

ふえらむ

*Bulletin of
The Iron
and Steel
Institute of
Japan*

Vol.14 / No.11 / 2009

(社)日本鉄鋼協会会報

ISSN1341-688X

鉄と鋼

Tetsu-to-Hagané

特集号

「矯正過程の数値解析技術の高度化と実機操業技術の最近の進歩」

Vol.95 / No.11 / 2009

ISSN0021-1575

Minco ミンコ・熱電対とサンプラー

品質向上のパイオニア

■ ミンコサンプラー (製鋼 製鉄 試料採取用)



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

■ ミンコサーモ 消耗型熱電対

for IRONS, STEELS, FERROUS ALLOY

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)

ふえらむ

Vol.14 (2009) No.11

C O N T E N T S

目 次

Techno Scope	「ミュオン」で見えてきた新しい世界	688
鉄の点景	ベアリング・グロッケン	693
連携記事	高エネルギー宇宙線の起源と特性 瀧田正人	695
	宇宙線ミュオンを利用した高炉内部観察技術 篠竹昭彦	700
展 望	製鉄原料展望-3 スクラップの現状 原田幸明	706
解 説	オキサイドメタラジー-5 ー介在物利用による組織制御ー 酸化物系介在物の微細分散および組成制御技術 ー製鋼におけるオキサイドメタラジー技術ー 若生昌光	713
会員へのお知らせ		721
海外鉄鋼関連最新論文		740

「ミュオン」で見えてきた新しい世界

地球の大気圏の上層部で大気中の原子核と宇宙線の相互作用によりミュオンが生まれる。ミュオンを利用して、他の方法では不可能な大きな物体の内部を観察する試みが行われている。一方、ミュオンを人工的に生成して利用する取り組みに期待が高まっている。

浅間山の噴火のようすを宇宙線ミュオンで明らかにする試みが行われている。



透過してきたミュオンの数を観測する検出器
南日本新聞2009年2月28日より

地球にたえず降り注ぐ宇宙線ミュオン

1897年にJ・J・トムソンによって電子が発見されて以来、原子核の発見、陽子、中性子、ニュートリノや種々の中間子などが次々に発見され、物質をかたちづくる基本構造が徐々に明らかにされてきた。

物質を構成するもっとも基本的な粒子であるクォークとレプトンは、その質量によって「世代」と呼ばれる3つのグループに分類されている。第1世代から第3世代へと質量が大きくなっていくが、そのうち第2世代のレプトンに属するのが、ミュオン（ミュオン粒子）である。

ミュオンは、電荷をもつ素粒子で、負の電荷をもつミュオンは、電子と良く似た振る舞いを示す。ただし、ミュオンの質量は電子の約200倍、陽子の約9分の1と、電子と比較して非常に大きいものになっている。

自然界では、ミュオンは宇宙から地表に降りそそいでいる宇宙線の一種として観測される。宇宙線とは、超新星の爆発や太陽表面の爆発などの宇宙空間での自然現象によって発生した高いエネルギーをもった高速で移動する粒子の総称で、

地球に降りそそぐ宇宙線の約90%を陽子、約8%を α 粒子（ヘリウムの原子核）が占め、これらを一次宇宙線と呼んでいる。一次宇宙線は地球に到達すると、大気圏の上層部で空気中の窒素や酸素などの原子核と衝突したり、相互作用を引き起こす。

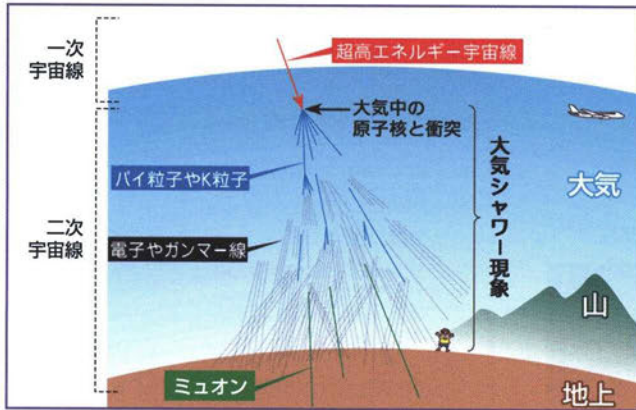
■素粒子の「標準模型」

「標準模型」では、物質をかたちづくる12種類のフェルミ粒子（クォークとレプトン）と力を伝える4種類のボース粒子、未発見の質量を与える粒子であるヒッグス粒子から宇宙が構成されていると説明される。

物質粒子				力を伝える粒子	
	第1世代	第2世代	第3世代	強い相互作用	
クォーク	u アップ	c チャーム	t トップ	g グルーオン	
	d ダウン	s ストレンジ	b ボトム		
レプトン	ν_e 電子ニュートリノ	ν_μ μ ニュートリノ	ν_τ τ ニュートリノ	電磁相互作用	
	e 電子	μ ミュオン	τ タウ	γ 光子	
				弱い相互作用	
				W⁺ W⁻ Z Wボソン Zボソン	
質量を与える粒子（未発見）				H ? ? ... ヒッグス粒子 ヒッグス粒子 ヒッグス粒子	

■宇宙線が地表に到達する様子

一次宇宙線は、大気圏上層部で大気中の原子と反応し、二次宇宙線を発生させる。発生した二次宇宙線も高いエネルギーを持っているために、大気中で次々に二次粒子が発生する「大気シャワー」現象が生じる。地表に到達する二次宇宙線のほとんどはミュオンやニュートリノである。



す。その際に核反応をおこして放射性同位元素が生成したり、相互作用によってパイ中間子などが発生したりする。このように一次宇宙線が大気中に飛び込むことによって新たに生まれた宇宙線を、二次宇宙線と呼んでいる。高いエネルギーを持つ一次宇宙線から発生した二次宇宙線も高いエネルギーを持つため、二次宇宙線がさらに新たな二次粒子を生み出す。二次宇宙線が連鎖的に生成し、大気中で大量の二次粒子が発生する現象は、「大気(空気)シャワー」と呼ばれている。二次宇宙線は、ミュオン、ニュートリノ、電子、 γ 線、中性子などが主な構成成分であるが、地表に到達するのはほとんどがミュオンとニュートリノである。

このうち、ミュオンの寿命は非常に短く、わずか 2.2μ 秒で電子とニュートリノに崩壊してしまふ。しかし、地表ではたとえば垂直方向から飛来する 1GeV 以上のエネルギーを持つミュオン強度は、

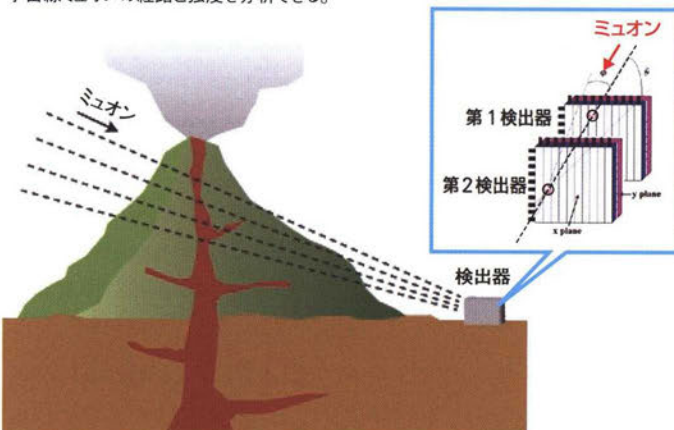
1cm^2 あたり1分間に1個程度とされている。これは、一晩で人体を約100万個の宇宙線ミュオンが通り抜けることになるミュオン強度である。寿命の短いミュオンが地表で観測できる理由は、「高速で移動する物体では時間の進み方が遅くなる」という相対性理論によって説明される。地表に到達する宇宙線ミュオンは非常に速い速度で移動している。仮に宇宙線ミュオンが光速の99.87%で飛行したと仮定すると、宇宙線ミュオンの寿命は 2.2μ 秒から 44μ 秒に伸びることになる。また、それに伴って飛行工程は 659m から 13km までのびる。これによって大気圏上層部で発生した宇宙線ミュオンが地表まで到達するのである。

ミュオンラジオグラフィで大きな物体の内部を見る

ミュオンの特徴のひとつは電荷を持っていることである。このため、ミュオンには電子と同様に電磁相互作用が働くことになる。しかし、陽子や中性子のような原子核内で作用する強い相互作用には反応しない。現在、ミュオンのこの性質を利用したイメージング技術が開発されている。質量の小さい電子は数十 cm 以上の物質を通り抜けることはできない。電子と比較して大きな質量を持つ陽子や中性子は、物質中で強い相互作用を受けるため、 1m 程度しか透過することができない。これに対して、高いエネルギーをもったミュオンは、従来までのX線や中性子線などの他の粒子では透過することのできない厚い岩盤や金属塊、建築物や火山などを透過できる。この性質を利用した宇宙線ミュオンによるラジオグラフィ(放射線を用いた非破壊透過測定技術)の研究が進んでいる。宇宙線ミュオンのラジオグラフィを利用することによって、建築物などの巨大な物体や山

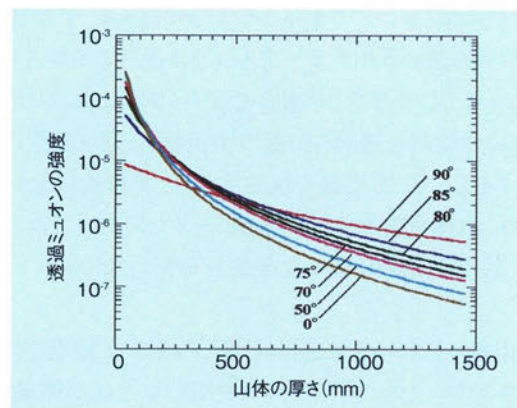
■宇宙線ミュオンラジオグラフィの概念図

山体を通過してきた宇宙線ミュオンを2つの検出器で捉えることで、宇宙線ミュオンの経路と強度を分析できる。



■様々な天頂角に対する宇宙線ミュオンの強度の変化例

密度 $2.5\text{g}/\text{cm}^3$ の山体を通過する宇宙線ミュオンの強度変化を計算したもの。天頂角が変わると、透過するミュオンの強度も異なる。



資料提供: 東京大学地震研究所

浅間山の噴火を宇宙線ミュオンラジオグラフィで解析

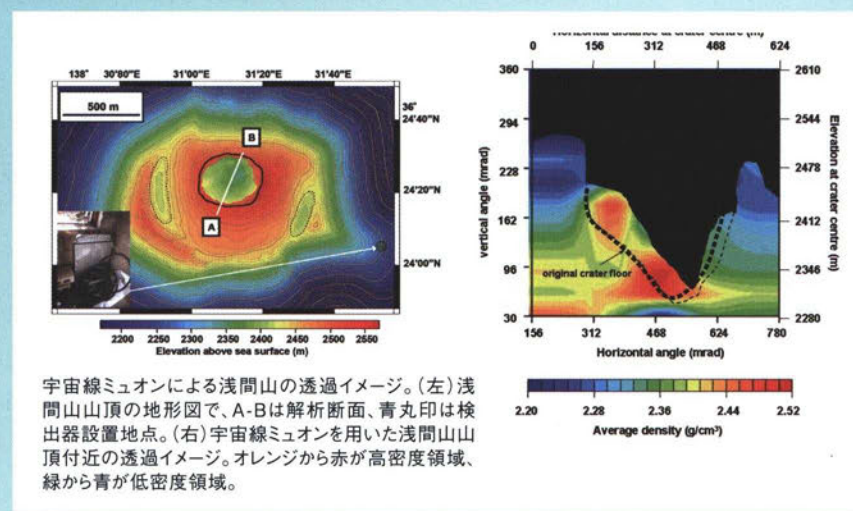
群馬県と長野県の境に位置する浅間山は、世界でも有数の活火山として知られている。標高は2,568mで、噴火と崩壊を繰り返した山体はおおよそ円錐形である。浅間山の噴火様式はブルカノ式噴火と呼ばれ、固結した溶岩によって塞がれていた火口が、マグマから分離したガスの圧力によって開かれ、爆発し、それに伴って火山灰などを大量に噴出するのが特徴である。気

象庁では、地震計、空振計、傾斜計、GPS、遠望カメラなどによって、火山活動の監視と観測を継続している。

この浅間山を宇宙線ミュオンラジオグラフィによりイメージングすると、図中に点線で示されている旧火口底の上に、2004年の噴火によって、固結したマグマを示唆する高密度物質(図中の赤～オレンジで示される領域)が存在していることがわかった。

さらに、旧火口底の下には、マグマの通り道と推測される空洞を示唆する低密度領域(図中の緑～青色で示される領域)の存在が確認された。

2009年2月2日の噴火の前後でも宇宙線ミュオンの測定が行われており、その際、火口中間～火口底でミュオン強度の有意な増加、すなわち質量移動があったことが観測されている。しかし、火口底よりも深い部分ではミュオン強度の増加が認められないことから、2009年2月2日の噴火は水蒸気爆発により、火口に堆積していた古い溶岩などが吹き飛ばされた現象であると分析されている。



資料提供:東京大学地震研究所

の内部などを、地震波などを用いた従来の地球物理学的観測よりも非常に高い空間分解能で密度測定することが可能になる。これまでに、高エネルギーの宇宙線ミュオンの高い透過力を利用して、火山の内部構造や製鉄所の高炉内部を調査する試みが行われている。

一次宇宙線は宇宙のあらゆる方向から地球に飛来している。そのため、宇宙線ミュオンも全天のすべての方向から飛来することになる。地表に到達する宇宙線ミュオンは、入射角度(天頂角)によってエネルギー分布が異なることがわかっている。垂直方向から水平方向(天頂角90度)へと天頂角が大きくなるに従って、高いエネルギーの成分が増える。宇宙線ミュオンは天頂角を決めるとほぼ一定のエネルギースペクトルを持つことがわかっているため、未知の密度長(密度と長さの積の積分値)を持つ物体を透過した際の宇宙線ミュオン強度の減衰を評価することで、密度長を推定することが可能になる。この密度長を、山体を透過する宇宙線ミュオンについて次々に求めていくことで、山体内部の密度長分布をマッピングすることができる。

宇宙線ミュオンの測定には、原子核写真乾板を用いる方法やプラスチックシンチレーターを用いる方法が開発され、実際の測定に用いられている。これらを利用して、例えば東京大

学地震研究所では、これまでに浅間山、昭和新山、桜島、薩摩硫黄島などで観測を実施し、大きな成果をあげている。

見えなかった高炉の内部を透視する

産業分野では、宇宙線ミュオンを利用して、高炉内の状態を測定しようという研究が行われている。高炉の高出銑比操業を行うための課題として、銑滓の排出が挙げられる。そのためには高炉の炉下部のセンシングが不可欠であるが、温度センサーによる測定には限界があった。そこで着目されたのが、宇宙線ミュオンの高い透過性である。

実際の測定試験は、解体する高炉の吹き止め後に取り出した炉底マンテルを対象に行われた。水平方向近くの宇宙線ミュオンは、2台の検出器によって測定され、高炉炉壁、炉内部、炉底の銑鉄とレンガの密度や位置が計算された。高炉内は耐熱レンガで保護されているが、測定の結果、レンガの損耗は15～20cmと推定されている。

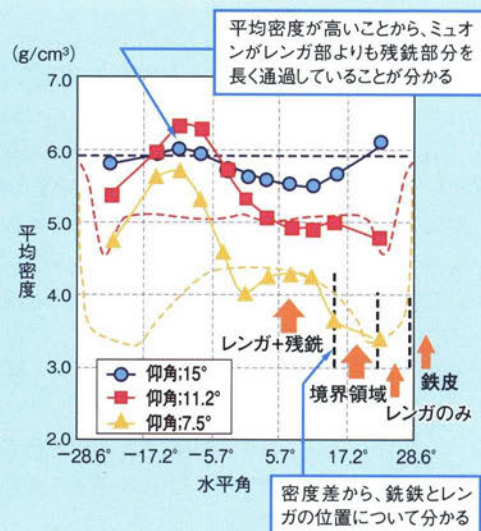
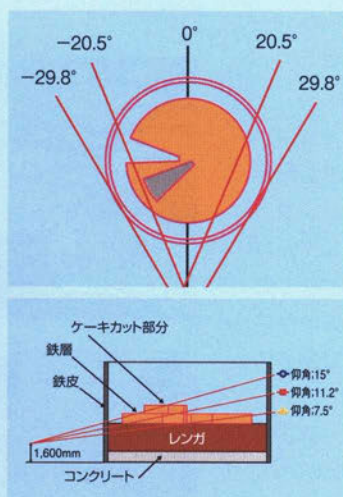
高温の高炉内をリアルタイムでセンシングできる技術は少なく、宇宙線ミュオンのラジオグラフィによる高炉内のイメージング技術は、効率的な操業に役立つ技術として大きな期待が寄せられている。

■高炉解体炉底での宇宙線ミュオン測定

高炉の炉底部脇に検出器を設置し、高炉を透過するミュオンの数を検出した。ミュオンの強度により、ミュオンが通過する経路上の密度を算出することができる。この結果、レンガの損耗は約15~20cmと推定された。この測定結果は、実際に解体した高炉内部の密度とほぼ一致することがわかった。



旧大分第2高炉の解体



資料提供:新日本製鐵(株)

人工的に生成する加速器ミュオンの利用

人類はこれまでに、X線、電子線、中性子線、陽子線などを人工的に作り出し、「科学の眼」として利用してきた。現在、加速器によって作られた加速器ミュオンが、新たな「眼」として加わろうとしている。日本では、1980年に高エネルギー物理学研究所(当時)に作られたミュオン科学研究施設(MSL)が、世界初のパルス状ミュオンビームの発生に成功している。MSLは国内のミュオン利用研究の中心であるとともに、世界的なパルス状ミュオン利用機関として利用された。MSLの後継として茨城県東海村に建設されたのが、大強度陽子加速器施設(J-PARC)のMLF(物質・生命科学実験施設)であり、2008年9月にミュオンビームの発生に成功している。

J-PARCでは高周波加速器(RCS)によって、光速の約97%まで加速された陽子ビームを生成する。陽子ビームを黒鉛でできた厚さ2センチのミュオン生成標的に衝突させることで、さまざまな粒子を生成させる。このときに生成したパイ中間子がおおよそ5000万分の1秒で崩壊し、ミュオンになるのである。J-PARCでは現在、5~50MeVの高速ミュオンビームと4MeVの低速ミュオンビームを発生させることができる。加速器ミュオンは、宇宙線ミュオンと比べて、一個あたりのエネルギーは10の4乗分の1と非常に小さい。このため、透過距離は山体を透過する宇宙線ミュオンと比較してわずか数m以下と短い。しかし、単位時間・単位面積当たりの個数は10の12乗倍と非常に多く、高い強度が得られるため加速器ミュオンはその強度を用いて種々の分析に活用されている。

ミュオンを利用した分析方法にはいくつかの種類がある。代表的な方法は、電荷を持った素粒子であるミュオンのスピンの変化を利用する「ミュオンスピン回転・緩和・共鳴法(μ SR法)」である。

加速器で作り出されたミュオンビームはスピンが揃っているの、測定対象物を透過したミュオンは、対象物の原子の中の電子の状態の影響を強く受けていることになる。 μ SR法によって、物質内部の微小磁性構造などを解明することができる。中性子

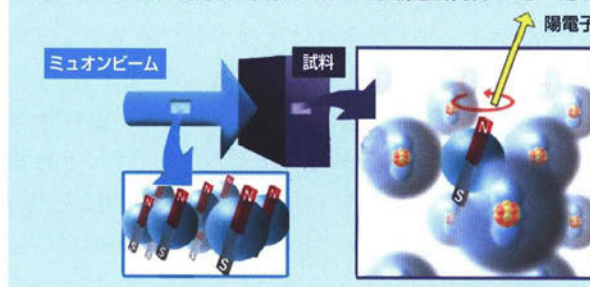
■ミュオン科学の範囲

基礎科学	物 性 物 理 学	銅酸化物超伝導体の物性、量子臨界点近傍の物性、第二種超伝導の磁束格子状態、半導体中の水素同位体中心
	化 学	ラジカル化学、水素化反応のダイナミクス、超臨界状態の化学
	素 粒 子 物 理	超対称性とミュオン稀崩壊、量子電磁気学
学際分野	μ 触媒核融合	アルファ捕獲と媒質効果、超微細相互作用効果、ミュオン原子
	生 物 物 理	材料としての生命体構成物質、電子状態と分子機能
応 用	非 破 壊 分 析	バルク敏感元素分析、トモグラフィ、ラジオグラフィ
	ビーム開発	超低速ミュオンビーム、ミュオンビーム冷却/再加速
	産業利用	水素エネルギー利用関連、磁性材料評価

資料提供:J-PARCセンター

■ミュオンによる物質の微小な磁場測定の仕組み

加速器で作られたミュオンビームはほぼ100%スピンが揃った状態なので、試料に打ち込まれたミュオンは原子間でその磁場に応じた歳差運動を行う。ミュオンが崩壊する際にスピンの方向に放出した陽電子を分析することで、磁性構造を分析することができる。



資料提供: J-PARCセンター

世界有数のミュオン強度を誇る MLF

茨城県東海村の大強度陽子加速器施設(J-PARC)には、原子核素粒子実験施設、ニュートリノ実験施設と、物質・生命科学実験施設(MLF)の3つの実験施設が建設されている。MLFは、床面積130m×70m、最大高さ約30mの巨大な実験施設であり、パルス中性子とミュオンを利用するMLF建家は、陽子ビーム入射系、ミュオン科学実験装置、1MWパルス中性子源及び、中性子ビームライン実験装置群の各装置を設置する4つの領域から構成されている。

このうちミュオン科学実験施設は、世界で初めてパルス状のミュオンビームを発生させたMSLの後継にあたり、平成15年から建設が進められてきた。MLFのビームラインでは、陽子ビームの出す放射線を遮へいするため、数十トンもある鉄の壁が精密に組み立てられている。また、MSLで使用された超伝導ソレノイドなどを再利用している。超伝導ソレノイドはコイル全長6m、地磁気の10万倍の5テスラという磁場を形成する。この超伝導ソレノイドによって、ミュオン生成標的で発生したパイ中間子の方向を揃え、ミュオンビームを形成している。



ミュオンビーム
ラインの外観

MSLから移設された
超伝導ソレノイド



黒鉛でできた
ミュオン生成標的



資料提供:J-PARCセンター

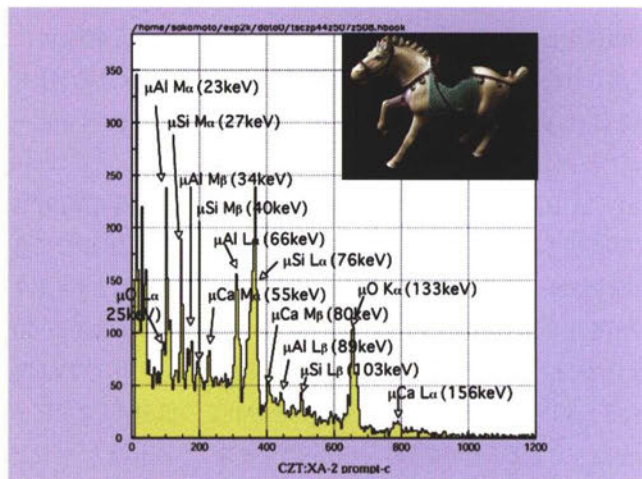
やX線を用いた分析や核磁気共鳴(NMR)、電子スピン共鳴(ESR)と互いに補完することで、物質の全体像を理解するための有力なツールとして利用されはじめている。

また、電子の200倍の質量を持つミュオンは、原子に捕獲・束縛される過程で放出するX線のエネルギーが通常の電子と比較して桁違いに高くなる。この高いエネルギーによって、ミュオンの特性X線は数mm～数cmという厚みを貫通して検出器に到達できる。通常の蛍光X線分析がナトリウムより軽い元素に対して感度が悪く、対象のごく表面の情報しかわからないことに対し、負ミュオンによる特性X線分析では、ミュオンを試料深くに注入することで、試料内部の元素分析を非破壊で行なうことが可能になる。J-PARCの高強度ビームを用いることで、従来までは測定が困難であった少量試料の分析が可能になるなど、ミュオン特性X線分析の大きな進展が期待されている。実際にJ-PARCでは、国立歴史民俗博物館の天保小判や唐三彩などの成分分析を行っており、例えば天保小判は純金でなく、金が56.8%で残りが銀であることが明らかになっている。

ミュオンはそのほかにも、酸化物超伝導体などの物性物理学、水素化反応の反応機構の解明などの化学分野、生物物理学、非破壊検査、素粒子物理学、ビーム開発、産業利用など、ミュオン科学ともいえる基礎科学から応用にいたるまでの幅広い分野での活用が期待されている。天然の宇宙線ミュオンについて

■負ミュオン特性X線分析の例

焼き物(唐三彩)の分析例。エネルギー強度から構成元素の種類がわかり、それぞれの強度から含有率がわかる。対象に損傷を与えることがないので、学術的な遺物や美術品の分析にも適している。



分析グラフ:久保謙哉氏(国際基督教大学)提供
唐三彩(模造品):齋藤努氏(国立歴史民俗博物館)提供

も、火山研究や高炉の評価のほか、建築物や橋梁の分析、古代遺跡の調査などでの利用が期待されている。人類の新しい「眼」となった、ミュオン利用技術の今後に注目していきたい。

- 取材協力 東京大学地震研究所、新日本製鐵(株)、J-PARCセンター、高エネルギー加速器研究機構、(独)日本原子力研究開発機構
- 文 杉山 香里

ベアリング グロッケン

ベアリング・グロッケンII

初号器発表後、反響が大きかったため開発された二号器。フォルムはより洗練され、奏でる曲のバリエーションも増えた。現在、イベントに貸出しされるなどして活躍している。photo: Shinya Yamada

ベアリングをより多くの人に知ってもらおうと、ベアリングメーカーによって企画されたイベントに、ベアリング・グロッケンと呼ばれる楽器が登場した。落下させた鋼球の跳ね返りによって、豊かなメロディを奏でる。その演奏は多くの人々を魅了し、大きな反響を呼んだ。この試みは、工業技術と芸術という、異なる発想の融合によって、機械部品であるベアリングの新たな世界を広げている。

地球上で最も丸い、ベアリングの鋼球

ベアリングは、自動車や鉄道、人工衛星から、洗濯機、冷蔵庫、エアコン、掃除機など身近な電化製品まで、ありとあらゆる機械の内部に組み込まれている部品である。日本語では「軸受」とも呼ばれ、基本構造は外側の大きな輪の「外輪」と内側の小さな輪の「内輪」、その二つの輪の間にはさまれた、いくつかの球体の「転動体」と、その位置を定める「保持器」の四つの要素から成り立つ。この部品は、機械の電動モーター内で回転する軸を受けて、その摩擦を軽減させることで機械をスムーズに動かすという重要な役割を果たしている。

ベアリングは18世紀以降の機械の大きな発達とともに進化し、

欧米では1900年代の自動車産業の隆盛がその進化に貢献した。一方、日本では1916年から生産が始まり、戦後の電化製品普及がベアリング技術の向上をもたらした。その大きな理由の一つには、欧米よりも国土が狭く、家々が軒を接しているという日本では、家電に静粛性が求められたという背景がある。そのため1960年代、唯一日本だけが「内輪」と「外輪」の軌道面と「転動体」の表面を極めてなめらかに仕上げる超精密加工技術の自動化に成功し、精密ベアリングを大量生産できるようになった。なかでもベアリングの回転精度の決め手となる「転動体」の球の精度は極めて高く、真球度は超精密球軸受の場合50nmとなる。また表面粗さは8nm以下となり、このような鋼球は地球上に存在するあらゆる球の中で、最も完全な球に近いとされる。

優れた工業技術とアートの融合

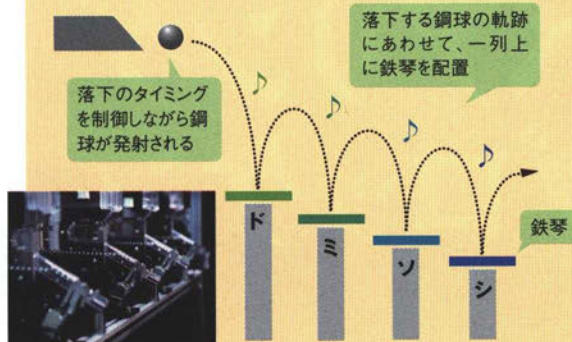
一切の無駄を排除し極限まで研ぎすまされた工業製品は時として芸術的な美しさを放つことがある。ベアリングもまたそうした製品の一つであり、ニューヨークの近代美術館(MoMA)の「アーキテクチャーとデザイン」の部に永久展示されている。しかし一般的には、機械の内部で使用されるベアリングは人の目に触れる機会が少なく、あまり知られていない。そこで、もっと多

世界に認められた美しい工業製品「ベアリング」



地球上で最も丸いと言われる
ベアリングの鋼球
(写真提供: 日本精工(株))

●ベアリング・グロッケンのおしくみ



次々と発射される鋼球

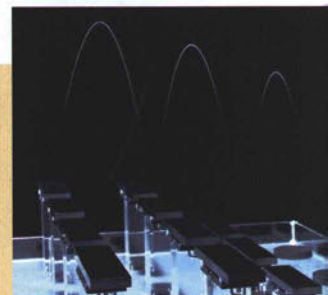
●音の配列

ベアリング・グロッケンの音域は1オクターブ。この楽器では1列につき4音の鍵盤が並べられ、それが4列、計16音の音程によりアンサンブルが展開していく。

*はオクターブ上の意

ソ	ファ	ミ	レ
ド*	ラ	ソ	ファ
レ	ファ	ラ	ド*
ド	ミ	ソ	シ

演奏の様子の動画は下記よりご覧ください。
 本会ホームページの「お知らせ」から公式サイトへリンクしています。
<http://www.isij.or.jp/News/index.htm>



軌跡を描く鋼球

真球に限りなく近い球だけができる、均一の跳ね返り。この特徴を生かして音色を奏でる。

くの人にベアリングの機能と役割を知ってもらおうと、2006年、ベアリングメーカーによって「Smooth Sailing for BEARING-NSK ベアリングアート展」が企画された。これはベアリングの技術をアートで飛躍させてみたらどうなるかという試みで、多彩な分野のアーティストからさまざまなアイデアが出された。

そのうちの一人、作曲家の川瀬浩介氏はベアリング・グロッケンを考案した。グロッケンはドイツ語で「鉄琴」を意味する「グロッケンシュピール」からとった。つまり、ベアリング・グロッケンは、ベアリングの鋼球で鉄琴を演奏する楽器である。真球に限りなく近いベアリングの鋼球を水平面に落下させると、一直線上に均一に跳ね返る。川瀬氏は、この跳躍が鉄琴を演奏する際のパチの動きに似ているところからヒントを得て、落ちてくる鋼球の軌跡にあわせて、一列上に均一に鉄琴の板を配置し、鋼球による自動演奏楽器を考え出した。この発案が特に優れていたことから、ベアリング・グロッケンの製作が始まった。

鋼球が奏でる、精緻なメロディ

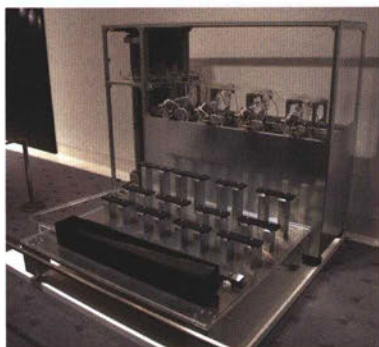
この新しい楽器をつくり出すために、ベアリングのエンジニア4、5名によるチームが組まれた。川瀬氏のアイデアを具現化する

ためには大きな課題があった。音を出すためには、鍵盤を振動させなければならないが、常に振動する着面地に次々と鋼球が落下すると、安定した跳躍が保障されず、同じ軌跡を描けなくなる可能性がある。そこで鍵盤に球が着地するタイミングをセンサーでキャッチし、予め用意しておいたサンプリング音を鳴らすといった代替案も出された。しかし生音で演奏してこそ楽器の魅力があるというこだわりから、膨大な時間をかけて技術検証が行なわれた。

その結果、鋼球のサイズは跳ね返り軌跡等の計算から、最適な直径約9.5mmのものが採用された。また、鋼種は炭化物粒が細かく一様に分布し、耐摩耗性が高い高C-Cr軸受鋼材のSUJ2が採用された。また鋼球を弾ませる鉄琴は微細な傷があると鋼球の飛ぶ方向に変化が生じるため、カーボンコーティングが施され、ダイヤモンド並の強度に仕上げられた。これにより落下を繰り返すと鋼球の方に傷がついてしまうが、定期的に新しい鋼球に交換することでこれに対応することにした。各列には一台ずつ鋼球の落下タイミングを制御する発射装置を取付け、リズムを一定にした。さらに下に落ちた鋼球は回収され、再び演奏に使用する機構とした。試行錯誤を繰り返し、初めて音が出た瞬間、エンジニアらは感激し思わず拍手が沸き起こったという。

完成したベアリング・グロッケンは、川瀬氏が作曲したメロディ

を見事に奏で、その音色は量感があり、美しく響く。軽快に跳躍する鋼球の動きは見る者を魅了し、イベントで人気を博した。その反響の大きさから、さらに外観デザインを洗練させ、設置も簡単で、なおかつ演奏曲目のバリエーションを増やした二号器が開発されている。優れた工業技術と芸術の融合により生まれたベアリング・グロッケンは、ベアリングの可能性を大きく広げた。今後もその展開に、注目していきたい。



ベアリング・グロッケン初号器

展示会で発表され、大きな反響を得た初号器。鋼球の跳躍の安定には平衡性が求められるため、設置にも神経が注がれる。右写真は2008年7月に開催された近代製鉄発祥150周年記念事業「鉄の星フェスティバル」での展示の様子。



●取材協力 日本精工(株)

●文 藤井 美穂

連携記事

高エネルギー宇宙線の起源と特性

Origin and Properties of High-energy Cosmic Rays

瀧田正人
Masato Takita

東京大学 宇宙線研究所
准教授

1 初めに

宇宙線ミュオンを用いる高炉内測定の新たな可能性及びその実用化が最近の鉄鋼業界で話題になっており、宇宙線ミュオンの親粒子である高エネルギー宇宙線の起源とその特性についてわかりやすい紹介記事を書いて頂きたいという趣旨の電子メールが、鉄鋼業界とはほど遠い職場に勤務している私に執筆依頼者より届いた。もう少し正確に書くと、執筆依頼者と私の共通の知人を介して届いたと書くべきである。何れにせよ、今回の連携記事はこの不思議な縁から始まる。

2 宇宙線 (cosmic rays) の発見¹⁾

宇宙線は地球外から飛来する放射線である。宇宙線の発見者は、ヴィクトール・フランツ・ヘス (Victor Franz Hess は、オーストリア生まれで、後にアメリカ合衆国に移住した物理学者) である。当時、金箔検電器に蓄えられた電荷が自然放電して次第に金箔が閉じていく現象は、地球内部にある放射性元素起源のガンマ線が金箔検電器内の空気を電離することによって説明できると考えられていた。しかし、エッフェル塔の上や海上でも同様な測定結果が得られることがわかったので、大地に原因を求めることは不可能となった。1912年から1919年にかけて、ヘス達は気球に乗って高度(最高で5kmから9km程度)と放射線の強さの関係を多数測定した。その結果、上空に行くほど放射線強度が増加することを見出して、放射線が宇宙起源であることを示した。ヘスはこの功績で1936年のノーベル物理学賞を受賞した。

3 宇宙線の正体¹⁾

その当時知られていた放射線としては、アルファ(ヘリウム原子核)、ベータ(電子)、ガンマ線(波長の短い光)の3種

類が知られていた。そのうち貫通力の大きいものは、ガンマ線だったので、ヘス達の発見した宇宙線はガンマ線ではないかと思われていた。

しかし、地球上の様々な場所で宇宙線の量を計測したところ、緯度による変化が観測され、高緯度ほど宇宙線の量が増えることが示された。これは、宇宙線の緯度効果と呼ばれ、コンプトン効果(光と自由電子の散乱)で有名なコンプトン卿などが測定した。地球は大きな磁石と考えられるため、電気的に中性なガンマ線が宇宙線の正体だとすると、緯度による変化は現れないはずなので、宇宙線は電荷をもった放射線であると考えられた。そうするとアルファ線よりは貫通力の大きいベータ線=電子ではないかと思われた。ただし、宇宙線の貫通力の大きさ(地球大気上空から地表まで到達するのに重さ約 10^4kg/m^2 の空気=1気圧を貫通する必要がある)から、非常に高いエネルギーを持つと予想された。

さて、ここで地球磁場がもう一度活躍する。荷電粒子が宇宙から地球に侵入すると、地球の方向へ曲げられるか、跳ね返す方向に曲げられるか、電荷符号(正か負か)によって決まる。その効果が最もよく現れるのは、地球磁場に垂直な東西方向である。宇宙線の電荷符号により、東方向からの量と西方向からの量に差が表れる。この宇宙線の東西効果は、1930年頃ロッシにより指摘された。ここで、もう少し詳細に東西効果を説明する。皆さんは理科の時間にフレミングの左手の法則を習ったと思うが、それを思い出して頂きたい。左手の中指を電流の方向(I)に、人差し指の方向を磁場の方向(B)にとると、この電流に働く方向(F)は、親指の方向になるという法則である。宇宙線は正電荷とすると宇宙線の進行方向が電流方向となる。すなわち、西側から入ってくる正電荷の宇宙線には地球に対して外向きの力が働き、東側から入ってくる正電荷の宇宙線には内向きの力が働く。これは、東側には正電荷の宇宙線が入れない死角があるということを意味する。実際の測定では、西からやってくる宇宙線の数の

方が、東側に比べると多くなっている。そして、この東西効果の測定により、宇宙線の電荷は正の電荷が優勢であると決定された。

宇宙線は一次宇宙線と二次宇宙線に大別される。一次宇宙線は地球大気に突入前の「生の」宇宙線であり、二次宇宙線は一次宇宙線が地球大気(窒素や酸素)と反応を起こすことによって生ずる二次的な宇宙線の総称である。ヘス達が観測した宇宙からの放射線や宇宙線ミュオンは典型的な二次宇宙線である。その後、二次宇宙線と気圧や温度の関係、二次宇宙線と雷の関係、二次宇宙線強度の高度変化、天頂角分布、方位角分布などが測定されたが、一次宇宙線の性質はなかなか明らかにできなかった。他方、二次宇宙線のなかに陽電子、ミュオン、パイ中間子(湯川中間子)など新たな素粒子が続々と発見された。しかしながら、このような素粒子の研究は、大型加速器による研究にその座を譲っていくことになる。

他方、宇宙物理学的な観点からの宇宙線研究、すなわち一次宇宙線の研究は、地球突入前の一次宇宙線の直接観測を助ける飛翔体(気球、ロケット、人工衛星など)の発展に伴い、盛んになっていった。東西効果から正の電荷をもった粒子が一次宇宙線の大部分を占めることが明らかにされ、水素原子核(=陽子)宇宙線であると考えられていた。その後、写真乾板や霧箱を気球に載せた実験により、宇宙線の中には水素よりもさらに重たい原子核が含まれていることがわかった。そして現在では量の多い少ないはあるが、周期律表に載っている自然界に存在するほとんどの元素の原子核が宇宙線中に観測され、ほぼ等方的に地球に降り注いでいる。要約すると、一次宇宙線の大半は原子核であり、電子は全体のおよそ1%程度、陽電子は0.1%程度、ガンマ線成分は電子の数桁下である。(ここで、宇宙から飛来するニュートリノはどうしたのかとの声が聞こえてきそうであるが、膨大な数(約 10^{10} 個/cm²)の太陽起源のニュートリノ等は伝統的な意味での一次宇宙線に入っていないので割愛させて頂く)

4 一次宇宙線の起源と伝播

通常、物理の授業で教わるSI単位系ではエネルギーの単位はジュール(J)であるが、宇宙線のエネルギーは電子ボルト(electron volt = eV)で表されることが多い。1電子ボルト=1eVは 1.6×10^{-19} Jという小さなエネルギー(単位電荷が1Vの電位差で加速される時に得るエネルギー)である。しかし、本記事ではあえて1eVを大雑把に 10^{-19} Jに置き換えて、SI単位で記述してみることにする。

さて、一次宇宙線の話に戻ると、地球磁場の影響で、 10^{-10} J以下の一次宇宙線は地球に侵入できない。大雑把に書

くと、一次宇宙線はおよそ 10^{-10} Jから10Jという広いエネルギー範囲に、一次宇宙線のエネルギー $E^{-2.7}$ に比例するエネルギースペクトルで分布しており、積分すると 10^4 個/m²程度の頻度で地球に飛来している。その一次宇宙線の加速源としては、太陽、我々の銀河系内の超新星爆発及び超新星残骸(飛散中の星の欠片)、銀河外の活動銀河核やガンマ線バースト等が考えられるが、高炉内測定に関連のある宇宙線ミュオンの親となる一次宇宙線(約 10^{-4} J以下のエネルギーを持つ)は我々の銀河系内にある超新星爆発・残骸起源であると考えてよい。銀河系内の一次宇宙線の起源が超新星爆発・残骸であるとする重要な根拠の一つは、銀河系内宇宙線のエネルギー収支である。また、宇宙線の化学組成が宇宙平均の元素比と比較して重元素が多いことも超新星爆発の過程で原子核に中性子や他の原子核等が詰め込まれると解釈できる。

4.1 超新星爆発²⁾

星間空間の雲が自分自身の重力で収縮し、密度が高くなって、解放された重力エネルギーによって暖められた状態が原始星である。こうしてできた熱い雲が重力収縮を繰り返しながら、その中心温度と密度がある限界に達すると陽子は核融合によってヘリウムの原子核を作り始める。この反応によって熱が発生し、核融合反応はさらに促進されることになる。こうして水素が持続的に「燃焼」し始める。すると発生した熱により暖められたガス圧が星間雲の重力を支えることになるので、重力収縮は止まる。これが星の誕生である。星の中心部で次々に核融合反応が起きて星の進化がすすむとともに、一番外側に水素、その内側に順次ヘリウム、炭素、ネオン、酸素等の層がタマネギのように形成される。最も核融合反応が進んだ段階が鉄である。太陽質量の0.08倍から0.6倍の星の場合は、核融合が中心部でヘリウムまで進行して白色矮星となる。星の質量が、チャンドラセカール質量(太陽の質量の1.4倍)と呼ばれる限界よりも小さい場合は、軽い原子核が核融合反応で燃え尽きた後に、電子の縮退圧で重力を支える状態まで収縮する。電子の縮退圧は熱力学的な圧力とは別に量子力学的なパウリの排他律(フェルミオンである電子は同じエネルギー準位を占めることができないので、最低エネルギー状態に重力で押し込んで詰め込むわけにはいかない)からくる圧力である。この状態の星が白色矮星である。ちなみに、星の質量が太陽質量の0.08倍より小さいと中心部で水素燃焼が始まる前に縮退が起こって褐色矮星とよばれる暗い星となる。太陽質量の0.6倍から8倍までの質量を持つ星は中心部が炭素・酸素になるまで核融合が進展し、重力エネルギーを上回る核エネルギーが生じて核爆発=炭素爆燃型超新星爆発となるか、外層を徐々に吹き飛ばしながら白色矮星となる。太陽質量の8倍から12倍までの質量を持つ星は中

心部が酸素・ネオン・マグネシウムになるまで核融合が進展するが、核エネルギーが重力エネルギーを上回ることはないので、外層を徐々に吹き飛ばしながら中性子星となる。中性子星は電子ではなく中性子の縮退圧により、重力を支えている星であり、一個の巨大な原子核と思って頂ければよい。太陽質量の12倍以上の質量を持つ星は中心部に鉄が形成されるまで核融合が進展する。重力収縮により温度が 4×10^9 度を超えると、熱運動による衝突の力が核力に勝つようになり、原子核の分解が始まる。鉄の分解が始まる吸熱反応なので、急に中心部の圧力が下がり重力に対する支えを失って、星の質量は中心部に向かって落下していくことになる。この現象を重力崩壊と呼ぶ。重力崩壊後、太陽質量の12倍から30倍の質量を持つ星は重力崩壊型超新星爆発を起こして、中心に中性子星を残し、太陽質量の30倍以上の質量を持つ星は、核力で重力止めることができずにブラックホールの形成に至る。つまり、「重い星」の一部は進化の最後の過程で超新星爆発を引き起こすことになる。超新星爆発は星の誕生ではなく、星の最期なのである。

星の重要な役割の一つは、宇宙における元素合成である。標準的な宇宙論によると元素合成(核融合)に必要な高温高密度の環境が実現される機会は、ビッグバン(宇宙開闢の爆発)後の初期宇宙と星の内部に限定される。初期宇宙で元素合成される期間は時間的に短いためにヘリウムやリチウム等の軽元素しか合成できない。従って、現在我々の宇宙に存在する炭素以上の元素は全て星の内部で合成されたものであると考えられる。超新星爆発の際には、非常な高温、高密度な環境が実現されるので、多種類の重元素が合成される。こうして合成された元素の一部が、超新星爆発によって宇宙にまき散らされて一次宇宙線となると考えられている。宇宙線の話は別にして、我々の身体を構成する炭素、窒素、酸素などの原子やふえらむ読者の関心事である「鉄」が一度ならず星内部の高温・高密度な環境をくぐり抜けてきたことになる。

4.2 銀河系内一次宇宙線の寿命と伝播³⁾

我々が、地球で観測する一次宇宙線の元素組成は、源での元素組成、源から地球に到達するまでに宇宙線の通過する物質質量で決まる。一次宇宙線には宇宙線源(超新星爆発でまき散らされる元素)にはほとんど存在しないと考えられるリチウム、ベリリウム、硼素やヘリウムの同位元素 ^3He がかなり含まれる。これは、一次宇宙線に含まれる重い原子核が星間空間にある物質(主として陽子で 10^6 個/ m^3 程度の密度である)と衝突して、原子核破砕が起きるために生ずる。原子核破砕反応確率は測定されているので、それを用いて観測値に合うような通過物質質量(約 $50\text{kg}/\text{m}^2$)が計算できる。

一次宇宙線のほとんどは 10^{-7}J 以下と考えてよいので、銀河円盤の磁場(約 0.03Tesla)の中で描くスパイラル半径は 0.001 光年 $=10^{13}\text{m}$ 以下であり、一次宇宙線は十分長い時間銀河円盤(半径 5×10^4 光年、厚み 1000 光年)の中にトラップされていると考えて良い。実際、一次宇宙線のエネルギー密度は約 $10^{-13}\text{J}/\text{m}^3$ であり、これは銀河磁場のエネルギー密度にほぼ等しい。つまり、宇宙線と銀河磁場が十分長い時間をかけて相互作用を行い、エネルギー的に平衡状態になっていると解釈できる。

一次宇宙線の速度を v 、通過物質質量 l 、星間空間密度を ρ 、一次宇宙線が銀河円盤中に滞在する平均時間(逆に言うと宇宙線が銀河円盤から漏れだしてしまう平均寿命)を T とすると $l(50\text{kg}/\text{m}^2) = \rho(1.7 \times 10^{-21}\text{kg}/\text{m}^3) v T$ となる。宇宙線の速度 v は光速($3 \times 10^8\text{m}/\text{sec}$)としてよいので、 T の値は約 3×10^6 年となる。今回は紹介しなかったが、ベリリウムの同位体元素 ^{10}Be を用いた精密な実験によると T の値は 10^7 年というのが業界のコンセンサスである。つまり、 10^7 年後には宇宙線は銀河系から消失することになる。ちなみに宇宙の年齢は約 1×10^{10} 年である。ところが、様々な年代の地球の地層や月、隕石、宇宙によって生成される塵に含まれる宇宙線起源生成原子核種を調査してみると、一次宇宙線強度は過去 10^9 年にわたってほぼ一定であると考えられる。従って、どこかに一次宇宙線の供給源がなければならないが、その供給源は超新星爆発である。

銀河系内の一次宇宙線エネルギー密度($10^{-13}\text{J}/\text{m}^3$)、銀河系の体積(半径 5×10^4 光年、厚み 1000 光年の円柱なので、 10^{61}m^3)から銀河系内に蓄えられている一次宇宙線エネルギー量は、 10^{48}J となる。また、一次宇宙線が銀河円盤から漏れ出す平均寿命は 10^7 年なので、毎年 $10^{48}\text{J}/10^7\text{年} = 10^{41}\text{J}/\text{年}$ の宇宙線エネルギーが失われることになり、その損失分を何かが補填しなければならない。これを補填できるのは、超新星爆発が尤もらしいシナリオである。銀河系内における超新星爆発の頻度は30年に1回程度と見積もられ、エネルギー放出量は(超新星爆発ニュートリノが担う分を除いて) 10^{44}J である。従って、毎年 $10^{44}\text{J}/30\text{年} = 3 \times 10^{42}\text{J}/\text{年}$ のエネルギーを供給することになる。つまり、超新星爆発の数%のエネルギーで宇宙線のエネルギーを説明できることになり、超新星爆発が最も有力な宇宙線の起源とされている重要な根拠の一つとなる。

5 一次宇宙線の加速³⁾

前章までに一次宇宙線の起源と伝播について解説したが、最後に宇宙線ミュオンの親となる一次宇宙線の加速機構について述べたい。超新星爆発に伴って急激な物質放出がプラズ

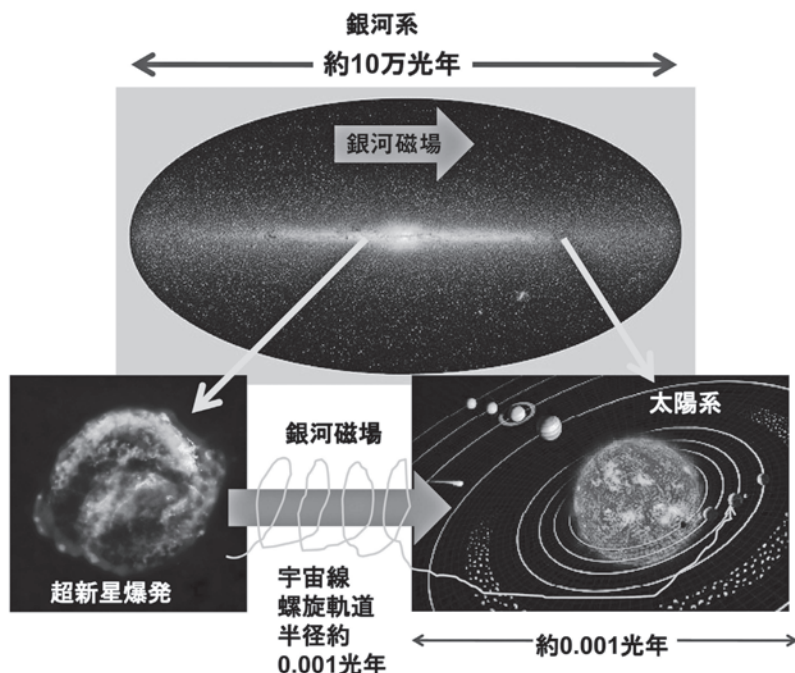


図1 銀河系(上段: Wikipedia より)、太陽系(下段右図: NASA 提供)、超新星爆発(下段左図: NASA 提供)と 10^{-7}J のエネルギーを持つ宇宙線伝搬の模式図

マ中で起きたり、中性子星やブラックホールに向かってガスが激しく降り積もる時に衝撃波が発生する。急激な物質放出を伴う超新星残骸の速度は 10^4km/sec に達する。それに対して周囲の星間物質中での音速は 10km/sec 程度なので、超新星残骸の速度は超音速となり、超音速ジェット機と同様に衝撃波を生ずる。衝撃波と衝突して反跳した粒子(=宇宙線)は加速される。加速された宇宙線の一部は星間磁場の作用でスパイラルを描いて再び衝撃波面と衝突してさらに加速される。この過程を繰り返しながら最高エネルギーとして Z (原子番号) $\times 10^{-5}\text{J}$ 程度まで加速される。この加速機構をショック加速と呼ぶ。従って、陽子は最高で $1 \times 10^{-5}\text{J}$ まで、鉄は $26 \times 10^{-5}\text{J}$ まで加速されることになる。一次宇宙線の加速エネルギー源は超新星爆発のときに解放される超新星残骸の運動エネルギーであると解釈できる。このときのエネルギースペクトルは一次宇宙線のエネルギー E^{-2} に比例するエネルギースペクトルで分布しており、実際に地球で観測される $E^{-2.7}$ に比例するエネルギースペクトルとは形が異なる。この差は、実は一次宇宙線の伝播に関係があり、銀河磁場に巻き付きながら星間物質と衝突して地球に到達する途中でエネルギーを失うことでうまく説明される。

6 終わりに

いままでに記述したことを簡潔にまとめると「宇宙線ミュオンの親となる一次宇宙線の起源は銀河系内超新星爆発であ

り、超新星残骸でショック加速された後に銀河磁場に巻き付いてスパイラル運動しながらはるばる地球に到達することになる(図1)。しかし、実はどの超新星残骸から宇宙線がきているのかは、未解決問題である。銀河磁場の影響で宇宙線は方向に関する情報を失ってしまい、ほぼ等方的(非等方性は0.01%から0.1%程度)になるために一次宇宙線の起源天体はまだ特定されていない。同様に一次宇宙線の加速機構も観測的にはまだ決着がついていない問題なのである。

超新星爆発を起源とする我々の太陽系の元素組成とよく似た化学組成を持つ一次宇宙線が地球大気に突入し、地球大気(窒素・酸素)と衝突して、二次宇宙線として多数のパイ中間子を生成する。発生したパイ中間子の中で電荷を帯びている荷電中間子は宇宙線ミュオンとニュートリノ(ほとんど物質と反応しないので素通りすると考えてよい)に崩壊し、宇宙線ミュオンの一部は地表に到達する前に電子/陽電子と2個のニュートリノに崩壊する。また、電氣的に中性な中性パイ中間子は2本のガンマ線に崩壊し、そのガンマ線が電子と陽電子の対を生成し、生成された電子や陽電子が空気と反応して再びガンマ線を放出するという連鎖反応が起きる。これらの粒子が全て混ざった現象を「空気シャワー」と呼ぶ。宇宙線ミュオンは一次宇宙線が大気中で引き起こす「空気シャワー」中に含まれる典型的な二次宇宙線である。宇宙線ミュオンは、地表では手の平くらいの面積に毎秒1個程度の頻度で飛来している。この宇宙線ミュオンが高炉内測定の新たな可能性を秘めたプローブとなるのである。自然の粒子加速器

からのミュオンビームと考えてもよい。

遠い将来の可能性として、先ほどほとんど反応しないとして無視したニュートリノを利用して地下鉱脈を探索するのも面白いかもしれない。移動型大強度ニュートリノビームを建設することと移動型ニュートリノ観測装置を作成しなければならぬので、技術的問題・費用対効果等を考えると現状では夢物語に過ぎないが…。

参考文献

- 1) 小田稔：宇宙線（改訂版），裳華房，物理学選書，5（2002）
- 2) 岡村定矩編：天文学への招待，朝倉書店，（2003）
- 3) Malcom S. Longair：High Energy Astrophysics, Cambridge University Press, 1 & 2（1992）

（2009年8月3日受付）

連携記事

宇宙線ミュオンを利用した高炉内部観察技術

Observation for the Inner Structure of Blast Furnace by Cosmic-Ray Muon Radiography

篠竹昭彦

Akihiko Shinotake

新日本製鐵(株)
環境・プロセス研究開発センター
製鉄研究開発部 主任研究員

1 はじめに

宇宙線ミュオンは、陽子や高エネルギー原子核などの1次宇宙線が大気圏に到達する際に大気原子核と反応して生成した π 中間子や k 中間子が崩壊して生成する2次宇宙線である素粒子の1つで、電荷を持つため、電氣的に中性であるニュートリノに比べて検出がしやすい。宇宙線ミュオンは、天頂角を決めると時間と場所によらずほぼ一定のエネルギースペクトルを持つ特性があるため、未知の“密度長”(密度 $\times$ 長さ)を持つ物体を透過する際の強度減衰を測ることで、“密度長”を知ることができる。この際、ミュオンの質量が電子より約200倍重く強い相互作用を行わない粒子であるという特徴の効果によって、高いエネルギーのミュオンは、鉄で数10～100mの厚みを通過することができ、ラジオグラフィーの対象とすることができる(Fig.1)¹⁾。その高エネルギーのミュオンは環境放射線である宇宙線として存在しているため発生器を必要としない。一方で、高エネルギーの宇宙線ミュオンは強度(飛来頻度)が小さく、測定精度を上げるためには、一

定の測定面積 $\times$ 測定期間をとる必要がある。

ミュオンは宇宙線として飛来するもののほか、加速器を用いて生成させることができ、加速器ミュオンが化学反応のトレーサーとして用いられた研究例もある²⁾。宇宙線ミュオンと加速器ミュオンの強度とエネルギーのレベルをFig.2に模式図として示す。Fig.2の縦軸・横軸は対数で示した。加速器ミュオンは宇宙線ミュオンに比べて強度が大きい、すなわち単位時間あたり多量に生成させることができるが、エネルギーレベルが小さく、高炉規模の巨大構造物を透過することができない。宇宙線ミュオンは高炉を透過できるGeV～TeVレベルのエネルギーを持つ。

宇宙線ミュオンを巨大構造物の内部探索に用いた例としては、Alvarezら³⁾が天頂方向から飛来する宇宙線ミュオンを利用してピラミッド内部の空間を探索した例が挙げられる。また、永嶺ら⁴⁾は、水平に近い方向から飛来する宇宙線ミュオンを利用して火山の噴火活動の解明と噴火予知を目的として火山体の内部探索を行っている。本稿では、大型構造物として高炉を対象とし、内部状態の探索を行った事例⁵⁾を紹介

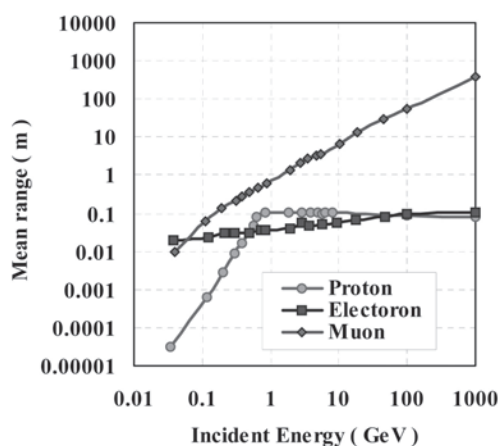


Fig.1 Relationship between incident energy and the mean range of material penetration for iron

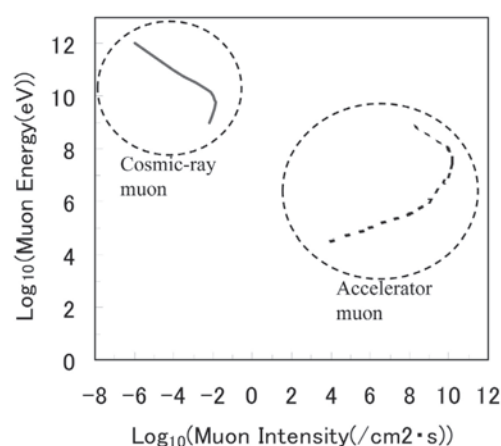


Fig.2 Relationship between Muon intensity and energy (log scale)

する。

高炉の炉下部は 1500℃ 以上の高温であり、直接内部の状態を計測することが困難である。例えば高炉の寿命を支配する要因である炉床レンガの損耗量もしくは残存厚みは直接計測できる手段がなく、レンガ背面に埋設した熱電対の温度から伝熱計算を用いて推定しているのが現実である。紹介する研究事例は、宇宙線ミュオンを用いて炉床部の密度およびレンガの残厚を非接触で計測できる可能性を確認することを目的としたものである。

2 測定原理および計測装置

宇宙線ミュオンによるラジオグラフィー（レントゲン写真撮影）の測定原理を簡単にまとめると次の通りである。

宇宙線ミュオンには強度およびエネルギー分布に天頂角依存性があり、天頂角が小さい（仰角が大きい）ほど平均的な強度は大きい、天頂角が大きい（仰角が小さく水平に近い）宇宙線ミュオンは高エネルギー成分の相対比が多い。したがって水平に近い方向から飛来するミュオンは火山体や高炉など大型対象物に対する透過性がよく、観測装置の配置が容易で対象物をそのままの状態にして測定することができる。対象とする観測物の下にトンネルを掘る必要もない。構造物を透過したミュオンの強度減衰測定を、2 基以上の位置敏感型検出器を用いて、物体を通るミュオンの経路を特定し、物体内部の「厚さ」の空間分布のマッピングを得ることができる。

永嶺らは、このような水平方向に近く（天頂角 60°～85°）強度が弱い宇宙線ミュオンを用いたラジオグラフィーを実現するために、上下左右に細分割されたプラスチックシンチレーターを検出器として用いるとともに、次のような技術開発を行った^{6,7)}。

- 1) 宇宙線ミュオンに対する有感面積が 1m 平方で空間分解能が 10cm 平方の、上下左右に 10 本ずつに分割されたプラスチックカウンター集合体を、1.5m 離して設置することにより、宇宙線ミュオンの経路ごとの強度をとらえた。そのような測定系が 2 基用意された。
- 2) 測定物を透過した方向と、反対方向からの宇宙線ミュオンを同時にとらえ、規格化し、F/B 比を求める方式を考案した。ここで F/B 比とは、測定物側 (F) と比較空間側 (B) から一定期間に到達したミュオン強度（飛来カウント数）の比である。
- 3) ミュオンに比べ数 10 倍近い多量の軟成分（電子、ガンマ線など）バックグラウンドを除去するために、中間に置いた鉄による軟成分がつくる多重発生信号を用いた。

高炉の測定は永嶺らが火山体観測に用いた測定系⁴⁾をそのまま用いて行った。観測装置を Fig.3 に示す。対象とした高炉は 2004 年に改修した新日本製鐵（株）大分第 2 高炉で、まず旧高炉吹止め後に取り出した外形形状が測定可能な炉底マンテル部を使って測定を行った。さらに、改修後稼働した新高炉について炉底部の測定を行った。

3 旧高炉の測定結果

高炉吹止め後に取り出された炉底マンテルの測定は、Fig.4 に示す配置で行った。炉底マンテルは、鋼材で組まれた台上に乗っている。マンテルの底部には炉底カーボンレンガが残っており、その上に凝固した銑鉄にスラグ、コークスが混在して固まった状態の残銑部が厚さ 0.9m 程度残った状態で乗っている。残銑層の一部が約 30° ケーキ状にカットされ、その部分が残銑層の上におかれた構造になっている。

測定は、測定器系の中心が、平面位置でマンテルの中心からマンテルの直径 17.6m の位置に、鉛直位置でマンテルの底から 2.9m の位置に、Fig.4 に示すように設置した。

仰角が小さいミュオンは前述の通り強度が弱いので、0.1m オーダーの測定精度を得るには 1 ヶ月程度の観測が必要であると推定され、30.5 日間の測定を行った。永嶺らが火山の観測で実施したのと同様の手法⁴⁾を用いて、得られた F/B 比から密度長（密度×物質通過距離）を求め、物質通過距離が既知であることを利用して物質密度を求めた。観測値より計算された密度を Fig.5 に示す。また、残銑部（密度 5.9g/cm³ と仮定）とレンガ部（密度 2.2g/cm³ と仮定）がきれいに分かれて存在していると仮定して計算した通過物質平均密度を Fig.5 中に破線で示した。

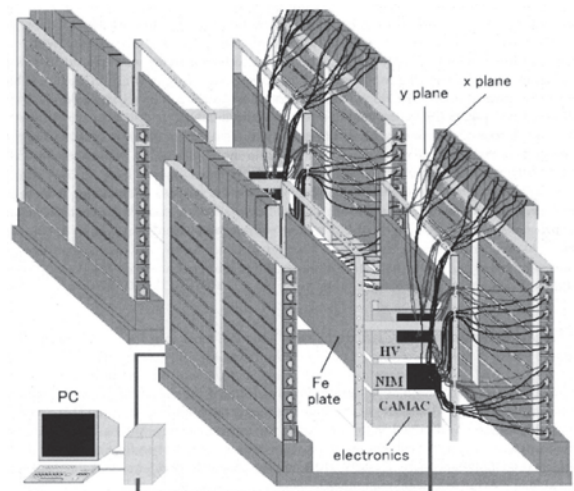


Fig.3 Probing system used for Muon observation

残鉄部は鉄鉄、コークス、スラグが混在しているため正確な密度は不明で、観測値をよく説明できる値を仮定した。マンテル周囲の鉄皮（密度 7.85g/cm^3 ）も考慮した。Fig.5は仰角 132mrad 、 198mrad 、 264mrad の3方向について水平角方向の密度分布を示している。この測定、解析から以下のことがわかった。

- 1) 仰角が $132\text{mrad} \rightarrow 198\text{mrad} \rightarrow 264\text{mrad}$ と高くなるにつれて、平均密度は高くなる。相対的に残鉄を通過する距離が増え、レンガ部を通過する距離が減っていることに対応している。
- 2) 仰角 132mrad 、水平角 $100 \sim 400\text{mrad}$ の領域では、レンガのみを通過する部分と、残鉄+レンガを通過する部

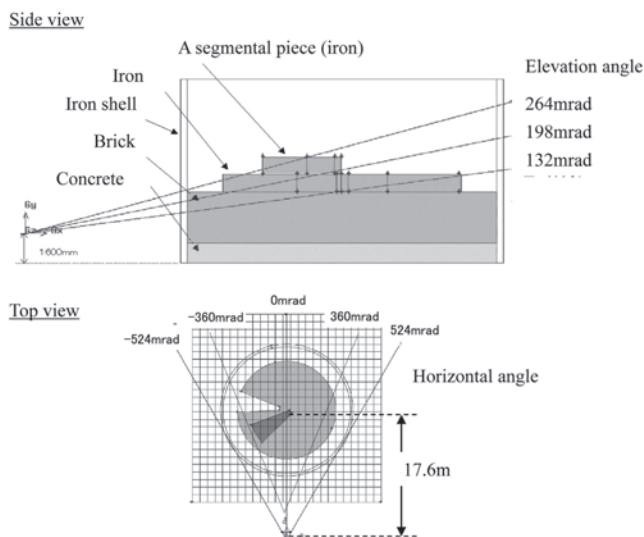


Fig.4 Location of furnace bottom remains of old Oita No.2 Blast Furnace before repair, and of its measurement

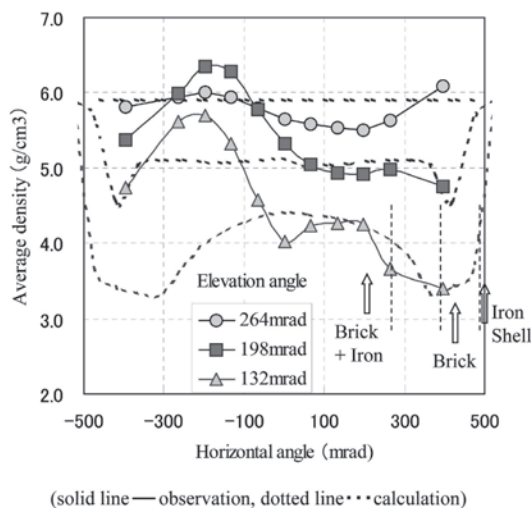


Fig.5 Mean density in every direction of the furnace bottom remains calculated from measurement values

分で明確に密度の差が検出されている。

- 3) 仰角 264mrad では、水平角が一方向で密度が若干高く、十方向で密度が若干低くなっている。残鉄層の内部で鉄鉄/コークスの比率が均一でなく、領域により密度に差があったことが考えられる。
- 4) 仰角 132mrad 、および仰角 198mrad の領域では、水平角 $-100\text{mrad} \sim -300\text{mrad}$ 付近の密度が高くなっている。炉底レンガの一部が損耗し鉄鉄に置き換わっていて、破線の計算前提より残鉄を通過する距離が長く、レンガ部を通過する距離が短かったことが推定される。

4 新高炉の測定結果

改修後稼働した高炉の測定は、Fig.6に示す配置で行った。測定器系の中心が、平面位置でマンテルの中心からマンテルの直径 17.9m の位置に、鉛直位置で測定装置下端が地上から 2.66m の位置に設置した。まずこの位置で24日間測定を行った。次に、炉底レンガの損耗量の推定精度を上げるために、測定器を鉛直上方に 2m 上げて、その位置で21日間測定を行った。

最初の測定位置で測定されたF（高炉側）/B（空側）比の空間分布をFig.7に示す。横軸が水平角、縦軸が垂直角を表す。図の中心部を縦に通る直線が炉の中心軸を通る位置を示す。水平角方向で見ると、炉内の通過距離が長い炉の中心部ほどF/B比が小さい。また、垂直角方向で見ると、レンガ部を通過する仰角の小さい部分よりも、炉内鉄部を通過する仰角の大きい部分の方がF/B比が小さい。

次いで、測定結果を定量的に評価するため、シミュレーション計算を行った。高炉の炉床部分を円筒形に近似して、炉内鉄部の密度、炉底部のレンガの厚さをパラメーターとし、高炉を透過してくるミュオンの飛来について火山体観測に用いたのと同様の手法でモンテカルロシミュレーションを行い⁴⁾、宇宙線ミュオンの透過像のF/B比分布を算出した。

Fig.8に炉内鉄部の密度を変化させた場合のF/B比の分布

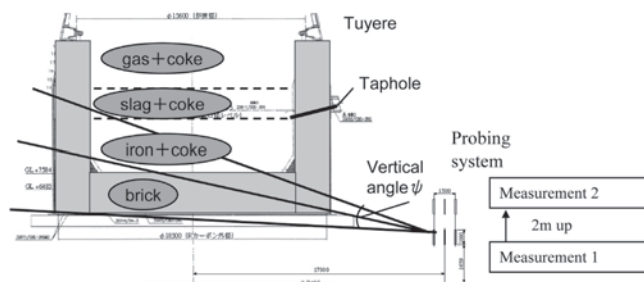


Fig.6 Relation between the furnace bottom portion and the measurement position in Oita No.2 Blast Furnace

図の例と、密度と炉床湯溜まり部分を横断する経路のF/B比との関係を示す。このF/B比を実測値と比較した結果、炉床湯溜まり部分の平均密度は 6.347g/cm^3 と推定された。この値は銑鉄の密度よりやや小さいが、湯溜まり部には密度がより小さいコークスが混在しているため、平均密度は銑鉄のみの場合より小さい。次いで、炉床湯溜まり部には推定された上記の密度を用いて、炉底レンガの上面位置を変化させた計算結果をFig.9に示す。今度は炉底レンガ上面を横切るミュオン透過経路を選択し、実測値とF/B比を比較した。炉底レンガが損耗してレンガ上面位置が低下すると、レンガ部が鉄部に置き換わるため、レンガ部の通過長さが減少して鉄部の通過長さが増加し、F/B比は小さくなる。比較の結果、レンガの損耗量は $20.7\text{cm} \pm 10.8\text{cm}$ と推定された。

Fig.7に示された水平角、垂直角各方向について、F/B比の実測値とモンテカルロシミュレーションとの比較により推定した炉内の平均密度の分布をFig.10に示す。湯溜まり部の通過長さが大きい部位の密度が大きいのは共通であるが、

2m上方で測定した場合の方が、高密度部分がより低仰角側に広がっている。また、両方の位置の測定結果を合成してレンガ損耗量を推定した図をFig.11に示す。左の図は初期の測定位置(0m)および測定器上昇後の測定位置(+2m)において観測されたF/B比と、レンガ損耗厚みを0cm、50cm、100cmの3水準仮定してモンテカルロシミュレーションによって計算されたF/B比を仰角に対して示す。右の図は、左の図の結果から、炉底レンガ上面を横切るミュオン透過経路に対応する仰角(0mに対し180mrad、+2mに対し150mrad)を選択し、シミュレーション結果をつないだ線上に測定値をプロットしたものである。両測定位置での結果を平均して、損耗量は $14.5\text{cm} \pm 4.9\text{cm}$ と推定された。この誤差項はミュオン飛来頻度のランダム性に起因する誤差で、観測期間が大きくなれば縮小する。他方、推定において炉床湯溜まり部の密度は湯溜まり部分を横断するミュオン透過経路上のF/B比の測定値をシミュレーションと比較して求めた値を用いているが、実際は湯溜まり部の密度は均一ではなく、溶銑・

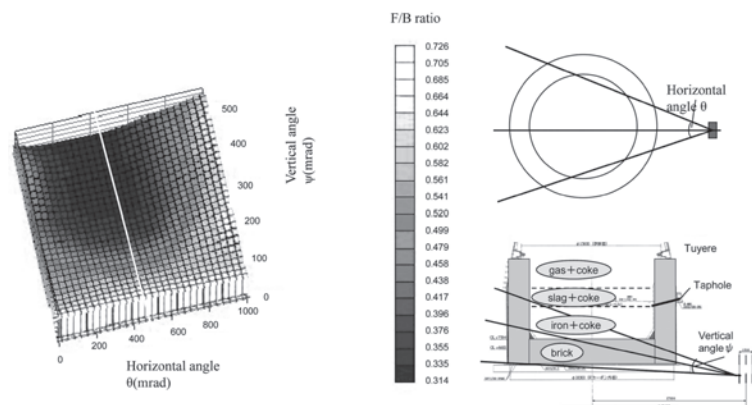


Fig.7 Muon penetrating intensity ratio measured in the blast furnace side and the opposite/skyward side

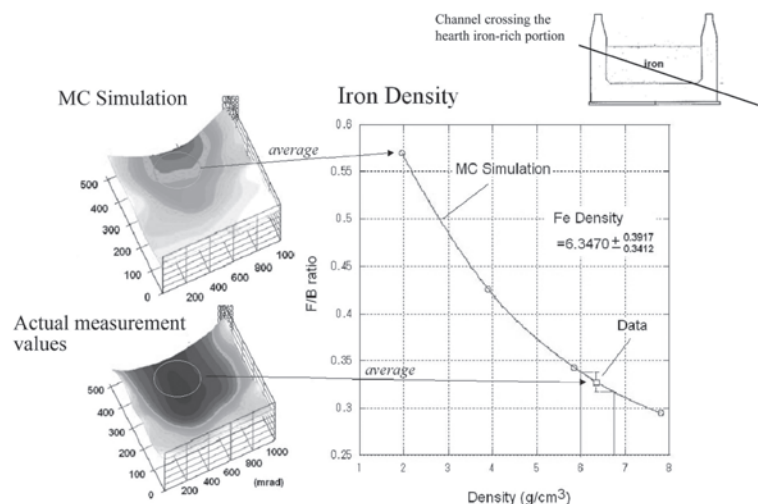


Fig.8 Estimation of the density in the hearth iron-rich portion

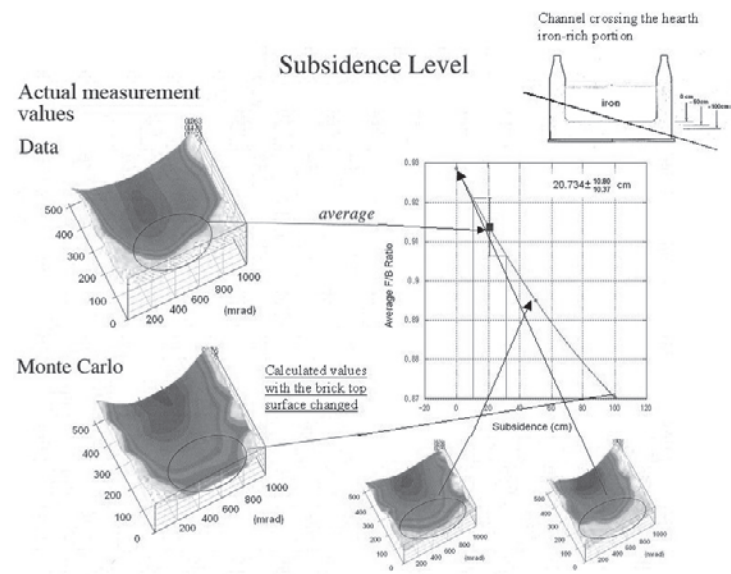


Fig.9 Comparison between measured data and Monte-Carlo simulation

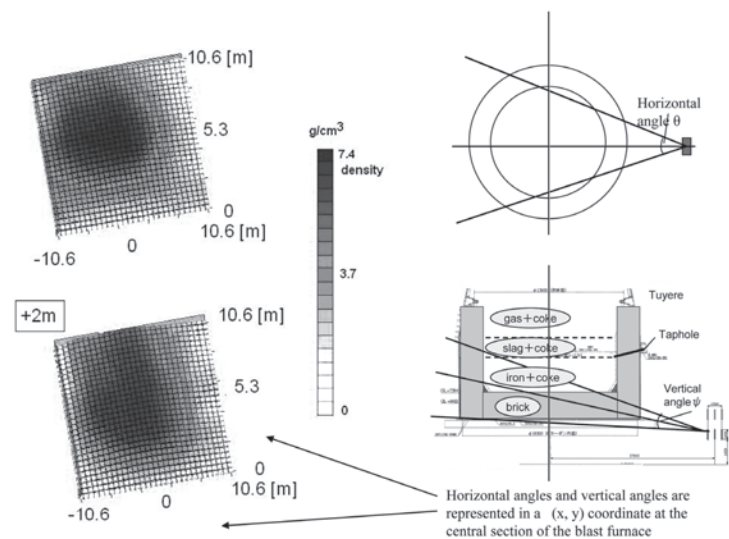


Fig.10 Average density on the penetrating channel in each direction

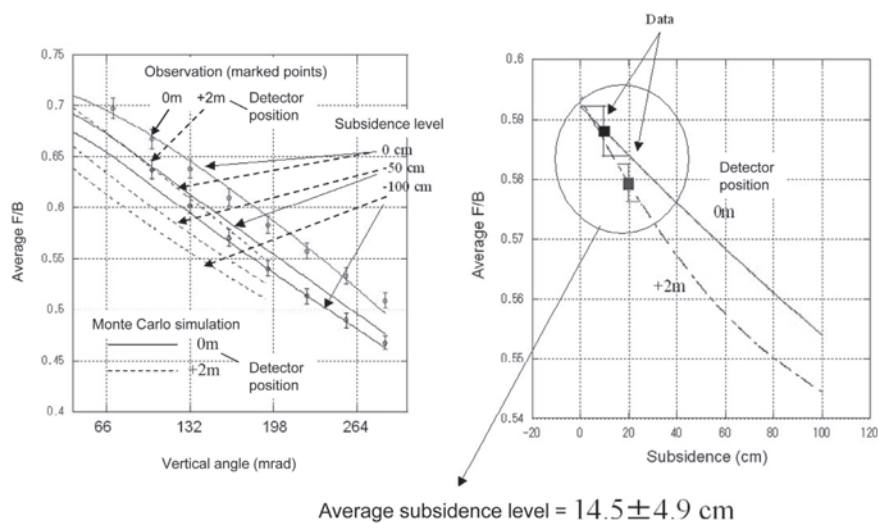


Fig.11 The erosion loss thickness of the furnace bottom (subsidence) induced from the measurement results in the two arrangements of the different heights

コークス・スラグの存在割合によって局所分布があり、異なるミュオン透過経路上では平均密度は同じとはいえず、上記レンガ損耗量推定値には別の誤差があると考えられる。さらに、測定器系の空間分解能による誤差および、高炉側および比較空間側の測定空間における物質質量を持つ障害物に起因する誤差もある。これらの誤差を縮小してレンガ損耗量の推定精度を向上することは今後の課題である。密度の局所分布を推定するには、異なる方向からの測定を用いたトモグラフィが考えられ、これも今後の開発課題の1つである。

5 おわりに

宇宙線ミュオンが構造物を透過する際に、密度と厚みに対応して減衰する性質を利用して高炉内部の状態の可視化を探索した。新日本製鐵(株)大分第2高炉で、旧高炉を吹止めた後に取り出した炉底マンテルおよび、改修後に稼働を開始した新高炉の炉床部の測定を行い、(1) 吹止め高炉の炉底マンテル部分の測定から、レンガと残銑部の形状および密度差に対応したミュオン強度分布が得られることを検証し、(2) 新高炉の炉床湯溜まり部分を横断する経路を透過したミュオン強度から、選択した経路上の平均密度を推定し、(3) 新高炉の炉底レンガと炉内を横切る経路のミュオン強度から、炉底レンガの損耗レベルを推定した。本測定方法により、高炉内の物質密度分布およびレンガの損耗量を推定できる可能性を初めて見出した。

一方、今後の課題としては、測定精度の向上と観測装置のダウンサイジングが挙げられる。火山活動の解明や噴火予知を目的として宇宙線ミュオンを用いた火山体観測を行う場合は、噴火口内部が空洞であるかマグマが上昇してきているかを識別することが重要であり、位置特定精度はさほど要求されないため、遠方からの観測も可能であり、今回使用したような大型の観測装置であっても、比較的設置場所の制約が少ない。一方、高炉の内部の密度分布やレンガの残存量を観測しようとする場合、高い位置特定精度が要求される。一定の立体角に対する位置特定精度は観測対象から測定器までの距離に比例するため、高炉観測の場合測定器をできるだけ高炉の近くに置くことが望ましいが、大型の測定器は、高炉の近傍では設置場所の制約が大きく、観測したい場所を見るのが

困難なことも考えられる。測定器を小型化できれば設置場所の自由度が増す。

また、高炉炉内のように時間的に変化する対象を観測する場合はできるだけ測定期間を短くできることが望ましいが、宇宙線ミュオンは飛来頻度が高くなく、空間分解能と時間分解能がトレードオフの関係にあり、高い空間精度を得るには一定の観測期間を必要とする。測定面積を大きくすることで時間あたりのミュオン蓄積量を増やし、観測期間を短縮することが可能であるが、装置はより高価となり、設置場所の制約も大きくなる。今後宇宙線ミュオンを利用した高炉測定を効果的に行うには、例えば時間変化が小さいレンガ損耗量については観測期間を十分とって位置特定精度を上げる、時間変化がより大きい炉内の観測には位置特定精度をやや緩和しても観測時間を短縮する、など、観測対象に合わせて測定器系を最適化する設計が重要になってくる。今後の進展を図りたい。それとともに、高炉測定にとどまらず火山観測も含めて宇宙線ミュオン測定の多方面へ活用が展開され、測定技術・解析技術が進化することが期待される。

参考文献

- 1) K. Nagamine : Introductory Muon Science, Cambridge University Press (2003)
- 2) R. West : 化学と工業, 61 (2008) , 1059.
- 3) L. W. Alvarez, J. A. Anderson, F. E. Bedwei, J. Burkhard, A. Fakhry, A. Girgis, A. Goneid, F. Hassan, D. Iverson, G. Lynch, Z. Miligy, A. H. Moussa, M. Sharkawi and L. Yazolino : Science, 167 (1970) , 832.
- 4) 田中宏幸, 永嶺謙忠 : 火山, 48 (2003) , 345.
- 5) 篠竹昭彦, 松崎眞六, 国友和也, 内藤誠章, 橋本操, 圃中朝夫, 長根利弘, 永嶺謙忠, 田中宏幸 : 鉄と鋼, 95 (2009) , 665.
- 6) K. Nagamine, M. Iwasaki, K. Shimomura, and K. Ishida : Nucl. Instr. Methods Phys. Res., A356 (1995) , 585.
- 7) H. Tanaka, K. Nagamine, N. Kawamura, S. Nakamura, K. Ishida, and K. Shimomura : Nuclear Instruments, A507 (2003) , 657.

(2009年8月10日受付)



製鉄原料展望-3

スクラップの現状

The Current Status of Scrap

原田幸明
Komei Harada

(独) 物質・材料研究機構
元素戦略センター長

1 はじめに

我が国のマテリアルフロー 2,163 百万トン¹⁾の第一位は土石(約800)、第二位は化石燃料(約500)であるが、鉄は約120百万トンと第三位であり、かつその約30%が市中スクラップを用いて生産されている。このように鉄におけるスクラップの利用は将来の持続可能な循環型社会に向けて一歩踏み出した形となっており、今後の動向を的確につかみより持続可能な方向へと進めていくことは現世代の大きな責任である。

現状の把握に関しては、鉄源協会が「クオータリー鉄源」²⁾などを通じて定量的なデータ整理のみならず分析を行っており、今後の需給にかかわる解析に関して小澤ら³⁾によるもの醍醐⁴⁾によるものなど議論が進んでおり、鉄源としての専門的な観点からのスクラップの理解はそれらを参考にするのが適切であると考えられる。

本稿では、それらの分析や議論をより活用する立場から、我が国の鉄のスクラップからの視点ではなく、さまざまな金属スクラップの中の鉄スクラップ、世界のスクラップ動向の中の我が国の鉄スクラップについて情報を整理し、新たな視点で鉄スクラップを捉える一助としたい。

2 スクラップとリサイクル

図1は、いろいろな要素をまとめたリサイクルの概念図である⁵⁾。鉄のリサイクルはほとんどが“オープンリサイクル(別種の製品に戻す)”の“マテリアルリサイクル(素材として使う)”になる。図でマテリアルリサイクルの入口に二種類あることを示しているが、金やレアメタルなどはリサイクルと同時に製錬が行われる“抽出型”なのに対して、鉄はアルミやガラス、紙などと同様に不純物レベルを調整してリサイクルする“希釈型”に属する。この希釈型は抽出型に比べて廃棄

物の発生が極めて少なくなるが、トランプエレメントの管理など抽出型にはない問題が伴う。

ポストコンシューマーリサイクルとプリコンシューマーリサイクルの違いは多くのリサイクルシステムで大きな問題になっている。前者は使用済み製品からのリサイクルであり、後者はそれに至る製造段階からの端材のリサイクルである。鉄スクラップでは、前者に相当するスクラップを“老廃スクラップ”とよび、後者で鉄製造で発生するものを“自家スクラップ”、自動車等の加工段階で発生するものを“加工スクラップ”と呼んでいる。なお、“市中スクラップ”とは“加工スクラップ”と“老廃スクラップ”の両者を含んだ鉄製造業が外部購入するスクラップである。リサイクルの大きな目的のひとつである原料としての天然資源使用量の削減に効果があるのはポストコンシューマーリサイクルである。しかし一般にプリコンシューマーでは、発生物の性状も明確で安定しておりかつ供給も定常性が高いためリサイクルは容易であるが、ポストコンシューマーになると上記の特徴が失われて個性、分散性、不安定性が増すだけでなく様々な他素材と混在してしまい選別のプロセスが重要になってくる。その点で、

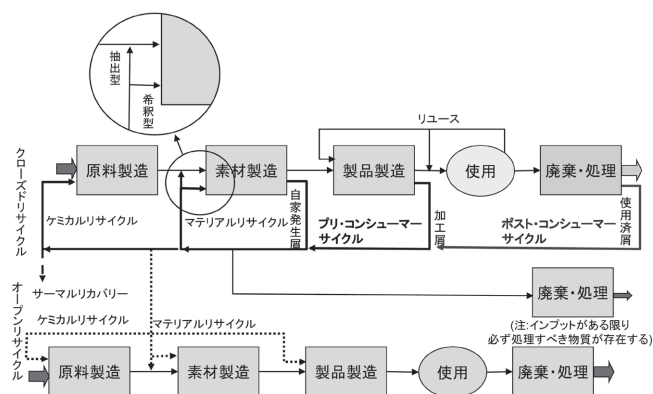


図1 全般的なリサイクルの種類

鉄の場合は選別において磁選が可能であり、ポストコンシューマーである老廃スクラップが相対的に利用しやすい状況にあるといえる。

3 鉄スクラップの構成

図2に鉄源協会の「鉄源需要基礎情報」⁶⁾から得られる2007年の鉄スクラップの供給と利用状況を図示した。2007年の鉄スクラップ使用量は約5300万トン、さらに600万トンを超える量が輸出量として統計上計上されている。なおこの輸出量には銅含有屑などの「雑品」も含まれるのでその全てが鉄という訳ではない。このうち鉄鋼産業以外からの購入スクラップが市中スクラップで約3800万トンである。それを図では加工スクラップと老廃スクラップに分け、さらにそれぞれの発生源毎の量を記しているが、これはスクラップがそのように区分されて購入されるのではなく、鉄源協会の分析による結果である。実際のスクラップは、図の上から4段目のように“新断”、“だらい”、“HS”などの性状により分類され購入される。その中でも加工スクラップに相当するとされるのは、“新断”、“だらい”および“銑”であり、それ以外のものはほぼ使用済みの老廃スクラップとみなされる。

量的な把握は、鉄源協会が数年毎に、自動車、産業機械などの各分野での加工屑発生率を調査しており⁷⁾、各年度でのそれぞれの分野への供給量にその発生率を乗じて加工スクラップの発生量が見積もられ、その加工スクラップの量を市中購入スクラップから減じたものが老廃スクラップの量として取り扱われている。なお近年は5年ごとに出版される産業連関表⁸⁾に「屑」部門が表記されるようになったためそれを用

いた加工屑量の把握も行われるようになっている。

いずれにしても、鉄の場合は加工スクラップに対してその3倍近くの老廃スクラップが利用されており、これは金属の中では自動車バッテリーを持つ鉛のスクラップに次いで高いポストコンシューマーリサイクル比となっている。この高いポストコンシューマーリサイクルを支えているのは、ひとつに先述の選別性の高さであるが、蓄積の大きさも、もうひとつの要因になっている。図3に示すのは、鉄鋼蓄積量と老廃スクラップ回収量、スクラップ使用量、鋼材生産量である。蓄積量の増大とともに老廃スクラップ回収量も伸びており、蓄積量に対する老廃スクラップ回収量の比は、1970年代から現在までほぼ2%から3%の間となっている。

4 各金属の状況

鉄にかぎらず金属の人間経済圏内部蓄積は、“二次ストック”もしくは“on-surface stock”と呼ばれて、地下にある天然資源すなわち、“一次ストック”もしくは“under ground stock”とも呼ばれる埋蔵金属資源、に加えてわれわれが活用すべき資源であり、都市鉱山 (urban mining)⁹⁾の対象となる。図4に様々な金属の蓄積推定量¹⁰⁾を表した。この数値は著者らが都市鉱山蓄積推定値として、輸入量の累積から製品輸出も含む輸出累積を差し引いて計算したものである。鉄の場合は鉄源協会による積み上げ法による蓄積量算定があるが、それとほぼ近い値になっている。

図4は対数目盛で記されており、鉄の蓄積量は他の金属と比べて圧倒的に大きい。マテリアルフローで鉄を凌ぐ土石や化石燃料は再利用可能な蓄積物となるのは困難であるから鉄

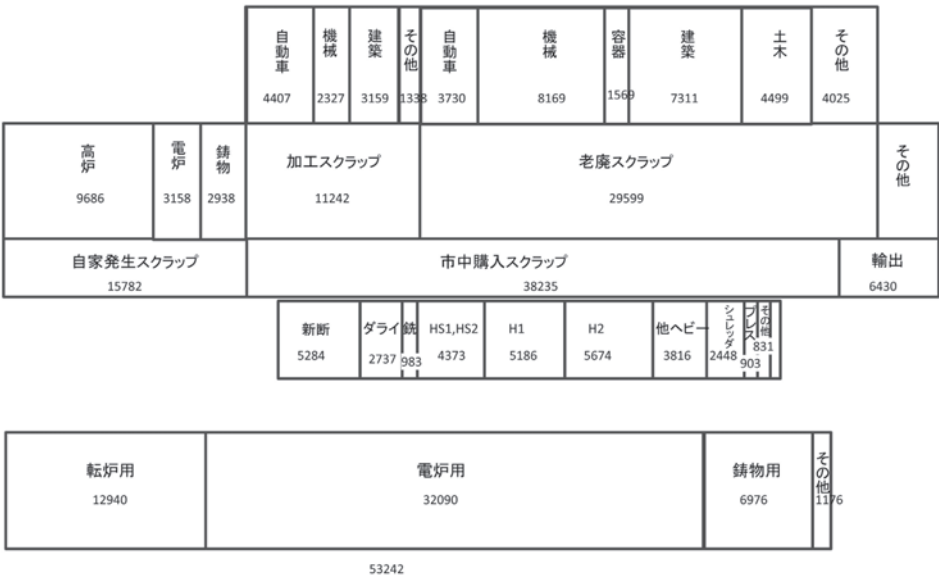


図2 2007年の我が国の鉄スクラップ構成

が最大の人工資源になっていると言っても差支えない。

各金属のリサイクル率を生産量に対してプロットしたものが図5である。リサイクル率には様々な定義の仕方がある。これは、それぞれの素材や製品に対して固有のリサイクル上の課題がありそれを克服するための取組指標としてそれぞれの分野でリサイクル率を定義しているためである。客観性の高い指標としては、ある素材を生産した場合に、すでに人間経済圏に存在していた原料を含んでいる割合を表す「リサイクル物含有率」を用いるのが良く、図5はそれで表している。これは、もし天然原料の原子にマーキングができ素材製造後にそれが消えたなら、製造段階を流れている素材でマーキングの無い原子の割合に相当する。

図5のデータは一貫性をとるためJOGMECのマテリアルフロー調査¹¹⁾より読み取った。鉄のリサイクル物含有率が鉄

の全生産の対するスクラップ投入比である鉄スクラップ投入率として知られている値より10ポイントほど低い、これは他の素材に合わせてLCAで通常使われる方法にもとづき自家発生スクラップの利用をプロセス内利用として計算から外して計算してあるからである。

鉄は銅、アルミ、鉛とともに使用量も多くリサイクル率も高いグループの代表である。なお、Cr、Mnは鉄鋼材料に含まれて循環しているとみなされる量も含まれている。このようなリサイクルは主成分を目的とした循環をエレメンタルリサイクル (elemental recycle) と呼ぶならばバイリサイクル (by-recycle) と呼ぶべき存在である。特に鉄鋼の場合は使用量が多いため低濃度の添加元素も量的には大きな値となり、Cr、MnのみならずNb、Vなどのリサイクルに大きくかわっている。

図5の左上のIn、Ga、Coなどはほとんどがブリコンシューマリーサイクルであり、リサイクル率は高いものの天然資源の削減への効果は少なく、鉄の老廃スクラップのように使用済みリサイクル原料を用いることで天然資源消費量を削減し持続可能性を高めることができる。

5 世界の状況

次に世界全体の鉄スクラップの状況を見てみる。図6は世界各国の鉄スクラップ発生量をその国の鉄消費量との関係でプロットしたものである。データは世界鉄連の world Steel Use in Figure¹²⁾ からとっており、スクラップ発生量は直接のデータではなくスクラップ消費量に輸出量を加算し輸入量を減算したものである。図からわかるようにスクラップ発生量と消費量はほぼ直線関係にあるが、中国が消費量に対して相対的に低い発生量になっている。

ここ近年のスクラップ発生量の推移を表1に示した。各地

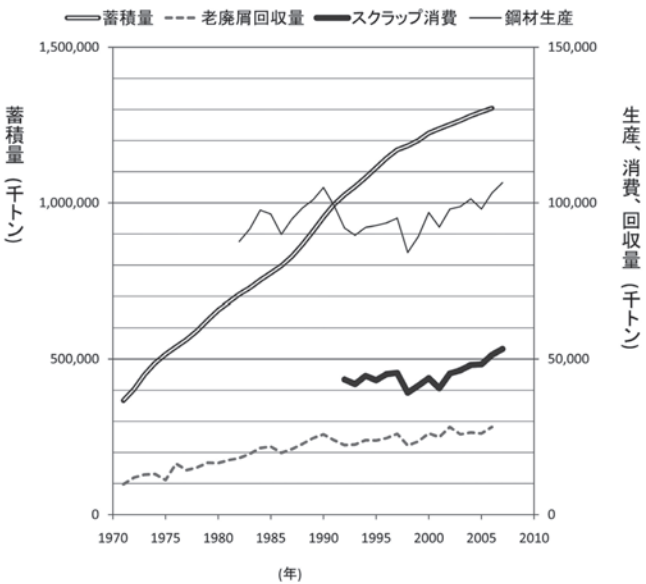


図3 鉄の国内蓄積量と鋼材生産、スクラップ消費、老廃屑回収量

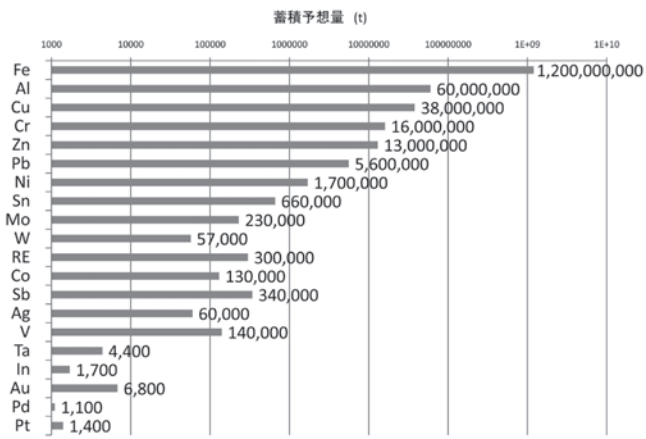


図4 各金属の国内蓄積予想量

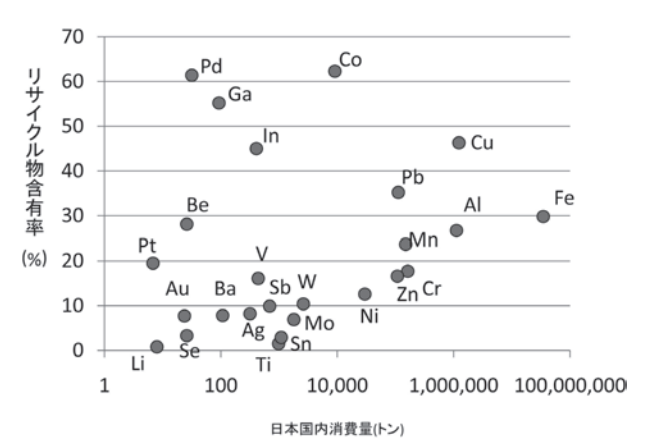


図5 各金属の国内消費量とリサイクル率 (リサイクル物含有率)

域や国の発生量は世界全体に対するパーセンテージで示している。2008年は世界経済危機を反映してスクラップ発生量も前年度比約7%減となっている。しかしこれは世界で一様ではなく、南・中央アメリカは絶対量としても発生量を増やしている。

いまひとつ注目すべきは中国の挙動である。2005年から2006年の間に中国のスクラップ発生量は日本や旧ソ連地域を追い越しておりアメリカに迫る勢いである。これは中国の鉄鋼生産が飛躍的に伸びていることの反映であるが、同時にその生産の内容に変化が起きてきていることも一因になっている。図7は国際鉄連の統計¹³⁾から得られた熱延鋼の棒・型もの(long hot-rolled)と板・帯もの(flat hot-rolled)の生産量の推移を中国と日本で比較したものであり、中国では2002年から急速にflat hot-rolledの生産が高まっている。これらの最終需要を日本の産業連関表から得られる波及関係と同程度と仮定すると、long hot-rolledの波及は機械に4.3%、電気0.5%、輸送に4.1%、建築に52.9%、土木に42.9%であり、一方でflat hot-rolledは機械15.7%、電気11.2%、輸送28.1%、建築28.6%、土木12.4%となっており、寿命の長い建築、土木用途から相対的に短寿命の電気、機械、輸送部門への供給が増している。さらにこれらのflat hot-rolledが主として対象とする機械、電気、輸送部門の端材発生率は

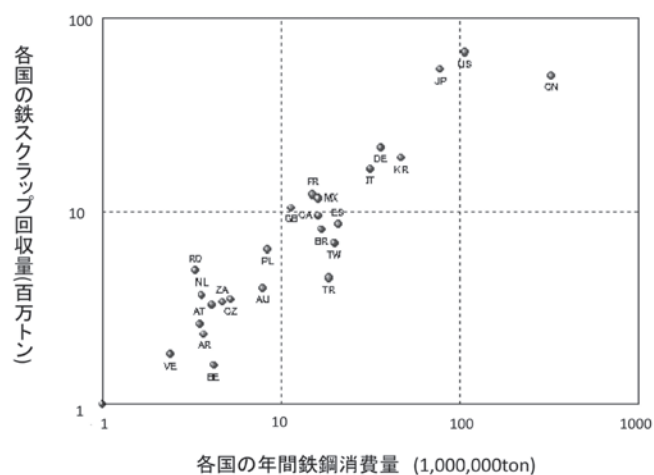


図6 世界各国の年間鉄鋼消費量とスクラップ回収量

表1 世界のスクラップ発生量と地域シェア

	2008	2007	2006	2005
world(Mton)	445.2	478.9	459.7	433.9
EU%	22.2	24.6	25.6	23.4
CIS%	10.5	12.7	12.3	14.9
USA%	14.4	16.1	15.8	15.3
China%	13.1	15.6	13.0	11.5
Japan%	10.4	12.4	12.3	12.5
CS-America%	6.1	5.6	5.2	6.1

日本の場合でもそれぞれ、14.5%、19.9%、16.2%と建築、土木の3.3%と比べて大きく、これも中国のスクラップ増の一因になっている。

このような分析はさらに寿命曲線などを用いて経年分析をすすめることで将来予測なども可能であろうが、ここでは上記の仮定とともに耐用年数を電気5年、輸送および機械10年、建築30年として単純に計算できる2008年の中国のスクラップ構成の推定を図8に示すにとどめる。図からわかるとおり電気機械の老廃屑や自動車の加工屑が多くを占めていると予想され、今後もflat hot-rolledの鋼材製造が伸びるならばこのような加工スクラップや短寿命製品の老廃スクラップの増加によりますます中国のスクラップ発生は大きくなるものと予想される。

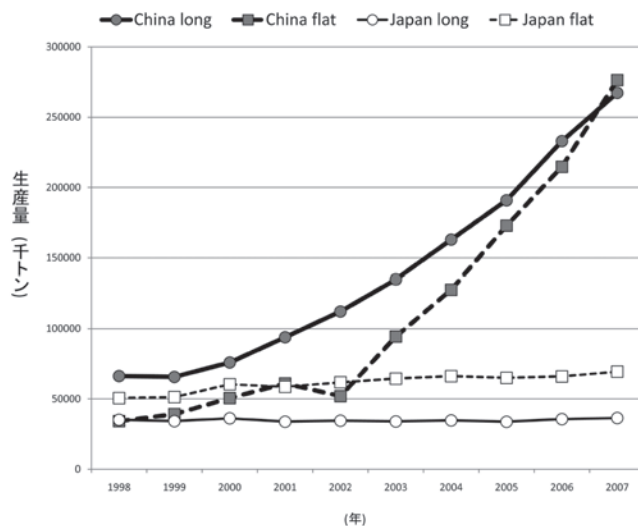


図7 中国と日本の熱延鋼材生産量の推移

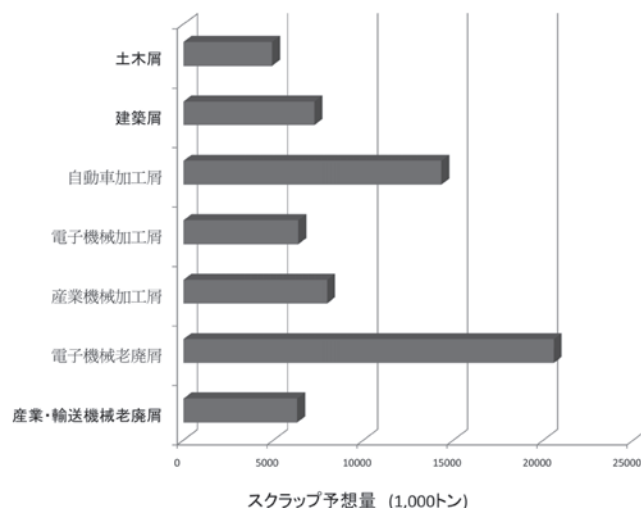


図8 中国の2007年スクラップ構成予想

6 グローバルな展開

中国の動きは世界のスクラップ状況に大きく影響するが、世界はそればかりではない。図9に2008年の鉄スクラップのトレードフローを図示した。データは国連貿易統計(Comtrade)¹⁴⁾から得て輸出入の上位10か国を入超国は白丸、出超国は白抜きで示し、二国間の貿易量を輸入側の統計データをもとに量の多いものから上位約30のフローとそこには含まれないが輸出入の多い国の典型的取引先のフローをディフォルメした地図上に記したものである。なお、国名は二文字の国際標準コードを用いており、線の太さは貿易量に比例している。

図9でわかるように、鉄スクラップの最大の輸入国は中国ではなくトルコである。トルコにはアメリカ、ロシア、ヨーロッパなど世界の各地からスクラップが輸入されている。なお、2006年ではロシアからの輸入が大部分であった。中国は輸入量も5位となっており、スペイン、イタリア、エジプトなど地中海沿岸から中東、中部ユーラシアがスクラップの輸入国となっている。

これらのスクラップがさらにどこに流れるかを知るために、スクラップに依存することの多い棒鋼の2008年のトレードフローを図10に示した。2005年ではトルコからアラブ首長国連邦への流れが格段に大きかったが¹⁵⁾、経済危機の影響で

その流れは少なくなり、トルコからはアメリカ、イタリアへと流れている。またアメリカが棒鋼の輸入国としての性格を強める一方で、中国は輸出国の側面をますます強くしており、アジア、アメリカへの輸出拠点となりつつある。

この図9、図10を合わせてみると、鉄スクラップはもはや、発展途上国が国内の建設需要の増大に合わせて近隣国から鉄源を調達しているという関係ではなく、大洋を渡って国際的な規模で動き、またそのスクラップから製造される製品も国際商品として流通していることがわかる。1980年代は多くのトレードフローは日米独の三極を軸として動いていたが、これからは南東北欧、中東、中部ユーラシアなど幅広い可能性に目を向けた動向把握が必要となってくる。

そのような動向把握の際に注意すべきことは、製品としての鉄もまた世界中に移動して回っているということである。図11は、自動車のトレードフローであるが、その重量の7割程度は鉄鋼製品であり、日本からアメリカにはほぼ240万トンの鉄が輸出されたことに相当している。他の製品にも多くの鉄が使用されており、今後これらの動態を含めて二次ストックとしての鉄の蓄積動態と分布を把握していくことが、特にこれから産業の急成長にともなって鉄の消費が急速に増すと思われるAALA(アジア、アフリカ、ラテンアメリカ)諸国に鉄鋼をいかに供給し、循環していくかという課題の解決に大きく影響していくと思われる。

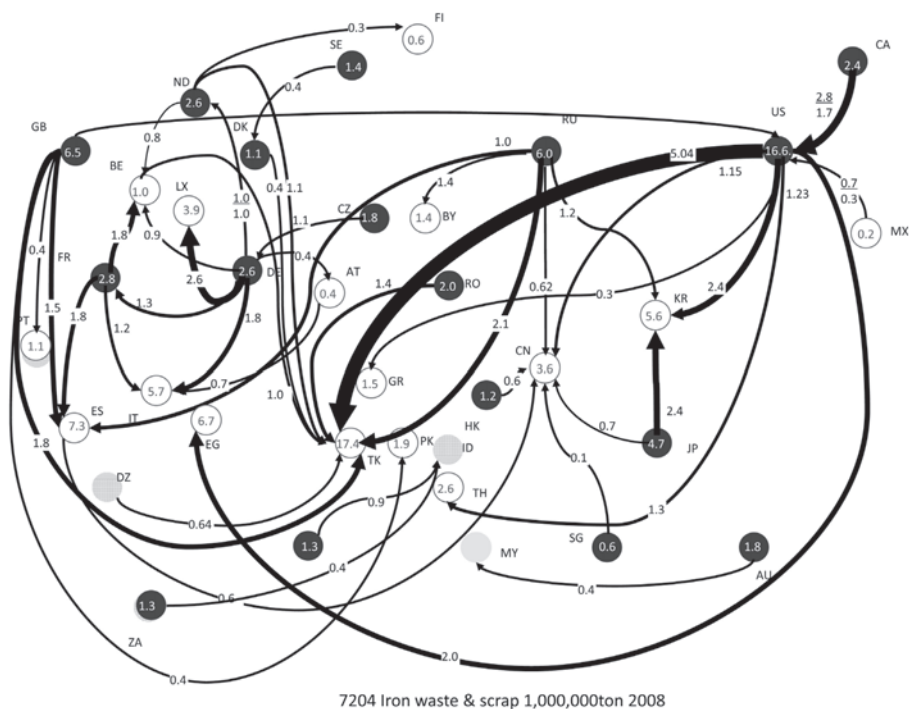
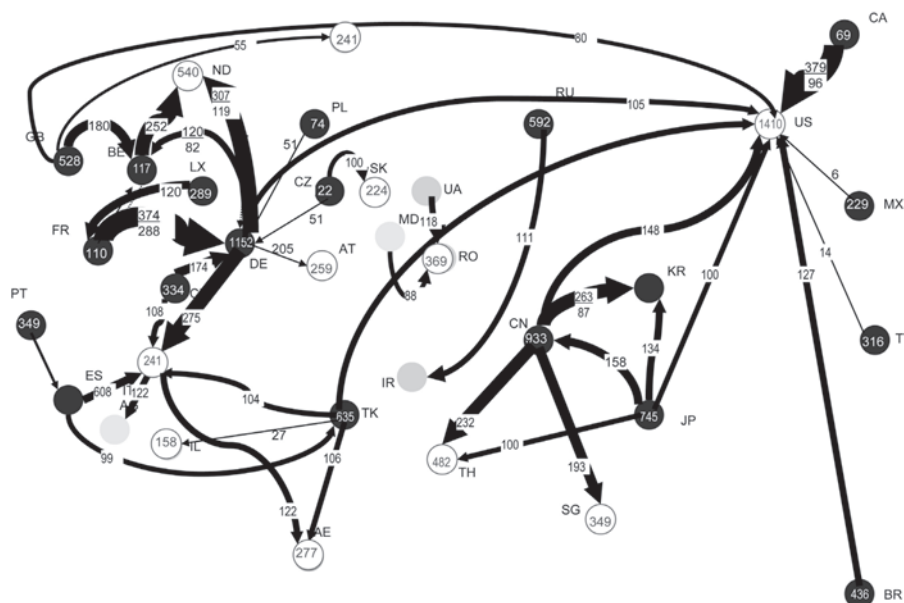


図9 鉄スクラップの2008年のトレードフロー

7 おわりに

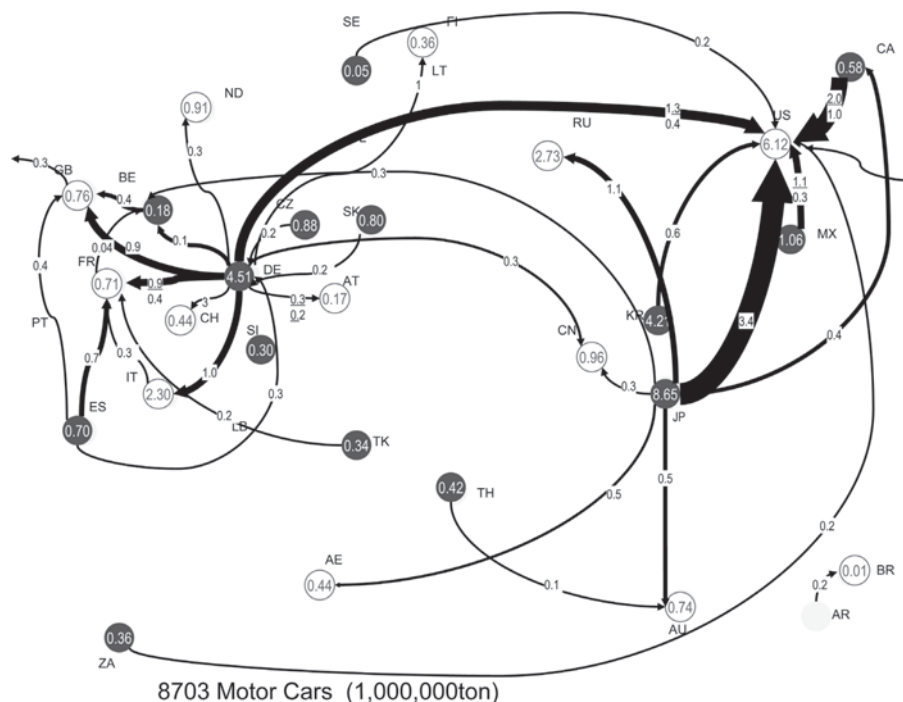
鉄鋼は膨大な需要を持ちつつも循環型への適応を進めている典型的な素材である。今後、中国のみならずAALA諸国など世界的な鉄需要の増大の中で持続可能な鉄資源の利用を

追及していくと、ますますスクラップの役割は大きくなる。国内的な視点だけでなく国際的な観点からのスクラップ利用の議論がこれから盛んになると思われる。本稿がその一助になればと願う次第である。



7213 Iron Rods 1,000ton 2008

図 10 棒鋼の 2008 年のトレードフロー



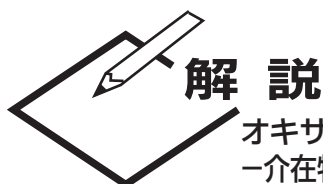
8703 Motor Cars (1,000,000ton)

図 11 乗用車の 2008 年のトレードフロー

参考文献

- 1) 平成 20 年環境循環型白書, 環境省 (2008)
- 2) クォーター鉄源, 鉄源協会, (1999)
- 3) 小澤純夫, 林誠一, 月橋文孝: 鉄と鋼, 95 (2009) 6, 70-78.
- 4) 醍醐市朗: ふえらむ, 13 (2008) 5, 53.
- 5) 物質・材料工学と社会, 日本放送出版協会, (2005), 147.
- 6) 鉄源協会ホームページ「鉄源需給基礎情報」,
<http://www.tetsugen.gol.com/kiso/>
- 7) クォーター鉄源, 鉄源協会, 19 (2004) 1.
- 8) 2005 年産業連関表, 総務省統計局, (2008)
- 9) 南条道夫: 都市鉱山開発一包括的資源観による: リサイクルシステムの位置付け 東北大学選鉱製錬研究所彙報
43 (1988) 2, 239 - 251.
- 10) 原田幸明, 井島清, 島田正典: 日本金属学会誌, 73 (2009) 3, 151-160.
- 11) 鉱物資源マテリアルフロー 2007, JOGMEC, (2008)
- 12) World steel use in Figure 2008, IISI, (2009)
- 13) Steel Statistics Yearbook 2008, IISI, (2009)
- 14) 国連貿易統計 UN COMTRADE,
<http://comtrade.un.org/db/>
- 15) 原田幸明: 第 196・197 回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, (2008), 81.

(2009 年 9 月 2 日受付)



オキサイドメタラジー—5
—介在物利用による組織制御—

酸化物系介在物の微細分散および組成制御技術 —製鋼におけるオキサイドメタラジー技術—

Control of the Size and the Composition of Oxide Inclusions for Oxides Metallurgy

若生昌光
Masamitsu Wakoh

新日本製鐵 (株) 大分技術研究部
主幹研究員

1 緒言

これまで鋼中の非金属介在物は製品特性にとって有害であるとして、その除去に多大の努力がなされてきた。これらの有害な介在物は、一般に $50\mu\text{m}$ 以上の大きさである場合が多い。しかしながら、1990年に、数 μm サイズの鋼中酸化物の分布や組成を制御することにより、鋼の凝固後に析出物の析出核として作用させ、製品特性を向上させようとする考え、いわゆるオキサイドメタラジー (Oxides Metallurgy) が提案¹⁻⁶⁾され、その応用技術が開発されてきた。本稿は、オキサイドメタラジー技術紹介の連載第5回目であり、キイテクノロジーのひとつである、製鋼工程における酸化物系非金属介在物 (本稿では、酸化物粒子または介在物と略す場合あり) の制御技術について、物理化学的な観点から紹介する。

2 オキサイドメタラジーにおける酸化物系非金属介在物の役割

2.1 MnS析出核

鋼中の酸化物粒子が析出物に大きな影響を与える典型例として、脱酸法を変えたラボ実験サンプルのEPMA解析で得られたMnS分布の変化⁷⁾をFig.1に示す。酸素濃度が9ppm以下と非常に低く、酸化物が殆ど存在しない真空溶解材 (a) の場合には、MnSを示す白い点が灰色のネットワーク領域、つまりMnの偏析部に偏在している。一方、Mn-Si-Zr複合脱酸材 (b) では、白い点がMn偏析の有無にかかわらず均一に分散している。この白い点は酸化物粒子を表す点 (原画では青色) とMnSを示す点 (原画では黄色) が合成されたもので、酸化物粒子上に析出したMnSを表している。また、Al脱酸材 (c) では酸化物粒子を示す小さな白色の点は見られるが、MnSが析出した酸化物粒子を表す点の個数は非常に少ない。このように、脱酸方法によりMnSの析出分布状態が大きく異なる。

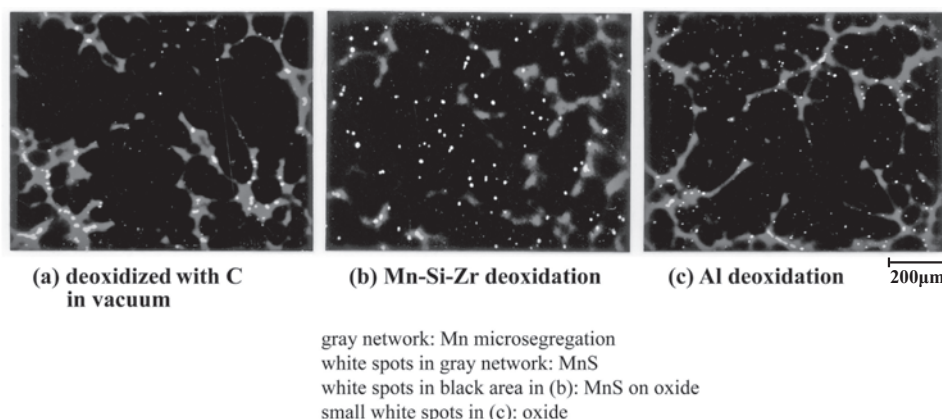


Fig.1 Effect of deoxidizing elements on MnS distribution⁷⁾

2.2 粒内フェライト変態核

Fig.2には、粒内フェライト変態核の例⁸⁾を示す。酸化物粒子はTi系であり、その上にMnSとTiNが析出している。粒内フェライト変態核に関しては種々のものが報告され^{9,10)}、変態機構についても既に紹介されている¹¹⁾ので、詳細については割愛するが、Fig.2に示した変態核の場合は、以下のように考えられる⁸⁾。核はTi(-Mn)酸化物、MnS、TiNで構成されている。このTi(-Mn)酸化物はMnSやTiNの析出核となるだけでなく、粒界からのフェライト形成を抑制するために添加するBを酸化物内に吸収することにより、粒内フェライト変態に対する抑制作用を軽減する。また、MnSはMn欠乏層の形成によりAr₃変態点を下げ、TiNはその格子整合性によりフェライトの生成を容易にすると考えられる。いずれの構成元素も極端に低減させると粒内変態率が大きく低下することから、これは有力な仮説のひとつである。

2.3 組織微細化

微細な凝固組織を得るために、核発生しやすい基質を探索する研究は、オキサイドメタラジー以前に古くから数多く行われてきた^{12,13)}。Bramfittは種々の窒化物や炭化物を溶鋼中に分散させ、 δ 鉄との格子整合性が良い物質の場合に凝固時の過冷度が小さくなることを示し、この観点からTiNが適していることを報告している。また、大橋らは酸化物について同様の実験を行い、Fig.3¹⁴⁾に示したように、 δ 相との格子不整合度の小さいREM酸化物が過冷度低下、すなわち δ 鉄の核生成に有効であることを明らかにした。また、塗ら¹⁵⁾も、REM添加による微細化およびREM酸化物と δ フェライトの格子整合性の研究を行い、同様な結果を得ている。更

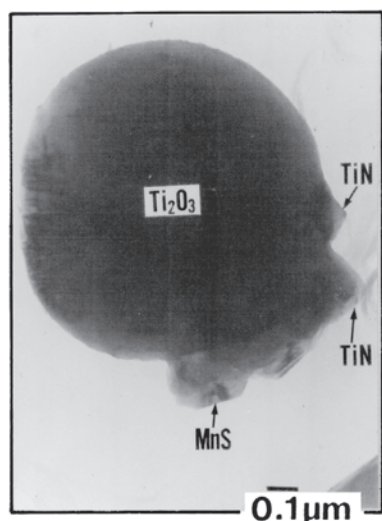


Fig.2 Example of the transformation site of intragranular ferrite (TEM)⁸⁾

に、小関ら¹⁶⁾はTiNが溶接部での微細な凝固組織形成に非常に有効であること、およびその機構を説明している。

凝固後の結晶粒成長の抑制手段として、微細粒子によるピンニング効果は古くから知られており、Zenerの式¹⁷⁾が有名である。この観点から、溶接ボンド部 (fusion line 近傍) 靱性改善のためにTiNを用いた結晶粒微細化について多くの研究が行われた^{18,19)}。また、溶接熱影響部 (HAZ) の更なる靱性改善のために、高温でも安定な酸化物や硫化物の微細な粒子を分散させた鋼が開発された^{20,21)}。

このように、析出核や変態核または結晶粒成長のピン止めとして作用する微細な粒子を単独で分散させる、または酸化物-硫化物-窒化物-炭化物のようにシーケンシャルに析出制御することにより、複雑な材質制御を可能ならしめることができると考えられる²²⁾。

3 酸化物系介在物の制御

3.1 酸化物へのMnS析出機構

酸化物粒子を析出物の核として利用する場合には、まず大事なのは、核となりやすい酸化物の条件を見い出すことである。著者らは、特に多くの材質に影響を与えるMnS析出物について検討し、MnS析出核としてS溶解度を持った溶融酸化物が適していることを示した。ここでは、この考え方について説明する。

(1) MnSの析出核となりやすい酸化物条件

Fig.4には、脱酸元素とS濃度を変えた場合の鋼中酸化物粒子へのMnS析出率について、1kg溶鋼を用いたラボ実験で解析した結果を示す²³⁾。ここで析出率は、測定視野内の全酸化物粒子個数を分母とし、MnSが析出した酸化物粒子の

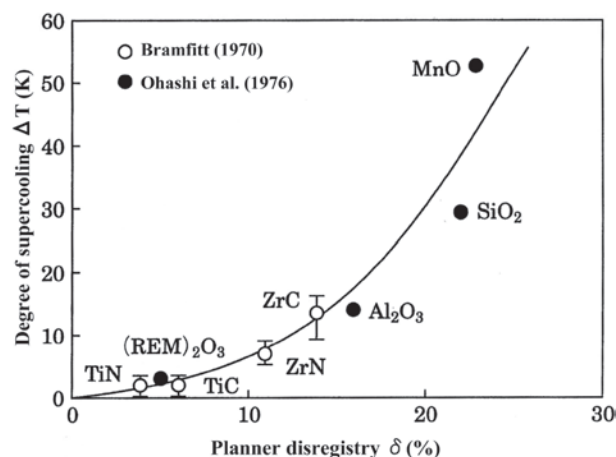


Fig.3 Effect of planner disregistry between particles and δ Fe on the degree of supercooling at solidification¹⁴⁾

個数を分子にその比をとったものであり、酸化物粒子のうちの何割が MnS 析出の核として作用したかを表す。また、Mn 濃度は 1.0mass% と一定である。Al や Zr 脱酸の場合には、MnS 析出率は S 濃度が 100ppm 未満で、S 濃度の低下とともに急激に低下する。一方、Mn-Si 脱酸の場合には、S 濃度が低くても高い MnS 析出率が維持されている。このように、S が 100ppm 以上では MnS が酸化物の種類によらず酸化物粒子を核として析出するが、S が 100ppm 未満では MnS の析出は酸化物の種類に大きく依存することが判る。Fig.5 には、MnO-SiO₂ 系での MnS 溶解度と酸化物への MnS 析出率を示す²⁴⁾。両者の傾向は良く一致しており、MnS 析出率は MnO が 53% 以上で増加し 65% で最大となる。なお、MnO が 80% 以上で MnS 析出率が低下するのは、酸化物の融点が高いため、著者らの実験では後述する鋼の凝固後の酸化物による MnS 吸収が起こらなかったためである。

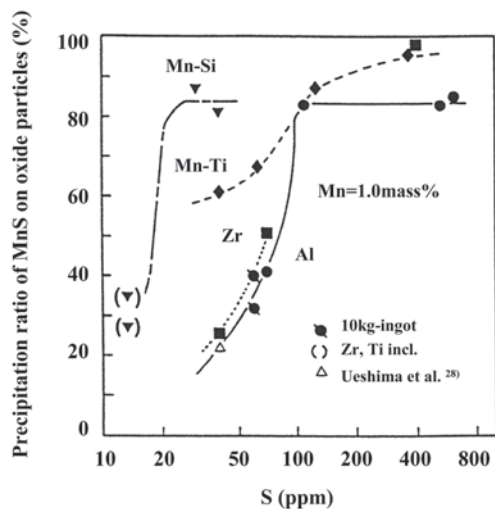


Fig.4 Effect of deoxidation elements on the MnS precipitation ratio on oxide particles²³⁾
 ▼ : Mn-Si, ◇ : Mn-Ti, ■ : Zr, ● : Al
 (▽) : Zr, Ti incl. (△) : Ueshima et al.²⁸⁾

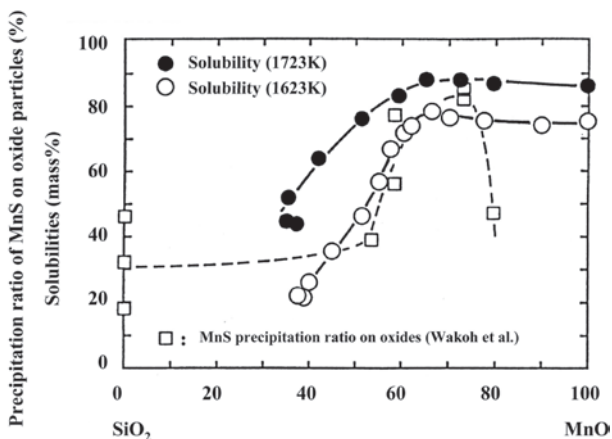


Fig.5 Solubility of MnS and precipitation ratio of MnS in MnO-SiO₂²⁴⁾

(2) 酸化物への MnS 析出機構

Fig.6 には、Mn-Si 脱酸した低硫鋼中の析出物の形態を SEM で解析した例を示す⁷⁾が、Mn-Si 酸化物に MnS が析出している。酸化物と MnS が共存して観察された例として、古くは Sims が鉄-Mn シリケートの表面に MnS の存在を観察している²⁵⁾。低 S 濃度におけるこのような MnS の析出挙動は、格子整合や界面エネルギーからは十分な説明ができず、Fig.7 に示す機構が考えられる⁷⁾。まず、Mn の添加により Mn 系溶融酸化物粒子が生成し、サルファイドキャパシティの高いこれらの酸化物粒子と溶鋼との間で S が分配される。溶融酸化物の MnS 溶解度が高い場合には、鋼の凝固後も固体鉄中の Mn と S が溶融酸化物表面に拡散して溶解が進行する。すなわち、酸化物が MnS のシンクとなり MnS が蓄積されることになる。これが、酸化物が固体となった時に酸化物表面に晶出し、その後の MnS 析出のエンブリオの役割を果たすと考えられる。冷却が更に進んで今度は鋼中の Mn と S の濃度積が平衡溶解度積を越えた時に、非常に小さな過飽和度で MnS 析出を促進させる。更に温度が下がれば、鋼中の Mn と S の拡散により MnS が成長する。

このように低 S 濃度の場合でも MnS の析出核となりやすい酸化物として、Mn-Si 酸化物の他に Mn-Al 酸化物や Mn-

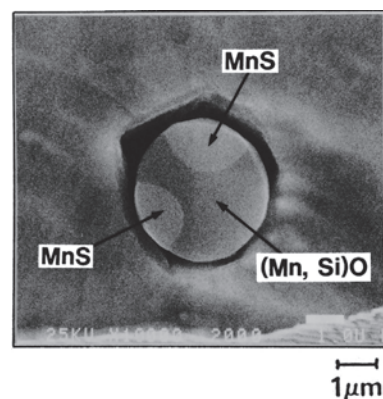


Fig.6 MnS precipitated on oxide particles (SEM)⁷⁾

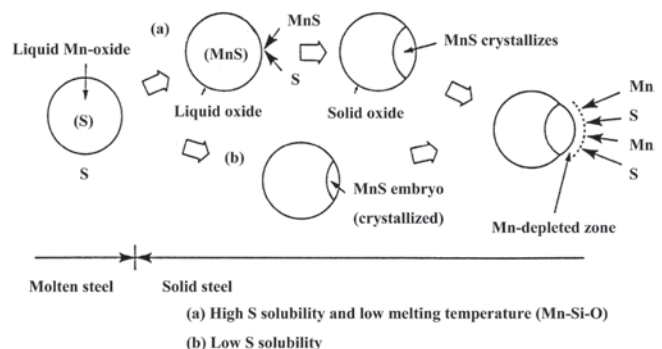


Fig.7 Mechanism of MnS precipitation on oxide particles⁷⁾

Ti 酸化物も考えられる。森岡ら²⁶⁾は Ti-Mn 酸化物の状態図を出しており、比較的低融点の相が存在することが判った。恐らく硫化物の溶解度も高いものと思われる。以上述べた酸化物と硫化物との関係は、MnS 以外の硫化物、例えば CaS と CaO-Al₂O₃ の間でも成り立つと考えられる。北村ら²⁷⁾は、CaS の生成機構を検討し、CaO-Al₂O₃ 介在物に溶解した CaS が影響していることを示した。ただし、CaS の場合には凝固後の固相からの拡散成長の寄与は小さい。

なお、Fig.4 に示したように、S 濃度が 100ppm 以上では MnS 析出率は酸化物の種類に関わらず高い値となるが、これは、Mn×S 濃度積が大きくなって析出の過飽和度が高くなったためだと考えられる²²⁾。

3.2 微細分散しやすい酸化物の選択

酸化物を MnS の分散に利用するためには、析出核となる酸化物粒子そのものを微細に分散させる条件を見いだすことも重要である。酸化物系介在物の個数を減少させる研究は数多く行われているが、鋼中に微細なまま残そうという試みは殆ど見られない。微細分散のためには、以下に示す 3 つの技術がキイとなると考えている。

(1) クラスター化しにくい強脱酸元素の利用

上島らは、脱酸元素を種々変えた 1kg 溶鋼を用いてラボ実験を行ない、Fig.8 に示すように、鋼中の酸化物粒子個数が Ti < Al < Y < Zr < Ce < Hf の順で増加することを報告した²⁸⁾。また、Zr には既に溶鋼中に存在する酸化物を微細にしたり、酸化物の比重が大きいため分散しやすい効果もある²⁹⁾。一般に使用されている Al は強脱酸元素であるが、クラスター化しやすいために微細分散には向かない。一方、Kimura et al.³⁰⁾ は共焦点レーザー顕微鏡による溶鋼表面での

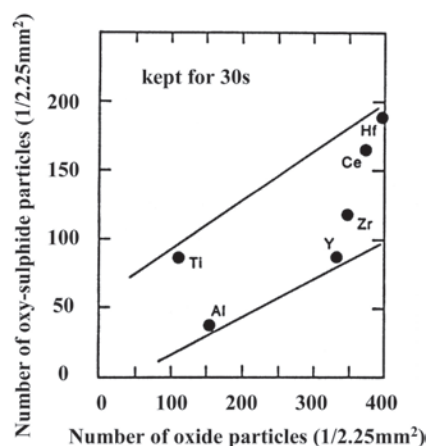


Fig.8 Relationship between the number of oxide particles and the number of oxy-sulfides²⁸⁾

観察結果として、MgO が Al₂O₃ に較べて凝集しにくく、その理由として溶鋼と MgO の接触角が小さいためだと報告している。酸化物粒子の凝集挙動に関しては、酸化物の種類以外に、溶鋼酸素濃度や生成した酸化物粒子の個数、更に脱酸から凝固までの経過時間も影響する。Al₂O₃ に較べてクラスター化しにくい ZrO₂ の場合でも、Zr を多量に添加した場合や、凝固までの経過時間が長くなった場合には、クラスター化する傾向にある。

(2) 凝固中に晶出する酸化物の利用

実際の製造プロセスでは、脱酸材の添加から凝固までの時間が長いこと、そして注入による乱流場のために、クラスター化しにくい酸化物粒子でも、凝集体として個数が減少する。一方、Ti のように脱酸力がそれほど強くないために、鋼の凝固中に晶出する酸化物は、凝集体の時間が非常に短いので微細に分散しやすい。しかしながら、凝固中に晶出する酸化物は冷却速度の影響を強く受けるために、冷却速度が速い鋳片表面では数 μ m サイズの微細な酸化物粒子が多数得られるのに対して、冷却速度の遅い鋳片中心部では個数が少なくなるという現象³¹⁾がある。

(3) 弱脱酸元素と強脱酸元素の組み合わせ

上記の弱点を補うためには、(1) で述べた強脱酸元素と組み合わせるのが有効である。例えば Ti 脱酸後に Zr を添加すると、Ti 酸化物分布の冷却速度依存性を小さくすることが出来る³²⁾。

3.3 脱酸初期の酸化物粒子のサイズ制御

微細な酸化物粒子を制御するためには、脱酸初期の酸化物粒子サイズを支配する因子を明らかにすることが重要であるが、核生成直後の状態を凍結することは困難であったため、これまでは、脱酸後の時間が経過した試料で観察された酸化物粒子サイズを基に、短時間側に外挿して推定する方法が採られていた。著者らはラボ実験手法と解析方法の工夫により、Al 脱酸 1 秒後のアルミナ粒子の観察を行った³³⁾。Fig.9 には、脱酸 1 秒後のアルミナ粒子の分布状態の変化を、脱酸前の溶鋼酸素濃度が異なる試料について示す。脱酸前の溶鋼酸素濃度によって、生成したアルミナのサイズおよび個数が大きく異なることが判る。

脱酸初期の酸化物粒子 (介在物) 成長機構として、一般にブラウン運動、溶質拡散、ストークス浮上の差動凝集、乱流凝集が考えられるが、著者らの解析の結果、酸素の拡散が支配的であることを見出した。Fig.10 にはモデルによる計算結果と実際の介在物半径の範囲を示すが、酸素濃度 26ppm での拡散成長として計算した結果が実測と合った。従って、脱

酸前の溶鋼酸素濃度を制御することが重要である。なお、本実験はAl脱酸を対象としたが、他の脱酸元素でも同様なことが成り立つ。

3.4 複合酸化物の組成制御

例えば、MnSの析出核として鋼中の微細な酸化物粒子を利用するためには、MnSの析出核になりやすい性質と、核そのものが微細に分散しやすい性質の両方を兼ね備えた酸化物であることが望ましい。しかしながら、析出核となりやすい酸化物は、溶鋼中では液相を含むために流動下では凝集体しやすい傾向にあり、逆に微細に分散しやすい酸化物では、低S濃度の場合のMnS析出能が小さい。従って、MnSの微細分散のためには、それぞれの特徴を持った酸化物を共存させることが重要となる。

このためには、精緻な実験に裏づけされた熱力学モデルが有効である。Fig.11には、Yamada et al.³⁴⁾が開発した酸化物生成モデルのアルゴリズムを示す。これは、溶鋼中の元素と酸化物との間の平衡についてSOLGASMIX³⁵⁾と呼ばれる多相多成分系の熱力学平衡解析ソルバーを利用するもので、

各相の活量計算に使うモデルとして本モデルでは、溶鋼中の活量計算にはWagnerの方法を、また溶融酸化物に対しては、Gaye and Welfinger³⁶⁾の取り扱いによるセルモデルを用いている。セルモデルのパラメータは、種々の二元系状態図を基にフィッティングで求めている。更にこのモデルでは、凝固偏析モデルと組み合わせることにより、凝固中の酸化物品出挙動の予測も可能である。

これを用いて、酸化物の組成制御を行った例を示す³²⁾。Fig.12は、MnS析出能と微細分散を両立させたMn-Si-Ti-Zr脱酸で、MnSの核となりやすいMn-Si酸化物が還元されないで残るようなTiとZrの濃度範囲をモデル計算結果で示している。図中の黒丸のTi、Zr成分条件で得られた複合酸化物をFig.13に示すが、予測通りMnO-SiO₂-Ti₂O₃-ZrO₂複合酸化物が生成しており、MnO-SiO₂の部分にMnSが析出している。

計算モデルを用いる場合は、使用する熱力学データが非常に重要である。伊藤らは、Mg、Ca、Alの脱酸平衡を新たに測定して報告している³⁷⁻³⁹⁾。また、Ti脱酸に関しては、車ら⁴⁰⁾、吉川ら⁴¹⁾の研究がある。今後は、複合脱酸系の熱力

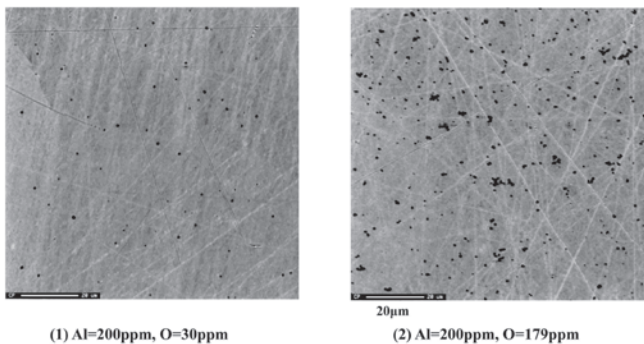


Fig.9 Alumina inclusions 1s after deoxidizing with Al³³⁾

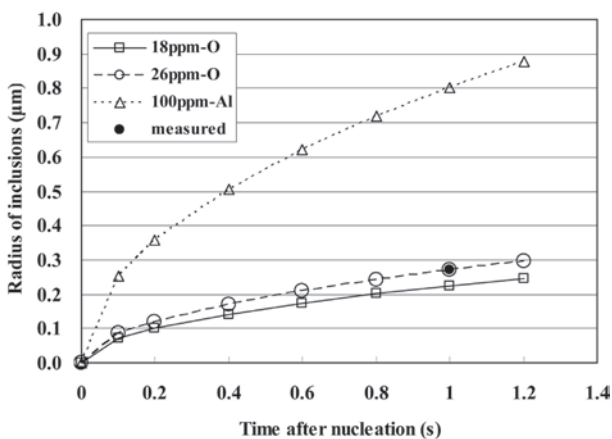


Fig.10 Calculated and observed radii of alumina inclusions 1s after deoxidation³³⁾

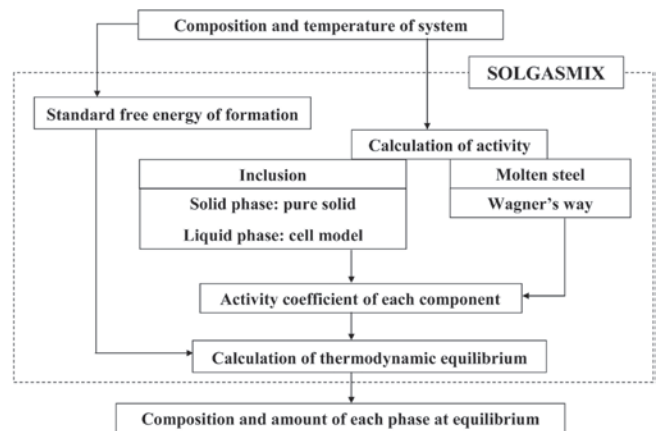


Fig.11 Algorithm of the model for calculation of oxide formation³⁴⁾

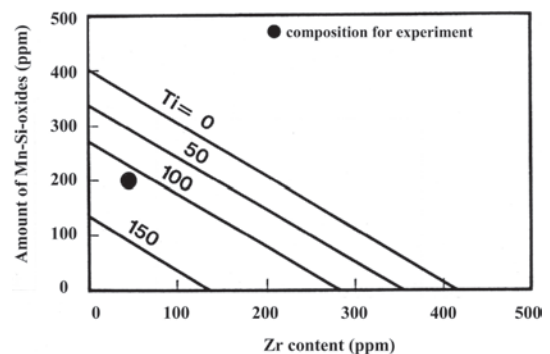


Fig.12 Change in the amount of Mn-Si oxide calculated with Ti and Zr addition (Ti : ppm)³²⁾

学データ構築が望まれる。

3.5 硫化物制御

脱酸元素の組み合わせが材質に影響するものとして、古くから Al と Ca の併用脱酸が鋼の機械的性質向上に有益である⁴²⁾といわれていた。これは、融点が低い球状の Ca アルミネートや加工時に変形しにくい CaS の生成が、鋼の機械的性質の異方性を解消するためである。Ca 添加による形態制御は厚板やラインパイプ向けの高級鋼製造にとって非常に有用であるために、Ca 量と介在物組成の関係⁴³⁾や CaO-Al₂O₃-CaS 系の熱力学⁴⁴⁻⁴⁶⁾などの多くの研究が行われてきた。また、REM を利用した硫化物の形態制御^{47,48)}も研究されてきた。

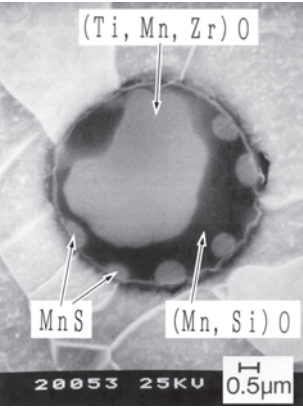


Fig.13 Oxide particle and MnS in the steel with Mn-Si-Ti-Zr-deoxidation (SEM)³²⁾

この場合には、酸化物の組成制御だけではなく、酸化物－硫化物の相平衡が重要となる。複合酸化物や酸化物－硫化物の熱力学データ、そして正確な熱力学データをベースとした計算モデルは、今後のオキサイドメタラジー技術の応用先拡大に益々不可欠なものと思われる。

また、硫化物については、近年ナノサイズの硫化物 (CuS、Cu_{2-x}S 等) の生成が確認されており^{49,50)}、材質制御への活用が期待される。

3.6 実操業における酸化物系介在物制御

実操業における介在物挙動は、机上での検討やラボ実験での結果とは異なり、非常に多くの複雑な要因が絡み合った結果として決定される。Table 1 には、実操業における鋼中介在物への影響因子を列挙したものである。特に影響の大きいものとしては、前述した脱酸前溶鋼酸素濃度、脱酸材の添加方法、過飽和度、添加順序、スラグの巻き込み、再酸化、取鍋やタンディッシュ、モールドでの凝集・浮上が挙げられる。このように、介在物挙動に対しては非常に多くの因子が関わっており、これらの挙動を要素ごとに物理化学的にきちっと説明することが重要である。オキサイドメタラジーにおける数μm 以下の微細介在物を均一に分散させる技術は、数十μm あるいは数百μm の有害な介在物を極限まで除去する高澄清化技術があって初めて成り立つ。

ここでは一例として、高澄清化技術の一環として検討した、取鍋スラグの巻き込みが溶鋼中のアルミナ粒子に与える

Table 1 Factors of oxide inclusion behavior in steel

converter	oxygen concentration in molten steel components (activity, interfacial energy) slag particles for the site of heterogeneous nucleation
ladle	deoxidation (way and order of addition, degree of supersaturation) nucleation-growth-agglomeration rising up in molten steel entrainment of slag upside re-oxidation by slag agglomeration in ladle nozzle
CC-tundish	agglomeration and rising up re-oxidation by air entrainment of slag upside or slag attached and reacted with refractory mixing of ladle slag into molten steel at the end of pouring reaction of ladle slag inclusions and alumina inclusions agglomeration in tundish nozzle attaching to the nozzle wall and abrasion
CC-mold	rising up with Ar gas bubbles and by upstream molten steel flow going down in strand pool by downstream flow entrainment of mold flux pushing out or entrainment by growing solidified shell phase separation by solidification
reheating furnace & heat treatment	crystallization
rolling & processing	elongating or breaking

影響⁵¹⁾について示す。Fig.14には、二次精錬処理後の溶鋼中の介在物について調査した結果と凝集・浮上計算モデルで計算した結果の対比を、アルミナ系とスラグ系に分けて示したものである。この計算モデルは、脱酸生成物であるアルミナ粒子と巻き込まれたスラグ粒子の二種粒子の衝突・凝集を考慮したものであるが、このように計算結果を実測に一致させるためには、計算条件として比較的多量の取鍋スラグの巻き込みを導入する必要がある(図中: after modified の条件)。従って、二次精錬での鋼中介在物の粒径分布に、巻き込みスラグが大きく影響していることが判る。

なお、介在物制御に関する産学連携の大きな研究活動が二つの研究会として9年にわたって行われた。これらの活動結果は報告書^{52,53)}に纏められているので、参考にされたい。また、介在物に関する最近の主なレビューとして、竹内⁵⁴⁾や著者⁵⁵⁾の報告がある。

4 今後の展望と課題

オキサイドメタラジーの概念は非常に幅広いものであり、今後とも硫化物のみならず窒化物、炭化物といった多くの析出物制御を経由して材質制御に適用されていくものと考えられる。そのためには、酸化物とMnSの間で明らかにされた関係を個々の析出物間で求めることが重要であり、例えば、及川ら⁵⁶⁾は、TiN-MnSの関係を求めている。また、今後の技術として、サブミクロンサイズの酸化物制御が必要になってくるが、このような制御は、凝固中の酸化物品出を積極的に利用した急冷凝固や凝集体を抑えるための酸化物界面制御、更には流動を制御する強力な電磁力の適用により実現していくものと考えられる。

鋼中酸素量が数ppmのレベルに達した現在、介在物量を更に低減するよりは、組成制御によって介在物を無害化す

る、あるいは積極的に利用するほうが、製造コスト的にも有利になると考えられる。また、逆に高純度化を追求した場合にも、牧⁵⁷⁾が述べているように、組織を微細にする新たな手段が必要となってくる。更に、リサイクル促進やエコマテリアルの観点から、今後は合金元素の使用を極力減らした材質制御が望まれる。このような場合にも、酸化物を利用した組織制御が有望であると考えられる。従って、オキサイドメタラジーは多方面への展開の可能性を秘めており、更には鉄以外の金属への発展も期待できる。

参考文献

- 1) 高村仁一, 溝口庄三: 材料とプロセス, 3 (1990), 276.
- 2) 溝口庄三, 高村仁一: 材料とプロセス, 3 (1990), 277.
- 3) J. Takamura and S. Mizoguchi: Proc. Sixth Int. Iron and Steel Congress, 1 (1990), 591.
- 4) S. Mizoguchi and J. Takamura: Proc. Sixth Int. Iron and Steel Congress, 1 (1990), 598.
- 5) T. Sawai, M. Wakoh, Y. Ueshima and S. Mizoguchi: Proc. Sixth Int. Iron and Steel Congress, 1 (1990), 605.
- 6) 若生昌光: まてりあ, 35 (1996), 1311.
- 7) 若生昌光, 澤井隆, 溝口庄三: 鉄と鋼, 78 (1992), 1697.
- 8) 山本広一, 高村仁一, 長谷川俊永: 鉄と鋼, 79 (1993), 1169.
- 9) D. J. Abson: Welding in the World, 27 (1989) 3/4, 11.
- 10) T. Koseki and G. Thewlis: Materials Science and Technology, 21 (2005), 867.
- 11) 植森龍治: ふえらむ, 14 (2009), 472.
- 12) B. Bramfitt: Metall. Trans., 1 (1970), 1987.
- 13) 大橋徹郎, 広本健, 藤井博務, 塗嘉夫, 浅野鋼一: 鉄と鋼, 62 (1976), 614.
- 14) 大橋徹郎, 為広博, 高橋学: まてりあ, 36 (1997), 159.

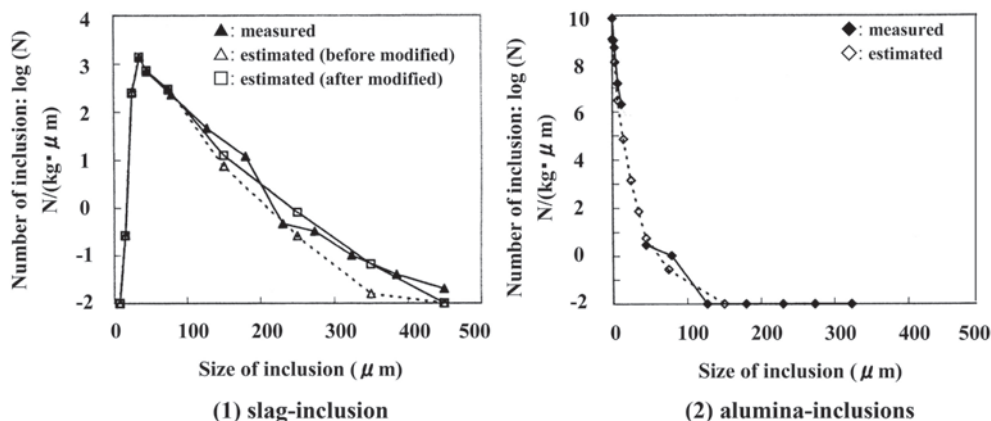


Fig.14 Comparison of calculated and observed numbers of inclusions after secondary refining treatment⁵¹⁾

- 15) 塗嘉夫, 大橋徹郎, 広本健, 北村修: 鉄と鋼, 66 (1980), 628.
- 16) 小関敏彦, 井上裕滋: J. Jpn. Inst. Met.: 65 (2001), 644.
- 17) C. Zener, quoted by S. Smyth: Trans. AIME, 175 (1948), 15-51.
- 18) 金沢正午, 中島明, 岡本健太郎, 金谷研: 鉄と鋼, 61 (1975), 2589.
- 19) 松田正一, 奥村直樹: 鉄と鋼, 62 (1976), 1209.
- 20) 児島明彦, 植森龍治, 皆川昌紀, 星野学, 市川和利: まてりあ, 42 (2003), 67.
- 21) 児島明彦, 清瀬明人, 植森龍治, 皆川昌紀, 星野学, 中島隆雄, 石田浩司, 安井洋二: 新日鉄技報, 380 (2004), 2.
- 22) 高村仁一: 私信
- 23) M. Wakoh, T. Sawai and S. Mizoguchi: ISIJ Int., 36 (1996), 1014.
- 24) 小山徳寿, 月橋文孝, 佐野信雄: 鉄と鋼, 79 (1993), 1334.
- 25) C. E. Sims: Basic Open Hearth Steelmaking, Chap.12, 459, ed. by G. Derge, The American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, New York, (1964).
- 26) 森岡泰行, 森田一樹, 月橋文孝, 佐野信雄: 鉄と鋼, 81 (1995), 40.
- 27) 北村信也, 宮村紘, 福岡功博: 鉄と鋼, 73 (1987), 677.
- 28) 上島良之, 湯山英俊, 溝口庄三, 梶岡博幸: 鉄と鋼, 75 (1989), 501.
- 29) 澤井隆, 若生昌光, 溝口庄三: 鉄と鋼, 82 (1996), 587.
- 30) S. Kimura, K. Nakajima and S. Mizoguchi: Metall. Trans. B, 32B (2001), 79.
- 31) 後藤裕規, 宮沢憲一, 山口紘一, 荻林成章, 田中和明: 鉄と鋼, 79 (1993), 1082.
- 32) 若生昌光, 澤井隆, 溝口庄三: 鉄と鋼, 82 (1996), 593.
- 33) M. Wakoh and N. Sano: ISIJ Int., 47 (2007), 627.
- 34) W. Yamada, T. Matsumiya and A. Ito: Proc. Sixth Int. Iron and Steel Congress, 1 (1990), 618.
- 35) G. Errikson: Acta Chem. Scand., 25 (1971), 2651.
- 36) H. Gaye and J. Welfringer: Second Int. Sympo. on Metallurgical Slags and Fluxes, ed. by H. A. Fine and D. R. Gaskell, The Metallurgical Society of AIME, Warrendale, Pennsylvania, (1984), 357.
- 37) 伊藤裕恭, 日野光元, 萬谷志郎: 鉄と鋼, 83 (1997), 623.
- 38) 伊藤裕恭, 日野光元, 萬谷志郎: 鉄と鋼, 83 (1997), 695.
- 39) 伊藤裕恭, 日野光元, 萬谷志郎: 鉄と鋼, 83 (1997), 773.
- 40) 車雨烈, 長坂徹也, 三木貴博, 佐々木康, 日野光元: 材料とプロセス, 18 (2005), 1032.
- 41) 吉川健, 森田一樹: 材料とプロセス, 18 (2006), 81.
- 42) 例えば, A. P. Gagnebin: Trans. Am. Foundrymen's Assoc., 46 (1938), 133.
- 43) 例えば, 玉本茂, 佐々木寛太郎, 梨和甫, 杉田宏, 森明義: 鉄と鋼, 63 (1977), 2110.
- 44) R. A. Sharma and F. D. Richardson: JISI, 198 (1961), 386.
- 45) 竹之内朋夫, 鈴木是明: 鉄と鋼, 63 (1977), 1653.
- 46) 藤澤敏治, 井上茂, 高木茂義, 鰐部吉基, 坂尾弘: 鉄と鋼, 71 (1985), 839.
- 47) L. Lyckx, J. R. Bell, A. McLean and M. Korchynski: Metall. Trans., 1 (1970), 3341.
- 48) 桜谷敏和, 江見俊彦, 垣生泰弘, 江島柳夫, 三本木貢治: 鉄と鋼, 62 (1976), 1653.
- 49) 山本研一, 柴田浩幸, 中島敬治, 溝口庄三: 鉄と鋼, 90 (2004), 788.
- 50) 小林能直, 長井寿: まてりあ, 43 (2004), 730.
- 51) 淵上勝弘, 若生昌光, 遠藤公一, 今村尚近, 清瀬明人, 沢田郁夫: 鉄と鋼, 85 (1999), 368.
- 52) 学振非公開資料 1994 年 9 月
- 53) 超清浄鋼研究の最近の展開, 日本鉄鋼協会高温プロセス部会 超清浄鋼研究会, (1999.5.20)
- 54) 竹内秀次: 極低炭素鋼製造プロセスにおける高清浄度化と介在物制御技術, 第 182・183 回西山記念技術講座, (2004), 63.
- 55) 若生昌光: 非公開資料 2009 年 1 月
- 56) 及川勝成, 大谷博司, 石田清人, 西沢泰二: 鉄と鋼, 80 (1994), 623.
- 57) 牧正志: 鉄と鋼, 81 (1995), N547.

(2009 年 9 月 16 日受付)

会員へのお知らせ目次

行事等予定	721頁
総合	
「ISIJ International」電子ジャーナルの無料アクセスについて	724頁
平成22年度俵・澤村論文賞候補論文の自薦について	725頁
会費等納入のお願い	725頁
第159回春季講演大会 講演募集案内	726頁
討論会／予告セッション／国際セッション／共同セッション募集案内	727頁
オンラインPDF原稿提出要領	727頁
講演大会参加方法のご案内	728頁
第159回春季講演大会学生ポスターセッション発表募集案内	728頁
効果的な講演発表のためのPower Point作成方法	729頁
評価・分析・解析部会 平成22年度新規フォーラムおよび新規自主フォーラムの募集	733頁
イベント情報	
社会鉄鋼工学会 「第18回歴史を変える転換技術研究会」開催案内	733頁
社会鉄鋼工学会 第17回公開セミナー「ものづくりの現場における安全追及の考え方」開催案内	734頁
創形創質工学会・日本鋼構造協会交流企画連絡会 第10回鉄鋼材料と鋼構造に関するシンポジウム	
「新機能鋼材の創出とその利用技術—橋梁・水圧鉄管・造船・建築にみる最近の動向」開催案内	734頁
創形創質工学会 板成形フォーラム特別講演会「テーラードブランクのプレス成形」開催案内	735頁
創形創質工学会 第31回トライボロジーフォーラム研究会「圧延潤滑の現状」開催案内	735頁
環境・エネルギー工学会 シンポジウム「鉄スクラップ利用の新しい視野と新技術」開催案内	736頁
支部	
東北支部 学生見学会開催案内	736頁
北陸信越支部 平成21年度連合講演会開催案内	736頁
人材募集案内	737頁
報告事項 第4回理事会報告	737頁
次号目次案内	738頁
会員欄(入会者・死亡退会者一覧)	739頁
海外鉄鋼関連最新論文	740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入手できます。

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
2009年11月			
1日	第279回塑性加工シンポジウム(長野)	日本塑性加工学会	Tel. 03-3435-8301 jstp@jstp.or.jp
2～4日	第22回国際超電導シンポジウム(ISS2009)(つくば)	国際超電導産業技術研究センター	Tel. 03-3536-7283 iss@istec.or.jp
2～4日	World Scrap Metal Congress 2009 (China). Terrapinn Holdings Ltd.	Terrapinn Holdings Ltd	http://www.com/2009/scrap/
4～6日	第50回真空に関する連合講演会(東京)	日本真空協会	Tel. 03-3431-4395 ofc-vs@vacuum-jp.org
5日	鉄鋼工学セミナー「専科」「再結晶・集合組織専科(第1回)」(東京 5号319頁 申込締切10月5日)	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-5209-7014
5, 6日	第45回X線分析討論会(大阪)	日本分析化学会	Tel. 03-3490-3351
7日	社会鉄鋼工学会 「鉄—人と道具とその技術—」研究Gr. 第3回例会(東京)(本号675頁 申込締切10月24日)	日本鉄鋼協会	研究Gr. 主査 香月節子 Fax. 03-5382-1512 k-setsu@k5.dion.ne.jp
8～12日	Asia-Pacific Galvanizing 2009 (Korea)	The Corrosion Science Society of Korea	Tel. 82-2-539-5869 apgalva@apgalva2009.com http://www.apgalva2009.com
9日	鉄鋼工学セミナー「専科」「溶接・接合専科(第1回)」(兵庫 6号389頁 申込締切10月20日)	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-5209-7014
10, 11日	第11回初心者のための疲労設計講習会(広島)	日本材料学会	Tel. 075-761-5321 http://www.jsms.jp
10, 11日	MECA SENS V(The 5th International Conference on Mechanical Stress Evaluation by Neutrons and Synchrotron Radiation)(水戸)	Japan Atomic Energy Agency	http://nsrc.jaea.go.jp/mecasens-5/
10～12日	The 17th Steelmaking Conference- 7th Ironmaking Conference-1st Cleaner Seminar (IAS-JICA)(Argentina)	IAS	http://www.siderurgia.org.ar/conf09
12日	社会鉄鋼工学会 歴史を変える転換技術研究フォーラム「第18回歴史を変える転換技術研究会」(東京 本号733頁)	日本鉄鋼協会	東京工業大学 大学院理工学専攻科 永田和宏 nagata@mtl.titech.ac.jp
12, 13日	第43回化学工学の進歩講習会(名古屋)	化学工学会 東海支部	Tel. 052-231-3070 http://www.c-goudou.org/scej-tokai/s43.html
12, 13日	第30回表面科学セミナー「グリーンテクノロジー、表面科学の新たな挑戦」(東京)	日本表面科学会	Tel. 03-3812-0266 shomu@sss.org http://www.sss.org/Seminar_30.html

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
2009年11月			
13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) 「温度計測技術セミナー」(兵庫 10号677頁 申込締切10月30日)	日本鉄鋼協会	学術企画グループ 平沢 Tel.03-5209-7013 hirasawa@isij.or.jp
13日	東海支部 第19回学生による材料フォーラム(10号679頁 申込締切10月20日)	日本鉄鋼協会 東海支部	豊橋技術科学大学 小林正和 Tel.0532-44-6706 m-kobayashi@pse.tut.ac.jp
13日	第32回材料講習会「ポーラス材料の特徴と力学特性」(京都)	日本材料学会	Tel.075-761-5321 jimu@jsms.jp
13日	第8回衝撃工学フォーラム(初心者のための衝撃工学入門)(東京)	日本材料学会	諏訪東京理科大学 板橋正章 Tel.0266-73-9845 itabashi@rs.suwa.tus.ac.jp http://www.jsms.jp
12~14日	日本結晶成長学会 第39回結晶成長国内会議(名古屋)	日本結晶成長学会	Tel.03-5950-1290 jacg@words-smile.com http://www.soc.nii.ac.jp/jacg/japanese/top.html
13~27日	早稲田大学 各務記念材料技術研究所教育プログラム(東京)	早稲田大学	Tel.03-3203-4782
17, 18日	溶接構造シンポジウム2009(大阪)	溶接学会	大阪大学 大学院工学研究科 Tel.06-6879-7545 http://www.jwri.osaka-u.ac.jp/~conf/wmd2009
18, 19日	第7回事故から学ぶリスクマネジメント-構造的災害事故は何故起こり、防止できないのか-(東京)	日本高圧力技術協会	Tel.03-3255-3486 hpi@hpij.org
18~20日	非破壊評価総合展2009(東京)	日本非破壊検査工業会他	日本能率協会 Tel.03-3434-1410 http://www.jma.or.jp/nde/ja/
18~20日	INCHEM TOKYO2009(東京)	日本能率協会	INCHEM TOKYO事務局 Tel.03-3434-1410 Inchem2009@convention.jma.or.jp
18~20日	第3回日本電磁波エネルギー応用学会シンポジウム(東京)	日本電磁波エネルギー応用学会	東京工業大学大学院理工学研究科 和田雄二 Tel.03-5734-2879 http://www.jemea.org/
19日	社会鉄鋼工学部会 安全・快適なシステム構築研究フォーラム第17回公開セミナー「ものづくりの現場における安全追求の考え方」(東京 本号734頁)	日本鉄鋼協会	安全学研究所 辛島恵美子 holonomy@aa.bb-east.ne.jp
19日	第2回省エネルギー政策・技術セミナー(東京)	日本エネルギー学会	Tel.03-3834-6456 events_jie2008@jie.or.jp http://www.jie.or.jp/annai2009_syusai.htm
19, 20日	第41回溶融塩化学討論会(京都)	電気化学会	京都大学 野平俊之 Tel.075-753-5827 ms41@www.echem.energy.kyoto-u.ac.jp
19, 20日	鋼構造シンポジウム2009(東京)	日本鋼構造協会	Tel.03-5919-1535 g.chizawa@jssc.or.jp http://www.jssc.or.jp/index.html
19, 20日	溶接学会定期講座 平成21年度溶接入門講座(広島開催)(広島)	溶接学会	Tel.03-3253-0488 ishmaru@tg.rim.or.jp http://www.soc.nii.ac.jp/jws/index.html
20日	創制創質工学部会・日本鋼構造協会交流企画連絡会共催 第10回鉄鋼材料と鋼構造に関するシンポジウムテーマ「新機能鋼材の創出とその利用技術-橋梁・水圧鉄管・造船・建築にみる最近の動向-」(東京 本号734頁)	日本鉄鋼協会	日本鋼構造協会 事務局担当 田代 誠 Tel.03-5919-1535 Fax.03-5919-1536 m.tashiro@jssc.or.jp
20日	関西支部 平成21年度材料セミナー「材料中の拡散-基礎からデータベースまで-」(大阪 10号677頁)	日本鉄鋼協会 関西支部	関西支部材料セミナー係 Tel.06-6443-5326 n-kansai@ostec.or.jp
20日	平成21年度材料科学基礎講座「環境と人間・安全のための材料技術・分析技術」(東京)	日本材料学会	Tel.03-3262-9166 mssj@shokabo.co.jp http://www.soc.nii.ac.jp/mssj/kisokoza21.htm
20日	ISIJ International特集号「Cutting Edge of Computer Simulation of Solidification and Casting」原稿締切(9号610頁)	日本鉄鋼協会	編集グループ Tel.03-5209-7014
20日	日本塑性加工学会 関西支部「第22回技術研修会」(大阪)	日本塑性加工学会	Tel.075-753-3330 kansai@jstp.or.jp
21, 22日	第52回自動制御連合講演会(大阪)	システム制御情報学会	大阪大学 大学院基礎工学研究科 http://rengo2009.sys.es.osaka-u.ac.jp/
24日	腐食防食部門委員会 第271回例会(大阪)	日本材料学会	Tel.075-761-5321 jimu@jsms.jp http://www.jsms.jp
25~28日	2009国際ロボット展(東京)	日本ロボット工業会	日刊工業新聞社 Tel.03-5644-7221 j-event@media.nikkan.co.jp
26日	第35回塑性加工技術フォーラム(東京)	日本塑性加工学会	Tel.03-3435-8301 jstp@jstp.or.jp
26日	東北支部 学生見学会(仙台 本号736頁 申込締切11月6日)	日本鉄鋼協会 東北支部	東北大学 多元物質科学研究所 井上亮 ryo@tagen.tohoku.ac.jp
26, 27日	第19回「圧力設備の材料、設計、施工、維持管理」(大阪)	日本高圧力技術協会	Tel.03-3255-3486 tanaka@hpij.org
26, 27日	Gases in Steels(U.K.)	IOM	http://www.iom3.org/events/gases
27日	第58期第3回分子動力学部門委員会(公開部門委員会)(名古屋)	日本材料学会	Tel.075-761-5321 jimu@jsms.jp http://www.jsms.jp
27日	第200回西山記念技術講座「トップが語る鉄鋼技術の進歩と今後の展望」(東京 9号624頁)	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel.03-5209-7014
27日	関西支部 平成21年度材料セミナー「材料技術者・研究者のためのEBSDによる局所方位解析技術の基礎と応用」(大阪 10号678頁)	日本鉄鋼協会 関西支部	関西支部材料セミナー係 Tel.06-6443-5326 n-kansai@ostec.or.jp
27日	実用表面分析セミナー 2009(神戸)	日本表面科学会	日東分析センター 信田拓哉 Tel.072-626-7059 http://www.sssj.org/Kansai/kansai_jitsuyou12.html
28日	平成21年度 工学教育連合講演会ICT世紀の工学教育—これからのあるべき姿は何か—(東京 本号673頁)	日本工学教育協会	Tel.03-5442-1021 Fax.03-5442-0241 http://www.soc.nii.ac.jp/jsee/
28日	社会鉄鋼工学部会 第20回講演会「幕末・明治期における東日本のたたら製鉄技術を探る」(福島 9号627頁 申込締切11月13日)	日本鉄鋼協会	フォーラム幹事 佐藤公昭 Fax.047-443-9208 kera_k_sato@hb.tp1.jp
28~30日	4th International Symposium on Advanced Fluid/Solid Science and Technology in Experimental Mechanics(4th ISEM '09)(新潟)	日本実験力学学会	Tel.025-227-0963 sakamoto@clg.niigata-u.ac.jp http://jsem.jp/ISEM4/index.html
30日	社会基盤の超長寿命化を考える日本会議 キックオフシンポジウム(東京)	連絡先 事務局 川俣	Tel.090-3312-8650 kkawamata@soc.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
2009年12月			
1, 2日	第17回新粉末冶金入門講座(東京)	粉体粉末冶金協会	Tel. 075-721-3650 inoue@jspm.or.jp http://www.jspm.or.jp
4日	ISIJ International特集号"Science & Technologies for the Effective Use of Unrecovered Energy in Steelworks"原稿締切(6号372頁)	日本鉄鋼協会	編集グループ Tel. 03-5209-7014
3, 4日	第47回高温強度シンポジウム(大分)	日本材料学会	Tel. 075-761-5321 jimu@jsms.jp
4日	日本機械学会No.09-135講習会(福島)	日本機械学会	Tel. 03-5360-3502 kawasaki@jsme.or.jp http://www.jsme.or.jp/kousyu2.htm
4, 5日	2009年材料技術研究協会討論会(千葉)	材料技術研究協会	Tel. 03-5695-0515 Aee89302@snow.odn.ne.jp
5日	北陸信越支部 平成21年度連合講演会(長岡 本号736頁 参加申込締切11月20日)	日本鉄鋼協会 北陸信越支部	長岡技術科学大学 機械系 山下 健 Tel. 0258-47-9746
7~9日	第35回固体イオニクス討論会(大阪)	固体イオニクス学会	大阪府立大学 辰巳砂昌弘 Tel. 072-254-9331 ssij35@chem.osakafu-u.ac.jp
7~9日	EcoDesign2009(北海道)	エコデザイン学会連合	製造科学技術センター Tel. 03-5472-2561 http://www.mstc.or.jp/imf/ed/
8日	溶接法セミナー「溶接プロセスの高機能化にむけた新しい展開」(東京)	溶接学会	Tel. 03-3253-0488 s_kogure@tt.rim.or.jp
9~10日	超音波による欠陥寸法測定—非破壊検査の新しい展開—(大阪)	日本高圧力技術協会	Tel. 03-3255-3486 hpi@hpij.org
9~11日	International Conference on the Advances in Theory of Ironmaking and Steelmaking(India)	Indian Institute of Science	atis2009@materials.iisc.ernet.in http://materials.iisc.ernet.in/~atis2009/
10日	自動車技術会No.09-09シンポジウム(東京)	自動車技術会	Tel. 03-3262-8214 sympo@jsae.or.jp http://www.jsae.or.jp/sympo/2009/scdl.php
10日	第9回東北大学 多元物質科学研究所研究発表会(仙台)	東北大学	Tel. 022-217-5357 kitakami@tagen.tohoku.ac.jp http://www.tagen.tohoku.ac.jp/index2-j.html
10, 11日	流動化・粒子プロセッシングシンポジウム(鹿児島)	化学工学会	鹿児島大学 大学院理工学研究科 Tel. 099-285-8361 http://fb15.nsf.jp/
10, 11日	第24回信頼性シンポジウム(大阪)	日本材料学会	Tel. 075-761-5321 http://www.jsms.jp
11日	第159回春季講演大会 討論会・国際セッション締切(本号726頁)	日本鉄鋼協会	学術企画グループ Tel. 03-5209-7013
11日	第36回塑性加工技術フォーラム(東京)	日本塑性加工学会	Tel. 03-3435-8301 jstp@jstp.or.jp
11日	自動車技術会No.10-09シンポジウム(東京)	自動車技術会	Tel. 03-3262-8214 sympo@jsae.or.jp http://www.jsae.or.jp/sympo/2009/scdl.php
11日	高温プロセス部会 凝固組織形成フォーラム 凝固・組織形成シミュレーション研究Gr.セミナー(講習会)「凝固プロセスからみた計算状態図ソフトの援用と組織予測Ⅲ」(東京 10号674頁 申込締切11月下旬)	日本鉄鋼協会	九州大学 工学研究院 宮原広都 Fax. 092-802-2990 miyahara@zaiko.kyushu-u.ac.jp
11日	創形創質工学部会 板成形フォーラム 特別講演会テーマ「テラードブランクのプレス成形」(東京 本号735頁 申込締切12月4日)	日本鉄鋼協会	東京農工大学 桑原利彦 Tel. 042-388-7083 kuwabara@cc.tuat.ac.jp
11日	創形創質工学部会 第31回トライボロジーフォーラム研究会 テーマ「圧延潤滑の現状」(東京 本号735頁 申込締切11月27日)	日本鉄鋼協会	(株)神戸製鋼所 柳 修介 Tel. 078-992-5646 yanagi.shusuke@kobelco.com
11日	第14回資源循環型ものづくりシンポジウム(名古屋)	実行委員会	Tel. 052-736-5681 ims07@u-net.city.nagoya.jp
11日	第29回疲労講座「疲労の基礎と応用」(名古屋)	日本材料学会	Tel. 075-761-5321 jimu@jsms.jp
12~14日	The 18th International Symposium on Processing and Fabrication of Advanced Materials(PFAMXVIII)(仙台)	日本学術振興会176委員会	東北大学金属材料 伸井正昭 http://pfam18.imr.tohoku.ac.jp/
14日	関西支部 平成21年度材料セミナー「技術者のための鉄鋼材料入門」(大阪 10号678頁)	日本鉄鋼協会 関西支部	関西支部材料セミナー係 Tel. 06-6443-5326 n-kansai@ostec.or.jp
17日	日本塑性加工学会関西支部第11回塑性加工基礎講座(京都)	日本塑性加工学会	kansai@jstp.or.jp
2010年1月			
4日	第159回春季講演大会 一般講演・予告セッション・共同セッション締切(本号726頁)	日本鉄鋼協会	学術企画グループ Tel. 03-5209-7013
4日	平成22年度俵・澤村論文賞推薦締切(本号725頁)	日本鉄鋼協会	編集グループ Tel. 03-5209-7014
21, 22日	ガスタービンセミナー(東京)	日本ガスタービン学会	gtsj@pluto.dti.ne.jp http://www.soc.nii.ac.jp/gtsj
22日	環境・エネルギー工学部会 資源循環フォーラム シンポジウム「鉄スクラップ利用の新しい視野と新技術」(東京 本号736頁 申込締切1月15日)	日本鉄鋼協会	大阪大学 大学院工学研究科 山本高都 t-yamamoto@mat.eng.osaka-u.ac.jp
23日	第15回高専シンポジウムinいわき(福島)	高専シンポジウム協議会	福島工業高等専門学校物質工学科 青柳克弘 Tel. 0246-46-0815 aoyagi@fukushima-nct.ac.jp
28, 29日	International Symposium on Ironmaking for Sustainable Development 2010(鉄鋼環境国際シンポジウム 2010)(大阪 10号626頁)	日本鉄鋼協会	大阪大学 大学院 工学研究科 碓井建夫 isisd2010@mat.eng.osaka-u.ac.jp
29日	自動車技術会 No.15-09シンポジウム(東京)	自動車技術会	Tel. 03-3262-8214 sympo@jsae.or.jp http://www.jsae.or.jp/sympo/2009/scdl.php
2010年2月			
3~5日	The 2nd International Symposium on Cutting Edge of Computer Simulation of Solidification and Casting(CSSC2010)(北海道 8号551頁)	日本鉄鋼協会	info@cssc2010.org http://www.cssc2010.org/
6日	社会鉄鋼工学部会「鉄の歴史—その技術と文化—」フォーラム第13回公開研究発表会(2009年度冬季)(千葉 9号628頁 発表申込締切11月4日)	日本鉄鋼協会	フォーラム幹事 佐藤公昭 Fax. 047-443-9208 kera_k_sato@hb.tp1.jp
14~18日	TMS2010 139th Annual Meeting & Exhibition(U.S.A.)	TMS	http://www.tms.org/annualmeeting.html

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
2010年3月			
5日	第25回塗料・塗装研究発表会(東京)	日本塗装技術協会	Tel.03-3663-5534 tosou-jimukyoku@jcot.gr.jp http://jcot.gr.jp
16日	第4回講習会「X線反射率による薄膜・多層膜の解析」(東京)	応用物理学会	物質・材料研究機構 桜井健次 Tel.029-859-2821 http://www.nims.go.jp/xray/ref/TutorialXRR2010.htm
22~26日	Asia Mining Congress 2009 (Singapore)	Terrapinn Holdings Ltd.	http://www.terrapinn.com/2010/asiamining/
28~30日	第159回春季講演大会(筑波 本号726頁)	日本鉄鋼協会	学術企画グループ Tel.03-5209-7013
2010年5月			
3~5日	Joint IABSE-fib Conference(Croatia)	IABSE	http://www.iabse.org/conferences/Dubrovnik2010/index.php
2010年6月			
10, 11日	第8回核融合エネルギー連合講演会(岐阜)	プラズマ・核融合学会、他	Tel.052-735-3185 plasma@jspf.or.jp http://www.jspf.or.jp/8renko/
27~2日	The thirteenth international conference on intergranular and interphase boundaries in materials-iib2010-(三重)	Iib2010実行委員会	東京大学iib2010事務局 Tel.03-5841-7688 http://jecs.org/iib2010/
2010年7月			
7~9日	表面改質展in名古屋(名古屋)	日刊工業新聞社	Tel.06-6946-3384
2010年8月			
31~2日	The International Conference Determination of Mechanical Properties of Materials by Small Punch and other Miniature Testing Techniques(Czech Rep)	Materials & Metallurgical Research, Ltd.	karel.matocha@mmvzskum.cz
2010年9月			
5~9日	The 12th International Conference on Aluminium Alloys(ICA12)(横浜)	JILM	http://www.icaa12.org/
15~17日	The 10th International Conference on Steel Rolling(ICSR)(中国)	CSM	http://hy.csm.org.cn/icsr10/en
25~27日	第160回秋季講演大会(北海道)	日本鉄鋼協会	学術企画グループ Tel.03-5209-7013
2010年10月			
3~6日	The 2nd International Conference on Interstitially Alloyed Steels (IAS2010)(Belgium)	TI- KVIV	http://www.ias2010.com/
2010年11月			
13~17日	Science and Processing of Cast Iron(SPCI09)(Egypt)	Central Metallurgical R&D Institute	http://www.cmrdi.sci.eg/index.php/events/eventlist
14~18日	第3回国際セラミックス会議(3rd International Congress on Ceramics(ICC))(大阪)	日本セラミックス協会	産業技術総合研究所 大司達樹 t-ohji@aist.go.jp http://www.ceramic.or.jp/icc3/
2011年3月			
25~27日	第161回春季講演大会(東京)	日本鉄鋼協会	学術企画グループ Tel.03-5209-7013
2011年6月			
27~1日	6th European Coke and Ironmaking Congress(ECIC2010)(Germany)	VDEh	http://www.ecic2010.com
2011年11月			
28~30日	国際シンポジウム「持続可能社会のための材料科学と技術革新-地球環境持続性のためのエコマテリアルズとエコイノベーション-」(大阪)	大阪大学先端科学イノベーションセンター	Tel.06-6879-4193 maeda@casi.osaka-u.ac.jp
2012年6月			
10~13日	4th International Conference on Progress Development in Iron and Steelmaking (SCANMET IV)	MEFOS	http://www.scanmet.info

総 合

「ISIJ International」電子ジャーナルの無料アクセスについて

論文誌編集委員会

日本鉄鋼協会では、欧文誌「ISIJ International」の個人会員向けの電子ジャーナル購読料を2010年1月より当分の間、無料とすることにしました。現在、オンラインで掲載後、1年間は有料でアクセスして頂いていましたが(個人会員3,000円/年)、掲載直後から論文へのアクセスを会員、非会員を問わず無料にし、「ISIJ International」掲載論文を早期により多くの研究者に公開します。

お知らせ ふえらむ10号(674頁)に掲載されたセミナー(講習会)の参加費が変更になりました。

高温プロセス部会 凝固・組織形成フォーラム主催 セミナー(講習会)

「凝固プロセスからみた計算状態図ソフトの援用と組織予測Ⅲ」(2009年12月11日開催)の参加費を下記の通り変更します。

参加費: 変更前 40,000円(学生8,000円) → 変更後 20,000円(学生5,000円)

問合せ先: 九州大学 工学研究院材料工学部門 宮原広郁 FAX.092-802-2990 E-mail: miyahara@zaiko.kyushu-u.ac.jp

編集後記

早いもので、今年も後2ヶ月を残すのみとなりました。読者の皆様には、いかがお過ごしでしょうか。今年は、経済危機の余波による社会不安が顕在化し、アメリカではオバマ大統領が就任し、日本では歴史的な政権交代が実現するなど、世の中が大きく変化した年でした。大きくうねる流れの中で、日常生活や将来への不安を感じ、人間の幸せとは一体何だろうかと、ハタと思い悩むこともあるかと思ひます。

一方で、年々、時間の流れが早くなるのを感じる方は大

変多いかと存じます。20世紀最大の天才といわれるアインシュタインは、たくさんのユーモアあふれる言葉を残しています。例えば、相対性を次のように説明しています。「熱いストーブに1分間手を載せてみてください。まるで1時間ぐらいに感じられるでしょう。ところが、かわいい女の子といっしょに1時間座っても、1分ぐらいにしか感じられません。」つまり、幸せな状態ほど、時間の流れを早く感じるようになります。人間は幸運なことに、もともと年齢を重ねるほど、幸せになれる生物のようです。(T.M.)

会報委員会(五十音順)

委員長 小野寺秀博(物質・材料研究機構)

副委員長 細谷 佳弘(JFEスチール(株))

委員 伊藤 直史(群馬大学)	韋 富高(日本冶金工業(株))	尾崎 大介((社)日本鉄鋼協会)
木村 勇次(物質・材料研究機構)	芝田 智樹(大同特殊鋼(株))	杉浦 夏子(新日本製鐵(株))
杉本 卓也(愛知製鋼(株))	埴本 敏江(日新製鋼(株))	滝田 光晴(名古屋大学)
田嶋 淳平(住友金属工業(株))	谷口 庸一(三菱自動車工業(株))	中嶋 宏(三菱重工業(株))
浜 孝之(京都大学)	林 幸(東京工業大学)	林 重成(北海道大学)
前田 恭志((株)神戸製鋼所)	三木 貴博(東北大学)	

ふえらむ／鉄と鋼 合本誌 定価 6,000円(消費税等込・送料本会負担)

Bulletin of The Iron and Steel Institute of Japan／Tetsu - to - Hagané : Unit Price ¥6,000 (Free of seamail charge)

1996年5月10日第三種郵便物認可 2009年10月25日印刷刷本、2009年11月1日発行(毎月1回1日発行)

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

Tel: 総合企画事務局: 03-5209-7011(代) Fax: 03-3257-1110(共通)

(会員の購読料は会費に含む)

印刷所 東京都文京区本駒込3-9-3 (株)トライ

©COPYRIGHT 2009 社団法人日本鉄鋼協会

複写される方に

本会は下記協会に複写に関する権利委託をしていますので、本誌に掲載された著作物を複写したい方は、同協会より許諾を受けて複写して下さい。但し(社)日本複写権センター(同協会より権利を再委託)と包括複写許諾契約を締結されている企業の社員による社内利用目的の複写はその必要はありません。(社外頒布用の複写は許諾が必要です。)

権利委託先: (中法)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

なお、著作物の転載・翻訳のような、複写以外の許諾は、直接本会へご連絡下さい。

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

・ Copyright Clearance Center, Inc.

222 Rosewood Drive, Danvers, MA01923 USA

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

DSI

Dynamic Systems Inc.



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。

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

※加熱方式：直接抵抗加熱システムを採用しています。

ELTRA

Analysers made in Germany

炭素／硫黄分析装置 CS-800

システム概要

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



特 徴

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



日本総代理店

ジャパンマシーナリー株式会社
JAPAN MACHINERY COMPANY

システム営業部 〒144-0046 東京都大田区東六郷 2-4-12 (JMC/ハイテクセンター)
TEL.03-3730-6061 (代表) FAX.03-3730-3737

大阪支店 〒530-0002 大阪府大阪市北区曽根崎新地 1-3-16 (京富ビル)
TEL.06-6342-1551 FAX.06-6342-1555



ハイテクの一步先に、いつも。

HORIBA

Explore the future

測定結果の正確さ 簡単操作で豊富なラインナップ。 金属分析に差をつけます。

酸素・窒素分析装置 水素分析装置

EMGAシリーズ

EMGA-620W 酸素・窒素同時分析
EMGA-621W 水素分析
EMGA-622W 窒素分析
EMGA-623W 酸素分析



炭素・硫黄分析装置

EMIAシリーズ

鉄鋼・非鉄金属・新素材・
セラミックスなどの品質チェック、
研究開発に。

EMIA-920V 炭素・硫黄同時分析
EMIA-921V 炭素分析
EMIA-922V 硫黄分析



ICP発光分光分析装置

JY/ICPシリーズ

最高分解能0.005で高感度・高精度測定が可能。
Cl, Brなどのハロゲン元素の分析も可能。



マーカス型高周波グロー放電 発光表面分析装置

GD-Profiler2

迅速表面分析が可能。
セラミックスなどの
非導電性材料の深さ方向
分析が可能。



本製品の詳しい情報は → www.horiba.info/kinbun/fe/
FAXでの資料請求は → 075-321-6621

株式会社堀場製作所

本社 〒601-8510 京都市南区吉祥院宮の東町2 TEL(075)313-8121 ●仙台(022)308-7890 ●つくば(0298)56-0521 ●東京(03)3861-8231
●横浜(045)451-2091 ●名古屋(052)936-5781 ●大阪(06)6390-8011 ●広島(082)288-4433 ●愛媛(0897)34-8143 ●福岡(092)472-5041

●製品の技術的なご相談をお受けします。 **カスタマーサポートセンター** フリーダイヤル 0120-37-6045

<http://www.horiba.co.jp> e-mail: info@horiba.co.jp