

心えらむ

*Bulletin of
The Iron
and Steel
Institute of
Japan*

Vol.17 / No.8 / 2012

(一社)日本鉄鋼協会会報

ISSN1341-688X

鉄と鋼

Tetsu-to-Hagané

Vol.98 / No.8 / 2012

ISSN0021-1575



固体発光分析装置 OBLF GmbH [GERMANY]

鉄・鋼・アルミニウム等の品質保証・工程管理分析(JSG 1253)等に最適!!

GS1000

500mmタイプの光学系を持つGS1000は、最大分析受光部数に制約がある場合は、放電スタンド、データ処理部、発光電源部等はQSN/QSG750と完全に共通です。目的が明確化されたルーチン分析に圧倒的な高精度と安全性およびコストパフォーマンスを誇ります。

QSN/QSG750

QSN750およびQSG750両機種は、OBLF社伝統の750mm光学系を持つ、世界最高性能機です。パルスパージ式フラッシュ機能や高速型発光電源装置、驚異的低リーク率を保証する真空型光学系容器等により極微量元素の分析から高濃度成分の品質保証まで、あらゆる分析に対応します。加えてQSG750には、測光部にシングルパルス測光機能および時間分析測光機能を備え、鋼中アルミニウムの金属/非金属分離分析等の特殊用途にも対応しています。



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。



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

第三営業部 〒143-0015 東京都大田区大森西5-27-4 (ファームストーンビル)
 TEL.03-3730-6061(代表) FAX.03-3730-3737
 関西営業課 〒530-0002 大阪府大阪市北区曽根崎新地1-3-16(京富ビル)
 TEL.06-6342-1550 FAX.06-6342-1557

ふえらむ

Vol.17 (2012) No.8

C O N T E N T S

目 次

日本のものづくり力	圧延ロールが甦る—CPC技術	532
Techno Scope	震災復興に貢献する鉄鋼スラグ	535
連携記事	環境資材としての鉄鋼スラグの有用性について 堤 直人、北野吉幸、加藤敏朗	539
	高炉水砕スラグを用いた空洞充填材「スマートグラウト®」 林 正宏	550
	津波被災農地復興に役立つ転炉スラグ 後藤逸男	554
特別講演 (学術功績賞受賞記念)	先進火力発電用9Cr鋼の長寿命化合金設計 阿部富士雄	560
(学術功績賞受賞記念)	鉄鉱石焼結プロセス研究 —資源対応力向上と環境負荷低減をめざして— 葛西栄輝	565
入門講座	鋼の防錆・防食技術—5 鋼中への水素吸収の電気化学と水素脆化 多田英司、水流 徹	573
躍 動	ターニングポイント 土田紀之	581
会員へのお知らせ		585
海外鉄鋼関連最新論文		604



注湯炉から数分おきに、自動的に水冷鑄型に溶湯が注がれる。この設備は最大で毎分200mmの速度でロールを製造できる能力を持つ。

MANUFACTURING POWER OF JAPAN 圧延ロールが甦る

日本のものづくりを支える圧延ロール

多くの鉄鋼製品の中で、鋼板は代表的な製品といえる。世界でもトップクラスの品質を誇る我が国の鋼板の製造を支える重要な工程の一つが、圧延プロセスである。実際の製造ラインには、ワークロールをはじめとして、バックアップロールやテーブルロールなど様々なロールが使用されている(下図参照)。

これらのロールは消耗品であり、その耐久性は鋼板の製造コストなどに大きく関わってくる。なかでも直接、鋼板に接触するワークロールについては、製品の安定製造に加えて寸法精度や表面品質に大きく影響するため、耐摩耗性、耐肌荒れ性、

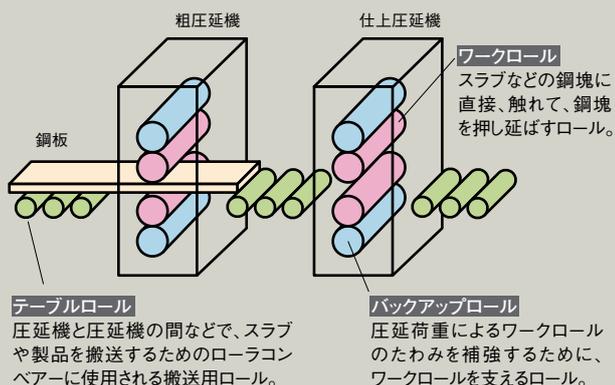
強靱性、耐焼き付き性、耐熱衝撃特性、耐打ち疵性など、数多くの耐久性能が求められる。

複合ワークロールは、荷重を受ける芯材(軸部分)とその外周部の鋼板と直接接触する外層部分の2つの金属層から構成される。金属層に要求される特性はそれぞれ異なり、ロール内層の軸部分には高い靱性が、ロール表面には優れた耐摩耗性が求められる。

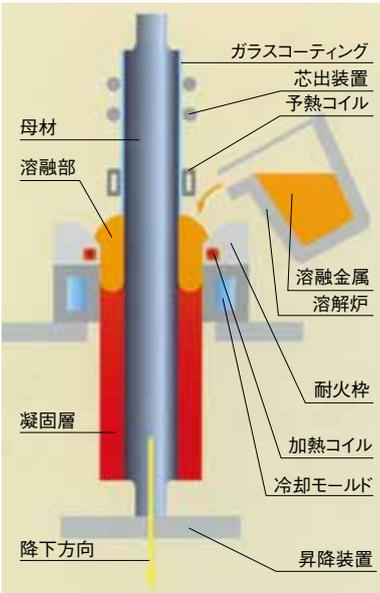
このような要求に対応するため、軸部分にはダクタイル鑄鉄やクロムモリブデン鋼などが使用されている。また、ロール外層材には、高クロム鑄鉄などが用いられてきたが、最近では耐摩耗性と靱性に優れた高速度工具鋼(以下、ハイスと呼ぶ)が我が国で開発・実用化され、広く採用されるようになった。

圧延用複合ロールは、遠心鑄造や軸部分への鑄掛肉盛溶接によって製造されてきた。遠心鑄造は、回転する鑄型内に溶湯を鑄込んで鑄型の外周部分から凝固させ、所定の厚さを有する筒状の鑄物を作る技術である。従来の静置鑄造では、鑄造品の内部に空洞を造るためには、中子(なかご)を使用する必要があった。遠心鑄造ではこれが不要となるため、ロール外層に使用する高価な合金を合理化でき、昭和40年代から採用が拡大した。しかし、遠心力を利用するため、耐摩耗性の確保に必要な炭化物などが外周部に偏析するという欠点があった。この難題を克服し、さらに優れた特性を持つ複合ロールの製造方法として利用されたのが、(株)フジコーが開発したCPC技術である。

●圧延ラインで使用される様々なロール



●CPC技術の仕組み



母材(芯材)は、耐火棒と水冷鑄型を上から下へ徐々に通過していく。耐火棒に常に溶融金属が注ぎ込まれることにより、連続した鑄掛肉盛溶接が可能になる。



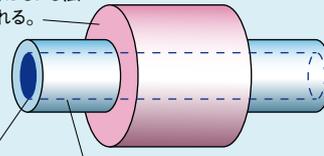
使用済みワークロールの検査



独自に開発した鑄鉄用超音波探傷試験装置

●大型ロールの再生

外層ハイス材はCPC法により再生される。



軸部分の中心部は再利用される。

軸部は肉盛溶接により形状が復元される。

- 使用済みロールの軸部
- 再生されたロール軸部
- 再生されたロール外層部



中小型ロールの軸部とロール部は、自動ナローギャップ溶接機によって接合される。トーチの厚さは約5mmである。

CPC技術

CPCロールが持つ、優れた特性

CPC技術とは、Continuous Pouring process for Claddingの略で、連続注入クラッド法とも呼ばれる。母材(芯材)の表面に数cmから数十cmの厚さで、母材と異なる金属を複合(クラッド)させる技術である。この技術は溶接棒の代わりに溶融した金属を用いる、鑄掛肉盛溶接の技術がベースとなっている。現在のCPC技術では、まず、芯材に酸化防止のために特殊なガラスコーティングを施す。芯材は溶融した外層用金属を流し込むための環状の耐火棒内にセットされ、流し込まれた溶融金属は、高周波誘導加熱により、加熱・攪拌され、水冷鑄型部分で冷却されることで芯材と接合し、複合層が形成される。

従来の遠心鑄造法の凝固速度が3~7mm/minであるのに対し、CPC技術では10~30mm/minと高速な冷却・凝固が可能である。これは、溶融した外層が凝固する際に、水冷鑄型、芯材、既肉盛凝固層の3方向から冷却されるためである。そのためCPC技術では、基地相中に高硬度な炭化物を均一に分散させた金属組織をつくることができ、偏析のない高合金の外層部を芯材に接合することが可能となる。また、高速で凝固させるため、結晶構造が微細で、美しいロール表面肌を実現でき、鋼板品質に影響を与えるロール肌荒れを低減できる利点もある。さらに、芯材とロール層との材料の組み合わせの自由度が高いため、高負荷圧延に耐えることができ

る強靱な芯材を用いることが可能になる。凝固速度が速いことは製造時間の点でも有利であり、1回のCPCプロセスによって、小型ロールの3~4本に相当する約7.5 mのロールを約85分で製造することが可能である。

(株)フジコーによって開発、確立されたCPC技術は、ハイス系複合ロールの最適な製造方法として高く評価され、他の

ものづくりの魅力



当社は規模ではなく技術で、世界一を目指しています。技術は失敗して確立するものです。CPC技術の開発も失敗の連続でした。100本作って70本失敗したことも……。悩んで悩んでもうダメだというところで、ふっとヒントが閃いて、一晩で改善が進むこともありました。100の苦しみがあって、1の喜びが生まれる。誰にも真似できない技術はそうやってできるのです。

(山本厚生代表)

株式会社フジコー(福岡県北九州市)
1952年創業、溶接、溶射、特殊鑄造等の金属表面処理で高度な技術を保有。特に独自開発のCPC技術は評価が高く、鋼材の中小型圧延ロール、搬送ロールの分野で国内トップシェアを誇る。
<http://www.kfjc.co.jp/>

ロールメーカーにも技術供与されている。CPC技術で製造されたハイス系複合ロールは従来製品と比較して2～5倍の耐久性を発揮するため、同社のハイス系複合ロールは、中小型圧延ロールの分野で国内トップシェアを誇っている。

ものづくりに求められる環境負荷の低減

CPCロールは従来製品と比較して優れた耐久性を持つものの、製造コストは従来製品より割高になる。そこで(株)フジコーでは、従来は廃棄されていた使用済み大型ワークロールの再生に取り組んだ。従来法で製造されたロールでは廃棄されていた芯材を再利用することによって、コスト削減と環境負荷低減を同時に実現することを狙ったのである。芯材を新たに溶製する必要がないため、再生CPCロール製造時のCO₂発生量は、従来法と比較して45%にまで削減されている。

CPCロールの再生では、まず、使用済みのロールの再生可否の検査が入念に行われる。検査に合格した使用済みロールは、摩耗した外層部分を削り取り、CPC技術により外層のハイス層が再生される。また、軸部分の摩耗は、肉盛溶接によって、形状が復元される。このようにして再生されたロールは、耐摩耗性や耐肌荒れ性、強靱性など、すべての性能において新製品と同等の品質を持ちながら、従来の遠心鑄造法ロールと同等のコストでの製造が可能となる。

現在、(株)フジコーでは一層の製造コスト削減を実現するために、組立ロールの大型化に挑戦している。CPCプロセスでは、一度に約7.5mの長尺材を製造することが可能であり、小型ロールに適用する場合はこれを分割して、軸部分を溶接して取り付け、数本のロールとして使用してきた。このように分割したロールに軸材を接合したロールを組立ロールと呼ぶ。現在、大型ロールを再生する際には、軸部分を肉盛溶接により再



ロール部(胴部)の再生が完了した状態

生しているが、組立ロールにすることで、コスト削減が可能になる。また、軸材とロールの接合にはナローギャップ溶接を用いているが、作業に時間がかかるという問題がある。(株)フジコーでは、大型組立ロールを実現できる、新しい接合技術の開発を進めている。

我が国で初めて実用化された環境負荷の少ない再生CPCロールは、徐々に国内メーカーで採用されつつある。また、より積極的なコスト削減を進める海外の鉄鋼メーカーは高い関心を示し、急速に導入が拡大している。これまで以上に低コストの再生大型CPCロールが実現すれば、国内外でさらに大きく普及することが期待される。極めて高性能のハイス系複合ロールを使いこなすためには、高度な圧延技術が不可欠である。この点で大きなアドバンテージを有する我が国の鉄鋼メーカーにとって、再生CPCロールは力強い味方になるに違いない。

●文 石田亮一

製鉄所を支えるメンテナンス技術



人間よりも巨大なクラッシャーの回転部分である「鬼歯」の補修作業のようす。

製鉄所には数年間休まず稼働する設備も少なくない。そのため、それらの設備には高い耐久性に加えて、信頼性の高いメンテナンス技術が重要となる。CPC技術の基になった鑄掛肉盛溶接は、製鉄所で使用される様々な大型設備のメンテナンスにも用いられる。

例えば、高炉に投入する鉄鉱石は、一定の大きさに焼き固める必要があるが、鉄鉱石は焼結工場で焼き固められた後、クラッシャーと呼ばれる粉砕機により、粉砕される。高温条件で使用されるクラッシャーには、鬼歯(おにば)と呼ばれる回転部と、受歯(うけば)と呼ばれる固定された部分があり、いずれも過酷な使用環境で摩耗していく。摩耗したクラッシャーの歯は、鑄掛肉盛溶接により、補修・復元されている。耐摩耗性、耐衝撃性、耐剥離性を両立させた高い溶接技術が、ものづくりの基本となる我が国の製鉄技術の現場を支えているのである。

Techno Scope



震災復興に貢献する

鉄鋼スラグ

鉄鋼スラグは、これまで建築・土木用途を中心に活用されてきたが、最近注目されているのが農業への利用である。東日本大震災の津波により、塩害を受けた農地の土壌改良に、転炉系スラグの効果が期待されている。被災農地の復興を支援する鉄鋼スラグについて紹介する。

被災農地で、転炉系スラグを使った除塩対策を行い、営農を再開したビニールハウス(福島県相馬市)



建築・土木用途を中心に活用されてきた鉄鋼スラグ

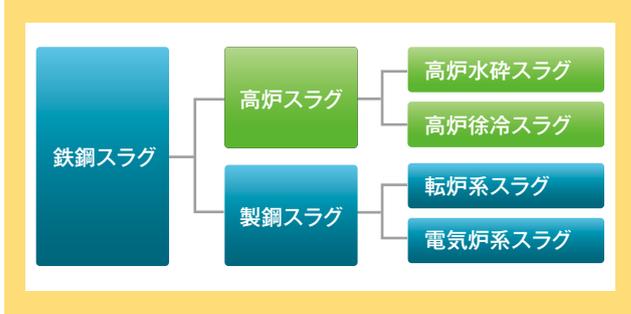
製鉄所で鉄を作れば、必ずスラグが発生する。鉄鋼スラグの生成量は年間約3千数百万tである。

鉄鋼スラグは、発生する過程によって、高炉スラグと製鋼スラグ(転炉系スラグおよび電気炉系スラグ)とに分類される。

高炉スラグは、高炉で鉄鉱石に含まれる鉄以外の成分と、副原料の石灰石やコークス中の灰分と一緒に熔融分離回収されたもので、銑鉄1tあたり約290kg生成される。高炉から排出されたスラグは約1,500℃の熔融状態であり、その冷却方法によって徐冷スラグと水砕スラグに分類される。徐冷スラグは、熔融スラグを冷却ヤードに流し込み、自然放冷と適度の散水により徐冷処理してできた、結晶質で岩石状のスラグである。水砕スラグは、熔融スラグに加圧水を噴射するなど急激に冷却処理してできる、ガラス質で粒状のスラグである。

一方、製鋼スラグは、製鋼工程で副生されるものであり、転炉から生成する転炉系スラグと、電炉で生成される電気炉系スラグがある。製鋼スラグは、高炉徐冷スラグと同様に冷却ヤードで放冷や散水により徐冷処理されたものであり、転炉系スラグは転炉鋼1tあたり約110kg生成される。電気炉系スラグには、酸化精錬で生成する電気炉酸化スラグと還元精錬で生成する電気炉還元スラグがあり、電炉鋼1tあたりで生成される電気炉酸化スラグは約70kg、電気炉還元スラグは約40kgである。

鉄鋼スラグの種類



高炉スラグは、セメント原料やコンクリート混和材等の材料として利用されている。高炉スラグ微粉末は、普通セメント(ポルトランドセメント)と同等の性能を持つ高炉セメントの原料となり、高炉セメントは普通セメントに比べて長期間にわたり強度を保ち、水との反応時の発熱速度が小さい、化学的な耐久性が高い、などの特徴を持つ。

また高炉セメントは、天然砂を使う通常のセメントに比べ製造時CO₂排出量を約40%低減できる。2001年度からは、グリーン購入法における公共工事の調達品目に高炉セメントが指定された。高炉セメントだけでなく、その後も多くのスラグ製品がグリーン購入法の指定を受けている。

一方、製鋼スラグは鉄分を含んでおり、耐摩耗性に優れているため、アスファルトコンクリート用骨材に使用されたり、粒子密度や単位体積重量が大きいと、土木用資材や地盤改良材としても使用されている。

農業分野での鉄鋼スラグの利用

こうした鉄鋼スラグの有効利用は、これまで長年にわたり企業や大学などにおいて研究が行われてきた*。これまでの用途のほかに、最近期待されているのが、鉄鋼スラグを東日本大震災で津波被害を受けた農地の復旧に役立てようという研究である。

2011年3月11日の東日本大震災に伴う津波により、多くの農地が流出や冠水等の被害を受けた。太平洋岸の被災6県(青森、岩手、宮城、福島、茨城、千葉)において、津波による被災農地面積は合計21,476haであったが、2012年3月11日現在では全体の約27%にあたる5,856haが復旧完了している。農林水産省では、復興マスタープランに基づいて復旧を進めているが、津波被災農地の約9割が営農再開できるのは2014年度という見通しが発表されている。(2012年4月20日農林水産省発表)

*日本鉄鋼協会では、現在「海洋環境での製鋼スラグの利用技術開発(H22~24)」「鉄鋼スラグ新機能フォーラム(H23~25)」「製鋼スラグによる被災沿岸田園地域の再生(H24~26)」などをテーマとした研究活動が進行中である。

そもそも海水には、塩類(塩化ナトリウムなど)が約3%含まれており、海水をかぶった津波土砂は大量の塩分を含む。一般に、植物が正常に生育できる塩分濃度は0.3%程度であり、津波による塩害を受けた農地では作物を作付けすることはできない。

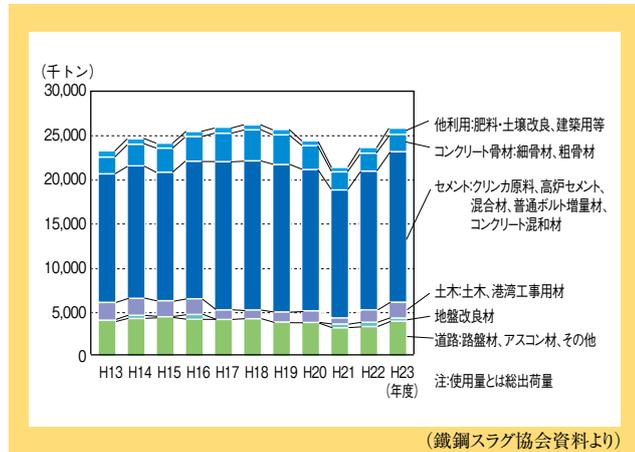
この塩分を除去するために、その効果が期待されているのが転炉系スラグである。鉄鋼スラグの中でも、高炉スラグの主成分がケイ酸カルシウムであるのに対し、転炉系スラグはさらにフリーライムや他の肥料成分を多く含み、土壌改良に効果を発揮する。

転炉系スラグを利用した土壌の除塩の取り組みを進めている東京農業大学の後藤逸男教授によれば、除塩のメカニズムは以下のとおりである。

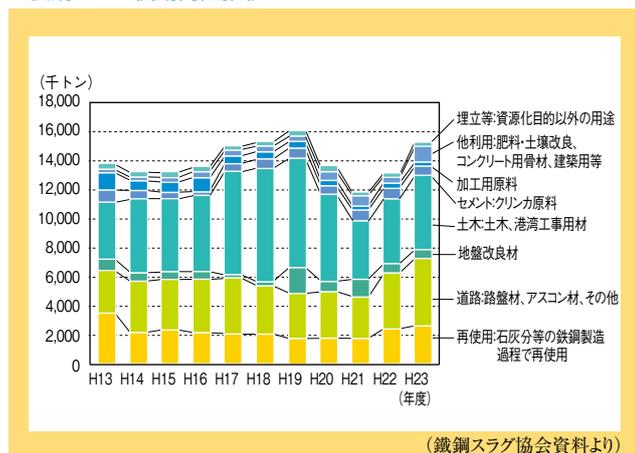
海水が浸入した農地には塩分がしみ込んでいる。もともと土はマイナスの電気を持っている。塩分のうち、塩素イオンはマイナスの電気を持っているので、土には結合せず、水によって簡単に取り除くことができる。しかし、ナトリウムはプラスの電気を持つので、土と結合してしまい、水だけでは簡単に取り除くことができない。

そこで、土壌に吸着されているナトリウムをカルシウムと置き換え、土壌から塩分を溶出させ水に流れやすくすることが必要であり、そのために石こうや炭酸カルシウムなどの石灰資材を使用

■高炉スラグ使用内訳推移



■製鋼スラグ使用内訳推移



海でも活かされるスラグの利用

最近、注目されているのは、水和固化体や炭酸固化体といった製鋼スラグを使用した固化体である。水和固化体は、天然石やコンクリートブロックのように、港湾土木資材や漁礁・藻場として使用されており、生物付着性にも優れているとの評価を得ている。製鋼スラグに炭酸を吹き込んで固める炭酸固化体は、貝殻やサンゴと同じ炭酸カルシウムの成分でできており、藻場造成礁やサンゴ造成礁としての利用が進められている。

また、藻場が白色小型藻類に覆われる「磯焼け」と呼ばれる現象を防ぐため、磯焼けの原因の一つである海水中の鉄分不足を補う目的で、製鋼スラグを腐食土と混合して海中に設置する技術も開発されている。



製鋼スラグを原料とする大型ブロック(上)は、すでに全国で実証実験・事業が行われており、サンゴ礁再生や藻場造成などに役立っている。港湾や海洋で利用される製鋼スラグブロックの設置状況(右)。



(資料提供:JFEスチール(株))

転炉系スラグによる除塩効果を実証したイチゴハウス

福島県相馬市和田地区。例年、冬から春には多くのイチゴ狩りの観光客でにぎわうこの地区で、鈴木さんのハウスでもイチゴの遅い苗がようやく実をつけた頃のことだった。2011年3月11日の東日本大震災で、周囲の田畑は広く津波の被害を受けた。太平洋岸から約3kmの距離にある鈴木さんのイチゴハウスにも津波が押し寄せ、その後は厚さ約10cmの津波土砂が堆積してしまった。

その後、復旧に向けてボランティアによる津波土砂の除去が始まった。しかし津波土砂を除去して処理するには大変な労力がかかる。そこで鈴木さんは後藤教授らの協力を得て、6月から津波土砂を除去せず元の土壌と混層することにした。またこの時に、転炉系スラグを10aあたり1tの割合で施用した。後藤教授らは、土壌の成分変化の観察を続けながら、8月にはソルゴー（緑肥作物）の種まきを行い、9月にはこれを鋤き込んで有機物補給と土壌団粒化の促進を図った。2011年の夏は比較的降雨量が多かったことも幸いし、土壌の塩分は徐々に減少し、当初の予想以上の除



ハウスの中で実ったイチゴ「ふくはるか」。春には元気に実をつけた(2012年4月撮影)。

塩を果たすことができた。

そして9月には、スナップエンドウの作付けを始めた。そのハウスから約200m陸側にある、塩害被害が軽微であった別のハウスには、イチゴの苗を植えることができた。

鈴木さんは、これまでの復旧についてこう話してくれた。

「元の土と混ぜ、転炉系スラグを混ぜて雨にあてる、という簡単な方法でここまで復旧することができた。津波土砂にはいい成分も含まれているからすきこんだ方がよいとアドバイスされ、手間をかけて土砂を取り除かなくてもよかったので、本当によかった」

津波被害をのりこえて実ったイチゴは、復興を目指す人々にとって何よりの収穫となった。

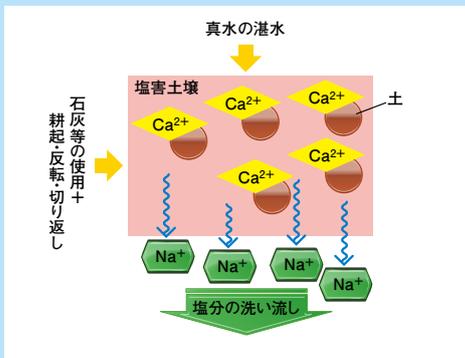


被災後の農地の状況

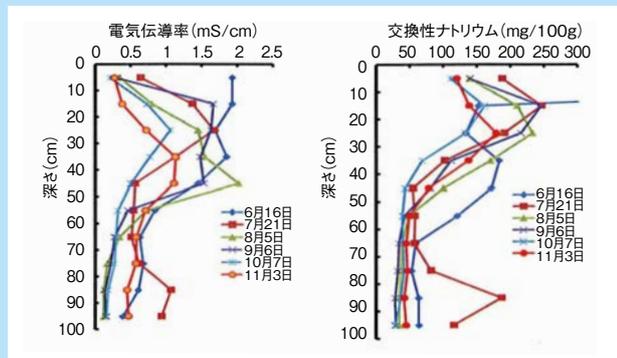


鈴木さん夫妻は震災後に初めてスナップエンドウに挑戦。丸々と大きく甘い実をつけ、直売所で人気となった。

■塩害土壌の改良に役立つ転炉系スラグのメカニズム ■イチゴハウス土壌の電気伝導率と交換性ナトリウムの経時変化



土はマイナスの電気を持っている。ナトリウムはプラスの電気を持つので土と結合してしまう。このナトリウムをカルシウムと置き換えて、土壌から塩分を溶出させることが必要である。このためには、カルシウムの供給源となる石灰資材が有効である。



電気伝導率は、塩類濃度の指標であり、表層10cmでは8月には0.35mS/cmまで低下したが、10~50cmでは1.5mS/cm程度までしか低下しなかった。また交換性ナトリウムは139mg/100gと高く、9月までは土づくりに注力した。9月以降ようやく塩分が減少した。

■代表的な転炉系スラグ肥料の成分



●保証成分(%)

アルカリ分	＜溶性苦土
50.0	4.0

●含有成分(%)

可溶性けい酸	酸化鉄	＜溶性マンガ	＜溶性りん酸	ほう素
15.0	20.0	3.0	1.0	120PPM

ほかに、モリブデン、亜鉛、コバルト等微量

*＜溶性:肥料成分は溶け方の性質の違いにより、水溶性、可溶性、＜溶性、不溶性に分けられる。＜溶性とは、クエン酸2%液で溶ける肥料成分のことであり、徐々に溶け出すためゆっくり効く。

除塩のために施用された転炉系スラグ。
φ0.6mm程度の粒状で、手に持ったずしりと重い。

(副産石灰肥料「てんろ石灰」ミネックス資料より)

することが望ましい。このほか、ナトリウムが吸着された土壌は分散しやすい特性があるため、ナトリウムを除去することにより、土壌粒子が流されることを防ぐ効果も期待できる。

また、津波土砂中には1%程度のイオウが含まれており、この土壌はパイライト(FeS₂)を含む酸性硫酸塩土壌と見なされている。そのため、時間がたつにつれて土壌が酸性化していくおそれがある。このような問題を解決するためにも、石灰資材を使用することが有効だといわれている。そして石灰資材の1種である転炉系スラグは、除塩の促進材として、また土壌の酸性硫酸塩の対策資材として、効果が期待されている。

塩害の土壌改良に期待される転炉系スラグ

転炉系スラグの原料は、鉄鉱石、石炭、石灰岩であり、有害成分を含んでいない。主成分はケイ酸カルシウム、副成分としてフリーライム(生石灰)やマグネシウム、さらに鉄、マンガ、ホウ素などを含む。そのため、転炉系スラグを施用してpH7.5程度以上にまで高めても、作物にマンガやホウ素などの微量元素欠乏がおこりにくい。

また転炉系スラグは、同じ石灰資材である炭酸カルシウムや苦土石灰より緩効的(効果がゆっくり表れ、長続きすること)であり、津波土砂中のパイライトの酸化による土壌の酸性化を抑制するのにも効果がある。また転炉系スラグ中には1~2%のリン酸が含まれ、枯渇が懸念されているリン鉱石(肥料用原料)の代替資源としても注目されている。

転炉系スラグを使用した除塩では、以下のような方法が実施されている。

まず、田畑に堆積した津波土砂を除去せずに、その下の元の土壌と混層する。もし津波土砂を除去することになれば、多大な労力がかかり、除去した後の処分も困難である。また津波土砂には、土壌養分となるマグネシウム、カリウムなどが大量に含まれており、これは肥料成分として役立つことができる。

その後、土壌中に残った塩素は雨によってある程度まで流さ

津波堆積土の改質実証実験に使われた鉄鋼スラグ改質材

鉄鋼スラグを使って、大量の津波堆積土を建設資材として利用可能な土に再生する試みが行われている。

使用する泥土改質材(カルシア系改質材)は、鉄鋼スラグを原料に使い、成分管理と粒度調整を行ったものである。これを泥土と混同することで、施工性と締固め特性に優れた盛土材料に改質することが可能となる。

2011年9月、仙台市宮城野区で実施された実証実験では、がれきを含んだ泥土と泥土改質材を、回転式破碎混合工法を用いて攪拌混合し、効率よく良質な土を得ることができた。この土は復興用盛土材料などへ広く有効利用されることが期待されている。

■カルシア改質材の使用状況(仙台市宮城野区)



がれきを含んだ泥土(上)にカルシア改質材を加え攪拌することにより良質な土が得られる(右)。

(資料提供:新日本製鐵(株)、新日鉄エンジニアリング(株))

れる。さらに、転炉系スラグを施用し、土壌と良く混層する。

つまり、雨水と石灰資材をいかに効果的に利用するかが、除塩のポイントとなる。実際にこの方法によって、すでに多くの田畑で除塩が進められ、作物の植え付けも始まっている。

あまり知られていないが、これまでも鉄鋼スラグは農業用として使われてきた。高炉スラグは肥料成分の酸化カルシウム、酸化ケイ素、酸化マグネシウムを含んでいるため、「鉱さい(けい酸質肥料)」として主に稲作用に使われている。また製鋼スラグは高炉スラグの成分に加え酸化鉄、酸化マンガ、リン酸などを含んでおり、稲作用、畑作用、牧草用の肥料に利用されてきた。さらに製鋼スラグはアルカリ分の作用により、土壌の酸性を改善する効果もあり、高pHでも生育障害を起こさない、などの特徴を持っている。しかし既存肥料より重いなどの理由から、これまでほとんど普及していなかった。

もし、全国の農地で肥料や除塩用資材として鉄鋼スラグを利用するようになれば、農業肥料としての効果を発揮し、製鉄工程の副生物利用もいっそう進むことが期待できる。これまではあまり知られていなかった鉄鋼スラグの農業用資材としての効果に目を向け、今後も継続的に被災農地復興に役立つことを期待したい。

●取材協力 東京農業大学応用生物科学部・後藤逸男教授
●文 杉山 香里

連携記事

環境資材としての鉄鋼スラグの有用性について

Availability of Iron and Steel Slag for Earth-Friendly Material

新日本製鐵(株) 技術開発企画部
グループリーダー 堤 直人
Naoto Tsutsumi

新日本製鐵(株) 環境基盤研究部
主幹研究員 加藤敏朗
Toshiaki Kato

新日本製鐵(株) 土木建築技術部
グループリーダー 北野吉幸
スラグ・セメント事業推進部 マネジャー兼務 Yoshiyuki Kitano

1 はじめに

鉄鋼スラグは、日本国内で年間4000万トン弱発生する鉄鋼製品製造時の副産物¹⁾であり、これまでは循環資源有効利用促進の観点から、セメント用材料や道路用路盤材、土木工事用材料としての公認化技術開発に基づいて建設工事に広く適用されてきた²⁾。しかしながら、昨今の国内公共事業や建設需要の低迷に加え、他の副産物との競合や廃コンクリート等リサイクル材料の適用奨励、環境基準厳格化への適合といった社会的な情勢変化により、急速に市場の需給構造が変化しつつある。

新日本製鐵(以下、新日鉄)では、このような既存市場の閉塞感や社会・環境動向を予見し、この10年、鉄鋼スラグ、中でも転炉系製鋼スラグの有する「環境用資材」としての新たな機能創出とその活用に向けての利用技術開発³⁾を進めてきた。

そこで本稿では、前半で新日鉄を含む業界としての従来の陸上向け鉄鋼スラグ製品の公認化技術開発の経緯とその利用の概況を、また後半では新たな市場創出・展開として新日鉄が取り組んでいる社会動向に着目した、主に海域向けの環境保全的利用技術開発について、さらにこれらの成果から展開しつつある震災復旧・復興用途への適用状況について紹介する。

2 鉄鋼スラグの概況

2.1 鉄鋼スラグの種類とその生成状況

天然資源に乏しい我が国では、鉄鋼製品の大半は、輸入した鉄鉱石と石炭(コークス)を用いて酸化鉄を溶けた鉄に還元する方法で製造される。ここで、鉄鉱石から鉄分を取り出す過程で生じる副産物として天然由来の無機化合物である鉄鋼スラグが生成する。

具体的には、溶けた鉄を扱う高炉中心の「製鉄」、ならびに溶鉄から溶鋼を作り出す「製鋼」の2つの工程から、高炉スラグが鉄1トンあたり約300kg、また製鋼スラグが同じく約100kgずつ発生する(図1)。この製鋼スラグはスクラップを主原料とする電気炉メーカーでも発生する(電気炉製鋼スラグ)。2009～10年度のこれら鉄鋼スラグの生成ならびに利用量を表1に示すが、年間約4000万トンの鉄鋼スラグは、その生成

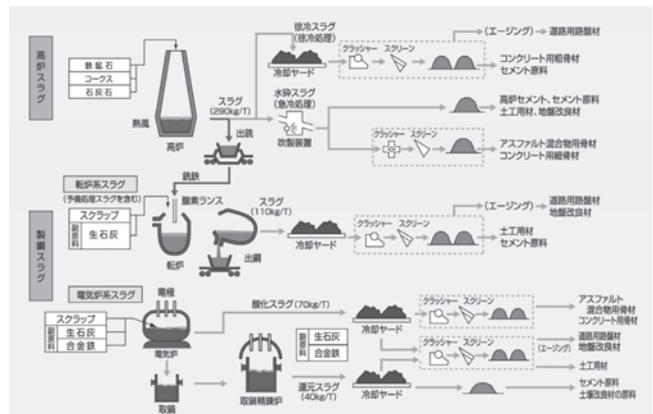


図1 鉄鋼スラグの生成工程¹⁾

表1 鉄鋼スラグの生成・利用量(単位:千トン)

	2009年度		2010年度			
	生成量	利用量	生成量	利用量		
鉄鉄生産量	72,526	—	82,915	—		
粗鋼生産量	96,449	—	110,792	—		
スラグ生成量	高炉	徐冷	4,124	4,107	5,085	4,362
		水碎	17,551	17,218	19,839	19,202
		小計	21,675	21,325	24,924	23,564
	製鋼	転炉系	9,174	9,425	11,674	10,460
		電炉	2,330	2,158	2,842	2,254
		小計	11,504	11,583	14,516	12,714
合計	33,179	32,908	39,440	36,278		

と自家再利用分を含めた利用が概ねバランスしている。

2.2 鉄鋼スラグの特性

鉄鋼スラグは石灰 (CaO) とシリカ (SiO₂) を主成分とし、その他に高炉スラグではアルミナ (Al₂O₃) や酸化マグネシウム (MgO) や硫黄 (S) を含み、片や製鋼スラグはさらに酸化鉄 (FeO) や酸化マンガン (MnO₂)、リン酸 (P₂O₅) 等を含む。高炉スラグの大半は、水を高圧噴射して急冷処理した水砕スラグであり、ガラス質で粒状 (砂状) の外観を呈する。また、一部はわずかな散水で放冷された徐冷スラグで、これは碎石状の外観である。一方、製鋼スラグは、高炉徐冷スラグと同様に冷却ヤードで放冷され碎石状となる。

3 鉄鋼スラグの利用開発状況 (1)

3.1 従来用途 (セメント、骨材、道路、土木工事等)

我が国の2010年度の高炉ならびに製鋼スラグの用途別の利用状況を図2に示す¹⁾。高炉スラグは、徐冷と水砕を合わせた量で、セメント・道路・コンクリート用骨材・地盤改良材の順に、また製鋼スラグは、土木・道路・自家再利用・地盤改良材の順で利用されている。以下、主要な用途順に製品としての概要を紹介する。

3.1.1 セメントへの利用 (高炉水砕スラグ)

水と反応して固まり時間とともに強度が向上する水硬性という特性は何れのスラグにも共通しているが、中でも、水砕スラグは微粉碎により特段に強い水硬性を示すため、セメント原料として約60%が利用されている。我が国の鉄鋼スラグ利用の歴史は古く100年以上前に遡り、1907年の水砕スラグを原料とした煉瓦の製造に続いて、1910年には高炉セメントの製造が開始された。その後、高炉セメント日本標準規格は1926年にJES第29号として制定され、数度の改正を経て、現在の3種類 (A・B・C種) は1960年に規定されている。水との反応時の発熱速度が小さく、化学的な耐久性が高い等の特

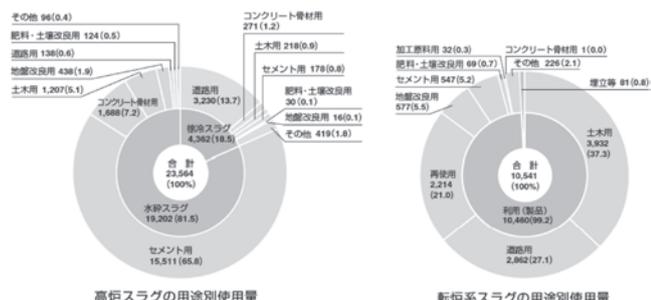


図2 各スラグの用途別利用状況¹⁾ (2010年度、千トン)

長を生かし、ダムや護岸・港湾といった大型構造物に広く使われている⁴⁾。

また地球環境保全の観点からは、普通セメントに比べ、天然資源の使用量抑制に加え、製造エネルギーに関しても約40%の省エネルギー効果を上げることができ、セメント1トンあたり約300kgのCO₂排出量を削減できる (図3)³⁾。これによって2001年度にはスラグ製品として最初のグリーン購入法の公共工事における特定調達品目 (環境負荷低減に資する製品等) にも指定されている。

3.1.2 道路用材料 (高炉徐冷・製鋼スラグ)

道路は通過車両の荷重に長期間、耐久できるよう、舗装を行う表面から下方、約1m程に骨材を敷き詰め、締め固めるが、この路盤材にも徐冷スラグが1960年代後半から利用され始めた。その後も、材料としての安定性を向上するための粒度構成やエージング (養生) 等の技術開発がなされ、設計施工指針の作成に基づき、1979年には徐冷スラグが道路用鉄鋼スラグ (JIS A5015) として制定され⁵⁾、1992年には製鋼スラグも適用可能となった。

また、製鋼スラグは硬質かつ耐摩耗性にも優れていることからアスファルト混合物の骨材としても使用され、2002年度に路盤材とともにグリーン購入法の特定調達品目に指定された。

3.1.3 コンクリート用骨材 (徐冷・水砕・電気炉製鋼スラグ)

建築資材として一般にコンクリートと呼ばれるものは砂や砂利、水等をセメント等の糊状のもので結合させたセメントコンクリートを指す。鉄鋼スラグは、前述のようにそもそも鉄鉱石から鉄を取りだした後の砂状ないし碎石状の資材であり、コンクリートの耐久性に影響を及ぼす有機不純物や粘土、貝殻等を含まない工業的な副産物のため、品質のばらつきも小さく、アルカリ骨材反応による膨張が認められない、といった優位な特性もある。そのため、1970年頃から、まず

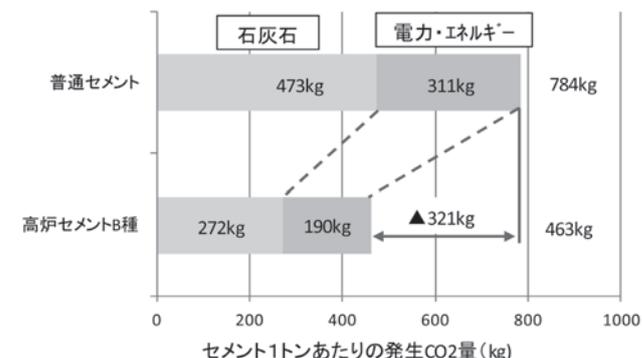


図3 高炉セメント利用時のCO₂削減効果³⁾

碎石状の徐冷スラグを天然碎石と同程度まで緻密に固める開発が進められ1977年にコンクリート用高炉スラグ粗骨材がJIS A 5011に制定された。一方で、砂状の水砕スラグについても1975年前後から細骨材として利用され始め、季節を問わず貯蔵中のスラグ同士の固結を抑制する手段の開発⁶⁾等により、1981年にJIS A5012コンクリート用高炉スラグ細骨材として認定され⁷⁾、両者とも日本建築学会や土木学会の各種施工指針にも織り込まれるに至った。さらに、電気炉製鋼スラグも2003年にコンクリート用電気炉酸化スラグ骨材としてJIS A 5011-4に制定され、この骨材は絶対密度が約 3.6g/cm^3 と他の骨材に比べて高いという特長を活かし、放射線遮蔽用コンクリートや港湾構造物に用いる重量コンクリート等に適用⁸⁾されている。

3.1.4 土木・港湾工事に用 (高炉水砕スラグ)

水砕スラグは1980年代から、前述のセメント原料やコンクリート骨材以外の用途として土工用(地盤)材料向けの利用研究開発が精力的に行われた。砂状の水砕スラグは、天然砂と比べ軽量で剪断抵抗力が大きいという力学的特性に加え、経時的に水和して固結する水硬性も有しており、地震時の液状化に対する抵抗性が大きくなるため、護岸の裏込めや軟弱地盤対策用の覆土、路床、盛土等に適している⁹⁾。1989年にはこれらの開発成果に基づき、(財)沿岸技術研究センターから「港湾工事に水砕利用手引書」が刊行された。特に護岸の裏込め材料に適用した場合、軽い点と剪断抵抗力が大きい点が相乗的に作用し前面の矢板等に働く主動土圧を大幅に減少させる効果があるため、1995年に起きた阪神淡路大震災の神戸港湾岸復旧工事には約110万トンの水砕スラグが使用された¹⁰⁾。

当時、六甲アイランド地区岸壁では、ケーソンと呼ばれる構造物を支える基礎が大きく変位する被害を受けたが、復旧に際して既存構造物に加わる荷重をできるだけ低減させる必要があり、岸壁背後の土圧軽減に優れた水砕スラグを用いて埋め戻す工法(図4)が採用された。

神戸港湾岸復旧工事(神戸市六甲アイランド)

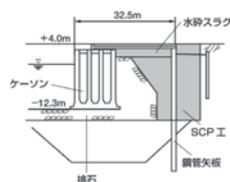


図4 神戸港湾岸復旧工事(六甲アイランド)¹⁾

3.1.5 地盤改良材(高炉徐冷・水砕・製鋼スラグ)

前項の土工用材料の範疇としての使用例であるが、軟弱地盤用の改良材として、2000～2002年にかけて北九州空港の地盤改良工事に、約150万トンの高炉水砕スラグが使用されている⁹⁾。周防灘の沖合、約3kmに建設された北九州空港は、北九州港や苅田港等の航路整備で発生する浚渫土が埋め立てに活用されたため、超軟弱地盤の沈下対策が求められた。開港に向け早期に強固な地盤とするために軟弱地盤上に厚さ0.5～1.2m程度の透水性の高い砂層を配置するサンドマット工法に、ペーパードレーン工法を加えた地盤改良が行われた。軽量である水砕スラグは、埋立地の沈下量を低減させることができる点からサンドマット材の一部に採用され、その効果が評価されている。

また、このような埋立時の大規模沈下対策とは異なるが、我が国の沿岸部において軟弱な粘性土地盤が堆積していることも多く、この軟弱地盤の改良には強固に締め固めた砂杭を地中に打ち込み造成するサンドコンパクションパイル(SCP)工法が代表的に用いられてきた。しかし、1990年半ばから、天然砂の枯渇や環境保全の点からも代替材の適用が検討され始め、製鋼スラグの港湾工事に用いる材料としての適用技術開発が進められた。ここでは神戸港での陸上SCP、広島港での海上SCPの試験が行われ、物理的特性以外に海域へ与える影響の調査も進められ、周辺海域へのアルカリ成分によるpH上昇は殆どない事も確認され、天然砂代替としての製鋼スラグの利用可能性が評価された¹¹⁾。その後、広島港の約400万トン(写真1)を始め、特に瀬戸内海では自然保護の観点から海砂採取を禁止する自治体が増えたこともあり、各地で港湾の地盤改良に利用された。

さらに2007年に改訂された港湾技術基準(港湾施設の技術上の基準・同解説)では、性能照査型設計法の導入に伴い、レベルⅡ地震時の耐震強化岸壁の残留変形照査が義務化されたが、従来の砂杭による地盤改良では護岸の残留変形量が必ずしも要求性能(例えば重力式ケーソン岸壁では1m)を満足できない事例も散見されるようになった。そこで新日鉄で



写真1 広島ポートルネッサンス出島地区¹⁾

は天然砂にはない鉄鋼スラグ特有の固結特性を確実に発揮し、水硬性SCP「エコガイアストーン® (固結タイプ)」を開発し、広島大学や (独) 港湾空港技術研究所、不動テトラとの共同研究によりその有効性 (改良地盤の安定性向上や残留変形抑制効果) を検証するとともに固結特性を有するSCP杭を用いた新たな設計法を公認化した¹²⁻¹⁵⁾。

本製品は室蘭港入江地区岸壁 (-8m) 耐震改良工事¹⁶⁾を始め、緩い砂地盤の液状化対策として既に採用されており、今回の東日本大震災において広域にわたり発生した液状化への対応として、また、今後予想される大型地震発生時の防災に向けての適用が始まっている^{17,18)}。

3.2 肥料・土壌改良用途 (高炉・製鋼スラグ)

図2に示した2010年度の鉄鋼スラグの用途別利用量において、農業向けの肥料・土壌改良用途は、高炉・製鋼スラグを合わせて年間約20万トンで、総利用量の約0.5%に留まる。ここで肥料としての鉄鋼スラグ利用の歴史を振り返ると、戦後の深刻な食料危機に対し国をあげての食料増産が至上命令とされ、1950年からケイ酸石灰の一つとして高炉徐冷スラグの施肥による老朽化水田での多収穫試験が実施され、①ケイ酸が水稻の葉や茎の表面に沈積し病原菌や害虫の侵入を防ぎ、②葉を直立させ受光態勢をよくするため光合成を促進する、という増収効果が明らかにされた¹⁹⁾。以後、1955年には、農林省が世界で初めてケイ酸肥料を公定肥料に認定、肥料取締り法の改正時に高炉スラグが普通肥料に位置づけられた。1960年半ばから近年に至るまでのケイ酸質肥料を主とした鉄鋼スラグ肥料の生産量を図5に示す²⁰⁾が、我が国の稲作生産量が1400万トンとピークであった1960年代後半は年間100万トンを出荷する時期もあった。その後の研究開発²¹⁾を通じて、1981年には転炉系の製鋼スラグも石灰系普通肥料としての認定を受け、新日鉄グループでは、ケイ酸質肥料 (高炉および製鋼スラグ)、石灰肥料 (製鋼スラグ) および鉄分を

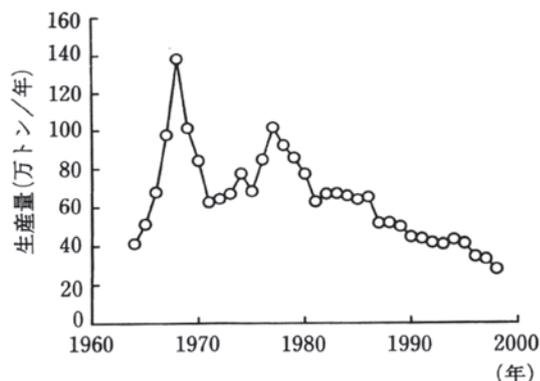


図5 ケイ酸質肥料の生産推移²⁰⁾ (協力: 博友社)

含む特殊肥料 (製鋼スラグ) の3種類 (表2、写真2) を製造し、農業協同組合殿等を通じて水田や畑用肥料として、各農業生産者へ販売供給している。とりわけ、製鋼スラグはカルシウム、マグネシア、ケイ酸以外に、酸化鉄やマンガン等多くの微量元素を含み、またカルシウム起因の即効的なアルカリ分とケイ酸カルシウムによる緩効ながら持続的なアルカリ分を供給でき、他の苦土石灰や消石灰といった普通肥料に比べて酸性土壌の改良効果が持続する²²⁾。

ここ数年、野菜作物の連作に伴い、カビが原因でアブラナ科植物 (白菜やキャベツ等) の根がこぶ状となる病原菌被害が問題となっている。東京農業大学の後藤教授らによって、この根こぶ病に対し持続的なアルカリ供給と欠乏する微量元素をバランスよく供給できる対策資材^{23,24)}として、製鋼スラグ肥料を用いた評価試験²⁵⁾が進められた。詳細は、後藤教授の連携記事 (本誌554ページ) をご参照頂きたいが、このような製鋼スラグ固有の複合効果を今後も探索し、食糧自給率向上を目指しながらも原料高騰による肥料価格上昇に苦しむ農産業の活性化に貢献できれば、と考える。

新日鉄ではさらに、地球温暖化抑制の視点からも鉄鋼スラグ肥料を活用した研究開発を千葉大学の犬伏教授と共同で進めている。CO₂よりも強力な温室効果ガスであるメタンは還元的な水田土壌で発生する。東南アジアは亜熱帯気候を活用して米の3期作が行われる世界でも主要な米生産地であるが、この水田への製鋼スラグ肥料施肥による水稻収穫やメタン発生量への影響に関してはこれまで調査されていなかった。そこで一例として、千葉大学やベトナム各大学と共同で、ベトナム国内の7カ所の水田で製鋼スラグ施肥による効果や影響を把握する試験を実施中²⁶⁾である。これまで17作のう

表2 鉄鋼スラグ肥料の特性¹⁾

(ケイカル肥料) (高炉スラグ利用)	(転炉石灰肥料) (製鋼スラグ利用)
珪酸による丈夫な稲づくり ・葉の受光態勢が向上し、光合成が促進する ・根の活力が旺盛になり、下葉の枯れ上りを抑える ・茎が丈夫になり、倒伏を防ぐ ・葉の表皮にケイ化細胞ができ、いもち病を防ぐ 乾物生産が旺盛 ・生育中期 もみ生産効率の向上 (もみ数の増加) ・生育後期 登熟の向上 (千粒量の増加) 収量・外観品質・食味の向上 ・もみ数と千粒量の増加で増収 ・外観品質の向上で一等米比率が増加 ・登熟の向上で食味が良くなる	水田 ・珪酸・マンガンにより根に活力を与える ・珪酸・石灰・リン酸・苦土により丈夫な稲を作る ・鉄分欠乏土壌の改良 (根腐れ・コマ糞枯れ・秋落田) に効果的 畑 ・珪酸・酸化鉄・石灰をはじめ、苦土・リン酸・マンガン・ホウ素などの作物が必要とする沢山の肥料成分をバランスよく含んだ総合的土づくり肥料 ・酸性・老朽土壌の改良に役立ち、電基を増やすだけでなく有機物の分解を促進しバランスの良い土づくりが可能



写真2 鉄鋼スラグ肥料製品の外観

ち14作で稲の増収効果が、また11作でメタン発生量の減少が見られ、有効性が確認されつつある。

3.3 安全面からの環境基準への適合

環境基本法の中で各種の環境基準が、行政上の政策目標として設定されており、従来の陸域での鉄鋼スラグ製品の使用においては、土壤環境基準（環境省告示第46号）に基づく各種元素の含有・溶出の適合性で安全性を評価・確認している。鉄鋼スラグ製品の多くはその品質がJIS化され有効活用されてきたが、環境安全面での品質基準に係る規格はなかったことから、2005年に制定された「スラグ類の化学物質試験方法JIS K 0058（環境JIS）」に準じて、現在、各鉄鋼スラグ製品のJISへ環境項目を織り込む追加改正に取り組んでいる³⁾とされており、厳格化する環境基準に適合できる鉄鋼スラグ製品の製造技術の改善、ならびに出荷に向けた品質管理の厳格化を図っている。

4 鉄鋼スラグの利用開発状況（2） 新規用途

前章で述べたように、我が国における鉄鋼スラグ利用の技術開発は、土木分野（港湾を含む陸上）への活用を中心に総合的に取り組まれてきた。しかし、公共事業も含め建設投資が減少傾向にある中、厳格化する環境変化にも対応しながら鉄鋼スラグの有効活用を継続していくには、社会のニーズを先読みした需要を創出していくことが肝要である。

四方を海に囲まれた我が国において、海域への鉄鋼スラグの利用は古くから試みられ、新日鉄でも1970年台後半に魚貝類供給増大を国策として進める「沿岸漁場整備開発事業」を狙い、魚礁としての製鋼スラグ大塊や中塊の利用可能性に関する実地試験や、養殖漁場の底質改良（硫化水素固定）への含鉄スラグの効果についての探索試験を実施²⁷⁾している。

その後、1993年から5年間、(財) 沿岸開発技術研究センターと鉄鋼スラグ協会が「製鋼スラグの覆砂活用技術研究委員会」を設立して、有効性確認や実用化への課題抽出の取り組みも行われた²⁸⁾。その結果、製鋼スラグからの有害物質含有・溶出に関する問題はなく、逆に底質や水質への改善効果等が確認されたものの、即効的なアルカリ溶出に伴う白濁発生（水酸化マグネシウム析出）という物理現象抑制への課題が抽出された。

一方、同時期に我が国沿岸では、閉鎖性海域における赤潮や青潮の発生をもたらす「富栄養化」と、北海道の日本海側

沿岸を中心とした磯焼けとも呼ばれる有用藻場減少の原因の一つに考えられる「貧栄養化」という、相反する二つの環境問題が顕在化していた。そこで新日鉄では、覆砂材への鉄鋼スラグ単体利用の技術的難度を鑑みつつ、材料的課題と海域環境問題とを克服するための幾つかの研究開発に着手した。

4.1 鉄鋼スラグ水和固化体

高炉水砕スラグは、港湾工事中用裏込材や地盤改良用SCP材として大量に利用され、周辺海域への影響もないことが認知されていることから、この微粉材をコンクリートのセメント結合材相当に、また転炉系製鋼スラグを骨材相当に利用し、砂利や砂といった天然骨材を全く使用しないオールリサイクル材からなる環境負荷の少ないコンクリート代替品を目指したものが鉄鋼スラグ水和固化体である²⁹⁾。必要に応じて硬化促進のためのアルカリ刺激材を添加し、これらを水と混合することでコンクリートと同様に施工でき、型枠を用いた無筋コンクリートブロック代替品や、塊状に破碎した人工石材等の自由な形状の製品製造が可能（写真3）である。主な結合材が高炉スラグ微粉末であり、塊成化による被表面積低減と相まって海水へのアルカリ成分溶出が少なくpH上昇が抑制できる。主要な用途として、裏込め石・傾斜護岸材・被覆石等に用いられる天然石の代替製品「フロンティアロック®」や「フロンティアストーン®」*1、および原料である鉄鋼スラグにケイ酸や鉄分が含まれるため藻類や水底生物が付着しやすいという特徴を生かした藻場造成用製品「ビバリー®ブロック」「ビバリー®ロック」*2を揃えている。

前者は、準硬石の割ぐり石（JIS A5006）と同等の品質を有する製品として、2007年度に（財）沿岸技術研究センター港湾関連民間技術の確認審査・評価（第07001号）を受け³⁰⁾、2008年度にはグリーン購入法の特定調達品目に指定された。その後、海中への投入のみで液状化や沈下を起こさない地盤が形成できる特長が認められ、国土交通省から東京国際空港



写真3 鉄鋼スラグ水和固化体製品の外観

*1 「フロンティアロック®」「フロンティアストーン®」は、JFEスチール（株）と新日鉄の共同研究成果である。

*2 製品名「ビバリー®」は英語のビバリウム（Vivarium）；（自然の状態を保つようにした）植物栽培所・動物飼養所、に由来する。

D滑走路建設外工事の中仕切り堤等に約100万トンが採用³¹⁾され(図6)、省エネ型の材料として2009年度の国土技術開発賞優秀賞を受賞した。また、後者の藻場造成用材料としての適用例として、2007年に三重県の三浦湾に漁礁を造成したものを図7に示す。設置から3ヶ月後には一面にフクロノリが着生しイシモチの群れも見られ、翌年以降は植生がマグサヤホンダワラに変化していることも確認できている。

さらに、この水和固化という特性の陸上用途への応用として、従来のアスファルト舗装に代わる安価で簡易な舗装材料の開発も進めている。これは、製鋼スラグと高炉水砕スラグ混合材を主原料としたものを敷き均し、散水しながらローラーで押し固める舗装工法で、林道や農道、駐車場等に十分な強度が確保できる簡易舗装材(カタマ[®]SP)として、2010年には大分県リサイクル製品にも認定³²⁾され、徐々に適用が拡大している。本工法は、舗装面道路の法面や太陽光発電敷地の除草といった副次的な効果も期待される。

4.2 藻場造成用鉄分供給材

1970年代以降、我が国の沿岸域において藻場が大規模に消失する「磯焼け」と呼ばれる現象が全国各地で発生³³⁾し、水産業に多大な影響を及ぼしている。磯焼けとは、浅海の岩礁・転石域において、海藻の群落(藻場)が季節的消長や多少の経年変化の範囲を越えて著しく衰退、消失して貧植生状態となる現象と定義され³⁴⁾、その原因としては温暖化に伴う高水温・貧栄養(気象変化)や藻食動物の摂餌圧増大(生物相変化)、河川改修や護岸整備に伴う河川を介した栄養供給が阻害された結果としての海水性質の変化(人間活動の関与)等が複合的に影響を及ぼしていると言われている。

東京大学の定方名誉教授はこの海水の貧栄養化、特に鉄濃

度不足の仮説³⁵⁾に興味を持ち、山林保全³⁶⁾や護岸改造といった自然界の治癒(体質改善)までのつなぎの技術(対処療法)として、鉄分を含む栄養塩の供給も必要と考え、藻類が摂取容易な鉄イオンの供給源として製鋼スラグに着目した。2002年から検討を開始した結果、前述の製鋼スラグを海水に投入した場合のアルカリ溶出に起因する白濁現象の抑制課題について、新日鉄が同時期にこの問題を克服できるスラグ安定化(炭酸化)処理の開発に目処を得た³⁷⁾ことも相まって、東京大学、(株)エコ・グリーンおよび西松建設と新日鉄間で製鋼スラグ等を用いた海域への鉄分供給技術の共同開発を開始するに至った。

北海道増毛漁業協同組合と(株)渋谷潜水工業の理解と協力も得て、2004年秋に増毛町舎熊海岸にて実海域試験を実施した。試験に用いた鉄分供給ユニット(ピバリー[®]ユニット)は廃木材チップを発酵させた人工腐植土と炭酸化処理した転炉系製鋼スラグを混合したもの(写真4)であり、製鋼スラグから溶出する2価鉄イオンを人工腐植土中の腐植酸(有機酸)でキレート(錯体)化し、海水中で鉄イオンとして供給する機能を有する。これを透水性のヤシ袋に詰め、海岸の汀線に約6トン埋設した(写真5)。写真6に示すように、試験前の同海岸の海底は汀線から沖合50mまで玉石の大部分が白色の無節サンゴモ(石灰藻とも呼ばれる海藻の一種)に覆われ有用な藻類は消失していた。しかし試験開始から約8ヶ月が経過した2005年5月に汀線から沖合に向けた海底観察を実施したところ、かつてこの海域に生息していたホソメコンブ群落の着生・繁茂が確認³⁸⁻⁴¹⁾された。(写真7)この効果の持続性を確認するため、今日に至るまで、毎年定点観測を実施⁴²⁾しており、7年が経過した2011年もコンブ場が持続していることを確認⁴³⁾している。

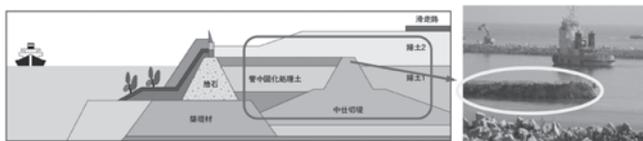


図6 羽田空港D滑走路建設外工事への適用事例³¹⁾



写真4 鉄分供給ユニットの構成例

写真5 ユニット施工状況

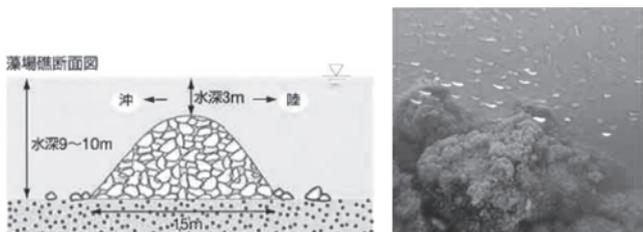


図7 三重県三浦湾での藻場礁築造事業概要



写真6 試験前海底



写真7 約8ヶ月後の状況

新日鉄は、この藻場繁殖が本当に鉄イオンの供給によるものか学術的な検討を北海道大学の本村教授とともに取り組み、コンブ生活環（一生のサイクル）において親コンブから放出された遊走子（種）が雌雄配偶体（卵と精子）に成熟する際に鉄が必要⁴⁴⁾であり、今回用いた鉄分供給ユニットからの抽出物にその効果があることを検証⁴⁵⁾（図8）できた。

また、実海域試験開始当初は困難であった海水中の鉄イオン濃度分析についても検討を重ね^{46,47)}、検出感度をppmからppb（10億分の1g）のオーダーまで高めることができ、この結果、約5ppb以上の鉄イオン濃度がコンブの受精・成長に必要なことや、実際に増毛海岸では鉄分供給ユニットの設置で汀線から沖合に向けて、その濃度の鉄分が供給されていること（図9）を確認できた。加えて、東京大学や産業総合技術研究所との共同研究を通じて、ユニットからの鉄イオン供給の持続性に及ぼす腐植物質の影響に関する基礎知見^{48,49)}も得られ、基本的な製品としての機能メカニズムを構築するに至っている。

さらに海域に本製品を施工するにあたり、関係各位が懸念される自然環境や生態系に対しての安全性についても最大の配慮が必要と考え、現地での各種測定に加え鉄鋼スラグ海域利用時の安全性や有用性に関する客観的なデータを収集す

るため、2009年には千葉県富津市の総合研究所に海域環境シミュレーション設備（通称；シーラボ、写真8）を開設⁵⁰⁾して各種の検討^{51,52)}を進めてきた。このような多岐に至るデータの蓄積⁵³⁾により、新日鉄の藻場造成製品であるピバリー®シリーズ（ユニットおよび前述のブロック、ロック）は、全国漁業協同組合連合会が制定する製品安全確認認証制度において安全性に関する製品認証を得るに至った。

以上の製品機能や安全性に関する検討・検証の取り組みを経て、増毛での最初の実証試験以降、各地の漁業関係者から本製品に関する問い合わせに対して、事前討議を通じて理解を頂いた上で試用販売・施工を行い、その数は日本各地で20数カ所⁴²⁾に及んでいる（図10）。

4.3 浚渫土砂改質材

前節の藻場造成技術開発と同時期の2004年から2007年にかけて、(社)日本鉄鋼連盟においても経済産業省の補助研究事業として「スラグ利用に係る研究開発」を受託、製鋼スラ

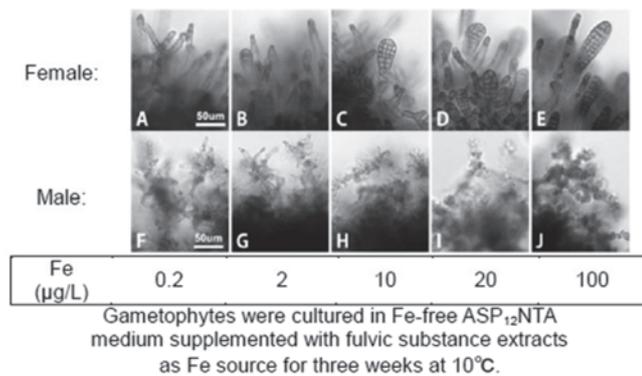


図8 コンブ配偶体の成熟に及ぼす鉄濃度の影響

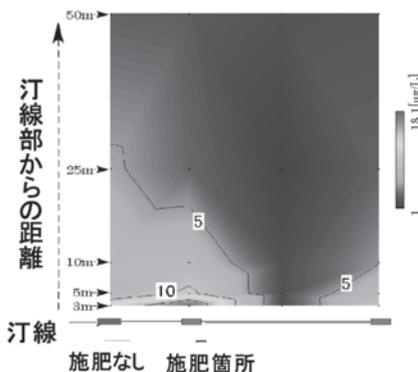


図9 増毛舎熊海岸における海水中微量鉄分布



写真8 総合技術センター シーラボ設備



図10 鉄分供給材料を用いた実海域での試用施工状況

グの海域利用時の環境への影響や環境改善効果に関する室内実験ならびに実海域実験が行われ、以下の成果が得られた。

4.3.1 安全に利用するための環境基準適合性について

(1) 海域利用時のpH抑制について

製鋼スラグからのアルカリ溶出は海水のpH上昇を誘発するため、海水に直接接する用途に適用するには対策を講じることが必要で、①鉄鋼スラグ水和固化体、②安定化处理（炭酸化や粉分を除く粒度調整等）および③浚渫粘性土との混合、等の方法が有効であることを確認。

(2) 重金属溶出に対する安全性について

鉄鋼スラグそのものは製鉄所での製造時に品質管理を行い、品質要求に対して土壌環境基準等を満足する製品として出荷されているが、底質の改善や浚渫土と混合して浅場造成や浚渫窪地の埋め戻しに適用する場合は、原位置の底質土壌や浚渫土からの含有物質の溶出増大も懸念された。そこで、各種の浚渫土と各社の製鋼スラグを混合した場合の溶出試験を実施し、環境基準等に対して悪影響がないことを確認。

4.3.2 富栄養化物質の発生抑制等、環境改善効果について

製鋼スラグから海水に溶出する適度のカルシウムイオンはリンを不溶化して吸着する特性や、硫酸還元菌の活性を阻害し海水中の硫化物濃度が低減するため硫化水素の発生を抑制する特性もあり、富栄養化している底質の改善に有効⁵⁴⁾。

4.3.3 軟弱な浚渫粘性土の強度改善効果について

前述のアルカリ抑制対策の一つである浚渫粘性土との混合処理時に、改質材からのCaや浚渫土のSiが溶出し水和物を生成することで改質後の材料強度が上昇することを確認。

このようにアルカリ溶出の適切な制御により製鋼スラグが安全かつ有効に適用できる可能性が確認され、これらの成果は「転炉系製鋼スラグ海域利用の手引」⁵⁵⁾として2008年に刊行された。本成果のうち、浚渫粘性土との混合処理⁵⁶⁾は、大型船舶の航行に必須な航路浚渫作業で定期的に発生する軟弱浚渫土に、製鋼スラグを原料として成分管理と粒度調整を施したカルシア系改質材を混合するもので、浚渫窪地の埋め戻し材等、富栄養化海域の水質環境修復へ活用できる有効な手段として「カルシア改質土」として製品化された。本製品はpH上昇抑制、リンや硫化物の発生抑制ならびに材料としての強度上昇という3つの特長を有する(図11)。

これまで材料特性確認のために進められた具体的な実海域への適用例としては、2007年に大阪府堺浜にて1200m³ (75m * 25m * 1m) のマウンドを造成する試験⁵⁵⁾や、2008年にカルシア改質土の強度特性や水質改善効果を実証するため東京

港の城南島における人工浅場 (910m³) の造成試験、等が挙げられる。後者は、環境省の2009年度「環境技術実証事業 (ETV事業)」へも応募し、本製品が浅場や干潟の造成に有用であることが環境省によって実証⁵⁷⁾されている。

さらに、2009年11月～2010年3月には、国土交通省関東地方整備局によって、比較的大規模な藻場造成を目的として、千葉県鋸南町保田海岸地先の1200mに及ぶ区間に鉄鋼スラグ水和固化体製人工石材や浚渫土固化体製人工石材 (水和固化体に浚渫土を4割程度混練したもの) が、比較的天然石材とともにそれぞれ200m×80mの区画に設置⁵⁸⁾された(図12)。ここで、東京湾で採掘された浚渫土砂とカルシア系改質材 (原料：製鋼スラグ) を混合したカルシア改質土は、洗屈防止用の底部のベッド材料として鉄鋼スラグ水和固化体製人工石材を設置する1区画の底質上に0.5mの厚さで施設された。それぞれの材料は洋上 (工船用船舶) で連続式ミキサにより混合され、ポンプで圧送の後、海水中に沈設したトレミー管により投入する方法で施工されている。この施工中に、材料の混合割合と強度発現の関係や海域への環境影響として施工前後のpHや濁度が調査され、設定した混合割合で

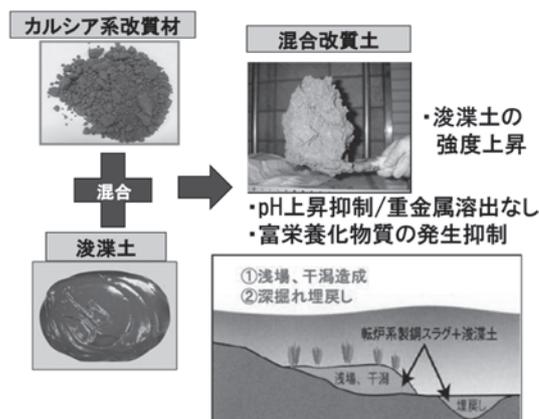


図11 カルシア改質土の概要および特徴

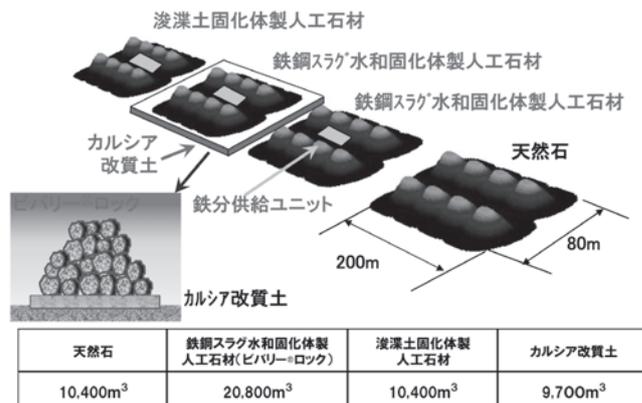


図12 東京湾鋸南町 (保田海岸) での適用事例

必要強度の発現（確保）や、pHや濁度に影響が無いことが確認された。施工の後1年が経過した2011年夏には藻場礁の観察が行われ、基質の違いによる藻類生育への影響の定量的評価には至らないが、総じて良好な藻場が形成され、魚介が増集し始めていることが確認されている。

先のビバリー®シリーズを用いた磯焼け海域での藻場造成（再生）や、このような水和固化体製人工石材やカルシア改質土を用いた新たな藻場の造成は、海域水質の環境改善や沿岸漁業活性化に留まらず、地球環境改善として温暖化抑制の一助にもなる。藻類も光合成によって成長を行っており、陸上の樹木と比べて幹を形成する必要がないことから成長速度が早く、この間のCO₂固定速度は陸上植物よりも10倍程度大きい、という報告⁵⁹⁾がある。

また、これらの藻類からバイオマス（バイオエタノール）を抽出する研究開発も複数の大学で取り組まれており、再生利用可能エネルギー源としての可能性も注目され始めている。

新日鉄は、横浜国立大学の宮脇名誉教授のご指導により、会社発足直後の1971年から40年にわたって全製鉄所において社員の植樹による「郷土の森づくり」を続けているが、この藻場造成による「海の森づくり」についても、今後地道に取り組んでいく所存である。

5 東日本大震災の復旧支援への鉄鋼スラグ適用性

2011年3月11日に発生した東日本大震災は、地震のみならずその後発生した津波によって広域な地域に甚大な被害

をもたらした。1年が経過した現在においても、瓦礫処理はスムーズには進まず、復旧・復興には膨大な月日と労力が必要と考えられる。今後、市街のみならず港湾や道路、同じ惨劇を繰り返さないための防災に向けた海岸林や防潮堤といったインフラの整備や液状化対策には大量の地盤材料が必要と考えられる。（社）日本鉄鋼連盟は、被災地の復旧・復興に向けて業界が有する防災・減災対策に有効な技術・工法について行政等への提案活動を進めており、新日鉄も鉄鋼スラグ協会とともに1日も早い復旧・復興に向け、本稿で述べた様々な鉄鋼スラグ製品の提案⁶⁰⁾（図13）や実行支援を進めている。以下、これまでの鉄鋼スラグ利用開発の成果の適用として取り組みが進んでいる具体例を紹介する。

5.1 津波堆積土砂の改質への適用

2011年7月に環境省から公表された「東日本大震災津波堆積物処理指針」⁶¹⁾に基づけば、津波被害によって被災6県で発生した災害廃棄物量（大型瓦礫等）は約2300万トン程度、瓦礫等が混然一体となった土砂・ヘドロ状物（津波堆積物）は約1300～2800万トンと推計されている。震災から約1年が経過した現在では、一次撤去された大型の瓦礫類はほぼ各県沿岸市町村の仮置き場へ搬入されたが、津波堆積土砂は未だに木くず・コンクリートくず等を含んだ状態で大量に存在する。これらの津波堆積土砂は腐敗や乾燥により悪臭や粉塵発生が懸念されたため、震災発生直後の2011年4月には、復旧・復興および公衆衛生環境の確保等の観点から、緊急的除去が必要な場合に関する、「津波がもたらしたヘドロへの対応について」が国立環境研究所の取り纏めで公表⁶²⁾された。

新日鉄ではその後、この津波堆積土の改質に関する技術開



図13 震災復旧への鉄鋼スラグ製品の提案例⁶⁰⁾

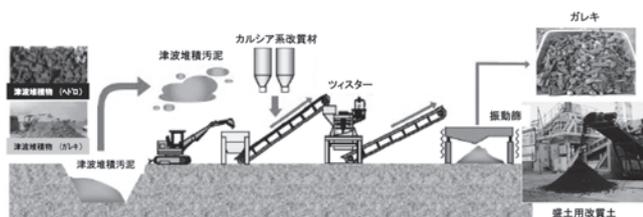


図14 回転式破碎混合工法とカルシウム系改質材による堆積土処理

発を新日鉄エンジニアリング(株)と共同で進めてきた。これは瓦礫等が混ざった軟弱な泥土である津波堆積土に、製鋼スラグからなるカルシウム系改質材を加え、回転式破碎混合工法でこれらを攪拌混合して瓦礫類を取り除き、建設資材として十分な強度を持つ良質な土に再生(図14)するものである。

この改質した津波堆積土は、港湾設備の埋戻材料や道路の盛土材料等に広く有効利用が可能と評価され、今年1月には国土交通省の仙台港岸壁災害復旧工事の地盤かさ上げ用の路床材として試験活用される⁶³⁾ことになった。新日鉄グループは、今回の災害復旧工事での活用を機に、国や自治体へ復興資材としての活用を広く働きかけていく方針である。

5.2 津波被災農地の除塩用途への適用

東日本大震災の津波により、流失や冠水等の被害を受けた農地面積は水田と畑を合わせて約2.3万ha、被災6県の耕地面積の約3%に達すると推定されており、被災農地の除塩対策が進められているも、被災農地表面には数10cmの津波土砂が堆積しており、農水省の除塩マニュアル⁶⁴⁾によればこの土砂を除去・処分することが基本となっているため、具体的な除塩措置はなかなか普及していない。東京農業大学の後藤教授は、除塩促進と同時に土壌酸性化対策に必要な石灰資材として転炉系製鋼スラグ(副産石灰質肥料)を推奨され、東北の各地で各種製鋼スラグ肥料を用いた具体的な除塩試験⁶⁵⁾を進められている。

6 まとめ

以上、種々の鉄鋼スラグ製品の概要について紹介したが、今後も「広く社会に需要される土木工用・環境用資材」を目指し、持続的な技術開発や市場開拓を行っていく。

参考文献

- 1) 環境資材 鉄鋼スラグ, 鉄鋼スラグ協会, (2010)
- 2) 藤原稔: 第44・45回白石記念講座, 日本鉄鋼協会編, (2001), 1.
- 3) 中川雅夫: 第205・206回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協

会編, (2011), 27.

- 4) 鉄鋼スラグの高炉セメントへの利用(平成23年版), 鉄鋼スラグ協会, (2011)
- 5) 道路用鉄鋼スラグ(JIS A5015), 日本規格協会, (1992)
- 6) 野村高照, 榎戸恒夫, 鈴木章平, 徳永良邦, 稲山邦彦: 製鉄研究, 301(1980), 19.
- 7) 高野良広, 赤司有三, 真沢正人, 片桐建嗣, 竹田重三, 松井淳: 新日鉄技報, 376(2002), 45.
- 8) 地域に根ざしたりサイクル資材 電気炉スラグ, 鉄鋼スラグ協会, (2011), 24.
- 9) 土工用水砕スラグ(平成23年), 鉄鋼スラグ協会, (2011)
- 10) 宮島正悟, 足立昭宏, 濱本晃一, 戸川准一, 遠山俊一, 山中量一: 土木学会第53回年次学術講演会, III-A112(1998), 222.
- 11) 港湾工用製鋼スラグ利用手引書, (財)沿岸開発技術センター・鉄鋼スラグ協会, (2000)
- 12) 水硬性スラグコンパクション材料(エコガイアストーン), 港湾関連民間技術の確認審査・評価報告書, (財)沿岸技術研究センター, 第10001号(2010)
- 13) 高橋英紀, 森川嘉之, 篠崎晴彦, 木下洋樹, 丸山憲治: 地盤工学ジャーナル, 6(2011)1, 81.
- 14) 木下洋樹, 一井康二, 土田孝, 森川嘉之, 高橋英紀, 篠崎晴彦, 丸山憲治, 高橋裕徳: 広島大学大学院工学研究科研究報告, 59(2010)1.
- 15) 木下洋樹, 一井康二, 森川嘉之, 高橋英紀, 篠崎晴彦, 高橋裕徳: 地盤工学ジャーナル, 7(2012)1, 323.
- 16) 岩崎幹平, 大沢佳宏, 松本一城: 国土交通省 国土技術研究会報告, (2008), 178.
- 17) 国土交通省, NETIS震災復旧・復興支援サイト, <http://www.s-netis.mlit.go.jp/> (エコガイアストーンで検索)
- 18) 北の技術情報誌「Hint!」, 北海道開発局, 18(2012), 2.
- 19) 太田道雄: 鉦さいの肥料学的利用に関する研究, 風間書房, (1964)
- 20) 学会シンポジウムシリーズ「ケイ酸と作物生産」, 日本土壌肥料学会, 博友社, (2002), 120.
- 21) 倉辺喜一郎, 押切亮平: 製鉄研究, 302(1980), 70.
- 22) くみあいミネカル(転炉さい)の農業技術解説, 産業振興(株), (1987)
- 23) 村上圭一, 篠田英史, 丸田里江, 後藤逸男: 日本土壌肥料学雑誌, 75(2004), 53.
- 24) 後藤逸男, 村上圭一: 根こぶ病 土壌病害から見直す土作り, 農文協, (2006)
- 25) 後藤逸男: 製鋼スラグの新機能探索と海洋環境での利用技術開発シンポジウム, 日本鉄鋼協会編, (2011), 22.
- 26) K.Ito, K.Endoh, K.Inubushi, N.H.Thanh, T.T.L.Ha,

- P.Q.Ha, V.Thang, P.T.Cong, N.T.Quynh and T.K.Tihn : 日本土壤肥料学会つくば大会, (2011)
- 27) 成松陽明, 宿谷巖 : 製鉄研究, 302 (1980) , 75.
- 28) 平成7・8年度 製鋼スラグの覆砂材としての適用技術の調査・研究報告書, (財) 沿岸開発技術研究センター, (1997)
- 29) 鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアルー製鋼スラグの有効利用技術 (改訂版) ー, (財) 沿岸技術研究センター, 沿岸技術ライブラリー, 28 (2008)
- 30) 港湾関連民間技術の確認審査・評価報告書第07001号, 鉄鋼スラグ水和固化体製人工石材, (財) 沿岸技術研究センター, (2007)
- 31) 鉄鋼スラグニュース, 鉄鋼スラグ協会, (2010)
- 32) 大分県:パンフレット「大分県リサイクル製品認定制度」, <http://www.pref.oita.jp/soshiki/13020/katamasp.html>
- 33) 藤田大助, 堀輝三, 大野正夫, 堀口健雄 : 21世紀初頭の藻学の現況, 日本藻類学会編, (2002) , 102.
- 34) 磯焼け対策ガイドライン, 水産庁編, (社) 全国漁港漁場協会, (2007)
- 35) 松永勝彦 : 水環境学会誌, 26 (2003) 10, 614.
- 36) 畠山重篤 : 水環境学会誌, 26 (2003) 10, 630.
- 37) 堤直人, 田中誠, 田崎智晶, 天田克己, 久末治, 山本充, 山田祐輝, 遠藤公一 : 新日鉄技報, 388 (2008) , 107.
- 38) M.Yamamoto, N.Hamasuna, M.Fukushima, S.Okita, S.Horiya, E.Kiso, M.Shibuya and M.Sadakata : J. Jpn. Inst. Energy, 85 (2006) , 971.
- 39) 木曾英滋, 堤直人, 渋谷正信, 中川雅夫 : 第20回海洋工学シンポジウム, 日本海洋工学会・日本船舶海洋工学会, (2008)
- 40) 加藤敏朗, 相本道宏, 三木理, 中川雅夫 : 第20回海洋工学シンポジウム, 日本海洋工学会・日本船舶海洋工学会, (2008)
- 41) 堤直人, 加藤敏朗, 本村泰三, 中川雅夫 : 第20回海洋工学シンポジウム, 日本海洋工学会・日本船舶海洋工学会, (2008)
- 42) 堤直人 : 平成22年度磯焼け対策全国協議会, 水産庁, (2010)
- 43) 加藤敏朗 : 平成23年度磯焼け対策全国協議会, 水産庁, (2011)
- 44) T.Motomura and Y.Sakai : Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries, 47 (1981) 12, 1535.
- 45) 植木知佳, 本村泰三, 加藤敏朗 : 第21回日本水産学会講演大会, (2010)
- 46) 相本道宏 : 海洋化学研究, 22 (2009) 1, 19.
- 47) 相本道宏, 加藤敏朗, 木曾英滋, 堤直人, 三木理 : 新日鉄技報, 390 (2010) , 89.
- 48) 山本光夫, 福嶋正巳, 劉丹 : 鉄と鋼, 97 (2011) 3, 61.
- 49) 駒井武, 川辺能成, 原淳子, 大塚敬嗣 : Journal of the Japan Institute of Energy, 90 (2011) , 449.
- 50) 藤本健一郎, 加藤敏朗, 植木知佳, 堤直人 : 新日鉄技報, 391 (2011) , 206.
- 51) 植木知佳, 加藤敏朗, 三木理 : 海洋理工学会誌, 17 (2011) 1, 49.
- 52) 植木知佳, 熊谷敬之, 藤田大助 : 海洋深層水利用学会, (2012) , 受理済.
- 53) 加藤敏朗, 植木知佳, 三木理 : 平成22年度日本水産学会春期大会, (2010)
- 54) 三木理, 加藤敏朗, 堤直人 : 水環境学会誌, 32 (2009) 1, 33.
- 55) 転炉系製鋼スラグ 海域利用の手引き, 日本鉄鋼連盟, (2008)
- 56) 転炉系製鋼スラグ 海域利用の手引き 別冊 転炉系製鋼スラグと浚渫土との混合改質工法 技術資料, 日本鉄鋼連盟, (2008)
- 57) 閉鎖性海域における水環境改善技術 実証試験結果報告書 (平成21年度), 港湾空間高度化研究センター, (2010)
- 58) 田口博文, 永留健, 高石謙介, 森川正仁 : 第7回地盤工学会関東支部発表会, (2010)
- 59) 伊藤靖, 中野喜央, 松下訓, 三上信雄, 横山純, 桐原慎二, 能登谷正浩 : 水産工学, 46 (2009) 2, 135.
- 60) パンフレット「鉄鋼スラグ製品のご提案」, 鉄鋼スラグ協会・(社) 日本鉄鋼連盟, (2011)
- 61) 東日本大震災津波堆積物処理指針, 環境省, (2011) <http://www.env.go.jp/jishin/attach/sisin110713.pdf>
- 62) 津波がもたらしたヘドロへの対応について (第二報), 国立環境研究所, (2011) <http://www.nies.go.jp/shinsai/index.html> http://www.nies.go.jp/shinsai/tsunami_sdm2_110406v2.pdf
- 63) プレスリリース「新日鉄グループが改質した津波堆積土が災害復旧工事に活用」, 新日本製鐵 (株), (2012) http://www.nsc.co.jp/CGI/news/0/whatsnew_detail.cgi?section=0&seq=00021122
- 64) 農地の除塩マニュアル, 農水省農村振興局, (2011) <http://www.maff.go.jp/j/press/nousin/sekkei/pdf/110624-01.pdf>
- 65) 後藤逸男, 稲垣開生 : 日本農学アカデミー, 16 (2011) , 109.

(2012年5月14日受付)

連携記事

高炉水砕スラグを用いた空洞充填材「スマートグラウト®」

SMART GROUT : Filler for Underground Cavities Using Granulated Blast Furnace Slag

林 正宏 JFEスチール(株)スチール研究所
 土木・建築研究部
 Masahiro Hayashi 主任研究員

1 はじめに

軟弱地盤の圧密沈下や地震による地盤の液状化によって、地盤と建築物基礎や道路との間に空洞が生じることがある。空洞は、地面の陥没や構造物の傾斜といった被害の原因となるため、従来は砂やセメント系固化材を主材料とした充填材の注入による埋戻しが行われている¹⁾。基礎スラブなどに注入孔を設けて充填材を注入する施工は、大規模な掘削を伴うことなく修復することができるという利点を有する。しかし、コストの削減や環境影響の観点から、新しい材料が求められている。そこで、この埋戻し材の主原料に鉄鋼スラグの一つ、高炉水砕スラグの適用性を検討し、空洞充填材「スマートグラウト®」を開発した。

高炉水砕スラグは、天然の砂とほぼ同じ粒度分布であるため、充填材の骨材の代替となる。また、アルカリなどの刺激作用によって水と反応して水和物を生成する潜在水硬性を有しているため、セメントの配合量を低減することができ、環境負荷やコストの低減が期待できる。

本稿では、スマートグラウト®の性能、現場での適用性について述べる。

2 空洞充填材の要求性能

スマートグラウト®は、図1に示すように、基礎スラブなどに注入孔を設け、空洞部に注入していく方法で施工される。このような基礎下などに生じた空洞への充填材料には、以下の性能が要求される。

- ①空洞を隙間なく充填できる流動性
 - ②地盤と同等の強度
 - ③空洞に地下水が存在する場合を想定した水中施工性
- 流動性が良いと、空洞を隙間なく充填ことができ、また、充填材の混練プラントから空洞部までの距離が離れてい

る場合に、延長された圧送ホース内をスムーズに流すことができる。流動性は、フロー試験のフロー値により確認する。フロー値は、充填材を入れたシリンダーを静かに引き上げたときの拡がり具合を計測した値である(図2)。

充填材による修復は、設計の考え方により要求される強度が異なるが、基礎下などに用いられる充填材は、地盤と同等以上の強度とする場合が多い。これは、現地盤と同等の材料があれば修復として十分であることと、充填材が基礎杭へ付着しないようにするためである。一般に、充填材の強度と杭との付着は比例関係であるため、充填材の強度が大きくな

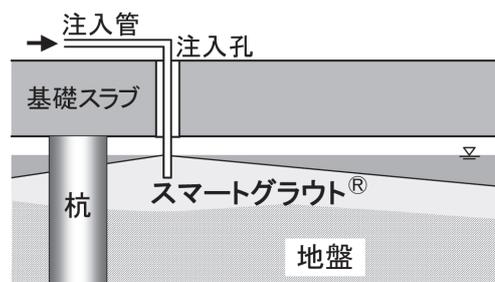


図1 スマートグラウト®の施工

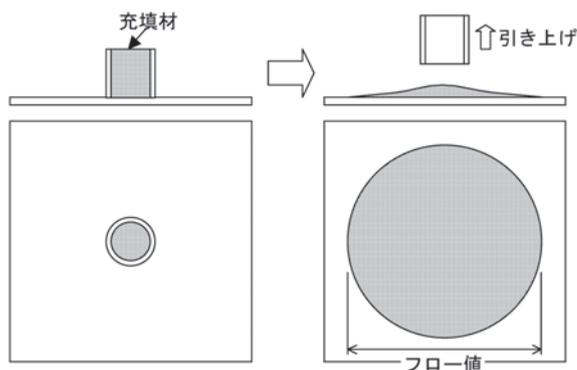


図2 フロー試験

ると付着強度も大きくなり、充填材は基礎杭へ付着してしまう。充填材が基礎杭へ付着した場合、さらなる沈下が発生して充填材と地盤との間に空洞ができると、掘削が困難となり修復ができなくなることがある。さらに、基礎杭へ付加的な荷重が作用し、杭の支持力や杭体に発生する応力を再検討する必要がある。よって、充填材は地盤の沈下に追随する方がよく、その他の埋設管などへ影響を与えないためにも、地盤と同等の強度であることが望ましい。

圧密沈下や液状化が生じやすい場所は、地下水位が地表に近いことが多い。空洞部は地下水で満たされることを考慮して、充填材は水中で材料が分離しないことと、水以上の重量を有することが必要である。

既存技術であるマイクロサンドエアモルタル²⁾の要求性能を参考に、スマートグラウト®の要求性能と品質確認項目を表1のように設定し、室内試験により配合を検討した。

3 室内試験による配合検討

配合に使用した材料は、骨材としての高炉水砕スラグ（粒径5mm以下に粒度調整、写真1）、固化材としての高炉セメント（B種）、材料分離の低減材としてのベントナイト、軽量化による施工性向上のための起泡剤、および水とした。図3に今回の実験で使用した高炉水砕スラグの粒度分布と、コンクリート標準示方書に規定される細骨材の粒度の標準³⁾を示

す。高炉水砕スラグは、細骨材である砂と似通った粒度分布であることがわかる。しかしながら、高炉水砕スラグは、一般に砂と比べると粒が角張っているため、モルタルとしたときに個々の材料が分離してしまう傾向がある。そこで、材料分離を防ぐためにベントナイトを用いることとした。ベントナイトは粘土鉱物であるので、充填材の粘性を増加させてしまうため、流動性を増すためには起泡剤により生成される気泡を混入し、注入ホース内でもスムーズに圧送ができるようにした。

表2に主な配合試験結果を示す。ここで、配合No.1、2は、既存の基礎下空洞充填材の配合^{1,2)}を参考に、骨材を高炉水砕スラグに置き換えたものとした。配合No.3、4は配合No.1、2の試験結果から高炉セメント、起泡剤の配合量を調整したものとした。試験の結果、配合No.3がフロー値やブリージング率など総合的に見て目標値を満足したため、この配合を基本配合とした。

4 施工性の検証

4.1 流動性の確認

スマートグラウト®の流動性を確認するため、水槽に地下空洞を模擬したモデルを作成し、スマートグラウト®を流し込む可視化試験を実施した。水槽は幅300mm×高さ300mm×長さ1,200mmで、底部に空洞として50mmの隙間を設け、地

表1 スマートグラウト®の要求性能と品質確認

項目	要求性能	品質確認項目	目標値	
①	流動性	隙間なく充填かつ長距離圧送可能	フロー値	210mm 以上
②	材料強度	地盤と同等の強度、杭に付着無し	一軸圧縮強さ	0.1N/mm ² 以上(28日養生)
③	水中施工性	材料分離をすることなく施工可能	ブリージング率	5%以下
		水面に浮遊せず、充填可能	単位体積重量	1.0g/cm ³ 以上



写真1 高炉水砕スラグ

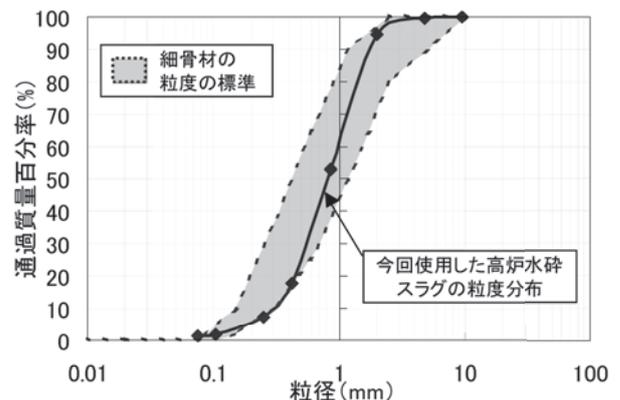


図3 高炉水砕スラグの粒度分布の例

盤を想定して珪砂を敷き詰めた。写真2に示すように、No.3の配合で作製されたスマートグラウト®を左側から注入すると、空洞部は隙間なく充填され、流動性に優れていることを確認した。

4.2 混練後の経過時間と流動性の関係

現地施工では、混練プラントから注入現場まで距離がある場合、混練後すぐに注入できないこともある。そこで、配合No.3について、経時的な流動性の変化を確認するため、混練後に時間をおいてフロー試験を実施した。フロー値の時間変化を写真3に示す。混練直後のフロー値は268mmであったが、150分経過後に実施したフロー試験では180mmまで低下していた。スマートグラウト®は、高炉セメントを使用しているため、混練後、水和反応が進み、時間の経過に伴い流動性が低下する様子が見られた。

配合No.3で気泡を混合しない条件となるが、混練後に攪拌を継続した場合と攪拌を行わない場合とでのフロー値の比較を実施した(図4)。攪拌を行わない場合のフロー値は、混練後の時間の経過と共に低下するが、攪拌を継続した場合には、混練後120分までフロー値が低下しないことを確認した。これにより、現地施工では、アジテート車により練り返しを続けながら輸送し、現地で気泡混合すれば、混練直後の流動性を保った状態で施工することができる。

4.3 実機プラントを用いた施工試験

実機プラントを用いた施工試験を実施し、スマートグラウト®の圧送性、および水中施工性を確認した。図5に施工プラントの配置、図6に施工手順、写真4に施工プラントの概観を示す。施工は、各材料をミキサーに投入・混練してモルタル状とし、ポンプで圧送する。途中、モーター付きのラインミキサーを用いて、モルタルと気泡を混合し、注入現場まで圧送する。ラインミキサーを設置することで、気泡が効率よく混ざり、最大200mの圧送を可能とした。強度なども室内

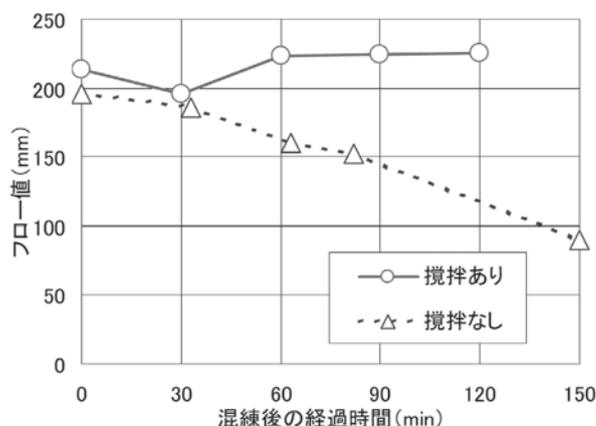


図4 フロー値の経時変化

表2 配合試験結果

配合No.	室内配合 (kg/m³)					試験結果				
	高炉水砕スラグ	高炉セメント	ベントナイト	起泡剤	水	フロー値 (mm)	ブリージング率(%)	単位体積重量 (g/cm³)	一軸圧縮強さ (N/mm²) 7日養生	28日養生
1	958	107	18	0.63	353	218	6.3	1.477	0.114	0.269
2	689	77	26	0.50	510	344	21.6	1.713	0.125	0.403
3	705	46	46	0.50	507	244	0.4	1.333	0.055	0.229
4	622	34.5	34.5	1.00	346	211	0.0	1.011	0.026	0.069

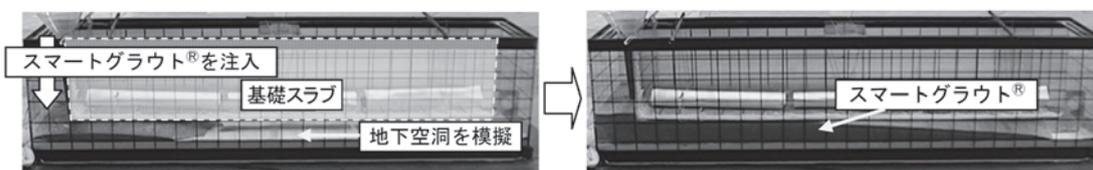


写真2 流動性確認試験

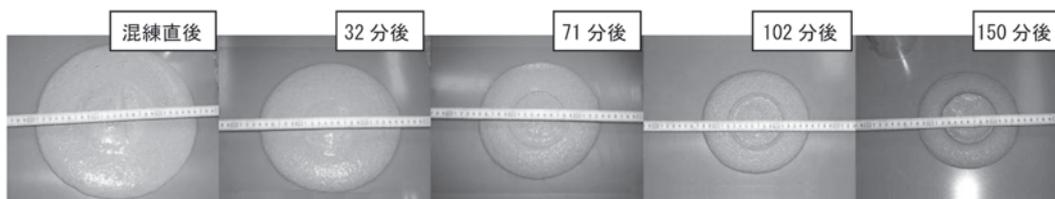


写真3 フロー値の経時変化

試験と同程度の結果が得られた。また、写真5に示すように、水中でも分離することなく打設できることも確認した。

5 おわりに

室内試験により要求性能を満足する高炉水砕スラグを用いた空洞充填材「スマートグラウト®」の配合を検討し、実機プラントを用いた施工試験により圧送性、および水中施工性の確認を行った。その結果、最大200mの圧送が可能であり、水中打設でも分離することなく施工できることを確認した。

東日本大震災では多くの地域で地盤の液状化が生じ、地下にも空洞が発生しているといわれている。スマートグラウ

ト®は、そのような空洞を鉄鋼製品の副産物を利用して、環境負荷を低減しつつ、修復できるため、充填材として利用価値が高いといえる。

参考文献

- 1) 軽量混合処理土工法技術マニュアル (改訂版), 財団法人沿岸技術センター, (2008.7)
- 2) 木寺謙爾, 中川茂, 田村徹, 轟丈詩, 森山紀夫: 建築技術, (1980.11), 351.
- 3) コンクリート標準示方書 規準編, 土木学会, (2007)

(2012年5月16日受付)

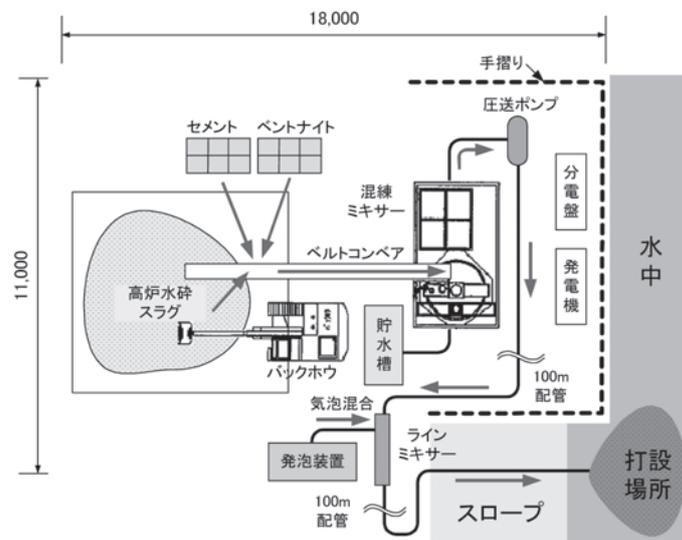


図5 施工プラントの配置

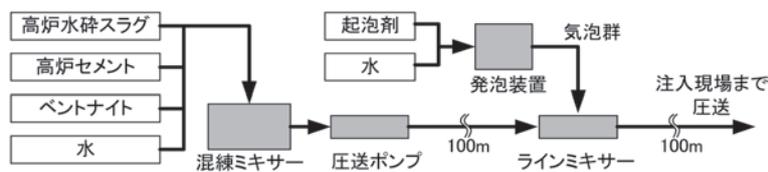


図6 施工手順



写真4 施工プラントの概観



写真5 水中施工状況

連携記事

津波被災農地復興に役立つ転炉スラグ

An Effective Application of Converter Slag on the Reconstruction of Farmland Struck by Tsunami

後藤逸男

東京農業大学 応用生物科学部
教授

Itsuo Goto

1 はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災の大津波により流失や冠水等の被害を受けた農地面積は水田20,151ha、畑3,449ha、合計23,600haで被災6県の耕地面積の2.6%、宮城県では県内耕地面積の11%にも及んだ。その後、がれきの除去と除塩作業が進められつつあるが、2012年春から水稻など農作物の作付が再開された農地は一部に過ぎない。特に海岸に隣接する被災農地の本格的復興作業はこれからが本番である。

また、福島第一原発から30km圏内と5,000Bq/kg以上の放射能汚染農地では2011年度産水稻の作付が制限されたが、福島県内の水田で放射性セシウム500Bq/kgを超過する米が見出された。そのため、福島第一原子力発電所から半径20キロメートル圏内の警戒区域と計画的避難区域、および福島市、伊達市、二本松市、相馬市の一部地域では2012年度産水稻作付が制限されることになった。

まさに、日本にとってはこれまで経験したことのない未曾有の農業災害に対して、今こそ農業技術者・研究者が復興に向けて総力を注ぎ込まなければならない。

2011年4月末、本学に「東京農業大学東日本支援プロジェクト」が結成された。3.11よりすでに二ヶ月近くが経過し、やや出遅れた感はあるが、5月1日より福島県相馬市の被災地に入った。

2 津波被災農地の復興から始めた支援活動

本プロジェクトの主な支援対象地となった福島県相馬地域における農業被害は津波による被災と福島第一原発事故に伴う放射能汚染であった。どちらも早期復旧・復興を目指すべき重要課題であるが、筆者らに両立させる力量はない。不良

農地の土壌改良や土壌診断などにたずさわってきた筆者らのこれまでの研究経験をすぐに活かせる支援は前者の津波被害と判断した。

昨年5月1日の時点で、相馬市岩子から柏崎に至る松川浦西側の水田地帯には松川浦の砂州に植えられていた松や漁船、車などが大量のがれきとして押し寄せていた(写真1)。用排水設備も津波による被害を受けたため湛水状態の水田が広範囲に拡がり、表面は厚さ5~10cmの津波土砂で被われていた。海岸から2km程度離れると、がれきの量は少なくなり、津波土砂の厚さも5cm程度となった。また、水田には水はなく表面にはナトリウムを多量に含んだ粘土特有の亀裂ができていた(写真2)。5月3日には、海岸から約3kmの距離にある和田のイチゴハウスを訪れた。この地域は海岸から川を遡って来た津波の被害を受けたため、がれきはほとんど見られず、イチゴハウス自体には被害はなかった(写真3)。しかし、津波を受け収穫中のイチゴは全滅し、ハウス内の畝間には約10cmの津波土砂が堆積していた(写真4)。そこで、筆者らはこのイチゴハウスとそれに隣接する水田から支援の手を差し向けることにした。



写真1 海岸に近く、がれきの多い激甚被災水田

3 津波土砂を取り除く必要はない

2011年6月に発表された農水省の除塩マニュアル¹⁾によると、「津波により海底の土砂がほ場に堆積している場合は、ほ場外に除去することを基本とする。」としている。しかし、土砂の除去・処分には多大な労力を必要とする。現地では「へどろ」といっているが、相馬市内から採取した20点ほどの土砂を分析した結果、CEC（陽イオン交換容量）の大きな粘土と肥料成分として有効なカリウムやマグネシウムを多量に



写真2 海岸から約3kmのがれきが少ない水田



写真3 海岸から約3kmのイチゴハウスの外観



写真4 海岸から約3kmのイチゴハウスの内部

含むこと（表1）、カドミウムやヒ素などの有害元素含有率は土壌と大差ないことがわかった（表2）。そこで、被災農家の了解を得た上で、イチゴハウスでは6月、となりの水田では8月に土砂を元の作土と混層した。これを見ていた周りの農家もそれに追従した。ただし、土砂中にガラス破片などの異物が多量に混ざっている、あるいは土砂の堆積厚さが15cm程度以上の場合にはこの限りではない。

4 雨に優る除塩資材なし

農業専門紙などには津波による農地被災直後から、数多くの除塩資材や耐塩性植物の導入などに関する記事が掲載されたが、塩害の主成分である塩素イオンは土壌に吸着されにくいいため、水で容易に流すことができる。筆者らはこのような土壌学の基本に立脚して雨による塩分除去を企てた。ただし、農地表面には亀の甲羅状に固まった津波土砂が堆積していたので、そのままの状態であてても充分な除塩効果は期待できない。除塩には筆者らが和田地区で行ったような土砂と作土をよく混和した上で雨にあてるのが有効であった。その方法により、図1のようにイチゴハウスでは8月5日（94日目）には電気伝導率が0.35dS/m程度まで低下し、ほぼ除塩が完了したので、それを確認する目的でソルゴーという緑肥作物を作付けた。一ヶ月後には人の背丈ほどに大きく生長したので、それを鋤き込んだ。有機物を農地に投入すると土壌団粒化が促進される。その結果、透水性が改善され除塩が進む、それがソルゴー作付けの目的であったが、それ以上に効果があったことは、緑肥の生育を目の当たりにした農家の営農意欲の復活であった。イチゴハウスの作土は充分な除塩が達成できたが、下層にまだ塩分が残っていた。そこで、塩分に弱いイチゴの作付けは2012年秋からとして、2011年9月からハウレンソウ、カブ、スナップエンドウなどの換金野菜を作付けることにした（写真5）。

8月に土砂を混層した和田の水田も、2012年1月25日（267日目）には電気伝導率が0.5dS/m程度まで低下して（図1）水稲が作付けできるまでの除塩が進んだが、用排水設備の復旧が遅れたために、作付けを断念せざるを得なくなった。放っておけば雑草田となるため、コスモスやヒマワリなど景観を兼ねた緑肥作物を作る予定である。

5 今こそ、転炉スラグの出番

(1) 石こうや炭カルではなく転炉スラグを

塩分中の塩素イオンは水で容易に流せるが、ナトリウムイオンは塩素イオンの対イオンとしての水溶性ナトリウムと土壌コロイドに捕捉された交換性ナトリウムとして存在する。

この交換性ナトリウムは水で流すことはできないため、雨水にあてるだけで完璧な除塩は達成できない。

1999年の台風18号により高潮被害を被った熊本県八代海沿岸地域では、塩害対策として石灰資材の施用を行っている²⁾。施用するカルシウムイオンと土壤に捕捉されている交換性ナトリウムとの間で陽イオン交換反応を起こさせて、交換性ナトリウムを水溶性ナトリウムに変換させるためであ

る。そのための石灰資材としては石こう (CaSO₄)、消石灰 (Ca (OH)₂)、炭酸カルシウム (CaCO₃) などが使われた。施用量は150～200kg /10aであった。

わが国では第二次大戦後の食料難を克服する対策の一つとして、児島湾や八郎潟など、最近では諫早湾で干拓事業が進められてきた。干拓とは遠浅の海に堤防を築きその内海を干しあげて農地を造成する工事である。すなわち、海底の土砂

表1 相馬市柏崎 (湛水水田) の土壤化学性

試料	深さ cm	pH	電気伝導率 dS/m	交換性塩基(mg/100g)				CEC meq/100g	塩基 飽和度%	可給態リン酸 mg/100g	可給態ホウ素 mg/kg
				CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O				
津波土砂	10	6.6	10.3	393	370	183	1540	27.6	311	10.6	13.4
水田作土	20	5.3	2.47	407	131	43.7	287	22.4	139	8.6	1.45
鋤床	30	5.9	0.89	477	124	35.4	86.6	23.5	114	6.9	0.82
下層土	40	6.2	0.26	479	143	35.2	27.3	24.8	104	4.1	0.59
下層土	50	6.6	0.25	467	150	32.4	27.4	23.9	107	4.8	0.54

注) CEC: 陽イオン交換容量(Cation Exchange Capacity) の略号、土壤の保肥力の大小を示す指標

表2 津波土砂とイチゴハウス土壤の重金属含有量 (mg/kg)

地目	地区	試料	深さ(cm)	カドミウム	ヒ素	亜鉛	銅	ニッケル	クロム
水田	相馬市柏崎	津波土砂	10	0.65	8.62	162	33.2	20.6	60.0
畑 (ムギ)	相馬市柏崎	津波土砂	3	0.48	8.19	124	24.6	19.0	50.3
水田	相馬市蒲庭	津波土砂	5	0.32	6.81	46.1	10.7	32.2	26.7
イチゴハウス	相馬市和田	津波土砂	0.7	0.39	4.30	110	19.9	21.0	71.5
イチゴハウス	相馬市和田	畝土壌	20	0.35	4.81	96.7	18.5	21.5	63.9
イチゴハウス	相馬市和田	畝土壌	30	0.32	4.40	92.8	19.8	22.6	55.9
イチゴハウス	相馬市和田	畝土壌	45	0.39	5.67	181	38.6	49.4	72.3
イチゴハウス	相馬市和田	畝土壌	50	0.35	6.61	109	26.1	30.3	108
イチゴハウス	相馬市和田	津波土砂	10	0.46	8.82	130	37.1	27.8	52.8
イチゴハウス	相馬市和田	畝間土壌	30	0.23	3.38	133	32.5	45.2	61.9
水田	相馬市和田	津波土砂	5	0.43	8.97	113	32.2	22.2	47.6
水田	相馬市和田	水田作土	20	0.34	3.99	107	38.5	35.8	58.3
水田	相馬市和田	鋤床	30	0.28	4.31	93.7	36.1	44.1	59.1

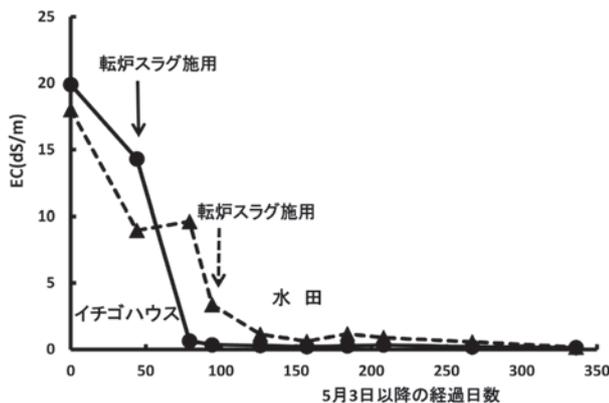


図1 転炉スラグの施用が作土の電気伝導率に及ぼす影響



写真5 野菜作付が復興したイチゴハウス

を農地として利用することになるが、土砂を空気にさらすとその中に含まれるパイライト（硫化鉄：FeS₂）が酸化して硫酸を生成し、pH4以下のきわめて強い酸性土壌を示す³⁾。そのため、炭カルや苦土カルなど大量の石灰資材を施用して硫酸を中和することが行われてきた。このような特殊な酸性土壌は酸性硫酸塩土壌と呼ばれる。津波土砂は津波により海底から運ばれた物質であるので、干拓地土壌と同様な酸性化が起こることが懸念される。そこで、採取した土砂の全イオン含有量と土壌を過酸化水素水で強性的に酸化した後に測定するpH（H₂O₂）を測定した結果、津波土砂中には1%程度の全イオンが含まれ、pH（H₂O₂）は2.2～2.6を示した。pH（H₂O₂）3以下の土壌が酸性硫酸塩土壌と定義されることから、津波が運んだ土砂は潜在的な酸性硫酸塩土壌と判定された。

津波土砂を混層する、しないにかかわらず、土砂の一部は必ず土壌に混ざり、その結果土砂中に含まれるパイライトが酸化して生成する硫酸により土壌が酸性化する恐れがある。また、パイライトを含む津波土砂が混ざった水田を湛水すると作土還元層の酸化還元電位が低下して水稻に有害な硫化水素ガスが発生する可能性もある。石こうや炭カルではこれらに対処できない。筆者らは除塩のための石灰資材として、迷うことなく転炉スラグを選択した。

(2) 転炉スラグの酸性土壌改良効果

わが国に分布する土壌の多くが酸性であるため、畑作農業では土壌酸性改良が重要な農作業のひとつである。その原理は酸性土壌に石灰資材を施用して、pHを高めることで、そのための資材としては炭カルや苦土カルの利用が一般的である。日本の土壌学では、土壌の水懸濁液のpHを測定して、6.0以下の場合を酸性土壌、6.0～6.5の土壌を中性土壌と定義する。中性域が一般化学のpH7とは異なる理由は、6.0～6.5で作物生育が最も良好で、pHをそれより高めると、土壌中のホウ素・マンガン・鉄などの微量元素が植物に吸収されない形態に変化して深刻な微量元素欠乏をきたすためである（写真6）。そこで、土壌が酸性の場合には石灰資材を適量施用して土壌pHを6.0～6.5に改善する。それ以上に土壌pHを高めることは、従来から「御法度」とされてきた。

筆者は1977年以来、転炉スラグを土壌改良資材として活用する研究を進めてきた⁴⁾。現在では、転炉スラグの粉碎品が副産石灰肥料あるいは特殊肥料、造粒品が鉍さいケイ酸質肥料として流通しているが、その農業利用率は残念ながら全生産量の1%にも満たない。農業界での普及を拒んできた最大の理由は、「スラグ（鉍さい）」という肩書きである。しかし、最近では転炉スラグの多量施用がアブラナ科野菜根こぶ病⁵⁾やハウレンソウ萎凋病⁶⁾などの土壌病害に有効である（写真7、8）ことが認識され、徐々にではあるが全国的に普及

の兆しを見せている。

転炉スラグには、ケイ酸カルシウムやフリーライムの他に、鉄、マグネシウム、マンガン、ホウ素などの微量元素が含まれる。そのため、転炉スラグを土壌に施用してpHを7.5程度以上まで高めても、作物に微量元素欠乏をきたしにくい（写真9）。また、炭酸カルシウムや苦土カルなどより緩効的な土壌酸性改良資材であるので、津波土砂中のパイライトの酸化による土壌酸性化にも対応できる。さらに、転炉スラグ中の鉄が水田土壌中で生成する硫化水素を硫化鉄として無害化すること、鉄とマンガンが水田中で生成するメタンガスの

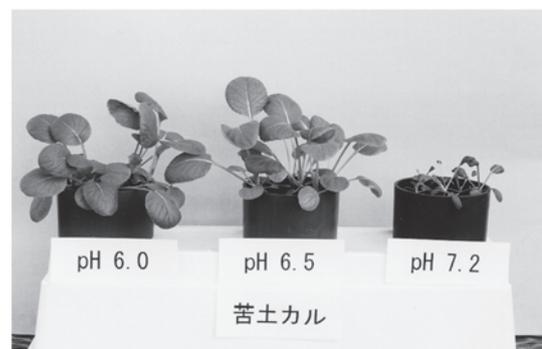


写真6 苦土カル（ドロマイト）施用土壌のpHとコマツナの生育の関係



写真7 ブロccoli根こぶ病に対する転炉スラグの施用効果（宮城県大崎市）

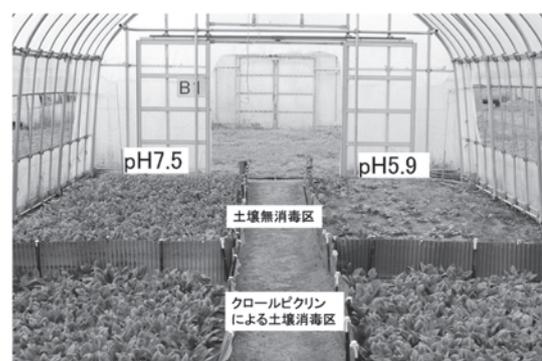


写真8 ハウレンソウ萎凋病に対する転炉スラグの施用効果（原図：岩手県農業研究センター 岩館 康哉）

揮散抑制に効果があることも明らかにされている⁷⁾。ごく最近では、転炉スラグ中に1～2%含まれるリン酸が枯渇の懸念されるリン鉱石の代替資源として注目されている⁸⁾。今こそ、転炉スラグの出番だ。

(3) 被災農地に転炉スラグを施用した

筆者らは上記の和田地区のイチゴハウスとそれに隣接する水田で土砂混層時に転炉スラグを施用した。その施用量は土壌pHを高めてもよいイチゴハウスでは1t/10a、水稲はpH5.5～6.0程度の弱酸性を好む植物であるので、水田では200kg/10aとした。

2011年5月3日以降における土壌pHの経時変化は図2のとおりであった。6月16日(44日目)に転炉スラグを施用したイチゴハウスでは、8月5日(95日目)から11月3日(184日目)までpHが8近くにまで上昇し、その後低下傾向を示して、2012年4月3日(336日目)には7.5となった。転炉スラグを1t/10a程度多量施用すれば、パイライトを含む土砂を混層しても硫酸生成による土壌酸性化は起こらなかった。一方、水田では5月以降9月6日(126日後)までpHが5.0にまで低下したが、転炉スラグの施用後には上昇に転じて、2012年4

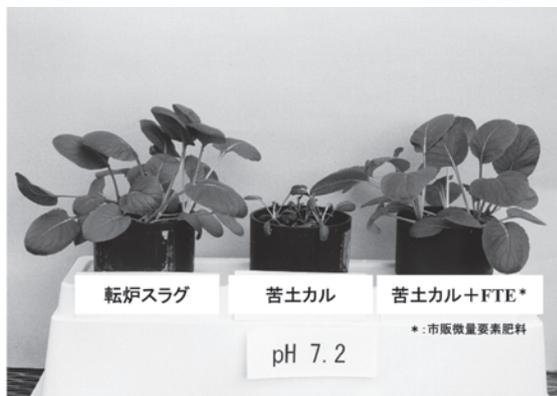


写真9 転炉スラグ施用土壌ではpH7.2でも微量元素欠乏をきたさない

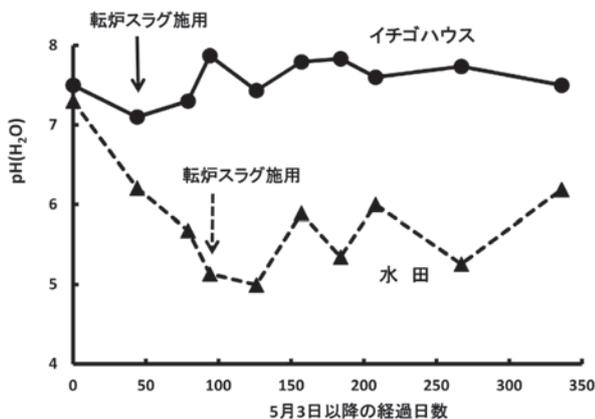


図2 転炉スラグの施用が作土のpHに及ぼす影響

月3日(336日目)には6.2となった。

(4) 激甚被災水田でも復興の兆し

松川浦に隣接する岩子地区の津波被災水田(写真1)では、2011年9月までにがれきを取り除かれたため、直ちに土砂を混層した。なお、その後の研究により、転炉スラグの施用時期は土砂混和直後より、まず雨水のみで塩素イオンと水溶性ナトリウムイオンを除き、その後に転炉スラグを施用した方がよいことが明らかになった。そのため土砂混和後には転炉スラグを施用せず、2011年9月から2012年4月まで雨水のみによる除塩を行った。その間の混層水田とそれに隣接する未混和水田で表層10cmの電気伝導率とpHの経時変化を図3、4に示す。図3より土砂混層が早期除塩に不可欠であることは明らかで、混層水田では2012年4月3日(混層から232日目)に水稲作付けの目安である電気伝導率0.7dS/mにまで低下した。また、図4より未混層水田では土砂中のパイライトが徐々に酸化されて、pHが3.5にまで低下することがわかった。混層水田でもpHが3.8にまで低下したので、4月23日に転炉スラグを施用(写真10)して硫酸を中和した後、5月11日に田植えを済ませた。6月7日現在、水稲は正常に生育し(写真

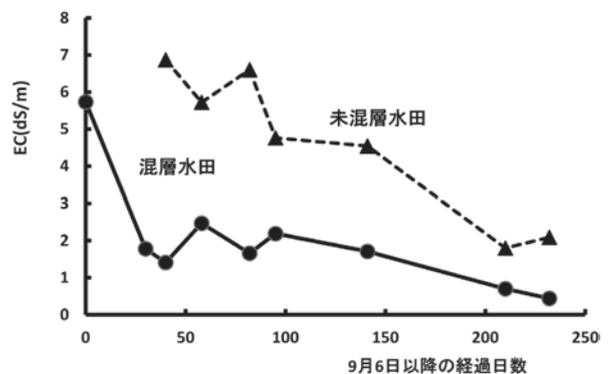


図3 津波被災水田作土における電気伝導率の経時変化

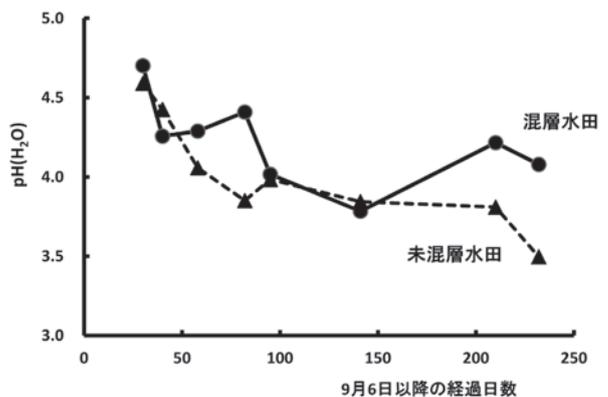


図4 津波被災水田作土におけるpHの経時変化

11)、津波による激甚被災水田でも復興の兆しが見えてきた。

6 東日本大震災からの 早期復興を目指して

福島県相馬地域（新地町・相馬市・南相馬市）では、今回の大津波により約2,000haの農地が甚大な津波被害を被った。その内、2012年春から開始された除塩作業により5月末までに水稲作付けが再開された水田は北部に位置する新地町の80haに過ぎず、これから本格的な除塩活動が始まろうとしている。福島県の基本方針により除塩対策のための石灰資材として炭カル（炭酸カルシウム）が用いられ、その施用量は塩分濃度により50～200kg/10aとなっている。

一方、筆者らは上記のように相馬市内の水田で鉄鋼メーカーと肥料メーカーから無償で24トンの製鋼スラグの支援を受け、混層と雨水による除塩後の約2haの水田に500～1000kg/10a施用して、土壌pHを水稲生育に支障のない程度まで高めた。相馬市内の津波被災農地では、除塩対策後にダイズの作付も計画されている。ダイズの栽培には水稲以上に土壌pHを高める必要があるため、福島県基準の炭カル量ではパイ



写真10 転炉スラグを施用中の津波被災水田（相馬市岩子）



写真11 転炉スラグ施用後に田植えを行った津波被災水田（相馬市岩子）

ライトの酸化による土壌酸性化を改良できないと判断される。

以上のように、福島県相馬地域だけでも今後の農地除塩と農業復興には大量の石灰資材が必要となる。そのための資材としてはカルシウムやマグネシウムだけでなく鉄、マンガン、その他の微量元素を含む転炉スラグなどの製鋼スラグが最適である。国内の製鉄所から生産されている年間約1,000万トンの製鋼スラグの一部が東日本大震災による農業の早期復興に活用されることを願ってやまない。

最後に、鉄鋼スラグの農業利用に明るい兆しが見えてきたことを紹介しておきたい。そのひとつは、2012年より本協会内の鉄鋼スラグ新機能フォーラムと植物病理学研究者との意見交換活動が開始された⁹⁾こと、もうひとつは2012年度に農林水産省が公募した「新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業」として「転炉スラグによる土壌pH矯正を核としたフザリウム性土壌病害の耕種的防除技術の開発」が採択されたことである。今後は鉄鋼業と農業関係者との連携をより一層深めながら鉄鋼スラグの農業利用の発展に邁進したい。

参考文献

- 1) 農地の除塩マニュアル, 農水省農村振興局,
<http://www.maff.go.jp/j/press/nousin/sekkei/pdf/110624-01.pdf>, (2011)
- 2) 台風18号技術対策資料集, 熊本県, 熊本県八代農業改良普及センター, (2001)
- 3) 久馬一剛他: 特集「酸性硫酸塩土壌」, アーバンクボタ No.25, <http://www.kubota.co.jp/urban/pdf/25/index.html>, (1986)
- 4) 後藤逸男・村上圭一: 根こぶ病, おもしろ生態とかしこい防ぎ方, 農文協 (2006), 77.
- 5) 村上圭一・篠田英史・丸田里江・後藤逸男: 転炉スラグによるブロッコリー根こぶ病の防除対策, 日本土壌肥料学雑誌, 75 (2004), 53-58.
- 6) 岩館康哉: 転炉スラグを用いた土壌pH改良によるホウレンソウ萎凋病の発病抑制, 土と微生物, 2012年度大会一般講演要旨, 66 (2012) 2, 印刷中.
- 7) 犬伏和之: 含鉄資材の施用による水田からのメタン放出抑制, 鉄鋼環境基金1998年度報告書, (1998)
- 8) 製鋼スラグの全量高炉循環システム構築に係る調査検討報告書, 経済産業省製造産業局, (2010)
http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2010fy01/E001004.pdf
- 9) 森田一樹: 鉄鋼スラグ新機能フォーラム東北地区農業試験研究機関情報交換会開催および津波被災農地視察報告, ふえらむ, 17 (2012), 230.

(2012年5月30日受付)

特別講演

□第163回春季講演大会学術功績賞受賞記念特別講演
(2012年3月29日)

先進火力発電用9Cr鋼の長寿命合金設計

Alloy Design of 9Cr Steel for Advanced Power Plants to Achieve Long Life

阿部富士雄

(独)物質・材料研究機構 元素戦略材料センター
特命研究員

Fujio Abe



*脚注に略歴

1 はじめに

火力発電は我が国の電力の基幹を担っているが、低炭素社会に向けて発電効率向上やCO₂排出削減が強く求められている¹⁾。蒸気タービンを回して発電する石炭火力では、発電効率は蒸気の温度と圧力が高いほど高くなり、効率向上によってCO₂排出量は削減する。

フェライト系耐熱鋼は、オーステナイト系耐熱鋼やNi合金に比べて価格が低い上に、熱膨張が小さく熱伝導度が大きいいため熱応力を低減できる利点を有するので、火力発電の大径厚肉鋼管(パイプ)やタービンロータのような大型構造物に大量に使用されてきた。しかし、拡散速度が大きいためクリープ強度が低く、Cr濃度が低いため耐酸化性も低い²⁾。現状の最高蒸気温度は610～620℃である。現在研究開発が進められている先進超々臨界圧(Advanced Ultra-supercritical, A-USC)火力発電では、高効率とともに経済性も要求されるため、安価なフェライト系耐熱鋼を650℃以下の低温部に使用し、高温強度は優れるが高価なNi合金は700℃程度の高温部のみを使用する考えになっている³⁾。このため、フェライト系耐熱鋼の高温化は、A-USCプラント実現の鍵を握っている。

高温化と並んで重要なのが長寿命化である。高温プラントは、通常、10万時間クリープ破断強度から計算される許容応力を基に設計され、数十年の長期にわたって使用される場合が多い。従って、高温構造材料に対しては10万時間クリープ破断強度が高温強度の指標となり、これは応力を負荷してから破断するまで10万時間を要する応力をいう。

以下では、650℃で長時間使用可能な9Cr鋼に向けた合金設計について述べる。

2 9Cr鋼の高温化、長寿命化を阻む壁

Cr濃度が9～12%の高Crフェライト鋼を650℃まで高温化し、長時間使用可能(長寿命化)とするには、基本的な材料課題として次の3大阻害要因を克服しなければならない。

- (a) 母材の長時間クリープ強度劣化
- (b) 溶接継手のクリープ強度劣化
- (c) 高温水蒸気中の耐酸化性

(a)に関しては、数千ないし数万時間経過後にクリープ破断強度が急激に低下する現象が焼戻マルテンサイト組織の9～12Cr鋼でしばしば見られるようになり、深刻な問題になっている。クリープ強度劣化は、650℃付近で最も顕著である。最近開発された高強度9～12Cr鋼は、焼きならし焼戻熱処理によって、高転位密度のラス、ブロック組織に微細なM₂₃C₆炭化物(M:Cr, Fe, W)とMX炭窒化物(M:V, Nb, X:C, N)が分散した析出強度の高い組織に調質されているが、クリープ中に析出物の凝集粗大化、再固溶等が進行すると、析出物による各種境界や旧オーステナイト粒界(以下、粒界)のピン止め力が低下し、クリープ強度が急激に低下することが明らかになってきた²⁾。粒界近傍では、焼戻マルテンサイト組織が回復し易い⁴⁾。(b)に関しては、溶接熱影響部の母材側で脆性的に破断する、いわゆるタイプ4破壊による寿命低下が600℃より高温で顕著となり、母材の1/10に低下する場合もある⁵⁾。(c)に関しては、Cr濃度が9～12%では耐酸化性が不十分で、600℃以上になるとマグネタイト(Fe₃O₄)主体の酸化皮膜の成長が顕著となる⁶⁾。また、実機プラントで酸化皮膜のはく離や遊離が観察されるなど皮膜の密着性も問題になっている⁷⁾。

* 昭和49年3月に東北大学院金属材料修士課程修了、52年3月に同博士課程を修了した。その後、日本学術振興会奨励研究員を経て53年に金属材料技術研究所(現物質・材料研究機構)へ入所し、平成23年4月から現職に至る。

3 ボロンによる9Cr鋼母材の長時間クリープ強度向上

図1に、粒界近傍組織を長時間安定化する観点から、粒界に偏析し易いボロンを少量添加した9Cr-3W-3Co-0.2V-0.05Nb-0.08C (質量%) 鋼の650°Cにおけるクリープ破断データを示す^{8,9)}。なお、窒化硼素 (Boron nitride, BN) の生成を抑制するため、窒素は添加されていない。ボロン無添加鋼では、千時間程度より長時間でクリープ破断強度劣化が顕著である。ボロン添加鋼でも長時間でクリープ破断強度劣化が見られるが、ボロン濃度が高くなるにつれ、劣化は軽減され長時間クリープ破断強度は向上する。139ppm ボロン鋼では、千時間以下の短時間域でクリープ破断強度が他鋼種より高いが、これはボロンの効果ではなく窒素濃度が若干高いためである。従来鋼と比較すると、T/P92 (9Cr-0.5Mo-1.8W-VNb)¹⁰⁾ の長時間クリープ破断強度は本研究の92ppm ボロン鋼と、T91 (9Cr-1Mo-VNb)¹¹⁾ は48ppm ボロン鋼と同程度である。全伸びや断面減少率といった破断延性は、ボロン添加によって向上したが、ボロン濃度を48から139ppmまで変えても破断延性に差は見られなかった。破断延性は、本研究のボロン添加9Cr鋼 ≧ T91 > T/P92の順であった。

本鋼のクリープ曲線は、負荷直後からクリープ速度が時間とともに減少する遷移域と、最小クリープ速度を経た後クリープ速度が時間とともに増大する加速域からなり、定常域は現れない^{8,9)}。クリープ速度は、時々刻々変化する微細組織の変化を如実に反映するので、クリープ変形機構や組織安定性に関して有益な情報が得られる。ボロンを添加しても遷移域のクリープ速度は変化しないが、加速クリープの開始が長時間まで遅延する。これによって、最小クリープ速度がより低下し、破断寿命が増大する。微細組織を観察すると、焼戻熱

処理後はボロン濃度によらず粒界一粒内とも微細なM₂₃C₆が分布していたが、ボロン濃度が低い材料ではクリープ中に粒界およびその近傍でM₂₃C₆の凝集粗大化が顕著であった。また、粒界近傍のM₂₃C₆には最大で数%のボロンの濃縮が認められた。ボロン添加によって加速クリープの開始が長時間まで遅延し長寿命化するの、粒界近傍のM₂₃C₆の凝集粗大化の抑制を通して粒界近傍のマルテンサイト組織の回復が抑制されるため、言い換えると、長時間まで組織が安定なためと考えられる。M₂₃C₆の凝集粗大化抑制、マルテンサイト組織の回復抑制を通して、Fe₂Wラーベス相析出物の凝集粗大化も抑制される。粒界近傍での局所的なクリープ変形が抑制されると、変形が粒界近傍一粒内にわたってより均一となるため、破断延性も向上する。その結果、クリープ破断延性と相関があるクリープ疲労寿命もボロン添加によって向上する¹²⁾。

長寿命化に対するボロンの効果で重要なのは、ボロン添加濃度ではなく固溶ボロン濃度である。高強度9～12Cr鋼では、M₂₃C₆に加えMXによる析出強化を図るため0.05%程度の窒素が添加されているが、さらにボロンを添加すると、ボロンは強力な窒化物形成元素なので熱間加工中や高温熱処理中に数μmの粗大なBNが生成し、固溶ボロン濃度は激減する。図2は、種々の9～12Cr鋼について焼きならし温度の1050-1100°CにおけるBN生成領域を示したもので、BNと平衡する固溶ボロン濃度 [%B] と固溶窒素濃度 [%N] (mass%) の関係は

$$\log [\%B] = -2.45 \log [\%N] - 6.81 \dots\dots\dots (1)$$

と表される¹³⁾。窒素濃度が0.05% (500ppm) の場合、ボロンは数ppmしか固溶しない。図3に、140ppmのボロンを添加した9Cr鋼のクリープ寿命と最小クリープ速度に及ぼす窒素

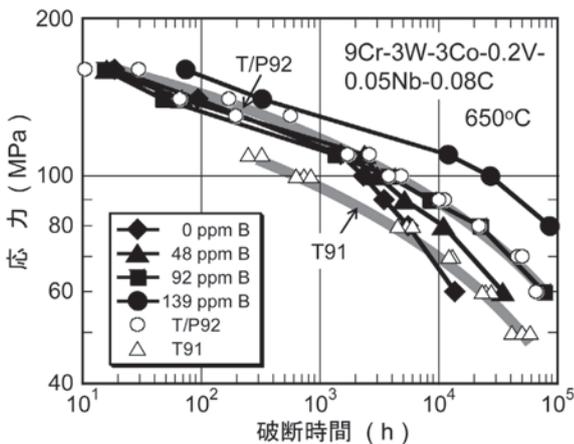


図1 ボロン添加9Cr鋼および従来鋼T/P92、T91の650°Cにおけるクリープ破断データ

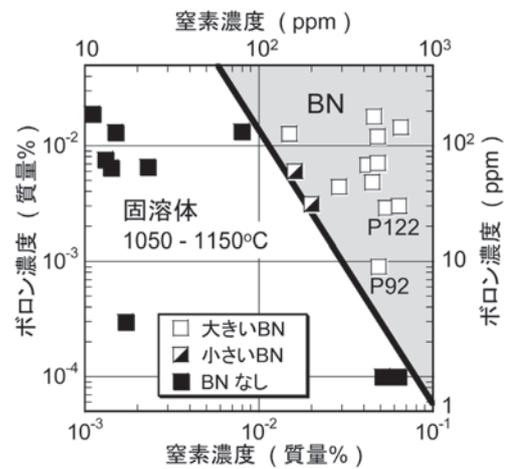


図2 各種9～12Cr鋼の焼きならし温度における固溶体およびBNを生成するボロンおよび窒素濃度

の効果を示す。窒素濃度が80ppmまでは、焼きならし温度でボロンも窒素も固溶し(図2)、寿命増大が顕著であるが、窒素濃度が100ppm以上ではBN生成量が増大し寿命も破断延性も低下する¹⁴⁾。

ボロンによるM₂₃C₆粗大化抑制の効果は、ボロンの粒界偏析を通して現れると考えられる⁹⁾。図4(a)に、316ステンレス鋼について報告されているボロンと粒界との結合エネルギー $B = 62.7 \text{ kcal/mol}$ ¹⁵⁾ を用いて、粒界-粒内にわたって均一に分布する初期ボロン濃度を $C_i = 100 \text{ ppm}$ 、結晶粒径を $d = 50 \mu\text{m}$ 、粒界の幅を $\delta = 0.3 \text{ nm}$ と仮定して粒界に偏析するボロン濃度 C_{GB} を

$$C_{GB} = C_0 \exp(B / RT) \dots\dots\dots (2)$$

から求め、温度の関数として示す。 C_0 は粒内のボロン濃度で、 C_i 、 B 、 d 、 δ の関数として表される⁹⁾。 R は気体定数、 T は温度(K)である。1100℃での C_{GB} は数%であるのに対し、 C_0 は $C_i = 100 \text{ ppm}$ と実質的に同一である。焼戻温度の800℃やクリープ試験温度の650℃では、低温のため粒界偏析はより顕著となる。

固体中でオストワルド成長が進行するには、粗大化するM₂₃C₆の周囲の局所的な歪みを緩和する必要がある。再固溶する小さなM₂₃C₆の周囲では、炭素原子が母相中の侵入型位置に入ると同時に原子空孔が生成する。Mを構成するCr、Fe、Wなどが粗大化するM₂₃C₆に向かって母相中を拡散するのと平行して、原子空孔がM₂₃C₆の周囲へ拡散すれば局所的な歪みを緩和できる。しかし、本鋼のように粒界近傍でボロン濃度が高く、ボロンが原子空孔を占有すると、図4(b)に示すようにM₂₃C₆の周囲の歪みを緩和できず、粒界近傍ではM₂₃C₆の粗大化が抑制されると推察される。前節で述べたボロンによる破断延性向上も、クリープポイド生成初期にボロンが原子空孔を占有する可能性が挙げられるが、今後、微量ボロンの分布に関する実験的検証が必要である。

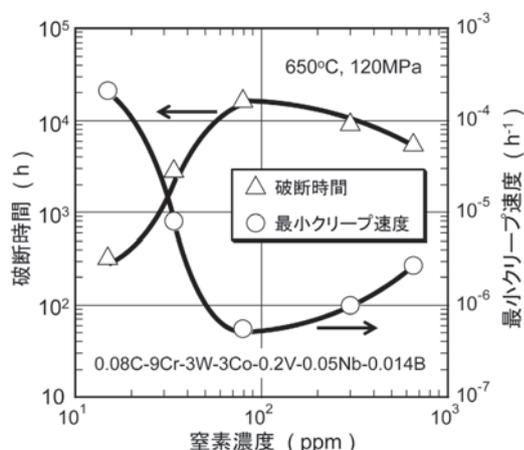


図3 140ppm ボロンを添加した9Cr鋼のクリープ破断時間および最小クリープ速度に及ぼす窒素の効果

4 ボロンによる9Cr鋼溶接継手のクリープ強度劣化の抑制

タイプ4破壊による溶接継手のクリープ強度劣化は9～12Cr鋼全てに生じると長い間思われてきた。しかし、図2に示した固溶ボロン領域の9Cr鋼では、溶接熱影響部の結晶粒径やM₂₃C₆の分布が母材とほぼ同じとなるため、タイプ4破壊が起こらずクリープ強度劣化も見られない¹⁶⁻¹⁸⁾。一例をP92の結果と比較して図5に示す。P92では溶接熱影響部が細粒化し、M₂₃C₆による粒界析出強化も低下するため、タイプ4破壊によって溶接継手のクリープ強度は劣化する。固溶ボロン領域であれば、ボロン濃度が40ppm程度でもタイプ4破壊は抑制されるが、図1に示したようにボロン濃度が低いと長時間で母材のクリープ強度劣化が顕著となる。

従来鋼では、溶接加熱中にAc₁以上になるとフェライトの粒界にオーステナイトが優先核生成し、温度上昇につれオーステナイト粒が成長する核生成-成長の拡散型相変態が進行するが、Ac₃近傍では温度が低いため細粒組織となる。一方、ボロン添加9Cr鋼では拡散型相変態が抑制され、マルエージ鋼のようにマルテンサイト逆変態が進行するため細粒化せず結晶粒径は母材と同一となる。マルテンサイト変態が進行するのは、加熱中その場観察によって試料表面に起伏が現れることから実験的に確認された¹⁹⁾。拡散型相変態が抑制され

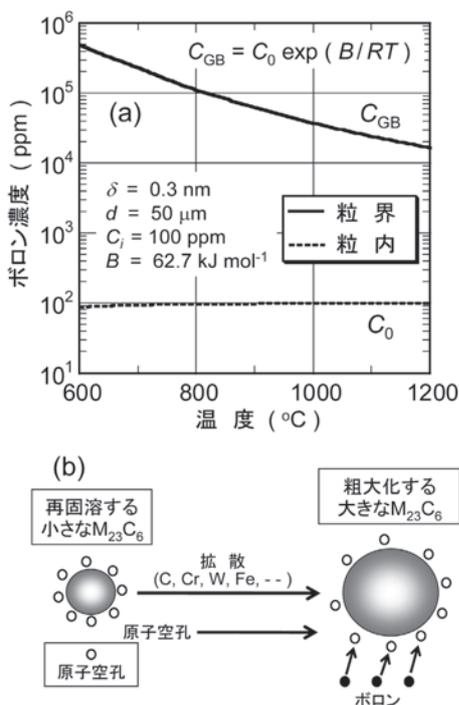


図4 (a) 粒界、粒内のボロン濃度の温度依存性 (b) ボロンによる粒界近傍M₂₃C₆のオストワルド成長抑制機構

るのは、ボロンの粒界偏析によってフェライトの粒界エネルギーが低下し、オーステナイト核生成が抑制されるためと推察される。

以上の結果を基に、母材の長時間クリープ強度が高くしかも溶接継手のクリープ強度劣化を抑えた9Cr鋼として、MARBN鋼 (*Martensitic 9Cr steel strengthened by Boron and MX Nitride*) を合金設計した^{20,21)}。化学成分は9Cr-3W-3Co-0.2V-0.05Nb-0.08C-0.008N-0.013Bである。BN生成を抑え、母材の長時間組織安定性向上の観点からボロン濃度を130ppmとし、微細なMXによる強化の観点から窒素濃度を80ppmとした。クリープデータをP92や図1の139ppmボロン鋼と比較して図6に示す。MARBN鋼は、P92と比較して母材のクリープ破断強度が高い上に、溶接継手のクリープ強度劣化はほとんど見られない。また、MARBN鋼について、3トン溶解インゴットから実規模サイズのパイプ製造とパイプ溶接が可能なのが民間企業と物材機構との共同研究で確認された²⁰⁾。MARBN鋼は現在、A-USCプロジェクトのフェラ

イト鋼候補材の一つに挙げられ、民間企業を中心に各種性能試験が行われている。ヨーロッパでも、物材機構のボロン添加9Cr鋼と同じ合金設計の考えで、タイプ4破壊を抑制する研究が進められている²²⁾。

5 予備酸化処理による9Cr鋼の耐酸化性向上

9Cr鋼の水蒸気中耐酸化性に及ぼす合金元素の効果を調べたところ、Pdを3%程度添加すると厚さ0.1μm以下の非常に薄いCr₂O₃の保護皮膜が生成し耐酸化性が著しく向上すること、従って、Crが9%でも条件によってはCr₂O₃の生成が可能であることが見出された²³⁾。Pdを添加しなくても、9Cr鋼をAr中で予備酸化すると厚さ0.1μm以下の非常に薄いCr₂O₃が生成し、その後水蒸気中で保護皮膜として作用するため、耐酸化性が著しく向上することが前述のMARBN鋼と類似の9Cr鋼で示された^{24,25)}。結果の一例を図7に示す。予備

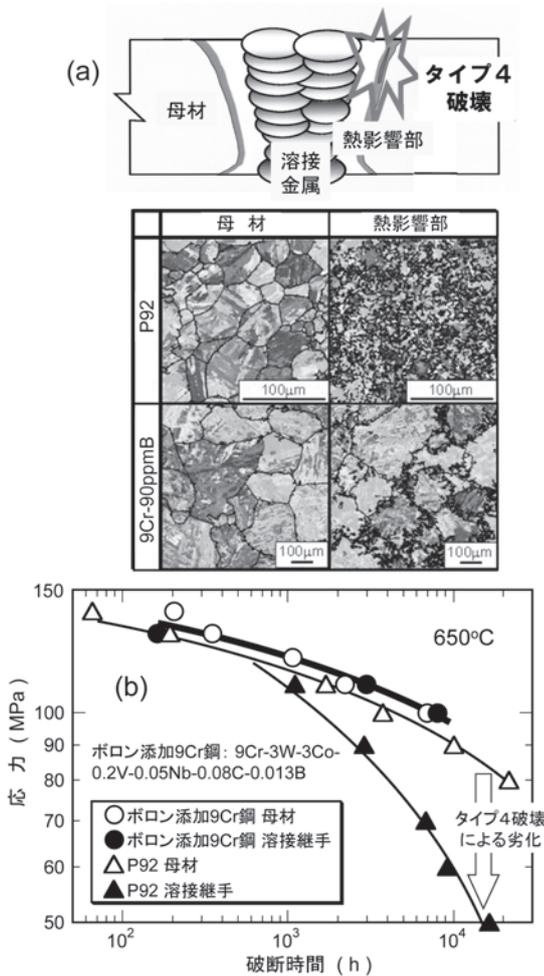


図5 (a) ボロン添加9Cr鋼およびP92溶接継手の母材および熱影響部の組織 (b) 650°Cにおけるクリープ破断データ

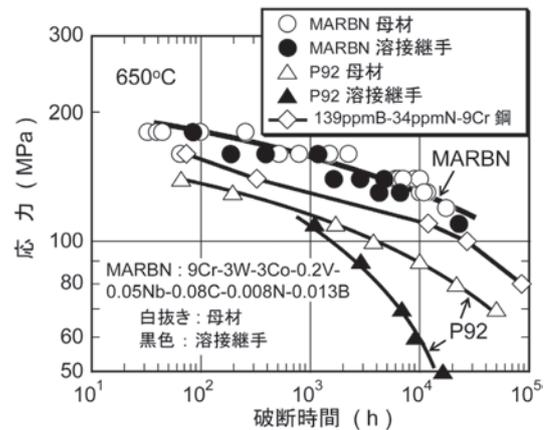


図6 MARBN鋼、139ppmボロン鋼、P92の650°Cにおけるクリープ破断データ

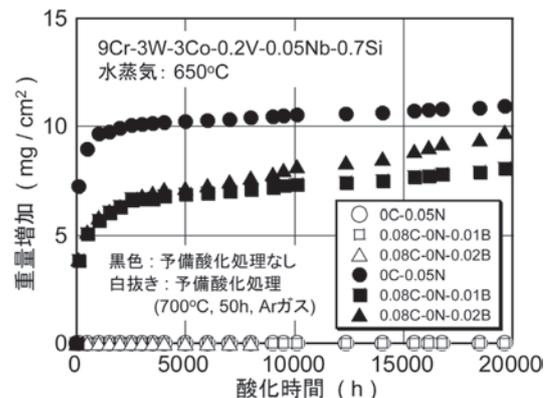


図7 9Cr鋼の650°Cにおける水蒸気中酸化に及ぼす予備酸化処理の影響

酸化中に生成するCr₂O₃皮膜は非常に薄いため、耐はく離性にも優れている。この他、Crショットピーニングした後に大気中で予備酸化するか、あるいは、Ni-Cr合金皮膜をコーティングしてもCr₂O₃の保護皮膜が生成する^{26,27)}。

6 おわりに

9Cr鋼について、650℃での長時間使用に向けた母材の長時間クリープ強度向上、溶接継手のクリープ強度劣化抑制、水蒸気中の耐酸化性向上を基にした長寿命化の合金設計指針を述べた。A-USC用耐熱鋼、耐熱合金の研究開発は日米欧のみならず、中国、インド、韓国でも開始され、耐熱鋼の高温化、長寿命化、さらには長時間信頼性確保の分野で国際貢献が期待されている。

謝 辞

本研究に関与された多くの方々に感謝します。

参考文献

- 1) 阿部富士雄：環境管理, 44 (2008) 11, 986.
- 2) 阿部富士雄：ふえらむ, 11 (2006) 4, 197.
- 3) 佐藤幹夫, 屋口正次, 田中良典, 岩崎淳, 福田雅文, 斎藤英治, 中川博勝, 椎橋啓, 和泉栄：火力原子力発電, 57 (2006) 10, 821.
- 4) 九島秀昭, 木村一弘, 阿部富士雄：鉄と鋼, 85 (1999) 11, 841.
- 5) J.A.Francis, W.Mazur and H.K.D.H.Bhadeshia：Mater. Sci. Technol., 22 (2006) 12, 1387.
- 6) 中川精和：溶接学会誌, 70 (2011) 8, 762.
- 7) N.Nishimura, N.Komai, Y.Hirayama and F.Masuyama：Materials at High Temperatures, 22 (2005) 1, 3.
- 8) T.Horiuchi, M.Igarashi and F.Abe：ISIJ Int., 42 (2002) Supplement, S67.
- 9) F.Abe：Intern. J. Mater. Research, 99 (2008) 4, 387.
- 10) NIMS Creep Data Sheet, No.48A, National Institute for Materials Science, Tokyo, Tsukuba, (2012)
- 11) NIMS Creep Data Sheet, Atlas of Creep Deformation Property, No.D-1, National Institute for Materials Science, Tokyo, Tsukuba, (2008)
- 12) M.Kimura, K.Kobayashi and K.Yamaguchi：Mater. Sci. Research Intern., 9 (2003) 1, 50.
- 13) 櫻谷和之, 岡田浩一, 阿部富士雄：鉄と鋼, 90 (2004) 10, 819.
- 14) H.Semba and F.Abe：Energy Materials, 1 (2006) 4, 238.
- 15) L.Karlsson and H.Norden：Acta Metallur., 36 (1988) 1, 13.
- 16) 田淵正明, 近藤雅之, 本郷宏通, 渡部隆, 殷福星, 阿部富士雄：材料, 54 (2005) 2, 162.
- 17) S.K.Albert, M.Kondo, M.Tabuchi, F.Yin, K.Sawada and F.Abe：Metal. Mater. Trans. A, 36A (2005) 2, 333.
- 18) M.Kondo, M.Tabuchi, S.Tsukamoto, F.Yin and F.Abe：Sci. Technol. Welding Joining, 11 (2006) 2, 216.
- 19) T.Shirane, S.Tsukamoto, K.Tsuzaki, Y.Adachi, T.Hanamura, M.Shimizu and F.Abe：Sci. Technol. Welding Joining, 14 (2009) 8, 698.
- 20) F.Abe, M.Tabuchi, H.Semba, M.Igarashi, M.Yoshizawa, N.Komai and A.Fujita：Proc. 5th Intern. Conf. on Advances in Mater. Technol. for Fossil Power Plants, October 3-5, 2007, Florida, USA (2007), CD-ROM.
- 21) F.Abe：Sci. Technol. Adv. Mater., 9 (2008) 013002.
- 22) P.Mayr, F.M. Martin, M.Albu and H.Cerjak：Proc. 2nd ECCC Creep Conference, April 21-23, 2009, Zurich, Switzerland, (2009) 1029.
- 23) T.Itagaki, H.Kutsumi, H.Haruyama, M.Igarashi and F.Abe：Corrosion, 61 (2005) 4, 307.
- 24) H.Kutsumi, T.Itagaki and F.Abe：Proc. 7th Liege Conference on Mater. for Advanced Power Engineering, September 2002, Liege, Belgium, (2002) 1629.
- 25) H.Okubo, S.Muneki, T.Hara, H.Kutsumi and F.Abe：Proc. 34th MPA-Seminar on Materials and Components Behaviour in Energy & Plant Technology, October 9 and 10, 2008, Stuttgart, Germany, (2008), CD-ROM.
- 26) H.Haruyama, H.Kutsumi, S.Kuroda and F.Abe：Proc. 4th Intern. Conf. on Advances in Mater. Technol. for Fossil Power Plants, October 25-28, 2004, North Carolina, USA, (2004) 412.
- 27) T.Sundararajan, S.Kuroda, T.Itagaki and F.Abe：ISIJ Int., 43 (2003) 1, 95.

(2012年4月26日受付)

特別講演

□第163回春季講演大会学術功績賞受賞記念特別講演
(2012年3月28日)

鉄鉱石焼結プロセス研究

—資源対応力向上と環境負荷低減をめざして—

Study on Iron Ore Sintering Process

—Aiming at Increasing Flexibility for Resources and Decreasing Environmental Load—

葛西栄輝

東北大学大学院 環境科学研究科 教授

Eiki Kasai



*脚注に略歴

1 はじめに

高炉用塊成鉱は焼結鉱と焼成ペレットが主であるが、我が国では高炉装入物の約75%を前者が占める。ペレットは200mesh(粒径150 μ m)程度以下の微粉鉱石、焼結鉱は数mm程度以下の粗粒を含む広い粒度の鉱石がそれぞれの原料である。昨今の鉄鋼生産量の急増は、鉄鉱石や石炭価格の高騰をもたらすと共に、良質な資源入手を困難にしている。同時に、従来から使用してきたいわゆる高品位鉄鉱石資源の枯渇も懸念されており、近年開発が進められている新規鉱床から選鉱を経て提供される微粉鉱石の効率的な使用法開発が今後重要になると考えられる。

焼結用鉱石について言えば、この2、30年は硬質ヘマタイトから軟質・多孔質ヘマタイト、ピソライト、そしてマラマンバへと、取り扱う鉱石性状が大きく変化してきた。鉄鉱石の軟質化・多孔質化により、主要フラックスである石灰成分との反応性が増加し、本来焼結中に骨材として残留すべき粗粒鉱石まで同化する現象が顕著になった。同化速度の観点からは、鉱石の反応性増加と粒度低下は類似した変化と言え、いずれも焼結層内で生成する融液の量と質の制御を困難にする要因となる。このような背景から、焼結層内で融液が発生する部分と溶融せずに残存する部分を明確にした配合や造粒等の予備処理過程を工夫する複合造粒法の概念が提案され、いくつかの技術が実用化されてきた。

焼結プロセスの主な熱源はコークス粉の燃焼熱であるが、それに加えて各種ダスト中の炭素や金属鉄、FeO成分等の反応熱があり、それらの反応には焼結層を通過する気流中酸素との接触が必要である。効率的に反応を進めるには均一分散

された焼結層通気が理想であるが、一方で歩留り、強度確保のためには限られた温度と保持時間で疑似粒子のクラスター化をスムーズに進行させることが不可欠である。コークス粉の疑似粒子周囲への外装は燃焼速度向上が狙えるものの、内装コークスには昇温中に周囲の酸化鉄を還元してFeO成分を生成し、低温での融液生成を促進すると共に焼成後半の酸化熱発生により、過剰な温度上昇を緩和する効果も考えられる。このように、鉄鉱石焼結は疑似粒子サイズでのミクロ的な不均一性を制御、利用して、マクロ的な均一性を確保する特徴を持つプロセスである。

2 鉄鉱石焼結プロセスを取り巻く情勢

焼結鉱の物理的、化学的性質は高炉操業に極めて大きな影響を与えることから、製造技術に関する膨大な研究開発が行われてきた。アジア、オセアニア諸国では数ミリ以下で比較的広い粒度分布をもつ豪州や南米産の鉄鉱石粉が鉄源の主流で、中国やインドではこれに自国の鉱石を混合して使用される。これらブレンド鉱石に、石灰石、生石灰などのフラックス材やコークス粉などの凝結材、リサイクルダスト類も添加される。水分を調整しつつ最大数mm以下の粒度分布を持つように造粒し、焼結機に装入する。充填時の原料層通気性は最も重要なファクターの一つである。

原油、石炭などエネルギー資源価格は、昨今の中国を中心とした工業製品生産の拡大を背景に不安定化しており、いずれも10年前に比較すると数倍に高騰している。特に鉄鉱石価格は2008年の資源バブルピーク時の値をさらに超えて上

* 昭和55年3月東北大学工学部金属工学科卒業後、同年4月東北大学選鉱製錬研究所助手に採用され、平成7年2月素材工学研究所助教授、16年4月多元物質科学研究所教授に昇任、23年4月より環境科学研究科教授。

昇しており、安定した価格決定が益々困難になっている。資源輸送のためのフレートも上昇しており、アジア圏の製鉄産業にとっては地理的に有利な豪州産資源の重要性が増している。

豪州から輸入される鉄鉱石の中では、ヘマタイト系の高品位低りんブロックマン (Brockman) 鉱石が枯渇してきており、結晶水含有量の多いゲーサイト (Goethite) 系の割合が高くなっている。後者には大きく分けて、ピソライト (Pisolite) 鉱石とマラマンバ (Marra Mamba) 鉱石があり、マラマンバ鉱石の一部は低りんブロックマン鉱石にブレンドされて出荷されるようになってきた¹⁾。一方、高りんブロックマン鉱石も結晶水含有量が高い鉱石であり、膨大な資源量をもち、次の主要鉄鉱石資源となる可能性が大きい。しかし、りん成分はGoethite相と共存する傾向にあることから¹⁾、分級などの物理的な方法で低減することは難しく、このような鉱石を多量に使用するためには効率的な脱りん技術の開発が必要である。

焼結層内におけるコークス粒子燃焼は層の熱履歴と構造変化に大きく影響し、歩留り、生産率、焼結鉱品質などを支配する重要な反応である。その他の発熱反応には、窒素酸化物排出制御のために使用される無煙炭、高炉ダスト中の炭素、ミルスケール中の金属鉄や低級鉄酸化物 (FeO、Fe₃O₄) などの燃焼・酸化反応がある。固定層内固体燃料の燃焼・伝熱を基本とする焼結プロセスでは、時間経過に伴い焼結層内の高温帯の厚みが増加し、プロセス進行に伴って最高温度が上昇する傾向があり、これを制御するために種々の凝結材偏析術²⁻⁶⁾が検討されてきた。最近では、層内温度履歴制御のための自由度増加のため、層頂点火後に上層からLNGなど炭化水素燃料を吹き込む技術が実用化されている^{7,8)}。製鉄産業において将来的に大きな課題とされる温室効果ガス排出削減においても、凝結材の選択や反応制御は重要な課題であり、カーボンニュートラルとされるバイオマス由来の炭材利用等も模索されている⁹⁾。本協会の「低炭素焼結技術原理の創成研究会」では、焼結プロセスからのCO₂排出量削減技術の提案を目指した産学共同研究を行っており、本年度に最終成果報告を行う予定である。

3 マラマンバ鉱石の特徴と焼結特性

一般的にマラマンバ鉱石の結晶水含有率は4～6%で、粒度0.25mm以下の微粉割合が高い。対照的に、ピソライト鉱石も7～10%の結晶水を含有する高結晶水鉱石であるが、比較的粒度が粗い。これらはいずれも多孔質構造を呈し、加熱時の結晶水分解によりさらに気孔率が増加する。現在採掘可能なマラマンバ鉱石は比較的SiO₂、Al₂O₃成分濃度が高いものも多いが、現状日本に輸入されているマラマンバ鉱石は品位が高く、結晶水を除く脈石成分濃度は低りんブロックマン鉱石に匹敵する¹⁰⁾。高りんブロックマン鉱石の結晶水含有量もマラマンバ鉱石と同様4～6%、りん濃度は0.08～0.12%である。Table 1に各鉱石の典型的な化学組成を示す。

焼結原料の造粒に寄与するのは粒子表面近傍に存在する水分であるが、マラマンバ鉱石は多孔質であるために、造粒時の粒子内吸水性が大きく必然的に必要水分量が多い。Matsumuraらは、マラマンバ鉱石の飽和吸水率 (saturation moisture) が10～11%とヘマタイト鉱石の6～8%に比較して高く、よって造粒物の点火前通気性が最大を示す最適水分率も高くなることを示した (Fig.1)¹¹⁾。Ellisらも同様の解析を行っており¹²⁾、加えて造粒物の水分と焼結層の一軸拘束圧縮強度 (uniaxial confined compression strength) の関係と極めて類似していることを報告している。一方、微粉割合が多いのにもかかわらず粘土 (カオリナイト) 成分が少ないため、造粒性は必ずしも良いとは言えないようである¹⁰⁾。

マラマンバ鉱石の昇温時には結晶水が分解し、さらに気孔が増加する。基本的にgoethiteの熱分解であることから、その挙動はピソライト鉱石と類似すると考えられる。したがって、結晶水の分解は250℃程度でスタートし、1000℃程度まで継続する。その間、極めて微細なクラックが発生するもののマクロ的な組織は維持される。GualtieriとVenturelli¹³⁾は、goethite単結晶の熱分解挙動をリアルタイムのシンクロトロンX線回折法で観察した。この際、goethite試料は250から300℃の昇温で約3/4の結晶水の分解が終了し、その後1000℃程度まで緩やかな解離が進行した。300℃付近では、非量論的なFe-O比をもつ中間相“protohematite”が生成して

Table 1 Typical composition of Australian iron ores

mass%	T. Fe	CW	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P
Low-P brockman	62-65	1-3	3-5	1-3	0.02-0.04
Pisolite	56-59	7-9	5-6	1-3	0.03-0.05
Marra Mamba	61-63	4-6	2-3	1-3	0.05-0.07
High-P brockman	61-64	3-5	2-3	1-3	0.08-0.12

おり、これは鉄原子が不足したhematite構造で、水酸基が電荷のバランスをとっている形になる。温度が上昇するにつれて、残留する結晶水が脱離すると共に徐々にhematite構造へ変化する。hematiteへの結晶変態がほぼ完了するのは石灰石の分解温度より高い1000℃付近であり、結晶水分解反応もかなり高温まで継続することになる。一方、結晶水分解反応初期に生成した微細なクラックは、900℃以上で合体を開始し、より大きなマクロクラックへ成長する。1200℃以上では、比較的短時間でマクロクラックに変化すると考えられるが¹⁴⁾、いわゆるハードヘマタイト鉱石と同等程度まで融液との反応性を抑制するためには、自己緻密化できる1350℃程度の温度が必要である¹⁵⁾。

ここで、焼結中の融液生成過程を考えてみる。一般的な焼結鉄の平均化学組成に対応する液相線温度は、CaO-SiO₂-Fe₂O₃系状態図上では1450℃を超える (Fig.2)。焼結層内の最高温度は高々1300℃程度であり、このような温度で充填構造変化を速やかに進行可能な高い流動性を持つ融液をある程度の量で確保するためには、原料中CaO成分の偏析が必須である。適当な粒度構成を持つヘマタイト鉱石を使用する場合は、細粒部分が優先的に融液化し、粗粒部分が未溶解で残留することにより、必要なCaO成分偏析がある意味自然に実現してきたものと言える。しかし、高結晶水鉄石を多量使用した場合、上述した結晶水分解時に発生するクラックのため、融液との接触面積が増大し、かなり大きな粒子でも低温で同化反応が進行する。CaO成分偏析の程度や偏析の大きさ、高結晶水鉄石の粒径等で挙動が異なって見えるものの、根本的な原因はその易同化性に集約される。マラマンバ鉄石において、「疑似粒子中付着粉を構成する細粒の融液浸透性は良好であるが、核粒子となる粗粒はCaOとの同化により空隙の多い組織構造を示す」¹⁰⁾のも、その易同化性と結晶水分

解反応が高温まで継続する性質から説明可能である。また、結晶水分解過程、易溶解性が類似するマラマンバ鉄石とピソライト鉄石であるが、両者の粒度分布が異なることから、実際の溶融挙動がかなり異なる場合があることにも留意が必要である。

高りんブロックマン鉄石はマラマンバ鉄石と基本的には同様の焼結特性を示す¹⁶⁾。これは、微粉割合が高く、多孔質で、結晶水分解により多数のクラックが発生するマラマンバと同様の特性に起因するものである。高結晶水鉄石の多量使用法に関しては、従来からいくつかの複合造粒法 (選択造粒法¹⁷⁾、分割造粒法¹⁸⁾等) が提案され、実用化されてきた。MEBIOS (Mesomosaic EmBedding Iron Ore Sintering) 法は、Fig.3に示すような焼結原料層構造を実現するための複合造粒焼結の概念である¹⁹⁾。すなわち、通常焼成条件において妥当な空隙ネットワークを形成可能な原料構成を持つ焼結誘導層中に、微粉鉄石を別途予備造粒したグリーンペレット (熟成層)

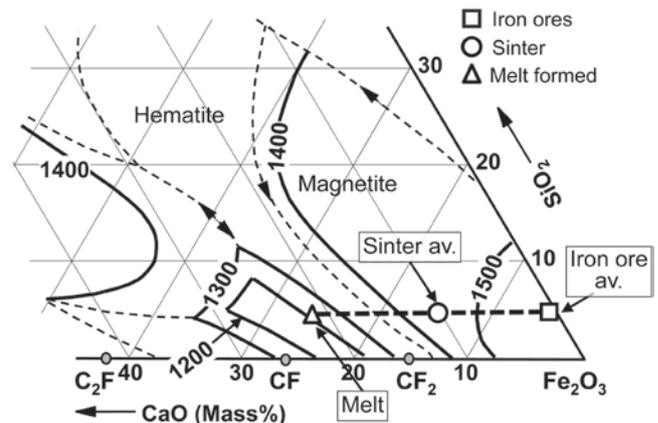


Fig.2 Average composition of iron ores, sinter and melt formed during sintering on the CaO-SiO₂-Fe₂O₃ phase diagram

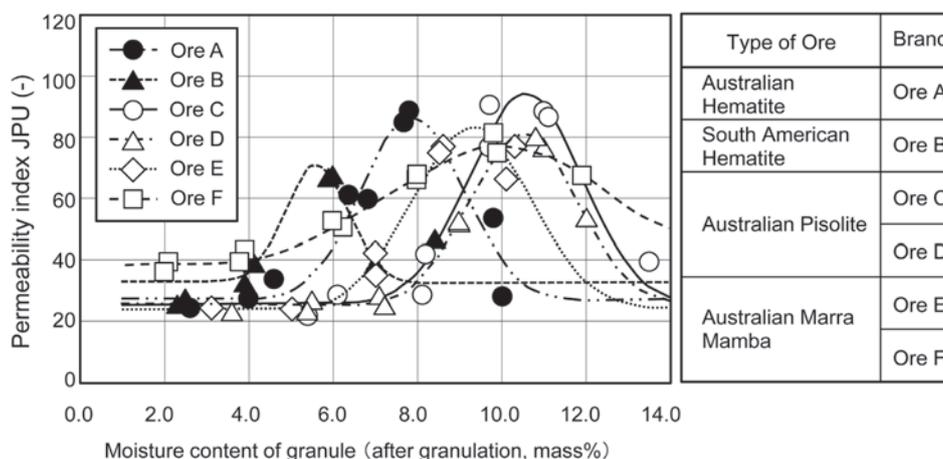


Fig.1 Relationship between moisture content ratio after granulation and packed bed permeability¹¹⁾

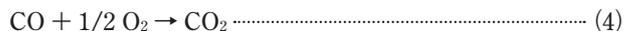
を配置するものである。この時、マランバ鉱石など高結晶水鉱石の微粉は熟成層を構成する主要鉱石と位置づけ、誘導層およびこれを通過するガスからの熱供給で塊成化を狙うものである。焼結時、熟成層には顕著な融液流動を抑制することにより、適正な空隙構造形成のための骨材的な役割を期待している。小型焼結試験機による焼成実験（一部、焼結X線CTによる焼結層構造変化のその場観察）および焼成後ペレットの強度評価の結果は、ペレットの組成および焼結誘導層の熱レベルを制御することにより、健全なグリーンペレットの焼成が可能であることを示している^{20,21)}。

以上、高結晶水鉱石使用時の過度の同化反応による焼結反応の遅延、不均一焼成、生産率、成品強度の低下等を防ぐためには、複合造粒法適用等によるCaO成分の偏析制御が有効であることを述べた。その偏析領域のサイズは、例えば選択造粒法やMEBIOS法であれば造粒した粒子の大きさ、分割造粒法であれば2種類の原料の混合の程度に依存する。前者については、造粒粒子と融液との同化性が重要であり、造粒物密度とサイズを制御でき、焼結機装入まで崩壊しない造粒法の選択・開発が不可欠である。造粒技術に関しては、最近、ドラム型造粒機に高速コンベアーを適用した粒子被覆法²²⁾、界面活性剤を用いる微粒子分散造粒法²³⁾などいくつかのユニークな研究開発事例があり、その有効性が報告されている。

4 凝結材種と焼結プロセスへの影響

コークスは灰分10%程度で揮発成分の少ない炭材である。焼結層内において、コークス粒子は上層からの高温ガスで加熱されて着火温度に到達し、燃焼を開始する。燃焼時間はコークスの粒径と賦存状態に依存し、粗粒や被覆された粒子

は燃焼継続時間が長い。コークスの表面（およびガス境界膜）温度は燃焼速度や気相雰囲気左右する重要なパラメータであるが、測定手段がなく、また精度良い推定も現在のところ難しい。



コークス燃焼の総括反応は、(1)式に若干の(2)式を加えたものである。しかし実際には、層内温度が1000℃を超えるあたりで見かけ上、コークス粒子表面のガス境界膜内ガス拡散律速になり²⁴⁾、コークス表面では(3)式のガス化反応が、ガス相内では(4)式の酸化反応が優先的に進行すると考えられる。前者は吸熱反応、後者は大きな発熱反応であり、結果としてコークス粒子およびその近傍の温度分布と履歴が決まる。従来の数学モデルでは、コークスを含む固体の粒子内温度を均一、代表反応を(1)と仮定して表面の化学反応とガス境界膜内物質移動を直列抵抗とみなして計算するのが一般的である。したがって、燃焼熱の固体（融体）とガスへの分配は、ある程度任意にならざるを得ない。確かに、高温では物質移動が支配的になるため、このような計算で得られる固体代表温度と実際のコークス表面温度の差は、総括燃焼速度にあまり影響しない可能性もある。一方で、この差が排ガス中のCO濃度やNOxの生成・分解反応など、環境保全事項に関連する反応に及ぼす影響が無視できない可能性を指摘したい。

燃焼中のコークス粒子温度に影響を与える因子は極めて複雑である。上記(1)～(4)の各反応による吸発熱、ガスとの熱交換、コークス表面あるいはCO₂など赤外吸収ガスからの輻射、付着粉層や融液を介する伝熱など、考慮すべきルートは複雑である。従来、このような系の熱移動現象を定量的に解いた例は見当たらず、最近のコンピュータ計算能力向上を考慮すれば、粒径差、付着粉層の有無などの影響を表現可能な数学モデルへのチャレンジも意義あるものとする。

コークスの燃焼は表面反応であるため、被覆粉層の有無等の条件によって燃焼速度が大きく変化する²⁵⁾。しかし、被覆粉層が高温で熔融し、コークス表面から離脱する場合、高温で燃焼速度が回復すると予想される²⁶⁾ (Fig.4)。これは、被覆粉層の組成制御によってコークスの燃焼速度が制御可能であることを示す。一方、微粉コークスが微粉鉱石と混合した状態で存在する場合には、昇温中に熱炭素還元反応が進行すると

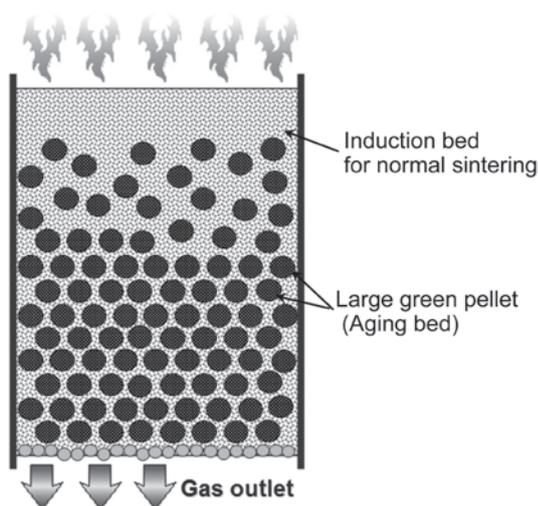


Fig.3 Concept of bed-structure for MEBIOS sintering

予想される。この場合、初期の発生熱量は低下するが、生成した低級鉄酸化物が冷却時に再酸化すれば、トータルの発熱量は同じである。これは、前述した焼結層熱履歴の緩和効果の原理であり、融液からの凝固時の冷却速度に直接影響することから、焼結組織への影響も無視できないと考えられる。

コークスは燃焼後、わずかな灰分を残し消失して空隙となるため、特に粗粒の層内分布が層構造変化に影響する。コークスに比較してバイオマス炭の見掛け密度は小さく、燃焼後の空隙増加も大きいことから、その使用は焼成速度を大幅に増加する。一方、ミルスケール等に含有される金属鉄やFeO、Fe₃O₄など低級鉄酸化物²⁷⁾、スチール缶チップ²⁸⁾、部分還元鉄粉²⁹⁾、マグネタイト鉱石なども焼成時に酸化発熱し、凝結材として機能することが実機規模の試験で実証されている。しかし、コークスと異なりいずれも発熱後の体積消失による空隙増加は望めず、むしろ酸化に伴う体積増加が起こるために相対的な通気性が低いことから生産率の低下が指摘されている。

焼成速度に関し、Nakanoら³⁰⁾はガスと固体の温度が等しく、FFS (Flame Front Speed, 火炎伝搬速度) およびTmax (焼結層最高温度) が一定な定常Heat Waveを仮定して焼結層熱履歴の解析解を求め、その特徴を検討している。これによると、FFSはコークスの燃焼速度に無関係で、ガス流速のみの関数として示されている。一方、Yangら³¹⁾は、鍋実験と数値シミュレーションにより、コークスと無煙炭の比較を行っており、凝結材の反応性 (reactivity) は上層部のFFSとTmaxに顕著に影響し、下層では粒径が燃焼継続時間への影響を通して高温帯の厚さに影響することを報告している。Lovelら³²⁾は、異なるコークス、バイオマス炭、コールチャーなど、異なる凝結材を使用して鍋試験を行い、700-800℃におけるCO₂との反応性とFFSに正の相関関係があることを報告している。しかし、彼らの試験鍋 (150mmφ×150H) が焼成速度の定量評価に十分であるか疑問があること、また、3900Pa (約390mmH₂O) の負圧一定での試験であることから、凝結材の性質 (特に、見かけ密度や形状) がガス流速に顕著

に影響した結果である可能性が強いことから、更なる検討が必要である。事実、彼らの凝結材密度とFFSには明確な負の相関が確認できる。

焼結層流通ガスにLPGなどガス燃料を添加し、凝結材の一部を代替する方法も検討され、実用化されている^{7,8)}。この場合、LPGの燃焼は比較的低温で開始するため、酸素濃度の高いHB (Heat Behind, 高温帯冷却部) の箇所で行われる。よって、コークス等固体の燃焼が終了した後に、焼結層 (熔融帯あるいは焼結完了帯) にガス燃料の燃焼熱が与えられることになる。ここで、ガス燃料で導入された熱量分の固体凝結材を低減すればトータル入熱は同一となり、ガス燃料導入の効果は熱履歴のプロード化 (Tmax低下および高温保持時間の延長) として得られる。大山らは、生産率一定の条件 (および成品強度および被還元率上昇) 下で、LPGとコークスのエネルギー基準置換率は約1/4になることを報告しており、コークスのみではTmaxが高すぎる一方、高温保持時間が短すぎるケースの制御に極めて有効であることがわかる。また、通常下層が熱過剰になりやすい焼結プロセスにおいて、熱の投入箇所および投入量の自由度を高める手段として魅力的な方法である。現状は熱不足になりやすい最上層部への適用が難しいが、点火炉と連続した制御や重油やエタノールなど液体燃料の使用や酸素富化との併用も含め、発展が期待できる技術と言える。

5 凝結材に関して検討すべき視点

(1) 焼成に必要な空気比

実機焼結機には漏風もあり、排ガス中のO₂濃度は～14%程度とかなり高い。一方、サンドシールを施した焼結鍋の排ガスは、定常値でO₂ 10%、CO₂ 18%程度の濃度になっている³²⁾。佐藤らは固定炭素基準で3.0%のコークスを配合した原料で、20mm/minのFFSに制御した鍋試験の結果に基づき、焼成ガスバランスを推算した (Table 2)³²⁾。トータルの排ガス量に比較してFF (Flame Front) が焼結層最下部に到達するまでに吸引された空気量は高々54.9%であり、実際にコークス燃焼に使用された空気は32.6%にすぎない。FF到達時点までに吸引された空気量のうち燃焼に使用された割合 (有効空気比) は59.4%であり、吸引空気の約4割はそのまま排出していることになる。有効空気比に対しては、コークスの配合率、粒度分布、賦存状態、ガス流速、その結果得られる温度履歴等が影響すると考えられるが、制御可能とすればどの程度の範囲で変化するのか、制御する意義を含め、精査が必要なパラメータである。仮に、焼成状態を大きく変化させずに有効空気比を上昇できれば、吸引空気流量の低下や層高上昇など大きなメリットが期待できる。

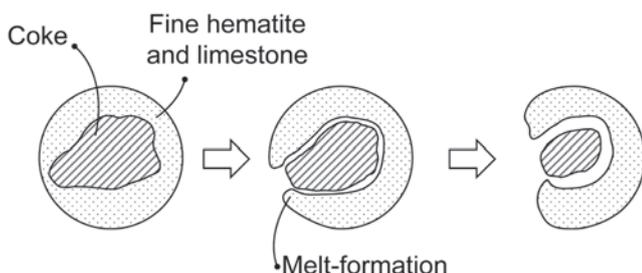


Fig.4 Change in the existing state of coke granules during its combustion

(2) 凝結材の反応熱および反応に必要な酸素比

凝結材の反応熱は上述の空気比と並び重要なパラメータである。Table 3に各凝結材および物質の単位重量当たりの発熱量、反応に必要な酸素量、単位酸素消費量当たりの発熱量をそれぞれ比較して示す(佐藤らのデータ³²⁾に加筆)。単位重量当たりの発熱量はメタン、A重油が大きく、メタノールやコークスがそれに続く。金属鉄、FeO、それらを含有するミルスケールの発熱量は一桁小さい値である。しかし、反応する酸素量当たりの発熱量は、逆に金属鉄やミルスケールがかなり大きい値を示す。吸引空気中酸素の効率的な使用の見地からは、金属鉄や低級鉄酸化物がコークスやガス燃料より有利ということもできる。

一方、メタン、メタノール、重油などの気体・液体燃料は、単位酸素消費量当たりの発熱量ではコークスと同等である。それぞれ燃焼のタイミングが異なることから、必要に応じた使い分けができれば、焼結操作の自由を拡大できるものと期待できる。

また、コークスなど炭材には、排ガス中に0.6~1%程度のCOが発生する問題があり、バイオマス炭等、特に反応性の高い炭材でこれがさらに高くなる可能性を指摘しなければならない。焼結層内のバルクガス流中での迅速な攪拌による反応促進が必要であるが、有効な手段は不明である。上述した凝結材自由度の拡大目的を含め、吸引空気への酸素付加は面白い試みの一つである。また、ハード的には困難が伴うが、層内通過ガス流を上下方向に揺動(flow-swing)できれば、COその他の未燃物を高温層で再燃焼できるはずであり、基礎的にでも試みる必要があると考えている。

(3) 焼結層通気性の制御・改善法

原料層の点火前通気性と焼成中の通気性には、ある程度の正の相関がある。これは、原料層の空隙率や空隙構造が多少引き継がれて、熔融帯や焼結完了帯構造に変化していくことを示唆する。Loo & Hutchens³³⁾は、原料層通気性と焼成時通気性の差分を高温帯の通気性と見なして、異なる鉱石や

Table 2 Gas balance obtained by a sinter-pot test in Nm³/ton-mixture(vol%) (F.C. 3%, FFS mm/min)³²⁾

Air used for combustion	220 (32.6)
Other air	150 (22.3)
Sucked air (till FFP)	370 (54.9)
Formed gases (decomposed CO ₂ , H ₂ O)	120 (17.8)
Gas volume till FFP	490 (72.7)
Gas volume after FFP till BTP	184 (27.3)
Gas volume through bed	674 (100)
Leak gas volume	70
Total outlet gas volume	744

Table 3 Amounts of heat generation and required oxygen for the reaction of different agglomeration agents³²⁾ (Some data were added by the author)

Agglomeration agent	Heat of oxidation A (MJ/kg)	Required O ₂ B (kg-O ₂ /kg)	A / B (MJ/kg-O ₂)	Remarks
Coke*	23.9	1.92	12.4	F.C. 85%, CO 10% Unreacted C 10%
Mill scale*	2.83	0.13	21.6	M.Fe 21.2%, FeO 65% Oxidized to Fe ₃ O ₄
M. Fe	7.39	0.43	17.1	Oxidized to Fe ₂ O ₃
FeO	2.62	0.14	18.7	Oxidized to Fe ₂ O ₃
Fe ₃ O ₄	0.70	0.047	14.9	Oxidized to Fe ₂ O ₃
CH ₄	55.5	4.00	13.9	
C ₂ H ₅ OH	29.7	2.08	14.3	
Heavy oil A	45.2	3.26	13.8	C 85%, H 13%, S 2%

* S. Sato et al.: Transaction ISIJ, 28(1988), 705-713

石灰石配合率（塩基度）等での鋼試験を行い、その結果から Sinterability というパラメータを導入して FFS 等の整理を試みている。ここでも指摘されているように、点火前通気性が同程度であっても、コークスや石灰石配合量、コークス粒度等の違いで焼結過程の通気性が異なる。熱源であり新たな空隙形成起点となるコークス粒子の機能、融液生成が構造変化を促進する現象等を裏付ける結果である。

バイオマス炭に関しては、コークスに比較して見かけ密度が小さく、形状係数も小さいケースが多いと考えられ、通気性はあまり問題にならないものと推察する。むしろ、焼成後ケーキの嵩密度が小さすぎて歩留りや焼結鉱強度が低下することが問題であり、見かけ密度の上昇策の検討が必要かもしれない。一方、ミルスケールやスチール缶チップなどの金属鉄や低級鉄酸化物を含有する凝結材の場合は、焼成中の通気性改善が必須の課題である。焼結層の通気性改善に関連し、高温で焼失する物質を焼結層内に配置するユニークな試みも行なわれている³⁴⁾。金属鉄や FeO は、 Fe_3O_4 、さらに Fe_2O_3 へと酸化されるが、すなわちこれにより付近の化学組成（例えば、 CaO/Fe_2O_3 比）が変化し、発生融液の性状に大きな影響を及ぼす。このような組成変化を予め考慮した原料設計は、この問題へのアプローチ法の一つと考える。また、通気性が高いバイオマス炭との併用も考えられる。

6 「おわり」に代えて

低炭素焼結技術原理の創成研究会では、鉄鉱石焼結プロセスにおける CO_2 排出量削減の可能性を定量的に検討し、具体的な技術原理提案の基礎を提供するために、基礎的検討を中心に産学共同研究を行っている。上述したようなバイオマス炭や金属鉄、鉄低級酸化物を使用する際のデメリットを克服し、環境に配慮したプロセス原理の提案が最終目的である。Fig.5 に本研究会の中間報告会で紹介した高結晶水鉱石改質と CO_2 排出削減が両立可能な低炭素焼結技術の概念図を示す。バイオマス炭化の際に副成する比較的熱量の低いガスを利用し、鉱石の脱結晶水と FeO レベルまでの還元による改質を行い、さらに密度が低いバイオマス炭と通気性悪化をもたらす低級鉄酸化物それぞれの欠点を、両者を複合利用することによりメリットに転化しようとする意欲的なプロセスである。さらに、鉄鉱石の予備還元を利用した後の排ガスを焼結層に吹込むことで、徹底的な省エネルギーを行う狙いもある。本プロセスを実現するためには、バイオマス炭と FeO 系凝結材それぞれの反応解析、両者の最適配合や造粒設計、適正な偏析装入などクリアすべき課題は多く、研究会メンバーがそれぞれの課題について鋭意検討を続けている。

大きく変化する鉱石性状にあわせて複雑な焼結プロセスを

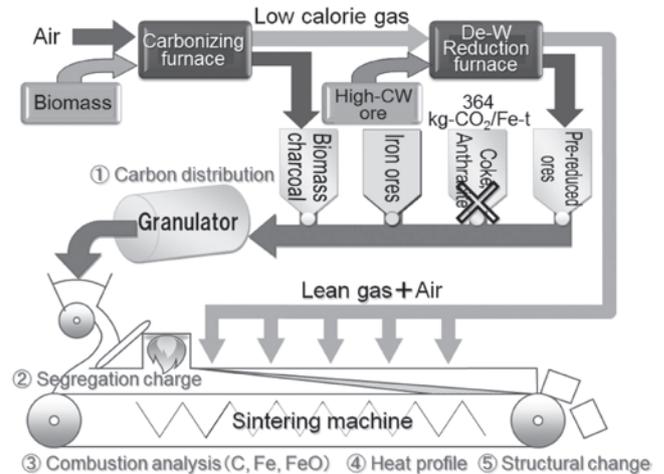


Fig.5 A process image of iron ore sintering with minimum carbon dioxide emissions

効率的に制御するためには、多くの基礎検討結果を踏まえた総合解析が不可欠であり、産学共同研究の意義は大きい。安定かつ効率的な高炉操業のためにも鉄鉱石塊成予備処理の研究は重要と認識しており、今後一層のご指導、ご支援をお願いしたい。

参考文献

- 1) K.Nagano : Tetsu-to-Hagané, 90 (2004) , 51.
- 2) T.Takai, S.Kishimoto, A.Sakai, H.Sato, O.Komatsu and H.Noda : CAMP-ISIJ, 6 (1993) , 916.
- 3) M.Fujimoto, T.Inazumi and K.Sato : Ironmaking Conference Proc., Detroit, USA, 49 (1990) , 589.
- 4) N.Oyama, K.Nushiro, K.Igawa, N.Fujii and K.Nakashima : Ironmaking Conference Proc., Baltimore, USA, 60 (2001) , 817.
- 5) M.Matsumura, T.Kawaguchi, K.Oone and K.Imagawa : CAMP-ISIJ, 15 (2002) , 702.
- 6) S.Machida, T.Higuchi, N.Oyama, H.Sato, K.Takeda, K.Yamashita and K.Tamura : ISIJ Int., 49 (2009) , 667.
- 7) N.Oyama, Y.Iwami, M.Sato, K.Takeda, H.Nishioka and M.Shimizu : CAMP-ISIJ, 22 (2009) , 837.
- 8) N.Oyama, Y.Iwami, T.Yamamoto, S.Machida, T.Higuchi, H.Sato, M.Sato, K.Takeda, Y.Watanabe, M.Shimizu and K.Nishioka : ISIJ Int., 51 (2011) , 913.
- 9) R.R.Lovel, K.R.Vining and M.Dell'amico : ISIJ Int., 49 (2009) , 195.
- 10) 岡崎潤, 樋口謙一, 中野正則 : 新日鉄技報, 384 (2006) , 20.
- 11) T.Matsumura, T.Maki, S.Amano, M.Sakamoto and

- N.Iwasaki : ISIJ Int., 49 (2009) , 618.
- 12) B.G.Ellis, C.E.Loo and D.Witchard : Ironmaking and Steelmaking, 34 (2007) , 99.
- 13) A.F.Gualtieri and P.Venturelli : American Mineralogist, 84 (1999) , 895.
- 14) C.E.Loo, L.T.Matthews and J.Ostwald : Trans. Institution of Mining and Metallurgy, Section C., 101 (1992) , 129.
- 15) Y.Hida, J.Okazaki, K.Nakamura, K.Uekawa and N.Kasai : Tetsu-to-Hagané, 78 (1992) , 1021.
- 16) N.Oyama, T.Higuchi, S.Machida, H.Sato and K.Takeda : ISIJ Int., 49 (2009) , 650.
- 17) T.Haga, A.Oshio, K.Nakamura, T.Kozono and K.Uekawa : Tetsu-to-Hagané, 83 (1997) , 103.
- 18) T.Kawaguchi, K.Kuriyama, S.Sato and K.Takada : Tetsu-to-Hagané, 73 (1987) , 1924.
- 19) N.Hayashi, S.V.Komarov and E.Kasai : ISIJ Int., 49 (2009) , 681.
- 20) E.Kasai, S.Komarov, K.Nushiro and M.Nakano : ISIJ Int., 45 (2005) , 538.
- 21) T.Otomo, Y.Takasaka and H.Sato : ISIJ Int., 49 (2009) , 659.
- 22) N.Oyama, H.Sato, K.Takeda, T.Ariyama, S.Masumoto, T.Jinno and N.Fujii : ISIJ Int., 45 (2005) , 817.
- 23) S.Kawachi and S.Kasama : ISIJ Int., 49 (2009) , 637.
- 24) 葛西栄輝, 武富洋文, 大森康男 : 東北大学選研彙報, 40 (1984) , 61.
- 25) Y.Hida, M.Sasaki, T.Enokido, Y.Umezu, T.Iida and S.Uno : Tetsu-to-Hagané, 68 (1982) , 400.
- 26) E.Kasai and Y.Omori : Tetsu-to-Hagané, 72 (1986) , 1537.
- 27) K.Takahira, N.Fujii and Y.Konoshi : CAMP-ISIJ, 8 (1995) , 913.
- 28) M.Fujimoto, T.Inazumi and Y.Okuno : CAMP-ISIJ, 7 (1994) , 143.
- 29) M.Nakano, T.Yamakawa, N.Hayakawa and M.Nagabuch : ISIJ Int., 38 (1998) , 16.
- 30) M.Nakano, K.Katayama and S.Kasama : ISIJ Int., 50 (2010) , 1054.
- 31) W.Yang, S.Choi, E.S.Choi, D.W.Ri and S.Kim : Combustion & Flame, 145 (2006) , 447.
- 32) S.Sato, T.Kawaguchi and M.Kato : Transaction ISIJ, 28 (1988) , 705.
- 33) C.E.Loo and M.F.Hutchens : ISIJ Int., 43 (2003) , 630.
- 34) K.Ichikawa, S.Machida, K.Nushiro, H.Sato and K.Takeda : Tetsu-to-Hagané, 92 (2006) , 794.

(2012年5月8日受付)



入門講座

鋼の防錆・防食技術-5

鋼中への水素吸収の電気化学と水素脆化

Electrochemical Analysis of Hydrogen Absorption into Steels and Hydrogen Embrittlement

東京工業大学大学院 理工学研究科
准教授

多田英司
Eiji Tada

東京工業大学
名誉教授

水流 徹
Tooru Tsuru

1 はじめに

近年、CO₂など温室効果ガスの排出量削減目標が掲げられるなど、地球環境保全が全世界的に叫ばれており、それに關わるあらゆる分野に省資源、省エネルギー化が求められている。当然、鉄鋼材料の製造や鋼構造物の維持管理においても例外ではない。鉄鋼分野における一つの方策として、高強度、軽量化による鉄資源使用量の削減と燃費向上を中心としたエネルギー削減が計られている。鉄鋼材料の最大の特徴として、元素添加、熱処理、加工を組み合わせることで材料特性を变幻自在に変えることができるので、鉄鋼材料の高強度、高靱性化はDP鋼やTRIP鋼などに見られるようにこれまで継続的に進められている¹⁾。最近話題となっている東京ゲートブリッジや東京スカイツリーなどの超巨大鋼構造物が実現できたのも、高強度鉄鋼材料の開発があったからこそである。

しかし、高強度鉄鋼材料の欠点として、鋼材内に吸収された水素によって遅れ破壊をはじめとする水素脆化感受性が高くなることが挙げられる²⁾。また、鉄鋼材料の多くは大気環境で使用されるため、水素圧力容器など特殊環境を除くと、水素源として、大気腐食反応にともない発生する水素が極めて重要であるといわれている³⁾。

本稿では、はじめに、水溶液環境におかれた金属材料表面で起こる水素発生・吸収反応の電気化学的取り扱いについて概説し、次いで腐食反応にともなう水素吸収と水素による鋼材の脆化について簡単に述べたいと思う。

2 金属表面における水素発生反応と水素吸収反応

2.1 水素発生反応

水の電位-pH図⁴⁾からわかるように、1atmの常温大気環境において、水は1.23V幅の安定領域を有している。この領

域においては、水素イオン(ヒドロニウムイオン)、水酸化物イオン、水分子が安定に存在できるが、その領域の下限と上限を超えると、それぞれ水素および酸素が発生することになる。

例えば、酸性水溶液中において、水素が発生する水素電極反応は式(1)で示される。これは、金属表面におけるヒドロニウムイオンの還元反応である。

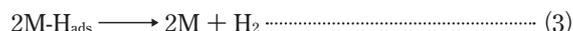


この反応は、図1に示すようにいくつかの素反応の組み合わせからなっている。すなわち、水溶液の沖合から金属表面へのヒドロニウムイオンの拡散(①)、金属表面でのヒドロニウムイオンの放電反応による吸着水素原子の生成(②)、吸着水素原子から水素分子の生成(③)である。

これらのうち、吸着水素原子の生成反応はVolmer反応(電気化学反応、図中E)とよばれ、式(2)で表される。金属表面をMで表すと、



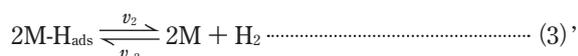
となる。また、吸着水素原子M-H_{ads}から水素分子が生成する反応には、式(3)および式(4)の2種類がある。これらは、吸着水素原子から水素分子の生成する反応が、化学反応(C)によるか放電反応(E)によるかで区別され、それぞれ



である^{5,6)}。式(3)、(4)は、それぞれTafel反応(C)、Heyrovsky反応(E)とよばれている。よって、式(1)の水素分子の生成反

応は、Volmer反応からTafel反応を経る過程、もしくはVolmer反応からHeyrovsky反応を経る過程のいずれかで進行することになる。このとき、その反応の速度は、各素過程の反応速度で決まることになる。

今、水素分子の生成が、Vomer反応からTafel反応を経る過程によって進行し、さらにVolmer反応が律速段階 (Rate-determining step, r.d.s.) にあるときを考える⁷⁾。このとき、水素発生反応は、



となる。ここで、式(2)'および式(3)'の右向き、左向きの反応速度をそれぞれ v_1 、 v_2 、 v_{-1} 、 v_{-2} とし、さらに、式(3)'で生成した水素分子が電極表面から速やかに除去されるとする。また、式(2)'の反応1回で1個のM-H_{ads}が形成するので、 v_2 は、

$$v_1 - v_{-1} = 2v_2 \dots\dots (5)$$

と表される。よって、この反応過程によって観測される電流密度*i*は、

$$i = F(v_1 - v_{-1}) = 2Fv_2 \dots\dots (6)$$

となる。ただし、*F*はファラデー定数 (96485C/mol) である。つぎに、式(2)'および(3)'の右向き、左向きの速度定数をそれぞれ k_1 、 k_2 、 k_{-1} 、 k_{-2} として、式(6)の中身を表現する。今、対称因子を β ($0 < \beta < 1$)、M-H_{ads}の表面被覆率を θ とすれば、式(5)より

$$k_1(1-\theta) a_{H_3O^+} \exp\left(-\frac{\beta FE}{RT}\right) - k_{-1}\theta \exp\left(\frac{(1-\beta)FE}{RT}\right) = 2k_2\theta^2 \dots\dots (7)$$

となる。ただし、*R*はガス定数 (8.3145J/molK)、*T*は絶対温度、 $a_{H_3O^+}$ は、ヒドロニウムイオンの活量、*E*は電極電位である。ここで、電極電位*E*は、平衡電極電位を*E*_c、過電圧を η とすれば、

$$E = E_c + \eta \dots\dots (8)$$

であるので、式(7)は、

$$k'_1(1-\theta) - k'_{-1}\theta = 2k_2\theta^2 \dots\dots (9)$$

と表すことができる。ただし、簡単のため

$$k'_1 = k_1 a_{H_3O^+} \exp\left(-\frac{\beta FE_c}{RT}\right) \exp\left(-\frac{\beta F\eta}{RT}\right) \dots\dots (10)$$

$$k'_{-1} = k_{-1} \exp\left(\frac{(1-\beta) FE_c}{RT}\right) \exp\left(\frac{(1-\beta) F\eta}{RT}\right) \dots\dots (11)$$

と置き換えた。

また先に述べたように、式(2)'の反応が律速段階にあり、 $k_2 \gg k'_1, k'_{-1}, 1 - \theta \doteq 1$ として、式(9)を整理すると、

$$\theta \approx \sqrt{\frac{k'_1}{2k_2}} \dots\dots (12)$$

となる。よって、電流密度は、

$$i = 2Fk_2\theta^2 = Fk_1 a_{H_3O^+} \exp\left(-\frac{\beta FE_c}{RT}\right) \exp\left(-\frac{\beta F\eta}{RT}\right) \dots\dots (13)$$

と導かれる。

式(13)からは様々な水素電極反応パラメータを求めることができる。例えば、Tafel勾配*b*_cは、

$$b_c = \left(\frac{\partial \eta}{\partial \log i}\right)_{pH} = -\frac{2.303RT}{\beta F} \dots\dots (14)$$

であるから、*T* = 298K、 $\beta = 0.5$ とすれば、*b*_c \doteq -120mV/decとなる。また、水素発生電流のpH依存性 ($\partial \log i / \partial pH$) _{η} は、

$$\left(\frac{\partial \log i}{\partial pH}\right)_{\eta} = -1 \dots\dots (15)$$

と求められる。さらに、吸着水素原子の表面被覆率 θ について、その過電圧および電流依存性は、それぞれ、

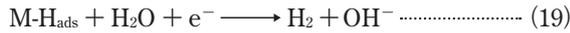
$$\frac{\partial \log \eta}{\partial \log \theta} = -\frac{2.303RT \times 2}{\beta F} \doteq -240 \text{ (mV/dec)} \dots\dots (16)$$

$$\frac{\partial \log \theta}{\partial \log i} = 0.5 \dots\dots (17)$$

となる。

以上から、水素発生反応の素過程の組み合わせと律速段階を決めることにより、いくつかの重要な反応パラメータを求めることができる。そして、実際に測定される反応パラメータと理論解析のパラメータとを比較することにより、金属表面における水素発生反応の素過程の詳細を推定することが可能となる。

ところで、上記の解析例では酸性水溶液中における水素発生反応を取り上げた。しかし、中性からアルカリ性水溶液中では、ヒドロニウムイオン濃度が低いため、Volmer反応およびHeyrovsky反応は、それぞれ式 (18)、式 (19) で表される水の還元反応となる。



この場合においても、先の酸性水溶液中での解析と同様に、各種パラメータを求めることができる。表1に、酸性からアルカリ性水溶液中における水素発生反応パラメータを整理して示す。後の2.3節において、実際に得られた反応パラメータを利用して水素発生反応機構を検討する。

2.2 吸着水素原子の吸収反応

図1のVolmer反応で生成した吸着水素原子の大部分は、Tafel反応もしくはHeyrovsky反応によって水素分子となり、金属表面から脱離していく。しかし、一部の吸着水素原子は金属表面直下の金属内部 (Sub-surface) に吸収される (図1)⁵⁾。



このとき、右向きおよび左向きの反応速度を、 v_3 、 v_{-3} 、速度定数を k_3 、 k_{-3} とすれば、水素吸収反応速度 v_{ab} は、

$$v_{ab} = v_3 - v_{-3} = k_3 \theta C_{ad}^0 - k_{-3} C_{ab} \dots\dots\dots (21)$$

となる。ただし、 C_{ab} は吸収水素濃度、 C_{ad}^0 は吸着水素原子の飽和濃度である。すなわち、この速度 v_{ab} でもって水素原子が金属内部に吸収されることになり、遅れ破壊など水素脆化の原

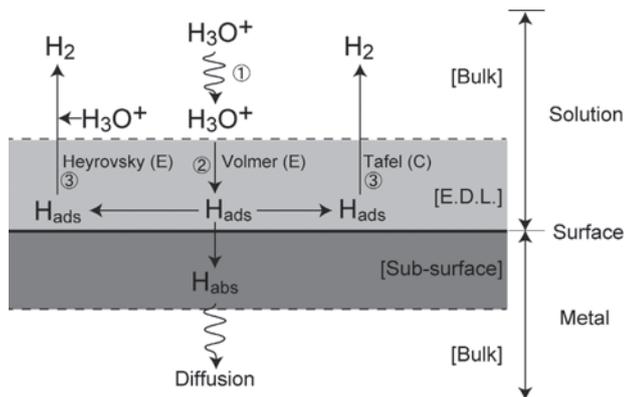


図1 水溶液中における金属表面での水素発生反応と水素吸収反応

因となる。

金属内部に吸収された水素量を測定するにはいくつかの方法がある。そのうち、装置が簡便で、その場測定できる電気化学的水素透過法 (Devanathan法) がよく利用されている^{8,9)}。この方法では、図2に示すように、2つの容器で金属の板材を挟み、その両側で別々に電気化学的条件を制御できる電気化学セルを構成する。水素吸収側セル (右側) では、カソード分極もしくは腐食反応にともなって発生した水素の一部が金属内部に吸収される。吸収された水素は、金属内部を拡散して、引き出し側セル (左側) の金属表面に到達する。そこで、到着した水素原子が速やかに酸化されてヒドロニウムイオンになるようにアノード分極すれば水素透過電流が測定され、水素吸収量や水素拡散係数の推定に利用することができる。電気化学的水素透過法の詳細ならびに数学的取り扱い、多くの解説があるのでそれらを参照していただきたい¹⁰⁾。

電気化学的水素透過法で求められる水素透過電流は、金属内部における水素の拡散速度として考えることができる。よって、水素引き出し側セルにおいて速やかに酸化反応が起こるように制御すれば、水素透過電流 i_p は、Fick'sの第1法則より、

$$i_p = -FD_H \left(\frac{\partial C_{ab}}{\partial x} \right) = \frac{FD_H C_{ab}}{L} \dots\dots\dots (22)$$

で表されることになる。ただし、 L は金属板材の厚さである。このときの金属内部の水素濃度プロファイルを描くと図3の様になる。

一方、金属内部における吸収水素原子の拡散が、式 (20) の反応と比べて十分に遅いとすれば、吸着水素原子と吸収水素

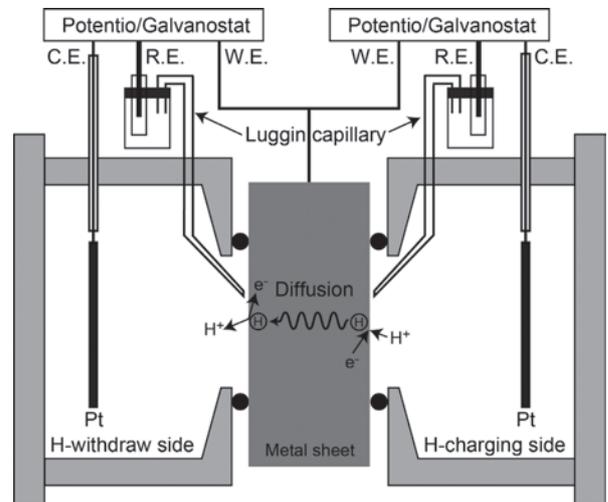


図2 電気化学的水素透過試験法 (Devanathan法) の模式図

原子の間の吸収反応が平衡とみなせるので、式 (21) は、

$$K\theta C_{ad}^0 - C_{ab} = 0 \dots\dots\dots (23)$$

と書き換えることができる。ただし、 $K (= \frac{k_3}{k_{-3}})$ は平衡定数である。よって、吸収水素濃度は、

$$C_{ab} = KC_{ad}^0\theta \dots\dots\dots (24)$$

となり、 K および C_{ad}^0 を定数とすれば、表面被覆率に比例することになる。結果、式 (24) を式 (22) に代入すれば水素透過電流は、

$$i_p = \frac{FD_H KC_{ad}^0\theta}{L} \dots\dots\dots (25)$$

と表わすことができる。

2.3 鋼表面での水素発生反応と水素吸収

矢澤らは、異なるマルテンサイト比率 (0%Mおよび95%M) を有する炭素鋼を用いて、電気化学的水素透過法により水素発生反応および水素吸収反応を調査した。図4は、pH4に調整したリン酸緩衝溶液中におけるカソード電流と水素透過電流の結果である¹¹⁾。水素発生反応のTafel勾配 b_c は、0%Mで-100mV/dec、95%Mで-120mVと報告されている。また、図5(a)の水素透過電流の電位依存性は、0%Mで-240mV/dec、

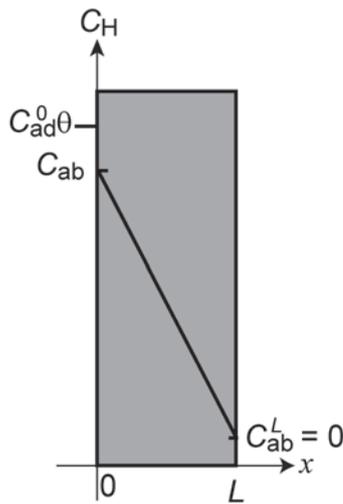


図3 Devanathan法における金属/水溶液界面および金属内部における水素濃度プロファイル

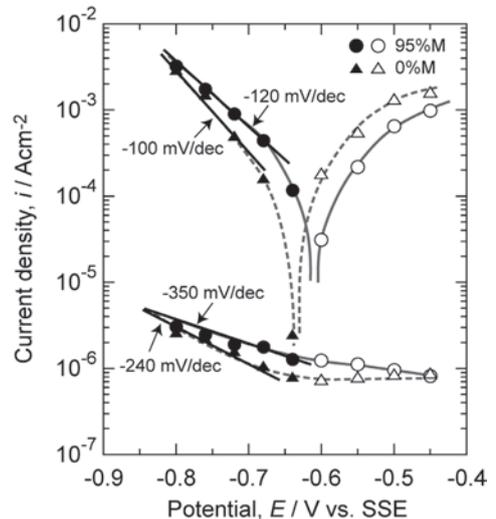


図4 マルテンサイト比率が異なる鋼材の水素発生電流 (i_c) と水素透過電流 (i_p) の電位依存性¹¹⁾

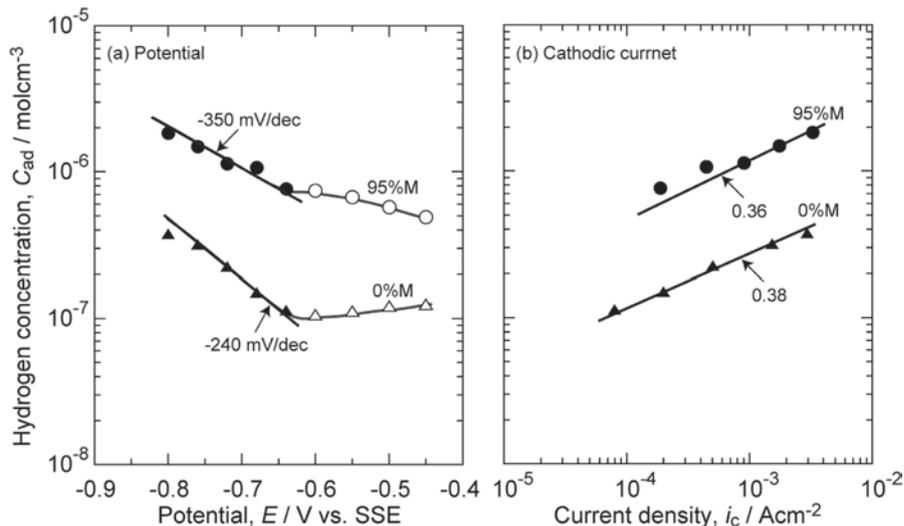


図5 水素透過電流から計算された鋼材の表面水素濃度に対する電位 (a) およびカソード電流 (b) の影響¹¹⁾

95%Mで-350mV/dec、カソード電流依存性は0%Mで0.38、95%Mで0.36と0.5に近い値が見積られている。これらのデータを表1の反応パラメータと比較すると、いずれの材料でも水素発生反応がVolmer反応が律速段階で後続反応がTafel反応の場合(A-1)か、Volmer反応とTafel反応が混合律速になっている場合(A-5)に近いといえる。また、水素発生反応機構が、マルテンサイト比率にあまり依存しないことが示唆された。

ここで、Volmer反応とTafel反応が混合律速にあるとき、水素発生電流*i_c*と水素透過電流*i_p*の比をとると、式(25)から、

$$i_p/i_c = \frac{D_H K C_{ad}^0}{L} \sqrt{\frac{a_{H_3O^+}}{2k_1 k_2}} \exp\left(\frac{\beta F E_c}{2RT}\right) \exp\left(\frac{\beta F \eta}{2RT}\right) \dots\dots\dots (26)$$

となる。ゆえに、

$$\log(i_p/i_c) = const. + \frac{\beta F \eta}{2.303 \times 2RT} \dots\dots\dots (27)$$

が導かれる。すなわち、*i_p*/*i_c*を水素吸収効率とすると、そのTafel勾配*b_p*は、

$$b_p = \frac{2.303 \times 2RT}{\beta F} = -2b_c \dots\dots\dots (28)$$

となり、水素発生反応のTafel勾配*b_c*の-2倍となる。図6は、

図4より求めた水素吸収効率*i_p*/*i_c*を電極電位に対して片対数プロットしたものであるが、0%Mのとき170mV/dec、95%Mのとき200mV/decとなり、おおよそ実験結果が式(28)の関係を満たしているといえる。よって、カソード分極が大きくなるにつれて水素発生反応および水素吸収反応も加速されるが、水素発生反応の加速率が水素吸収反応のそれよりも高いため、結果として水素吸収効率が低下することになる。例えば、図4および図6より、電位が-0.8Vから-0.65Vに増加すると、水素発生電流が約1.5桁減少するのに対して、水素

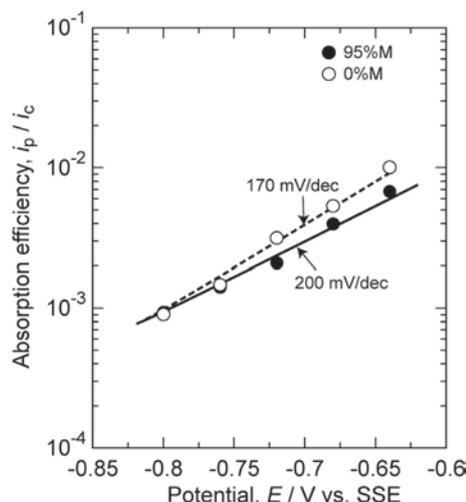


図6 マルテンサイト比率の異なる鋼材に対する水素吸収効率の電位依存性

表1 水素発生反応機構とその電極反応パラメータ

No.	H ₂ evolution reaction	$\left(\frac{\partial \eta}{\partial \log i}\right)_{pH}$ (mV/dec)	$\left(\frac{\partial \log i}{\partial pH}\right)_\eta$	$\frac{\partial \log \theta}{\partial \log i}$	$\frac{\partial \eta}{\partial \log \theta}$ (mV/dec)	$\frac{\partial \log \theta}{\partial pH}$
A-1	Volmer(r.d.s.) → Tafel	-120	-1	0.5	-240	-0.5
B-1		-120	0	0.5	-240	0
A-2	Volmer → Tafel(r.d.s.)	-30	-2	0.5	-60	-1
B-2		-30	-2	0.5	-60	-1
A-3	Volmer(r.d.s.) → Heyrovsky	-120	-1	1	-	0
B-3		-120	0	1	-	0
A-4	Volmer → Heyrovsky(r.d.s.)	-40	-2	1	-60	-1
B-4		-40	-1	1	-60	-1
A-5	Volmer → Tafel (Coupled)	-120	-1	0.5	-240	-0.5
B-5		-120	0	0.5	-240	0
A-6	Volmer → Heyrovsky (Coupled)	-120	-1	1	∞	0
B-6		-120	0	1	∞	0

A: 酸性水溶液中, B: 中性からアルカリ性水溶液中
r.d.s.: 律速段階, Coupled: 混合律速

吸収効率はおおよそ1/1000から1/100に増加することがわかる。

3 鋼の腐食にともなう水素発生と吸収

本入門シリーズの大塚の解説¹²⁾にあるように、鋼材をはじめとする金属材料の腐食反応は、金属の溶解反応と環境中の酸化体の還元反応がカップルすることで進行する。一般的に、大気環境で利用されることが多い鋼材の腐食反応の場合、酸素の還元反応が主なカソード反応になる。しかし、腐食電位がその腐食環境 (pH) における水素発生電位よりも卑な電位にあれば、カソード反応の一部を水素発生反応が担い、それによって、水素が鋼材内に吸収されうることになる。ところで、前節では、水素発生反応にともなう発生する吸着水素原子とその鋼材内での透過について議論したが、その中で、金属内部に吸収される水素濃度は、吸着水素原子の表面被覆率に比例することが説明された。水素原子の表面被覆率は、表1で整理したように、水素発生電流、水素発生反応の過電圧、pHに依存する。よって、実際の腐食環境において、腐食電位 (水素発生電位との過電圧)、pHが、金属内部への水素吸収に対して重要となる。

そこで、その例を次に示す。図7は、炭素鋼を中性の0.5M NaClおよび0.5M Na₂SO₄水溶液中に浸漬したときの腐食電位と電気化学的水素透過法で測定した水素透過電流の経時変化である。図よりわかるように、腐食電位が約-0.6Vよりも卑になると水素透過電流が観察された。また、腐食電位がNaCl水溶液の場合に比べてより卑であるNa₂SO₄水溶液中の方が水素透過電流が大きいことがわかる。いずれの腐食環境

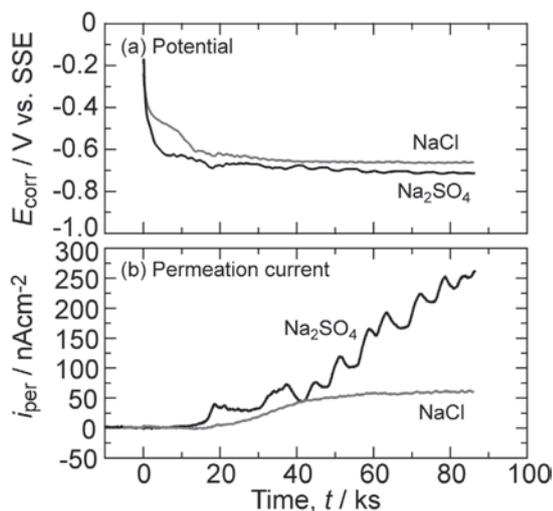


図7 炭素鋼の中性水溶液中における腐食電位と水素透過電流の経時変化

においても、たとえばpH6と仮定すると、水素発生電位よりも腐食電位は卑であるといえ、水素発生反応が酸素還元反応とともに起こっていることが示唆される。

また、実際の鋼材の腐食では、乾湿繰り返し環境といった降雨や結露にともなう液薄膜下で進行する大気腐食が問題になることが多い。多くの研究者によって、大気腐食にともなう水素吸収反応機構の解析が行われている¹³⁻¹⁵⁾。

谷口らは¹⁶⁾、Devanathanセルの水素吸収側に液滴をのせ、乾湿繰り返し環境で吸収される水素量と腐食電位および錆層のpHとの関係を調査した。図8は、0.5M NaCl水溶液で鋼板に錆を形成、乾燥させた後、再度50μLの0.5M NaCl水滴をのせ、それが乾燥するときの水素透過電流、腐食電位、pHの経時変化を示したものである。水滴をのせた後、電位は-0.6V付近にあり、このとき水素透過電流が増加したが、2hを過ぎ、乾燥にともなう酸素還元反応の増加によって電位が貴にシフトすると、水素透過電流が急激に減少している。一方、このとき錆層のpHは、水素透過電流の減少とともに低下している。これらのことから、水素吸収に腐食電位が強く影響することがわかる。すなわち、酸性溶液中においては、pHの低下によって水素発生反応の交換電流密度、吸着水素濃度とも増加するが、微酸性からpHが高い領域では、ヒドロニウムイオンの還元反応ではなく、水の直接還元となるので、pHの低下によって吸着水素濃度が増加することや、その結果として水素吸収量の増加することに結びつかないといえる。ただ、腐食環境、腐食生成物の形成と関係してpHの低下がさらに生じるとpHの影響もあらわれると予想される。

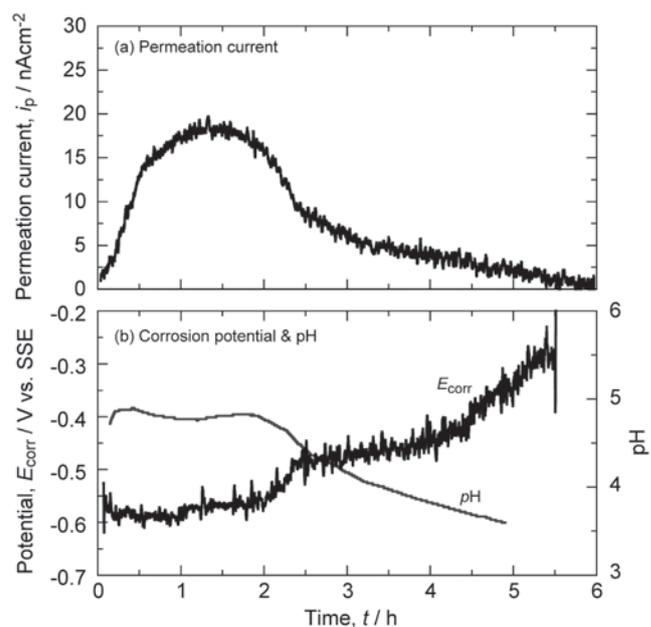


図8 乾湿繰り返し環境における鋼材の腐食にともなう水素透過電流 (a) と腐食電位およびpH (b) の経時変化¹⁵⁾

以上のことから、大気腐食環境における鋼材の腐食時においては、腐食電位の変化を中心にpH変化や腐食生成物の形成が水素吸収に対して非常に重要になるといえる。液薄膜下での腐食電位、pH測定は困難であるが、今後種々の工夫によって詳細に測定がなされることを期待したい。

4 鋼の水素吸収による脆化

鉄鋼材料をはじめとする金属材料の水素脆化機構については、南雲の成書をはじめ、多くの解説記事において詳しく述べられている¹⁷⁻¹⁹⁾。近年、高井らの研究において、変形、熱処理を組み合わせた巧みな実験手順を駆使して、水素の存在状態に注目した解析がなされている。その解析で得られた知見として、塑性変形にともなって転位と水素の相互作用によって、格子欠陥、主に原子空孔クラスターの形成が促進され、その蓄積によって延性低下が起こる可能性が示されている¹⁹⁾。

小林らは²⁰⁾、コンクリート構造物中における鉄筋のアルカリ骨材反応にともなう脆化割れに関連して、高アルカリ性水溶液環境において、鉄筋用炭素鋼(0.27C-1.6Mn-0.55Si)の脆化挙動を調査した。図9は、脱気した1M NaOH+0.5M NaCl水溶液中において、種々の水素チャージ電流とひずみ速度の組み合わせでSSRT試験を行ったときの破断ひずみ量の減少率を整理したものである。彼らは、ひずみ速度が小さくなると、より小さい電流密度で破断ひずみ量の減少が起こること、さらに、表面近傍に擬へき開破面が観察されたことから、水素チャージによって脆化が起こると報告している。これらの結果は、低ひずみ速度において、供給された水素が転位との相互作用によって、効率良く格子欠陥を生成したた

めであると推察される。

一方、図10は、水素チャージを開始するひずみ量を種々変化させたときに得られた応力-ひずみ曲線である。予ひずみ量は3%~13.6%まで変化させ、カソード電流を、予ひずみ後、脱気した1M NaOH+0.5M NaCl水溶液中において $20\mu\text{Acm}^{-2}$ 一定で与えている。その結果、いずれの条件においても破断伸びは空气中に比べて減少しているものの、破断のびの値、加工硬化の程度が予ひずみ量に依存しないことを報告している。すなわち、水素吸収による破断ひずみ量の減少は、吸収した水素量そのものにはあまり依存しておらず、最大引張応力以降の動的ひずみの寄与、すなわち転位の増殖速度とその程度に関係していることが示唆された。ただ、水素吸収による延性の低下は、最大引張応力以降の大きな塑性変形が必ずしも必要とはいえず、今後の詳細な検討が必要であるといえる。

以上のように、水素と転位や空孔といった格子欠陥との相互作用が原因で脆性破壊が進行する機構が検討の中心となりつつある。様々な新しい手法による解析がなされているので、今後の結果に期待したい。

5 まとめ

本稿では、金属表面における水素発生反応および水素吸収反応の電気化学的取り扱いを中心に解説し、腐食環境における水素吸収と、水素吸収による脆化について例示した。「はじめに」で述べたように、近年、鉄鋼材料の高強度・高靱性化が急速に進む中、遅れ破壊をはじめとする水素脆化機構を解明することは、需要の拡大、材料の破壊に対する信頼性の観点から極めて重要である。しかし、水素の吸収機構と吸収された水素による脆化、破壊機構は未だ十分に明らかにされた

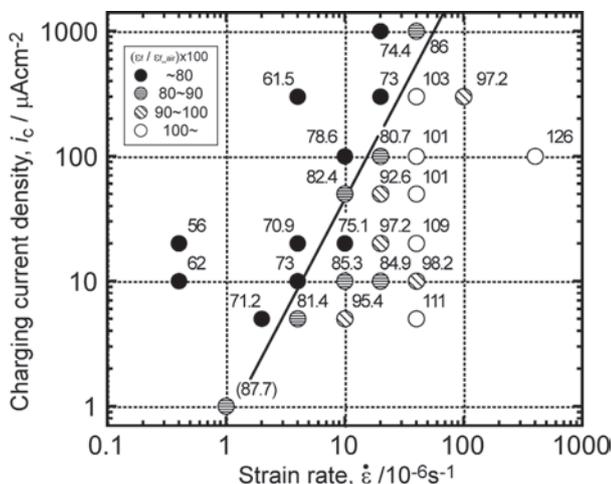


図9 高アルカリ環境における鉄筋の破断ひずみ量におよぼす水素チャージ電流とひずみ速度の影響²⁰⁾

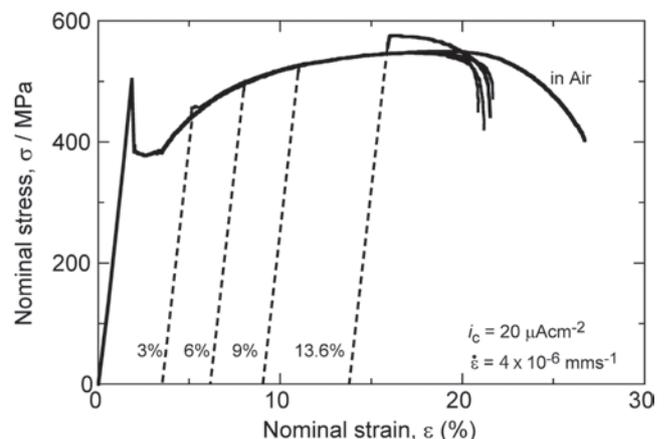


図10 異なる予ひずみを与えた鋼材に水素チャージしたときの応力-ひずみ曲線²⁰⁾

とはいえない状況にある。特に、大気環境で使用されることが多い鉄鋼材料の場合、腐食環境が時間、腐食部位に関係して複雑に変化するので、腐食環境、腐食速度、表面状態などと水素吸収反応機構との関係を明らかにすることが極めて重要になる。また、表面反応のみならず、吸収された水素が脆性破壊とどのような関係にあるかという材料内部の劣化現象についての理解も必要である。両機構について一連の説明がなされたときに、安全かつ安心して高強度鉄鋼材料を利用でき、需要も一層促進されると期待される。本稿が、鉄鋼材料を中心とした金属材料の水素吸収反応機構および水素脆化機構の解明を目指す研究者、技術者のヒントになることを期待したい。

参考文献

- 1) ハイテンハンドブック, 自動車用材料共同調査研究会編纂, (社) 日本鉄鋼協会, (2009)
- 2) 松山晋作: 遅れ破壊, 日刊工業新聞社, (1989)
- 3) 榎田隆弘: 遅れ破壊解明の新展開, (社) 日本鉄鋼協会, (1997), 145.
- 4) M.Pourbaix: Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions, NACE, Houston, (1974), 97.
- 5) N.Amokrane, C.Gabrielli, E.Ostermann and H.Perrot: Electrochim. Acta, 53 (20074), 700.
- 6) E.Protopopof and F.Marcus: Corrosion Mechanism in Theory and Practice, 2nd. ed. by Marcel Dekker, NY, (2002), 105.
- 7) J.O'M.Bockris and A.K.N.Reddy: Modern Electrochemistry-2, by Plenum, NY, (1977), 991.
- 8) M.A.V.Devanathan and A.Stachurski: Proc. Roy. Soc., A270 (1962), 910.
- 9) M.A.V.Devanathan, A.Stachurski and W.Beck: J. Electrochem. Soc., 110 (1963), 886.
- 10) 吉沢四郎, 山川宏二: Denki Kagaku, 39 (1971), 845.
- 11) 矢澤真, 西方篤, 水流徹, 第57回材料と環境討論会講演集, B305 (2010)
- 12) 大塚俊明: ふえらむ, 17 (2012), 220.
- 13) 山川宏二: 遅れ破壊解明の新展開, 日本鉄鋼協会, (1997), 77.
- 14) 大村朋彦, 榎田隆弘, 工藤赳夫, 中里福和, 渡部了, 材料と環境, 54 (2005), 67.
- 15) 秋山英二: 材料と環境, 60 (2011), 184.
- 16) Y.Taniguchi, A.Nishikata and T.Tsuru: Proc. Japan-China Joint Seminar on Marine Corrosion, (2002), 183.
- 17) 南雲道彦: 水素脆性の基礎, 内田老鶴圃, (2008)
- 18) 高井健一: 日本機械学会誌 (A編), 70 (2004), 1027.
- 19) 高井健一: 材料と環境, 60 (2011), 230.
- 20) 小林正人, 西方篤, 水流徹: 材料と環境, 59 (2010), 129.

(2012年6月4日受付)



若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

ターニングポイント

土田紀之

兵庫県立大学大学院 工学研究科
准教授

Noriyuki Tsuchida

現在著者は、兵庫県姫路市書写にある兵庫県立大学大学院工学研究科で、鉄鋼材料を中心に材料強度に関する研究を行っている。引張試験を軸に、変形特性におよぼす試験温度、ひずみ速度の影響の調査や引張試験で得られた応力-ひずみ曲線を記述する構成方程式についての研究に取り組んでいる。ここでは、これまでに取り組んできたふたつの研究テーマについて紹介させていただきたい。

1 炭素鋼の応力-ひずみ曲線におよぼす結晶粒径、温度とひずみ速度の影響

結晶粒微細化強化は、環境負荷を上げることなく高強度を達成できる強化機構である¹⁾。一方で結晶粒微細化だけでは延性の確保が難しく、このため第二相や第二組織との組み合わせ(複合組織強化)により強度・延性バランスを向上させる研究が広く行われている。本研究では、引張特性におよぼす結晶粒径の影響を調査することを大きな目的として、単純組成のJIS-SM490鋼を組織制御することでフェライト結晶粒径が $0.5\mu\text{m}$ から $46\mu\text{m}$ のフェライト-セメンタイト(FC)鋼とフェライト-パーライト(FP)鋼を作製し、常温以下における静的ならびに高速引張試験を行った^{2,3)}。引張試験により得られる応力-ひずみ曲線は、結晶粒径の範囲によりそのタイプが分かれる。変形応力におよぼす温度とひずみ速度の影響は結晶粒径によらず等しく、一方で、結晶粒径の影響は温度、ひずみ速度に依存しないことが明らかとなった。これらの実験結果を元に、熱活性化過程に基づいたKocks-Meckingモデルを用いて、結晶粒微細化による強度の増大を温度やひずみ速度に依存しない非熱的応力成分に結晶粒径の $-1/2$ 乗の関数で与えることによって、結晶粒径の異なるFC鋼、FP鋼の常温以下、ひずみ速度 10^{-6} s^{-1} から 10^3 s^{-1} における応力-ひずみ曲線を精度良く記述できることを明らか

にした⁴⁾。また、ひずみ速度 10^3 s^{-1} における高速引張試験では、超微細粒鋼の結果は伸びを著しく低下させることなく強度が増大することを確認し、一般的に高強度になると低下する静動差は結晶粒径によらずほぼ同じ値であった。これにより結晶粒微細化強化と複合組織強化の組み合わせは、高速変形挙動にも有効であることがわかった⁵⁾。ところで、低炭素鋼を引っ張ると変形初期に降伏点降下とリュウダース伸びが観察される。リュウダース伸びの大きさは、結晶粒径をはじめとする様々な因子によって変化する。著者らの実験結果においても、結晶粒径が微細なほど、温度が低いほどリュウダース伸びが大きくなった。このリュウダース伸びの大きさは、リュウダース変形が終了した後の加工硬化挙動が関係しているというButlerの論文⁶⁾を読み、実験結果からリュウダース変形終了直後(下降伏応力)における加工硬化率とリュウダース伸びの関係を整理したところ、ほぼ1本の曲線に乗っていることがわかった(図1)⁷⁾。図1は結晶粒径や温度、ひずみ速度、炭素量の異なる様々な炭素鋼のリュウダース伸びについて整理した結果であるが、すべて下降伏応力における加工硬化率の大きさと整理できることがわかった点は非常に興味深い結果であった。現在は、超微細粒鋼を用いて破断直前までの真の応力-ひずみ関係を推定する実験を進めている⁸⁾。従来、最高荷重点までしか計算できない真応力-ひずみ曲線を破断直前まで推定することで、破断までの変形挙動を真応力-ひずみ関係の点より眺めることができることは、同じ引張試験でも多くの新しい発見があり、非常に面白さを感じている。真応力-ひずみ関係から見た結晶粒微細化強化の特長とその理由を明らかにすることが本研究課題における重要な目的である。これは科研費 新学術領域「バルクナノメタル~常識を覆す新しい構造材料の科学(代表:京都大辻伸泰教授)」等の支援により取り組んでいるテーマであり、特に同じ班の3名の先生方の強力なサポートのおかげで楽しく研究を進めることができている。

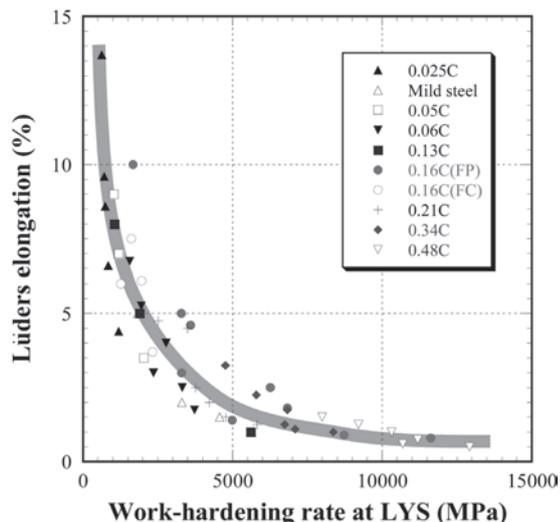


図1 下降伏応力における加工硬化率とリューダース伸びの関係⁷⁾。著者らの実験結果だけでなく、過去に報告された様々な炭素鋼の実験も含まれている。いずれのリューダース伸びも下降伏応力における加工硬化率により整理できる

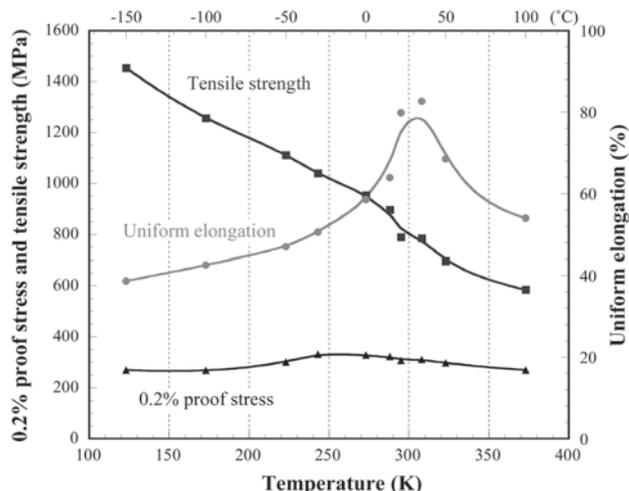


図2 SUS304鋼における様々な温度での機械的特性¹¹⁾。308K (35℃)において一番優れた均一伸びが得られた

2 鉄鋼材料のTRIP効果と加工誘起変態挙動の関係

TRIP (Transformation induced plasticity) 効果とは、オーステナイト組織の一部が強度の高いマルテンサイト組織に変態する (加工誘起変態) ことにより高強度、高延性が得られる強化機構であり、優れた衝突エネルギー吸収能 (高速変形挙動) も期待できることから自動車用構造部品用鋼板にも利用されている⁹⁾。この強化機構について取り組み始めたきっかけは、マイクロメカニクスによる応力-ひずみ曲線の計算であった。著者が所属していた研究室では、以前より実用鉄鋼材料の応力-ひずみ曲線の予測計算について研究を行っており、計算手法の拡張としてTRIP効果についても取り組んだ¹⁰⁾。まずは計算の立場から、TRIP効果におよぼす残留オーステナイト体積率や加工誘起変態挙動、組織の組み合わせの影響について検討し、これまでに研究されてきた準安定オーステナイト鋼やTRIP型複相鋼などのTRIP効果による均一伸びの大小について議論した。その後現在の大学に移り実験ができる環境が整い、準安定オーステナイト鋼の実験から改めてスタートした。市販のSUS304鋼、SUS301L鋼を用いて試験温度とひずみ速度を変えた引張試験を行い、機械的特性について調査するとともに、加工誘起変態挙動をX線回折実験等で調べ、機械的特性との関係について考察した^{11,12)}。SUS304の温度依存性の結果¹¹⁾からは、TRIP効果により優れた均一伸びの得られる加工誘起変態条件として、次の2条件を明らかにした (図2、3)。①ひずみ30%加えたときの加工誘起マルテンサイト体積率は約5%、②最大変態速度を迎

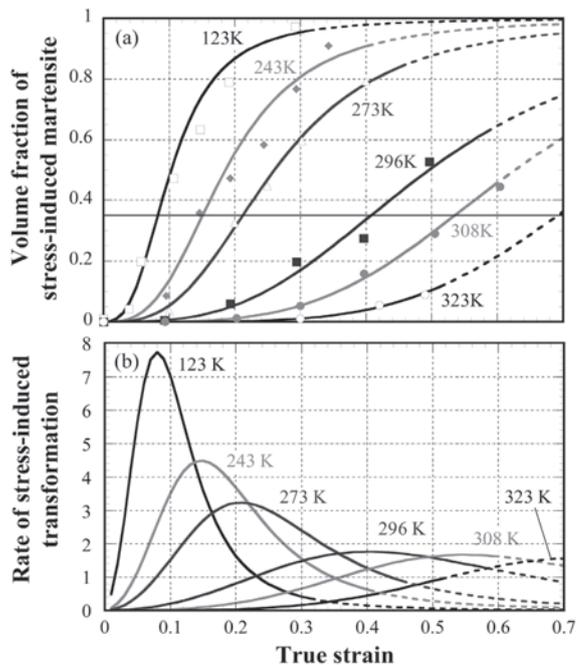


図3 SUS304鋼の様々な温度での加工誘起変態マルテンサイト体積率 (a) と変態速度 (b)¹¹⁾。308Kの結果より、本文中の①、②の条件が明らかとなった

える真ひずみがより大きく、最大変態速度の大きさは2 (ひずみ1%加えたときの加工誘起マルテンサイト体積率が2%) 以下である。これらの条件は、田村らが示した、変形初期のひずみ20%まではオーステナイト相のみが変形しなければいけないこと、ひずみ20%以降は加工誘起変態がひずみとともに刻々と起こる、という条件¹³⁾とよく一致すると考えられる。現在はこの加工誘起変態条件についてさらに検討を進める目的で、使用済み材料を用いるなどして化学成分 (Ni当量) の異なる準安定オーステナイト鋼を作製し、TRIP効果にお

よぼすNi当量の影響について研究を進めている¹⁴⁾。今更ながら真空溶解、圧延、熱処理といった工程を学生とともに作業できたことは自分にとっては貴重であった。また、TRIP型複相鋼の研究にも取り組み始めており、高速変形時に優れた機械的特性を示すことのできる条件を明らかにすることを大きな目標に、現在は引張特性の温度、ひずみ速度依存性について実験を進めている。

大学4年生の時に卒業論文で初めて研究というものに触れ、それから約20年。40代に突入し、自分自身何をやってきたかこの機会に振り返ってみると、引張試験と応力-ひずみ関係のことしかやっていない。大学院博士課程に進んだ際、当時の所属グループ長に引張試験のプロになれと言われて、それまで深く考えもしなかったロードセルの校正、伸び計の作製、データの取得および整理の仕方を一から学ばせてもらった。ひずみ速度や加工硬化率の意味を実験データと数式の両面から理解することができた点や、他の機械的特性との違いといった基礎をたたき込まれたことは、当時実験で得られたデータがアナログであったが故に内容をしっかりと理解することができ、現在大学の教員として学生などに教える立場として非常に役立っている。

現在、幸いなことにやりたい研究をやれる環境にある。それもひとえに、現在、またはこれまでに世話になった先生方や諸先輩方、研究に協力していただいている先生方、そして兵庫県立大学での約9年間、一緒に研究に取り組み、多くの実験データを出してくれた学生の皆さん（現在、各企業で活躍している皆さん）のおかげである。この場を借りて心から感謝申し上げたい。現在の自分にとって非常に大きな存在である、恩師の先生方がここ1、2年で全員定年退職となる。現在好きなことをやれてはいるが、自立しているとは言い難く、数年後のことを考えるとこれからはいろいろな意味で立ち立しなければいけないことを強く感じる。先日、ある師からのメールに研究に対する夢が書かれていた。20年近い付き合いの中でこういったことはずっと当たり前のことではあ

るが、今なお大きな夢を抱いて研究に励んでいる姿には改めて脱帽する思いである。数年後、数十年後の自分を見据えて、これからどうあるべきかはこれまで教わってきたこと、見てきたこと、経験してきたことを大きな教訓として生かしていきたい。最後に、今後ともご指導ご鞭撻のほど、よろしくお願い申し上げます。

参考文献

- 1) 辻伸泰：鉄と鋼, 88 (2002), 359.
- 2) N.Tsuchida, H.Masuda, Y.Harada, K.Fukaura, Y.Tomota and K.Nagai : Mater. Sci. Eng. A, 488 (2008), 446.
- 3) N.Tsuchida, Y.Tomota and K.Nagai : ISIJ Int., 42 (2002), 1594.
- 4) N.Tsuchida, K.Fukaura, K.Nagai and Y.Tomota : ISIJ Int., 48 (2008), 1020.
- 5) 土田紀之, 友田陽, 長井寿：鉄と鋼, 90 (2004), 1043.
- 6) J.F.Butler : J. Mech. Phys. Solids, 10 (1962), 313.
- 7) N.Tsuchida, Y.Tomota, K.Nagai and K.Fukaura : Scripta Mater., 54 (2006), 57.
- 8) N.Tsuchida, T.Inoue and K.Enami : Mater. Trans., 53 (2012), 133.
- 9) 潮田浩作, 高橋学：ふえらむ, 11 (2006), 779.
- 10) N.Tsuchida and Y.Tomota : Mater. Sci. Eng. A, 285 (2000), 345.
- 11) N.Tsuchida, Y.Morimoto, T.Tonan, Y.Shibata, K.Fukaura and R.Ueji : ISIJ Int., 51 (2011), 124.
- 12) 高木勝規, 上路林太郎, 水口隆, 土田紀之：鉄と鋼, 97 (2011), 450.
- 13) 田村今男, 牧正志, 波戸浩, 油井孝輔：日本金属学会誌, 33 (1969), 1383.
- 14) N.Tsuchida, S.Kawabata, K.Fukaura and R.Ueji : J. Alloys and Compounds, in press.

(2012年5月7日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

(独) 物資・材料研究機構 ナノ材料科学環境拠点 マネージャー

長井 寿

同じ対象でも、見る角度によっては違って見えるかもしれない。置かれている条件を変えると姿を変えるかもしれない。室温は偶然であり、室温で見える姿が本質だと思いきんではいけない。どうせ角度を変えるなら、天空のあらゆる角度から地球を見るつもりで観察しよう。どうせ条件を変えるなら少なくとも3桁は飛ばそう。

これは私の常套句だ。こう話す側は楽だが、研究、実験をする、させられる側はきっと大変だろう。土田さんは、ひずみ速度を9桁も飛ばしてしまった！ 相変わらず何気なく書いておられるが、自分の苦労を顕わにしない姿にはいつも感服する。ひずみ速度を実感できない人のために老婆心な説明を加える。一本の実験に最短で1秒掛けるとすると最長で10⁹秒(=11,574日=32年弱)掛ける。実際には、最短0.001秒で、最長11.5日程度ではなかったか。たとえ室温であっても、定温に保つことが不可欠で、ましてや室温以外での苦労は想像の域を越える。

ここまで言えば苦労の程度が想像できたと思うが、それほどの苦労をするならばもっと多くの実験結果が出る研究がしたいと読者は思われるのではないか。一理ある。だが、私は材料の実験、研究とはこんなものだ、いや本音ではこうある

べきだ、と思う。土田さんのお陰で、地球が銀河の太陽系第三惑星として、自転しながら太陽の周りをまわっているのを天空から眺めているような気分になれる。

何かが分かった、何が分からないか分かる。研究半生の中で雑多なテーマに取り組んでいるようで、実は自身の本源的な疑問に自分で答えようとしている、なんだか変わりようのない自分を発見するものだ。だからいくら寄り道をしてもよい。もっと地球を微細に見たいと思っても良いし、次は火星を観察してみたいと思っても良い。夢を持ち、夢を自分自身で実現できるのは人間の特権だ。この特権を忘れこまれた人間が日本を滅ぼす。

材料の難しさとか面白さは、寸法のスケールが飛ぶことだと思っている。マクロの世界とミクロの世界では、スケールが9桁も飛んでいる。土田さんはひずみ速度の9桁の飛びを埋めたが、寸法スケールのこの飛びはそう簡単には埋められない。「ターニング・ポイント」は自分自身のことでもある。いつの間にか60歳定年となった。私自身、この寸法の飛びを少しでも埋めるべく、時々土田さん達ともふれあいながら、第二の人生を楽しみたい。宜しくお願いします。

平塚金属工業(株) 技術部

守谷 英明

若手研究者として活躍されている土田先生の「ターニングポイント」について、コメントする機会を頂き光栄に存じます。

室温付近の温度領域における鉄鋼材料の引張変形挙動は、エンジニアリング分野全般においては一般に静的な特性として捉えられているように思われます。これは、動的な特性として疲労特性や衝撃特性などがあり、エンジニアリング分野全般における引張挙動に関する議論の中にひずみ速度という因子が取り込まれる機会があまりなかったことによるためと思われます。土田先生がこれまで取り組んでこられた研究では、温度とひずみ速度という因子を静的な特性の議論の中に取り入れることによって、また従来最高荷重点までしか扱われてこなかった真応力-真ひずみ曲線を破断直前まで推定できるようにして破断までの変形挙動を真応力-真ひずみ関係の点から眺められるようにすることによって、今まで見えていなかった多くの新たな発見をされています。そしてなにより、この鉄鋼材料の引張挙動に及ぼす結晶粒径、温度、ひず

み速度、第二相などの諸因子の影響についての研究を、芯がぶれることなく約20年間続けてこられた土田先生の直向な姿に頭が下がります。

最近「素材革命」と言う言葉を良く耳にするようになりましたが、素材分野全般における研究開発に大きな期待が掛けられています。しかも迅速な結果が求められる時代になってしまいました。鉄鋼分野においてもハイテン材の更なる高性能化が強く求められています。今現在土田先生が「高速変形時に優れた機械的特性を示すことのできる条件を明らかにすることを大きな目標」に掲げて進められているTRIP型複合組織鋼に関する研究は、まさにこのような要求に応えられるものの一つと思われます。土田先生はまだまだ若手です。これまで長きに亘って培ってこられた経験は、これからの研究に生かされるべく培われた財産になっていることと思います。今後、TRIPやTWIPなど以外の新しいメカニズムの発見や考案にも期待したいと思えます。益々のご活躍をお祈りしています。

会員へのお知らせ目次

行事等予定	585頁
総合	
事務所移転のお知らせ	590頁
第164回秋季講演大会懇親会のお知らせ	590頁
2012年秋季講演大会会期中の託児室設置のお知らせ	591頁
第2回日本鉄鋼協会・日本金属学会女性会員のつどい開催のお知らせ	591頁
関東地区 平成25年度「鉄鋼技能功績賞」受賞候補者の推薦募集案内	592頁
平成25年度 日本鉄鋼協会「研究奨励賞」および「学術功績賞」受賞候補者の推薦募集案内	592頁
イベント情報	
平成24年度 工学教育連合講演会 開催案内と参加募集案内	593頁
鉄鋼工学セミナー「専科」平成24年度受講のご案内	594頁
材料の組織と特性部会 「鉄鋼の組織形成に及ぼす合金元素の効果のメカニズム」 鉄鋼の組織形成に及ぼす合金元素の効果フォーラム成果報告会開催案内	595頁
計測・制御・システム工学部会 次世代鉄鋼業のあるべき姿を具現化するシステム技術フォーラム 第3回公開フォーラム「人とシステムの信頼構築：インタフェース/エージェント技術の動向」開催案内	595頁
(公社)日本分析化学会、(一社)日本鉄鋼協会 評価・分析・解析部会、(公社)日本セラミックス協会共催 分析信頼性実務者レベル講習会 第11回セラミックス原料・鉱石類分析技術セミナー開催案内	596頁
平成24年度 レアメタル研究会のご案内	597頁
支部	
中国四国支部 中国四国支部講演大会開催案内	597頁
関西支部 平成24年度材料セミナー開催案内	598頁
公募	600頁
人材募集案内	601頁
次号目次案内	602頁
会員欄 (入会者・死亡退会者一覧)	603頁
海外鉄鋼関連最新論文	604頁
ブックレビュー	601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
2012年8月			
2日	計測・制御・システム工学部会 制御フォーラム「高品質・安定生産・環境調和を達成する先端的プロセス制御」主催第4回公開フォーラム「産業界における省エネルギーへの取組みの最前線」(東京 6号413頁)	日本鉄鋼協会	(株)神戸製鋼所 西野 都 Tel. 078-992-5611 nishino.satoshi@kobelco.com
2日	第5回 腐食防食セミナー (大阪)	腐食防食協会 関西支部	事務局 土谷博昭 Tel. 06-6879-7470 tsuchiya@mat.eng.osaka-u.ac.jp
2,3日	第23回海洋工学シンポジウム (東京)	日本海洋学会他	http://www.oesymposium.com/
5~7日	高温プロセス部会 フォーラム合同企画 博士課程後期学生交流会 (宮城 7号521頁 申込締切7月20日)	日本鉄鋼協会	東北大学 北村信也 kitamura@tagen.tohoku.ac.jp
6,7日	第16回 初心者のための疲労設計講習会 (大阪)	日本材料学会	日本材料学会 今井 Tel.075-761-5321 jimu@jsms.jp http://www.jsms.jp
6~8日	Interface21(A New International Conference on Composite Interfaces) (Merging of ICCI, IPCM and IIMM) (京都)	京都工芸繊維大学	http://gtlab.ise.osaka-sandai.ac.jp/~Interface21/
6~8日	第25回DV-X α 研究会 (福岡)	福岡大学	理学部化学科 栗崎敏 Tel. 092-871-6631 http://www.sc.fukuoka-u.ac.jp/~dvxa2012/
8,9日	KAST教育講座「塑性力学の基礎、金属材料の塑性変形と降伏応力、変形抵抗」(東京)	神奈川科学技術アカデミー	教育情報センター Tel. 044-819-2033 http://www.newkast.or.jp/kyouiku/boshu.html
9日	第31回混相流シンポジウム (千葉)	日本混相流学会	実行委員事務局 Tel. 04-7136-4658・4603 http://www.jsmf.gr.jp/nenkai2012/index.html
9,10日	中国四国支部 講演大会 (鳥取 本号597頁)	日本鉄鋼協会 中国四国支部	鳥取大学 音田哲彦 toridai2012@mech.tottori-u.ac.jp
9,10日	日本物理学会2012年度科学セミナー「元素誕生と周期表—私たちを取り巻く原子核」(東京)	日本物理学会	科学セミナー係 Tel. 03-3816-6201 http://www.jps.or.jp/information/2012/05/2012.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
9~11日	日本混相流学会年會講演會2012 (千葉)	日本混相流学会	実行委員事務局 Tel.04-7136-4603 http://www.jsmf.gr.jp/nenkai2012/index.html
21~25日	第七回(2012年度)DV-X α 夏の学校「量子材料科学」セミナー(東京)	DV-X α 研究協会	Tel.077-529-0374 dvxa@e-mail.jp http://imac.eng.kagawa-u.ac.jp/DVSummerSchool/
22,23日	第42回初心者のための有限要素法講習会(第2部)(京都)	日本材料学会	有限要素法講習会係 今井 Tel.075-761-5321 jimuj@jsms.jp http://www.jsms.jp
22~24日	平成24年度工学教育研究講演会(東京)	日本工学教育協会	Tel.03-5442-1021 kawakami@jsee.or.jp http://www.soc.nii.ac.jp/jsee/
22~24日	第48回熱測定討論会(JCCTA48)(大阪)	日本熱測定学会	Tel.03-5821-7120 http://www.netsu.org/
22~24日	The 15th International Congress on Thermal Analysis and Calorimetry (ICTAC15)(大阪)	日本熱測定学会	Tel.03-5821-7120 http://ictac15.org
24日	評価・分析・解析部会 若手フォーラム主催 第2回研究所見学会兼 若手フォーラム研究会(東京 7号521頁)	日本鉄鋼協会	千葉工業大学 谷合哲行 Tel.047-454-9601 drtanai@mx3.ttcn.ne.jp
24日	はんだ強度評価法の講習会「鉛系および非鉛系はんだ接合材のクリープおよびクリープ疲労」(京都)	日本材料学会	「はんだ強度評価法の講習会」係 今井 Tel.075-761-5321 http://www.jsms.jp
24日	熱切断作業の品質と安全講習会(東京)	日本溶接協会、他	業務部 日暮宏彰 Tel.03-5823-6324 http://www.jwes.or.jp/mt/kenkyu/ae/archives/04/
25,26日	SPRING-8シンポジウム2012(大阪)	Spring-8ユーザー共同体(SPRUC)	事務局 Tel.0791-58-0970 users@spring8.or.jp
30,31日	役に立つ真空技術入門講座(大阪)	日本真空学会 関西支部	深沢博之 Tel.06-6397-2279 http://www.vacuum-jp.org/
30,31日	第69回熱測定講習会 初心者のための熱分析の基礎と応用 一専門家による講義と実習,個別相談一(京都)	日本熱測定学会	事務局 Tel.03-5821-7120 netsu@mbd.nifty.com http://www.netsu.org
31日	日本鉄鋼協会研究会I 平成25年度募集申請締切(7号512頁)	日本鉄鋼協会	学術企画グループ Tel.03-3669-5932
31日	日本鉄鋼協会研究会II 平成25年度募集申請締切(7号513頁)	日本鉄鋼協会	技術企画・部会グループ Tel.03-3669-5932
31日	平成25年度「産発プロジェクト展開鉄鋼研究」募集申請締切(7号514頁)	日本鉄鋼協会	技術企画・部会グループ Tel.03-3669-5932
31日	2012年度(社)日本金属学会関東支部講習会「分析・解析法の多面的アプローチ」一表面・界面現象の解明を例にして一(東京)	日本金属学会 関東支部	事務局 多賀三千代 Tel.080-4833-3136 jim-kanto@mtl.titech.ac.jp
31~2日	2012年度JCOM若手シンポジウム(岐阜)	日本材料学会	「JCOM若手シンポジウム」係 Tel.075-761-5321 JCOM2012wakate@jsms.jp http://compo.jsms.jp
2012年9月			
4,5日	第28回分析電子顕微鏡討論会(千葉)	日本顕微鏡学会 分析電子顕微鏡分科会	京都大学化学研究所 根本隆 Tel.0774-38-3054 http://eels.kuicr.kyoto-u.ac.jp/bunseki2012/
4,5日	KAST教育講座「基礎から考えるプレス成形加工」(東京)	神奈川科学技術アカデミー	教育情報センター Tel.044-819-2033 http://www.newkast.or.jp/kyouiku/boshu.html
4~6日	平成24年度「クリーン・コール・デー」記念行事 CCD2012石炭利用国際会議(東京)	クリーン・コール・デー実行委員会、他	Tel.03-6402-6101 fijita@jcoal.or.jp http://www.jcoal.or.jp/clean-coal-day/kokusaiKaigi.html
4~7日	第52回(2012年度)真空夏季大学(静岡)	日本真空学会	Tel.03-3431-4395 ofc-vs@vacuum-jp.org http://www.vacuum-jp.org/SUMMER/summerhome.html
5,6日	第17回 初心者のための疲労設計講習会(東京)	日本材料学会	今井 Tel.075-761-5321 http://www.jsms.jp
6,7日	鉄鋼工学セミナー「強化機構専科」(兵庫 6号410頁 申込締切8月6日)	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 次世代鉄鋼業のあるべき姿を具現化するシステム技術フォーラム 第3回公開フォーラム「人とシステムの信頼構築:インタフェース/エージェント技術の動向」(大阪 本号595頁 申込締切8月20日)	日本鉄鋼協会	住友金属工業(株) 岩村健 Tel.06-6489-5983 iwamura-kr@sumitommetals.co.jp
10~12日	IFAC Workshop on Automation in Mining, Mineral and Metal Industries (IFAC MMM 2012)(岐阜)	日本鉄鋼協会	http://www.ifacmmm2012.org/
11~13日	平成24年度 修士学生向け「鉄鋼工学概論セミナー」(神奈川 6号406頁 申込締切7月31日)	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel.03-3669-5933
11~13日	資源・素材2012(秋田)一平成24年度 資源・素材関係学協会合同秋季大会一(秋田)	資源・素材学会、他	「Journal of MMI」7号(7/10発行) 綴じ込みの振込用紙 http://www.mmi.or.jp/lecture/2012_b/info_120523.pdf
13,14日	き裂欠陥に対する供用適性評価手法~HPIS Z 101-1および2規格の理解と実際への適用のために~(東京)	日本高圧力技術協会	Tel.03-3255-3486 hpi@hpij.org http://www.hpij.org/mu9kz0318-102/
13,14日	第3回塗装入門講座(東京)	日本塗装技術協会	事務局長 小山田護 Tel.03-6411-9236 tosou-jimukyoku@jcot.gr.jp http://jcot.gr.jp/
14日	講習会「もう一度学ぶ機械材料学」(第4回)一機械・製造技術者のための基礎講座一(東京)	日本機械学会	http://www.jsme.or.jp/kousyu2.htm
14日	第299回塑性加工シンポジウム(愛知)	日本塑性加工学会	Tel.03-3435-8301 jstp@jstp.or.jp
16~18日	トライボロジー会議2012秋 北海道室蘭(北海道)	日本トライボロジー学会	Tel.03-3434-1926 jast@tribology.jp http://www.tribology.jp/jikkou/12muroran/12muroran.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
17日	第164回秋季講演大会懇親会(愛媛 本号590頁 申込締切8月31日)	日本鉄鋼協会	総務グループ Tel. 03-3669-5931
17~19日	第164回秋季講演大会(愛媛 6号403頁)	日本鉄鋼協会	学術企画グループ Tel. 03-3669-5932
18日	JST産学共創基礎基盤研究プログラム「ヘテロ構造制御」公開シンポジウムヘテロ構造制御で起こすイノベーション(愛媛 7号516頁)	日本鉄鋼協会	技術企画・部会グループ Tel. 03-3669-5932
18日	材料の組織と特性部会「鉄鋼の組織形成に及ぼす合金元素の効果のメカニズム」鉄鋼の組織形成に及ぼす合金元素の効果フォーラム成果報告会(愛媛 本号595頁)	日本鉄鋼協会	茨城大学 榎本正人 Tel. 0294-38-5058 enomoto@mx.ibaraki.ac.jp
18~20日	第126回塑性加工学講座(東京)	日本塑性加工学会	Tel. 03-3435-8301 jstp@jstp.or.jp
18~21日	No. 12-12 Dynamics and Design Conference 2012 「システムを考える。境界を越えて。」(神奈川)	日本機械学会	総合企画グループ 大竹英雄 Tel. 03-5360-3505 http://www.jsme.or.jp/conference/dmconf12/
19日	第2回日本鉄鋼協会・日本金属学会女性会員のつどい(愛媛 本号591頁)	日本鉄鋼協会 日本金属学会	(独)物質・材料研究機構 御手洗容子 mitarai.yoko@nims.go.jp
19日	第59回技術セミナー「淡水における水処理と腐食防食の基礎」(東京)	腐食防食協会	Tel. 03-3815-1161 ysm.hng-113-0033@jcorr.or.jp
21日	平成25年度 日本鉄鋼協会「研究奨励賞」および「学術功績賞」受賞候補者の推薦募集締切(本号592頁)	日本鉄鋼協会	総務グループ Tel. 03-3669-5931
21日	第62回 東レ科学講演会(東京)	東レ科学振興会	Tel. 047-350-6103 http://www.toray.co.jp/tsf/index.html
23~27日	第4回アジア溶融塩化学・技術国際会議(4th Asian Conference on Molten Salt Chemistry and Technology) および 第44回溶融塩化学討論会(宮城)	電気化学会 溶融塩委員会	AMS 4 実行委員会事務局 東北大学 竹田 修 http://msc.electrochem.jp/acmsct4/
23~28日	IUMRS-ICEM2012(神奈川)	物質・材料研究機構	Tel. 03-3503-4681 http://iumrs-icem2012.org/
24~26日	Asia Steel International Conference(Asia Steel 2012)(China)	CSM	http://www.asiasteel2012.com
24~26日	第59回材料と環境討論会(北海道)	腐食防食協会	Tel.03-3815-1161 http://www.jcorr.or.jp/jcorr12f/index.html
27, 28日	第29回センシングフォーラム(茨城)	計測自動制御学会	信州大学 高山潤也 Tel.026-269-5154 http://www.k.ctrl.titech.ac.jp/sf29/sf29.html
28日	第52回レアメタル研究会(東京 本号597頁)	レアメタル研究会	東京大学 岡部研究室 学術支援研究職員 宮寄智子 tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp
30~3日	51st Annual Conference of Metallurgists (COM2012)(Canada)	Metsoc of CIM	http://www.cim.org/COM2012/
2012年10月			
1~3日	5th International Congress on the Science and Technology of Steelmaking(ICS2012)(Germany)	IEST	http://www.ics2012.de/index.php/ics2012-home.html
2~4日	The 2nd International Conference Small Sample Test Techniques (SSTT) (Czech Republic)	Czech Metallurgical Society	http://www.mmvyzkum.cz/conference
3~5日	第33回日本熱物性シンポジウム(大阪)	日本熱物性学会	大阪府立大学 木下進一 Tel. 072-254-9231 jstp2012@me.osakafu-u.ac.jp
7~11日	Materials Science & Technology 2012 Conference & Exhibition (MS&T12) (U.S.A.)	TMS他	http://www.matscitech.org
9日	関西支部 平成24年度材料セミナー テーマ1「技術者のための鉄鋼材料入門」(大阪 本号598頁)	日本鉄鋼協会 関西支部	関西支部 材料セミナー係 n-kansai@ostec.or.jp
10, 11日	第4回MLFシンポジウム・茨城県ビームライン平成23年度成果報告会(東京)	J-PARCセンター、他	MLFシンポジウム事務局 Tel. 029-284-3934 http://j-parc.jp/MatLife/ja/meetings/MLFSympo/index.html
10~12日	第3回 若手研究者および技術者のための高温強度講習会(兵庫)	日本材料学会	「講習会」係 Tel. 075-761-5321 jjmu@jsms.jp http://www.jsms.jp
11~12日	鉄鋼工学セミナー「水素脆化専科」(東京 7号519頁 申込締切9月14日)	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-3669-5933
14~18日	The 6th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking (ICSTI2012)(Brazil)	ABM	http://www.abmbrasil.com.br/seminarios/icsti/2012/default.asp
14~18日	2012年粉末冶金国際会議(略称:PM2012 YOKOHAMA)(神奈川)	日本粉末冶金工業会、他	Tel.03-3219-3541 pm2012@ics-inc.co.jp http://www.pm2012.jp/
15日	標準化と品質管理全国大会2012(東京)	日本規格協会	事務局 岩垂・天野 http://www.jsa.or.jp/info_detail/zenkoku.asp
17, 18日	第40回日本ガスタービン学会定期講演会(北海道)	日本ガスタービン学会	事務局 Tel. 03-3365-0095 gtsj-office@gtsj.org http://www.gtsj.org/html_calender/40teiki-yokoku.html
18日	関東地区 平成25年度「鉄鋼技能功績賞」受賞候補者の推薦募集締切(本号592頁)	日本鉄鋼協会	総務グループ Tel. 03-3669-5931
18, 19日	鉄鋼工学セミナー「圧延理論専科」(兵庫 6号411頁 申込締切9月27日)	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-3669-5933
18, 19日	日本鉄鋼協会 評価・分析・解析部会、日本セラミックス協会共催 分析信頼性実務者レベル講習会 第11回セラミックス原料・鉱石類分析技術セミナー(東京 本号596頁 申込締切8月31日)	日本分析化学会	日本分析化学会 セラミックス原料・鉱石類分析技術セミナー係 Tel. 03-3490-3351 koms@jsac.or.jp
20日	最先端鉄鋼体験セミナー(新日鐵室蘭)(北海道 7号517頁 申込締切9月20日)	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-3669-5933

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
22~26日	7th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials (EPM2012) (China)	CSM	http://www.epm2012.cn/
26日	関西支部 平成24年度材料セミナー テーマ2「材料技術者・研究者のためのEBSIによる局所方位解析技術の基礎と応用」(京都 本号598頁)	日本鉄鋼協会 関西支部	関西支部 材料セミナー係 n-kansai@ostec.or.jp
26日	平成24年度 工学教育連合講演会 (東京 本号593頁)	日本工学協会	工学教育連合講演会事務局 Tel.03-5442-1021 https://www.jsee.or.jp/
29,30日	第56回材料工学連合講演会 (京都)	日本学術会議 材料工学委員会	日本材料学会 Tel.075-761-5321 jimuj@jmsj.jp
30日	早稲田大学各務記念材料技術研究所オープンセミナー (東京)	早稲田大学各務記念材料技術研究所	反田ゆかり Tel.03-3203-4782 http://www.waseda.jp/zaiken/index.html
31~2日	第48回X線分析討論会 (愛知)	日本分析化学会 X線分析研究懇談会	科学技術交流財団 岡本篤彦 Tel.0561-76-8331 http://www.sangaku.nagoya-u.ac.jp/btk48x/
31~3日	International Conference & Exhibition on Analysis & Testing of Metallurgical Process & Materials (ICACI2012, CCATM2012) (China)	ICASI、他	http://www.icasi-society.org
2012年11月			
1~3日	第20回鉄鋼工学アドバンスセミナー (神奈川 6号407頁 申込締切6月15日)	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel.03-3669-5933
1~3日	The 3rd China RM & PT Forum (China)	CAS	http://www.rmpt.org.cn (工事中)
4~6日	第63回塑性加工連合講演会 (福岡)	日本塑性加工学会	Tel.03-3435-8301 http://www.jstp.jp/jp08/kouen.html
5~8日	The 5th International Symposium on Designing, Processing and Properties of Advanced Engineering Materials ISAEM-2012 and The 3rd International Symposium on Advanced Materials Development and Integration of Novel Structured Metallic and Inorganic Materials AMDI-3 (愛知)	日本学術振興会 加工プロセスによる材料新機能発現 第176委員会	豊橋技術科学大学 機械工学系 安井利明 Tel.0532-44-6703 http://martens.me.tut.ac.jp/176/ISAEM2012/
7~9日	第53回高圧討論会 (大阪)	日本高圧学会	事務局 多田 他 Tel.070-5545-3188 http://www.highpressure.jp/forum/53/
8,9日	第18回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム (大阪)	化学工学会 粒子流体プロセス部会	大阪府立大学 綿野 哲 Tel.072-254-9305 http://www.chemeng.osakafu-u.ac.jp/FB18/FB18.html
9日	第211回西山記念技術講座「金属の界面腐食科学技術の進歩と今後の展望」(東京 6号407頁)	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel.03-3669-5933
10日	最先端鉄鋼体験セミナー(新日鐵広畑) (兵庫 7号517頁 申込締切10月10日)	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel.03-3669-5933
14~16日	ものづくりNEXT↑2012 (東京)	日本能率協会	事務局 中野、吉野 Tel.03-3434-0587 http://www.jma.or.jp/next/
16日	第212回西山記念技術講座「金属の界面腐食科学技術の進歩と今後の展望」(大阪 6号407頁)	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel.03-3669-5933
16日	関西支部 平成24年度材料セミナー テーマ3「透過型電子顕微鏡(TEM)による解析技術の基礎と応用」(大阪 本号598頁)	日本鉄鋼協会 関西支部	関西支部 材料セミナー係 n-kansai@ostec.or.jp
17日	最先端鉄鋼体験セミナー(JFE西日本倉敷) (岡山 7号517頁 申込締切10月17日)	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel.03-3669-5933
18~20日	Techno-Ocean2012 (兵庫)	テクノ・オセアン・ネットワーク	事務局 Tel.078-303-0029 techno-ocean@kcva.or.jp
19~21日	修士・博士学生向け「第6回学生鉄鋼セミナー 製鉄・製鋼コース」(千葉 5号324頁 申込締切6月29日)	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel.03-3669-5933
20~22日	修士・博士学生向け「第6回学生鉄鋼セミナー 材料コース」(茨城 5号324頁 申込締切6月29日)	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel.03-3669-5933
20,21日	第31回疲労シンポジウム (神奈川)	日本材料学会	Tel.075-761-5321 http://fatigue.jsms.jp
20~23日	第10回エコバランス国際会議 (神奈川)	日本LCA学会	Tel.03-3503-4681 http://ilcaj.sntt.or.jp/EcoBalance2012/
24日	最先端鉄鋼体験セミナー(住金鹿島) (茨城 7号517頁 申込締切10月24日)	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel.03-3669-5933
25~28日	The International Deep Drawing Research Group(IDDRG2012) (India)	SMART	http://www.iddrg2012.in/
26,27日	日本バイオマテリアル学会シンポジウム 2012 (宮城)	日本バイオマテリアル学会	事務局 Tel.022-215-2728 http://kokuhoken.net/jsbm/event/meet_34.html
26~28日	Asian Thermal Spray Conference 2012 (アジア溶射会議2012) (茨城)	日本溶射学会	http://www.jtss.or.jp/atssc2012/
27~30日	第21回 AE国際シンポジウム (沖縄)	日本非破壊検査協会	中村芳江 Tel.03-5821-5105 nakamura@jsndi.or.jp http://www.jsndi.jp/sciences/index3_1.html
28~30日	評価・分析・解析部会 国際シンポジウム「鉄鋼業における分析・解析法の最近の進歩」RATEC2012 (東京 4号241頁 発表者以外申込締切10月31日)	日本鉄鋼協会	東北大学 多元物質科学研究所 井上亮 Tel&Fax.022-217-5157 ratec2012@imr.tohoku.ac.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
28~30日	第2回次世代ものづくり基盤技術産業展—TECH Biz EXPO 2012—(愛知)	名古屋国際見本市委員会	Tel. 052-735-4831 techbiz@nagoya-trade-expo.jp
28~30日	国際粉体工業展東京2012 (東京)	日本粉体工業技術協会	「国際粉体工業展東京2012」展示会事務局(株)シー・エス・ティ Tel. 03-5297-8855 http://www.appie.or.jp
30日	第53回レアメタル研究会 (東京 本号597頁)	レアメタル研究会	東京大学 岡部研究室 学術支援研究職員 宮寄智子 tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp
30~2日	第20回機械材料・材料加工技術講演会(M&P2012) (大阪)	日本機械学会	http://www.jsme.or.jp/conference/mpdconf112/ (9月上旬公開予定)
2012年12月			
3~5日	第25回国際超電導シンポジウム (ISS2012) (東京)	国際超電導産業技術研究センター	事務局 Tel. 03-3536-7283 iss@istec.or.jp http://www.istec.or.jp/ISS/
3~5日	第38回固体イオニクス討論会 (京都)	固体イオニクス学会	事務局 Tel. 075-383-2519 http://www.eguchi-lab.ehcc.kyoto-u.ac.jp/ssij38/
6,7日	第50回記念高温強度シンポジウム (京都)	日本材料学会	シンポジウム係 Tel. 075-761-5321 jimu@jsms.jp http://www.jsms.jp
13日	第64回白石記念講座「鋼・コンクリート構造物の腐食・防食、劣化とセンシング技術の課題と展望」 (東京 7号519頁)	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-3669-5933
13,14日	第26回信頼性シンポジウム—安心・安全を支える信頼性工学の新展開— (香川)	日本材料学会	シンポジウム係 Tel. 075-761-5321 RESVMP02012@jsms.jp http://sinrai.jsms.jp
20,21日	鉄鋼工学セミナー「スラグ処理専科」 (東京 本号594頁 申込締切11月26日)	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-3669-5933
2013年1月			
11日	第54回レアメタル研究会 (東京 本号597頁)	レアメタル研究会	東京大学 岡部研究室 学術支援研究職員 宮寄智子 tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp
25日	「ISIJ International」特集号「Recent Progress of Science & Technologies for the Iron Ore Agglomeration Processes (鉄鉱石塊成化プロセスに関する科学技術の最近の進歩)」原稿締切 (6号401頁)	日本鉄鋼協会	東北大学 葛西栄輝 Tel. 022-795-4895 kasai@material.tohoku.ac.jp
30,31日	KAST教育講座「切削・研削加工技術の新しい流れ」コース (神奈川)	神奈川科学技術アカデミー	教育情報センター 教育研修グループ 石川和宏 Tel. 044-819-2033 ed@newkast.or.jp
30~1日	先端セラミックス&機能性ガラス 先進応用技術展・会議 (Neo Ceramics 2013) (東京)	日本セラミックス協会、他	Neo Ceramics事務局 Tel. 03-3219-3568 ceramics@ics-inc.co.jp http://www.neoceramics.jp/
2013年2月			
22日	第13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	シンポジウム係 Tel. 075-761-5321 design13@jsms.jp http://www.jsms.jp
2013年3月			
22日	第55回レアメタル研究会 (東京 本号597頁)	レアメタル研究会	東京大学 岡部研究室 学術支援研究職員 宮寄智子 tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp
2013年5月			
5~10日	The 5th international conference on Recrystallization and Grain Growth (Australia)	Organizing Committee	http://www.rex-gg2013.org/
20~23日	The 3ed International Symposium on Cutting Edge of Computer Simulation of Solidification, Casting and Refining (CSSCR2013) (Sweden & Finland)	KTH & Aalto Univ.	csscr2013@mse.kth.se http://www.kth.se/en/itm/inst/mse/research/applied-process-metallurgy/csscr2013/
2013年6月			
30~4日	第32回熱電変換国際会議 (兵庫)	産業総合研究所	舟橋良次 Tel. 072-751-9485 funahashi-r@aist.go.jp (準備中)
2013年9月			
10~15日	The 8th International Conference on the Beginning of the Use of Metals and Alloys (第8回金属の歴史国際会議(BUMA8)) (奈良 7号511頁)	日本鉄鋼協会	学術企画グループ Tel. 03-3669-5932
2013年12月			
2~6日	8th International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials (THERMEC2013) (Las Vegas, USA)	THERMEC2013運営委員会	物質・材料研究機構 津崎兼彰 Tel. 029-859-2101 http://www.thermec.org/2013/

編集後記

4年に一度のオリンピックがロンドンではじまっています、この編集後記掲載された「ふえらむ」が皆様のお手元に届く頃は、日本選手の活躍が放送され、連夜の熱戦で寝不足の方もおられるでしょうか。

陸上競技は気温を味方につけた選手が有利でしょう。しかし水泳は、競泳用プールの水温が25℃から28℃と決められているようで、水温が高すぎると良い記録はでないようです。また本当かどうか定かではありませんが、一般的に日本人は低めが苦手だそうで、日本での国際試合は範囲内で少し高めを狙って設定しているらしいです。確かに、真冬でもTシャツ姿の欧米人らしき人も良く見かけますし、日本の電車には弱冷房車があって冷房の嫌いな方もいます。

鉄鋼業は温度への依存性が高く、温度制御なくして発展はなかったと思います。また、製造現場は人も設備も暑熱対策が必要で、工程は冷間であっても下工程は屋外からの埃を嫌うため建屋

を密閉していますから建屋内の気温は相当高くなっています。作業への対策とともに夏の暑さがモーターや電子機器の故障原因にもなるので、精密な電子機器はクーラーの効いた部屋に収められています。

子供の頃、夏の楽しい思い出と言えば海水浴、キャンプ、夏祭りや野外活動ばかりが浮かびます。家の中は暑いので、涼しさを求め屋外に出かけていたと思います。クーラーの効いている家で昼寝ばかりしては、記憶に留まる楽しい思い出は残らなかったと思います。かき氷やスイカも、暑いからおいしいのであって、クーラーの効いた部屋で食べてもおいしくないのではないのでしょうか。

今年も節電が必要です、クーラーの効いた部屋は精密機器に譲って、私たちは自然の涼を求めてみませんか。木陰で読書、これが本当のエコではないのでしょうか。ぜひ「ふえらむ」も持参してください。(A.Y.)

会報委員会 (五十音順)

委員長	森田 一樹 (東京大学)		
副委員長	上島 良之 (新日本製鐵 (株))		
顧問	細谷 佳弘 ((株) 特殊金属エクセル)		
委員	小野 嘉則 (物質・材料研究機構)	大野 宗一 (北海道大学)	神戸 雄一 (日本冶金工業 (株))
	梶野 智史 (産業技術総合研究所)	杉本 卓也 (愛知製鋼 (株))	高谷 英明 (三菱重工業 (株))
	寺岡 浩 (大同特殊鋼 (株))	戸高 義一 (豊橋技術科学大学)	野崎 精彦 (UDトラックス (株))
	早川 朋久 (東京工業大学)	林 幸 (東京工業大学)	藤本 延和 (日新製鋼 (株))
	船川 義正 (JFEスチール (株))	前田 恭志 ((株) 神戸製鋼所)	森 善一 (住友金属工業 (株))
	三木 貴博 (東北大学)	山内 昭良 (日本鉄鋼協会)	

ふえらむ/鉄と鋼 合本誌 定価 4,000円 (消費税等込・送料本会負担)

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

1996年5月10日第三種郵便物認可 2012年7月25日印刷納本、2012年8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 専務理事 小島 彰

Tel: 学会・生産技術部門事務局: 03-3669-5931(代) Fax: 03-3669-5934(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 2012 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つては、その必要はございません(社外頒布目的の複写については、許諾が必要です)。

権利委託先: 一般社団法人学術著作権協会

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル

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

複写以外の許諾(著作物の引用、転載、翻訳等)に関しては、(一社)学術著作権協会に委託致しておりません。

直接、本会へお問い合わせください。

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

©Copyright Clearance Center, Inc

222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA

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

JASIS

Japan Analytical & Scientific Instruments Show

分析展／科学機器展は、
「JASIS」へ生まれ変わりました。
(ジャシス)

2012

未来発見。

規模が大きく
大変有益。

3日間見ても
飽きなかった!!

落ち着いていて周りやすい。
出展社とよく話が出来てよかった。

分析を行う立場としては、
分析展と科学機器展を
一度に見られ、好都合。

アジア最大級へ

展示400社以上!

新技術説明会337テーマ! 史上最多

2012.9/5(水)▶9/7(金)

幕張メッセ国際展示場 入場無料

午前10:00～午後5:00 併催:新技術説明会/JASISコンファレンス

主催:社団法人日本分析機器工業会/一般社団法人日本科学機器協会

後援:経済産業省/文部科学省/環境省/農林水産省/日本分析化学会/日本化学会 他(予定)

コメントは、ご来場者様に
いただいたご意見です。

<http://www.jasis.jp>

△ URLが変更になりました。ご来場前に左記URLより入場事前登録を!(7月2日(月)受付開始)
※事前登録をしない場合、ご入場に時間が掛かる場合があります。

全自動シリアルセクションング 3D顕微鏡

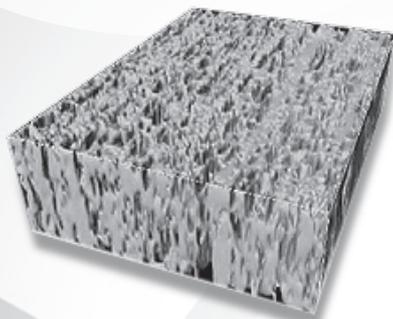
Genus 3D
 (ジーナス スリーディ)

材料内部の3D観察、3D数値化が可能に!

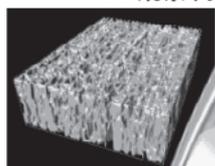
光学顕微鏡、測定用高精度レーザー、湿式研磨装置、操作PC搭載により速度や荷重などの研磨条件を自由に設定でき、研磨、エッチング、洗浄、観察までを繰り返す一連の**組織観察過程の全自動化が可能**になりました。観察画像を自動的にPC取り込み、3次元化等データの応用が容易です。清掃も簡単で劇的な時間短縮につながります。

<主な用途>

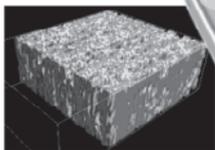
- ・単相、複相組織解析
- ・材料の破壊機構解明 (ポイド、亀裂)
- ・欠陥評価 (介在物、空洞など)
- ・材料内部界面の解析 (相界面、粒界)



研磨観察を行っていた材料、部品の
3D観察、数値化!



Genus 3D



材料

鉄
ステンレス
アルミ
銅
チタン
等

・圧延
・転造
・鍛造
・溶接
・溶射
・蒸着
等

加工方法

主な仕様 ・対応試料 金属、無機材料等(研磨可能な物に対応) ・試料サイズ 樹脂固定 円形試料(標準1インチ)
 ・試料研磨量測定 分解能0.01 μ ・本体寸法 W860mm×H630mm×D540mm

国内総販売元



株式会社

新興精機

〒812-0054 福岡市東区馬出一丁目18番3号

TEL : 092-641-8451 FAX : 092-641-8786 担当 : SAM課・堀ノ内

Email: horinouchi@shinkouseiki.co.jp http://www.shinkouseiki.co.jp

定価 4,000円 (本体 3,810円)