8%Ni)と同様以上の耐食性を有しており、SUS304に代えて建築材料や厨房機器などに使用されている。

ステンレス鋼は耐食性の他、耐熱性にも優れているため、400℃を超える高温環境下でも使用される。オーステナイト系ステンレス鋼は面心立方構造であり体拡散が小さく、600℃以上の高温域で高い強度を示す。そのため、長時間高温域で使用され、クリープ特性が必要となる発電プラントの構造材料等に使用されている³⁾。一方でフェライト系ステンレス鋼は体心立方構造であり、500℃以上でその強度はオーステナイト系ステンレス鋼に比べて劣る。しかし、フェライト系ステンレス鋼はオーステナイト系ステンレス鋼に比べ

て熱膨張係数が30%程度小さいため、加熱と冷却が繰り返される用途、例えば自動車の排気管等での使用に適している³⁾。このとき、フェライト系ステンレス鋼の高温強度(耐力)を高めるため、NbやMo、Wといった固溶強化元素が添加される⁵⁾が、これらの元素もレアメタルであり、添加量の低減が求められている。

本報では、従来強化元素として広く用いられてきたMoを全く添加せずにフェライト系ステンレス鋼の耐熱性を向上させた技術開発について報告する。

2 自動車排気管用ステンレス鋼

2.1 高温排気管部品に求められる耐熱疲労性

図1に示すように、自動車のエキゾーストマニフォールドやマフラー等の排気管部品には、耐熱性や耐食性が必要なことからステンレス鋼が多く使用されている⁶⁾。自動車の排気管部品は、その上流側と下流側で材料に求められる特性が異なり、エンジンに近い上流側(例えばエキゾーストマニフォールド)では、エンジンから800℃を超える高温の排ガスが流れ込んでくるため、耐熱性が必要となる。一方、マフ

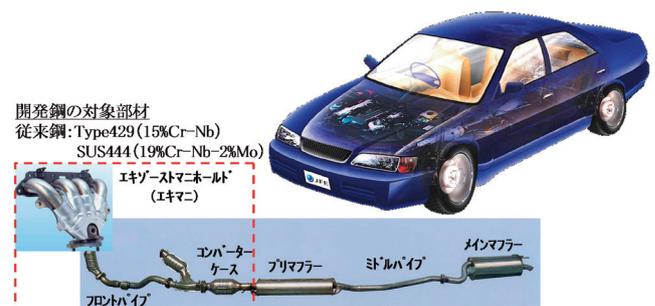


図1 ステンレス鋼が使用される自動車排気管部品例⁶⁾

ラーのようにエンジンから離れた下流側では、排ガス温度が低下しており、排ガスが結露した凝縮水や外部から付着した塩分に対する耐食性が求められる。

エキゾーストマニフォールドなど、高温排気管部材に求められる耐熱性を具体的に表1に示す。中でも最も重要とされているのが耐熱疲労性である。熱疲労現象を模式的に図2に示す。自動車のエンジンを起動すると、高温の排ガスが流れ込んでくるため排気管部材は加熱される。このとき素材(金属)は熱膨張しようとするが、他部品と接続されているため、自由に膨張することができず膨張が拘束され、自由膨張した場合に比べて圧縮ひずみ(応力)が生じる。一方、エンジンを停止すると部品は冷却され、素材は逆に熱収縮しようとするが、これも拘束されて引張ひずみ(応力)が生じる。これらの圧縮ひずみと引張ひずみが繰り返し発生し、蓄積することで破壊に至る現象が熱疲労である。耐熱疲労性は図3に模式的に示した熱疲労試験で評価される⁷⁾。熱疲労試験では、昇降温サイクル中に予め測定した自由膨張に対して所定の割合(拘束率)をかけた圧縮ひずみおよび引張ひずみを付与する。それを繰り返し、試験の最低温度(例えば200℃)における最大引張応力(荷重)の値が、試験初期の値に対して所定の割合(例えば70%)まで低下したサイクル数を寿命として評価する。エキゾーストマニフォールドなど排気管部材は管形状

表1 高温排気管部材に求められる耐熱性

特性	現象
耐熱疲労性	昇温と降温の繰返しに起因した破壊
高温疲労特性	高温での振動に起因した破壊
高温強度	熱疲労、高温疲労特性の向上に必要
耐酸化性	高温での耐食性
耐高温塩害腐食性	塩水付着+高温環境下での耐食性

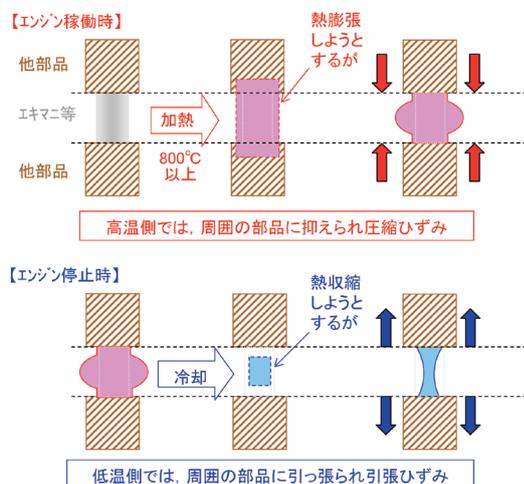


図2 熱疲労現象の模式図

であるが、管形状の試験片ではその真円度や板厚偏差によって熱疲労試験における寿命が大きく変動してしまい、材料そのものの耐熱疲労性を正しく評価できない可能性があるため、試験片形状の影響を受けにくい中実丸棒試験片での試験も行われている。耐熱疲労性を向上させるためには、熱膨張係数を小さくすることや、弾性限を大きくすることが有効な手段である。

2.2 材料の変遷

従来、エキゾーストマニフォールドには鋳鉄製のものが使用されていた。しかし、80年代以降、軽量化を目的としてステンレス鋼板(例えばType409 (11%Cr-0.2%Ti))が使用され始めた。熱疲労は、先に述べたように昇降温に伴う熱膨張、熱収縮に起因して起こる疲労破壊であるため、高温強度の高いオーステナイト系ステンレス鋼よりも、熱膨張係数の比較的小さいフェライト系ステンレス鋼の方が耐熱疲労性に有利であり多く使用されている。さらに耐熱疲労性を向上させるには、高温から室温まで全ての温度域における強化(高耐力化)が必要であり、従来は、Nbを添加して耐熱性を高めたType429 (15%Cr-0.4%Nb)⁵⁾、さらにMoも添加して耐熱性を高めたSUS444 (19%Cr-0.5%Nb-2%Mo)⁵⁾等の耐熱フェライト系ステンレス鋼が多く使用されてきた。NbやMoはいずれも鋼中で固溶強化元素として鋼を強化することで耐熱性を高める元素であり⁸⁾、固溶強化は室温から高温まで全温度域で鋼の強化に寄与するため、耐熱疲労性向上には非常に有効である。しかし、これらの固溶強化元素はいずれもレアメタルであることに加え、固溶強化によって十分な高温強度を得るためには、その合金量を多くする必要があり、耐熱疲労性の向上に伴い、室温における加工性が低下してしまうという課題を有している。

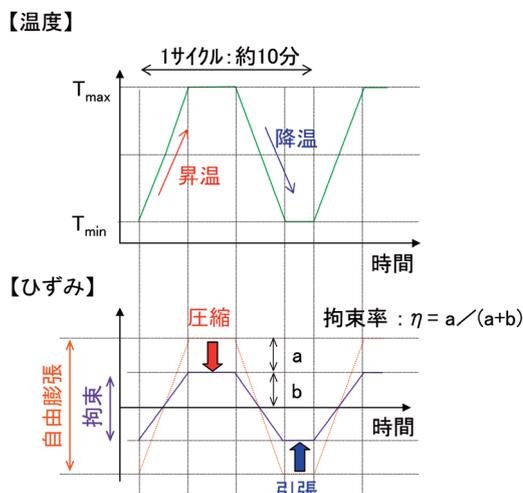


図3 熱疲労試験方法

2.3 Mo 使用量削減のニーズ

2004年頃、ステンレス鋼生産量の増加や中国の鉱山での事故、Mo 鉱山の減産等をきっかけとして、Moの原料価格が大きく高騰⁹⁾し、その後も不安定な状態が続いている。以降、鉄鋼メーカーのみならず、自動車メーカーにおいてもレアメタルを含む鋼材の使用量を低減する方針が打ち出されている。一方で、近年、自動車の排ガス温度は燃費向上のために高くなる傾向にあり、エキゾーストマニフォールド用材料についてもType429では耐熱性が不十分であり、SUS444クラスの耐熱性が必要となるケースが増えてきている。また、車体の軽量化を目的として鋼板の薄肉化も推進されており、より薄い鋼板を使用しても部品としての耐熱性を確保するため、より高い耐熱性を有する鋼板に対するニーズは大きくなっている。以上のような背景の下、自動車の高温排気管部品には、Moを使用せずにSUS444と同等以上の耐熱性を有する新しい省資源型耐熱ステンレス鋼の開発が求められていた。

3 耐熱性向上技術開発

3.1 開発の考え方

上述したように、耐熱性の向上に有効な固溶強化元素はそのほとんどがレアメタルである。レアメタルの添加量を低減した高耐熱ステンレス鋼を開発するため、NbやMoによる固溶強化以外の強化機構の活用を検討した。高温域でも有効な強化機構として、固溶強化に次いで挙げられるのは析出・分散強化である。析出・分散強化は固溶強化に比べて少ない合金量で大きな強化量を得られる利点を有しており、一般に、析出・分散強化が期待できる析出物としては炭窒化物やLaves相などの金属間化合物が知られている。しかし、従来の耐熱フェライト系ステンレス鋼では、これらの析出物は800℃を超える高温域では鋼中に固溶するか粗大化が進行し、長時間の使用中に次第に強化に寄与できなくなるため、その強化効果は限定的である。また、これらの析出物には構成元素としてNbが含まれることが多く、析出物の析出、粗大化とともに固溶Nb量が減少してしまい、固溶強化効果の低減にもつながってしまう。そこで、炭化物や金属間化合物以外の析出物による強化とレアメタル以外の元素による固溶強化について検討した。

3.2 開発技術① Cu析出・分散強化の活用

炭窒化物やLaves相の他に析出・分散強化が期待できる析出物として、 ϵ -Cuが挙げられる。 ϵ -Cuは、600℃～700℃の温度域で図4に示すように微細(数nm以下)に析出し、鋼を大きく強化する。一方で、800℃を超えると ϵ -Cuは鋼中に再固溶するが、この析出-固溶現象を耐熱疲労性向上に活用す

ることができる¹⁰⁾。すなわち、室温から800℃以上までの昇降温の繰り返しにおいて、 ϵ -Cuは600℃～700℃での微細析出と、800℃以上の高温域での固溶を繰り返すため、長時間の使用後も粗大化しにくく、強化に寄与し続けることが可能となる。鋼に適量のCuを添加することにより、耐熱疲労性は大きく向上することが確認できた。しかし、後述するように、Cuを添加するのみでは目標であるSUS444の耐熱疲労性には及ばず、Moの完全フリー化は達成できなかった。この理由として、 ϵ -Cuが析出する700℃以下においては長時間の使用後も十分な強度が得られる一方で、 ϵ -Cuが固溶する800℃以上の高温域では ϵ -Cuによる析出・分散強化効果が得られず、強度が不十分であることが考えられる。たとえCuの添加量を増加しても、 ϵ -Cuの粗大化を促進させてしまい、かえって耐熱疲労性は低下する。熱疲労には、室温から高温まで全温度域の強度が熱疲労には寄与するため、700℃以下の温度域での高強度化も効果を有するが、最も材料の強度が低下する高温域での強度向上が必要不可欠であった。

3.3 開発技術② 固溶強化元素としてのAlの活用

Cuの析出・分散強化効果が得られない800℃以上の高温域での強化について、他の強化技術で補うことを検討した。この温度域で長時間使用した場合にも析出物による析出・分散強化効果を発揮させるのは困難であり、レアメタル以外で固溶強化効果を有する新しい元素の探索を行った。高温域における固溶強化に関しては、溶質原子の引きずり抵抗 τ_d が式(1)で表され、易動度 B_d が式(2)で表されるため、溶質原子の溶媒原子(鉄鋼におけるFe)との原子サイズ差(ミスフィット η)に加え、溶質原子の拡散係数 D_i も寄与する^{11,12)}。

$$\tau_d = v / B_d \quad (v: \text{転位速度}, B_d: \text{易動度}) \dots\dots\dots (1)$$

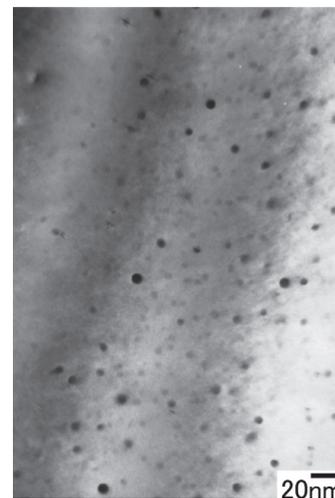


図4 ステンレス鋼中に析出した ϵ -Cuの観察例

ここで、易動度 $B_d = D_i \cdot k_b \cdot T / (68 \cdot C_s \cdot N \cdot G^2 \cdot \eta^2 \cdot R^6 \cdot b)$ (2)
 (K_b : ボルツマン定数、 T : 絶対温度、 C_s : 溶質原子濃度、 N : 単位体積当たり原子数、 G : 剛性率、 R : 溶媒原子半径、 b : バーガースペクトル)

これらのパラメータを考慮し、Crに対する相対的な固溶強化能を理論的に計算した結果を図5に示す。従来から固溶強化元素として知られるNb、Moの強化能が大きいことに加え、これまでは固溶強化元素としてはほとんど活用されていないAlの固溶強化能が比較的大きいことが計算結果から示唆され、この結果に基づきAlを固溶強化元素として活用することとした。

800℃における高温強度に及ぼすAl添加の影響を図6に示す。Al添加による強度増加は、通常高温引張試験が行われるようなひずみ速度が大きい場合 (ひずみ速度: $10^{-3}/s$) と比較して、熱疲労現象に対応するようなひずみ速度が小さい場合 (ひずみ速度: $10^{-5}/s$) に顕著に見られた。800℃において、Al添加鋼に異なるひずみ速度で20%のひずみを付加したときの組織を図7に示す。ひずみ速度が大きい場合には亜粒界の形成が多く見られたのに対し、ひずみ速度が小さい場合には亜粒界の形成は僅かで、粒内に転位が絡み合って分布している様子が見られた。これは転位が溶質原子を引きずって移動していることを示しており、Alが固溶強化元素としての効果を有していることが示唆された。

先に述べたように、熱疲労の高温域においては熱膨張が拘束されるため、自由膨張に対して圧縮のひずみが負荷される

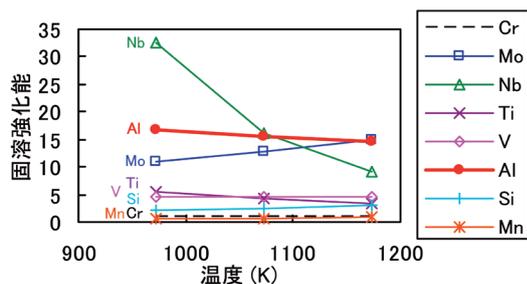


図5 各元素の α Fe中固溶強化能計算結果

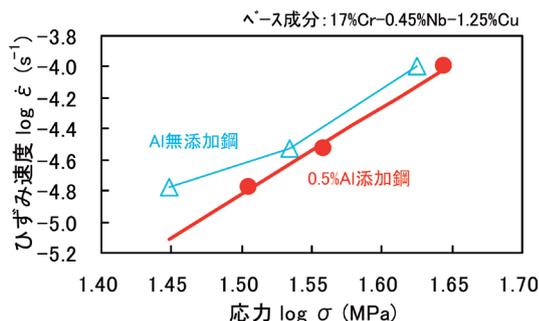


図6 800℃における応力とひずみ速度の関係⁶⁾

が、常温における状態に比べるとクリープにより引張のひずみが生じるため、試験片は引張試験時と同様にネッキングを生じ断面積が低下する。通常、耐熱疲労性の評価には試験の最低温度 (本試験においては200℃) における応力 (荷重) の値を用いるが、本研究においては高温域での変形に着目するため、試験片平行部の最もくびれた部分の断面積の値を用いた。熱疲労試験における試験片の断面積変化を図8に、1400サイクル時の試験片平行部観察結果を図9に示す。Alを添加したことにより、試験片断面積の減少は緩やかになり、寿命も増加した。Alを添加することで固溶強化により高温域における変形 (ネッキング) が抑制され、耐熱疲労性が向上することが確認された。

4 完全Moフリー型耐熱ステンレス鋼 JFE-TF1 の特性

以上の知見に基づき、完全Moフリー型高耐熱フェライト系ステンレス鋼JFE-TF1 (17%Cr-0.45%Nb-1.2%Cu-0.3%Al) が開発された。Cuに加えてAlを適量添加した開発鋼の熱疲労寿命を従来鋼と比較して図10に示す。Cu単独添加鋼ではSUS444の寿命には及ばなかったが、CuとAlを複合添加した開発鋼はSUS444と同等以上の耐熱疲労性が得られた。すなわち、Alを固溶強化元素として活用することにより

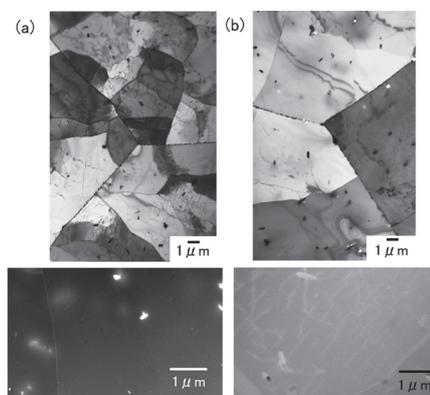


図7 17%Cr-0.45%Nb-1.25%Cu-0.5%Al鋼の800℃、20%ひずみ付与後のTEM組織写真⁶⁾ ひずみ速度: (a) $2 \times 10^{-3} s^{-1}$ 、(b) $4 \times 10^{-5} s^{-1}$

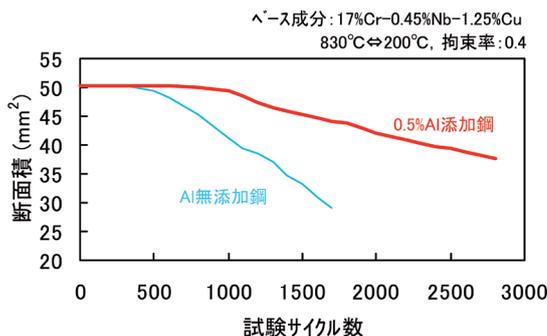


図8 熱疲労試験中の断面積変化⁶⁾

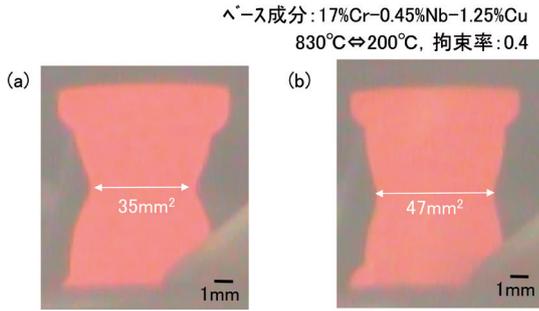


図9 熱疲労試験 1400 サイクル時の試験片観察結果 (a) AI無添加鋼、(b) 0.5%AI添加鋼

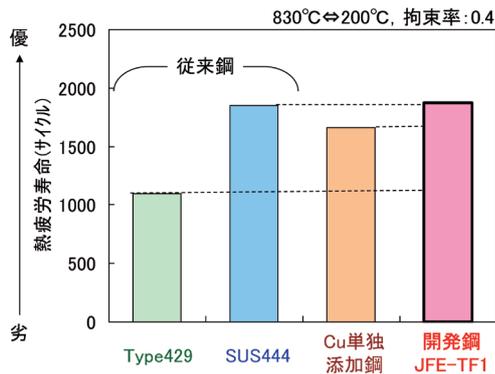


図10 開発鋼の熱疲労寿命

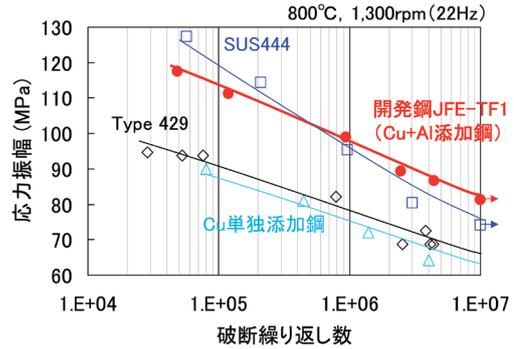


図11 高温平面曲げ疲労試験結果

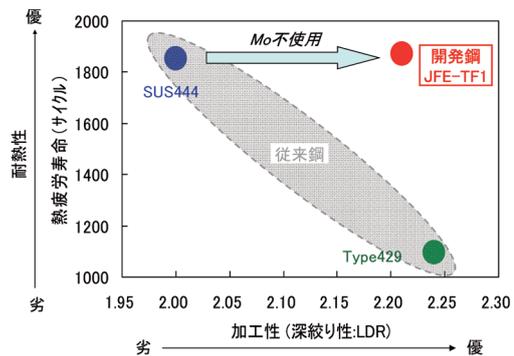


図12 完全 Mo フリー開発鋼の耐熱疲労性と加工性⁶⁾ (熱疲労条件: 830°C⇔200°C、拘束率0.4)

耐熱疲労性を向上させ、Cuの析出・分散強化と複合することでSUS444と同等以上の耐熱疲労性が得られた。また、熱疲労とともに重要な耐熱性の1つである高温疲労特性(耐振動疲労性)を図11に示す。800°CではCuは固溶温度域であるため強化効果が小さいが、Al添加により10⁷回疲労限が大きく向上する。さらに、Moフリー化したことにより加工性はSUS444に比べて大きく向上し、従来SUS444では加工できなかった複雑な形状の部品への加工も可能となる。図12に耐熱疲労性と加工性(深絞り性)のバランスを示す。開発鋼はType429と同等の良好な加工性を有している。

5 おわりに

本開発では、従来の代表的な耐熱フェライト系ステンレス鋼であるSUS444のMoをフリー化するために、CuとAlを組み合わせることで耐熱性を高める技術を開発した。NiやMo等のレアメタルはステンレス鋼の種々特性を向上させることが可能であるが、用途ごとの使用環境に合わせて必要な特性を考慮し、レアメタルを使用せずにその特性を向上させることが今後の開発に求められている。資源が限られるレアメタルを添加したステンレス鋼は現在もまだ多く使用されており、今後もレアメタルの添加量を減らすことを可能にする高耐熱化、高耐食性化技術開発が継続して行われていくと考えられる。

参考文献

- 1) JIS G 0203
- 2) JIS G 4305
- 3) 遅沢浩一郎: ステンレス鋼の科学と最新技術, 細井祐三 監修, ステンレス協会, 東京, (2011)
- 4) 石井和秀, 石井知洋, 宇城工, 柳沼寛, 山下英明: あたりあ, 47 (2008) 1, 45.
- 5) 宮崎淳, 郡司牧男, 吉岡啓一: 川崎製鉄技報, 25 (1993) 2, 112.
- 6) 中村徹之, 太田裕樹, 加藤康: あたりあ, 54 (2015) 1, 18
- 7) 新制金属講座新版材料編「耐熱合金」, 日本金属学会, (1964)
- 8) 大村圭一, 藤田展弘, 菊池正夫, 鈴木亨, 弘重逸朗: 材料とプロセス, 4 (1991), 1796.
- 9) 濱井昂弥: JOGMEC 金属資源レポート, (2011) 11, 75.
- 10) 富田壮郎, 奥学: 日新製鋼技報, 90 (2009), 30.
- 11) A.H.Cottrell: Dislocations and Plastic Flow in Crystals, Oxford Univ. Press, London, (1953), 139.
- 12) A.H.Cottrell and M.A.Jaswon: Proc. Phys. Soc., A199 (1949), 104.

(2017年1月26日受付)

2016年鉄鋼生産技術の歩み

Production and Technology of Iron and Steel in Japan during 2016

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

2016年の我が国の経済情勢は、政府の経済報告等によると、雇用環境・所得環境が改善し、緩やかな回復基調が続いているが、年前半では海外経済で弱さがみられたほか、国内経済についても、個人消費および民間設備投資は、所得、収益の伸びと比べ力強さを欠いた状況となっている。この結果、2016年度の実質GDP成長率は1.3%程度、名目GDP成長率は1.5%程度と見込まれている^{1,2)}。

(一社)日本鉄鋼連盟によると、2015年度の鉄鋼内需は、総じて停滞していたが、2016年度は建設市場における公共・民間土木工事や住宅建設が回復基調となった。一方で、製造業における設備投資等に関わる産業機械、電気機械は総じて力強さを欠いた。また、自動車関連では熊本地震等による影響で年央まで低迷していたが、その後の挽回生産や新型車効果等から下期に持ち直しが見られた。外需は先進国新興国ともに緩やかな回復傾向に転じたことから世界の鉄鋼需要も僅かながらも前年を上回った。

このような情勢を反映し、我が国の2016年(暦年)の粗鋼生産量は1億477万トンとなり、前年の1億513万トンと概ね同レベル(0.3%減少)となった(図1)^{3,4)}。国内の業界動向をみると、新日鐵住金(株)が日新製鋼(株)を子会社化することで検討を開始し、高炉および電炉各社でも設備休止や集約が進展した。また、中国をはじめとする鉄鋼生産能力過剰問題に対しては、G20構成国等により本問題を話し合う「鉄鋼の過剰生産能力問題に関するグローバル・フォーラム」が12月に正式に発足した。

鉄鋼原料となる鉄鉱石や原料炭に関しては、その価格が2011年をピークに下落傾向となり、2016年もこの傾向が続いていたが(図2)⁵⁾、原料炭に関しては、2016年後半より豪州の有力炭鉱の操業トラブルや中国の炭鉱操業規制等によって価格が従来の3倍以上に急騰しており、コストアップ要因として2017年以降の動向が大いに懸念される場所である。

2016年も鉄鋼各社は各社の海外戦略に沿って、種々の製品分野において東南アジア、ブラジル、メキシコ等の海外への投資・進出が行われた。一方で、2016年6月には英国におい

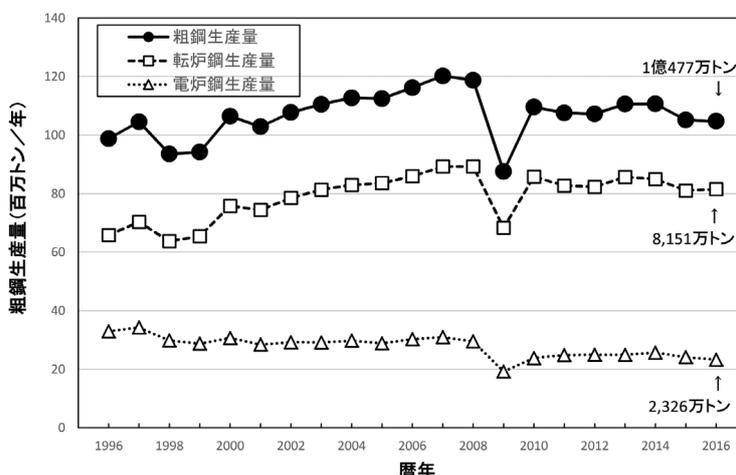


図1 我が国の粗鋼生産量の推移 (暦年)^{3,4)}

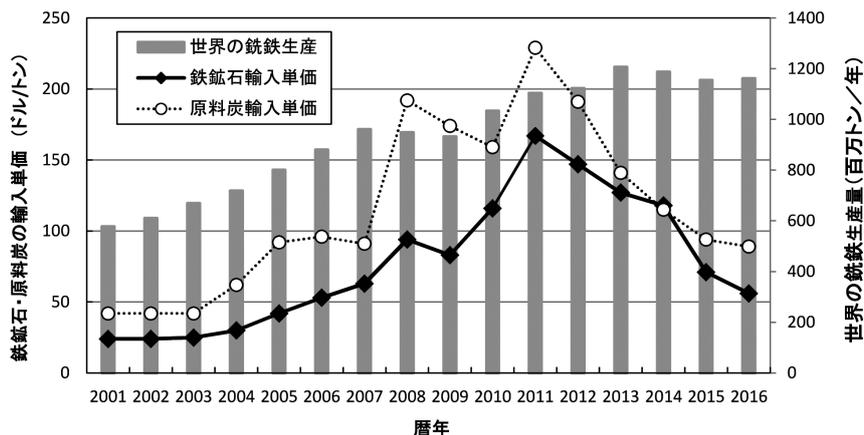


図2 世界の銑鉄生産量と鉄鉱石・原料炭の輸入単価推移 (暦年)⁵⁾

て国民投票により、英国の欧州連合 (EU) 離脱が選択され、11月には米国の大統領選挙が行われ新政権が誕生することになったが、鉄鋼業界にとっても、今後の欧米諸国の保護主義的な動向が懸念される展開となった。

また、2016年は地球温暖化対策についても新たな展開があった。国際的には、2015年12月に第21回気候変動枠組条約締約国会議 (COP21) でパリ協定が採択された。その後国内では、このような動向も踏まえて地球温暖化対策計画が2016年5月に閣議決定された。パリ協定が2016年11月に発効され鉄鋼業界としては、既に日本鉄鋼連盟を中心に取組を行っている低炭素社会実行計画を着実に実行していくことを再確認した。

以下に、2016年の我が国鉄鋼業を取り巻く状況として、鉄鋼原料の動向、鉄鋼需要産業の動向、我が国および世界の粗鋼生産の状況等について概要をまとめる。

1.1 鉄鋼原料の動向

鉄鉱石は鉄鉱石3大メジャー (ヴァーレ、リオ・ティント、BHPビリトン) の寡占化並びに増産基調が2016年も継続し、各社とも過去最高水準の生産が行われた。(独) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) の金属資源レポート⁶⁾によると、各社とも徹底したコスト削減で得た価格競争力を武器に激しいシェア争いを続けているとみられる。一方で、世界の粗鋼生産量は前年と横ばい、銑鉄生産量も2012年頃から横ばい基調となっている。鉄鉱石の生産量が高位に維持され供給量が過剰となっているために、鉄鉱石の価格は2011年をピークにして下落傾向が続いている。また、原料炭についても2016年9月頃まで需給関係は鉄鉱石と同様の状況であった。しかし、鉄鋼メーカーの原料炭契約価格の公表値によれば、2016年10月以降原料炭契約単価が高騰した⁷⁾。豪州の原料炭サプライヤーの操業トラブルによる供給減少が引き

金との報道があった⁸⁾。図2には、世界鉄鋼協会、財務省通関統計等による、世界の銑鉄生産量と鉄鉱石および原料炭の輸入単価の推移を示す⁵⁾。これによると、2011年には鉄鉱石は167ドル/トン、原料炭は229ドル/トンの最高値となっていたが、2016年には鉄鉱石は56ドル/トン、原料炭は89ドル/トンに低下し、概ね10年前と同じ水準となった。原料炭の契約価格高騰は、契約と輸入の時差のため輸入単価に影響しなかった。

1.2 鉄鋼需要産業の動向

日本鉄鋼連盟の鉄鋼需給四半期報⁹⁾、(一社) 日本自動車工業会、(一社) 日本造船工業会、(一社) 日本電機工業会等のホームページによると、2016年の鉄鋼需要産業の動向は概略以下のとおりである。

詳細については、原典あるいは日本鉄鋼連盟、国土交通省、および各工業会のホームページを参照されたい。

【土木】 2016年度の土木建設は、公共土木の公共事業費 (2015年度補正予算と2016年度当初予算、第一・二次補正予算との合算等) 予算規模が前年度から拡大したことや、2016年9月に「東京外環道」工事の大型受注や「新国立競技場」の受注等もあり、上期の公共土木工事は大幅に増加した。下期に入ってから、熊本地震や台風10号等の災害復旧・復興や、東京五輪関連の社会インフラ等の整備等も期待され、引き続き盛り上がるものと思われる。一方、民間土木工事は、首都圏を中心とした駅前再開発が進展、リニア中央新幹線 (東京-名古屋間) の着工等から、年間を通して好調を持続する見込みとなった。

【建築】 2016年度の住宅建設は、消費税率引上げを見越した駆け込み需要が見られる中、緩やかな回復傾向を辿った。利用関係別には低金利な住宅ローンの後押しから持家が回復傾向を辿ったほか、貸家は相続税対策も加わって高い伸びを続

け、住宅市場の牽引役となった。一方で、非住宅用建築物（事務所、店舗、工場等）は、年度下期にかけてオリンピック案件の始動が見られたものの、不安定な為替の動きに加えて、新興国経済の停滞、英国EU離脱、米国大統領交代等の世界経済の先行きへの不透明感から、企業の設備投資は盛り上がり欠ける状況が続いた。

【造船】 世界的な船腹過剰、海運市況低迷が続く中、2016年1月のNOx排出規制強化に伴う反動減もあって、受注環境は厳しく、造船所では手持ち工事を取り崩す状況にある。また、船主側からの納期後倒し要請も伝えられ、こうした受注減に加え、艤装期間の長いLNG船、大型コンテナ船等の建造ウェイト上昇といった船種構成変化も相まって、起工量、鋼材消費量とも減少する見込みとなった。他方、輸出船契約の動向は、船体構造に係る規制が強化される2015年7月およびNOx排出規制が強化される2016年1月を前に駆け込み発注が見られ、多くの造船所が2018年頃まで手持ち工事を確保したが、2016年以降は低迷が続いている。

【自動車】 2016年の国内新車販売台数は、軽自動車の燃費不正問題の影響等が長引き、登録車のうち特に普通乗用車が新型車効果で増加したが、通年では微減となった¹⁰⁾。一方で、完成車輸出は中東・アフリカ向けが低迷しているものの、欧州、アジア向けの回復や、一部メーカーの国内拠点活用動きが下支えし、増加する見込みであり、この結果、完成車生産は増加、鋼材消費量は若干増加の見通しとなった。日本自動車工業会によると、2016年の四輪車の生産台数は9,204,590台で、前年の9,278,321台に比べて、73,731台、約0.8%の減少となった¹¹⁾。

【産業機械】 化学機械は老朽化設備の更新や性能向上に繋がる機械への需要、運搬機械はネット通販業者の伸長に伴う運搬機器関連の増加や物流設備の省エネ・省力化投資から増加する反面、排ガス規制強化による駆け込み需要後の反動減から、鋼材消費ウェイトの大きい建設機械をはじめ、内燃機関、農業機械、産業車両も減少基調を辿っている。また、ボイラー・原動機も、日本経済の景気回復の遅れ等から発電設備の設置を先送りする動きが見られ、金属加工・工作機械も不安定な為替の値動きや中国向けスマートフォン関連需要が期待外れとなり、産業機械全体では、前年度を下回ると見込まれた。2016年の産業機械の受注額は、民需、官公需等が増加したものの、外需が大幅に減少し、全体では前年比4.9%減となった。

【電気機械】 家電は省エネ・高付加価値製品に対する需要に支えられ底堅く推移したほか、民生用電子も自動車生産の持ち直しに伴いカーナビが堅調に推移したことから前年水準を維持した。一方で、重電関連は国内火力発電向けの発電機は堅調なもの、外需が弱含んでいることに加え、製造業の設

備投資の慎重化が下押し要因となった。通信関連は固定電話のIP網への移行に向けた局用交換機の更新が完了したことなどから減少となった。

このような鉄鋼の需要産業の動向に対して、本会維持会員企業においては2016年も後述の表9に詳細を示す通り、土木・建築分野、自動車分野を中心に新たな製品が開発された。

1.3 我が国の粗鋼生産状況

我が国の2016年（暦年）の粗鋼生産量は1億477万トンとなり、前年の1億513万トンに対して0.3%の減少となった。2008年のリーマンショック以降、2013年、2014年と1億1千万トンを超えていたが、2016年は1億トン台をキープしたものの、2年連続で前年を下回る結果となった。炉別生産では、転炉鋼が8,151万トン（前年比0.5%増）、電炉鋼が2,326万トン（前年比3.3%減）となり、電炉鋼比率は22.2%（前年比0.7ポイント低下）となった（図1）。また、鋼種別では、普通鋼が8,074万トン（前年比1.2%減）、特殊鋼が2,403万トン（前年比2.5%増）となった。

日本鉄鋼連盟では、2017年度の鉄鋼需要見通しを発表している。これによると内需は、東京五輪関連をはじめ都市再開発・交通インフラ整備の加速による建設投資の拡大が見込まれ、製造業においても省力化・省エネ投資は堅調が見込めるため、総じて前年を上回るとみられる。一方で、外需は世界経済が緩やかな回復傾向を辿るものの、中国の輸出増による世界的な需給緩和、通商問題の頻発が懸念されるため、鉄鋼輸出は前年度並みと想定されている。この結果、2017年度の粗鋼生産は、2016年度を上回る見通しであるが、世界的な政治リスク、急激な為替変動による外需の下振れリスク、原材料価格の上昇等に、留意が必要である¹²⁾。

1.4 世界の粗鋼生産状況

World Steel Association (WSA：世界鉄鋼協会)によると、世界の2016年（暦年）の粗鋼生産量は16億2,852万トンとなり、前年の16億1,537万トンに比べて0.8%の増加となった¹³⁾。世界の粗鋼生産量は、一昨年の2015年にこれまで増産を続けていた中国が前年よりも減少に転じたことにより、6年ぶりに前年より減少したが、2016年は再び増加に転じたことになった。主要国の粗鋼生産量をみると、トップ10の中では中国が再び増加に転じたこと、インドは継続的に増加傾向にあることが特徴である（表1）¹³⁾。一方で、主要66か国の2016年の平均操業率は69.3%であり¹³⁾、前年（2015年）の69.7%よりも0.4ポイント低下した。

中国の粗鋼生産量は対前年比率が増加に転じたが、これまでの年率10%を超えるような伸びはピークを迎え一段落してきた。中国政府は2016年初めに過剰生産能力に対する合

表1 粗鋼生産量のトップ10 (出所: WSA; 百万トン)¹³⁾

	2016年 トップ10	2013年	2014年	対前年伸び率 2014/2013(%)	2015年	対前年伸び率 2015/2014(%)	2016年	対前年伸び率 2016/2015(%)
1	中国	822.0	822.8	0.1	798.8	▲2.9	808.4	1.2
2	日本	110.6	110.7	0.1	105.1	▲5.1	104.8	▲0.3
3	インド	81.3	87.3	7.4	89.0	1.9	95.6	7.4
4	アメリカ	86.9	88.2	1.5	78.8	▲10.7	78.6	▲0.3
5	ロシア	69.0	71.5	3.6	70.9	▲0.8	70.8	▲0.1
6	韓国	66.1	71.5	8.2	69.7	▲2.5	68.6	▲1.6
7	ドイツ	42.6	42.9	0.7	42.7	▲0.5	42.1	▲1.4
8	トルコ	34.7	34.0	▲2.0	31.5	▲7.4	33.2	5.4
9	ブラジル	34.2	33.9	▲0.9	33.3	▲1.8	30.2	▲9.3
10	ウクライナ	32.8	27.2	▲17.1	23.0	▲15.4	24.2	5.2
	世界合計	1650.4	1669.9	1.2	1615.4	▲3.3	1628.5	0.8

理化計画を表明し、この方針に沿って、国有大手の宝钢集団（上海市）と武漢鋼鉄集団（武漢市）が再編協議を行い、12月には中国宝钢鉄集団として設立大会が行われた。まさに、中国鉄鋼業界の大型再編の動きが本格化してきたといえる。

インドは2016年も年率7%を超える高い前年比率で粗鋼生産量を伸ばした。今後も想定される人口の増加、それに伴う重工業向けや建設市場向け等の社会インフラ、自動車産業、電気機器産業等の鋼材需要が続伸することが予想されるので、今後も引き続き粗鋼生産量の伸びが続くものと予想されている。

2 技術と設備

2.1 日本鉄鋼業の技術的環境

昨年（2016年）は上工程での設備集約並びに集約計画の発表が相次いでおり、鉄鋼各社は最適生産体制を構築し生産性の向上と競争力の強化を進めている。新日鐵住金は、君津第3高炉を休止（2016年）した他、八幡製鉄所の鉄源工程の最適体制構築計画の方針変更を発表した。戸畑地区の新ブルームCC設置（2018年度末目途）、小倉第2高炉休止（2020年度末目途）、小倉地区製鋼工場（精錬・CC）休止（2020年度末目途）、戸畑地区CC1基休止（2020年度末目途）を行い、棒線品種並びに軌条品種の生産性向上と商品対応力強化を狙っている。また、(株)神戸製鋼所は鋼材事業の構造改革の一環として、2017年度を目途に、神戸製鉄所の上工程設備を加古川製鉄所に集約することを2013年に発表した。加古川製鉄所にブルーム連続铸造設備と溶鋼処理設備を新設し、加古川第2分塊工場の能力増強投資を実施したうえで、神戸製鉄所の高炉をはじめとする上工程設備を休止する計画が立てられた。このうち、機械攪拌式脱硫設備2基と脱りん炉は2014年4月に稼働開始し、2016年度には2基目の脱りん炉の建設も進められ2017年度には営業運転する予定である。これにより、上工程の余剰設備能力の解消と、コスト競争力強化を狙っている。

さらに、新日鐵住金と日新製鋼は、2017年3月を目途に新日鐵住金が日新製鋼を子会社化すること、およびこれを前提に、日新製鋼が呉製鉄所第2高炉休止による鉄源合理化を含む構造対策を検討し、その代替鉄源として新日鐵住金が日新製鋼に継続的に鋼片を供給することについて検討を開始することを2016年2月に発表した。

一方で日本鉄鋼各社は古い設備の保全並びに維持管理によるトラブルの未然防止や稼働率の向上に取り組んでいる。コークス炉の老朽化対策として従来炉の基礎部を流用するパドアップ工法による改修や新設が進められており、2016年に新日鐵住金では3件、JFEスチール（株）で1件の工事が完了した。

2015年に経済産業省では、金属素材産業の競争力強化を図るための方策として「金属素材競争力強化プラン」を取りまとめ、I. 技術開発戦略、II. 国内製造基盤強化戦略、III. グローバル戦略の3つの戦略が示された¹⁴⁾。この中で、金属素材産業が直面する課題として、i) ユーザーからの素材に対するニーズの高度化と多様化、ii) 海外競合者のキャッチアップ、iii) 国内需要の減少やエネルギー・環境制約、人と設備の制約等、iv) デジタル化が及ぼす変革インパクト、を掲げた。Iの技術開発の方向性としては、材料設計技術の開発、製造技術の開発、分析・評価技術の開発、人材育成、デジタルデータを用いた予防保全、資源・エネルギーの有効活用技術の開発、環境への負荷を考慮した素材開発、が示された。IIの国内製造基盤強化としては、産業事故の防止、事業再編による競争力強化、エネルギー・環境問題への対応、デジタル化が及ぼす変革への対応、等が示され、IIIのグローバル戦略の一つとして、原材料供給リスクへの対応としてリサイクルを含めた資源循環が挙げられた。

我が国の鉄鋼産業は、異なる素材との組み合わせによる新しい価値の追求等、素材間協調にも配慮しつつ、素材間競争が進む中、例えば加工性の高い超高張力鋼の開発等、ユーザーニーズに答える製品開発を粛々と進め一層激化する国際

競争に打ち勝つべく産学官が連携して技術レベルの向上に努めている。以下には、鉄鋼技術の分野別に主要な技術動向や維持会員企業の技術的なトピックスを紹介する。

2.2 製鉄

2016暦年の鉄鉄生産量は8,019万トンであり、2015年の8,101万トンと比べ減少した¹⁵⁾。2016年末の高炉稼働状況については、新日鐵住金は君津第3高炉(内容積4,822m³)を3月12日休止したため、26基となった。神戸製鋼所は、加古川第3高炉を9月25日から12月23日の工期にて改修し、内容積を4,500m³から4,844m³に増加した。内容積5,000m³以上の高炉は14基で変化はなかった。平均出銑比は2015年の1.86トン/m³・日に対して、1.92トン/m³・日と増加した。

近年の製鉄分野では、コークス炉の改修と高炉休止の動きが注目される。老朽化したコークス炉の改修は逐次進捗している。新日鐵住金が鹿島第1コークス炉F炉団増設、第2コークス炉E炉団増設、君津第4コークス炉A炉団、B炉団改修につづいて2016年には第5コークス炉の改修に着手した¹⁶⁾。JFEスチールは、西日本製鉄所倉敷地区の第6コークス炉B炉団増設、第1コークス炉A炉団、第3コークス炉A・B炉団、第2コークス炉A・B炉団、千葉地区の第6コークスA炉団の改修に続いて第6コークスB炉団改修に着手した¹⁷⁾。一方、製鉄工程のコスト競争力向上のために高炉の休止が進行している。新日鐵住金が2016年に君津第3高炉を休止し、君津製鉄所は高炉2本の生産体制となった¹⁶⁾。2017年に神戸製鋼所が神戸第3高炉を休止する予定である¹⁸⁾。日新製鋼は呉第2高炉の2019年以降の休止を予定し、呉製鉄所の高炉1本による生産体制とすると発表した¹⁹⁾。2020年には新日鐵住金の小倉第2高炉を休止するとの発表があった¹⁶⁾。比較的内容積の小さな高炉が停止し、高炉の稼働本数が減少するものの、1本当たりの平均内容積は増加する予定となっている。

焼結機の改修、新設の動きはなかったものの、JFEスチー

ルは、焼結機の点火炉に用いる高効率ジェットバーナーを開発し、2015年11月から西日本製鉄所倉敷地区の焼結機に導入した。このバーナー導入により従来に比べて燃料ガス使用量を30%低減し、年間2,100tのCO₂排出量を削減した。

2.3 製鋼

2016暦年の粗鋼生産は、1億477万トンであり、2015年の1億513万トンと比べ減少した(図1)。圧延用鋼塊に占める連铸鋼片の比率を図3に示す¹⁵⁾。特殊鋼の連铸比率は、95.2%であり、前年の94.9%と比べて微増した。

電気炉操業コストの低減を図る目的で、愛知製鋼(株)は、電気炉の排熱を蒸気回収し、一部を発電設備に供給する設備の建設に着手した²⁰⁾。中山鋼業(株)は、電気炉排ガスの廃熱をスクラップ予熱に利用する「次世代環境対応型高効率アーク炉」の導入を決定した。JFE条鋼(株)姫路製造所などに導入された「環境対応型高効率アーク炉(従来炉)」を改善したもので、既存設備の利用範囲を広げ初期投資、コストの抑制、工期の短縮を図りながら、従来炉と同等の省エネ効果を実現するものである。また、従来炉はすべて交流式アーク炉であったが、直流アーク炉へ初めて適用する事例である²¹⁾。

製鋼工程におけるコスト競争力改善の取り組みの一環として設備集約が進んでいる。2016年3月に共英製鋼(株)が圧延用鋼塊のピレットを製造していた枚方事業所大阪工場を閉鎖した²²⁾。同3月には大阪製鐵(株)が恩加島工場の製鋼工程を休止し、堺工場に集約した²³⁾。新日鐵住金の八幡製鐵所は戸畑地区にブルーム連铸機を新設し2019年の稼働を見込み、2021年には小倉地区の製鋼工場を休止すると発表した¹⁶⁾。神戸製鋼所は、上工程集約のため2017年に神戸製鐵所の製鋼工場を休止する予定であり、加古川製鐵所に第6連铸設備、溶鋼処理、脱りん処理設備を建設中である¹⁸⁾。これらの工場は、製鋼工程を停止後、他所が製造する圧延用鋼塊を圧延工程に供給し最終製品を製造する予定である。

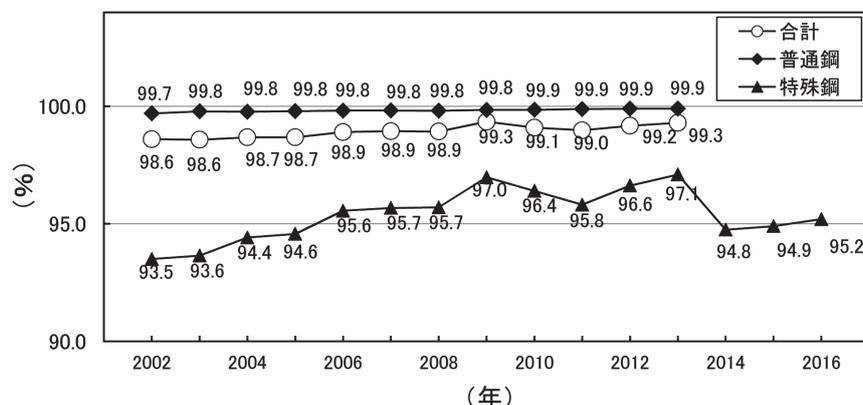


図3 圧延用鋼塊に占める連铸鋼片の比率¹⁵⁾

2.4 鋼材

2.4.1 薄板

新日鐵住金は、排気ガasket用高機能ステンレスばね鋼板の実用化をした。これは、高温化する自動車排気系で使用されるガasket用に600°C程度まで実用強度を維持できる高耐熱性のステンレスばね鋼板を開発・実用化したものである。この開発に対して、2016年11月に日本ばね学会より技術賞が授与された。

JFEスチールは、1,470MPa級超高強度冷延鋼板を開発し、バンパーレインフォースメント用として採用された。冷間加工による自動車構造用部品の強度としては、世界最高強度レベルとなる。JFEスチール独自の水焼入れ(WQ)方式の連続焼鈍プロセスの極めて高い冷却速度(1000°C/sec以上)を活用して、遅れ破壊に悪影響を及ぼす合金添加元素を極限まで低減することで、1,470MPa級の高い強度と耐遅れ破壊特性を両立させた。

東洋鋼板(株)は、ステンレス基材上にAuやPt、Pdなどの貴金属を無電解めっきする際の表面改質技術を開発し、高被覆、かつ極薄のめっき皮膜形成を可能とした。この技術は、ステンレス基材上に貴金属を無電解めっきする前に、表面改質を行い、①不活性なCr酸化物の除去、②活性な金属結合状態を有するFe基、Ni基が濃化した表層を発現することにより、置換めっきが容易に進行しやすくなり、膜厚が極めて薄い領域においても被覆率の高いめっきを達成するものである。

また日本冶金工業(株)は、高ニッケル合金の広巾コイルの製造を可能とした。過酷な腐食環境下で使用される高ニッケル合金は溶接作業の効率化のため広巾コイルのニーズが高い。しかし高温強度が非常に高いため、熱延ミルでは1メートル巾コイル製造が限界であった。日本冶金工業では開発技術を組み込み、熱延時の圧力負荷を軽減し4フィート巾化に成功した。

2.4.2 厚板

新日鐵住金は、塗装の塗替周期延長を可能にする新たな耐食鋼を開発した。鋼材に添加した微量スズ(Sn)の効果により、同じ塗装条件・使用環境下で塗膜欠陥部における鋼材腐食量や塗膜剥離面積が、従来鋼に比べ大幅に抑制し、ライフサイクルコスト(LCC)縮減を実現する。

JFEスチールは、衝突時の安全性を高める船舶用高強度高延性厚鋼板を開発した。この鋼板は、マイクロ組織を最適に制御することで、従来鋼と同等の溶接施工性を維持しつつ、同一強度の従来鋼と比べ高い伸び特性を有し、船舶の衝突時に破断までの吸収エネルギーを、従来鋼に比べ2割以上向上させる。さらにJFEスチールは、大入熱溶接施工対応

TMCP型中厚YP460MPa級厚鋼板を開発した。この鋼板は、高能率の各種大入熱溶接施工に対応し、溶接熱影響部の強度および靱性が確保できる。

日本冶金工業は、スーパー二相厚板形状のNORSOK認証範囲を拡大した。2015年に汎用二相、スーパー二相、スーパーオーステナイトステンレス鋼の厚板・熱帯形状でNORSOK規格認証を取得し、2016年にはスーパー二相の認証範囲を拡大、つまりS32750の厚板形状の板厚範囲を31mm以下から40mm以下に拡大し、新規鋼種としてS32760の厚板形状で認証を取得した。石油・ガス分野への適用拡大が期待できる。

2.5 システム

海外を中心に、鉄鋼企業が製品出荷時に提供するミルシートが何者かにより偽造され、顧客から問い合わせを受けるケースが多くなっている。JFEスチールは、鉄鋼製品向けミルシート偽造判定システムを稼働させた。このシステムは、偽造防止用紙に印字されたマトリックス型二次元コードをスマートフォンで読み込むことにより正規ミルシート内容を参照することができ、その画面から直接問い合わせもできるシステムで、2016年3月から知多製造所で製造された鋼管のミルシートに導入された。

また、JFEスチールは外航船による鋼材輸送における配船費用処理システムを2015年12月に稼働させた。外航船の鋼材輸送においては期間や数量などの条件が変更になるケースが多発し、書面にて事後清算していたが、インターネットを介してクラウドサービスを活用することにより商社や船会社を含む社内外の関係者がリアルタイムに費用処理を行うことができるシステムを構築し、処理にかかる期間を半減した。

2.6 環境・エネルギー

2.6.1 政府の取組み

2016年11月7日から18日まで、モロッコのマラケシュにおいて、国連気候変動枠組条約第22回締約国会議(COP22)、京都議定書第12回締約国会合(CMP12)等が行われた。また、11月4日にパリ協定が発効したことを受けて、15日から18日までパリ協定第1回締約国会合(CMA1)が行われた²⁴⁾。

今回のCOP22を通じて、(i)包摂性に基づく意思決定の確保、(ii)パリ協定の実施指針をめぐる議論の推進、(iii)日本の気候変動分野での国際協力についての発信、の日本の主な3点の目標はおおむね達成できたと評価される。また、パリ協定の早期発効およびCMA1の開催を歓迎するとともに、全ての国が関与する形で今後も交渉が行われることとなったことが高く評価される。実施指針等に関する議論を促進する観点から、採択の期限が2018年に決まったことも重要な成

果である。ただし、一部途上国より、先進国のみの取組を求めるべきとのパリ協定採択以前の主張が繰り返されたこと等により、今次会合においては主張の違いが明確になったことから、今後どのように建設的かつ速やかに議論を進めていくかが課題となる²⁴⁾。

2.6.2 日本鉄鋼業の取組み

日本鉄鋼連盟は、京都議定書第一約束期間に実施した「自主行動計画」に続き、現在、2020年度をターゲットとした低炭素社会実行計画フェーズⅠを推進している。また、2014年11月には、我が国の約束草案(2030年度目標)の策定に先駆け、2030年度をターゲットとする低炭素社会実行計画フェーズⅡを策定した。これらの自主的な取組みの基本コンセプトは、「エコプロセス」、「エコプロダクト」、「エコソリューション」の3つのエコと「革新的技術開発」の4本柱である²⁵⁾。

エコプロセスは鉄鋼生産プロセスにおける省エネ/CO₂削減努力を目指すものであり、エコプロダクトは高機能鋼材の供給による製品の使用段階での削減に貢献するもの、そしてエコソリューションは日本鉄鋼業が開発・実用化した省エネ技術の移転普及による地球規模での削減に貢献するものである。革新的技術開発としては、革新的製鉄プロセスの開発(COURSE50)と革新的製鉄プロセスの開発(フェロコークス)に主に取り組んでいる。表2に低炭素実行計画の目標を示す²⁵⁾。

COURSE50事業は2008年度から取り組んでいるが、フェーズⅠSTEP1(2008-2012年度)では主に水素による鉄鉱石還元と高炉ガスからのCO₂分離回収等の要素技術開発を行った。主な成果として、水素還元によるCO₂低減効果(-3%)を確認した。さらにCO₂分離回収の所要エネルギー量を2GJ/トン-CO₂まで半減する技術を開発した²⁶⁾。続いて2013年度から5年間の予定でフェーズⅠSTEP2が開始され

た。STEP2では各要素技術を統合したパイロットレベルの総合実証試験を行い、実証規模試験を行うフェーズⅡにつなげていくため、a) 高炉からのCO₂排出削減技術として、12m³の試験高炉により高炉からのCO₂排出量を削減する技術を確立すること、b) 高炉ガスからのCO₂分離回収技術として、高炉ガスからのCO₂分離回収コスト2,000円/トン-CO₂を可能とする技術を確立することを目標としている²⁷⁾。

12m³試験高炉を新日鐵住金君津製鐵所に建設し、2015年12月に熱間試運転にて初出銑を行なった。2016年7月には約3週間の第1回の試験操業を実施し、8月下旬から解体調査を実施した。水素還元によるCO₂排出の1割削減の目標に対して、目標は未達ではあるがほぼ当初の期待通りに炭素投入量を減少させることが確認された。さらに高炉内部の数学モデルによる3D数値シミュレーション結果と試験高炉の操業結果がほぼ合致し、シミュレーションの精度の高さが確認された²⁸⁾。

フェロコークス事業は、2006年度から3年間、経済産業省の産学共同プロジェクト「革新的製鉄プロセスの先導的研究」で推進され、さらに2009年度から4年間(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)・経済産業省の「資源対応力強化のための革新的製鉄プロセス技術開発」プロジェクトとして実施された。このプロジェクトは2012年度で一時的に終了したが、製造能力300トン/日規模のフェロコークス製造の実証プラントを建設し、長期操業技術の確立と製鉄工程における省エネルギー効果の確認を目的としたプロジェクトを推進することが2016年に決められた。2017年度から5年間の予定で「環境調和型製鉄プロセス技術の開発(フェロコークス活用製鉄プロセス技術)」の公募がNEDOから予告された。

フェロコークスとは、低品位の石炭と鉄鉱石を原料とし、成型、乾留により、微細な金属粉を内包した高反応性の成型

表2 日本鉄鋼連盟の低炭素社会実行計画の目標²⁵⁾

		フェーズⅠ	フェーズⅡ
エコプロセス		BAU※1比500万t-CO ₂ の削減目標	BAU※1比900万t-CO ₂ の削減目標
エコプロダクト		約3,400万t-CO ₂ の削減貢献(推定)	約4,200万t-CO ₂ の削減貢献(推定)
エコソリューション		約7,000万t-CO ₂ の削減貢献(推定)	約8,000万t-CO ₂ の削減貢献(推定)
革新的技術開発	革新的製鉄プロセスの開発(COURSE50)	水素による鉄鉱石の還元と高炉ガスからのCO ₂ 分離回収により、生産工程におけるCO ₂ 排出量を約30%削減。2030年頃までに1号機の実機化※2、高炉関連設備の更新タイミングを踏まえ、2050年頃までに普及を目指す。	
	革新的製鉄プロセスの開発(フェロコークス)	高炉内還元反応の高速化・低温化機能を発揮するフェロコークス及びその操業プロセスを開発し、製鉄プロセスの省エネルギーと低品位原料利用拡大の両立を目指す革新的技術開発を行う。	

※1 : BAUとは、Business as usualの略称であり、本目標では、2005年度を基準としてそれぞれの粗鋼生産量において想定されるCO₂排出量を意味する。

※2 : CO₂貯留に関するインフラ整備と実機化に向けて経済合理性が確保されることが前提。

コークスである。金属鉄が高炉での還元反応速度を速めるため、従来に比べ少ないコークス量（炭素量）で酸化鉄を還元できる。CO₂排出量削減と省エネルギーを図ることができ、現行高炉操業に対して最大約10%の省エネルギーおよび約20%の高品位炭使用量削減を目標としている。

2009年度開始のプロジェクトでは、主にJFEスチール東日本製鉄所（京浜地区）に設置した30トン/日規模の製造設備で製造した2,100トンのフェロコークスを用いて、2012年度にJFEスチール東日本製鉄所（千葉地区）第6高炉にて5日間の使用試験を実施し、コークス使用量の約10%をフェロコークスに置き換え高炉操業における影響を評価した。高炉への装入方法の適正化等により操業への悪影響もなく、還元材比、コークス比が計画通り低下することを実証した²⁹⁾。

個別鉄鋼企業の取り組みとしては、JFEスチールが焼結鉄の製造工程において焼結原料に点火するための高効率バーナの開発を行った。このバーナは、二つのバーナを組み合わせることにより火炎の安定化と高速化を同時に達成し、加熱面での熱伝達の促進により高いエネルギー効率を得ることができる。JFEスチールはこの技術を2015年11月に西日本製鉄所倉敷地区の焼結工場に導入し、従来に比べて燃焼ガス使用量の約30%の低減と、年間約2,100トンのCO₂削減に寄与した。なお、この技術開発は平成28年度の地球温暖化環境大臣表彰を受賞した。

また、大同特殊鋼（株）は、熱処理用の焼鈍炉などの間接加熱に用いる省エネ型燃焼システムを開発した。本システムはラジアントチューブバーナにおいて、チューブ排気側に新たに開発した高輻射材と高効率熱交換器を設置し、排ガス顕熱を効率的にチューブ側に輻射伝達するとともに、排ガスと燃焼空気の熱交換により排ガス顕熱の回収を効率的に行うものである。これらの高輻射材と高効率熱交換器の素材は熱伝導率が高く熱衝撃に強い炭化けい素を採用し、さらに熱交換器は、3Dプリント技術の採用により従来は製造困難であった複雑形状の広い熱交換面積を有している。その結果、リジネレイティブバーナに肉薄する省エネ性能を達成し、同社の従来システムと比較して燃料ガス原単位10.2%減の省エネ効果を確認した。

2.7 建築・土木

新日鐵住金は、従来の鋼管杭の現場溶接に対して短時間接合が可能な機械式継手を開発した。継手の構造に4段のギア構造を採用することでコンパクト化、軽量化を達成した。適用範囲は、鋼管径400～1600mm、鋼種SKK400、SKK490に加えて570MPa級の鋼管に対応する。2016年2月に（一財）土木研究センターの建設技術審査証明を取得し、同年8月に八幡製鉄所内の工事に初適用した。

JFEスチールは、建築構造用低降伏点鋼材を地震エネルギーを吸収する鋼板パネルとして用い、巨大地震や長周期地震動に対する超高層建築をはじめとする建築物の被害を抑制できる建築構造用制震デバイスを開発し、（一社）日本建築センターの評定を取得した。また建築向けの冷間ロール成形角形鋼管に対する耐火被覆（吹付けロックウール）を40%以上削減して、国土交通大臣より耐火構造の認定を取得した。

また土木向け製品として、JFEスチールは（株）大林組およびジェコス（株）の3社と共同で、地下壁の施工に際し仮設土留め壁として利用した特殊な鋼矢板と鉄筋コンクリートを一体化させて本設の合成地下壁を構築する工法を開発し、（一財）国土技術研究センター（JICE）より建設技術審査証明を取得した。これは、T形鋼および定着用鉄筋をハット形鋼矢板にあらかじめ溶接した合成構造用鋼矢板を用いることで、鋼矢板と鉄筋コンクリートとの接合強度を高めたもので、壁厚を縮小できるというメリットなどがある。さらにJFEスチールは、土木向けに鋼製リングを2重構造として現地で組み立てた後、鋼製リング間にコンクリートを充填する大口径合成構造ケーソン工法を開発した。

3 技術貿易・技術開発

3.1 技術貿易

図4に鉄鋼業の2015年度までの技術貿易収支の推移を示す³⁰⁾。技術輸出対価受け取り額は前年度と比較して13%増加し、技術輸入対価支払い額は約4倍に増加した。

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」の結果の概要にある統計表の第3表 企業における研究活動にあるデータを用いて、

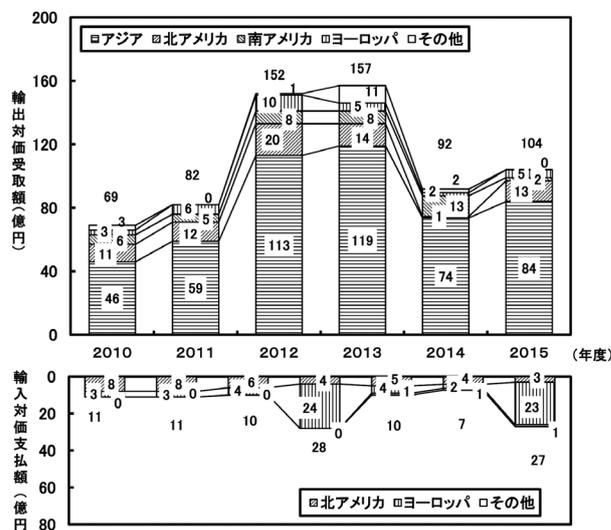


図4 鉄鋼業の技術貿易収支³⁰⁾

以下の3項目を整理した。その結果を図5～図7に示す³¹⁾。

[売上高対研究費支出比率] 全産業はここ5～6年横ばいが続いていたが、2015年度は過去20年で最高の水準まで増加し、鉄鋼業も2002年度のレベルまで増加している。

[従業員1万人あたりの研究本務者数] 全産業は2013年度までの増加傾向から転じ、ここ2年は微減傾向であり、鉄鋼業は2011年度まで増加傾向で最高値を示したが、2012年度以降落ち込み状態が続いている。

[研究本務者1人あたりの研究費] 2015年度は、全産業では2004年度の底から1999年度レベルまで増加している。また、鉄鋼業ではリーマンショックによる落ち込みから毎年順調に増加し、2007年度レベルまで回復した。

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、NEDOの「次世代10MW級海洋温度差発電プラントのコア技術研究開発」が2015年度で終了したが、2016年度に新たに経済産業省の「超先端材料超高速開発基盤技術プロジェクト」(2016～2020年度、2016年度19.5億円、委託先NEDO)がスタートした。本

事業の狙いは、主に有機系材料を対象とした従来に無い材料設計シミュレーションの開発や人工知能を活用した材料開発支援等を、革新的な試作プロセス開発や評価計測技術開発と共に行うことで、これまで“経験と勘”に基づいた材料開発文化に変革の兆しを誘発すると共に、競争力の高い日本の素材産業の優位性を確保することである。

主要継続プロジェクトは、①文部科学省の「ヘテロ構造制御金属材料プロジェクト」(2010～2019年度、委託先：(国研)科学技術振興機構(JST))、②経済産業省の「環境調和型製鉄プロセス技術開発(COURSE 50) Step2」(2013～2017年度、委託先：NEDO)、③経済産業省の「革新的新構造材料等技術開発」(2014～2022年度、2016年度予算：43.5億円)、④内閣府の「戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)」の「革新的構造材料」(2014～2018年度、委託先：JST)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・技術開発テーマの主なものを表3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 技術系人材育成

本会では、業界横断的な人材育成を目的として、企業人材育成事業(鉄鋼工学セミナー、鉄鋼工学セミナー専科、鉄鋼工学アドバンスセミナー)および学生人材育成事業を継続して実施してきている。

学生人材育成については従来行ってきた「学生鉄鋼セミナー」に加え、2011年度より産学人材育成パートナーシップ事業を継承し、修士学生対象である「鉄鋼工学概論セミナー」、学部学生対象である「最先端鉄鋼体験セミナー」を実施している。「鉄鋼工学概論セミナー」は、鉄鋼基礎工学と現場での技術開発について大学および企業側講師から講義を行い、最終日に工場見学(2016年度はJFEスチール東日本製鉄

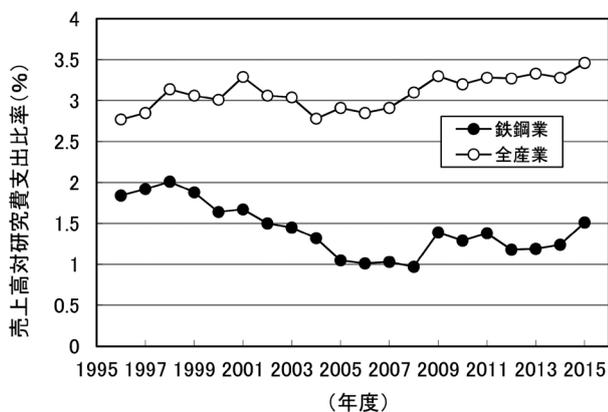


図5 売上高対研究費支出比率の経年変化³¹⁾

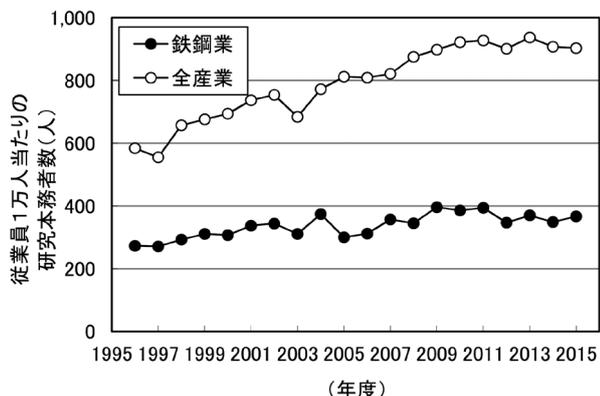


図6 従業員1万人当たりの研究本務者数の経年変化(人)³¹⁾

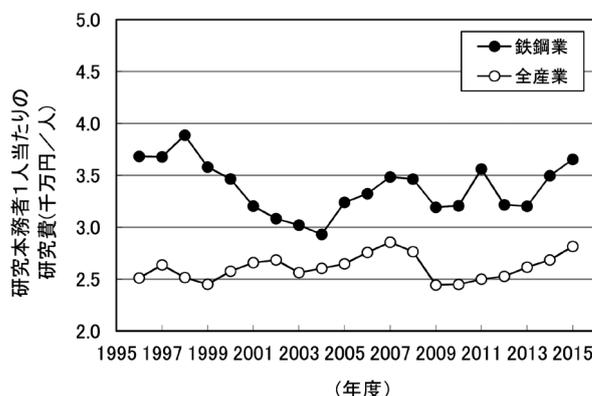


図7 研究本務者1人当たりの研究費の経年変化(万円/人)³¹⁾

所千葉地区)を行う3.5日コースの講座で、15大学から26名の参加者があった。「最先端鉄鋼体験セミナー」は鉄鋼に関する最先端技術や将来の展望を紹介し、工場見学を行う1日コースの講座であり、新日鐵住金鹿島製鐵所、JFEスチール西日本製鐵所福山地区、神戸製鋼所加古川製鐵所の3箇所で開催され、トータル73名が参加した。

その他、鉄鋼企業の経営幹部による「経営トップによる大学特別講義」を10大学で、経産省または企業講師による「鉄鋼技術特別講義」を15大学で実施し、トータル約1,800名の学生が聴講した。また、大学が企画する製鐵所見学のバス代を補助する事業も実施している。

5 本会における技術創出活動

本会では、生産技術部門に属する技術部会および技術検討部会が中心となって鉄鋼生産技術に関する技術情報の調査、技術開発課題の抽出と課題解決に向けた活動を行っている(表4)。

5.1 技術部会

鉄鋼製造にかかわる特定分野毎の活動を推進している技術部会は、部会大会を定期的で開催し、現時点で重要な課題

を共通・重点テーマとして活発な議論を行っている(表4)。2016年度は、2015年度同様35の部会大会(春季17大会、秋季18大会)が開催された。参加者延べ人数は2,798名(そのうち大学等研究者の延べ参加人数は66名、2015度から5名減)であり、2015年度の2,744名から約50名増加した。

また、学術部会との連携も定着しており、部会大会や若手育成のための企画への大学研究者の参加、学術部会との合同企画等、交流が推進されている。さらに部会によっては、国際会議への参加や海外技術の調査および工場等の見学、海外からの訪問団受入れ等を行い、国際交流活動も増えつつある。部会毎の特定技術課題を共同で重点的に検討する技術検討会については、19テーマで活動した。従来から継続している若手技術者対象の講演会や異業種見学・講演会等についても、新たに企画する部会が増える傾向にある。

5.2 技術検討部会

分野横断的、業際技術課題を検討する技術検討部会は、原則として期間を3年以内として活動している(表4)。2016年度は、新たに「一貫製造プロセス造り込みによる実用構造用鋼の極限特性追求実用構造用鋼における信頼性向上」技術検討部会が活動を開始した。

表3 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	委託先	開始年度	終了年度
プロセス	環境調和型製鉄プロセス技術開発(COURSE50) Step2	(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構	2013	2017
	戦略的エネルギー技術革新プログラム	(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構	2014	2016
要素技術	先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発費補助金	経済産業省	2008	2016
	ヘテロ構造制御金属材料プロジェクト	(独)科学技術振興機構	2010	2019
	元素戦略プロジェクト<研究拠点形成型> 構造材料	文部科学省	2012	2021
	ゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクト	(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構	2014	2017
	戦略的イノベーション創造プログラム(SIP) 革新的構造材料	内閣府	2014	2018
製品	先進超々臨界圧プラント(A-USC)技術開発	経済産業省	2008	2016
	次世代自動車向け高効率モーター用磁性材料開発	経済産業省	2012	2016
	革新的新構造材料等技術開発	経済産業省	2013	2022
	水素利用技術研究開発事業	(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構	2013	2017
その他	次世代3D積層造形技術総合開発	経済産業省	2014	2018
	超先端材料超高速開発基盤技術プロジェクト	(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構	2016	2020

表4 生産技術部門における技術創出活動の主体

種類	活動内容
技術部会	<ul style="list-style-type: none"> 対象：鉄鋼製造全般にかかわる特定分野 部会種類：製鉄、コークス、製鋼、電気炉、特殊鋼、耐火物、厚板、熱延鋼板、冷延、表面処理鋼板、大形、棒線圧延、鋼管、圧延理論、熱経済技術、制御技術、設備技術、品質管理、分析技術、以上19部会 参加者：鉄鋼企業の技術者、研究者、大学等教職員 活動目的：現場技術水準の向上を目的とした鉄鋼生産に関する技術交流、各分野における技術課題の抽出と課題解決、若手技術者の育成、産学連携による技術向上、海外との技術交流 活動：部会大会(年1~2回)、特定テーマを扱う技術検討会、若手育成のための講習会等各種企画、等
技術検討部会	<ul style="list-style-type: none"> 対象：鉄鋼生産プロセスの各分野にまたがる分野横断的、または業際技術課題 部会種類：自動車用材料検討部会(第VII期)、一貫製造プロセス造り込みによる実用構造用鋼の極限特性追求実用構造用鋼における信頼性向上技術検討部会、压力容器用材料技術検討部会、以上3部会 活動内容：技術の方向と課題解決のための技術討議、調査等の研究、他学協会との情報交流、等

表5 日本鉄鋼協会の研究助成制度

種類	活動内容
鉄鋼研究振興助成	<ul style="list-style-type: none"> ・主旨：鉄鋼研究の活性化、鉄鋼の基礎的基盤的研究の支援、若手研究者の育成 ・募集：公募により毎年採択、受給期間は2年間。 ・特徴：研究者個人を対象、若手枠を設置 ・件数：72件(2016年度受給者数)
研究会	<ul style="list-style-type: none"> ・主旨：鉄鋼研究の活性化、技術革新の基盤創生、産学連携による人的研究ネットワーク構築 ・募集：提案、公募により毎年度採択、活動期間は原則として3年間 ・特徴：大学等研究機関からのシーズ主導の基礎的・先端的テーマを扱う「研究会Ⅰ」と鉄鋼企業からのニーズ主導の応用的・産業的テーマを扱う「研究会Ⅱ」を設置 ・件数：21件(2016年12月末現在活動中)
鉄鋼協会研究プロジェクト (旧産発プロジェクト展開 鉄鋼研究から名称変更)	<ul style="list-style-type: none"> ・主旨：鉄鋼業の技術課題の解決、重要かつ基盤的領域の研究、国家プロジェクト等への展開 ・募集：公募により採択、活動期間は原則として3年間 ・特徴：鉄鋼企業からのニーズ主体のプロジェクト ・件数：1件(2016年12月末現在活動中)

表6 2016年度活動 研究会

型	研究会名	所属部会等	主査	研究期間
I	固液共存体の挙動制御によるマクロ偏析低減	高プロ	大野 宗一(北大)	2014~2016年度
I	熱間圧延ロール	創形	小森 和武(大同大)	2014~2016年度
I	鉄鋼インフォーマティクス	材料/創形	足立 吉隆(鹿児島大)	2014~2016年度
I	小型中性子源による鉄鋼組織解析法	評価分析	大竹 淑恵(理研)	2014~2016年度
II	円周ガイド波による配管減肉検出技術Ⅱ	設備技術	西野 秀郎(徳島大)	2014~2016年度
II	鉄鋼スラグ中フリーMgO分析法の開発と標準化	分析技術	洪川 雅美(埼玉大)	2014~2016年度
II	スケールの伝熱特性支配因子調査	圧延理論	須佐 匡裕(東工大)	2014~2016年度
I	高度循環製鉄に向けた鋼中遷移金属・循環元素の熱力学	高プロ	小野 英樹(阪大)	2015~2017年度
I	スマート製鉄システム	環境/高プロ	加藤 之貴(東工大)	2015~2017年度
I	先進的多軸応力試験による鋼板成形の高度化	創形	桑原 利彦(農工大)	2015~2017年度
I	鉄系金属ガラスの粘性流動成形技術開発	創形	川崎 亮(東北大)	2015~2017年度
I	水素脆化の基本要因と特性評価	材料/評価分析	高井 健一(上智大)	2015~2017年度
II	新規コークス製造プロセス要素技術	コークス	青木 秀之(東北大)	2015~2017年度
I	通気性確保に向けた高炉内融着現象の制御	高プロ	桒上 洋(東北大)	2016~2018年度
I	適応的エリアセンシング手法を用いた知能化設備異常診断	計測	玉置 久(神戸大)	2016~2018年度
I	溶鋼リアルタイム分析	評価分析	出口 祥啓(徳島大)	2016~2018年度
I	鉄鋼中の軽元素と材料組織および特性	材料/評価分析	沼倉 宏(大阪府立大)	2016~2018年度
I	未利用熱エネルギー有効活用	環境	沖中 憲之(北大)	2016~2018年度
II	アルカリ溶出抑制のための製鋼スラグ凝固組織制御	スラグ技術検討WG	柴田 浩幸(東北大)	2016~2018年度
II	鉄鋼材料の土壤腐食機構の解明	建設用鋼材利用検討WG	西方 篤(東工大)	2016~2018年度
II	高機能溶融亜鉛めっき皮膜創成とナノ解析	表面処理鋼板	貝沼 亮介(東北大)	2016~2018年度

「自動車用材料検討部会」では、自動車メーカーとの新たな協力関係のあり方を模索しつつ、見学会、(公社)自動車技術会への話題提供等を行った。

また、「压力容器用材料技術検討部会」では、2015年度に引き続き、鋼材規格検討WG、化学プラント用鋼材の水素脆化評価WG、高強度耐熱鋼WGがそれぞれ調査検討、実験等の活動を行い、高強度耐熱鋼WGは報告書を取りまとめた。

5.3 研究助成

本会の研究助成に関する活動内容を表5に示す。「鉄鋼研究振興助成」では、2016年度から受給開始となる対象者とし

て新たに36件(若手11件)が採択され、2015年度から開始した36件と合わせて2016年度は合計72件が受給テーマに基づく活動を実施した。

「研究会」は、2016年度には21研究会が活動し、その内の7研究会が同年度に終了した。2016年度には、研究会Ⅰ(シーズ型)、研究会Ⅱ(ニーズ型)の各研究会で、8件が新規に活動を開始した(表6)。2017年度は新たに研究会Ⅰが5件、研究会Ⅱが2件採択された(表7)。「鉄鋼協会研究プロジェクト」としての採択は、2016年度は無かった。産発プロジェクト展開鉄鋼研究として2015年度採択の1テーマが活動中である(表8)。

表7 2017年度採択 研究会

型	研究会名	所属部会等	主査	研究期間
I	スラグ・介在物制御による高純度クロム鋼溶製	高プロ	三木 貴博(東北大)	2017～2019年度
I	革新的LCAによる鉄鋼材料の社会的価値の見える化	環境	醍醐 市朗(東大)	2017～2019年度
I	鋼板のテンションレベラモデリング高度化	創形	濱崎 洋(広島大)	2017～2019年度
I	鉄鋼のミクロ組織要素と特性の量子線解析	材料/評価分析	佐藤 成男(茨城大)	2017～2019年度
I	バイオフィルム被覆によるスラグ新機能創出	評価分析/環境/高プロ	平井 信充(鈴鹿高専)	2017～2019年度
II	資源環境調和型焼結技術創成	製鉄部会	村上 大一(東工大)	2017～2019年度
II	熱延ROT冷却モデル構築Ⅱ	圧延理論部会	永井 二郎(福井大)	2017～2019年度

表8 鉄鋼協会研究プロジェクト(旧産発プロジェクト展開鉄鋼研究)のテーマ

研究テーマ	研究目的	主査	研究期間
鋼の脆性き裂伝播挙動機構理解深化とLNG貯槽次世代材料設計指針提案	LNG貯槽用鋼材を構造材として使用した場合に、脆性き裂伝播停止特性の付与により、絶対に大規模破壊事故に至らない材料設計が可能であることを実証し安心して使用する基礎環境を整える。	川畑 友弥(東大)	2015～2017年度

参考文献

- 平成29年度の経済見通しと経済財政運営の基本的態度, 内閣府ホームページ, <http://www5.cao.go.jp/keizai1/mitoshi/2017/0120mitoshi.pdf> (参照日: 2017年2月15日)
- 月例経済報告等に関する関係関係会議資料, 内閣府ホームページ, <http://www5.cao.go.jp/keizai3/getsurei/2017/01kaigi.pdf> (参照日: 2017年2月15日)
- 日本鉄鋼連盟鉄鋼統計専門委員会: 鉄鋼統計要覧-2016年度版, 日本鉄鋼連盟, (2016年10月24日)
- 鉄鋼生産速報 暦年, 全国鉄鋼生産高/全国鋼材生産高, 日本鉄鋼連盟ホームページ, <http://www.jisf.or.jp/data/seisan/index.html> (参照日: 2017年2月15日)
- 日本の鉄鋼業2015, 日本鉄鋼連盟, (2015年6月)
- 資源メジャーの最新生産動向, JOGMEC ホームページ, http://mric.jogmec.go.jp/periodical/kinzoku_report201601.html (参照日: 2016年2月5日)
- JFEグループインベスターズ・ミーティング資料, (2017/01/31), 24, JFEホールディングスホームページ, <http://www.jfe-holdings.co.jp/investor/zaimu/g-data/jfe/29/29-setumei170131-03.pdf> (参照日: 2017年2月21日)
- 鉄鋼新聞, (2017年1月4日)
- 鉄鋼需給四半期報, 日本鉄鋼連盟, (2016年1月)
- 統計データ, (一社)日本自動車販売協会連合会ホームページ, <http://www.jada.or.jp/contents/data/hanbai/index12.html> (参照日: 2017年2月21日)
- 自動車統計月報, 50 (2017) 10, (一社)日本自動車工業会ホームページ, http://www.jama.or.jp/stats/m_report/pdf/2017_01.pdf (参照日: 2017年2月21日)
- 2017年度の鉄鋼需要見通し, 日本鉄鋼連盟ホームページ, <http://www.jisf.or.jp/news/topics/161216.html> (参照日: 2017年2月15日)
- worldsteel 鉄鉄・粗鋼生産量・時系列表2007～2016年, 日本鉄鋼連盟ホームページ, http://www.jisf.or.jp/data/iisi/documents/summary_2016CY.pdf (参照日: 2017年2月15日)
- 金属素材競争力強化プランの概要, 経済産業省ホームページ, <http://www.meti.go.jp/press/2015/06/20150619002/20150619002.pdf> (参照日: 2017年2月22日)
- 経済産業省 経済産業省生産動態統計 統計表一覧(経済産業省生産動態統計), http://www.meti.go.jp/statistics/tyo/seidou/result/ichiran/08_seidou.html (参照日: 2017年2月21日)
- 2016-3Q 決算説明会資料, 30, 新日鐵住金ホームページ, http://www.nssmc.com/common/secure/ir/library/pdf/20170202_500.pdf (参照日: 2017年2月21日)
- ニュースリリース, (2016.1.27), <http://www.jfe-steel.co.jp/release/2016/01/160127.html>, JFEグループTODAY2016, 34., JFEホールディングスホームページ, <http://www.jfe-holdings.co.jp/investor/library/group-today/2016/pdf/all.pdf> (参照日: 2017年2月21日)
- Annual report 2015, 9, 神戸製鋼所ホームページ, http://www.kobelco.co.jp/english/ir/library/annualreport/2015annual/_icsFiles/metafile/2015/08/24/

- annualrepot_2015.pdf (参照日：2017年2月21日)
- 19) 平成28年度第2四半期決算説明会資料, 9, 日新製鋼ホームページ, <http://www.nisshin-steel.co.jp/news/> (参照日：2017年2月21日)
 - 20) ニュースリリース, (2016.5.20), 愛知製鋼ホームページ, https://www.aichi-steel.co.jp/news_item/20160520.pdf (参照日：2017年2月21日)
 - 21) プレスリリース, (2016.11.17), スチールプラントックホームページ, <https://steelplantech.com/news/4636/> (参照日：2017年2月21日)
 - 22) 72株主通信, 7, 共英製鋼ホームページ, http://contents.xj-storage.jp/xcontents/54400/85fa72c2/0366/4a42/a749/799025854752/2016062_7223033432s.pdf (参照日：2017年2月21日)
 - 23) ニュースリリース, (2015.5.28), 大阪製鐵ホームページ, http://www.osaka-seitetsu.co.jp/investment/pdf/brief_20150528.pdf (参照日：2017年2月21日)
 - 24) 国連気候変動枠組条約第22回締約国会議 (COP22)、パリ協定第1回締約国会合 (CMA1) 及び京都議定書第12回締約国会合 (CMP 12) の結果について, 環境省, ホームページ, <http://www.env.go.jp/press/files/jp/104193.pdf> (参照日：2017年1月17日)
 - 25) 鉄鋼業界の取り組み 低炭素社会実行計画, 日本鉄鋼連盟ホームページ, <http://www.jisf.or.jp/business/ondanka/kouken/keikaku/> (参照日：2017年1月26日)
 - 26) NEDO 委託事業 環境調和型製鉄プロセス技術開発について, 新エネルギー・産業開発機構環境部, 日本鉄鋼連盟 COURSE50 委員会, (2016年3月23日)
 - 27) 環境調和型製鉄プロセス技術開発プロジェクト進捗状況 日本鉄鋼連盟 COURSE50 委員会, 神戸製鋼所, JFE スチール, 新日鐵住金, 新日鐵住金エンジニアリング, 日新製鋼, (2016年3月23日)
 - 28) 水素還元製鉄法の技術開発, 国家プロジェクト「COURSE50」, 日韓鉄鋼新聞, 鉄鋼新聞社, (2016年9月15日, 2017年1月4日)
 - 29) 資源対応力強化のための革新的製鉄プロセス技術開発事業の概要について 経済産業省製造産業局鉄鋼課製鉄企画室, JFE スチール, 新日鐵住金, 神戸製鋼所, (2013年12月12日)
 - 30) 総務省統計局統計 科学技術研究調査 調査の結果 統計表一覧, <http://www.stat.go.jp/data/kagaku/kekka/index.htm> (参照日：2017年2月21日)
 - 31) 総務省統計局統計 科学技術研究調査 調査の結果 統計表一覧 結果の概要, <http://www.stat.go.jp/data/kagaku/kekka/index.htm> (参照日：2017年1月27日)
- (2017年2月28日受付)

☆新製品☆

本会維持会員企業における最近の新製品およびその動向を表9に示す。

表9 新製品およびその動向一覧表

分類	会社名	製品名および動向	内容
自動車向け製品	新日鐵住金株式会社	3次元熱間曲げ(3DQ)角型鋼管による自動車骨格部品開発	(株)エイチワン、日鉄住金鋼管(株)と共同で3DQにより自動車ボディ骨格部品であるフロントピラーを開発、安全・軽量化に寄与
	JFEスチール株式会社	1,470MPa級超高強度冷延鋼板	冷間加工できる世界最高強度の冷延鋼板を開発。バンパー補強部品として実用化。自動車骨格部材用へ適用可能
	株式会社 神戸製鋼所	高生産性ホットスタンプ用冷延鋼板	ホットスタンプの下死点保持時間短縮を可能とする鋼板で、プレス生産性の低さを克服し多工程プレスを可能とするもの
		1,300, 1,500MPa級マルテンサイト鋼板	優れた曲げ加工性、抵抗溶接性、耐遅れ破壊特性を兼備し、バンパーレインフォースメントとして実用化
	日新製鋼株式会社	耐摩耗性サイレントチェーン用鋼	微粒子の介在によって生じるアブレッシブ摩耗に対して優れた耐摩耗性を有する鋼材
厚板 造船向け製品	JFEスチール株式会社	衝突時の安全性を高める船舶用強度高延性厚鋼板「SAFEED [®] 」	マイクロ組織最適制御により高い延性を確保し、船舶衝突時の高い安全性(高吸収エネルギー)を実現可能な高強度厚鋼板
		大入熱溶接対応 TMCP型中厚YP460MPa級厚鋼板	高能率の各種大入熱溶接に対応し、溶接熱影響部の強度および靱性を向上させたTMCP型中厚YP460MPa級高強度鋼板
土木向け製品	JFEスチール株式会社	JWALL-II (ジェイウォールツー)	ハット型鋼矢板にCT鋼を取り付けた専用の鋼矢板(ビートルパイル)とコンクリートとの合成地下壁工法
		大口径アーバンリング工法 (アーバンウォール工法)	鋼製リングを2重構造として現地で組み立てた後、鋼製リング間にコンクリートを充填した合成構造ケーソン工法
建築向け製品	JFEスチール株式会社	JFEコラムBCRの耐火被覆低減工法	JFEコラムBCRに対する耐火被覆(吹付けロックウール)を40%以上削減できる耐火被覆低減工法
		制振壁 (JFEシビルと共同開発)	建築構造用低降伏点鋼材を地震エネルギーを吸収する鋼板パネルとして用いた制振壁
エネルギー	大同特殊鋼株式会社	DINCS [®]	ラジアントチューブバーナーの排気側に、新開発高効率熱交換器を設置し排熱回収を行うバーナーシステム。炭化珪素を素材とした3Dプリント技術により耐熱性が高く理想的な形状の熱交換器を実現。シンプルな構成でリジェネレイティブバーナー同等性能を達成
金属加工	大同特殊鋼株式会社	STAR-TM ^{3®} (スターティーエムキューブ)	冷間鍛造金型への適用で寿命3倍を実現。高硬度(4500HV)と密着性を兼ね備えた硬質皮膜用Ti-Mo系ターゲット材

☆生産技術のトピックス☆

2016年の注目すべき技術開発、新設備、新製品などの概要を紹介する。

塗装周期延長鋼「コルスペース®」

新日鐵住金(株)

橋梁や港湾設備などの鋼構造物の多くは塗装によって防食されるが、十分な膜厚の確保が難しい部材鋭角部や、塗装欠陥部では、腐食に至るケースがあり、これは、塩害が厳しい環境ほど顕著である。今後、経年劣化が進んだ鋼構造物が増えるにつれ、塗装塗替え等を含む補修や更新に関わる経済的コストの増大が予想されている。このような背景から、社会インフラの基盤となる鋼構造物のライフサイクルコスト(LCC)の縮減を可能とする新たな長寿命化技術が渴望されていた。

新日鐵住金は、このような社会ニーズに応えるべく、JIS規格に適合した(適合規格: JIS G3101 (SS)、JIS G3106 (SM)、JIS G3140 (SBHS))、塗装周期延長鋼「コルスペース®」を開発・実用化した。コルスペース®は、微量添加Snが、Feの溶解反応を抑制するというメカニズムを発見し、利用した新鋼材である。

コルスペース®は、塗膜剥離面積を普通鋼の約半分に抑制することが確認されている。そのため、普通鋼が新設後30年毎、100年間で3回塗装塗替えされる場合、コルスペース®では、新設後50年で塗装塗替え不要、100年で1回となる。即ち、LCCで約半減の効果が期待できる。

コルスペース®は、橋梁や港湾設備に、累計約5千トン採用され、今後、塩害の厳しい環境で使用される社会・産業インフラを支える鋼構造物の塗装塗替え周期延長に伴う維持管理費削減や環境負荷低減による益々の社会貢献が期待されている。

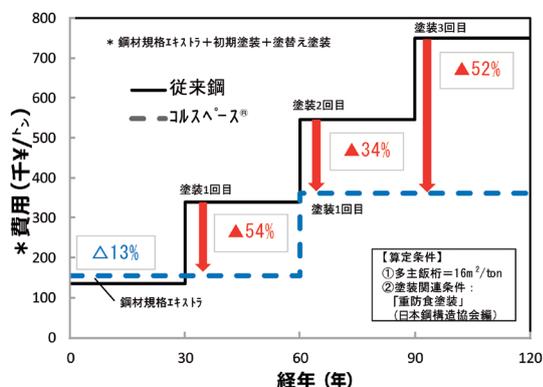


図1 LCCの計算例



図2 新日鐵住金名古屋製鐵所に新設したアンローダー(港湾荷役機械)

衝突時の安全性を高める船舶用高強度高延性厚鋼板「SAFEED®」

JFEスチール(株)

JFEスチールは、三菱重工船舶海洋株式会社と共同で、船舶衝突時の安全性を高めることができる高強度厚鋼板「KA32-HD20」および「KD32-HD20」(商品名:『SAFEED®』*)を新たに開発し、LPG(液化石油ガス)運搬船に、世界で初めて適用した。

船舶の衝突は、その積載物の流出により深刻な環境被害をもたらす懸念があることから、衝突時の破損リスク低減が求められており、特にLPG船等の可燃性ガスを積載した船舶においては、破損リスクの低減が極めて重要となる。破損リスク低減の方法としては、設計段階で破損しにくい船体構造とするほか、今回のような衝突時の安全性を高める鋼板を使用する方法が考えられる。

今回開発した鋼板は、鋼の化学成分および圧延条件の適正化により、鋼板のマイクロ組織を最適に制御することで、従来鋼と同等の溶接施工性を維持しつつ、同一強度の従来鋼と比べて高い伸び特性を得ることに成功した。三菱重工船舶海洋での船舶衝突シミュレーションでは、本鋼板を船側外板に適用することで、衝突時に鋼板が破断するまでに吸収することができるエネルギーを、従来鋼を使用した場合と比べて2割以上向上できることが確認された。本鋼板は、一般財団法人日本海事協会より「KA32-HD20」、「KD32-HD20」として認証を取得している。

本鋼板の適用により、船体構造を変えることなく、船舶側面から衝突された際の破損リスクを大きく低減することができるほか、船体構造との組合せによりさらなる衝突安全性の向上効果も期待でき、LPG船と同様に高い安全性が求められるLNG船や原油タンカー等への適用も効果的である。

*SAFEED: SAFE Excellent Ductility steel の略。

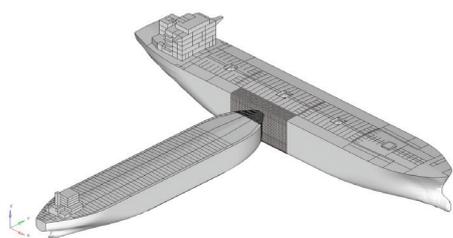


図3 船舶衝突の概念図

LNG 船用中厚YP460級厚鋼板

JFE スチール (株)

JFE スチールは、川崎重工業株式会社と共同で、液化天然ガス (LNG) 運搬船用として中厚 (板厚50mm以下) の降伏応力 (YP) 460MPa級の高強度厚鋼板を開発・実用化し、MOSS型^{*1}LNG船に世界で初めて適用した。

LNG需要は今後中国を中心としたアジアが牽引すると見られており、一方で供給元としてはシェールガス革命により増産整備が進んでいる米国が特に注目されている。LNG輸出基地計画の多い米国東岸からアジアへのLNG輸送は、2016年6月に拡張工事の完了したパナマ運河を通行することで運行日数が大幅に短縮される。このため拡張後のパナマ運河を通峡可能なMOSS型の最大船型の設計を可能とする、高強度化、軽量化につながる中厚鋼のニーズが高まっていた。

今回開発した鋼板は、高精度水冷装置『Super-OLAC[®] (On-Line Accelerated Cooling)』、および熱影響部の靱性劣化を抑制する『JFE EWEL[®]』技術による溶接熱影響部の組織制御を通して、溶接部の強度と靱性を両立することに成功した。これにより、造船所での建造効率向上に必要な、各種大入熱溶接施工^{*2}に対応しながら、従来のLNG船に使用されている降伏応力355MPa級もしくは390MPa級鋼板に比べ、降伏強度にしておよそ15～30%の向上を達成した。当鋼板は最大船型の設計を可能とする船体強度の向上に寄与するとともに、船体軽量化による輸送エネルギーの低減を実現する。

*1 MOSS型：＝球形独立型タンクを円筒形の支持構造 (スカート) で固定する方式。

*2 大入熱溶接：＝一般的な小入熱多層盛溶接に比較して、一度の溶接で投入される熱量が大きく高能率な溶接方法。サブマージアーク溶接やエレクトロガスアーク溶接など。



図4 高強度厚鋼板が適用されたMOSS型LNG船 (写真提供：川崎重工業株式会社)

NORSOK 認証範囲拡大

日本冶金工業 (株)

NORSOKは石油掘削・生産に係る作業や設備等の安全性を担保するため、北海油田の開発を進めていたノルウェーの石油産業界によって1990年代半ばに導入された規格である。各種の施設・工法などと共に、材料についても要求事項を定めており、現在では世界的に石油・ガス開発における標準的な規格の一つになっている。

日本冶金工業は、熱処理管理やトレーサビリティなど品質保証体制を整え、2015年3月、汎用二相鋼 (S31803,S32205)、スーパー二相鋼 (S32750)、スーパーオーステナイトステンレス鋼 (S31254) の厚板形状で規格認証を取得し、2015年12月にはそれぞれの鋼種について熱帯形状でも認証を取得した。2016年11月にはS32750厚板形状の板厚範囲を「31mm以下」から「40mm以下」に拡大し、新規鋼種としてスーパー二相鋼S32760の厚板形状で認証を取得した。

NORSOK認証範囲の拡大により、高機能材材販市場の1つである石油・ガス分野において、アジア・ヨーロッパのファブリケーターや問屋をメインターゲットに、NORSOK認証を裏付けとした高品質な汎用二相鋼、スーパー二相鋼、そしてスーパーオーステナイト鋼の、より一層の需要取込み拡大が図れるものと考えている。

表1 取得した認証規格、鋼種

認証規格	材料規格	鋼種	日本冶金相当鋼種
NORSOK M-650	NORSOK M-630	MDS D45 UNSS31803 UNSS32205	NAS329J3L
		MDS D55 UNSS32750 UNSS32760 (新規)	NAS74N NAS75N
		MDS R15 UNSS31254	NAS185N

高ニッケル合金の4フィート幅コイル

日本冶金工業 (株)

日本冶金工業は、高ニッケル耐食合金「NAS625」(UNS N06625) の4フィート幅コイル製造に2016年4月に成功し、さらに2016年9月に「NASNW22」(UNS N06022) の4フィート幅コイル製造に成功した。

過酷な腐食環境下で使用され、近年は溶接作業の効率化のため広幅コイルのニーズが高い。しかしこのクラスの合金は高温域での強度が非常に高いため、4フィート幅熱延コイルの生産に成功したのは世界でも1、2社に限られる。従来、日本冶金では1メートル幅コイル製造が限界であった。先行して2015年12月に高ニッケル耐食合金「NASNW276」(UNS N10276) の4フィート幅コイル製造を成功しており、ここで用いた開発技術を組み込み、熱延条件を最適化することで熱延時の圧力負荷を軽減している。

主な需要分野はプレート式熱交換器、オイル・ガス精製機器、化学タンク、水処理設備などであり、海外からの引き合いが活発である。使用環境に応じて、3鋼種から適切な鋼種を選択していただけるよう、技術サービスを含めて販売体制を整えている。



図5 NASNW276 4フィート幅熱延コイル

冷間加工用 1470MPa級超高強度冷延鋼板

JFEスチール (株)

JFEスチールは、1470MPa級冷延ハイテンを新たに開発し、バンパーレインフォースメント (以下、「バンパー R/F」) として実用化した。

バンパー R/Fは、衝突時に乗員を保護する自動車前後部の部材で、近年の衝突規制の厳格化から素材鋼板の高強度化が求められている。しかし、高強度化するほど成形加工が難しくなり、また遅れ破壊が発生する懸念も出てくることから、これまでは主に980MPa級ハイテンが使用されていた。また、ホットプレス工法が採用された例もあるが、生産性および製造コストに課題があった。

そこでJFEスチールは、西日本製鉄所福山地区にある独自のWQ方式連続焼鈍プロセス (JFE-CAL) を活用し、冷間加工用の鋼板としては世界最高強度の1470MPa級冷延ハイテンを開発した。これはWQ方式の極めて高い冷却速度 (1000°C / 秒以上) を利用して高強度化し、遅れ破壊の原因となる合金元素を極限まで低減することで、1470MPa級の高強度と耐遅れ破壊特性を両立させたことによる。今後は、今回実用化したバンパー R/Fだけでなく、ドアインパクトビームや骨格部品など、高強度が求められる他の自動車部品への展開も期待でき、一層の車体衝突性能の向上と、軽量化による燃費向上へ貢献する。



図6 バンパー R/F

表面改質技術によるステンレス基材上への貴金属めっき皮膜の高被覆・極薄化

東洋鋼鈹 (株)

東洋鋼鈹は、ステンレス基材上にAuやPt、Pdなどの貴金属を無電解めっきする際の表面改質技術を開発し、高被覆、かつ極薄のめっき皮膜形成を可能とした。従来、Auのような貴金属を無電解めっきする際には、ステンレスとAuとの密着性を向上させるため、下地Niめっきを行う必要がある。この場合、Auめっき層に生成されたピンホールが耐食性を悪くするため、Auめっき層を厚膜化する必要があり、コストが高くなる課題があった。そこで、ステンレス基材上に貴金属を無電解めっきする前に、表面改質を行い、①不活性なCr酸化物の除去、②活性な金属結合状態を有するFe基、Ni基が濃化した表層を発現することにより、置換めっきが容易に進行しやすくなり、膜厚が極めて薄い領域においても被覆率の高いめっきを達成した。

本技術を用いた耐食性の例を図7に示す。本技術を用いたAuめっきは、従来のAuめっきに比べ、同一皮膜厚みでは1/100の溶出量、同一溶出量では1/10の皮膜厚みが可能となった。本技術は、導電性および耐食性が必要な用途に低コストで適用可能であり、今後拡大が見込まれるエネルギー関連分野等で高機能商品として展開を図っていく予定である。

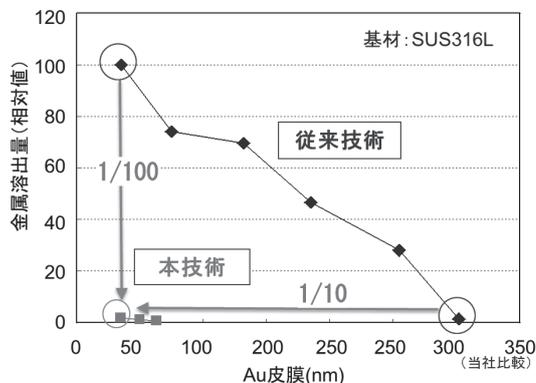


図7 耐食性評価結果の一例 (pH1.0硫酸中90°C -100時間浸漬後)

鋼矢板を活用した合成地下壁構築技術『J-WALL II工法』

JFEスチール (株)

JFEスチール株式会社、株式会社大林組およびジェコス株式会社の3社は共同で、地下壁の施工に際し、仮設土留め壁として利用した特殊な鋼矢板と鉄筋コンクリートを一体化させて本設の合成地下壁を構築する『J-WALL II工法』を開発し、国土技術研究センター (JICE) より建設技術審査証明を取得した。

近年、都市部の各所で再開発が行われているが、狭あいな土地で必要な幅の地下空間を確保しなければならないというケースが少なくない。従来は、仮設の土留め壁を構築した後

に、別途、本設の地下壁を構築する工法が多く採用されているが、この場合、仮設と本設の別々の2つの壁を構築する必要がある。そのため、用地境界が設定されている場合には内部空間面積が狭くなってしまい、逆に、内部空間の必要幅が決まっている場合には工事に必要な敷地面積が大きくなってしまいう課題があった。さらに、上述のような厳しい施工条件の下での地下壁構築工事には時間がかかることから、全体工期や工費を圧迫しており、工期短縮やコストダウンを実現する工法が望まれていた。

今回、3社は共同で『J-WALL II 工法』を開発、T形鋼および定着用鉄筋をハット形鋼矢板にあらかじめ溶接した合成構造用鋼矢板『ビートルパイル』を用いることで、鋼矢板と鉄筋コンクリートとの接合強度を高めたことにより壁厚を縮小できるというメリットなどがある。



図8 工法イメージ

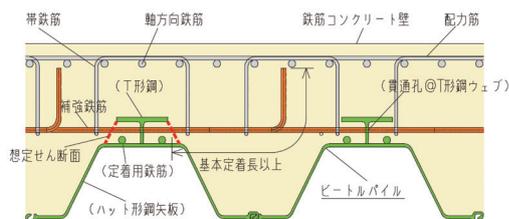


図9 構造断面(例)

鋼管杭・鋼管矢板の機械式継手ガチカムジョイント®

新日鐵住金(株)

新日鐵住金は、鋼管杭・鋼管矢板の機械式継手として、ガチカムジョイント®を開発した。

鋼管杭は現場で溶接接合しながら施工することが一般的であるが、近年のインフラの補強・更新工事や都市内の再開発工事では、狭隘地や空頭制限下での短尺鋼管杭の継ぎ施工や工事時間制約下での急速施工が求められている。

一方で、構造物への要求性能の高度化・多様化から、鋼管杭は大径化、厚肉化、高強度化が進んでおり、溶接時間も増

加傾向にある。ガチカムジョイント®はこのようなニーズに対応した現場での溶接接合が不要な機械式継手である。

ガチカムジョイント®(図10)は、ピン継手、ボックス継手、回転抑止キーで構成され、円周方向に均等に分割された4段のギア同士が噛み合う構造である。接合はボックス継手のギア溝にピン継手のギアを挿入し、ピン継手をギア幅だけ回転させ、回転抑止キーを取付けることのみで完了できる。部品数が少なく接合作業に優れており、大径で板厚の厚い鋼管杭でも短時間で確実に接合できる。継手本体は鋼管本体と同等以上の強度を有し、適用範囲は、鋼管径400から1600mm、鋼種SKK400、SKK490に加えて570N/mm²級の鋼管に対応する。2016年2月に一般財団法人土木研究センターの建設技術審査証明を取得し、同年8月には新日鐵住金八幡製鐵所内の杭基礎工事で施工時間の短縮のために初採用された。

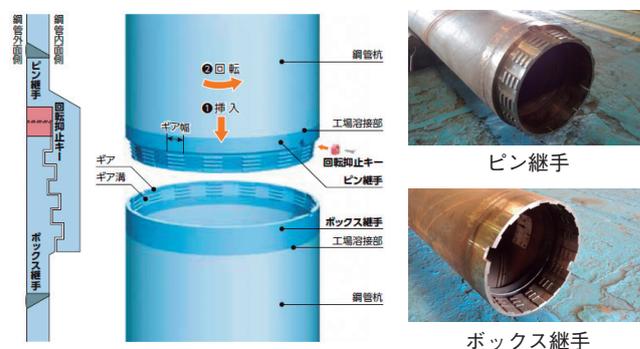


図10 ガチカムジョイント®

JFEコラムBCRの耐火被覆低減工法

JFEスチール(株)

JFEスチール(株)は、建築構造用冷間ロール成形角形鋼管「JFEコラムBCR」を用いた鋼管柱の吹付けロックウールの耐火被覆厚を40%以上低減し、国土交通大臣の耐火構造認定を取得した。

鉄骨造の耐火被覆材料やその厚みは、建築基準法およびその関連法規で定められた要求性能に応じて、評価機関による所定の耐火試験を経て認定される。

鉄骨造建築物の柱には耐火被覆材として吹付けロックウールが多く使用されている。今回「JFEコラムBCR」を用いた柱に限り、従来認定に比べて吹付けロックウールの被覆厚を1時間耐火は25mmから15mm(柱の適用サイズは□-200×12~□-550×25)、2時間耐火では従来の45mmから25mm(柱の適用サイズは□-250×16~□-550×25)へ低減し、認定を取得した。これは構成材料(耐火被覆材、鋼管柱)の熱特性を詳細に検討し、仕様設計したことによるものである。これにより「JFEコラムBCR」が使用される鉄骨造建築物において、耐火被覆工事費削減と柱の仕上げ寸法縮小による居室有効面積の拡大が実現する。

さらに、外壁を耐火被覆の一部として活用する合成耐火構

造についても、鉄骨造建築物の外壁材として使用頻度の高いALC板を対象に、吹付けロックウールとの組み合わせで1時間および2時間耐火の認定を取得した。

※「BCR」は日本鉄鋼連盟の登録商標です。

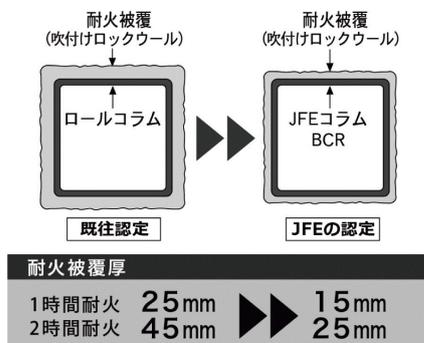


図11 耐火認定概要図

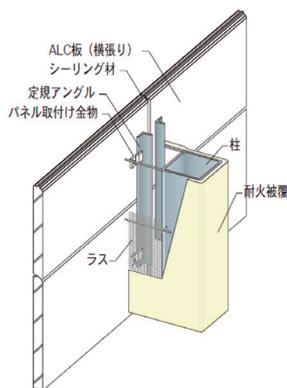


図12 合成耐火構造概要図

外航船による鋼材輸送における配船費用処理システム構築

JFEスチール (株)

JFEスチールは2015年12月に、外航船による鋼材輸送における配船費用処理システム『輸出配船支援システム』を稼働させました。本システムの稼働により、お客様との間の配船費用処理を遅滞無く効率的に進めることが可能となります。配船費用処理業務について、システムを活用して処理を行うことは、国内の鉄鋼業界では初めての試みです。

外航船の鋼材輸送においては、期間や数量などの条件をあらかじめ定めた上で船積みを行います。実際には、天候不順や荷揃え状況によって、当初の条件どおりにならないケースが多く発生します。その際、早出滞船料など配船費用を事後に精算することとなりますが、従来は書面にて処理を行っていたため、社内外の関係者確認や進捗確認の負荷が大きく、グローバルマーケットへの対応の必要から輸出量が拡大する中で、効率的かつ迅速な処理が課題となっていました。

そこで本システムを2015年12月に立ち上げました。クラウドサービスを最大限活用することで、商社や船会社を含む

社内外の関係者がリアルタイムに連携して費用処理を行うことで、処理にかかる期間を半減します。また、処理遅延を防止するためのステータス管理機能を有することで、進捗状況を容易に把握できるようになりました。

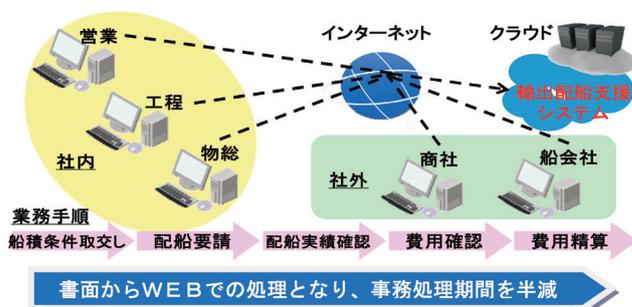


図13 『輸出配船支援システム』概念図

排気ガスケット用高性能ステンレスばね材の実用化

新日鐵住金 (株)

新日鐵住金は、(株) 本田技術研究所と共同で、耐熱性に優れた排気系ガスケット用のステンレスばね材 (NSSMC-NAR-AH-4 3/4H) を開発・実用化した。

燃費向上や排出ガスの清浄化を目的に自動車の排気温度は上昇傾向にあり、排気系部品の連結部で使用される排気ガスケットには、従来よりも耐熱性に優れたばね材が必要となった。このような環境では、比較的高価なニッケル基の耐熱合金などが採用されてきたが、本開発では経済的な高耐熱性ばね材を目指し、通常のステンレス鋼の範疇となる成分と製造工程のなかで、優れた耐熱性を実現した。

AH-4は窒素添加による固溶強化を活用する高耐熱合金で、火力発電設備の高温構造部材として開発された。この材料を冷間圧延で加工硬化させることにより、ガスケット材に求められる初期硬度 (400HV超) を確保した。さらに600℃の環境に長時間保持されても硬度低下がほとんどなく、熱劣化耐久性に優れたばね材であること等が特徴である。

本開発は、2016年に日本ばね学会より「技術賞」を受賞した。



図14 NSSMC-NAR-AH-4製の排気系ガスケット



入門講座

材料の構造を見る回折現象 - 1

回折現象の動力学

—透過電子顕微鏡学における動力的回折理論の基礎—
Basis of Dynamical Theory of Electron Diffraction
in Transmission Electron Microscopy

赤瀬善太郎 東北大学
多元物質科学研究所
講師
Zentaro Akase

1 はじめに

回折現象を考えるうえで、試料中で一回散乱を受けた散乱波だけで考える回折理論を運動学的回折理論 (kinematical theory of diffraction) といい、それに対し、複数回の多重散乱を考慮する回折理論を動力的回折理論 (dynamical theory of diffraction) という。特に電子回折では、電子と物質の相互作用が大きいため、散乱強度の解釈には動力的回折理論が必要となる。

本稿では透過電子顕微鏡学における運動学的回折理論について述べたのち、動力的回折理論の代表的な3つの手法、すなわち (a) 波動光学に基づいたHowie-Whelanの微分方程式を解く手法、(b) シュレディンガー方程式から出発し行列の固有値問題を解くBethe法、(c) 波動光学に基づき、像および回折強度を試料厚さ方向に逐次計算するマルチスライス法について概説し、最後に動力的回折効果を積極的に利用した解析手法についていくつか簡単に紹介する。

2 運動学的回折理論

運動学的回折理論では、回折波の確率振幅は、電子が試料の中のある一点で一度だけ散乱して観測点にたどり着いたときの確率振幅を、試料全体の点にわたって計算して、その和をとることで計算される。実際には、まず試料の深さ方向に垂直な面内の寄与の和を計算して、次にそれを深さ方向に積分する。透過電子顕微鏡用試料の場合、電子の寄与は主に1 nm程度の広がりを持ったコラム内からのものがメインとなり、その外からの寄与は位相が激しく振動するためほとんど打ち消し合う。よって、このコラム内からの寄与だけを考える (コラム近似)。コラム内の深さzにおける平面からのg反射の寄与の和 $d\phi_g/dz$ は、

$$\frac{d\phi_g}{dz} = \frac{i\pi}{\xi_g} \exp(-2\pi isz) \dots\dots\dots (1)$$

となる。ここで ξ_g は消衰距離 ($\xi_g = \pi V_c \cos \theta_B / (\lambda F_g)$)、 V_c : 単位胞の体積、 θ_B : ブラッグ角、 F_g : 結晶構造因子)、sは励起誤差 (逆空間における逆格子点gとエバルト球の距離) である。運動学的理論では、g回折波の波動関数 ϕ_g は、試料の上面 (z=0) から下面 (z=t) まで、各面からの寄与を足し合わせたものとなる。

$$\phi_g = \frac{i\pi}{\xi_g} \int_0^t \exp(-2\pi isz) dz = \frac{i\pi}{\xi_g} \frac{\sin(\pi st)}{\pi s} \exp(-\pi ist) \dots\dots\dots (2)$$

よってg反射の回折強度の式は、

$$I_g = \phi_g \phi_g^* = \left(\frac{\pi}{\xi_g} \right)^2 \frac{\sin^2(\pi st)}{(\pi s)^2} \dots\dots\dots (3)$$

となる。ここで上付きの*は複素共役を意味する。回折強度 I_g は結晶構造因子 F_g の自乗に比例し ($\because \xi_g \propto 1/F_g$)、試料厚さに対しては1/sの周期で振動するなど、運動学的回折理論でも電子回折強度や像コントラストの多くの特徴を説明できる。しかし、例えばs=0すなわちブラッグ条件が満たされたとき、 $I_g \rightarrow (\pi t / \xi_g)^2$ となるため、実験では試料厚さに対して回折強度が振動するのに対し、計算では単調に増加してしまうなど適用限界がある。

3 Howie-Whelanの微分方程式による二波励起条件における動力的回折理論

多重散乱を考えると、電子が試料内のある一点で散乱を起こし、「かつ」、違う点でまた散乱を起こすという確率振幅

の「積」を考慮する必要がある。まず、回折波が一つだけ励起された、透過波とg回折波の二波励起条件における多重散乱を考える。

コラム内の深さzにある平面からのg反射への寄与dφ_g/dzは、多重散乱を考慮すると、

$$\frac{d\phi_g}{dz} = \frac{i\pi}{\xi_g} \phi_0 \exp(-2\pi isz) + \frac{i\pi}{\xi_0} \phi_g \dots\dots\dots(4)$$

となる。右辺第一項は、式(1)と同じく透過波から散乱を起こしてg回折波に寄与する成分であるが、式(1)との違いは深さzにおける透過波の確率振幅φ₀との「積」になっている点である。右辺第二項は深さzにおけるg回折波の確率振幅φ_gとその回折波が前方に透過する確率振幅(iπ/ξ₀)の「積」である。同様に透過波方向への寄与dφ_g/dzも下記の通り記述できる。

$$\frac{d\phi_0}{dz} = \frac{i\pi}{\xi_0} \phi_0 + \frac{i\pi}{\xi_g} \phi_g \exp(2\pi isz) \dots\dots\dots(5)$$

式(4,5)の連立微分方程式をHowie-Whelanの式という。この形の連立微分方程式はもともと1914年C.G.DarwinによってX線回折の解析に導入され¹⁾、その後1961年A.HowieとM.J.Whalenによって電子線回折に応用された²⁾。この連立方程式は、変数の置換(φ₀exp(-πiz/ξ₀))をφ₀、φ_gexp(2πisz-πiz/ξ₀)をφ_gとそれぞれ置きなおすなどを技巧的に行うと、下記の2階線形常微分方程式に変形できる。

$$\frac{d^2\phi_0}{dz^2} - 2\pi is \frac{d\phi_0}{dz} + \frac{\pi^2}{\xi_g^2} \phi_0 = 0 \dots\dots\dots(6)$$

二階線形常微分方程式であるから、φ₀はφ₀=exp(2πiγz)という形の特解を持ち、上式はγの二次方程式(特性方程式)に変形できて、その特性方程式の解γ⁽¹⁾、γ⁽²⁾は

$$\gamma^{(1)} = \frac{\left(s + \sqrt{s^2 + \frac{1}{\xi_g^2}} \right)}{2} \dots\dots\dots(7)$$

$$\gamma^{(2)} = \frac{\left(s - \sqrt{s^2 + \frac{1}{\xi_g^2}} \right)}{2}$$

となる。よって微分方程式(6)の一般解は

$$\phi_0 = C_0^{(1)} \exp(2\pi i\gamma^{(1)}z) + C_0^{(2)} \exp(2\pi i\gamma^{(2)}z) \dots\dots\dots(8)$$

と、特殊解の線形結合となる。係数C₀^(j)はこの時点では任意定数である。回折波も同様に

$$\phi_g = C_g^{(1)} \exp(2\pi i\gamma^{(1)}z) + C_g^{(2)} \exp(2\pi i\gamma^{(2)}z) \dots\dots\dots(9)$$

と記述できる。ただしC_g^(j)とC₀^(j)の間にはC_g^(j)/C₀^(j)=2ξ_gγ^(j)

という関係がある。ここで、透過波と回折波の強度を足すと1になるようにC_gとC₀を規格化する、すなわち、

$$C_0^{(1)2} + C_g^{(1)2} = C_0^{(2)2} + C_g^{(2)2} = 1 \dots\dots\dots(10)$$

となるようにC₀^(j)の値を決める。

上記で得られたCとγを用いると、Howie-Whelanの式を満たす波動関数として次の二つの独立した解(ブロッホ波)が記述できる。

$$b^{(1)}(\mathbf{k}^{(1)}, \mathbf{r}) = C_0^{(1)} \exp(2\pi i\mathbf{k}^{(1)} \cdot \mathbf{r}) + C_g^{(1)} \exp(2\pi i(\mathbf{k}^{(1)} + \mathbf{g}) \cdot \mathbf{r})$$

$$b^{(2)}(\mathbf{k}^{(2)}, \mathbf{r}) = C_0^{(2)} \exp(2\pi i\mathbf{k}^{(2)} \cdot \mathbf{r}) + C_g^{(2)} \exp(2\pi i(\mathbf{k}^{(2)} + \mathbf{g}) \cdot \mathbf{r}) \dots\dots\dots(11)$$

ここで屈折の効果を含めた結晶内の入射電子の波数ベクトルをKとすると、(k-K)のz成分がγとなる。結晶中の電子の波動関数Ψ^Tはブロッホ波(1)とブロッホ波(2)の線形結合となる。

$$\Psi^T = \alpha^{(1)}b^{(1)} + \alpha^{(2)}b^{(2)} \dots\dots\dots(12)$$

ブロッホ波の励起係数α⁽¹⁾とα⁽²⁾は、境界条件(試料の上面では透過波強度が1になり、回折波強度が0になるという条件)より決まる。なお、

$$w = s\xi_g \dots\dots\dots(13)$$

$$\cot \beta = w$$

という二つのパラメータw、βを定義すると、Cおよびαは

$$C_0^{(1)} = \sin \frac{\beta}{2}, \quad C_g^{(1)} = \cos \frac{\beta}{2}, \quad C_0^{(2)} = \cos \frac{\beta}{2}, \quad C_g^{(2)} = -\sin \frac{\beta}{2}$$

$$\alpha^{(1)} = \sin \frac{\beta}{2}, \quad \alpha^{(2)} = \cos \frac{\beta}{2} \dots\dots\dots(14)$$

という関係がある。g反射がブラッグ反射条件を満たしているとき、s=0、w=0、β=π/2であり、電子の入射方向とブラッグ反射面とのなす角θがブラッグ角θ_Bよりも大きいほうにずれている場合即ちθ>θ_Bの時、s>0、w>0、β<π/2である。

最終的にg回折強度I_gは次式の通り運動学的回折理論で得た式(3)と似た形になる。

$$I_g = \phi_g \phi_g^* = \frac{1}{w^2 + 1} \sin^2 \frac{\pi t \sqrt{w^2 + 1}}{\xi_g} = \left(\frac{\pi}{\xi_g} \right)^2 \frac{\sin^2(\pi s_{eff} t)}{(\pi s_{eff})^2} \dots\dots(15)$$

ここで、s_{eff}は実効的な励起誤差で

$$s_{\text{eff}} = \sqrt{s^2 + \frac{1}{\xi_g^2}} = \frac{\sqrt{W^2 + 1}}{\xi_g} \dots\dots\dots(16)$$

である。また、有効励起差 s_{eff} の逆数を有効消衰距離 $\xi_{g,\text{eff}}$ とよぶ。式 (15) では、ブラッグ条件を満たした $s=0$ の時、 g 回折強度は試料厚さに対し、消衰距離 ξ_g の周期で振動することになる。

式 (11) の状況をエバルトの作図の要領で波数空間上に描いた図を図1に示す。図中一点鎖線の波数ベクトルの組み合わせ $(\mathbf{k}^{(1)})$ および $(\mathbf{k}^{(1)} + \mathbf{g})$ で示した波がブロッホ波 (1)、二点鎖線の波数ベクトルの組み合わせ $(\mathbf{k}^{(2)})$ および $(\mathbf{k}^{(2)} + \mathbf{g})$ で示した波がブロッホ波 (2) である。屈折効果を考慮した入射電子の波数ベクトル \mathbf{K} の始点は原点 O から半径 K の球面上に位置するのに対し、ブロッホ波はその球よりも γ だけずれた位置にベクトルの始点がある。いろいろな入射方位に対し、ブロッホ波の波数ベクトルの始点を結んだ面を分散面と呼ぶ。ブラッグ条件を満足しているところでは、分散面間の距離は消衰距離の逆数 ($1/\xi_g$) となる。なお、この図は透過波と一つの回折波の二波励起状態の図であるが、後述する多波動力学的回折理論で n 個の回折波を考慮する場合、分散面も n 個生じ、 n 個のブロッホ波を考察することになる。電子回折では透過波強度および回折波強度は試料の厚さに対して振動するが、これは波数 (つまり波長) わずかに異なるブロッホ波が足し合わさった結果、うなりが生じたものと解釈することもできる。

4 Bethe法による多波動力学回折理論

次にBethe法による回折理論を概説する。Bethe法は結晶ポテンシャル V 中の電子の運動をシュレディンガー

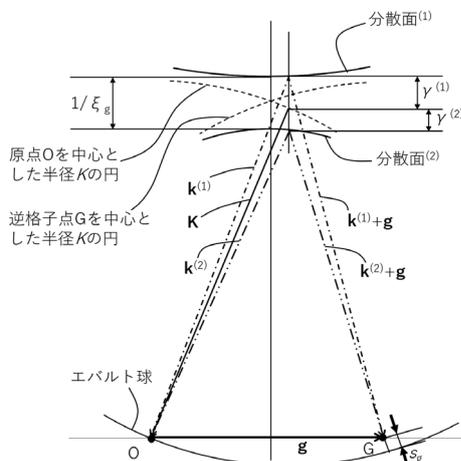


図1 ブロッホ波と分散面の模式図

方程式から求める手法であり、初めにH.Betheが考え³⁾、後にC.H.MacGillavry⁴⁾、R.D.Heidenreich⁵⁾、N.Kato⁶⁾、L.Sturkey⁷⁾、F.Fujimoto⁸⁾ およびH.Niehrs^{9,10)} らが発展された理論である。

電子の波動関数 Ψ はシュレディンガーの波動方程式に従う。

$$\nabla^2 \Psi(\mathbf{r}) + \frac{8\pi^2 m e}{h^2} (E + V(\mathbf{r})) \Psi(\mathbf{r}) = 0 \dots\dots\dots(17)$$

ここで、 m は相対論の補正をした電子の質量、 e は電気素量、 h はプランク定数、 E は加速電圧である。 $V(\mathbf{r})$ は結晶ポテンシャルで、次式のようにフーリエ級数で記述できる。

$$\begin{aligned} V(\mathbf{r}) &= \sum_h V_h \exp(2\pi i \mathbf{h} \cdot \mathbf{r}) \\ &= \frac{h^2}{2me} \left(\sum_h U_h \exp(2\pi i \mathbf{h} \cdot \mathbf{r}) \right) \dots\dots\dots(18) \\ &= \frac{h^2 U_0}{2me} + \frac{h^2}{2me} \left(\sum_{h \neq 0} U_h \exp(2\pi i \mathbf{h} \cdot \mathbf{r}) \right) \end{aligned}$$

\mathbf{h} は逆格子ベクトルである。フーリエ係数である結晶構造因子 U_g は次式で計算できる。

$$U_g = \frac{2m|e|}{h^2 V_c} \sum_j f_j^e \exp(-2\pi i \mathbf{g} \cdot \mathbf{r}_j) \exp\left(\frac{-B_j |\mathbf{g}|^2}{4}\right) \dots\dots\dots(19)$$

ここで f_j^e は j 番目の原子の原子散乱因子で Σ は単位胞内の各原子について行われる。 $\exp(-B_j |\mathbf{g}|^2/4)$ は温度因子と呼ばれ、原子の熱振動等に起因した波の減衰を考慮するためのもので B_j は等方性原子変位パラメータと呼ばれる。

シュレディンガー方程式 (17) はブロッホの定理により、次式に示すブロッホ波を特殊解に持つ。

$$\Psi(\mathbf{r}) = \sum_g C_g(\mathbf{k}) \exp\{2\pi i(\mathbf{k} + \mathbf{g}) \cdot \mathbf{r}\} \dots\dots\dots(20)$$

式 (17) に結晶ポテンシャルの式 (18) とブロッホ波の式 (20) を代入し、

$$K^2 = \frac{2meE}{h^2} + U_0 \dots\dots\dots(21)$$

とおく。すると、式 (17) は次式のように指数項で整理できる。

$$\sum_g \left[\{K^2 - (\mathbf{k} + \mathbf{g})^2\} C_g(\mathbf{k}) + \sum_{h \neq 0} U_h C_{g-h} \right] \exp\{2\pi i(\mathbf{k} + \mathbf{g}) \cdot \mathbf{r}\} = 0 \dots\dots\dots(22)$$

この式が任意の \mathbf{r} について成り立つには、指数の係数がすべ

て0でなければならない。よって、一連のgに対しての次式に示す一連の連立方程式が得られる。

$$\{K^2 - (\mathbf{k} + \mathbf{g})^2\} C_g(\mathbf{k}) + \sum_{h \neq 0} U_h C_{g-h} = 0 \dots\dots\dots(23)$$

この連立方程式が多波動力学的回折理論の基礎方程式である。本来、gとhは無限個あるが、実際の計算では求められる計算精度に応じて有限個で打ち切る。式(23)を行列表記すると、

$$\begin{pmatrix} |K|^2 - |\mathbf{k}|^2 & U_{-g} & U_{-h} & \dots \\ U_g & |K|^2 - |\mathbf{k} + \mathbf{g}|^2 & U_{g-h} & \dots \\ U_h & U_{h-g} & |K|^2 - |\mathbf{k} + \mathbf{h}|^2 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_0 \\ C_g \\ C_h \\ \vdots \end{pmatrix} = 0 \dots\dots\dots(24)$$

となる。ここで、図1の分散面の図から、

$$|\mathbf{k} + \mathbf{g}| \approx K + \gamma - s_g \dots\dots\dots(25)$$

と近似できることが分かる。すると、式(24)左辺の行列の対角要素は

$$|K|^2 - |\mathbf{k} + \mathbf{g}|^2 \approx 2K(s_g - \gamma) \dots\dots\dots(26)$$

となるので、式(24)は次式のように変形できる。

$$\begin{pmatrix} 0 & \frac{U_{-g}}{2K} & \frac{U_{-h}}{2K} & \dots \\ \frac{U_g}{2K} & s_g & \frac{U_{g-h}}{2K} & \dots \\ \frac{U_h}{2K} & \frac{U_{h-g}}{2K} & s_h & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_0 \\ C_g \\ C_h \\ \vdots \end{pmatrix} = \gamma \begin{pmatrix} C_0 \\ C_g \\ C_h \\ \vdots \end{pmatrix} \dots\dots\dots(27)$$

左辺左の行列は、対角要素に励起誤差(結晶方位の情報)、非対角要素に結晶構造因子(結晶構造の情報)を含んだ正方行列となる。式(27)は、この正方行列の固有値がγ、固有ベクトルがC_gになるという固有値問題に帰着され、γとC_gは固有値問題用の科学計算サブルーチン等を利用して数値的に解くことができる。なお、非弾性散乱による強度の減衰を考慮するには上の行列の結晶構造因子をU_g → U_g + iU_g'と虚数成分を加えたもの(U_g'の振幅はU_gの1/10以下程度に設定する¹¹⁾)に置き換えることで実効的に取り入れることができるが、後述するようにひとまずU_gで計算したのちに、摂動理論で得られる吸収係数もちいて補正をしてもよい近似が得られる。

次にブロッホ波の励起係数α^(j)を求める。厚さtにおけるg

回折波の式

$$\phi_g = \sum_{j=1}^n \alpha^{(j)} C_g^{(j)} \exp(2\pi i \gamma^{(j)} t) \dots\dots\dots(28)$$

において、α^(j)は境界条件に決まる。各gに対する式(28)を行列の形でまとめて表記すると次式になる。

$$\begin{pmatrix} \phi_0(t) \\ \phi_g(t) \\ \phi_h(t) \\ \vdots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_0^{(1)} & C_0^{(2)} & C_0^{(3)} & \dots \\ C_g^{(1)} & C_g^{(2)} & C_g^{(3)} & \dots \\ C_h^{(1)} & C_h^{(2)} & C_h^{(3)} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \exp(2\pi i \gamma^{(1)} t) & 0 & 0 & \dots \\ 0 & \exp(2\pi i \gamma^{(2)} t) & 0 & \dots \\ 0 & 0 & \exp(2\pi i \gamma^{(3)} t) & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha^{(1)} \\ \alpha^{(2)} \\ \alpha^{(3)} \\ \vdots \end{pmatrix} \dots\dots\dots(29)$$

右辺左の固有ベクトルからなる行列をCとして、試料の最上面では、透過波強度が1、回折波強度が0という境界条件を考える、即ち、t=0、φ₀(t=0) = 1、φ_g(t=0) = 0、φ_h(t=0) = 0、…を式(29)に代入すると、

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \end{pmatrix} = \mathbf{C} \begin{pmatrix} \alpha^{(1)} \\ \alpha^{(2)} \\ \alpha^{(3)} \\ \vdots \end{pmatrix} \dots\dots\dots(30)$$

となる。よって両辺にCの逆行列をかけることでブロッホ波の励起係数α^(j)は

$$\begin{pmatrix} \alpha^{(1)} \\ \alpha^{(2)} \\ \alpha^{(3)} \\ \vdots \end{pmatrix} = \mathbf{C}^{-1} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \end{pmatrix} \dots\dots\dots(31)$$

と計算できる。

g回折波の式(28)は、非弾性散乱による回折強度の減衰を取り入れると、下記のようなになる。

$$\phi_g = \sum_j \alpha^{(j)} C_g^{(j)} \exp(2\pi i \gamma^{(j)} t) \exp(-2\pi q^{(j)} t) \dots\dots\dots(32)$$

ここで、q^(j)はj番目のブロッホ波の吸収係数で下記の式で計算できる。

$$q^{(j)} = \frac{1}{2K} (C_0^{(j)*} \ C_g^{(j)*} \ C_h^{(j)*} \ \dots) \begin{pmatrix} U_0' & U_{-g}' & U_{-h}' & \dots \\ U_g' & U_0' & U_{g-h}' & \dots \\ U_h' & U_{h-g}' & U_0' & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_0^{(j)} \\ C_g^{(j)} \\ C_h^{(j)} \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (33)$$

5 マルチスライス法による 動力学的回折強度の逐次計算

マルチスライス法はJ.M.CowleyとA.F.Moodieにより提唱された^{12,14)}。この手法では後述するようにまず実空間での投影ポテンシャルを作成するところから始まるので、完全結晶からスタートするBethe法とは異なり、結晶粒界のような複雑なモデルにおける電子波の伝播を容易に取り扱えるという特徴があり、高分解能電子顕微鏡像の解釈によく利用される。

結晶を n 個のスライスに分割し、一つのスライスの厚さを Δz とする。電子線はこのスライスにほぼ垂直に入射するものとする。スライスへの結晶の投影ポテンシャルを $V_p(\mathbf{x})$ とし。まず、第1スライスの上面でポテンシャルによる散乱が起こり、それによって電子波は、次式(透過関数)のように位相変化を起こすと考える。

$$q(x, y) = \exp\{-i\sigma V_p(x, y)\Delta z - \mu(x, y)\Delta z\} \quad (34)$$

ここで、 σ は相互作用定数で、 $\sigma = 2\pi m|e|\lambda/h^2$ である。 $\mu\Delta z$ は吸収の効果である。次に、第1スライス上面で小角散乱した電子線が、第1スライスの下面まで真空中を伝播すると考える。この散乱過程を伝播関数

$$p(x, y) = \frac{1}{i\Delta z\lambda} \exp\left\{\frac{ik(x^2 + y^2)}{2\Delta z}\right\} \quad (35)$$

を用いて表すと、第1スライス下面での散乱振幅 ψ_1 は

$$\psi_1(x, y) = q(x, y) \otimes p(x, y) \quad (36)$$

で表される。ここで \otimes はコンボリューションである。第2スライス下面の散乱振幅 ψ_2 を計算するには、入射波 ψ_1 が第2スライス上面で散乱を起こしたのちに第2スライス下面まで伝播すると考える。すると、

$$\begin{aligned} \psi_2(x, y) &= q(x, y)\psi_1(x, y) \otimes p(x, y) \\ &= q(x, y)\{q(x, y) \otimes p(x, y)\} \otimes p(x, y) \end{aligned} \quad (37)$$

と表せる。以下同様の操作を行うと、 n スライスからなる試料下面での散乱振幅 ψ_n は

$$\psi_n(x, y) = q(x, y) \left[\dots \left[q(x, y) \right]_1 \left[q(x, y) \otimes p(x, y) \right]_1 \dots \right] \otimes p(x, y) \quad (38)$$

と逐次計算できる。この式は実空間で考えたものであるが、フーリエ変換を利用して逆空間で演算を行うやり方もある。上式をフーリエ変換すると、

$$\psi_n(u, v) = \left[Q(u, v) \otimes \dots \left[Q(u, v) \otimes \left[Q(u, v) \otimes P(u, v) \right]_1 \right]_1 \dots \right] P(u, v) \quad (39)$$

となる。 $Q(u, v)$ および $P(u, v)$ はそれぞれ $q(x, y)$ および $p(x, y)$ をフーリエ変換した関数である。試料が結晶の場合、 $Q(u, v)$ は、 (u, v) は逆格子ベクトルと一致するときにピークを持ち、逆空間内で離散的になるため、式(38)でのコンボリューションおよび積は離散的な逆格子点のみにおいて行えばよい。逆空間では伝播関数 $P(u, v)$ は

$$P(u, v) = \exp\{-i\pi\lambda\Delta z(u^2 + v^2)\} \quad (40)$$

となる。入射ビームが晶帯軸から角度 (α_x, α_y) だけ傾斜している場合は、式(40)に

$$\exp\{2\pi i\Delta z(u \tan \alpha_x + v \tan \alpha_y)\} \quad (41)$$

を乗じると、その影響を考慮することができる。

6 動力学的回折効果の応用

以上、電子線の動力学的回折理論の代表的な手法について概説した(詳しくは参考文献に挙げた教科書^{15,22)}を参考されたい)。最後に、動力学的回折を利用した例をいくつか簡単に紹介する。まず、式(15)から導かれる簡単な応用例として、収束電子回折の系統列反射ディスク内のロッキングカーブより、試料厚さと消衰距離を見積もる方法^{23,24)}がある。Bethe法の応用例としては収束電子回折図形の強度より、結晶構造因子を精密に求める研究がある。これには加速電圧を変化させたときに γ が重解を持つところで回折強度に異常が生じることを利用した臨界電圧法^{25,26)}や、回折強度を直接シミュレーション結果と比較する手法^{27,29)}がある。また、動力学的回折ではフリーデル則が破れることを利用して、収束電子回折図形の対称性から結晶の空間群を決定する研究があ

る³⁰⁻³²⁾。電子チャネリングとEDXを組み合わせて固溶原子の占有サイトを決定するアルケミ法³³⁻³⁵⁾も、動力学的回折効果(ブロッホ波の励起係数 α の電子線入射方位依存性)を利用した技法である。

参考文献

- 1) C.G.Darwin : Philos. Mag., 27 (1914) 315, 675.
- 2) A.Howie and M.J.Whelan : Proc. R. Soc., A263 (1961), 217.
- 3) H.A.Bethe : Ann. Phys., 87 (1928), 55.
- 4) C.H.MacGillavry : Physica, 7 (1940), 329.
- 5) R.D.Heidenreich : J. Appl. Phys., 20 (1949), 993.
- 6) N.Kato : J. Phys. Soc. Jpn., 7 (1952), 397.
- 7) L.Sturkey : Acta Crystallogr., 10 (1957), 856.
- 8) F.Fujimoto : J. Phys. Soc. Jpn, 14 (1959), 1558.
- 9) H.Niehrs : Z. Naturf., 14a (1959), 504.
- 10) H.Niehrs : Z. Phys., 156 (1959), 466.
- 11) C.J.Humphreys and P.B.Hirsch : Philos. Mag., 18 (1968), 115.
- 12) J.M.Cowley and A.F.Moodie : Proc. Phys. Soc., B 70 (1957), 486.
- 13) J.M.Cowley and A.F.Moodie : Acta Cryst., 10 (1957), 609.
- 14) J.M.Cowley : Diffraction Physics. 2nd revised ed. Amsterdam, North-Holland, (1981)
- 15) P.B.Hirsch, A.Howie, R.B.Nicholson, D.W.Pashley and M.J.Whelan : Electron Microscopy of Thin Crystals, London Butterworths, (1965)
- 16) J.C.H.Spence and J.M.Zuo : Electron Microdiffraction, Plenum Press, New York, (1992)
- 17) C.J.Humphreys : Rep. Prog. Phys. 42 (1979), 1826.
- 18) D.B.Williams and C.B.Carter : Transmission Electron Microscopy, A Textbook for Materials Science, Second Edition, Springer, (2009)
- 19) 進藤大輔, 平賀賢二 : 材料評価のための高分解能電子顕微鏡法, 共立出版, (1996)
- 20) 進藤大輔, 及川哲夫 : 材料評価のための分析電子顕微鏡法, 共立出版, (1999)
- 21) 今野豊彦 : 物質からの回折と結像—透過電子顕微鏡法の基礎—, 共立出版, (2003)
- 22) 堀内繁雄 : 高分解能電子顕微鏡, 共立出版, (1988)
- 23) P.M.Kelly, A.Jostsons, R.G.Blake and J.G.Napier : Phys. Stat. Sol. (a) , 31 (1975), 771.
- 24) S.M.Allen : Philos. Mag., A43 (1981), 325.
- 25) 渡辺伝次郎 : 日本金属学会会報, 14 (1975), 482.
- 26) Y.Tomokiyo, S.Matsumura and T.Eguchi : Proc. XI th Inter. Congr. on Electron Microsc., Vol.II, Kyoto, (1986), 1085.
- 27) J.M.Zuo, M.Kim, M.O' Keefe and J.C.H.Spence : Nature, 401 (1999) 49.
- 28) D.Morikawa, K.Tsuda, Y.Maeda, S.Yamada and T.Arima : J. Phys. Soc. Jpn., 81 (2012) 093602.
- 29) Z.Akase, Y.Tomokiyo, Y.Tanaka and M.Watanabe : Physica C, 338 (2000), 137.
- 30) M.Tanaka and M.Terauchi : Convergent-Beam Electron Diffraction, Tokyo, Jeol-Maruzen, (1985), 144.
- 31) H.Inui, A.Fujii, H.Sakamoto, S.Fujio and K.Tanaka : J. Appl. Cryst., 5 (2007), 241.
- 32) K.Tsuda and M.Tanaka : Applied Physics Express, 9 (2016), 071501.
- 33) J.H.C.Spence and J.Taftø : J. Microscopy, 130 (1983), 147.
- 34) S.Sakaida, Y.Shimokawa, T.Asaka, S.Honsa and Y.Iwamoto : Materials Research Bulletin, 67 (2015), 146.
- 35) M.Ohtsuka, S.Muto, K.Tatsumi, Y.Kobayashi and T.Kawata : Microscopy, 65 (2016), 127.

(2016年11月21日受付)



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

徐々にミクロへ

Toward a More Microscopic Approach

大塚貴之

Takayuki Otsuka

新日鐵住金(株) 技術開発本部
プロセス研究所 鋼圧一貫研究部

主幹研究員

筆者は2003年に当時新日本製鐵(株)一現新日鐵住金(株)に入社した後、圧延プロセス開発担当となり、当初は新型式知能圧延機に関する開発の下命を受けた¹⁾。本開発は大分厚板工場において厚板矯正機 Oita Plate Leveller (OPL) として実機適用され^{2,5)}、厚板という非常に大きなサイズの板の圧延・冷却形状と格闘することになった。板幅が広く板厚が薄い場合には、小さな伸びひずみ差で板形状が変化するため、板幅が大きくなればなるほど、逆に形状制御にはより精緻な精度が要求される。このように、小さな温度分布や材質分布が影響して大きな板形状変化に帰結してしまう現実を実感し、焼入れ時の応力変化や形状変化に与える変態塑性の影響を調査した学生時代の記憶が呼び起こされた。

1 変態塑性現象の実験的考察

変態塑性現象とは、金属材料が相変態をうけるときの、応力が負荷された場合に、その応力が降伏応力以下であっても大きな塑性変形を起こす現象をいい、熱処理変形や残留応力に大きな影響を及ぼすことが分かっている⁶⁻¹⁰⁾。このため、変態塑性データの実験的な同定が行われ^{11,12)} データベースの構築がなされてきた^{13,14)}。筆者が初めて変態塑性に出会ったのは京都大学の卒業研究で、当時担当教官の井上達雄先生(現埼玉工業大学特任教授、京都大学名誉教授)の元で変態塑性ひずみの実験的同定とモデル化を行った。井上研究室に配属された際は、将来鉄鋼の世界に進むとは思ってもよらなかったが、複数のテーマがある中で(じゃんけんにより)日本刀の焼入れ変形・残留応力に及ぼす変態塑性の影響というテーマを与えられたのは、現在の自分の鉄鋼プロセス研究の原点であるように思う。修士課程進学後も引き続き井上研究室での研究を続け、変態塑性ひずみ測定の実験では、堤らの実験¹⁰⁾を参考に、4点曲げによる測定を行い、熱ひずみや変態ひずみのような応力依存の無いひずみと分離する手法を用い、炭素鋼の変

態塑性ひずみ同定に成功した^{15,16)}。本実験結果を用いて、多相間の変態を考慮した変態塑性ひずみの定式化を行い¹⁷⁾、熱処理シミュレーションに用いてきた。この間、京都大学近くの材料学会での会合に参加させて頂き、専門家の方々から多くのご助言を頂いたことは非常によい経験となった。しかし、当時は鉄鋼材料に関する知識も薄く、変態塑性のメカニズムに関して、拡散変態は Greenwood-Johnson の効果¹⁸⁾、無拡散変態は Magee の効果¹⁹⁾ と念仏のように唱えるだけで、深く考察することは無かった。

2 変態塑性メカニズム解明に関する研究

入社後は研究所や製鉄所での開発業務に追われていたが、冷却時の鋼板形状変化を見る度に、変態塑性研究の必要性を感じた。しかし、抜本的にプロセスを変革するためには、現象を正確に理解し、制御することが必要であり、これまでの実験によるデータ取得だけでなく、メカニズムに踏み込む必要がある。ここから、変態塑性のメカニズムについて深く考えるようになった。まずは、変態時の体積変化により周囲の相にひずみの accommodation が生じ、塑性変形を起こすという Greenwood-Johnson の効果について、実験的に確認すると共に、マルテンサイト変態時に変態膨張を起こさないインバー合金を用いて実験を行い、変態膨張が小さい場合には変態塑性ひずみも小さくなることを確認し、図1に示すようにこれが無拡散変態にも適用可能であることを示した²⁰⁾。しかし同時に、フェライト変態やパーライト変態では、Greenwood-Johnson の効果を定式化した Leblond のモデル²¹⁾から計算される変態塑性係数とは絶対値が合わず、この原因が不明なままであった。

ここで、2011年から2013年の2年間、会社の制度を利用してパリ13大学の博士課程に入学する機会を得た。この機

会を利用して、Greenwood-Johnsonの効果を直接数値計算によって解き、実験とモデルとの乖離が説明できないか考えた。幸い、入社後に業務の合間を見つけて有限要素法 (FEM) による熱処理解析プログラムを作成していたので、これを使用する積りであった。一方で、研究室では高速フーリエ変換 (FFT) を用いた演算手法を用いており²²⁾、非常に効率がよく力学計算が可能であるため、FEMでは無くFFTを用いることになった。

ここでの計算は、これまでFEMを用いて行ってきたバルクの計算とは異なり、周期境界を持つ参照体積要素の計算となるため、よりミクロな視点に踏み込むことになる。ポロノイ多面体分割された多結晶体について、新相が核生成し成長していく過程を解くが、このとき新相の体積が旧相よりも大きい場合、このひずみの不整合を無くすような応力/ひずみが発生する。ここに外部から(マクロな) 応力を与えると、塑性ひずみが助長されるが、この関係を、結晶塑性高速フーリエ変換 (CPFPT) を用いて解くことになる。図2は外部から与える応力を変化させた場合の、変態塑性ひずみの計算例である。図2に示すように、変態の進行によって変態塑性ひずみが負荷応力に応じて発生している様子が分かる。変態終了時の変態塑性ひずみと負荷応力との関係をプロットし図3を

得る。負荷応力が比較的小さい場合には、負荷応力に対し変態塑性ひずみが線形となっており、この傾きが変態塑性係数である。一方、負荷応力が大きいと変態塑性ひずみが非線形的に大きくなる様子が計算によって再現された。従って、この現象は一般的な弾塑性論で説明することが可能で、変態相周りの塑性変形に対し、負荷応力が小さい場合には変態膨張による影響が支配的であるが、負荷応力が大きいと変態膨張による影響に加えて外部応力による影響が加わるため非線形となることが分かった。このように、今まで実験だけでは説明されなかった変態塑性ひずみの非線形メカニズムが解明された²³⁾。

さらに、数値試行を繰り返すと、無負荷状態でも変態塑性ひずみが発生するという面白い現象が計算によって示された^{24,25)}。この現象が起こるのは、変態前の材料に異方性がある場合で、この異方性は例えば前加工や集合組織によって与えられる。すなわち、前加工で圧縮のひずみが付与されている場合、引張りの変態塑性ひずみが助長され、前加工で引張りのひずみが付与されている場合、逆に圧縮の変態塑性ひずみが助長されるが、この変態塑性ひずみは変態中に無負荷であっても発生する。この現象はTalebら²⁶⁾によって実験的に示されていたが、初めて計算によって確認され、そのメカニズムは以下のように説明される。予加工によって導入された背応力は、変態膨張に伴う応力によって異方性を持ったひずみを生じ、結果的に異方性を伴う変態塑性ひずみを生じる。この他にも、変態塑性に与える結晶粒径の影響や、バンド組織(ミクロ偏析)の影響など多くの現象が数値計算結果から解明された²⁷⁾。この成果によって博士号を取得することができた。パリで行われた公聴会の数ヶ月後にフランス大使館で博士号が授与されたのはよい思い出である(図4)。

このように変態塑性現象をよりミクロな単位から考察することにより、多くの現象をより理解することができるようになった。ところが、残念なことに本モデルを用いて計算した

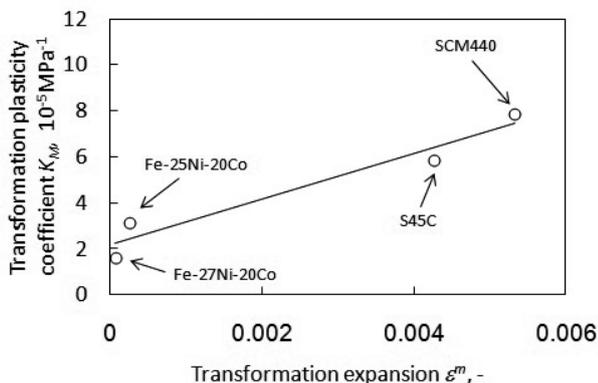


図1 マルテンサイト変態における変態塑性ひずみの変態膨張依存性

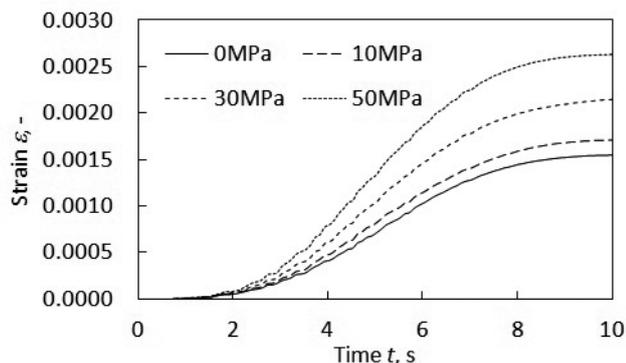


図2 等温変態中の変態塑性ひずみの変化

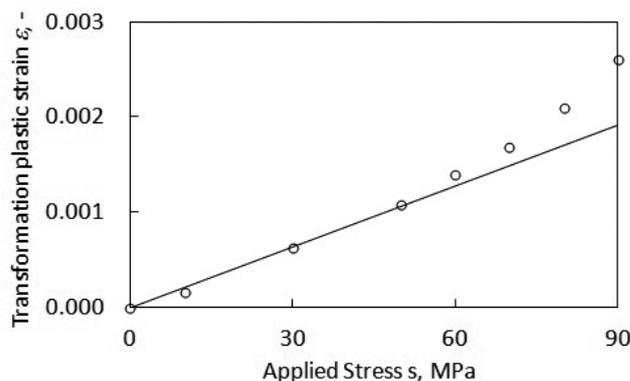


図3 負荷荷重と変態塑性ひずみとの関係



図4 東京南麻布のフランス大使館科学技術部にて

場合、Leblondのモデルとほぼ同等の変態塑性ひずみを予測し、フェライト変態やパーライト変態における変態塑性ひずみの実験値よりも小さな値となってしまうことが判明した。そこで次のステップとして、拡散界面と応力との関係性について、分子動力学法などを用いてさらにマイクロな視点から追及したいと考えている。

このように変態塑性という一現象だけでも不明な点が多く残されており、鉄鋼プロセス研究にはまだまだ課題が山積みである。今後のプロセス研究として、よりマイクロな視点を取り入れて行くことで、新たな研究開発に努めて行きたいと考えており、今後とも皆様のご指導・ご支援を賜りたい。

参考文献

- 1) 小川茂, 山田健二, 大塚貴之, 井上剛, 若月邦彦, 空尾謙嗣, 竹下幸一郎, 池田佳士郎, 中川大輔: 鉄と鋼, 100 (2014) 12, 1490.
- 2) 白石利幸, 小川茂, 東田康宏, 左田野豊, 若月邦彦, 池本祐二: 材料とプロセス, 22 (2009) 1, CD-ROM.
- 3) 大塚貴之, 小川茂, 山田健二, 井上剛, 若月邦彦, 中川大輔: 材料とプロセス, 22 (2009) 2, CD-ROM.
- 4) 大塚貴之, 小川茂, 山田健二, 井上剛, 若月邦彦, 中川大輔: 材料とプロセス, 23 (2010) 2, CD-ROM.
- 5) T.Otsuka, S.Ogawa, K.Yamada, T.Shiraishi, Y.Higashida, Y.Sadano, K.Kobayashi, N.Shiomi, K.Hayashi, A.Sako, H.Matsuda, Y.Ikemoto and H.Furumoto: Proc. of South East Asia Iron and Steel Industry Conf., (2009)
- 6) T.Inoue, T.Uehara and T.Ohtsuka: Proc. of the Fifth World Congr. on Comput. Mech. (WCCM-V), (2002)
- 7) 宮尾光介, 王志剛, 井上達雄: 材料, 35 (1986) 399, 1352.
- 8) 福本学, 吉崎正敏, 今高秀樹, 岡村一男, 山本憲司: 材料, 50 (2001) 6, 598.
- 9) 堤一之, 仲山公規, 中川知和, 森本禎夫, 山内学, 大江憲一: 材料とプロセス, 13 (2000), 1051.
- 10) 堤一之, 仲山公規, 中川知和, 森本禎夫, 山内学, 大江憲一: 材料とプロセス, 13 (2000), 1052.
- 11) 堤一之, 中川知和, 仲山公規: 日本機械学会2004年度年次大会講演論文集, 1 (2004), 445.
- 12) 長岐滋, 朝岡真一, 両角克之, 大下賢一: 日本機械学会論文集A編, 69 (2003) 684, 1230.
- 13) T.Inoue and K.Okamura: Proc. of 5th Int. Symp. on Quenching and Distortion Control, ASM, St.Louis, October (2000), 753.
- 14) 岡村一男: 材料, 55 (2006) 5, 529.
- 15) 大塚貴之, 井上達雄: 材料, 52 (2003) 10, 1198.
- 16) T.Otsuka and T.Inoue: Proc. of the 1st ASM Int. Surface Eng. and the 13th IFHTSE Congr., ASM Int., (2003), 201.
- 17) T.Otsuka and T.Inoue: Int. J. Mater. and Prod. Technol., 24 (2005) 1-4, 292.
- 18) G.W.Greenwood and R.H.Johnson: Proc. Roy. Soc., 283A (1965), 403.
- 19) C.L.Magee: Ph.D. Thesis of Carnegie Institute of Technology, (1966)
- 20) T.Otsuka, A.Akashi, S.Ogawa, T.Imai and A.Egami: J. Soc., Mater. Sci. Jpn., 60 (2011) 10, 937.
- 21) J.C.Leblood, J.Devaux and J.C.Devaux: Intl. J. Plasticity, 5 (1989), 551.
- 22) H.Moulinec and P.Suquet: Comput. Methods Appl. Mech. Eng., 157 (1998), 69.
- 23) T.Otsuka, R.Brenner and B.Bacroix: Proc. of 4th Intl. Conf. of Thermomechanical Processing, (2012)
- 24) T.Otsuka, R.Brenner and B.Bacroix: Proc. of Intl. Conf. of Rolling 2012, (2012), 148.
- 25) T.Otsuka, R.Brenner and B.Bacroix: Key Eng. Mater., 622-623 (2014), 687.
- 26) L.Taleb and S.Petit: Int. J. of Plast., 22 (2006), 110.
- 27) T.Otsuka: PhD thesis of Université Paris, 13 (2014)

(2017年1月24日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

京都大学 名誉教授 埼玉工業大学 特任教授

井上 達雄

大塚氏の本文で、「日本刀」、「変態塑性」が取り上げられています。前者については拙著書を参照して頂くとして、後者については相変態をうける過程の変態・熱・力学に馴染んだ方でも、十二分に認識しておられない向きがあるので、改めてのべておきましょう。

力学場の解析に出てくるひずみは、応力の存在による弾性ひずみ、塑性（一般には非弾性）ひずみ、温度変化と場所による分布に起因する熱ひずみ、変態が進行して別組織が変わるとき（フェライト→パーライト変態、オーステナイト→マルテンサイト変態など）の体積変化による変態ひずみ、それに変態塑性ひずみがあります。この変態塑性ひずみは変態ひずみとは別のものです。前者は応力の存在に直接かわりませんが、後者は変態過程で応力が生じる時にだけ大きな塑性変形が出ることで、変態超塑性とも言われます。例えば50MPaで0.05%にもなりますから、これを考慮するかしないかは計算結果におおきな影響が出てきます。

この変態塑性のメカニズムと実験を大塚氏は大学院時

代にやってくれました。直径3mm、長さ300mmの棒を800度に加熱して両端を支持して荷重をかけますと、空中で冷却するとき、初めは材料力学のはりのたわみでもとめられる小さなたわみが出ますが、変態開始点にまで冷却が進むと急に数十mmの変態塑性たわみがでてきたのには感激したものです。これを基盤にして変態塑性のメカニズムを考えてくれました。さらにそれを私が一般化する動機を作ってくれたり、会社では特別な試験装置を作ったり、フランス留学でフーリエ変換法を多結晶体に適用してメカニズムを明らかにして（2年足らずで）学位をもらっています。

弟子というにはおこがましいのですが、私の研究室にいた中で、まさにトップクラスの最愛の弟子で、幅広い分野に果敢に取り組む優秀さと、人間的な爽やかさが好きです。できれば、発言のときにもう少し声を大きくしてくれたら、年老いて聞きづらくなった私にはありがたいし、男の職場で将来益するところがおおきいと思います。

(株)神戸製鋼所 技術開発本部 機械研究所 構造強度研究室 室長

堤 一之

大塚さんと初めてお会いしたのは、井上達雄先生の指導を受けられていた2002年ですので、15年近い付き合いとなります。その彼からの依頼があり、僭越ながらコメントをお引き受けしました。

2002年当時、私どもが検討中だった曲げ試験による変態塑性係数の同定手法について、井上研究室でお話する機会をいただき、そのとき居られた学生が大塚さんでした。以来、変態塑性に関わる技術を中心に、学会活動などでご一緒させていただいております。これまでの付き合いで、彼は企業研究者のお手本となるかたと思いますので、はじめに人となりを紹介させていただきます。

私感ですが、企業研究者には、研究力と人間力のふたつが大事だと考えております。研究力とは、研究課題を解決する力と適応力で成り立ちます。前者についての彼の優秀さについては、会社に海外留学を認められたことや、研究論文の数々で知ることができます。一方後者は、本文でも触れられているように、多様な業務に追われつつも自分の興味を失わず、気付くとそれぞれの課題と自分の興味を結びつける粘り度でわかります。企業人として、同じテーマを続けていくことは稀であり、この自分に引き付ける力、適応力は大事です。

一方、人間力が大事であることは、開発の過程のみならず、その成果を実際のプロセスや製品に適用する段階で多くの協力者を必要とすることから明らかです。その

点大塚さんは、人を惹き付ける力も持ったかたと思っています。学会の懇親会などでは、技術レベルも年齢も異なる方々とお話することになりますが、どのような人にも打ち解けておられ、技術の深い話から世間話まで楽しそうに話されています。

次に、大塚さんの研究成果について、交流のきっかけとなった変態塑性係数の曲げ試験による同定の問題で紹介したいと思います。一般的には、一定荷重（主に引張）下で試験片を冷却することで変態時のひずみを求める試験を行います。異なる荷重ごとに同様の試験を行い本文の図3を得るため、複数の試験が必要です。曲げ試験法を用いると、それが1回の試験ですむのではないかと、というのが当時の提案でした。しかし、彼が本文で述べているように、変態塑性のメカニズムを明確にしないと、引張と圧縮、曲げでそれぞれ図3の勾配が異なる事実が説明できません。彼の研究は、その解決を大きく前進させるものです。曲げ試験で言えば、応力誘起されることで板厚方向の変態開始タイミングが変化するという弱点もわかっています。この点については、今後とも議論していけたらと考えています。

最後になりますが、上からは頼りにされ、下からは目標にされる存在となっておられる大塚さんが、これから企業研究者の手本として活躍され続けることを祈念します。



私の論文

今振り返ってみて、行間にこめた思い、エピソード

マクロ偏析予測と透過率評価

Evaluation of Permeability to Predict Macrosegregation

棗 千修

Yukinobu Natsume

秋田大学 大学院理工学研究科
物質科学専攻

准教授

1 はじめに

本稿では第77回俵論文賞を受賞した拙著「3次元数値流体解析による柱状デンドライト組織の透過率評価¹⁾」に関して論文には書き切れなかった研究の背景やエピソードなどを紹介する。なお、本論文に関する研究はISIJ International Vol.53 (2013) No.5に掲載された拙著「Quantitative Model to Determine Permeability for Columnar Dendritic Structures²⁾」との2編構成となっており2編分の内容を本論文として、「マクロ偏析予測と透過率」と題し、研究背景から今後の課題までをエピソードを交えて述べていただきたいと思います。

2 研究背景

本論文の背景には、鉄鋼材料の鑄造プロセスの積年の課題であるマクロ偏析低減に向けた予測シミュレーションモデルの開発がある。鉄鋼材料はほぼ全て連続鑄造法か造塊法によって製造されるが、その鑄造過程では必ず偏析が生じる。鑄片・鑄塊の割れにつながるマクロ偏析は限りなくゼロにしたいとの思いが現場の希望であろう。1970~1980年代、製造現場では連続鑄造鑄片に生成する中心偏析や大型鋼塊に生成する逆V偏析などのマクロ偏析に悩まされていたと思われる。その証拠としてこの時期、非常に多くの実験研究や実鑄塊の実態調査の報告があり、和文だけでも論文数は非常に多い³⁻¹³⁾。その成果として固液共存領域の流動がマクロ偏析の生成に大きく関与していることが突き止められ、現在ではマクロ偏析起因の鑄造割れによる不良は低減している。しかし、完全にマクロ偏析の生成メカニズムが解明され、制御技

術が確立したわけでは無く、新鋼種開発などでは現在でもまだマクロ偏析は解決課題の一つとなっている。

計算機の日覚ましい発展もあり1990年代頃からマクロ偏析生成メカニズムの解明に数値シミュレーションが利用されるようになってきた¹⁴⁻²³⁾。マクロ偏析シミュレーションは、温度場(凝固熱伝導方程式)、濃度場(拡散方程式)、流れ場(Navier-Stokesの式、連続の式)の支配方程式の連成計算により実行されるが、モデルの最大の特徴は、凝固時の固液共存領域にDarcy流れを仮定して、Navier-Stokesの式にDarcy項を外力項として加え液相の伴う全ての領域の流れを考慮しているところである。初期のシミュレーションは非常に粗い要素サイズでの計算であったため、マクロ偏析の分布がわかる程度であったが、近年では実鑄塊で観察されるような偏析帯の生成を見事に再現できるようになってきた。しかしながら、マクロ偏析を定量的に予測できるモデルは今でも確立していない。多くのモデルで考慮されるDarcy流れは多孔質媒体中の流体の流速を表す関係式であり、流体がどの程度浸透するか、あるいはどの程度流れやすいかを定めるパラメータが含まれている。これが透過率(Permeability)と呼ばれるもので、本論文の題目にも現れる重要パラメータである。Darcy流れによる流速は、多孔質媒体の空隙率、圧力損失と比例関係にありその比例定数に相当するものが透過率である。したがって多孔質媒体の状態(空隙率)が同じであってもマクロ偏析シミュレーションの結果は透過率の値に左右される。ここでいう多孔質媒体とは凝固組織いわゆるデンドライトのことであり、数mm以上にもなるマクロスケールで生成する偏析が数十~数百 μm のミクロスケールの組織に支配されているということになる。これは、厳密にマクロ偏析を

* [今回の対象論文]

棗千修, 高橋大喜, 河嶋佳純, 谷川英司, 大笹憲一: 「3次元数値流体解析による柱状デンドライト組織の透過率評価」, 鉄と鋼, Vol.99(2013), No.2, pp.117-125 (第77回俵論文賞受賞論文)

予測するためにはミクロスケールでモデル化しなければならないことを意味するが、計算コストなどの点であり現実的なモデルになるとは言えない。ゆえにDarcy流れによる近似を精度良く行える適切な透過率の評価が重要となる。すなわちマクロ偏析の予測精度の鍵を握る因子の一つが透過率ということになる。

金属材料に対する透過率測定の実験研究は1960~1980年代に盛んに行われており、透過率と液相率の関係が系統的に調査されている²⁴⁻³⁴。また、柱状 dendrait 組織に対しては流れの方向によって透過率が異なること(透過率の異方性)なども明らかにされた。多くのシミュレーションでは、透過率 K と液相率 g_L の関係として(1)式のKozeny-Carmanの式が用いられる³⁵。これは実験的に様々な多孔質媒体に対してこの関係が良く当てはまるからであろう。ここで d は dendrait アーム間隔であり、一応、凝固組織の情報が含まれている。一応と述べた理由は、研究論文によってこれが1次 dendrait アームであったり、2次 dendrait アームであったりするからである。言い換えれば透過率を大ざっぱな見積もりでシミュレーションしている例が少なくないということである。

$$K = \frac{d^2}{180} \frac{g_L^3}{(1-g_L)^2} \dots\dots\dots (1)$$

定性的なマクロ偏析の再現が目的であればそれでも良いが、実際のものと同様したマクロ偏析分布は再現できても予測はできない。そこで、マクロ偏析予測を可能にする上で重要なパラメータである透過率をより正確なモデルとして評価できないかというのが、本論文のモチベーションであった。

3 本論文の概要

前章で述べた研究背景から透過率の重要性はご理解いただけたと思う。実験による透過率の測定は1980年中頃までの論文²⁴⁻³⁴に多く見られるが、近年ではあまり見られなくなっている。これは実験の難しさもあると思われ、より簡便な流体解析を用いた透過率の評価法を提案する論文³⁶⁻³⁹が近年見られるようになってきた。本論文の目的も流体解析を用いた透過率評価法の提案¹とその方法で得られた結果に基づく透過率の定量的な評価モデルの提案²である。まず前者の透過率評価法であるが、詳細は原著論文¹を参照していただくこととして、その骨格だけを説明する。透過率を求める基本的な手順は、 dendrait 組織を境界条件として一方向に流れる液相の dendrait 間流れを流体解析によって計算し、定常状態での圧力損失から Darcy 則にしたがって透過率を算出する。したがって、ポイントとなるところは dendrait

組織の境界条件である。先行研究では、 dendrait 組織を模した対称的な幾何学模様(丸や菱形など)を2次元的に並べて2次元の境界条件を作成したもの^{36,37}や、最近ではX線CTによる実際の凝固組織のスライス画像から dendrait 部分を抽出して3次元再構築して境界条件を作成したもの³⁸、デカンテーションによって凝固途中の溶湯を捨て組織を取り出し3次元スキャナーで境界条件を作成したもの³⁹などが報告されている。2次元の境界条件については、流体の流れ方に制約ができるため妥当な透過率を算出することが難しいと思われるが、1990年代前半に行われた研究としては先駆的で価値あるものであると言える。実際の組織から3次元の境界条件を作成する方法については、実際の透過率を算出する方法としては有効であるが、狙いの液相率(あるいは空隙率)となる組織を実験で作りに上げることは難しく、液相率の異なる系統的な透過率を算出するためには相当数の実験を行う必要があると思われる。結果として境界条件そのものもコンピュータ上で作成する方法が良いという結論となり、セルオートマトン法によってシミュレーションした3次元等軸 dendrait を境界条件として透過率を算出した研究⁴⁰も報告されている。本論文では、3次元 dendrait 組織の作成に2次元フェーズフィールド法⁴¹と3D-CADを用いた(Fig.1)。現在では3次元フェーズフィールド法によって任意の組織(境界条件)を作り上げることが可能であるが、当時は3次元計算をすぐに実施できる手段が無く、共著者の河嶋さん、谷川さんに無理を言って3D-CADで作成してもらった。2次元平面の dendrait 形状が非常にリアルな3次元形状に作り込まれており、これは今でもかなりのお気に入りである。Fig.1を見ていただければわかると思うが本論文では柱状 dendrait 組織を作成した。これは前章で

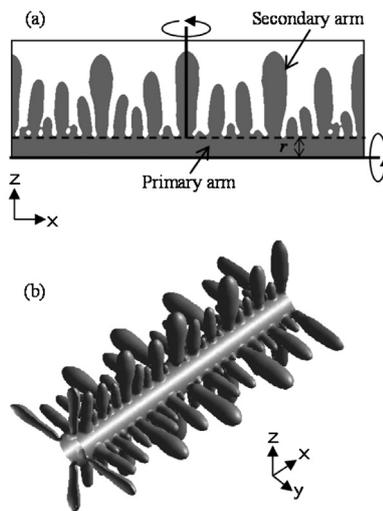


Fig.1 Dendritic morphology used in the present work¹.
 (a) 2D dendrite calculated by phase-field method.
 (b) 3D dendrite made by CAD.

述べた透過率の異方性を評価しなかったからである。透過率は流れやすさを示すパラメータであるから1次デンドライトアームに対して平行方向の流れと垂直方向の流れではその流路も流れやすさも異なる。計算結果では平行方向の流れの透過率が2~3倍程度大きくなっていった。これらの計算結果をMurakamiら^{28,29}、Liuら³⁰の実験結果と比較したものがFig.2であるが、非常に良い相関関係を示しており、この図を作成したとき本論文での透過率評価法の正当性を確認できたことに加え、精度の高い実験が30年も前になされていたことに感心した。

ここからは透過率の定量的な評価モデルの構築についてである。結果として本論文で構築したモデルはModified Kozeny-Carman (MKC) モデルと呼ぶこととしたが、その名の通りKozeny-Carmanの式がベースとなっている。もちろん最初からKozeny-Carmanの式がベースになるとは考えていなかった。先に述べたように計算結果と実験結果が非常に良い相関を示したことからKozeny-Carmanの式が多くの多孔質媒体に対して良く当てはまることから、とりあえず(1)式の d に適切な値を入れてグラフ上で比較してみることにした。なんと計算値と実験値が(1)式の曲線上にきれいに並んでおり、この図を見たとき少し鳥肌が立った。これはいける！このときKozeny-Carmanの式の凄さとすばらしさを

感じた。もちろんKozeny-Carmanの関係以外にもいくつかの関係式と計算値を比較してみたが、それほど良く一致するものはなかった (Fig.3)。そこからはKozeny-Carmanの式をベースとすることに決め、Kozeny定数と呼ばれる形状因子を組織の異方性を説明できるように理論立てていくことにやや苦戦したが、透過率の異方性を定量的に評価できる一つのモデルとしてMKCモデルを完成させた。Fig.4が本論文の流体解析で算出した透過率とMKCモデルの透過率の比較であるが、今見ても非常に良く一致していると思う。最終的にMKCモデルは1次デンドライトアーム間隔 d_1 、2次デンドライトアーム間隔 d_2 、液相率 g_L の3つの変数のみで(2)式のように整理した。

$$K_{P-MKC} = 0.0194 \left[\frac{d_2}{1+(d_2/d_1)} \right]^2 \frac{g_L^3}{(1-g_L)^2} \dots\dots\dots (2)$$

$$K_{N-MKC} = 0.0097 \left[\frac{d_2}{1+(d_2/d_1)+2(d_2/d_1)^2} \right]^2 \frac{g_L^3}{(1-g_L)^2}$$

ここで、 K_{P-MKC} 、 K_{N-MKC} はそれぞれ平行方向の流れ、垂直方向の流れに対する透過率である。Fig.5が d_1 、 d_2 、 g_L がわかっている過去の実測データと(2)式による計算値の比較であるが、

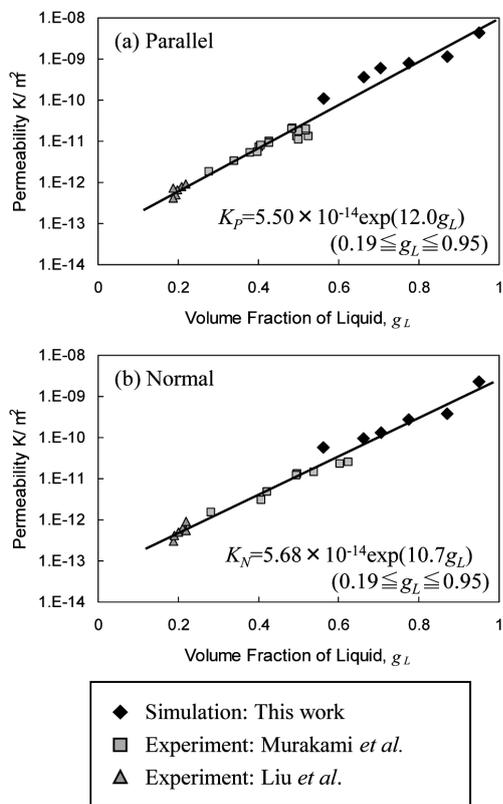


Fig.2 Relation between permeability and volume fraction of liquid for our simulations and the experiments¹⁾.

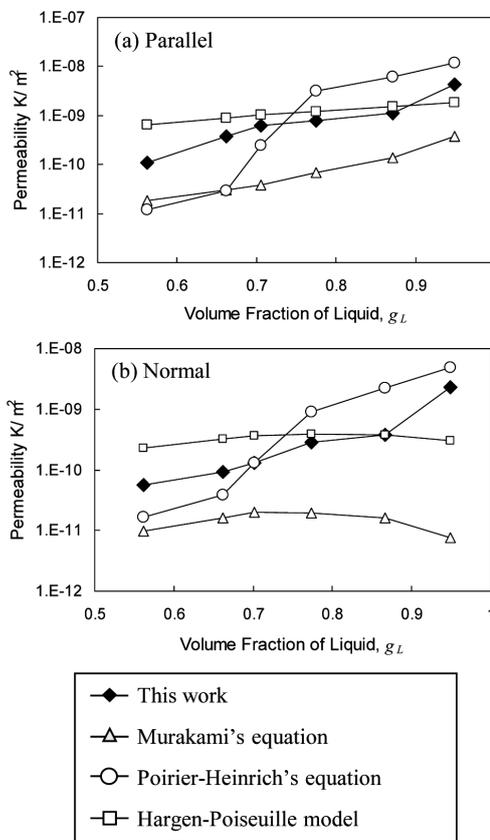


Fig.3 Relation between permeability and volume fraction of liquid for our simulations and three equations¹⁾. (a) Flow parallel to the primary dendrites. (b) Flow normal to the primary dendrites.

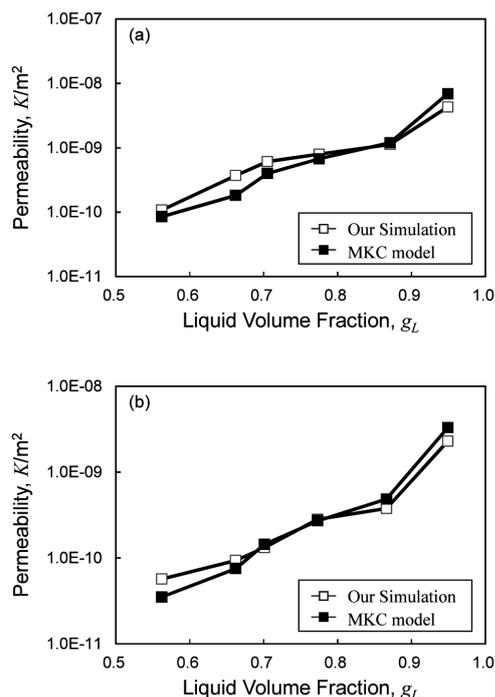


Fig.4 Relationship between the liquid volume fractions and the permeability in our previous simulations and the present MKC model²⁾. (a) For a flow parallel to the primary arms. (b) For a flow normal to the primary arms.

MKCモデルによる透過率が多くの実測データと相関関係を示していることがわかる。

4 今後の課題

研究背景でも述べたがマクロ偏析予測を可能とするモデル構築が、本論文の研究の根底にある。その意味ではMKCモデルによって、マクロ偏析予測に一步近づいた議論が今後展開できるのかもしれない。(2)式に示すMKCモデルは、 d_1 , d_2 , g_L の3つの変数だけで構成されているためマクロ偏析シミュレーションモデルにも組み込みやすくなっている。 d_1 , d_2 は温度場計算の結果から冷却速度や温度勾配との関係式を用いて容易に求められ、液相率は平衡状態図から算出できる。すなわち、シミュレーションの中でリアルタイムに各計算要素の透過率が更新され、より適切な組織の状態を反映したシミュレーションができるようになる。また、本論文では、凝固組織のより詳細な情報をマクロ偏析シミュレーションに反映させるために透過率の異方性も考慮している。もちろん異方性を考慮した透過率の関係式は、MKCモデル以外にもいくつか提案されている^{16,20,42)}。しかしながら透過率の異方性を考慮する場合には、1次 dendrait アームの成長方向の定義が必要となってくる。通常、マクロ偏析シミュレーションでは凝固組織形成を同時に計算することはなく、dendrait の成長方向は厳密にはわからない。フェーズフィールド法な

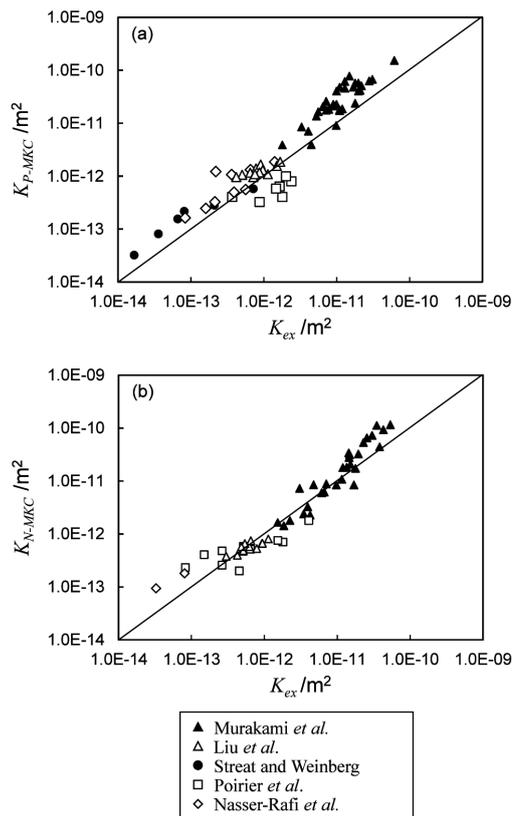


Fig.5 Comparison of the permeability obtained from experiments and the MKC model²⁾. (a) For a flow parallel to the primary arms. (b) For a flow normal to the primary arms.

どでの dendrait 成長シミュレーションを併用できればこのような問題は発生しないが、dendrait 成長シミュレーションとの併用は膨大な計算量となるため現時点では不可能であり、将来もかなり厳しいと言わざるを得ない。したがって、何らかの仮定をおいて近似的に成長方向を定義する必要がある。最も簡便な方法は座標軸に成長方向を合わせてしまうことである。本稿では誌面の都合上詳細は述べられないが、座標軸を成長方向として単純に異方性を定義した場合でもマクロ偏析シミュレーションの結果はかなり変わってくる。

今後は透過率の異方性だけではなく、等軸晶組織の場合はどうなのかなどミクロスケールの情報をどのようにマクロ偏析シミュレーションモデルに適切に組み込んでいくかが課題となってくるだろう。根本的な発想の転換も必要になってくるかもしれない。

5 おわりに

マクロ偏析予測シミュレーションの高精度化に向けて適切な透過率を評価する目的で始めた本論文の研究背景と概要を中心にエピソードを交えて紹介した。今振り返ってみると当初モデル構築までは想定していなかったが、やや力業である

3D-CADによるデンドライト形態作成から始まり、透過率の算出、Kozeny-Carmanの式との比較と順を追ってモデル構築まで進み、比較的順調に結果が得られたと思う。これで透過率に関する課題が全て解決したわけではないが、マクロ偏析の予測精度は徐々に高まっていくものと期待している。今後は、MKCモデルを導入したマクロ偏析シミュレーションによりどの程度予測精度が向上したかを検証していくこととなる。最後に、本研究は著者の前職場（神戸製鋼所）で行った研究であり、誌面を拝借して共著者とすばらしい研究環境を整えて下さった関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 棗千修, 高橋大喜, 河嶋佳純, 谷川英司, 大笹憲一: 鉄と鋼, 99 (2013), 117.
- 2) Y.Natsume, D.Takahashi, K.Kawashima, E.Tanigawa and K.Ohsasa : ISIJ Int., 53 (2013), 838.
- 3) 田代晃一, 轟木透, 木村重夫: 鉄と鋼, 57 (1971), 1479.
- 4) 鈴木是明, 宮本剛汎: 鉄と鋼, 63 (1977), 53.
- 5) 鈴木是明, 宮本剛汎: 鉄と鋼, 65 (1979), 1571.
- 6) 森信幸, 大城桂作, 松田公扶: 日本金属学会誌, 43 (1979), 851.
- 7) 森信幸, 大城桂作, 松田公扶: 日本金属学会誌, 43 (1979), 858.
- 8) 拝田治, 岡野忍, 江見俊彦, 河西悟郎: 鉄と鋼, 67 (1981), 954.
- 9) 森信幸, 笹栗信也, 大城桂作, 松田公扶: 日本金属学会誌, 50 (1986), 480.
- 10) 森信幸, 大城桂作: 日本金属学会誌, 50 (1986), 486.
- 11) 山田人久, 桜井隆, 竹之内朋夫, 岩波義幸: 鉄と鋼, 73 (1987), 1706.
- 12) 山田人久, 桜井隆, 竹之内朋夫: 鉄と鋼, 75 (1989), 97.
- 13) 山田人久, 桜井隆, 竹之内朋夫: 鉄と鋼, 75 (1989), 105.
- 14) J.C.Heinrich, S.Felicelli, P.Nandapurkar and E.R.Poirier : Metall. Trans. B, 20B (1989), 883.
- 15) S.D.Felicelli, J.C.Heinrich and D.R.Poirier : Metall. Trans. B, 22B (1991), 847.
- 16) D.R.Poirier and J.C.Heinrich : Mater.Characterization, 32 (1994), 287.
- 17) H.C.Schneider, J.P.Gu, C.Beckermann, W.J.Boettinger and U.R.Kattner : Metall. Mater. Trans. A, 28A (1997), 1517.
- 18) S.D.Felicelli, D.R.Poirier and J.C.Heinrich : Metall. Mater. Trans. B, 29B (1998), 847.
- 19) C.Beckermann : International Materials Reviews, 47 (2002), 243.
- 20) J.C.Heinrich and D.R.Poirier : C.R.Mecanique, 332 (2004), 429.
- 21) J.Li, M.Wu, J.Hao and A.Ludwig : Computational Materials Science, 55 (2012), 407.
- 22) 澤田朋樹, 及川勝成, 安斎浩一: 鉄と鋼, 99 (2013), 135.
- 23) A.Saad, Ch.-A.Gandin and M.Bellet : Computational Materials Science, 99 (2015), 221.
- 24) T.S.Piwonka and M.C.Flemings : Trans.Metall.Soc. AIME, 236 (1966), 1157.
- 25) D.Apelian, M.C.Flemings and R.Mehrabian : Metall. Trans., 5 (1974), 2533.
- 26) N.Streat and F.Weinberg : Metall. Trans.B, 7B (1976), 417.
- 27) K.Murakami and T.Okamoto : Acta Metall., 32 (1984), 1741.
- 28) K.Murakami, A.Shiraishi and T.Okamoto : Acta Metall., 31 (1983), 1417.
- 29) K.Murakami, A.Shiraishi and T.Okamoto : Acta Metall., 32 (1984), 1423.
- 30) C.Y.Liu, K.Murakami and T.Okamoto : Mater. Sci. Tech., 5 (1989), 1148.
- 31) R.Nasser-Rafi, R.Deshmukh and D.R.Poirier : Metall. Trans., 16A (1985), 2263.
- 32) D.R.Poirier : Metall. Trans., 18B (1987), 245.
- 33) D.R.Poirier and P.Ocansey : Mater.Sci.Eng., A171 (1993), 231.
- 34) S.Ganesan, C.L.Chan and D.R.Poirier : Mater. Sci. Eng., A151 (1992), 92.
- 35) J.A.Dantzig and M.Rappaz : Solidification, EPFL Press, (2009), 131.
- 36) M.S.Bhat, D.R.Poirier and J.C.Heinrich : Metall. Trans., 26B (1995), 1049.
- 37) J.C.Heinrich, D.R.Poirier and D.Nagelhout : Comput. Methods Appl. Mech. Eng., 133 (1996), 79.
- 38) D.Fuloria, P.D.Lee and D.Bernard : Mater. Sci. Eng., A494 (2008), 3.
- 39) J.Madison, J.Spewart, D.Rowenhorst, L.K.Aagesen, K.Thornton and T.M.Pollock : Acta Mater., 58 (2010), 2864.
- 40) S.G.R.Brown, J.A.Spittle, D.J.Jarvis and R.Walden-Bevan : Acta Mater., 50 (2002), 1559.
- 41) Y.Natsume : R & D Kobe Steel Engineering Reports, 58 (2008), 35.
- 42) R.G.Santos and M.L.N.M.Melo : Mater. Sci. Eng., A391 (2005), 151.

(2017年2月20日受付)

会員へのお知らせトピックス

※詳細は本会ホームページをご覧ください。

平成29年度鉄鋼工学セミナー「製鋼熱力学専科」受講案内

8月28日(月) 13:00～29日(火) 12:00、於：日本鉄鋼協会 第1・2会議室、申込締切：8月4日

<https://www.isij.or.jp/mugwjecfn>

第25回鉄鋼工学アドバンスセミナー受講者募集案内

10月23日(月)～25日(水)、於：セミナーハウス クロス・ウェーブ船橋、申込締切：6月12日

<https://www.isij.or.jp/mul8oyevj>

行事等予定	268頁
次号目次案内	271頁
会員欄(入会者・死亡退会者一覧)	272頁

行事等予定

太字は本会主催の行事。国際会議で○は協会にてサーキュラー等を入手できます。
行事等の詳細は、本会ホームページ、★印はイベントカレンダーリンク先URLをご参照ください。

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
2017年5月			
15日	★腐食防食部門委員会 第316回例会(大阪)	日本材料学会	事務局 船越英子 Tel. 075-761-5321 jimu@jsms.jp
15～17日	★トライボロジー会議2017春 東京(東京)	日本トライボロジー学会	事務局 Tel. 03-3434-1926 jast@tribology.jp
18, 19日	★第29回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム(岡山)	日本AEM学会	シンポジウム事務局 sead29@mif.sys.okayama-u.ac.jp
18, 19日	★平成29年度第1回熱処理技術セミナー(福岡)	日本熱処理技術協会	代表理事 川壽一博 Tel. 03-6661-7167 info@jsht.or.jp
20, 21日	★軽金属学会第132回春期大会(愛知)	軽金属学会	Tel. 03-3538-0232 jilm1951@jilm.or.jp
22日	鉄鋼プレゼンス研究調査委員会 歴史を変える転換技術研究フォーラム「第39回 歴史を変える転換技術研究会」テーマ:鉄鋼業の革新に貢献した耐火物技術(その3)(東京 当日参加可)	日本鉄鋼協会	立命館大学 山末英嗣 Tel. 077-561-4693 yamasue@fc.ritsumei.ac.jp
23日	第174回秋季講演大会討論会・国際セッション申込締切(4号213頁)	日本鉄鋼協会	学術企画グループ Tel. 03-3669-5932
23日	第30回環境工学連合講演会(東京)	日本学術会議 土木工学・建築学委員会学際連携分科会	空気調和・衛生工学会事務局 半田 Tel. 03-5206-3600 handa@shase.or.jp
23～26日	★第53回真空技術基礎講習会(大阪)	日本真空学会関西支部・大阪府技術協会・日本真空工業会関西支部	大阪府技術協会 三浦智子 Tel. 0725-53-2329 g-kyoukai@dantai.tri-osaka.jp
24～26日	★自動車技術展:人とくるまのテクノロジー展 2017(神奈川)	自動車技術会	http://expo.jsae.or.jp/
24～26日	★第54回日本伝熱シンポジウム(埼玉)	日本伝熱学会	実行委員会 事務局 Tel. 04-7136-4647 symp2017@htsj-conf.org
26日	★第2回マルチスケール材料力学シンポジウム(第22回分子動力学シンポジウム・第10回マイクロマテリアルシンポジウム)(愛知)	日本材料学会	事務局 船越英子 Tel. 075-761-5321 jimu@jsms.jp
30～1日	★第73回学術講演会(北海道)	日本顕微鏡学会	運営事務局 Tel. 011-272-2151 jsm73@c-linkage.co.jp
31～2日	★第22回計算工学講演会(埼玉)	日本計算工学会	Tel. 03-3868-8957 office@jcses.org
2017年6月			
2日	★第103回シンポジウム「次世代自動車の車体軽量化における材料・加工技術の開発トレンド Ⅲ」～マルチマテリアル車体時代を担う材料たちの現状と将来展望～(東京)	軽金属学会	Tel. 03-3538-0232 jilm1951@jilm.or.jp
5, 6日	平成29年度鉄鋼工学セミナー「精錬プロセス解析専科」(大阪 申込締切5月12日)	日本鉄鋼協会	新日鐵住金(株) 田村鉄平 Tel. 0479-46-5510 Fax. 0479-46-5142 tamura.x74.teppe@jp.nssmc.com
7日	第229回西山記念技術講座「鋼材の性能を引き出す溶接技術の最先端」(東京)	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-3669-5933
7日	計測・制御・システム工学部会シンポジウム(制御技術部会共催)「センシングデータにおけるデータサイエンスの最前線」(神奈川 申込締切5月25日)	日本鉄鋼協会	学術企画グループ Tel. 03-3669-5932
8, 9日	★平成29年度溶接入門講座(東京)	溶接学会 溶接教育委員会	講習会係 Tel. 03-5825-4073 jws-info@tg.rim.or.jp
8～10日	★平成29年度塑性加工春季講演会(岐阜)	日本塑性加工学会	事務局 井上聡美 Tel. 03-3435-8301 inoue@jstp.or.jp

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
9日	★腐食防食学会第72回技術セミナー(東京)	腐食防食学会	事務局 Tel. 03-3815-1161 ysm.hng-113-0033@jccor.or.jp
12日	創形創質工学部会 第46回トライボロジーフォーラム研究会 テーマ:「熱・冷間圧延における振動現象の現状と対策」 (東京 申込締切6月5日)	日本鉄鋼協会	JFEスチール(株) 松原行宏 Tel. 086-447-3931 yu-matsubara@jfe-steel.co.jp
13, 14日	★技術セミナー 「しなやかな水素社会に向けた材料強度評価技術の新展開」(東京)	日本高圧力 技術協会	Tel. 03-3516-2270 tanaka@hpj.org
14, 15日	★第22回動力・エネルギー技術シンポジウム(愛知)	日本機械学会	豊橋技術科学大学 機械工学系 飯田明由 Tel. 0532-44-6680 iida@me.tut.ac.jp
18~22日	★5th International Conference on Steels in Cars and Trucks (SCT2017) (Amsterdam-Schiphol, The Netherlands)	Steel Institute VDEh	TEMA Technologie Marketing AG info@sct2017.com
20日	第174回秋季講演大会一般講演・予告セッション・共同セッション・学 生ポスターセッション申込締切(4号213頁)	日本鉄鋼協会	学術企画グループ Tel. 03-3669-5932
23~25日	★スケジューリング国際シンポジウム2017(愛知)	スケジュー リング学会	事務局 橋本英樹 Tel. 03-5245-7368 office@scheduling.jp
28~30日	★自動車技術展:人とくるまのテクノロジー展 2017(愛知)	自動車技術会	http://expo.jsae.or.jp/
2017年7月			
5日	第230回西山記念技術講座「鋼材の性能を引き出す溶接技術の最先端」(大阪)	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-3669-5933
5, 6日	第37回防錆防食技術発表大会(東京)	日本防錆 技術協会	事務局 Tel. 03-3434-0451 jacc@mbf.sphere.ne.jp
5~7日	★第54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	学術振興部学術課 杉山 Tel. 03-5395-8081 gakujutsu@jrias.or.jp
6, 7日	★第27回電子顕微鏡大学(東京)	日本 顕微鏡学会	電子顕微鏡大学ヘルプデスク Tel. 03-3362-9743 jsm-denken@bunken.co.jp
12~14日	★日本結晶学会講習会「粉末X線解析の実際」(東京)	日本結晶学会	東京理科大学理学部応用化学科 Tel. 03-3260-4271 y.abe@rs.tus.ac.jp
13, 14日	平成29年度鉄鋼工学セミナー「凝固専科」 (神奈川 申込締切6月13日)	日本鉄鋼協会	新日鐵住金(株) 高平信幸 Tel. 0439-50-2888(内線3801) takahira.52f.nobuyuki@jp.nssmc.com
19~21日	★メンテナンス・レジリエンス TOKYO 2017(東京)	日本能率協会	事務局 Tel. 03-3434-1988 mente@jma.or.jp
19~21日	★サーモテック2017第7回国際工業炉・関連機器展(東京)	日本工業炉協会	サーモテック事務局 宮島 Tel. 03-3262-8446 info@thermotec-expo.com
20, 21日	★平成29年度J-PARC MLF産業利用報告会(東京)	JPARCセンター・総合科 学研究機構、茨城県、中性 子産業利用推進協議会	中性子科学センター 利用推進部 宮崎 司 Tel. 029-219-5300 t_miyazaki@cross.or.jp
23~28日	第43回鉄鋼工学セミナー(宮城 申込締切5月9日)	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-3669-5933
27, 28日	第51回X線材料強度に関するシンポジウム(兵庫)	日本材料学会	事務局 船越英子 Tel. 075-761-5321 jimu@jsms.jp
28日	★レアメタル研究会(東京)	東京大学生産 技術研究所	岡部徹研究室 学術支援専門職員 宮嵩智子 Tel. 03-5452-6314 okabelab@iis.u-tokyo.ac.jp
2017年8月			
1, 2日	★第26回日本エネルギー学会大会(愛知)	日本エネ ルギー学会	大会係 Tel. 03-3834-6456 taikai26happyo@jie.or.jp
17~19日	★2017年真空・表面科学合同講演会「第37回 表面科学学術講演会・第58 回真空に関する連合講演会」(神奈川)	日本表面科学会、 日本真空学会	事務局 上村恵美子 Tel. 03-3812-0266 taikail7@sss.org
19~21日	★日本混相流学会混相流シンポジウム2017(東京)	日本 混相流学会	実行委員会事務局 konsosymp@jsmf.gr.jp
27~1日	★The 15th International Conference on Advanced Materials (IUMRS-ICAM2017) (京都)	日本MRS	事務局 meetings@iumrs-icam2017.org
28, 29日	平成29年度鉄鋼工学セミナー「製鋼熱力学専科」 (東京 申込締切8月4日)	日本鉄鋼協会	新日鐵住金(株) 岡山 敦 Tel. 0479-46-5510/Fax. 0479-46-5142 okayama.rt6.atsushi@jp.nssmc.com
28~30日	★日本実験力学学会2017年度年次講演会(岡山)	日本 実験力学学会	岡山理科大学 清水一郎 Tel. 086-256-9614 shimizu@mech.ous.ac.jp
29~31日	★平成29年度工学教育研究講演会(東京)	日本工学教育 協会、関東工 学教育協会	川上理英 Tel. 03-5442-1021 kawakami@jsee.or.jp
29~1日	★Dynamics and Design Conference 2017/ 第15回「運動と振動の制御」シンポジウム(愛知)	日本機械学会	D&D/MoViC2017実行委員会 Tel. 03-5360-3505 DMinfo@jsme.or.jp
31, 1日	平成29年度鉄鋼工学セミナー「溶接・接合科学専科」 (大阪 申込締切8月9日)	日本鉄鋼協会	JFEスチール(株) 一宮克行 Tel. 086-447-3961 Fax. 086-447-3939 k-ichimiya@jfe-steel.co.jp

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
2017年9月			
6~8日	第174回秋季講演大会(北海道 4号213頁)	日本鉄鋼協会	学術企画グループ Tel. 03-3669-5932
10~13日	★Liquid Metal Processing & Casting Conference (LMPC 2017) (Hyatt at The Bellevue, Philadelphia)	TMS	Meeting Services Tel. +1-800-759-4867 mtgserv@tms.org
15日	★レアメタル研究会(東京)	東京大学生産技術研究所	岡部徹研究室 学術支援専門職員 宮崎智子 Tel. 03-5452-6314 okabelab@iis.u-tokyo.ac.jp
26~28日	★資源・素材&EARTH2017(札幌)(北海道)	資源・素材学会	事務局 Tel. 03-3402-0541 info@mmij.or.jp
2017年10月			
11~13日	○鉄鋼分野におけるエネルギーと材料の効率化、二酸化炭素削減に関する国際会議(International Conference on Energy and Material Efficiency and CO ₂ Reduction in the Steel Industry(EMECR 2017))(神戸)	日本鉄鋼協会	EMECR2017 Secretariat c/o ISS, INC. emecr2017@issjp.com
11~13日	★粉体工業展大阪2017(大阪)	日本粉体工業技術協会	展示会事務局(株)シー・エヌ・ティ 田島 Tel. 03-5297-8855 info2017@powtex.com
13日	第15回機械・構造物の強度設計、安全性評価に関するシンポジウム(京都)	日本材料学会	事務局 船越英子 Tel. 075-761-5321 jimu@jsms.jp
13, 14日	第12回材料の衝撃問題シンポジウム(京都)	日本材料学会	事務局 船越英子 Tel. 075-761-5321 jimu@jsms.jp
22~26日	★The 8th International Symposium on Surface Science (ISSS-8)(茨城)	日本表面科学会	Tel. 03-3812-0266 iss8@sss.jp
23~25日	第25回鉄鋼工学アドバンスセミナー(千葉 申込締切6月12日)	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-3669-5933
2017年11月			
1~4日	★The 12th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics(石川)	日本実験力学会	金沢工業大学 中田政之 Tel. 076-274-9255 nakada@neptune.kanazawa-it.ac.jp
5~10日	★第18回材料集合組織国際会議(18th International Conference on Textures of Materials(ICOTOM 18))(St George, Utah, USA)	Stuart Wright(EDAX), David Fullwood(BYU) and Matthew Nowell (EDAX)	大阪府立大学 井上博史(ICOTOM国際委員) inoue@mtr.osakafu-u.ac.jp
12~16日	○第11回亜鉛および亜鉛合金めっき鋼板に関する国際会議(11th International Conference on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet(Galvatech2017))(東京)	日本鉄鋼協会	Galvatech2017 Secretariat c/o ICS Convention Design, Inc. galvatech2017@ics-inc.co.jp
15, 16日	第5回国際鉄鋼科学シンポジウム(The 5th International Symposium on Steel Science - ISSS 2017)(京都)	日本鉄鋼協会	九州大学 土山聡宏 toshi@zaiko.kyushu-u.ac.jp
15~17日	★第7回 次世代ものづくり基盤技術産業展 -TECH Biz EXPO 2017-(愛知)	名古屋国際見本市委員会	事務局 Tel. 052-735-4831
17日 または 24日	★レアメタル研究会(東京)	東京大学生産技術研究所	岡部徹研究室 学術支援専門職員 宮崎智子 Tel. 03-5452-6314 okabelab@iis.u-tokyo.ac.jp
2017年12月			
11, 12日	★3rd International Conference on Science and Technology of Ironmaking & Steelmaking(インド工科大学カンプール校)	インド工科大学カンプール校	IIT Kanpur, Prof. Dipak Mazumdar Tel. 91-512-2598535 stis17@iitk.ac.in
11, 12日	平成29年度鉄鋼工学セミナー「材質制御専科」(東京 申込締切11月6日)	日本鉄鋼協会	日新製鋼(株) 藤原 進 Tel. 0823-25-8318 Fax. 0823-25-8277 fujiwara.s366@nissin-steel.co.jp
2018年1月			
12日	★レアメタル研究会(東京)	東京大学生産技術研究所	岡部徹研究室 学術支援専門職員 宮崎智子 Tel. 03-5452-6314 okabelab@iis.u-tokyo.ac.jp
2018年3月			
9日	★レアメタル研究会(東京)	東京大学生産技術研究所	岡部徹研究室 学術支援専門職員 宮崎智子 Tel. 03-5452-6314 okabelab@iis.u-tokyo.ac.jp

次号目次案内

* 定期刊行物の掲載記事及び題目は変更になる場合があります。

ふらむ Vol.22 (2017) No.6 掲載記事

Techno Scope

進化する画像診断装置

連携記事

画像診断装置向けNbTi超電導線材
 川嶋慎也、他((株) 神戸製鋼所)
 画像診断装置に利用される超電導マグネット
 齊藤一功((株) 神戸製鋼所)

入門講座

材料の構造を見る回折現象-2

放射光を用いたX線回折による鉄鋼材料分析
 佐藤真直((公財)高輝度光科学研究センター)

躍動

高炉プロセスの研究開発を通じて
 柏原佑介(JFEスチール(株))

私の論文

溶鋼中における固体介在物の凝集体、IF 鋼の実操業に基づく理解
 上島良之(新日鐵住金(株))

解説

受賞技術-24

炭化水素系気体燃料を活用した鉄鉱石焼結プロセスの開発
 山本哲也、他(JFEスチール(株))

「鉄と鋼」Vol.103 (2017) No.6 掲載記事

特集号「資源自由度拡大に資する鉄鉱石処理プロセス」

「資源自由度拡大に資する鉄鉱石処理プロセス」特集号発刊に寄せて(巻頭言)
 村上太一
 鉄鉱石造粒物の湿潤および乾燥状態での強度発現に関する実験的検討
 前田敬之、他
 擬似粒子の造粒性と強度に及ぼす超微粉ヘマタイトおよびマグネタイトの影響
 前田敬之、他
 焼結原料造粒における複合造粒ライン粉核比が造粒物の構造に及ぼす影響
 山口泰英、他
 鉄鉱石の造粒および崩壊過程に及ぼす機械的攪拌操作の影響
 樋口隆英、他
 ミルスケール多量使用時における予備造粒による焼結生産性の改善
 階元仁史、他
 焼結原料造粒後の乾燥処理が燃焼前線降下速度および成品歩留に及ぼす効果
 松村 勝、他
 微粉鉄鉱石の多量使用に向けた整粒強化型の新造粒プロセス
 樋口隆英、他
 粉末Fe₃O₄とCaOで被覆したコークスの燃焼挙動
 大場雄介、他
 焼結過程の数値シミュレーション -マグネタイト鉱石粒子の配合割合が大規模亀裂の発生に及ぼす影響-
 梅景俊彦、他

焼結過程の数値シミュレーション -マグネタイト鉱石粒子の体積溶融率および粒子間摩擦力が大規模亀裂の発生に及ぼす影響-
 湯 晋一、他
 焼結層内におけるマグネタイトの偏析制御による焼結鉄の生産性改善
 岩見友司、他
 焼結プロセスにおける初期融液生成挙動に及ぼすマグネタイト(Fe²⁺源)の影響
 多木 寛、他
 焼結層内におけるWüstite粒子の酸化反応に対するCaO成分添加の影響
 藤野和也、他
 融液生成による鉄系凝結材の酸化反応促進効果
 藤野和也、他
 鉄鉱石焼結工程におけるKRスラグの有効利用法
 藤野和也、他
 焼結充填層におけるコークス共存下の金属鉄およびマグネタイト精鉄の酸化挙動
 藤野和也、他
 温度1573 Kおよび酸素分圧10⁶~10² atmにおけるFeO_x-CaO-SiO₂-Al₂O₃系のFeO_x側液相線
 片平圭貴、他
 FeO_x-CaO-SiO₂系スラグ中のFeイオンの局所構造とFeO_{1.33}活量との関係
 林 幸、他
 分割造粒法を活用したマグネタイト鉱石の酸化促進による焼結鉄強度および被還元性向上
 松村 勝、他
 リートベルト解析による高炉原料用焼結鉄の鉄物相評価
 高山 透、他

ISIJ International Vol.57 (2017) No.6 掲載記事

Fundamentals of High Temperature Processes

Mechanochemical effects on the roasting behavior of vanadium-bearing LD converter slag in the air J. Xiang *et al.*

Ironmaking

Influence of Al₂O₃ and MgO on the viscosity and stability of CaO-MgO-SiO₂-Al₂O₃ slags with CaO/SiO₂ =1.0 C. Sun *et al.*

Operation characteristic of super-large blast furnace slag in china K. Jiao *et al.*

Evaluation of coal compatibility effect in coke strength by surface tension of semi-coke M. Nagayama *et al.*

Probing study on separating Pb, Zn, and Fe from lead slag by coal-based direct reduction C. Wang *et al.*

Characterization of granule structure and packed bed properties of iron ore sinter feeds that contain concentrate M. Zhou *et al.*

Steelmaking

Effects of temperature and oxygen potential on removal of sulfur from desulfurization slag A. Matsui *et al.*

Effect of sulphur concentration on precipitation behaviors of MnS-containing inclusions in GCr15 Bearing Steels after LF Refining P. Chen *et al.*

Powder blasting in hot metal desulfurization by mechanical stirring process Y. Nakai *et al.*

Casting and Solidification

Heat transfer of steel in a slab tundish with vacuum chamber J. Zhou *et al.*

Instrumentation, Control and System Engineering

Detection of pinholes in steel slabs using gabor filter combination and morphological features D.-C. Choi *et al.*

A Gaussian filter for plate flatness evaluation system with 3-D scanner S. Aoe *et al.*

Forming Processing and Thermomechanical Treatment

Effects of nitrided surface layer and microstructure on press formability in commercially pure titanium sheet annealed in nitrogen gas atmosphere K. Takahashi *et al.*

Welding and Joining

Comparative study on internal residual stresses in electron beam welds T. Nagai *et al.*

The dynamic resistance based weld quality monitoring research in small scale resistance spot welding of titanium alloy X. Wan *et al.*

Effect of pulsed current gas tungsten arc process on the dissimilar weldments between nickel-based superalloy/austenitic stainless steel S. Sharma *et al.*

Surface Treatment and Corrosion

Jet flow characteristics of 3-slot nozzle in gas wiping process at continuous galvanizing line G. Takeda *et al.*

Liquid metal embrittlement of hot stamped galvanized boron steel sheet - effect of heating time on crack formation - M. Takahashi *et al.*

Transformations and Microstructures

Dynamic transformation during the simulated plate rolling of a 0.09% Nb steel S. Rodrigues *et al.*

Effect of heating rate and annealing temperature on secondary recrystallization of Goss grains in a grain orientated silicon steel F. Citrawati *et al.*

Ultrafinegrained microstructure in a medium manganese steel after warm rolling without intercritical annealing A.S. Magalhaes *et al.*

Mechanical Properties

Effects of tensile tests and specimen thickness on elongation and deformation energy for industrially pure iron Y. Takeda *et al.*

Forming Processing and Thermomechanical Treatment

Plastic deformation promoted by δ-ferrite-to-austenite transformation in the heat-treated cold-rolled novel advanced high-strength steel in FeCrNiBSi alloy system (Note) M. Askari-Paykani *et al.*

会員欄
新規入会
青方 友哉

青山 智胤
阿川 裕志
朝倉 詩乃
石原 準也
磯部 敏樹
岩井 陽平

上田 敏郎
大賀 賢一
小川 晃弘
尾郷 顕
片岡 由行
坂本 真人

佐藤 力樹
田中 智仁
林 和幸
平下 淳二
藤井 章
保木本 達也

松本 圭介
柳瀬 雅人
山崎 孝博
山下 悟
山田 太一
横森 玲

渡邊 敏寛
SLYE,
William Eric
YIM,
ChangHee

ご冥福をお祈り
申し上げます。
志村 一輝
藤井 増彦
湯河 透

Media DATA

媒体概要

	ふえらむ	鉄と鋼	ISIJ International
体 裁	A4判	A4判	A4判
発行部数	2,500部(1号は9,500部)	1,200部	1,200部
発 行 日	毎月1日	毎月1日	毎月15日
広告申込締切	前月5日	前月5日	前月20日
広告原稿締切	前月10日	前月10日	前月25日
入稿形態	完全データ(出力見本添付)	完全データ(出力見本添付)	完全データ(出力見本添付)
広告有効寸法	1P:天地260mm×左右180mm フールド判1P:天地297mm×左右210mm ½P:天地125mm×左右180mm		1P:天地260mm×左右180mm ½P:天地125mm×左右180mm

広告掲載料金

	「ふえらむ」「鉄と鋼」 2誌同時掲載(同一原稿)			ISIJ International
	1P	1/2P		
表2	160,000	-	4色1頁	250,000
表3	140,000	-	2色1頁	170,000
表4	200,000	-	1色1頁	120,000
表2・本文対向	140,000	-	1色1/2頁	70,000
前付	120,000	-		
後付	100,000	60,000		
表3対向	110,000	-		
広告目次下	-	70,000		
2色刷り (上記金額に加算)	20,000加算			
4色刷り (上記金額に加算)	50,000加算			
綴り込み1枚 (印刷物持込)	175,000			
フールド	20,000加算			

「ふえらむ」「鉄と鋼」に広告をご掲載頂くと、
バナー広告(無料)を掲載致します。

<掲載頁>
ホームページTOP、ふえらむのページ
<バナーサイズ>
TOP: 230×61ピクセル
ふえらむ: 200×53ピクセル
<データ締切>
前月10日
<入稿形態>
GIF、JPEG(静止画)

- 上記の料金に消費税は含まれておりません。
- 原稿データその他の製作費は別途ご請求させていただきます。

広告掲載のお問い合わせ・お申込み

株式会社 明 報 社

〒104-0061 東京都中央区銀座七丁目12-4 友野本社ビル
 TEL(03)3546-1337 FAX(03)3546-6306
 E-mail info@meihosha.co.jp
 ホームページ http://www.meihosha.co.jp

編集後記

この編集後記に着手するのが、督促が届くほどまで遅くなってよかった。今まさに春である。窓に目を向けると、空は快晴である。春の霞みがかかった空が何とも心地よい。桜は日々開花が進み、弊製造所の構内の桜も満開に近い。小生、鉄鋼技術者であるが、このような記事に筆を取るのもこの時期心地よい。鉄鋼業界も四季の装いの中で循環することを、この春の陽気に重ねて考える。ふとした瞬間に考えることがある。種々の事象あるいは物事の推移やその時の勢いを例える時、人生を重ねると四季を重ねると、この二つに大別されるように感じる。どの産業でも勢いの良い時、少し落ち着いた時、少し元気が無

い時、つまりいつも好調なわけではない。成熟産業という言葉があるが、鉄鋼業界はよく成熟の部類に分類されてしまうことが多い。この意味合いは深く、いずれ老齢となり消え去るからだ。この表現をどうしても嫌ってしまう。まだ、鉄鋼は冬の時代、の方が例えとしてはマシだ。それは、また春が来て、夏が訪れ、秋の木漏れ日、そして冬を向かえ、また必ず再び春が来るからである。鉄鋼業界も春真っ盛り、桜満開、そして夏真っ盛りとなるよう邁進したい。

(H.T.)

会報委員会 (五十音順)

委員長	梅澤 修 (横浜国立大学)			
副委員長	前田 恭志 ((株) 神戸製鋼所)			
委員	岩崎 修吾 (三菱重工業 (株))	植田 滋 (東北大学)	木村 裕司 (大同特殊鋼 (株))	
	小林 能直 (東京工業大学)	小森 和武 (大同大学)	佐藤 克明 (日新製鋼 (株))	
	諏訪 晴彦 (摂南大学)	田中 将己 (九州大学)	堤 康一 (JFEスチール (株))	
	戸田 佳明 (物質・材料研究機構)	轟 秀和 (日本冶金工業 (株))	永山 宏智 (愛知製鋼 (株))	
	棗 千修 (秋田大学)	難波 茂信 ((株) 神戸製鋼所)	本間 穂高 (新日鐵住金 (株))	
	森 善一 (新日鐵住金 (株))	山口 広 (JFEスチール (株))	山田 明德 (いすゞ自動車 (株))	

ふえらむ 定価 (本体価格2,000円+税)

Bulletin of The Iron and Steel Institute of Japan : Unit Price ¥2,000

2017年4月25日印刷納本、2017年5月1日発行 (毎月1回1日発行)

編集兼発行人 東京都中央区日本橋茅場町3-2-10 鉄鋼会館5階

(一社)日本鉄鋼協会 業務執行理事・専務理事 脇本眞也

Tel : 03-3669-5933 Fax : 03-3669-5934 (共通)

印刷所 東京都文京区本駒込3-9-3 (株) トライ

©COPYRIGHT 2017 一般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、(一社)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 ((一社)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っては、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、(一社)学術著作権協会に委託致していません。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

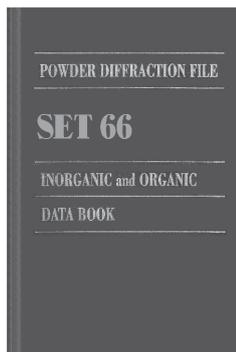
222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA

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

粉末回折データベース
PDF Book Form (Set66)

価格(税別) ¥155,000.- (データブック)各¥75,000.- (インデックスブック)
 (データブックとインデックスとのセット割引、教育機関向け割引等あり、要問い合わせ)

JCPDS-ICDDから毎年9月に発売されるデータブックとインデックスブックです。データブックには無機1,900/有機600の回折パターンが追加収録されます。インデックスには無機用のAlphabetical IndexとHanawalt Index、有機用のOrganic Indexの計3点があります。



化学プロセス用の物性データベース
DIPPR with DIADEM pro
 (Design Institute for Physical Property Data)

価格(税別) ¥350,000.- (一般向け) ¥60,000.- (教育機関向け)

2,280化合物についての49種類の熱物性値(実測値)、複数の推算式、原文献データと15種類の温度依存物性には推算式の係数などのデータベースです。AIChE推奨のインターフェイスソフトウェア(DIADEM)付きのスタンドアロンシステムです。

おもな機能 (DIADEM)

- 検索対象: Name, Formula, CAS番号、物性データ
- 物性値: 実測値、推算式による予測値
- データ表示: テーブルとグラフプロット
- 複数化合物データの重ね合わせプロット
- MDL Chimeプラグインによる構造的立体表示
- ユーザーデータベースの作成



システムプラットフォーム:
 Windows Xp/Vista/7/8 (AIChE DIPPR Project 801)

25,000件のセラミックス状態図データベース

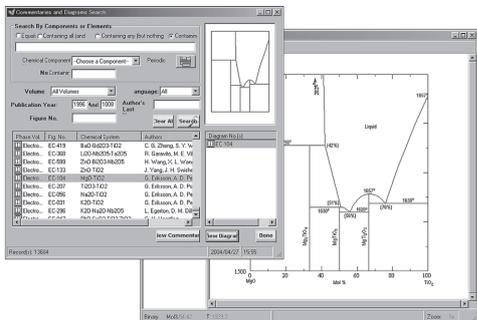
ACerS-NIST
 Phase Equilibria Diagrams, Version 4.1

価格(税別) ¥160,000.- マルチユーザー ¥260,000.-

- | | |
|---------------|-----------------|
| 検索条件 | データ表示 |
| ■ 成分系、元素記号 | ◆ モル百分率 ↔ 重量百分率 |
| ■ 著者、出典誌名、出版年 | ◆ Lever rule計算 |
| ■ 状態図番号 | ◆ ズームアップ/ズームダウン |

データソース / 新データ2,500件を追加

● Phase Diagrams for Ceramists (Volumes I・III, Annual Volumes '91, '92 and '93, High Tc Superconductor monographs (two), Phas Diagrams for Zirconium + Zirconia Systems and Phase Diagrams for Electronic Ceramics Vol.15)

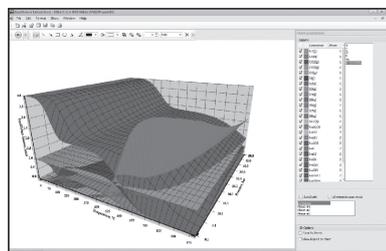


システムプラットフォーム: Windows XP/Vista/7

化学反応/平衡計算ソフトウェア
HSC Chemistry for Windows, Ver.9.0

価格(税別) ¥650,000.-/¥280,000.- (一般/教育)

約28,000種についてのエンタルピー、エントロピー、熱容量のデータベースを基に化学反応の計算やGIBBSまたはSOLGASMIXのルーチンによる化学平衡を計算します。反応、熱平衡、分子量計算などの一般的なモジュールの他、電気化学セル平衡と相安定性、腐食の研究に使われるEh-pH(プールベ)状態図の作成などユニークなモジュールを持ち合わせています。計算結果のテーブルと状態図はクリップボードにコピーできます。SIM Flowsheetモジュールもあり、複数のユニットプロセスからなるプロセス全体のシミュレーションとモデリングができます。



システムプラットフォーム: Windows 7/8/10
 (Autototec Research Oy. 製作)

株式会社 **デジタルデータマネジメント**

東京都中央区日本橋茅場町1-11-8 紅萌ビル 〒103-0025
 TEL.03-5641-1771 FAX.03-5641-1772 <http://www.ddmcorp.com>

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)

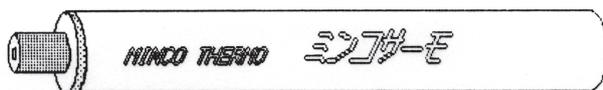


ミンコサンプラーの3つの大きな特徴 信頼性、作業性、安全性。
炉外精錬装置 脱ガス装置 電気炉 レードル タンデイシュ CCモールド
高炉出鉄樋 トピードカー 溶銑予備処理などあらゆる場所から採取できます

■ 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)