

鉄鋼スラグによる海域環境改善技術

中川 雅夫

鉄鋼製造工程で副生される鉄鋼スラグは、鉄分やシリカ分等のミネラル分を多く含むこと、水と反応して硬化する性質を有すること、硫化物やリン酸の発生を抑制することで富栄養化した底質を浄化する機能等、固有の特性を有している。そこで、これらの特性を活用して、磯焼けによって喪失された藻場の回復や、富栄養化海域の赤潮や青潮の発生抑制のための海域環境再生に資する技術開発に取り組んでいる。本稿では、これらの製品開発の現状と実際のフィールドへの適用事例について紹介する。

キーワード：鉄鋼スラグ、海域環境、藻場造成、浅場・干潟、浚渫窪地

1. はじめに

鉄鋼スラグは製鉄工程で発生する副産物で、鉄鉱石を溶かして銑鉄にする工程で発生する高炉スラグと、銑鉄を成分調整して鋼にする工程で発生する製鋼スラグを総称している。鉄1t製造するのに約400kg発生し、日本全国で年間約3,900万t(2010年度)生成されている¹⁾(図-1参照)。

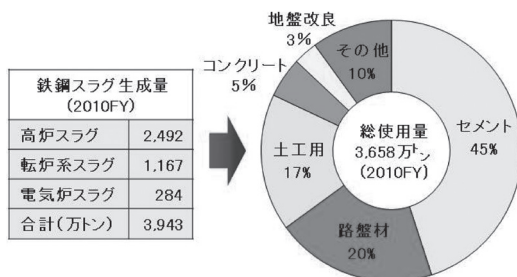


図-1 鉄鋼スラグの生成・利用量 (2010年度)

鉄鋼業界では古くから、セメント原料、道路路盤材や土工材等の資源として利用するための技術開発と規格化を行ってきた結果、現在ではほぼ全量が有効利用されており、循環型社会創造に貢献してきた。

しかしながら、その用途のほとんどが建設用であるため、昨今の建設投資低減を考えると、新たな大規模用途・市場開拓を図っていくことが必要となっている。そこで、鉄鋼スラグ固有の特性を有効利用して、貧栄養化で磯焼けした海域での藻場の再生や、富栄養化して赤潮や青潮の恐れがある海の環境再生を図るための浅場・干潟の造成や浚渫窪地の埋戻に資する技術開発に取り組んでいる。

本稿では、これらの鉄鋼スラグを用いた海域環境改善技術の概要と実施例について、以下に紹介する。

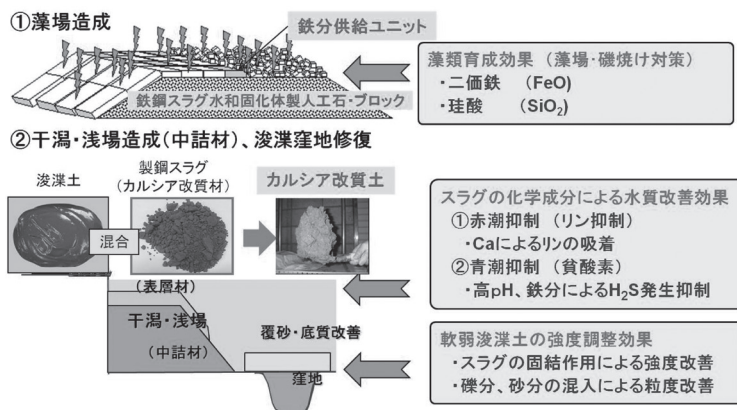
2. 鉄鋼スラグを活用した海域環境改善技術

近年、我が国の沿岸海域においては、海水中の窒素やリン、シリカ、鉄といった栄養塩が不足し、磯焼け現象を引き起こす「貧栄養化」と、閉鎖性海域の窒素・リンが過多となり赤潮を発生させたり、堆積硫化物による貧酸素水塊の形成に起因する青潮を発生させたりする「富栄養化」という海域環境の悪化が問題となっている。

図-2に、鉄鋼スラグを貧栄養化海域の藻場造成と、富栄養化海域の干潟・浅場造成材や浚渫窪地の埋戻材として適用することの意義を示す。

第一に、貧栄養化海域での藻場造成では、特に、転炉系製鋼スラグからの鉄イオン溶出に着目している。転炉系製鋼スラグには海藻生育に必要な鉄分等のミネラル分を含むため、貧栄養化した沿岸域の藻場造成をおこなうための基質材や海藻用肥料として活用することが可能である。そこで、鉄鋼スラグを藻礁・漁礁材として活用するための「鉄鋼スラグ水和固化体製人工石材・ブロック」と、鉄分(鉄イオン)を肥料成分として海域に供給する「鉄分供給ユニット」を新規開発した。

第二には、富栄養化域においては、リン酸や硫化物を多く含む軟弱な浚渫土と転炉系製鋼スラグを原料とする「カルシア系改質材」を混合し、浚渫土の性状を改質した「カルシア改質土」とすることで、安価で有用な浅場・深場の造成材料として適用することを狙っ



図一 鉄鋼スラグ製品による海域環境改善技術

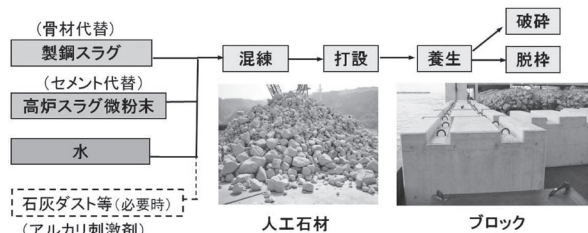
ている²⁾。

港湾の浚渫工事から発生する浚渫土は、一般に軟弱でそのままでは利用が困難な場合が多いが、これをカルシア改質土とすることで浚渫土の強度が改善されるとともに富栄養化成分の発生が抑制され、浅場・干潟の造成材や浚渫窪地の埋戻し材として活用することが可能になる。以下に、これらの内容について詳述する。

3. 藻場造成技術

(1) 鉄鋼スラグ水和固化体製人工石材・ブロック

鉄鋼スラグ水和固化体は、砂利、砂等の天然骨材を全く使用しない、環境負荷が少ないセメントコンクリート代替のリサイクル材料である。コンクリートの骨材の代替に製鋼スラグを、セメントの代替に高炉スラグ微粉末を利用し、必要に応じて硬化を促進させるアルカリ刺激材を添加して、水と混練して成型することにより、石材状やブロック状の自由な形状の製品を製造することが可能である (図一 3 参照)。



図一 3 鉄鋼スラグ水和固化体

鉄鋼スラグ水和固化体製人工石材・ブロックは、港湾工事用の石材・ブロック代替材や水産基盤整備用の漁場造成用資器材への適用が可能で、非液化化埋立材料 (羽田空港再拡張プロジェクトに約 100 万 t 適用) や漁場造成用の藻礁石材 (東京湾保田漁港藻礁石材工事に約 2 万 t 適用) 等に活用されている。

なお鉄鋼スラグ水和固化体については、製造・利用

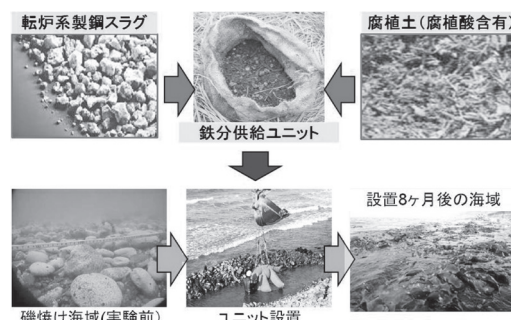
技術の規格化、マニュアル化が図られている³⁾。

(2) 鉄分供給ユニット

鉄分供給ユニット (ビバリー[®]ユニット) は、森の栄養分が川を通じて海に供給され、海藻に吸収されるという自然現象を人工的に生じさせ、貧栄養のため磯焼けした海域の藻場を修復する目的で開発された。

鉄分供給ユニットは転炉系製鋼スラグと廃木材チップを発酵させた人工腐植土を混合したもので、スラグ中に含まれる鉄イオンを人工腐植土中に生成される腐植酸で錯体化し、安定的に腐植酸鉄 (鉄イオン) を海藻に供給するための「海藻用肥料」である。

鉄分供給ユニットの藻場造成への有用性について、2004 年 11 月より北海道増毛町にて実施した実海域実験の事例を図一 4 に示すが、ユニット埋設後 8 ヶ月後には、磯焼け海域にホソメコンブが再生され、対策の有用性が確認された⁴⁾。



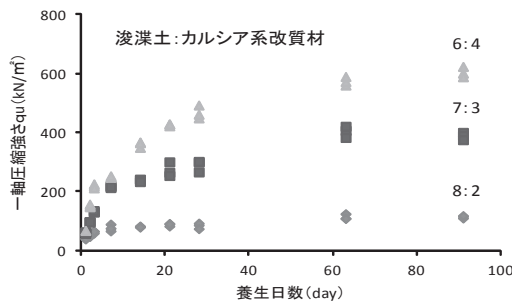
図一 4 鉄分供給ユニットによる藻場再生実験

その後、鉄イオンの海藻生育に対する有用性が培養実験と水槽実験で確認されたことと魚介類への安全性が確認されたことより、(一社)全国水産技術者協会の「漁場造成・再生用資器材の技術認定登録」を受けるとともに全国漁業協同組合連合会の「鉄鋼スラグ製品安全確認認証」も受領し、現在、各海域で実証実験を実施中である。

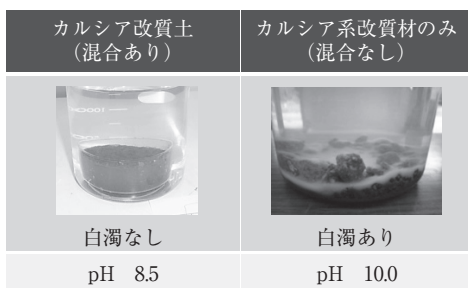
4. カルシア改質土による浅場・干潟等の地盤造成技術

(1) カルシア改質土の特長

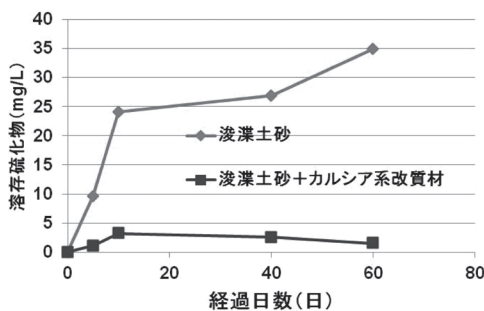
カルシア改質土は、軟弱な浚渫土に転炉系製鋼スラグを原料にしたカルシア系改質材と混合することで、浚渫土の物理的、化学的性状を改善した材料であり、干潟・浅場造成材や浚渫窪地の埋戻材等の海域環境修復の用材として活用可能な材料である。カルシア改質土の特長を図一5～8に示す。第一に、カルシア系改質材のCaと浚渫土中のSi、Al等が反応して軟弱な浚渫土の強度を上昇させるため、浅場等の法面を造成することが可能になる。第二に、混合によりカルシア系改質材が透水性の低い浚渫土に覆われるため高pH水の溶出が抑制される。第三にカルシア系改質材のCaやFeにより、浚渫土に含有されたリン酸や溶存硫化物等の富栄養化物質の発生が抑制される浄化作用を有する。以上のような基礎実験結果から、カルシア改質材による浚渫土改質技術の有用性が確認された⁵⁾。



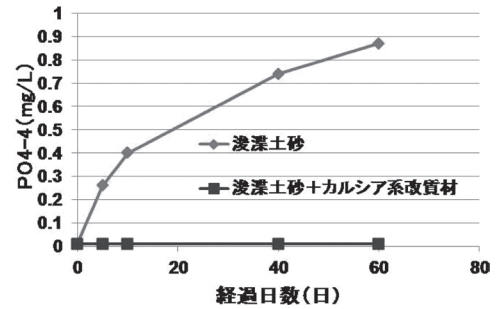
図一5 カルシア改質土の強度発現



図一6 カルシア改質土のpH上昇抑制



図一7 溶存硫化物の溶出抑制効果

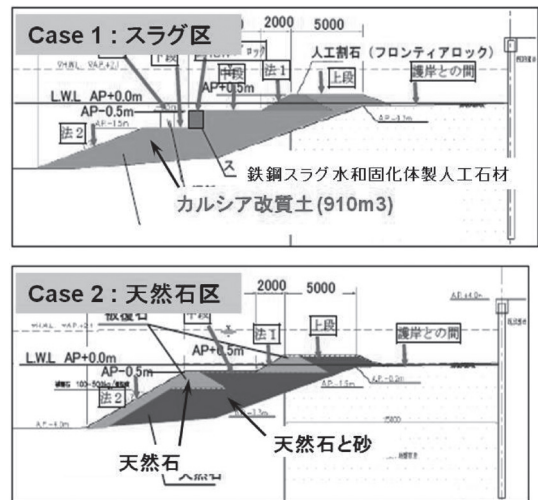


図一8 リン酸態リンの溶出抑制効果

(2) 実施事例1：城南島での浅場造成実験（土運船内でのバックホウ混合）

2008年5月に、カルシア改質土の強度特性や水質改善効果の検証実験を目的として、東京港の城南島において、カルシア改質土で人工浅場の造成を実施した。

天然材料により造成された人工浅場と、形状安定性や水環境改善効果を比較できるように、図一9に示すように、カルシア改質土による人工浅場（CASE 1）の他に、天然石による人工浅場（CASE 2）も造成した。なお、カルシア改質土は、現地採取された浚渫土に



図一9 東京都城南島での浅場造成実験断面図



写真一1 東京都城南島での浅場造成実験工事

カルシア系改質材を混合率 30 容積%で混合したもので浅場マウンド 910 m³ を造成した (写真一)。カルシア改質土の浅場上には、生物生息性を確保するために鉄鋼スラグ水和固化体製人工石材やブロック等を設置し、天然石材の浅場との比較実験を行った。

2009 年度には、環境省による「環境技術実証事業 (ETV 事業)」の「閉鎖性海域における水環境改善技術分野」に応募し、カルシア改質土で造成した浅場の環境保全効果等の実証を委託した。

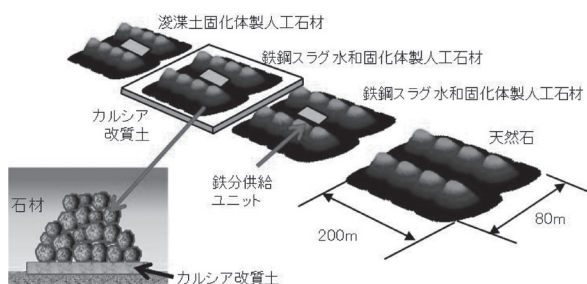
実証の結果、①実験後 2 年後においてもカルシア改質土からの有害物質の溶出はなく、安全であること ②浚渫土の強度増強効果が認められること ③設置による水環境の悪化は認められず、リン酸と硫化物の溶出が抑制されることが確認され、浅場や干潟の造成に有用な技術であることが実証された²⁾。

(3) 実施事例 2：東京湾藻礁石材設置工事 (連続式ミキサー混合)

藻場造成を目的に、2009 年 11 月～平成 2010 年 3 月に千葉県鋸南町の保田平島と二間島との間の 1,200 m の区間に図一 10 に示す鉄鋼スラグ水和固化体製人工石を含む 3 種類の藻礁材料が設置された。カルシア改質土は洗掘防止用の基盤材料として、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 0.5 m 厚で敷設された。浚渫土とカルシア系改質材との混合は、写真一 2 に示すように連続式ミキサーで混合した後、ポンプ圧送しトレミー管により投入する方法で施工された⁶⁾。

施工中に、品質の確認として、実施工におけるカルシア系改質材の混合割合と強度発現を、また、環境影響の確認として、施工中および施工後の pH や濁度等が調査された。

実施工時のカルシア系改質材の混合割合は、設定したカルシア系改質材の混合割合である 20 容積%に対し、土運船毎に連続式ミキサーから採取した試料の湿潤密度から算出した実測の混合割合は、7.7:2.3 となり、精度よく配合割合を管理できたことが確認できている。また、強度発現については、同じく連続式ミキサー



図一 10 東京湾鋸南町での藻礁石材設置工事



写真一 2 カルシア改質土の施工状況

から採取した試料を用いた 28 日材齢一軸圧縮強度試験結果は、平均で $q_{um} = 227 \text{ kN/m}^2$ となり、2 m 高さの藻礁材料が上載されても十分に基盤材として機能する強度が確保できたことが確認された。

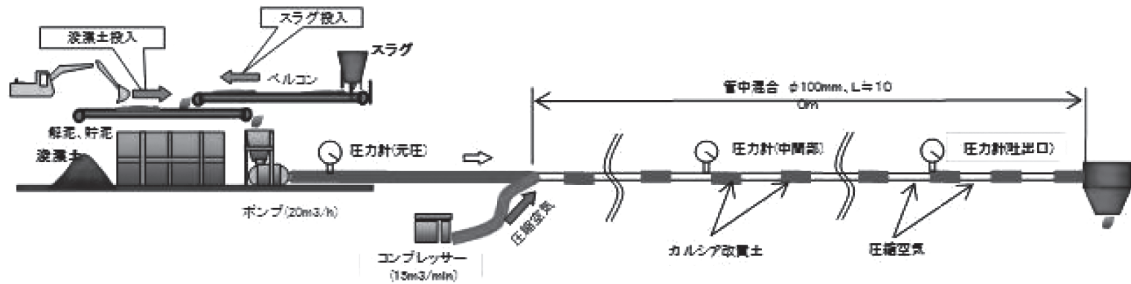
pH および濁度についても施工期間中および施工完了後に測定を行ったが、工事期間中においても、カルシア改質土の打設による周辺海域への悪影響がないことが確認できた⁶⁾。

(4) 実施事例 3：管中混合工法によるカルシア改質土の施工実験

カルシア改質土を大規模な浅場・深場造成や埋立造成に適用するためには、浚渫土とカルシア系改質材を、大量に急速で確実に混合する施工法が必要となる。そこで、浚渫土のセメント改良において大規模施工時に用いられる、管中混合工法の適用性を確認するための実験工事を行った⁷⁾。

浚渫土とカルシア系改質材の管中混合、打設の実験システムを図一 11 に示す。圧縮空気による管中混合は、管径 100 mm、圧送距離は 100 m とし、気中打設とトレミー管による水中打設を行い、施工後に強度試験や圧密試験を行った。尚、カルシア系改質材は 25 mm 以下の粒径のものを適用し、浚渫土の含水比を液性限界の 1.6 倍とし、浚渫土とカルシア系改質材を体積比で 7:3 の割合で混合した。

施工実験の結果、セメント改良の場合と同様に、管中混合工法によって浚渫土と改質材を分離させることなく、高速で均質に混合できることが確認できた (写



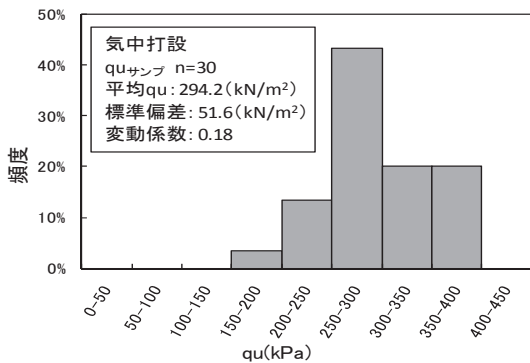
図一 11 実験施工システム（管中混合工法）の概要

真一3)。また、塩化ビニルパイプ（φ100）を使用して採取したサンプリング試料の一軸圧縮強さ（材例28日）の分布を図一12に示すが、比較的小さなバラツキで均質な地盤が造成可能ことが確認できた。

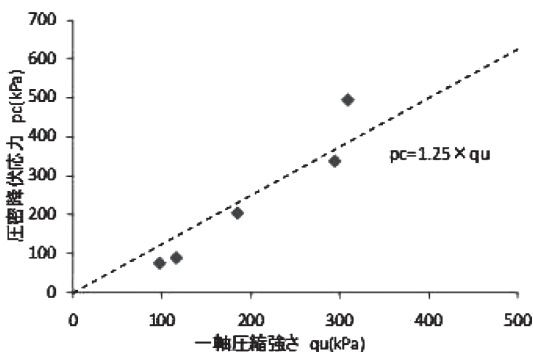
圧密試験から得られた圧密降伏応力 p_c と一軸圧縮強さ q_u には、セメント系固化処理土と同様に $p_c = 1.25 \times q_u$ の関係があることがわかった（図一13）。



写真一 3 カルシア改質土の打設状況（気中）



図一 12 気中打設の一軸圧縮強さ（28日後）



図一 13 一軸圧縮強さと圧密降伏応力

5. おわりに

以上、鉄鋼の製造工程で副生される鉄鋼スラグを活用して、海域環境改善用の藻場造成材や浅場・干潟造成材等に活用するための技術開発の状況について述べた。リサイクル材の大規模適用に対しては、海域環境に及ぼす影響を懸念するステークホルダーも多いため、各海域でのパイロット工事でのモニタリング調査をしっかりと行い、安全性や効果を確認しながら、徐々に規模や範囲を拡大する順応的管理でのアプローチが必要と考えている。今後も、社会的コンセンサスを得ながら、循環型社会の構築と海域環境修復に資する技術開発と実用化に取り組んでいきたい。また、特にフィールド試験では、五洋建設(株)、東亜建設工業(株)の多大なるご協力を得た。ここに記して、感謝の意を表します。

JCMIA

【参考文献】

- 1) 鉄鋼スラグ協会、「鉄鋼スラグ統計年報（平成22年度実績）」、鉄鋼スラグ協会HP（2011年7月）
- 2) 中川ら、「HEDORO NO.108」、(社)底質浄化協会（2010年5月）
- 3) 財沿岸技術研究センター、「鉄鋼スラグ水相固化体技術マニュアル（改訂版）」、（2008年2月）
- 4) 木曾ら、「海域施肥時のコンブ等の生育に関する実海域実験—転炉系製鋼スラグ等を用いた藻場造成技術開発（1）～（3）—」、第20回海洋工学シンポジウム、日本海洋工学会（2008年3月）
- 5) 社団法人日本鉄鋼連盟、「転炉系製鋼スラグ 海域利用の手引」、（2008年9月）
- 6) 田口ら、「保田沖海域におけるカルシア系改質材の適用例」、第7回地盤工学会関東支部発表会（2010年11月）
- 7) 田中ら、「カルシア改質土の埋立材としての利用検討」、土木学会第66回年次学術講演会（2011年9月）

【筆者紹介】

中川 雅夫（なかがわ まさお）
新日本製鐵(株) スラグ・セメント事業推進部
部長

