

技術展望

鉄鋼スラグ利用の現況および新規有効利用技術の開発状況概括

Overview of the Present Situation of the Steel Slag Application and the Development of New Utilization Technologies

堀井和弘* Kazuhiro HORII
 堤直人 Naoto TSUTSUMI
 加藤敏朗 Toshiaki KATO
 北野吉幸 Yoshiyuki KITANO
 菅原敬介 Keisuke SUGAHARA

抄 録

鉄鋼スラグは、日本全体で年間約 4000 万 ton 生成されており、その成分、機械的特性・機能により、セメント原料、路盤材、土工用資材等の用途にほぼ全量が有効利用されている。その過半が自然からの新規採取原料の代替や新規製造プロセス省略による省エネルギー、省 CO₂ に貢献する用途であり、その点で鉄鋼スラグの利用拡大は地球環境保全に貢献する取組である。一方、長期的な需要動向としては土木・建設工事等、鉄鋼スラグの主な利用用途市場の縮減が想定されることから、これまで新日鐵住金(株)では鉄鋼スラグ使用における課題の解決およびスラグの特性を活かした新たな用途開発を継続して進めてきた。鉄鋼スラグの生産・販売概況、特性、用途開発状況について述べた。

Abstract

About 40 million tons of steel slag is generated in Japan every year and almost all of the slag is used in the several field such as raw material for cement, course material for road base and civil work material according to the ingredient, mechanical or functional characteristic. Expansion of the steel slag utilization has been an important action to contribute the solving for global warming, because its utilization will be contributed effectively for saving both energy and CO₂ in terms of the substitute for fresh natural raw materials and the new manufacturing process abbreviation-saving. However, Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation has promoted continuously the engineering works, construction pushed forward to solve the problem in the steel slag and also to develop the new utilization based on the slag characterization, because of the assumption what the main conventional market of the steel slag will be reduced in future. In this report, the current status about steel slag generation and its sales, introduction of the characteristic of steel slag and new technology from research and development are mentioned.

1. はじめに

鉄鋼スラグは、鉄鋼製品製造時に鉄 1 ton 当たり約 400 kg 生成され¹⁾、ほぼ全量がセメント用材料や道路用路盤材、土工工事用材料、肥料等の用途において有効に活用されている(表 1、図 1 参照)。しかし長期的には国内公共事業や建設需要の縮減が予想される一方、スラグ製品と競合する他のリサイクル材料の適用奨励、各種資材における環境基準適合性評価の厳格化といった社会的な情勢変化が着実に進展してゆくと想定される。これに対し新日鐵住金(株)(以下、当社)では、鉄鋼スラグの有する物理的、化学的特徴を活かした、“環境資材”としての新たな機能

表 1 鉄鋼スラグ生産量と販売量 (2012Fy)
Amount of production and sales of the steel slag

			Production		Sales	
			Japan	NSSMC	Japan	NSSMC
Pig iron			81 860	43 902	—	—
Crude steel			106 624	43 958	—	—
Production	Blast furnace	Air cooled	4 590	2 689	4 855	2 685
		Granulated	20 049	10 384	21 030	10 792
		Sub total	24 639	13 073	25 885	13 477
	Steelmaking	BOF	11 036	5 572	11 810	6 569
		EAF	2 726	77	2 011	65
		Sub total	13 762	5 649	13 821	6 634
Grand total			38 401	18 722	39 706	20 111

(kton)

* スラグ・セメント事業推進部 企画調整室長 東京都千代田区丸の内 2-6-1 〒100-8071

創出とその活用に向けての利用技術開発を進めてきた²⁾。

本稿では、前半で鉄鋼スラグの生産、販売の現況およびスラグ製品の特性、課題を概括し、後半では高炉・転炉系鉄鋼スラグ製品の新規利用に向けた技術開発状況について紹介する。

2. 鉄鋼スラグの概況

2.1 鉄鋼スラグの生産状況

鉄鋼スラグは、鉄鉱石や石炭、コークス等の原料中の脈石成分および、精錬プロセスにおいて Si, P, S 等の鉄銑中の不純物除去や、溶鋼の成分調整のために添加されるフラックスに由来して、鉄鋼生産時に生産される。その生産量は、高炉スラグは鉄銑 1 ton あたり約 300kg、製鋼スラグは溶鋼 1 ton あたり約 100~150kg であり、両スラグ合計で日本全体で年間約 4 千万 ton 程度である。

2.2 鉄鋼スラグの特性

鉄鋼スラグは CaO と SiO₂ を主成分とし、その他に高炉スラグでは Al₂O₃, MgO や S 等を含む。製鋼スラグは前記

に加え、酸化鉄 (FeO, Fe₂O₃) や MnO, P₂O₅ 等を含む。溶銑予備処理の際に発生する予備処理スラグ (脱硅スラグ、脱磷スラグ、脱硫スラグ等)、溶鋼取鍋内に転炉から流出したスラグや二次精錬処理時に生成した造塊スラグ (二次精錬スラグ、取鍋スラグともいう) も製鋼スラグに含まれる。

表 2¹⁾ に鉄鋼スラグの代表的な成分を記す。高炉スラグはセメント同様、化学成分として CaO, SiO₂, Al₂O₃ を主成分としており、特に水砕スラグは活性が強く、アルカリ性水溶液のもとでは水和物を生成して硬化する強い潜在水硬性を有するのが特徴であり、主に高炉セメントの原料として活用されている。また、製鋼スラグや高炉徐冷スラグは自然砕石や砂と似た外観、性質を活かし、路盤材や土工用資材、骨材等の用途に活用されている。

2.3 鉄鋼スラグの処理プロセス

鉄鋼スラグの処理プロセスフローの概略を図 2¹⁾ に示す。

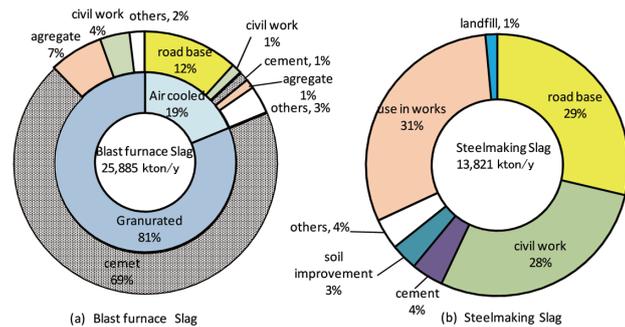


図 1 鉄鋼スラグ利用用途実績 (2012Fy)
Usage of steel slag (2012Fy)

表 2 鉄鋼スラグの組成例¹⁾
Typical compositions of several steel slag

	Blast furnace slag	BOF slag	EAF slag		Reference	
			Oxidation slag	Reduction slag	OPC *	Andesite
CaO	41.7	45.8	22.8	55.1	64.2	5.8
SiO ₂	33.8	11.0	12.1	18.8	22	59.6
T-Fe	0.4	17.4	29.5	0.3	3.0	3.1
MgO	7.4	6.5	4.8	7.3	1.5	2.8
Al ₂ O ₃	13.4	1.9	6.8	16.5	5.5	17.3
S	0.8	0.06	0.2	0.4	2	-
P ₂ O ₅	<0.1	1.7	0.3	0.1	-	-
MnO	0.3	5.3	7.9	1	-	0.2

* OPC : Ordinary Portland Cement

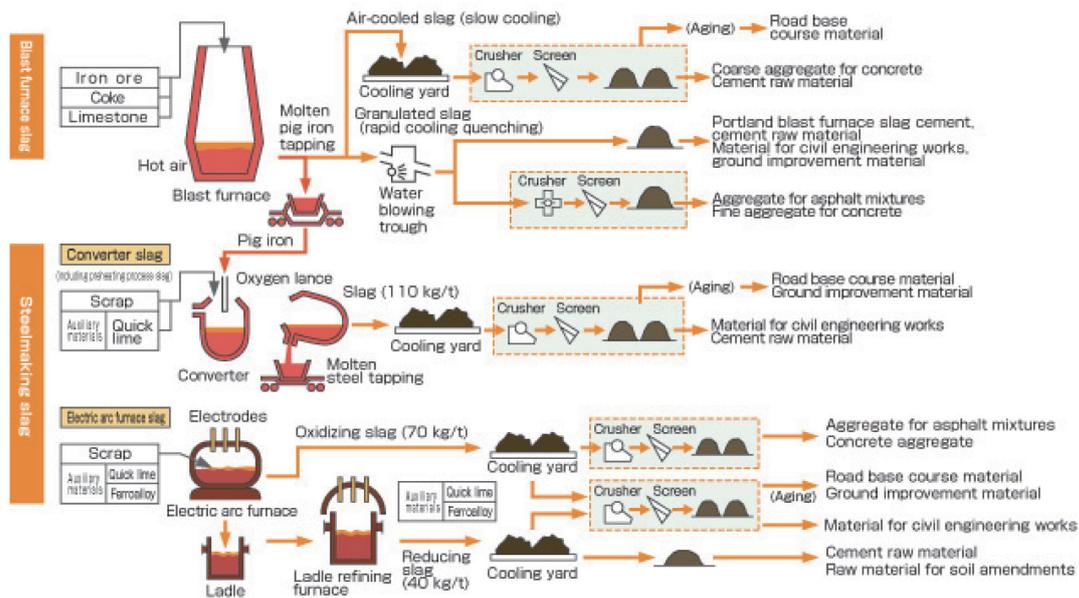


図 2 スラグ処理プロセスフロー概略¹⁾
Schematic view of the slag treatment process

(1) 高炉スラグの冷却・処理方法

図1に示すように高炉スラグの約80%は約1500℃の熔融スラグに高圧水を噴射させる急冷処理をすることによりガラス質の砂状になる。水と混ざりスラリー化したスラグから脱水槽で水砕スラグを分離抽出し、製品製造を完了する。高炉スラグの残り約20%は熔融スラグをドライピットあるいは畠と呼ばれる土場の冷却ヤードに放流し、自然放冷のみ、または自然放冷と散水を併用して冷却し、岩石状に固化させる（徐冷スラグ）。これを破碎、篩分級処理および黄色水対策のエージング処理を経て製品として出荷される。

(2) 製鋼スラグの冷却・処理方法

製鋼スラグは下記①～④の4工程の処理を実施した上で製品として出荷している。すなわち①高温熔融スラグの冷却処理（冷却ヤード等で自然放冷または自然放冷と散水併用）、②スラグ中の金属鉄回収を目的とした破碎および磁力選鉱処理、③スラグ製品製造のための粒度調整を目的とした破碎および篩分級処理、④スラグ製品品質向上および安定化を目的としたエージング処理である。

3. 鉄鋼スラグ利用時の課題と対応状況

3.1 黄色水溶出課題（高炉スラグ）

高炉スラグには溶銑製造時に還元材として使用するコークスやその他の原料に由来して、1%程度の硫黄が硫化カルシウム（CaS）の形態で含有されている。このため高炉徐冷スラグが水と接触すると、CaSが加水分解し、更に逐次反応が進行して多硫化イオン（ S_x^{2-} ）を生成することにより、溶出水は黄色に変色したり温泉臭がすることがある³⁾。この現象を防止するため、破碎後に空気中の酸素と硫黄を反応させて、チオ硫酸イオン（ $S_2O_3^{2-}$ ）や硫酸イオン（ SO_4^{2-} ）に酸化させたり、炭酸ガスで中性化し、黄色水の色や臭気を消失させるエージングと呼ばれる安定化処理を実施している。エージングは、破碎、篩分けした製品製造直後品をヤードに積みつける方法で実施されている³⁾。また製品出荷時には通常、例えば呈色反応試験⁴⁾等により硫黄の安定化処理が終了していることを確認している。

3.2 膨張性課題（特に製鋼スラグ）

製鋼スラグは鉄鋼精錬時に石灰等のフラックスを使用する。石灰（CaO）は単体での融点が2572℃と極めて高温であり、転炉や電気炉での精錬処理温度（1300～1700℃程度）では溶融しない。そのため、他成分との化合物形成等の溶融促進（スラグ成分設計）を実施しているものの、一部未反応のままスラグ中に残留したCaOや熔融スラグ冷却時に析出したCaOが遊離石灰（free-CaO、以下f-CaOと記す）としてスラグ中に残留することがある。f-CaOは水と接触すると水和反応し（ $CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$ ）、約2倍に体積膨張する。路盤材に使用されたスラグ中のf-CaOが水和反

応により膨張した場合は、舗装面の隆起や亀裂発生等の原因となる。

生成直後の製鋼スラグはf-CaOを数%含有することから、出荷前に予め水和反応を完了させる処理（エージング）を実施している。エージング方法にはスラグヤードで自然の降雨水により水和反応させる大気エージング法、および促進エージング法として高温蒸気を使用する蒸気エージング法、温水中に浸漬処理する温水エージング法、密閉容器内で高圧蒸気（例えば0.6～1MPa）により強制的に水和反応を促進させる加圧エージング法等が実用化されている。現在は製鋼スラグを道路用路盤材として出荷する際には蒸気エージング処理を実施することが一般的であり、当社はJIS A 5015⁴⁾に規定された品質管理方法、管理基準（80℃水浸膨張率 $\leq 1.5\%$ ）を満足することを確認して出荷している。

3.3 アルカリ課題（高炉スラグ、製鋼スラグ）

鉄鋼スラグ製品は、含有する石灰の影響で水と反応すると溶出水のpHが10～12.5となり、コンクリート再生路盤材やセメント安定処理土と同等のアルカリ性を示す。ただし、我が国の土壌は一般に酸性土壌であることから、適正使用時はスラグ製品からアルカリ成分が溶出した場合でも土壌に吸着・中和されるため、環境に影響を及ぼすことはない。しかし土工用途等で一か所に大量のスラグ製品を使用する場合には、廃コンクリート再生材料使用時と同様、アルカリ供給源としての影響が無視できなくなる可能性がある。このリスクに対し、①当社販売管理規程に従い、必要に応じて契約前に現地調査（地形、現地土壌のアルカリ吸着能・透水性、地下水脈、周辺地域水脈状況等）を実施し適用可否判断を行うとともに、施行中・施行後も問題ないことを適時現地を確認、②現地土壌、地勢条件におけるアルカリ溶出・拡散リスクを評価する目的でpHシミュレーション技術の開発、③海域利用用途向けを含めアルカリ溶出リスク低減技術の開発、等を実行することにより環境コンプライアンス対応力強化を進めている。

3.4 重金属含有課題

鉄鋼スラグ製品は、製造ロット毎に出荷品質検査を実施しており、陸域で使用されるものは土壤環境基準を、海域および埋立地で使用されるものは海洋汚染防止法による水底土砂基準をそれぞれ満足していることを確認して出荷されている。

4. 鉄鋼スラグ資源化状況

4.1 高炉セメント

高炉セメントは図3に示すようにポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末と石こうを所定量混合して製造している。オイルショック以降（1973年～）は高炉セメントの省エネルギー性が評価されて、需要は急拡大し、現在はセメ

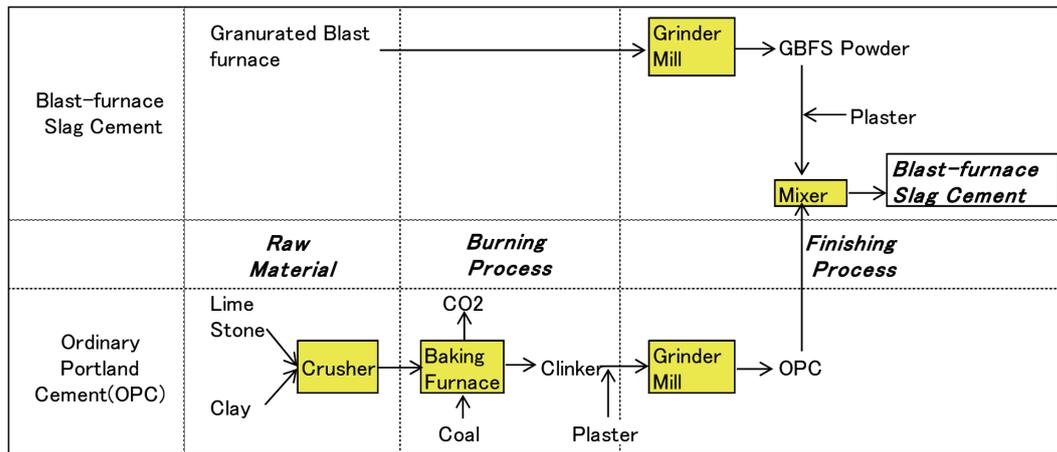


図3 高炉スラグと普通セメントの製造プロセス比較
Manufacturing process comparison between OPC and Blast-furnace Slag Cement

ント生産量全体の約20%の比率となっている⁵⁾。

高炉セメントはセメント中の高炉スラグ微粉末配合量により、A種(5を超え30%以下)、B種(30を超え60%以下)、C種(60を超え70%以下)の三種類に分類されるが、その中でB種が最も多く生産され、幅広い分野で使用されている。高炉セメントは、普通セメントに比較して、①耐海水性や化学抵抗性が大きく、耐久性が向上できる、②塩素イオンの拡散係数が小さく、鉄筋が錆びにくい、③アルカリ骨材反応を抑制できる、④高炉スラグの潜在水硬性の発現により長期強度が増進する、⑤原料の石灰石使用量が削減できる(石灰石からのCO₂発生の削減)こと、およびクリンカー焼成工程を省略できることによりセメント生産時のCO₂排出量を約40%削減できる、⑥地盤改良では六価クロムの溶出が少ない等の特徴がある⁵⁾。一方、①初期強度が低く所定の強度に達するまでの養生期間が長い、②温度依存性が大きいので低温時は強度発現が遅く、特に冬季は養生期間が更に長くなることから、使用にあたっては工期設計に反映する必要がある⁵⁾。

4.2 道路用材料(路盤材)

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に骨材(路盤材)を敷き詰め、締め固める。この路盤材に1979年には徐冷スラグが道路用鉄鋼スラグ(JIS A 5015)として制定され⁴⁾、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磨耗性に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典調達品目に指定された。

製鋼スラグを路盤材に使用する際には、特に膨張防止が品質管理上の最大のポイントである。そのため、過去の膨張トラブルの原因がf-CaOの水和膨張であるとの研究結果をもとに、蒸気エージング処理等、適切な処理を実施しJISを満足する品質を確認した上で出荷している。

4.3 道路用材料(簡易舗装材)

鉄鋼スラグの潜在水硬性を制御することにより、安価で簡易な舗装材料の開発も進めてきた。技術ポイントは高炉水砕スラグと製鋼スラグの配合、粒度を適切に制御することにより、高炉水砕スラグが製鋼スラグのアルカリ刺激を受け、ポゾラン反応を起こすと同時に、スラグから供給されるCaイオンが空気中あるいは散水中の炭酸イオンと反応して炭酸カルシウムを生成し固結する性質を利用している。

具体的には製鋼スラグと高炉水砕スラグ混合材を適切な割合で混合、敷きならし、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、駐車場等の要求仕様を満足する強度が確保できる簡易舗装材(カタマ®SP)として、2010年に大分県リサイクル製品にも認定⁶⁾され、その後当社製鉄所の立地する自治体における同様の認定を拡大中である。更に2013年にはNETIS(New Technology Information System:新技術情報提供システム(国土交通省))に登録(QS-I30016-A)され、最近では新たな用途として舗装道路の法面、鉄道線路周辺敷地や太陽光発電(メガソーラ)敷地等における防草目的の簡易舗装材としての適用が着実に拡大している。

4.4 地盤改良材

我が国の沿岸部においては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む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年代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用材料としての適用技術開発が進められてきた。ここでは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溶出に伴うpH上昇は殆どないことも確認され、天然砂代替資材としての製鋼スラグの利用可能性が評価され

た。更に当社では天然砂にない鉄鋼スラグ特有の固結性能を活用した“エコガイアストーン®(固結タイプ)”を開発し、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⁸⁾。

4.5 肥料・土壌改良用途

2012年度の国内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ると年間約25万tonで、総利用量の約0.6%にとどまっている。鉄鋼スラグの肥料効果については、けい酸石灰肥料として高炉徐冷スラグの施肥による試験が実施され、けい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ぐとともに、葉を直立させ受光態勢を良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⁹⁾、以後1955年には、農林省が世界で初めてけい酸肥料を公定肥料に認定、肥料取締法の改正時に高炉スラグが普通肥料に位置づけられた。

その後の研究開発¹⁰⁾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、当社はけい酸質肥料(高炉スラグおよび製鋼スラグ)、石灰肥料(製鋼スラグ)、りん酸肥料(製鋼スラグ)および鉄分を含む特殊肥料(製鋼スラグ)の4種類について、鉄鋼スラグを肥料原料として肥料メーカーに供給することを通して、各農業生産者へ鉄鋼スラグ肥料・土壌改良材を供給している。とりわけ製鋼スラグは、カルシウム、マグネシア、けい酸以外に酸化鉄やマンガン、ほう素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カルシウムシリケート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¹¹⁾ことが特長である。

4.6 鉄鋼スラグ水和固化体

鉄鋼スラグ水和固化体は高炉水砕スラグ微粉末をコンクリートのセメント結合剤相当に、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、環境負荷の少ないコンクリート代替品を目指して開発された¹²⁾。必要に応じて硬化促進のためのアルカリ刺激剤を添加し、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、塊状に破碎して人工石材等の自由な形状の製品製造が可能である。主な結合剤が高炉スラグ微粉末であり、塊成化による比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。

当社は主な製品として、裏込め石、傾斜護岸材、被覆石等に用いられてい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

鋼スラグにけい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”を開発し商品化している。

4.7 藻場造成用鉄分供給材および海域環境へのスラグの有効性評価技術

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”現象に対し、その原因として温暖化に伴う高水温・貧栄養(気象変化)、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阻害(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¹³⁾に対し、藻類が摂取容易な鉄イオンの供給源として製鋼スラグの適用検討を2002年から開始した。製鋼スラグの海水投入時の白濁について炭酸化処理技術の開発による解決の目途を得たことから東京大学、(株)エコ・グリーン、西松建設(株)および当社間で製鋼スラグ等を適用した鉄分施肥技術の共同開発を開始した。

実海域試験においては、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を透水性のヤシ袋に詰めたもの(ビバリー®ユニット)、鋼製の専用形状BOXに詰めたもの(ビバリー®ボックス)を適正な位置に設置することにより、海中で鉄イオンとして供給することによる藻場再生への効果を調査してきた。2004年秋に開始した北海道増毛町舎熊海岸での試験により、ホソメコンブ群落の着生、繁茂が確認¹⁴⁾¹⁷⁾され、更に継続した定点調査¹⁸⁾により現在もコンブ場が持続していることを確認¹⁹⁾できている。

我々はこの鉄イオン供給による藻場繁殖メカニズムを学術的に証明するため、コンブ生活環(一生のサイクル)における鉄分の必要性検証²⁰⁾²¹⁾、および実海域海中の微量鉄イオン濃度分析技術(検出感度:ppmからppbへ)²²⁾²³⁾等についても並行して開発を進めた。

更に自然環境や生態系への安全性、有用性に関する客観的なデータ収集を目的として、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、シーラボII)を設置²⁴⁾し各種データ採取を行っている。²⁵⁾²⁶⁾

以上の研究の取り組みや実海域試験成果を経て、現在までにその施工箇所は、水産庁との共同試験施工を含め、全国で約30か所¹⁸⁾に及んでいる。

4.8 浚渫土砂改質技術

浚渫土は日本国内で年間2000万m³以上発生しており、その大部分が埋立や海洋投棄処分されているが、昨今の処分場不足問題や環境問題への対応課題があり、その資源化に対するニーズは極めて大きい。一方、土木資材としての天然石砂は環境配慮の観点から使用量削減ニーズがある。

*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) と当社の共同研究成果である。

これら課題に対し、軟弱浚渫土を天然石砂に代替する土木資材として有効利用（カルシア改質土）するための技術開発を進めてきた²⁷⁾。これは浚渫土とカルシア改質材（製鋼スラグを原料とし、成分管理と粒度調整実施）を混合することにより、浚渫土からのシリカやアルミナ分とカルシア改質材からのf-CaOが水和固化して、カルシウムシリケート系水和物やカルシウムアルミネート系水和物が形成され改質土の強度が上昇したものである。海底の深掘れ窪地の埋め戻し、藻場／浅場造成用等、海域環境修復に資する有効な資材である。カルシア改質土はpH上昇抑制、りん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つの特徴を有する。

5. 東日本大震災の復旧支援への鉄鋼スラグの貢献

5.1 がれき混じり津波堆積土の資源化

2011年3月11日に発生した東日本大震災では、津波被害によって被災6県で発生した災害廃棄物量（大型がれき等）は約2300万ton程度、がれき等が混然一体となった土砂・ヘドロ物（津波堆積物）は約1300～2800万tonと推計され²⁸⁾、その処置が課題であったことから、当社は新日鉄エンジニアリング(株)(現 新日鉄住金エンジニアリング(株))と共同で、がれき混じり軟弱津波堆積土に、カルシア改質材を加え、回転式破碎混合工法でこれらを攪拌混合してがれき類を取り除くと同時に、軟弱津波堆積土を建設資材として十分な強度を持つ良質な土に再生する技術（カルスピ®工法）を確立し、2013年8月に一般財団法人土木研究センターの建設技術審査証明を取得した。本技術は岩手県釜石市での災害廃棄物処理事業に本格採用され、20万ton規模の津波堆積物の再生処理を実施した。改質された津波堆積土は釜石市の復興事業工事用資材として有効利用される予定である。

5.2 津波被災農地の再生

東日本大震災で津波により被災した農地面積は太平洋岸6県で24千haと推計された²⁹⁾。被災農地ではヘドロ、がれきの堆積、海水による塩害に加え、ヘドロに含有されたパイライト（硫化鉄）の酸化で生成した硫酸に起因して土壌が極めて強い酸性になる課題があった³⁰⁾。この被災農地に対し、東京農業大学後藤教授らは福島県相馬市において津波被災農地の復興を支援する“そうまプロジェクト”を立ち上げ、がれき除去のみを実施した水田において、降雨による除塩と当社スラグを原料とした製鋼スラグ肥料の施肥によるNa置換、土壌pH調整を実施することにより農地を復興する“東京農大方式”を確立した³¹⁾。2012Fyは12ha、2013Fyは50haの農地を再生するとともに、炭酸カルシウム等の他除塩資材に比較してスラグ肥料の被災農地復興資材としての優位性、有効性を実証した^{31,32)}。

本成果をもとに、2014Fyには相馬地区で国の復興補助

金による製鋼スラグ肥料を使用した農地再生事業（200ha）が認可され成果の更なる拡大が期待される。

また東北大学北村教授らにより鉄鋼協会の産発プロジェクト“製鋼スラグによる東日本大震災で被災した沿岸田園地域の再生”において、除塩・土壌改良材としての製鋼スラグ肥料の効果に加え、スラグ肥料全般の効果について学術的な研究が行われている。本研究によりスラグ肥料の潜在的な実力についての定量的な評価につながる成果が期待される。

6. 今後の展望

鉄鋼生産とスラグ生産は不可分である。将来にわたり国内で鉄鋼生産を継続するためには、鉄鋼生産量に見合ったスラグ製品の有効活用が必須であり、そのために鉄鋼スラグの安全、安定した利用が不可欠である。したがって下記の視点について継続して検討・開発を推進してゆく。

6.1 コンプライアンス対応の更なる強化

品質、環境上のトラブル防止は、鉄鋼製品製造時同様、スラグ製品製造においても全てに優先して対応される状況は今後も変わらない。スラグは前述したように潜在的に膨張性、アルカリ水溶出の課題を有しており、その課題への本質的な改善技術やトラブル未然防止に資する環境影響評価技術について今後も開発を推進する。

ひとたびコンプライアンス事故が起これば、当該社の問題にとどまらず“鉄鋼スラグ製品”全体の評価に致命的なダメージを与えることから、販売管理ルールの明確化と実行管理に関して、業界を挙げて更に強化してゆかねばならない。

6.2 新機能開発、新規市場の開拓推進

表1、図1に示すように、現在は製造された鉄鋼スラグのほぼ全量が有効に利用されているものの、高炉セメント原料用途以外は太宗が路盤材や土木用途に代表される自然砕石・骨材の代替という、鉄鋼スラグの物理的特性を活用した用途であり付加価値が低く、また長期的には需要の縮小が想定されていることからスラグの特性を活かした新規用途開発のニーズは極めて大きい。

一方、スラグの化学的特性を活用した用途は、高付加価値化の可能性が期待できるものの、現在は高炉セメント原料用途以外（高炉水砕スラグ）は肥料として少量が活用されているに過ぎない。今後は新規用途かつ高付加価値用途の視点から、鉄鋼スラグのアルカリ特性を活かした商品開発、例えば海域での浚渫土カルシア改質技術や陸域での軟弱土改質地盤改良技術関連の開発を更にすすめてゆきたい。新規の用途開発には技術確立のみならず環境影響評価、公的認証取得等、関係ステークホルダーや自治体、官庁の評価や理解を得つつ進める必要から開発期間の長期化は避

けられないが、粘り強く開発を継続しスラグの利用用途拡大を通して地域環境保全に貢献してゆく所存である。

参考文献

- 1) 鉄鋼スラグ協会：環境資材 鉄鋼スラグ。2010
- 2) 中川雅夫：第 205・206 回西山記念講座，日本鉄鋼協会編，2011，p. 27
- 3) 港湾・空港等整備におけるリサイクル技術指針。港湾・空港等リサイクル推進協議会，2004
- 4) 日本規格協会：道路用鉄鋼スラグ JIS A 5015。1992
- 5) 鉄鋼スラグ協会：高炉セメント百年史。2010
- 6) 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.htm>
- 7) (財)沿岸開発技術センター・鉄鋼スラグ協会：港湾工用製鋼スラグ利用手引書。2000
- 8) 例えば，(財)沿岸開発技術センター：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。第 10001 号，2010
- 9) 太田道夫：鉄さいの肥料学的利用に関する研究。風間書房，1964
- 10) 倉辺喜一郎，押切亮平：製鉄研究。(302)，70(1980)
- 11) 産業振興(株)：くみあいミネカル(転炉さい)の農業技術解説。1987
- 12) (財)沿岸技術研究センター：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。沿岸技術ライブラリー，2008，p. 28
- 13) 松永勝彦：水環境学会誌。26(10)，614(2003)
- 14) Yamamoto, M., Hamasuna, N., Fukushima, M., Okita, S., Horiya, S., Kiso, E., Shibuya, M., Sadakata, M.: J. Jpn. Inst. Energy. 85, 971 (2006)
- 15) 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
- 16) 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
- 17) 堤直人，加藤敏朗，木村泰三，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
- 18) 堤直人：平成 22 年度磯焼け対策全国協議会。水産庁，2010
- 19) 加藤敏朗：平成 23 年度磯焼け対策全国協議会。水産庁，2011
- 20) Motomura, T, Sakai, Y.: Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries. 47 (12), 1535 (1981)
- 21) 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
- 22) 相本道宏：海洋化学研究。22(1)，19(2009)
- 23) 相本道宏，加藤敏朗，木曾英滋，堤直人，三木理：新日鉄技報。(390)，89(2010)
- 24) 藤本健一郎，加藤敏朗，植木知佳，堤直人：新日鉄技報。(391)，206(2011)
- 25) 植木知佳，加藤敏朗，三木理：海洋理工学会誌。17(1)，49(2011)
- 26) 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
- 27) 日本鉄鋼連盟：“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。2008
- 28) 環境省：東日本大震災津波堆積物処理指針。2011
<http://www.env.go.jp/jishin/attach/sisin110713.pdf>
- 29) 農林水産省大臣官房統計部農村振興局：東日本大震災に伴う被災農地の復旧完了面積。2012 年 3 月 11 日現在情報
- 30) 久馬一剛：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)
- 31) 後藤逸男：ふえらむ。17(8)，24(2012)
- 32) 新日鐵住金(株)，東京農業大学，相馬市，JA 相馬：プレスリリース“東日本大震災における津波被災農地の除塩対策において転炉スラグ肥料が効果を発揮”。2013.3.8
http://www.nssmc.com/news/20130308_100.htm



堀井和弘 Kazuhiro HORII
スラグ・セメント事業推進部 企画調整室長
東京都千代田区丸の内2-6-1 〒100-8071



堤直人 Naoto TSUTSUMI
技術開発企画部 技術企画室
主幹 (部長代理)



加藤敏朗 Toshiaki KATO
先端技術研究所 環境基盤研究部
首席主幹研究員 博士(学術)



北野吉幸 Yoshiyuki KITANO
スラグ・セメント事業推進部長



菅原敬介 Keisuke SUGAHARA
スラグ・セメント事業推進部 市場開拓室長