

(解説)

鉄鋼スラグ製品の紹介と海域実証試験の現況

Introduction of Iron and Steel Slag Products and Present Situation of Oceanic Field Tests



松元弘昭*1
Hiroaki MATSUMOTO



森 英一郎*1
Eiichiro MORI



小北雅彦*2
Masahiko KOKITA



福崎良雄*3
Yoshio FUKUZAKI



幸田隆史*4
Takafumi KOUDA

At present, about 38 million tons of iron and steel slag are generated per year in Japan. The properties of the slag have been investigated and ways of using it have been developed since the 1970's. As a result, iron and steel slag products have contributed to the conservation of natural resources and establishment of a recycling-based society, being used effectively for cement, aggregate for concrete, base course materials, civil engineering works and fertilizer. This paper introduces these iron and steel slag products of Kobe Steel. Furthermore, in recent years, iron and steel slag subjected to field testing in the ocean and were evaluated as safe for the surrounding waters and as having good biological affinity. This paper also describes the present situation of field testing.

まえがき = 鉄鋼スラグは鉄鋼生産の副産物であり、2012年度の国内生成量は3,800万トンに達する¹⁾。鉄鋼スラグ製品は、これら鉄鋼スラグを原料として必要な加工を施した工業製品である。日本国内では1970年代から資源化活動が進められ、道路工事や土木工事、コンクリートなどで工事用資材として有効利用され、天然資源の保護・資源循環型社会に貢献してきた。

本稿では、工事用資材として有効利用されている(株)神戸製鋼所(以下、神戸製鋼という)の鉄鋼スラグ製品を紹介するとともに、スラグの利用用途拡大のために数年前から取り組んでいる、海域利用を目的とした実証実験について報告する。

1. 鉄鋼スラグの種類

1.1 高炉スラグ

高炉スラグは、高炉において鉄鉱石をコークスで還元・溶融して銑鉄を製造する時に、銑鉄1トンあたり約300kg生成する。冷却方法の違いにより徐冷スラグと水砕スラグに区別される(図1)。2012年度の全国の高炉スラグ取り扱い量は約2,460万トン¹⁾、神戸製鋼は約230万トンである。いずれも80%強が水砕スラグである。徐

冷スラグは熔融状態からゆっくりと冷却されるため、岩石状の結晶質となる(図1(a))。一方、水砕スラグは熔融状態の高炉スラグに高圧水を噴射して急速冷却されるため、砂状のガラス質になる(図1(b))。水砕スラグは単に水を混ぜたのでは硬化を起こさないが、アルカリ刺激剤と呼ばれる特定の少量物質が存在する時は水和反応して硬化する性質を示す。このような潜在水硬性を生かして、高炉セメントやコンクリート混和材として使用されている。高炉スラグは、高炉内で溶銑からの脱硫機能と1,500℃前後での適切な粘性が求められ、その化学成分はほぼ一定に制御されているので性状は安定しており、工業製品として好適である。

1.2 製鋼スラグ

高炉で製造された銑鉄は硬くて脆いため、靱(じん)性・加工性に優れた鋼に変える必要がある。その工程である製鋼プロセスで生成する鉄鋼スラグを総称して製鋼スラグと呼ぶ。製鋼スラグは粗鋼1トンあたり約130kg生成し、2012年度の取り扱い量は全国で約1,100万トン¹⁾、神戸製鋼は約100万トンである。製鋼スラグは主に路盤材や土工用材料として使用される。

2. 鉄鋼スラグ製品

鉄鋼スラグ製品は表1に示すように、セメント・コンクリート用途、路盤材用途、土木用途に分けられる。また数量的にはわずかであるが、肥料原料としても利用されている。前述した主要な鉄鋼スラグ製品を以下に詳述する。

2.1 セメント・コンクリート用途

2.1.1 高炉スラグ微粉末

高炉スラグ微粉末(商品名:ケイメント)は高炉水砕

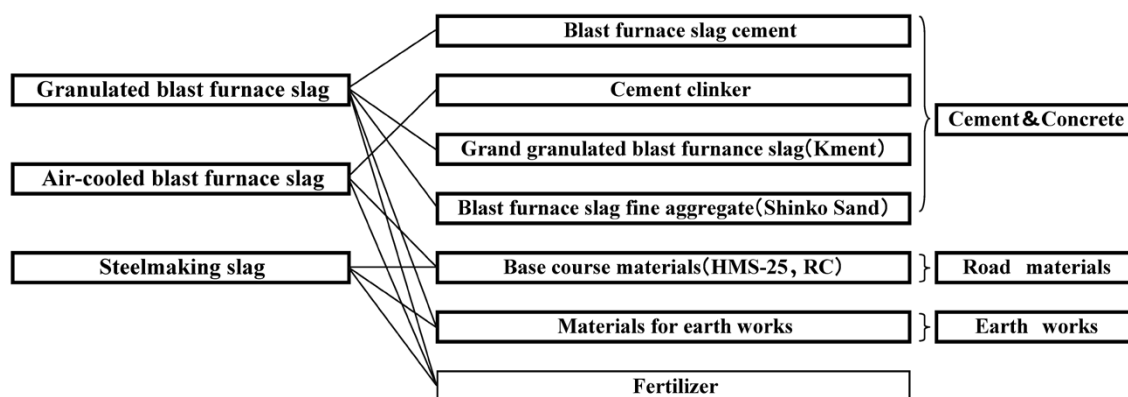


(a) 徐冷スラグ (b) 水砕スラグ
(a) Air-cooled blast furnace slag (b) Granulated blast furnace slag

図1 高炉スラグ
Fig. 1 Blast furnace slag

*1 神鋼スラグ製品(株) 技術部 *2 鉄鋼事業本部 技術総括部 *3 鉄鋼事業本部 技術総括部(現 加古川製鉄所 製鋼部) *4 神鋼建材工業(株) 営業本部

表1 神戸製鋼所における鉄鋼スラグ種類別の用途
Table 1 Uses of iron and steel slag at KOBE STEEL.



スラグを微粉碎することにより製造され、セメントメーカーやコンクリート2次製品メーカー、生コン工場に販売され、最終的に建築物や土木構造物として使用されている。JIS A6206では比表面積 (cm²/g) により3000級、4000級、6000級、8000級が規定されている²⁾。神戸製鋼では4000級に相当する高炉スラグ微粉末をローラミル (OKシリーズミル)³⁾ により製造している。

一部の大手建設会社などでは最近、コンクリート製造時のCO₂排出量を大幅に低減できる低炭素型コンクリートの実用化に取り組み、環境負荷の少ない建築物を目指し始めている⁴⁾。この取り組みにおいて主役となるのが高炉スラグ微粉末である。

コンクリートのバインダであるセメントは、石灰石等を焼成して製造されることから、その製造過程で多量のCO₂を排出する。一方、高炉スラグ微粉末の製造過程で発生するCO₂は少なく、コンクリート中のセメントを、製鉄過程で生じる副産物である高炉スラグ微粉末に置き換えることによってCO₂排出量を相当小さくすることが可能である。2013年3月に竣工した神戸製鋼の新社屋では、バインダ中のケイメント比率が75%の(株)大林組のクリーンクリート⁵⁾が擁壁の一部で使用され(図2)、この部位では通常のコンクリート使用と比較して70%以上CO₂が削減されたことになる。

(独)建築研究所や(独)土木研究所においても低炭素型コンクリートの研究が進められており、将来の高炉スラグ微粉末の利用拡大が期待される。

2.1.2 高炉スラグ細骨材

高炉スラグ細骨材は、水砕スラグを軽破碎して粒子形状とサイズを調整したコンクリート用の砂である。JIS A5011-1では粒度によりBFS5, BFS2.5, BFS1.2, BFS0.3が規定されており⁶⁾、神戸製鋼ではBFS2.5に相当する細骨材(商品名:シンコーサンド)を製造している。

近畿以西では高度成長期以降、コンクリート用の細骨材として海砂が使われてきたが、瀬戸内海では数年前に海砂採取が全面的に禁止され、さらに中国政府が海砂輸出を禁止した。このため最近では、岩石を砕いて製造される砕砂やスラグ骨材のような人工砂が細骨材の主流となっている。天然砂の枯渇が懸念される中、砕砂に比べて品質が安定している高炉スラグ細骨材への注目度は高く、今後も旺盛な需要が見込まれている。



図2 (株)神戸製鋼所新社屋擁壁に適用されている低炭素型コンクリート

Fig. 2 Low-carbon concrete applied to retaining wall of new head office of Kobe Steel

日本建築学会の「高炉スラグ細骨材を使用するコンクリートの調査設計・施工指針・同解説」が2013年2月に改定された。本改定の最大のポイントは、高強度コンクリートへの高炉スラグ細骨材の使用が認められたことであり、それに加えて高炉スラグ細骨材の使用によりコンクリートの乾燥収縮が抑制されることが明示されたことである⁷⁾。さらに、高炉スラグ細骨材の使用によりコンクリートの中性化も抑制できる可能性が示唆されており⁸⁾、コンクリートの耐久性の観点からも高炉スラグ細骨材への期待が高まっている。

2.2 路盤材用途

路盤材は、道路表層のアスファルトコンクリートの下に使用され、路面の交通荷重を分散させ、下方の路床にかかる応力を低減する役割を担っている。このために必要な特性は、良好な締め固め性と高い地盤強度が得られることである。高炉徐冷スラグや製鋼スラグは粒子の組み合わせが良く、良好な締め固め性を示すことから、路盤材の素材として適している。

神戸製鋼では、主に路盤上層部で使用される水硬性粒度調整スラグ(HMS-25)と、主に路盤下層部で使用される再生路盤材(RC-30, RC-40)を製造している。両者とも施工性の良さと支持力の高さから好評を得ている。

2.3 鉄鋼スラグ製品の環境安全性

2013年3月に高炉スラグ微粉末JIS A6206²⁾、コンクリート用高炉スラグ骨材JIS A5011-1⁶⁾、道路用スラグJIS A5015⁹⁾が改正された。今回の改正の大きな変化点は、高炉スラグ骨材と道路用スラグで環境安全品質基準が定められたことである。その項目と基準値を表2に示す。これら基準値は、各製品が、その働きを終えて再利用されるまでを一つのライフサイクルと考えて、最も

表2 環境安全品質基準

Table 2 Standard of quality for environmental safety

Element	Elution amount (mg/L)	Content (mg/kg)
Cd	≦0.01	≦150
Pb	≦0.01	≦150
Cr ⁶⁺	≦0.05	≦250
As	≦0.01	≦150
Hg	≦0.0005	≦15
Se	≦0.01	≦150
F	≦0.8	≦4000
B	≦1	≦4000

スクの高い状態をベースに評価している。これにより鉄鋼スラグ製品は環境影響が極めて小さいことが明確になり、他のリサイクル材料との差別化が図れるようになった。神戸製鋼では原料スラグの段階から厳密な検査体制を構築し、環境安全性品質を確保した製品を製造している。

3. 海域利用の取り組み

近年、鉄鋼スラグの主な用途の一つである路盤材の需要が減少していることに加えて、陸上土木工事では建設副産物リサイクル材の使用量が増加している。そこで、鉄鋼スラグの新たな用途として防波堤や潜堤などの海域工事で使用される被覆石・基礎捨石代替材、及び藻場マウンドや底質改善などの海域環境改善資材への利用を検討している。

神鋼グループはこれまで、兵庫県家島諸島、神戸空港、及び沖縄県与那原町の3箇所で藻場造成材としての試験を行ってきた。本章では、2009年に開始した家島諸島における鉄鋼スラグを活用した藻場造成試験について紹介する。

3.1 背景

兵庫県では「ひょうごエコタウン推進会議」を設置し、循環型社会の形成を推進している。この中で、海域環境保全・修復材料としての鉄鋼スラグを有効に活用するための方策を検討する「鉄鋼スラグの利用拡大研究会」を設置している¹⁰⁾。本研究会の取り組みとして神鋼グループは、家島諸島において鉄鋼スラグを活用した実証試験を実施した。

3.2 試験方法

3.2.1 鉄鋼スラグ石材を用いた藻場魚礁

鉄鋼スラグ石材（以下、スラグ石材という）が海藻類の着生基材としての効果及び魚の蝸（い）集による漁場の改善効果の有無を検証することを目的に、家島諸島西島沖の水深5～8mの比較的浅い海域でスラグ石材を組み合わせた鋼製藻場魚礁を2009年7月に沈設した（図3）。スラグ石材は、製鋼スラグを固化したものを20～50cmに破碎したものである。鋼製藻場魚礁は神鋼建材工業㈱製のフラットタイプ魚礁とマウントタイプ魚礁（図4）の2種類を用いた。図3で示したB点、E点にはスラグ石材を組み合わせたフラットタイプ魚礁（寸法4.4×3.1×2.0m；総重量10.5トン）を沈設し、比較としてA点、D点には天然石を組み合わせた同様の魚礁を合計

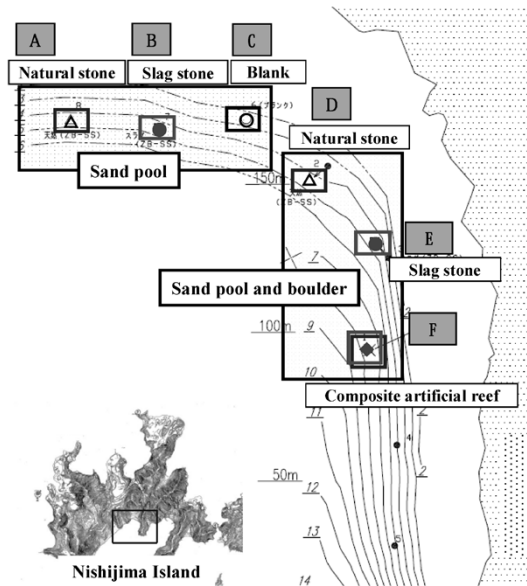


図3 藻場魚礁の配置図（家島諸島西島沖）

Fig. 3 Layout of artificial reef (offshore of Nishijima Island, Ieshima Islands)

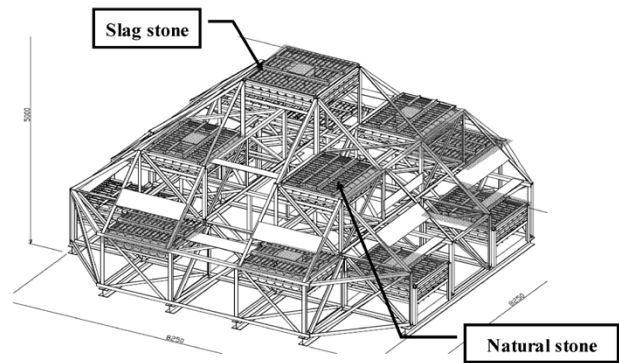


図4 マウントタイプ魚礁の概略図

Fig. 4 Schematic of mount type artificial reef

4基沈設した。F点には、スラグ石材と天然石を交互に組み合わせた複合型のマウントタイプ魚礁（寸法8.5×8.5×5.0m；総重量35.7トン）を1基沈設した。また、比較対照地点（ブランク）を魚礁を沈設していない自然海底面（C点）に設定した。

3.2.2 調査項目

2009年7月の沈設以降、潜水士による定期観察を含む追跡調査を実施している。この追跡調査では、付着植物、蝸集魚類数、プランクトン、マクロベントス等の生物量と金属元素等の水質への影響を評価した。付着植物の調査は、植生調査法として一般的に行われている区画法（コドラート法）により実施した。蝸集魚類調査では各魚礁に出現した魚類を目視観察し、出現種について総個体数を階級分けした。また、水質調査は基材直上の海水を採水して金属元素等を分析した。

3.3 試験結果

3.3.1 付着植物量

付着植物量の結果を図5に示す。調査時期により変動はあるものの、スラグ石材には天然石と同等に植物が付着していた。観察された主な出現種はフクロノリ、ウミウチワ、ウスカワカニノテであった。なお、沈設2年目（2011年）の冬から初夏にかけてスラグ石材には有用種

であるホンダワラ科のアカモクが繁茂していることが確認された (図6)。この傾向は3年目の2012年も同様であった。

3.3.2 蝟集魚類数

蝟集魚類数の結果を図7に示す。ここで、図中のスラグ石材はB点、E点、天然石はA点、D点それぞれにおいて8月に観察された魚類総数の平均を示している。スラグ石材は天然石と同等以上の蝟集効果があることが分かる。観察された主な魚種はスズメダイやメバル属であり、その他にもカワハギ、マアジ、イシダイ等これまで30種以上に及ぶ魚種の回遊が確認された。

3.3.3 水質 (金属元素)

海水中の金属元素の調査結果の一例を図8に示す。2009年は8月、2010年以降は3月と8月の調査結果の平均を示している。調査の結果、スラグ石材は天然石及びブランクと差異はなく、海水への金属元素の溶出は認められなかった。

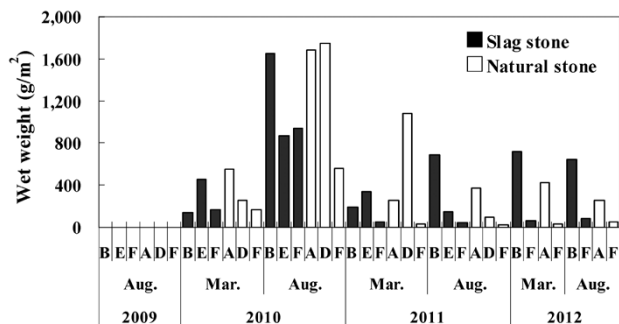


図5 附着植物量の経年変化
Fig. 5 Secular change of sessile plants

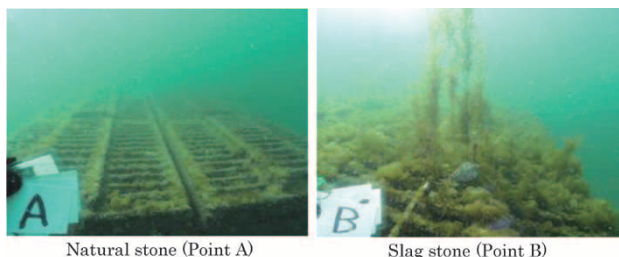


図6 天然石とスラグ石材の附着植物量の比較 (2011年1月)
Fig. 6 Comparison of the quantity of attached plant (Jan. 2011)

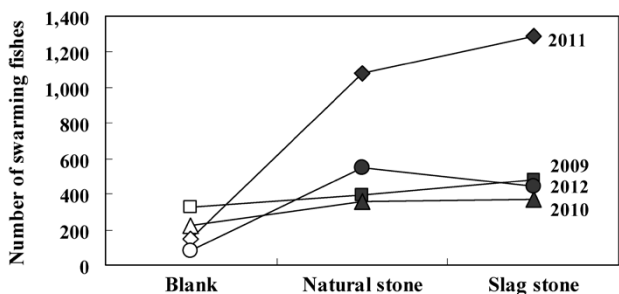


図7 蝟集魚類数結果
Fig. 7 Result of the number of swarming fishes

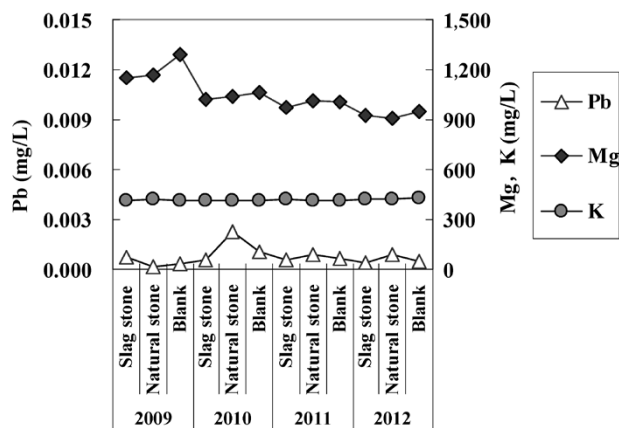


図8 海水中の金属元素濃度
Fig. 8 Metal element concentration in seawater

3.3.4 スラグ石材の効果

これまでの調査結果より、スラグ石材は天然石材と同等に海藻類の付着効果があり、かつ蝟集効果も有することが確認できた。さらに、水質調査の結果から有害な金属元素の溶出は認められず安全性が確認できた。これらの結果から、スラグ石材は天然石同様に海域環境改善資材として有用であると考えられる。なお、今後も追跡調査を継続していく計画である。

むすび=鉄鋼スラグ製品はセメント・コンクリートや路盤材など、主に陸上での工専用資材として国内で有効に利用されてきた。しかし、近年その需要が減少し、とくに製鋼スラグには新たな用途が求められている。このような背景から海域での利用拡大にも取り組んでいる。これまでの実証試験では、周辺海域への安全性、及び天然石と同等の生物親和性を有することを確認している。今後は、従来の陸上用途に加えて、環境修復機能も併せ持った、海域工事全般に用いられる天然石代替石材として活用することを目指していく。

参考文献

- 1) 鉄鋼スラグ協会. 鉄鋼スラグ統計年報(平成24年度実績). 2013, p.2.
- 2) 日本規格協会. コンクリート用高炉スラグ微粉末JIS A6206. 2013, p.5.
- 3) 下島克彦ほか. R&D神戸製鋼技報. 1985, Vol.35, No.1, p.49.
- 4) 北岡真文ほか. Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan. 2012, Vol.19, No.357, p.138.
- 5) 小林利充ほか. 大林組技術研究所報. 2011, No.75, p.1.
- 6) 日本規格協会. コンクリート用高炉スラグ骨材JIS A5011-1. 2013, p.4.
- 7) 日本建築学会. 高炉スラグ細骨材を使用するコンクリートの調査設計・施工指針・同解説. 2013, P.30.
- 8) 日本建築学会. 高炉スラグ細骨材を使用するコンクリートの調査設計・施工指針・同解説. 2013, P.126.
- 9) 日本規格協会. 道路用鉄鋼スラグJIS A5015. p.6.
- 10) ひょうごエコタウン推進会議. 鉄鋼スラグの利用拡大研究会 海域ワーキンググループ. 瀬戸内海. 2002, No.59, p.51.