

## 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  
スラグ・セメント事業推進部 マネージャー兼務

北野吉幸  
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<sup>1)</sup>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<sup>2)</sup>。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<sup>3)</sup>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「製銑」、ならびに溶銑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

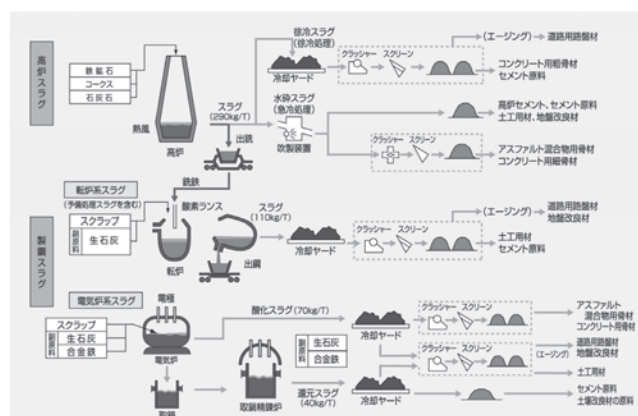


図1 鉄鋼スラグの生成工程<sup>1)</sup>

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 |
| スラグ生成量 | 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 (SiO<sub>2</sub>) を主成分とし、その他に高炉スラグではアルミナ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 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 (MnO<sub>2</sub>)、リン酸 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 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<sup>1)</sup>。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

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<sup>4)</sup>。

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CO<sub>2</sub>排出量を削減できる (図3)<sup>3)</sup>。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<sup>5)</sup>、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

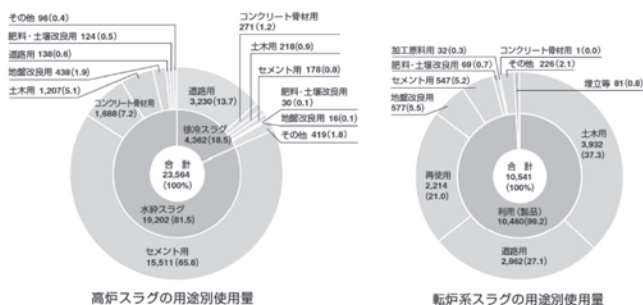


図2 各スラグの用途別利用状況<sup>1)</sup> (2010年度、千トン)

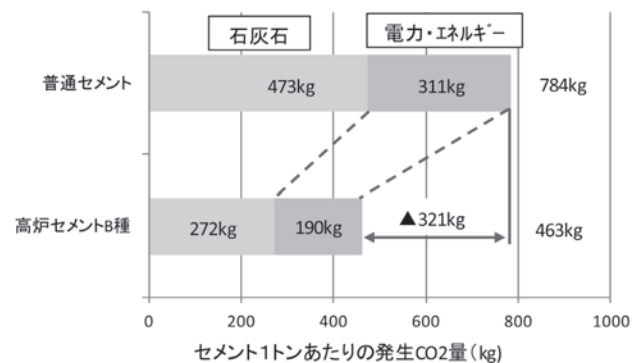


図3 高炉セメント利用時のCO<sub>2</sub>削減効果<sup>3)</sup>

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<sup>6)</sup>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<sup>7)</sup>、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 $3.6\text{g/cm}^3$ 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<sup>8)</sup>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<sup>9)</sup>。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<sup>10)</sup>。

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）

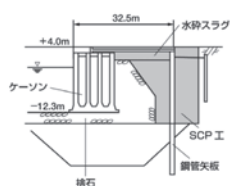


図4 神戸港湾岸復旧工事（六甲アイランド）<sup>1)</sup>

### 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<sup>9)</sup>。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<sup>11)</sup>。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<sup>1)</sup>

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<sup>12-15)</sup>。

本製品は室蘭港入江地区岸壁 (−8m) 耐震改良工事<sup>16)</sup>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<sup>17,18)</sup>。

### 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<sup>19)</sup>。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<sup>20)</sup>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<sup>21)</sup>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

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<sup>22)</sup>。

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<sup>23,24)</sup>として、製鋼スラグ肥料を用いた評価試験<sup>25)</sup>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物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。CO<sub>2</sub>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<sup>26)</sup>である。これまで17作のう

表2 鉄鋼スラグ肥料の特性<sup>1)</sup>

| 《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)                                                                                                                                                                            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>畦畔による丈夫な稲づくり</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 葉の受光態勢が向上し、光合成が促進する</li> <li>・ 根の活力が旺盛になり、下葉の枯れ上りを抑える</li> <li>・ 葉が丈夫になり、倒伏を防ぐ</li> <li>・ 葉の表皮にケイ化細胞ができ、いもち病を防ぐ</li> </ul> | <b>水田</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 酸化鉄・マンガンにより根に活力を与える</li> <li>・ 硫酸・石灰・リン酸・苦土により丈夫な稲を作る</li> <li>・ 鉄分欠乏土壌の改良 (根腐れ・コナ菌枯れ・秋落田) に効果的</li> </ul>                                 |
| <b>乾物生産が旺盛</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 生育中期 もみ生産効率の向上 (もみ数の増加)</li> <li>・ 生育後期 登熟の向上 (千粒量の増加)</li> </ul>                                                               | <b>畑</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 硫酸・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</li> <li>・ 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</li> </ul> |
| <b>収量・外観品質・食味の向上</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ もみ数と千粒量の増加で増収</li> <li>・ 外観品質の向上で一等米比率が増加</li> <li>・ 登熟の向上で食味が良くなる</li> </ul>                                             |                                                                                                                                                                                               |

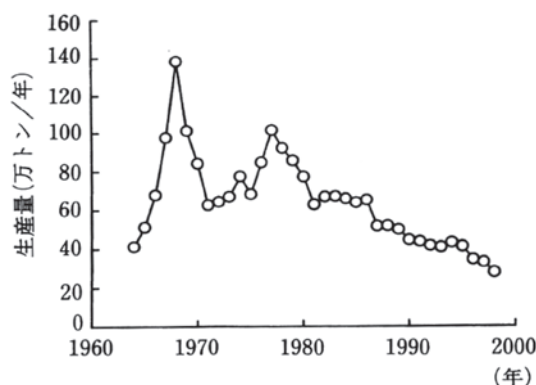


図5 ケイ酸質肥料の生産推移<sup>20)</sup> (協力: 博友社)



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<sup>3)</sup>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<sup>27)</sup>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「鉄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<sup>28)</sup>。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<sup>29)</sup>。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<sup>30)</sup>、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<sup>31)</sup>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や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<sup>®</sup>SP)として、2010年には大分県リサイクル製品にも認定<sup>32)</sup>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<sup>33)</sup>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<sup>34)</sup>、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<sup>35)</sup>に興味を持ち、山林保全<sup>36)</sup>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<sup>37)</sup>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(ビバリー<sup>®</sup>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<sup>38-41)</sup>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<sup>42)</sup>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<sup>43)</sup>している。

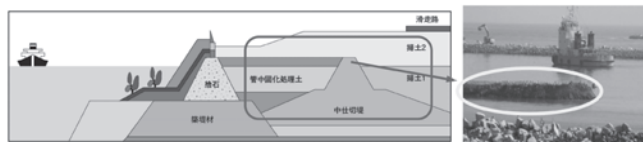


図6 羽田空港D滑走路建設外工事への適用事例<sup>31)</sup>

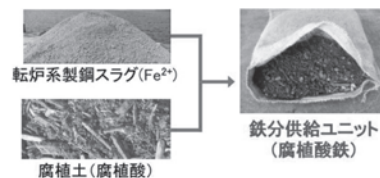


写真4 鉄分供給ユニットの構成例



写真5 ユニット施工状況

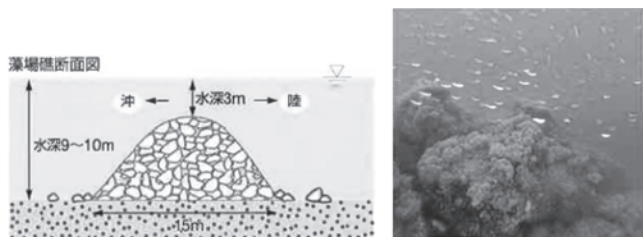


図7 三重県三浦湾での藻場礁築造事業概要



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<sup>44)</sup>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<sup>45)</sup>（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<sup>46,47)</sup>、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・成長に必要であることや、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<sup>48,49)</sup>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<sup>50)</sup>して各種の検計<sup>51,52)</sup>を進めてきた。このような多岐に至るデータの蓄積<sup>53)</sup>により、新日鉄の藻場造成製品であるビバリー®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<sup>42)</sup>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

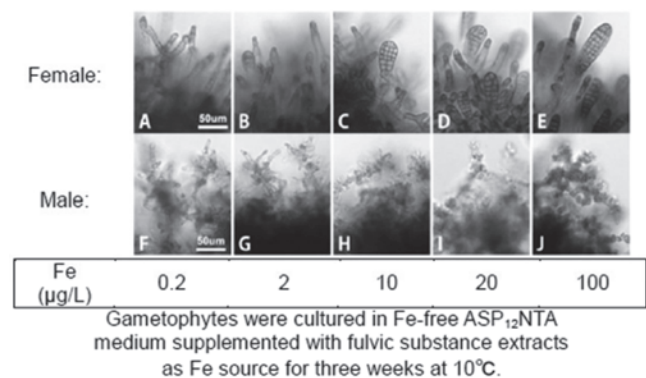


図8 コンブ配偶体の成熟に及ぼす鉄濃度の影響

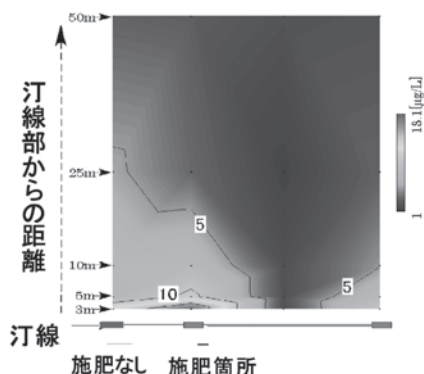


図9 増毛舎熊海岸における海水中微量鉄分布



写真8 総合技術センター シーラボ設備

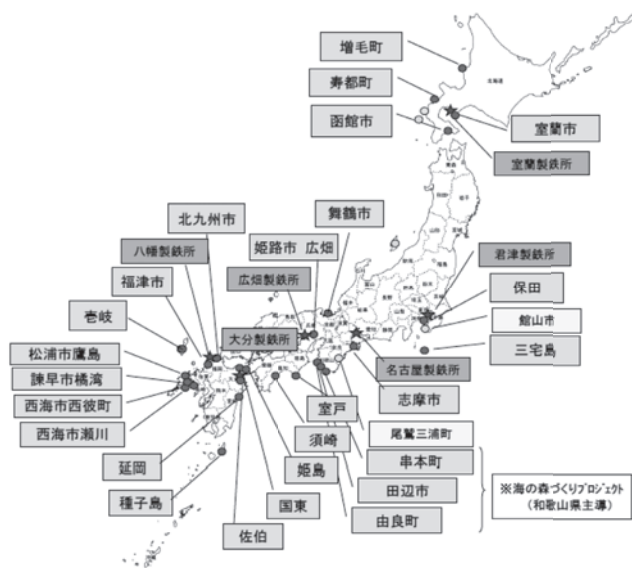


図10 鉄分供給材料を用いた実海域での試用施工状況

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安定化処理（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<sup>54)</sup>。

#### 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」<sup>55)</sup>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<sup>56)</sup>は、大型船舶の航行に必須な航路浚渫作業で定常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1200m<sup>3</sup>（75m×25m×1m）のマウンドを造成する試験<sup>55)</sup>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（910m<sup>3</sup>）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<sup>57)</sup>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<sup>58)</sup>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（工事用船舶）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

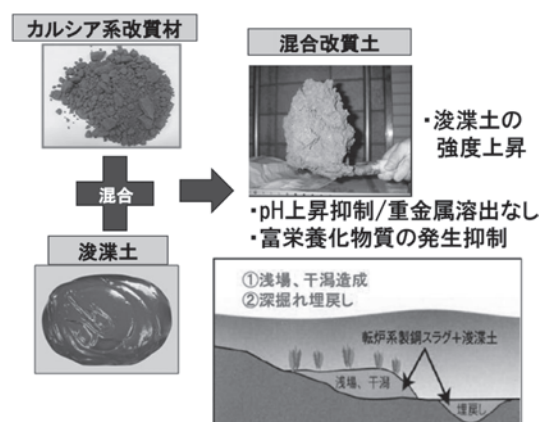


図11 カルシア改質土の概要および特徴

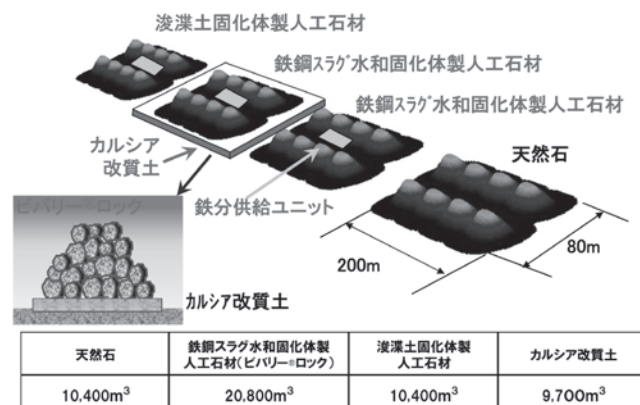


図12 東京湾鋸南町（保田海岸）での適用事例

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CO<sub>2</sub>固定速度は陸上植物よりも10倍程度大きい、という報告<sup>59)</sup>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<sup>60)</sup>（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」<sup>61)</sup>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<sup>62)</sup>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<sup>60)</sup>

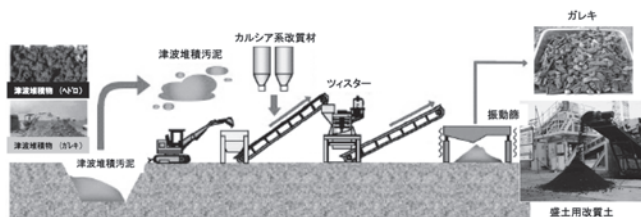


図14 回転式破碎混合工法とカルシア系改質材による堆積土処理

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ア系改質材を加え、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<sup>63)</sup> 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<sup>64)</sup>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<sup>65)</sup>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) 地域に根ざしたリサイクル資材 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) 港湾工事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: 鉾さいの肥料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 : 日本土壌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](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](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)