

(解説)

鉄鋼スラグ製品によるCO₂削減への取り組み

森 英一郎*¹・松元弘昭*¹・牧 剛司*¹

Initiatives to Reduce CO₂ Emissions through Steel Slag Products

Eiichirou MORI・Hiroaki MATSUMOTO・Takeshi MAKI

要旨

鉄鋼スラグは鉄鋼製造工程で発生する副産物であり、従来路盤材やセメント原料として活用されてきた。これまでも高炉スラグ微粉末はコンクリートのセメント代替材として利用され、CO₂排出量削減に貢献している。本稿では、高炉スラグ微粉末を用いた既存のCO₂削減事例に加え、地盤改良や藻場造成材など新たな用途による環境効果について紹介する。既存製品である高炉スラグ微粉末の提供だけでなく、製鋼スラグを用いた地盤改良の普及促進、さらに海藻育成基盤としての活用を通じて、鉄鋼スラグ製品による持続可能な社会へ貢献していく。

Abstract

Steel slag is a by-product of the steel manufacturing process and has traditionally been used as roadbed material and as a raw material for cement. Ground-granulated blast furnace slag (GGBFS) has also been widely used as a partial substitute for cement in concrete, thereby contributing to the reduction of CO₂ emissions. This article introduces existing examples of CO₂ reduction achieved through the use of GGBFS, as well as the environmental benefits of emerging applications such as soil stabilization and materials for seaweed bed creation. In addition to supplying GGBFS, an established product, Kobe Steel strives to contribute to the realization of a sustainable society by further promoting the use of steel slag products—including soil stabilization with steelmaking slag and its application as a base material for seaweed bed creation.

検索用キーワード

鉄鋼スラグ、高炉スラグ、高炉スラグ微粉末、低炭素型コンクリート、製鋼スラグ、地盤改良

まえがき＝鉄鋼スラグは鉄鋼製造工程で発生する副産物であり、2024年度の国内生成量は約3,000万t、当社加古川製鉄所では約270万tに達する。これらは従来路盤材やセメント原料として活用されてきた。なかでも、高炉スラグ微粉末はコンクリートのセメント代替材として利用され、CO₂排出量削減に貢献している。本稿では、既に実用化されている削減事例に加え、今後さらなるCO₂削減効果が期待される鉄鋼スラグ製品の動向として、地盤改良用途と海域用途について紹介する。

1. 鉄鋼スラグの種類と用途

鉄鋼スラグは製鉄業における代表的な副産物であり、製鉄工程から生成する高炉スラグと、製鋼工程から生成する製鋼スラグに大別される。当社加古川製鉄所の2024年度生成量は、高炉スラグ約194万t、製鋼スラグ約77万tである。

高炉スラグは、ゆっくり冷却される高炉徐冷スラグと、高圧水で急冷される高炉水砕スラグに区分され、後者が80～90%を占める。高炉徐冷スラグは路盤材など土木資材に、高炉水砕スラグは主としてセメント原料またはセメント代替の水硬性材料に利用されている。

製鋼スラグには、溶銑（ようせん）予備処理工程で生成する脱リン炉（Dephosphorization furnace）スラグ、

転炉で生成する転炉スラグなどがあり、土木資材（路盤材など）や焼結原料としてのリサイクルとして活用されている。

2. 高炉スラグ微粉末

高炉スラグ微粉末は高炉水砕スラグの微粉碎品であり、当社はケイメント^{注1)}の商品名で30年以上前から供給している。主として橋りょうやダムなどの土木工事で用いられる高炉セメントB種は、普通セメントに高炉スラグ微粉末を約45%混合したものである。普通セメントの製造では原料として石灰石を高温焼成するため¹⁾、石灰石および燃料由来のCO₂が大量に発生し、普通セメント1tあたりのCO₂排出量は741.3 kg-CO₂/t²⁾と報告されている。いっぽう、高炉スラグ微粉末の製造は水砕スラグの乾燥・粉碎が主で、CO₂排出量は39.6 kg-CO₂/t³⁾と低い。このため、高炉セメントは普通セメントと比較して約40%のCO₂削減が可能である。近年はさらなる削減を目的として、高炉スラグ微粉末を65%以上混合した低炭素型コンクリートが実用化されている。当社の神戸本社（図1）や加古川製鉄所（溶銑予備処理工場の集じん機基礎、6CCレードルターレット基礎；図2）では、

脚注1) ケイメントは当社の登録商標である。

*¹ 鉄鋼アルミ事業部門 資源化推進部



図1 神戸製鋼所神戸本社の社屋擁壁に使用された低炭素型コンクリート
Fig.1 Low carbon type concrete utilized in the retaining wall at Kobe head office of Kobe Steel



図2 加古川製鉄所 6CC レードルターレット
Fig.2 Ladle Turret of 6CC in Kakogawa Works

株式会社大林組のクリーンクリート®を採用し、普通セメントコンクリート比で63%のCO₂削減を達成した⁴⁾。当社は今後も社内工事において、適用可能な箇所で低炭素型コンクリートの活用を拡大する計画である。

2025年4月には、国土交通省の「土木工事の脱炭素アクションプラン」が公表され、普通セメントの55%以上を高炉スラグ微粉末などに置換したコンクリート(CO₂削減率約50%)を、用途などを指定して公共工事で原則化する方針が示された⁵⁾。これを受け、ケイメントの利活用が一層進むことが期待される。

3. 製鋼スラグによる地盤改良

製鋼スラグは耐摩耗性、締固め性に優れ、主に道路用路盤材として利用されてきた。しかしながら、日本では道路実延長の増加が収束しており、新設工事に起因する路盤材需要の拡大は見込みにくい^{6), 7)}。このため、従来の路盤材用途への依存を低減し、維持管理・更新や防災・強じん化で継続的に需要が見込まれる分野への用途展開が課題である。とりわけ、予防保全を重視する政策動向の下で、支持力向上・沈下抑制を目的とする地盤改良は有望な適用先の一つである。

3.1 地盤改良工法

地盤改良は、軟弱地盤に構造物を建設する際、所要の地盤強度・変形性能を確保するために行う改良である。工法は多岐にわたるが、セメント系固着材を用いる改良が簡便性から広く採用されている。

表1 現場発生土と製鋼スラグの物理的特性

Table 1 Physical specification of local soil and steelmaking slag

	On site soil	Steelmaking slag
Soil particle density (g/cm ³)	2.619	3.197
Natural water content (%)	22.9	8.4
Content of Gravel (2-75 mm) (%)	44.7	64.4
Content of Sand (0.075-2 mm) (%)	17	27.4
Content of fines (≤0.075 mm) (%)	38.3	8.2

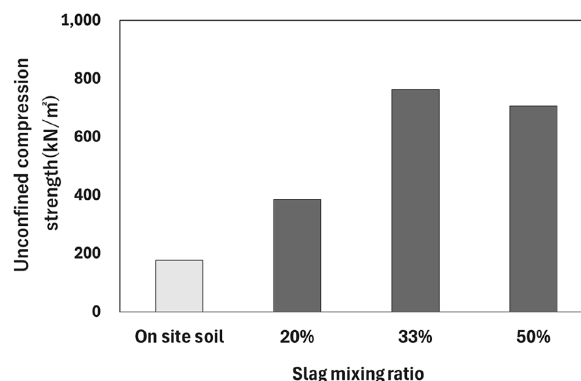


図3 一軸圧縮試験結果
Fig.3 Result of uniaxial compression test

3.2 製鋼スラグによる地盤改良工法

製鋼スラグによる地盤改良効果は、粒度改善による締固め性の改善と、含有する石灰分 (f-CaO, Ca(OH)₂) の水和反応による固化の双方により発現すると考えられている⁸⁾。

これまでに、各種室内試験⁹⁾ や盛土の現場実証¹⁰⁾ により、軟弱土へ適切割合で混合することで十分な強度が得られることが報告されている。兵庫県の土木請負工事必携にも「鉄鋼スラグ混合土を用いた軟弱土改良の設計施工マニュアル」が掲載され、公共工事での普及が進みつつある¹¹⁾。

3.2.1 製鋼スラグを活用した地盤改良事例

兵庫県の公共工事における適用事例を示す。表1に現地発生土と混合に用いた製鋼スラグの物性を示す。現地発生土は細粒分38.3%で、土工用材料としては不適に分類される¹¹⁾。

図3は製鋼スラグ混合土の一軸圧縮強さであり、製鋼スラグ混合率33%で最大強度を示したため、当該現場では混合率33%を採用した。ここで、混合率50%のときに強度が低下したのは、混合率増加に伴う含水比低下により水和物生成が抑制されたためと推察される。施

工結果として、所要強度を満足し、軟弱な現地発生土の改良が達成された。

3.2.2 CO₂排出量削減効果

本事例のCO₂排出削減量を試算する。本工事では、製鋼スラグ180 m³を現地発生土360 m³に混合し、計540 m³を裏込め土として使用した。製鋼スラグのCO₂排出量は、製鋼スラグのCO₂排出量原単位2.6 kg-CO₂/t¹²⁾と単位体積質量1.85 t/m³から865.8 kgと見積られる。いっぽう、セメント改良を想定し、高炉セメント50 kg/m³を添加(改良土360 m³相当)と仮定すると添加量は18 tで、原単位423 kg-CO₂/t¹⁾より7,614 kg-CO₂を排出する。以上より、削減量は6,748 kg-CO₂となりセメント改良比で88.6%削減と推定される。

4. 藻場造成材としての利用

KOBELCOグループでは、これまで海藻育成類の着生基盤として鉄鋼スラグ石材の有効性を検証している。当社加古川製鉄所で製造した鉄鋼スラグ石材を、つぎに示す2箇所で潜堤(水面下に没した消波構造物)用に沈設し、モニタリングを行った。

4.1 田之代海岸(淡路市岩屋, 2014年)

田之代海岸では、図4に示すように既設潜堤の傾斜面の一部として鉄鋼スラグ石材を約1,000 t設置した。図5に同時期に設置した天然石と海藻の付着状況を比

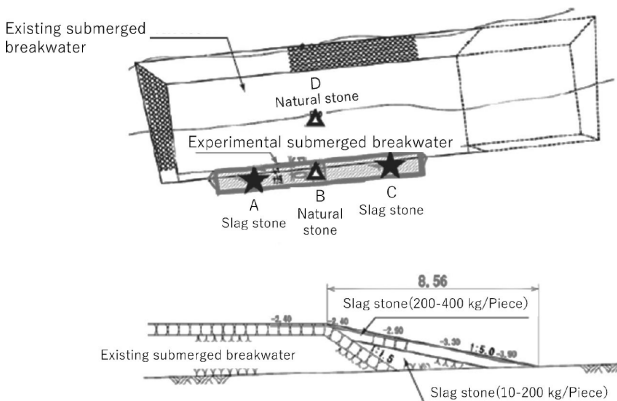


図4 田之代海岸における鉄鋼スラグ石材の設置箇所
Fig.4 Installation location of slag stone at Tanoshiro Beach

較した結果を示しており、鉄鋼スラグ石材の方が多くのシダモクヤワカメが繁茂していた¹³⁾。これは、鉄鋼スラグに鉄分やミネラルが豊富に含まれていること、および鉄鋼スラグ石材の表面性状が海藻着生に適していたためと推定している。また、ホンベラやスズメダイなどの魚の回遊も見られ、既設潜堤と同等以上の魚のい集が見られた。

4.2 須磨海岸(神戸市須磨区, 2016年)

田之代海岸での良好な結果を受け、図6に示すように、須磨海岸でも潜堤構築材として鉄鋼スラグ石材1,200 tを設置した。図7に現地のモニタリングで撮影された写真を示しており、鉄鋼スラグ石材への海藻の繁茂が確認できる¹⁴⁾。

海草藻場および海藻藻場によるCO₂吸収量はブルーカーボンと呼ばれ、2022年度には日本の海岸全体で約35万t/年と算定されている¹⁵⁾。これは陸上植物によるCO₂吸収量、いわゆるグリーンカーボンに比べると量的には少ないが、鉄鋼スラグ石材を用いる海藻の育成もCO₂削減に寄与するものと考えられる。また海藻は光合成により酸素を海水へ供給し、富栄養化の要因である窒素やリンの吸収を通じた水質浄化、魚類への住処の提供による生物多様性の保全など、多様な役割を担っている¹⁶⁾。海藻育成はCO₂削減のみならず海域環境の保全にも寄与すると考えられる。

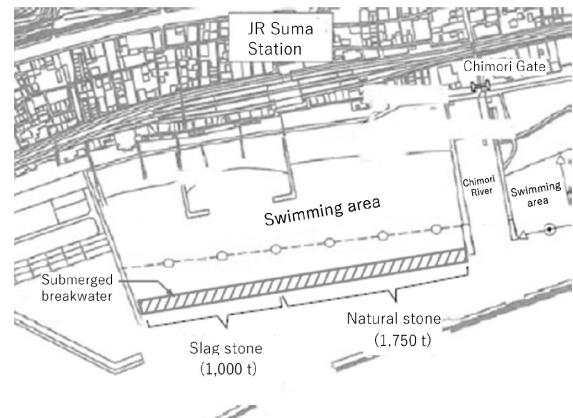


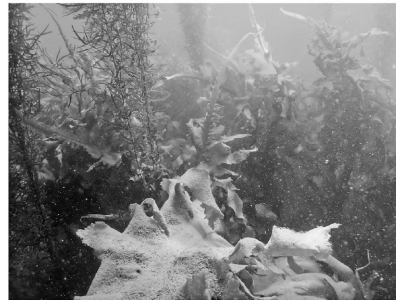
図6 須磨海岸における鉄鋼スラグ石材設置場所
Fig.6 Installation location of steelmaking slag stone at Suma Beach

Study period	Experimental submerged breakwater			Existing submerged breakwater
	Slag stone A	Slag stone B	Slag stone C	Natural stone D
August, 2014				
April, 2015				

図5 鉄鋼スラグ石材を用いた試験潜堤の観察結果
Fig.5 Observation of experimental submerged breakwater with slag stone



(a) Submerged breakwater construction materials (Steelmaking slag stone)



(b) Seaweed growth status near submerged breakwater (April 16, 2025):
Photo courtesy of Suma Sea Association

図7 スラグ石材の外観、および潜堤付近の海藻育成状況

Fig.7 Appearance of slag stone materials and seaweed growth conditions near the submerged breakwater

むすび＝当社は鉄鋼生産工程の副産物である鉄鋼スラグの利材化と活用に長年取り組んできた。今後は鉄鋼スラグ製品をCO₂削減にも寄与する資材として世の中に発信するとともに、持続可能な資源循環型社会の構築に貢献したいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 一般社団法人セメント協会. セメントの製造方法.
<https://www.jcassoc.or.jp/cement/1jpn/jc.html#03> (参照2026-01-20).
- 2) 一般社団法人セメント協会. セメントのLCIデータの概要. 2025年5月20日, p.8.
- 3) 高橋茂ほか. コンクリート工学. 2018, Vol.56, No.11, p.948.
- 4) 大林組. 低炭素型のコンクリート クリーンクリート®.
https://www.obayashi.co.jp/solution_technology/detail/tech_d074.html (参照2026-01-20).
- 5) 国土交通省. 土木工事の脱炭素アクションプラン(発表資料).
https://www.mlit.go.jp/report/press/kanbo08_hh_001200.html (参照2026-01-20).
- 6) 国土交通省. 道路統計年報2024.
<https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/tokei-nen/index.html> (参照2026-01-20).
- 7) 国土交通省. 道路データブック2025.
https://www.mlit.go.jp/road/toukei_chousa/road_db/index.html (参照2026-01-20).
- 8) 陣内綾音ほか. R&D神戸製鋼技報2025, Vol.74, No.2, p.108-114.
- 9) 片岡沙都紀ほか. 第15回地盤改良シンポジウム論文集. 2022, p.107-112.
- 10) 片岡沙都紀ほか. 第13回地盤改良シンポジウム論文集. 2018, p.59-64.
- 11) 兵庫県. 鉄鋼スラグ混合土を用いた軟弱土改良の設計施工マニュアル, p.43-1-43-4.
<https://web.pref.hyogo.lg.jp/ks04/documents/tekousuragu.pdf> (参照2026-01-20).
- 12) 池田秀文ほか. 第29回環境システム研究論文発表会講演集. 2001, p.43-49.
- 13) 山中量一ほか. R&D神戸製鋼技報. 2019, Vol.69, No.2, p.19-25.
- 14) 神戸製鋼所. 須磨海岸潜堤工事での鉄鋼スラグ使用実績.
<https://www.kobelco.co.jp/products/steel-aluminum/slag/solution/submerged-embankment.html> (参照2026-01-20).
- 15) 国土交通省. 我が国の沿岸域に生息する海洋植物による二酸化炭素吸収量(約35万t)の報告.
https://www.obayashi.co.jp/solution_technology/detail/tech_d074.html (参照2026-01-20).
- 16) 水産庁. 藻場の働きと現状.
https://www.jfa.maff.go.jp/j/kikaku/tamenteki/kaisetu/moba/moba_genjou/ (参照2026-01-20).