

スラグ資材の海域適用時の影響評価

Study on Environmental Impact Evaluation of Steelmaking Slag Using in Coastal Sea Area

加藤 敏朗*
Toshiaki KATO小杉 知佳
Chika KOSUGI木曾 英滋
Eiji KISO

抄 録

転炉系製鋼スラグを海域利用するに際し、当該材料がいかに有用かつ安全であるかを示すために様々な検討を実施してきた。特に、海域環境シミュレータ（シーラボ）を開設し、変動要因の多い実海域では得ることが困難な有用性や安全性に関する定量データの取得を試みてきた。さらに、藻場造成用資材や海域環境修復資材としての製鋼スラグ製品について、品質や生物影響などを精査し、全国漁業協同組合連合会が制定する製品安全性確認認証を得るに至った。

Abstract

Steelmaking slag came to be used in a marine environment and safety issue of slag is a matter of concern. We are trying to provide the safety information of the slag material. Experimental facility with mesocosm aquariums was constructed in RE center in order to clarify the mechanisms for efficacy and to evaluation of the safety for environmental organisms.

1. 緒 言

転炉系製鋼スラグの特性に着目した海域での利用技術の開発に取り組んでいる。これらのスラグは物理的な特性から土木用の資材として注目されているばかりでなく、含有成分である鉄を海藻の肥料として活用し、磯焼けした藻場を造成することを期待した藻場造成用資材として、また、軟弱な底質土に混合することで水和反応によって強度が増す上に、りんや硫化物などの海域環境汚濁物質の溶出や生成を抑制することを期待した海域環境修復資材としての活用についても実用化が進みつつある。

これらのスラグ系資材を実際の海域へ適用するにあたっては、有用な効果の影響範囲についての考察や海域生態系に及ぼす影響、すなわち安全性について可能な限りのデータを集積することが肝要と考えている。しかし、実際の海域は気象や海象などの変動要因が多く、効果を適切に見極めることが難しい場合があり、実験施設内に大型の水槽設備を建設して、それを用いた効果の検証を実施した。また、スラグ系資材の安全性についても生物学的な視点や生態学的な視点を含めて検討を実施してきた。以下、本稿では、実環境におけるスラグ系資材の有用性や安全性に関する影響評価の取り組みについて述べる。

2. 実海域での効果とその範囲の考察

スラグ系資材を用いた鉄分供給による藻場造成や浚渫土改質による海域環境改善については、これまで、さまざまな室内実験によって効果やそのメカニズムを検証してきた。一方、実際の海域で実施した小規模ないしは実規模での施工場所について継続的な現地調査を行って効果を評価する試みも実施してきた。しかし、気象や海象などの種々の変動要因のためにクリアな結果を得られない場合があった。

そこで、著者らは自然環境での変動要因を低減しつつ、より自然に近い環境下で試験できる海域環境シミュレータ実験水槽を設置し、スラグ系の資材を海域に適用する際の有用性や効果について検証するとともに、そこで得られた定量的な数値をもとに海域における物質動態をシミュレーションによって解釈することを試みた。

2.1 模擬環境下での有用性検討

2009年に千葉県富津市のREセンター内に設置した海域環境を模擬した実験水槽施設は、太陽光を採光するためにガラスハウス（写真1）の内部にFRP製の2組の水槽、すなわち鉄分供給による藻場造成を検討するための水槽（以下、藻場水槽と呼ぶ。写真2(a)）とカルシア改質による環



写真1 シーラボ I 外観

Photograph of apparatus of the mesocosm facility

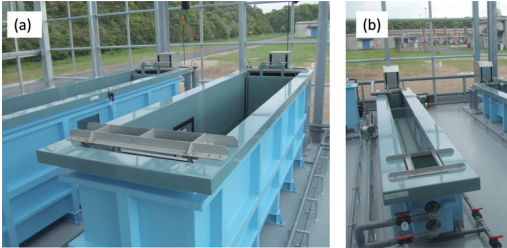


写真2 シーラボ I の実験水槽 ((a) 藻場水槽, (b) 浅場水槽)
Photographs of apparatus of the experimental tanks in mesocosm facility

(a) Seaweed grown tank, (b) Shallow seabed tank

境修復を検討するための水槽（以下、浅場水槽と呼ぶ。写真2 (b)）を配置している。

2.1.1 藻場水槽における藻類生長効果と安全性の確認

藻場水槽は、造波装置を有した水槽部分（内寸：幅1m×長さ5m×深さ1.6m）とそれにつながった貯水槽（容積約8m³）からなり、貯水槽と水槽との間で海水のやりとりをすることで水槽内に潮汐を再現することができる。系内の保有水（実験時約10m³）は、水槽内が下げ潮時に系外に排出し、上げ潮時に新鮮な海水を供給することでかけ流し条件での稼働も可能であるが、スラグ系施肥材の効果を検証する実験の場合は、物質収支を把握する目的でかけ流しではなく、閉鎖循環条件で実験を行った事例を紹介する。

東京湾表層の海水を引き入れた藻場水槽2槽の一方にスラグ系施肥材（ビバリー®ユニット）を投入し、施肥材を投入しない他方の水槽ともに造波と潮汐（12時間周期）を生じさせつつも閉鎖循環条件で稼働させ、両槽の差異を比較した。継続的に水質を測定して、施肥材からの栄養塩類の供給と藻類による吸収を考察した。紅藻スサビノリの殻胞子を着生させたノリ網を両槽に設置し、両槽でのノリの生育を観測したところ、施肥材投入から16日目に両槽ともに葉長100μm未満の葉体が観察されたが、藻体の色調は実験区で濃い傾向にあった。施肥材投入から48日目の写真を図1に示す。実験区では順調に生長していることが目視的にも確認できたが、対照区では藻体の生長は観察されなかった。また、同様の実験をアオサノリ（緑藻ヒトエグサ）

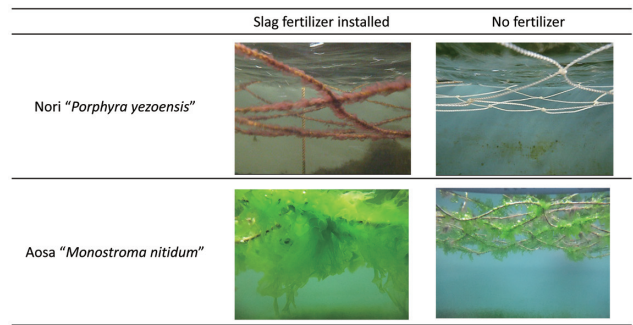


図1 シーラボ I 藻場水槽でのノリ栽培実験結果
Seaweeds grown in the experimental seawater tanks with or without slag fertilizer

についても実施したところ、実験開始後約4か月時点での写真を図1に示したように、スラグ系施肥材の投入によりヒトエグサの生長が促進することを確認できた。

これらの実験に用いたスラグ系施肥材は炭酸化した製鋼スラグと腐植物質の混合物であり、鉄以外にも窒素、りん、けい素等の栄養塩類が溶出することを確認しており、前記のノリの生長促進は鉄そのものの効果のみとは断定できないため、栄養素ごとの効果の差異や程度についての検討が待たれるものの、施肥によって海藻の生長を促進できることを明らかにできた。さらに、生長した藻体を回収し、重金属の含有量を測定したところ、スサビノリについては既往の分析値と、ヒトエグサについては対照区の藻体の分析値と比較してもスラグ系施肥材を投入した実験区のそれとの差はなかったことから、スラグからの重金属溶出やその結果としての生物濃縮の可能性は低いと考えられた。

2.1.2 浅場水槽における環境改善効果の確認

浅場水槽は、造波装置を有した水槽部分（内寸：幅0.3m×長さ5m×深さ0.5m）とそれにつながった貯水槽（容積約90L）からなり、貯水槽と水槽との間で海水を循環させる閉鎖循環条件での実験が可能である。

この浅場水槽の底面に東京湾にて採取した底質土（対照区）またはそれにスラグを混合した改質土（実験区）を敷設し、人工海水600Lを注ぎ入れて実験を開始した。海中のりん酸態りん濃度は対照区で初期に有意に上がり、その後、植物プランクトンの増殖に伴って減少した。対照区の植物プランクトン濃度は初期に上昇し、その後減少する現象を周期的に繰り返したが、実験区ではほぼ一定の低い水準で推移していた。また、無機態窒素濃度は両区ともに初期は高まったが、対照区においては植物プランクトンの増殖に伴って減少したのに対して、実験区では無機態窒素濃度はほぼ一定で推移した。これは、実験区での植物プランクトン増殖が対照区に比べて抑制されていたことが原因と推定している。

このようにスラグを混合して底質土を改質すると、底質土からのりんの溶出が低減し、その結果として植物プラン

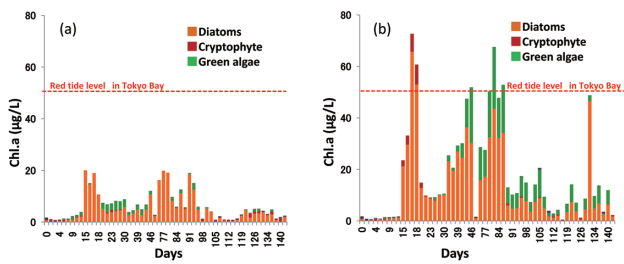


図2 植物プランクトン発生量の時間変化 ((a) 実験区, (b) 対照区)
Time-course changes of chlorophyll a in experimental tanks
(a) CaO - improved soil , (b) Raw soil

クトンの増殖が低減することが確認できた²⁾。なお、スラグ混合によって底質土からのりんの溶出が抑制される点については、他の実験でも確認されている³⁾。

また、大阪湾で採取した底質土を用いて同様の実験を行って再現性を確認したところ、図2に示すように、対照区では赤潮レベルまで植物プランクトンが増殖するのに対して、実験区では植物プランクトンの増殖が低位に推移していることを確認できた。このように、シーラボIの浅場水槽を用い、閉鎖循環系といった極端な環境条件であるものの、赤潮の発生抑制といった海域環境改善の効果を再現よく確認することができた。

2.2 鉄分供給による藻場造成

前述したシーラボIの藻場水槽やその他の室内実験において、ビバリー®ユニットからの鉄分溶出速度が実験的に求められている⁴⁾。また、当該施肥材を収納した鉄分供給ボックスからの鉄分溶出についても流体解析技術ツールとしてボックス内からの拡散フラックス（単位時間当たりの鉄分溶出質量）を算出する解析手法⁵⁾やボックスのごく近傍での拡散状況の推定⁶⁾を検討してきた。その一方で、実際の海域にビバリー®ユニットを設置した場合、溶出した鉄分は波浪や潮汐によって速やかに拡散することが容易に推定されることから、それぞれの海域の地形や潮流を考慮した移流拡散を解くことによって、ビバリー®ユニットから供給された鉄分の効果範囲を推定することができると考え、これまでに、北海道（室蘭、寿都）⁷⁾、兵庫（広畑）⁸⁾、大分（佐伯）⁴⁾などで解析を試みてきた。しかしながら、海藻生長に必要な鉄分の濃度やタイミングなど海藻側の施肥の必要要件について不明な点が多く、計算結果の妥当性を確認するには今後の検討が待たれる。

2.3 底質改善による環境修復

スラグ混合による底質改善や改質土を用いた浅場造成などは、前述のようにりんの溶出抑制とそれに関連した赤潮の発生抑制が期待できるばかりでなく、青潮の原因となる硫化物の発生抑制についても効果があることが確認されている⁹⁾。これらの定量的な知見を織り込んだ「浮遊系 - 底

生系結合生態系モデル¹⁰⁾”を考案し、三河湾の浚渫窪地を製鋼スラグ混合土ほかで埋め戻した場合の改善効果の予測を試み、埋め立て材の種類によって水質濃度の改善効果に大差はなかったが、スラグ混合土を用いた場合、浚渫土単独の場合に比べて、生物に毒性が強い硫化水素等の還元物質の低減効果が高くなる計算結果が得られている²⁾。

3. 海域利用時の安全性評価について

3.1 安全性評価と製品認証

転炉系製鋼スラグを海域で用いる場合、有害物質の溶出に関して環境保全上に問題がないことを確認するために、水底土砂の有害物質に係わる基準として定められた“海洋汚染防止及び海洋災害の防止に関する法律（海洋汚染防止法）”に準じた判定基準¹¹⁾、いわゆる水底土砂基準に基づく品質管理を行っている。さらに、適用先の海域環境において生息する生物を取り巻く生態環境に対しても懸念がないことを検証するために提案されている各種の生物試験（例えば、海産生物毒性試験指針¹²⁾）についても検討を行ってきた。このような製品としての品質管理体制の構築や生物影響評価等のデータを重ね、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認証を得るに至った。以下、藻場造成用資材と漁場環境修復資材について生物安全性を中心に経緯を述べる。

3.1.1 ビバリー® シリーズ^{13, 14)}

転炉系製鋼スラグを用いた藻場造成用資材は、鉄分供給を目的とした施肥材であるビバリー®ユニットと藻礁や漁礁の基盤として用いる人工石材であるビバリー®ロックおよびビバリー®ブロックとがある。

本資材については、環境庁告示第14号に準拠して調製した溶出液中の有害物質濃度が、前出の水底土砂基準を満足していることを確認している。さらに、本資材が海域で使われた際の生態影響を精査するため、(一社)全国水産技術者協会の指導のもと表1に示す生物群に対する生物試験を実施して毒性がないことを確認した。この生物試験では、本資材について“スラグ類の化学物質試験方法 - 第1部：溶出量試験方法 (JIS K 0058-1:2005)”に準拠してタンクリーチング法で溶出液を準備し、その溶出液もしくはろ過海水で希釈した溶出液を用いてそれぞれの生物を飼育して所定時間後の生残率に基づいて急性毒性を判定した。

2010年の取得に際しては、表1に示すGroup 1～4、すなわちマダイに対する急性毒性試験、クロアワビに対する急性毒性試験、クルマエビに対する急性毒性試験、ノリ芽およびノリ葉体に対する急性毒性試験を実施し、さらに、2013年の認証更新時までに残る2試験、すなわち有用植物プランクトン生長阻害試験、赤潮プランクトン影響試験を実施した。

Group 1～3の試験結果を表2¹⁵⁾に示した。試験では上

述のタンクリーチング法でろ過海水を溶媒として調製した溶出液（表中100%濃度）のほかにろ過海水で25~75%の濃度となるよう希釈した溶出液、さらに、対照としてろ過海水そのもの（表中0%濃度）について試験を行った。1試験区あたりの個体数は、マダイ10個体、クロアワビ10個体、クルマエビ20個体とした。試験の結果、ビバリー®ユニットに関するマダイの急性毒性試験について50%濃度区で個体間の闘争による損傷が原因の斃死が1個体観察されたが、それ以外の試験区では、斃死や異常行動が観察されなかったことから、ビバリー®シリーズの2種3製品についてともに海域使用時に水産生物に対する安全性に問題はないと判定された。さらに、Group 4~6の試験においてもノリ¹⁶⁾や植物プランクトンの生長を阻害する毒性影響は観察されず、また、赤潮プランクトンの増殖を顕著に促進する効果も観察されなかった。

以上の結果を含め、これらの製品群が藻場造成に有用な利用技術として、2010年に認定されるに至った。

表1 水産生物に対する影響評価
Outline of the biological testing of slag

Category	Organism type	Test organism in this article	Test method
Group 1	Fish	Red seabream [<i>Pagrus major</i>]	96h-acute toxicity (survival)
Group 2	Shellfish	Abalone [<i>Haliotis discus</i>]	96h-acute toxicity (survival)
Group 3	Crustacean	Prawn [<i>Marsupenaeus japonicus</i>]	96h-acute toxicity (survival)
Group 4	Macroalgae	Seaweed [<i>Porphyra yezoensis</i>]	96h-acute toxicity (growth inhibition)
Group 5	Microalgae	Marine diatom [<i>Skeletonema costatum</i>]	72h-acute toxicity (growth inhibition)
Group 6	Pest organism	Red tide phytoplankton [<i>Heterosigma akashiwo</i>]	120h-effect on growth (growth stimulation)

表2 水産生物毒性試験の結果例
Example of results of acute toxicity tests

Concentration of test solution (%)	Iron supply unit			Slag rock/block		
	Fish	Shellfish	Prawn	Fish	Shellfish	Prawn
0	0% (0/10)	0% (0/10)	0% (0/20)	0% (0/10)	0% (0/10)	0% (0/20)
25	0% (0/10)	0% (0/10)	0% (0/20)	0% (0/10)	0% (0/10)	0% (0/20)
50	10% (1*/10)	0% (0/10)	0% (0/20)	0% (0/10)	0% (0/10)	0% (0/20)
75	0% (0/10)	0% (0/10)	0% (0/20)	0% (0/10)	0% (0/10)	0% (0/20)
100	0% (0/10)	0% (0/10)	0% (0/20)	0% (0/10)	0% (0/10)	0% (0/20)

* Falling dead by the struggle between the individual.

3.1.2 カルシア改質材¹⁷⁾

転炉系製鋼スラグを用いた漁場環境修復用資材は、カルシア改質材と称し、漁場等に沈降堆積して漁業の障害となる堆積物等に混合することで、それらを凝集あるいは固化させる特性があり、混合土（カルシア改質土）は埋め戻し材として利用して、漁場としての機能を回復することを狙った商品である。

本資材についても、ビバリー®シリーズの商品群と同様に、環境庁告示第14号に準拠して調製した溶出液中の有害物質濃度が、前出の水底土砂基準を満足していることを確認しているうえに、本資材が海域で使われた際の生態影響を精査するため、全国水産技術者協会の指導のもと表1に示す生物群に対する生物試験のうち、これまでにGroup 1~4の試験を実施して毒性がないことを確認した。さらに、カルシア改質土は、海底面に広く施工する可能性があるため、短期間の急性毒性ばかりでなく、30日間の飼育試験によってもその安全性を確認した。具体的にはカルシア改質材もしくはカルシア改質土を投入した水槽を通過した海水でマダイもしくはクロアワビを飼育し、30日後の生残率や異常行動の有無、さらには試験終了時の重金属含有量を、スラグ資材にさらされていない海水で飼育した場合（対照区）と比較し、差がないことを確認した。

さらに、カルシア改質土を施工した実際の海域で魚介類を採取して、栄養成分量や重金属含有量を測定したが、対照区で採取したものと差はなく、カルシア改質土を施工した海域であってもそこに生息する魚介類は食品としての安全性に問題はないことを確認している。

以上の結果を含め、カルシア改質材が漁場環境修復について有用かつ安全な技術として、2014年に認定されるに至った。

3.2 その他の生物影響評価

海域における底質の汚染評価は一般には有害物質の含有量や溶出量で判断される場合が多いが、そのような化学的

特性ばかりでなく、生物に対する毒性評価をすることが提案されている¹⁸⁾。上述した水産業上で有用な資源生物に対してばかりなく、環境影響という視点からは、生態系を構成する生物種について食物連鎖を考慮して階層ごとに代表的な生物を選定して試験することが推奨されている。淡水に生息する生物については各種の生物種とその標準的な試験方法が提案されているが、海生生物については実用的な試験方法が開発の途にある。

筆者らは、富山県立大学の楠井隆史教授の指導のもとで海生生物を用いた生物毒性試験を検討し、製鋼スラグについて評価を試みてきた。これまでに一次生産者である植物プランクトン、それを捕食する動物プランクトン、さらにその上位に位置する貝類、ウニ類、分解者としての細菌などについて検討してきた。ここではそのうちの細菌（海洋性発光細菌（*Vibrio fischeri*）を用いた発光阻害試験）とミジンコ（海洋性ミジンコ（*Tigriopus japonicus*）を用いた遊泳阻害試験）を例に製鋼スラグの溶出液を評価した事例を紹介する¹⁹⁾。

前述したタンククリーニング法で人工海水を溶媒して調製した製鋼スラグの溶出液を評価したところ、両試験ともに高 pH で阻害反応を示すことが判明した。高 pH の溶出液を海水並みの pH8 に中和すると、発光細菌では阻害が消失し、むしろ発光が増大したが、ミジンコでは遊泳阻害が残存した。この原因について検討を行った結果、スラグから溶出した Ca によって海水中の Ca 濃度が高まったことが原因であることを突き止めた。つまり、これらの生物試験については、pH 変化や pH 変化に伴う硬度成分、特に海水中の Ca 濃度の変化が結果に影響したと結論され、有害物質による影響は観察されなかった。なお、実際の使用条件では pH の変化がほとんどみられないことが報告されており²⁰⁾、前記の生物試験でみられた高 pH 影響は生じないと考えられる。

4. 結 言

鉄鋼スラグ製品を水産用資材として利用するに際し、スラグがいかにより有用な資材であるのかを実証するばかりでなく、スラグが環境中でも安全に使用できることを裏付けるデータをひとつでも多く取得していくことを今後とも継続する必要があると考えている。

2011 年には海域利用時の長期的な環境影響を評価することを目的として“シーラボⅡ”を増設し、初代のシーラボでは困難であった年間を通じた実験データの蓄積が可能となり、現在は、アサリの生育に及ぼす鉄鋼スラグ系資材の影響に関する検証を行っている。

大規模適用に向け、広く社会に受容されるために何が必要かを考えて、実験室での基礎実験から各海域での実証実験に至るまで幅広いステージでの検討を通じて、安心して使用できる環境整備のための技術開発を継続したい。

参考文献

- 1) 植木知佳 ほか：海洋理工学会誌. 17 (1), 49 (2011)
- 2) 三木理 ほか：海洋理工学会誌. 17 (1), 37 (2011)
- 3) 三木理 ほか：水環境学会誌. 32 (11), 33 (2009)
- 4) 加藤敏朗：平成 23 年度磯焼け対策全国協議会, 東京, 2011
- 5) 古屋哲志 ほか：水環境学会第 46 回年会, 東京, 2012
- 6) 金山進 ほか：海の緑化研究会シンポジウム, 東京, 2013
- 7) (財)室蘭テクノセンター：平成 21 年度低炭素社会に向けた技術発掘・社会システム実証モデル事業“農工循環資源を用いた亜寒帯沿岸域藻類による CO₂ 吸収実証モデル事業”成果報告書. 2011
- 8) 加藤敏朗：ひょうごエコタウン推進会議平成 23 年度研究進捗報告会, 神戸, 2011
- 9) Miki, O. et al.: Journal of Water and Environment Technology. 11 (2), 101 (2013)
- 10) 永尾謙太郎 ほか：海岸工学論文集. 55, 1191 (2008)
- 11) 日本鉄鋼連盟：転炉系製鋼スラグ 海域利用の手引き, 2008
- 12) 水産庁：海産生物毒性試験指針. 2010 年 3 月
- 13) 全国水産技術者協会：漁場造成・再生用資器材の技術審査・評価報告書. 第 22001 号, 2010
- 14) 全国水産技術者協会：漁場造成・再生用資器材の技術審査・評価報告書. 第 22002 号, 2010
- 15) 加藤敏朗：海の緑化研究会シンポジウム, 東京, 2010
- 16) Ueki, C. et al.: 15th International Symposium on Toxicity Assessment, Hong Kong, 2011
- 17) 全国水産技術者協会：漁場環境修復技術審査・評価報告書. 第 26001 号, 2014
- 18) 中村由行：水環境学会誌. 29 (8), 14 (2006)
- 19) 三木理 ほか：水環境学会誌. 33 (9), 141 (2010)
- 20) 宮崎哲司 ほか：土木学会論文集 B3. 69 (2), I_1042 (2013)



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)
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



小杉知佳 Chika KOSUGI
先端技術研究所 環境基盤研究部
主任研究員 博士(水産科学)



木曾英滋 Eiji KISO
スラグ・セメント事業推進部 主幹