

転炉系製鋼スラグ資材を用いた 海域環境造成技術の開発

加藤 敏朗・小杉 知佳・山越 陽介

製鉄の副産物である鉄鋼スラグは、従来の構造材としての用途にとどまらず、その特性を活かした機能材としての利用技術の開発が進められている。特に最近では、陸域ばかりでなく、海域での利用を想定した利用法が提案され、実用化が進みつつあり、環境資材としての資源化が注目されている。

本稿では、鉄鋼スラグのひとつである転炉系製鋼スラグに着目し、藻場や浅場などの沿岸海域環境の造成を目的とした利用技術として、人工石材、ミネラル供給材、カルシア改質材の開発状況について事例を交えて詳しく紹介する。

キーワード：鉄鋼スラグ、藻場造成、浅場造成

1. はじめに

鉄鋼スラグは、鉄鉱石、石炭、コークス等の原料中の脈石成分、および、精錬工程において銑鉄中の不純物除去や溶鋼の成分調整のために添加される融剤に由来して、鉄鋼生産時に副生する銑物資材であり、鉄鋼石を溶融・還元して銑鉄を製造する工程で生成する高炉スラグと銑鉄を成分調整して鋼を製造する工程で生成する製鋼スラグに大別される。本稿は、後者のうち、特に電気炉ではなく転炉で生産される転炉系製鋼スラグを用いた資材に関するものである。

鉄鋼スラグの利用は、路盤材や簡易舗装材といった道路用材料、軟弱地盤の土壌改良材、農業用の肥料・土壌改良材などのような陸域用途に限定されることなく、海域においても有用に活用できる資材として注目されている。

著者らは、鉄鋼スラグやそれを原料とした固化体などを構造材として利用することばかりでなく、鉄鋼ス

ラグの特性を活かした機能材としての利用技術の開発を進めてきており、以下、本稿では代表的な海域利用技術について概要を述べ、その後、それぞれについて事例を交えて詳しく紹介する。

2. 藻場造成技術への適用

(1) 人工石材（鉄鋼スラグ水和固化体）

鉄鋼スラグ水和固化体は、セメント原料として活用してきた高炉水砕スラグ微粉末を結合材とし、転炉系製鋼スラグを骨材としたオールリサイクル材からなるコンクリート代替品であり、型枠を用いた無筋コンクリートブロック代替の成形品や所望のサイズで塊状に破碎した人工石材等の自由な形状での製造が可能である（写真—1）。また、製造過程で焼成熱源としての燃焼に加え、石灰石の脱炭酸反応によりCO₂が必然的に排出される普通セメントに代わって高炉スラグ微粉末を使用する鉄鋼スラグ水和固化体は、CO₂の発生



写真—1 鉄鋼スラグ水和固化体¹⁾

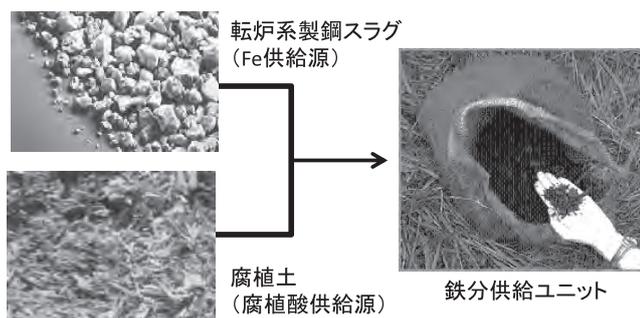
を削減した環境負荷の少ない資材と位置付けられる。

これらの人工石材は、裏込め石、傾斜護岸材、被覆石など港湾土木工事資材のほか、漁礁や藻場礁など水産用基材として活用されている。施工例として長崎県壱岐での事例を後述する。

(2) ミネラル供給材（鉄分供給ユニット）

沿岸域の藻場が衰退する「磯焼け」現象については気象変化、生物相変化（ウニや魚などの食植生物による被害）、人工的な海域環境改変などによる潮流変化や海水水質変化などが複合的に影響しているといわれ、その解決に向け様々な取り組みが行われている。

また、近年、河川を介した森林から海域のつながりが重要視され、海域への栄養の供給が着目されている。海藻の生育には窒素やりんなどの栄養塩類のほか鉄分も必要とされるが、鉄イオンは水中の溶存酸素で容易に酸化されて三価鉄となり不溶性の水酸化物コロイドとして沈殿しやすい性質がある。これに対して森林土壌中では鉄イオンが腐植酸と錯体を形成し、それは溶存鉄として安定的に海域へもたらされると考えられている。この原理に基づき、図一に示すように鉄イオンの供給源として炭酸化した転炉系製鋼スラグを用い、錯体形成にかかせない腐植酸の供給源として腐植土を用いた鉄分供給ユニットを開発し、貧栄養が原因と推定される沿岸域における海藻類の生長促進を期待したミネラル供給材としての適用が提案され、各地で実証実験が実施されている。これについては北海道増毛町における事例を後述する。



図一 鉄分供給ユニットの構成¹⁾

3. 浅場造成技術への適用

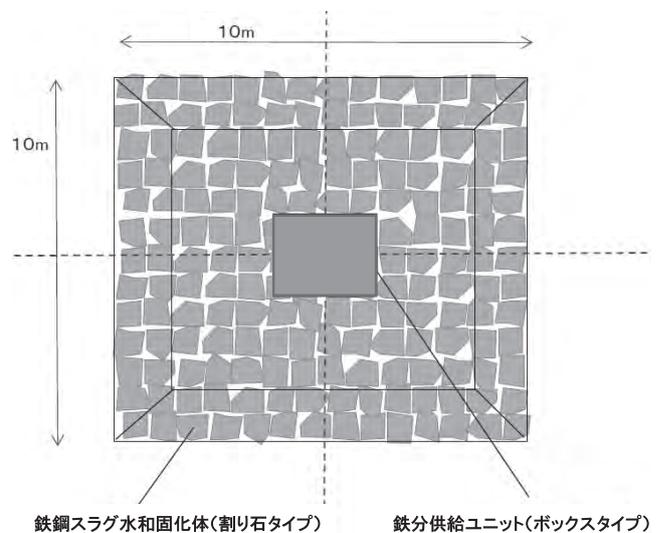
鉄鋼スラグの潜在水硬性を利用し、港湾・航路の保全で発生する軟弱な浚渫土の強度改善材として活用が進められている。本技術は、転炉系製鋼スラグを原料として成分管理と粒度調整を施したカルシア改質材を、軟弱な浚渫土に混入することで強度を改善し、そ

の改質土を浅場・干潟の造成や浚渫窪地の埋戻しに活用する技術であり、実海域での実証試験を経て実用化が進められている。また、カルシア改質土は、浚渫土の物理的な性状を改質するばかりでなく、浚渫土からのりんの溶出や硫化物の発生を抑制する効果があり、富栄養化した内湾や閉鎖性海域の底質環境を改善する技術として期待されている。

4. 事例紹介

(1) 長崎県壱岐における藻場造成事例²⁾

海藻が着生する基盤がない砂地における藻場造成技術として、鉄鋼スラグ水和固化体をマウンド基材として用いることを提案している。長崎県壱岐では図一に模式化したような藻礁を2010年に設置した。さらに、藻礁の中心には鉄分供給ユニット（鋼製ボックス仕様）を設置して、鉄分供給による藻場造成効果も期待した。2013年夏には写真一に示すようにアラメ・カジメ類の繁茂を確認した。また、生物利用性が高いと



図一 壱岐市での藻礁施工模式図



写真一 壱岐市実験海域の状況（2013年7月撮影）

される二価鉄が鉄分供給ユニットの近傍で観測され、投入した鉄分供給ユニットが鉄イオンの供給源として機能していることがうかがえる。鉄分供給と海藻繁茂の関連性について今後の調査が待たれる。

(2) 北海道増毛における藻場造成事例

2004年10月、北海道増毛町舎熊海岸において鉄分供給ユニットを埋設し（写真—3a）、その後、10年にわたってその海域の藻場の状況や海水水質について継続的に観測を実施してきた。9年目の2013年6月においても、実験区の海岸にはホソメコンブを中心とした海藻群落が維持されている様子が観察されている（写真—3b）。

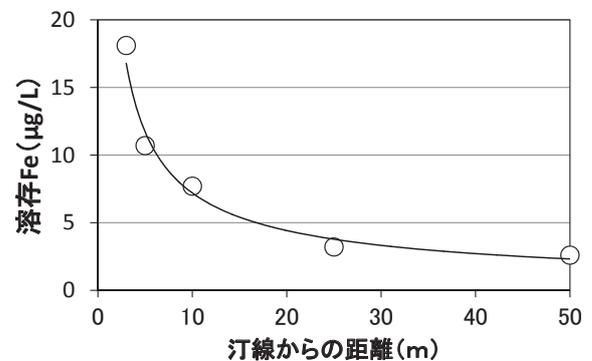
本海岸は、50m沖合でも水深1.5m程度の遠浅であり、粒度20～50cmの玉石からなる地盤であり、さらに干満差が小さいことから供給した養分が希釈拡散されずにとどまることが期待された。実験区の汀線を26mにわたって掘削し、ヤシ繊維袋に充てんした鉄分供給ユニットをのべ約6t埋設した。実験区から西に108m離れた地点に設定した対照区とともに、海藻が繁茂する時期(6～7月)に定期調査を実施した。

藻場調査は、汀線部から沖合50mまでの植生調査（ベルトトランセクト法）、及び、沖合50mまでの各観測点（3, 5, 10, 25, 50m）において50cm方形枠

内の海藻重量調査(コドラート法)を実施した。また、海水を採取し、Fe濃度や栄養塩類（N, P, Si）等について水質分析した。

海藻繁茂の観測結果の一例としてコドラート調査の結果を図—3に示す。天候や海況等の影響により年ごとに海藻量は異なるが、ホソメコンブを中心とした海藻繁茂量は対照区に比べて実験区で多い傾向が継続しており、さらに埋設した汀線からの限界有効距離は沖合10～25mの範囲にあると考えられ、これは後述する溶存鉄分布とも符合する結果であった。

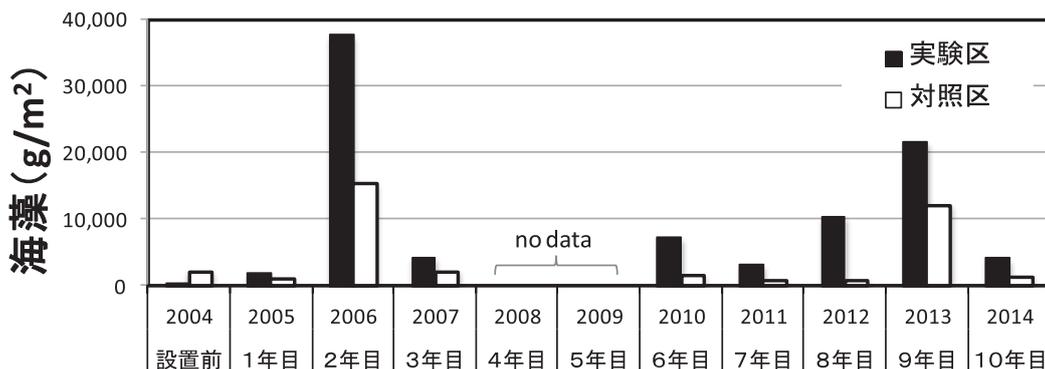
海水中の窒素やリンの濃度は実験区と対照区で明確な差が見られなかった。一方、鉄濃度（溶存Fe）は極低濃度であったためJIS法（フェナントロリン吸光



図—4 実験区における海水中の溶存鉄分布測定例¹⁾



写真—3 鉄分供給ユニットの施工事例¹⁾



図—3 海藻繁茂量の経年変化（コドラート調査結果）¹⁾

光度法)で測定できなかったことから、分析方法を検討し、実験方法の整った3年目以降に分析を行うようになり、その年(2007年)の6月にコドラート調査を行った観測点について水質調査も行ったところ図-4に示すように埋設部である汀線部の近傍ほど高く、沖合に向かって低減する傾向が確認され、鉄分供給ユニットからFeが溶出している可能性を明らかにすることができた。なお、溶存Feは、海水試料を0.45μmのメンブレンフィルターでろ過した後、キレート樹脂を用いた固相抽出でアルカリ金属イオン等の海水マトリクスを除去し、硝酸で溶離して、溶離液中のFeイオンをICP-MSで測定した。

対照区と実験区の溶存鉄濃度の経年変化は、図-5に示すように、施工後5年目までは対照区に比べて実験区で高い傾向が観察されたが、それ以降は顕著な差が確認できなかった。埋設した資材を掘り出してスラグの残存鉄濃度を観測したところ、4年でほぼ半減していたことから鉄溶出量が少なくなったことが推定さ

れた。しかし、写真-3bに示したように10年目になっても磯焼けに戻ることなくコンブの繁茂が観察されていることから、ある量のコンブ場を施工後の数年間で形成することができれば、持続的に自己再生産する場が復活するのではないかと推定している。

増毛町舎熊地区での結果を受け、実事業規模での藻場造成を再現するとともに、将来の事業化に向けた経済性データ(費用対効果など)を試算することを目指し、増毛町別荘地区において増毛漁協殿を事業主体とした実証事業を開始した。2014年10月に別荘地区の海岸線300mにわたり25m間隔で、前述した舎熊地区での実験相当の鉄分供給ユニット埋設規模で6区画を施工した(図-6)。すなわち、1区画あたり汀線部を深さ1m程度で25mにわたって掘削し、鉄分供給ユニット(ヤシ袋仕様)をS版(35リットルタイプ)100袋とL版(55リットルタイプ)50袋にて約8t埋設した。翌春以降、持続的な藻場の拡大が観察されているが、今後数年かけて調査を継続して効果を評価し

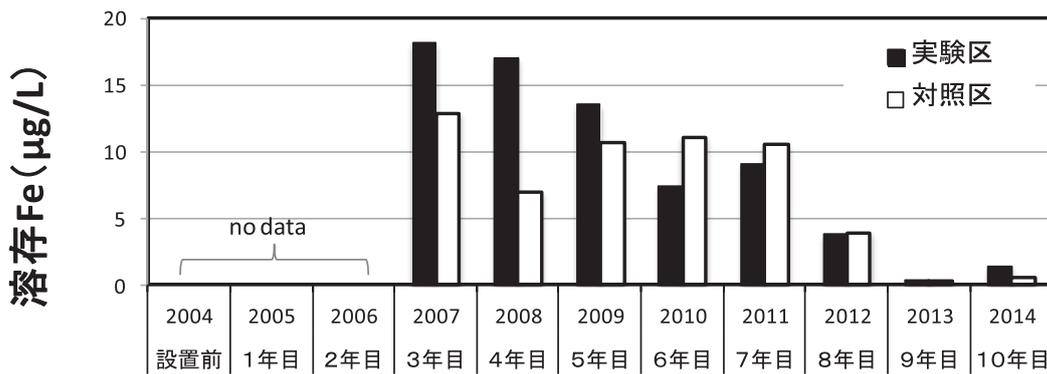
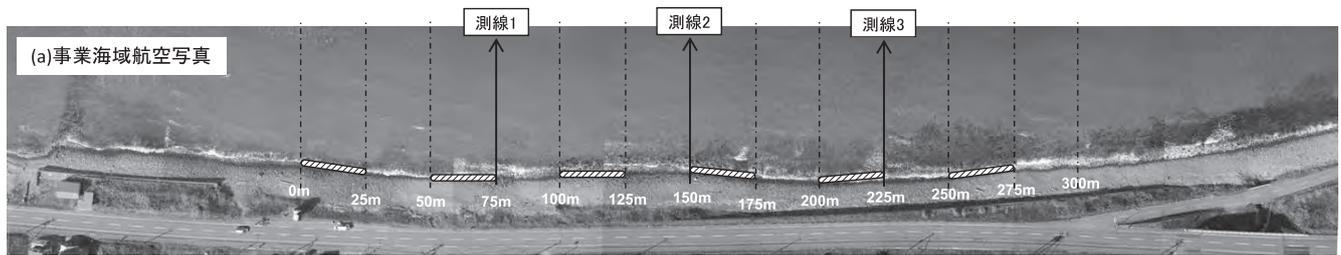


図-5 海水中の溶存鉄濃度の経年変化¹⁾



藻場造成共同実証事業区域(300m)

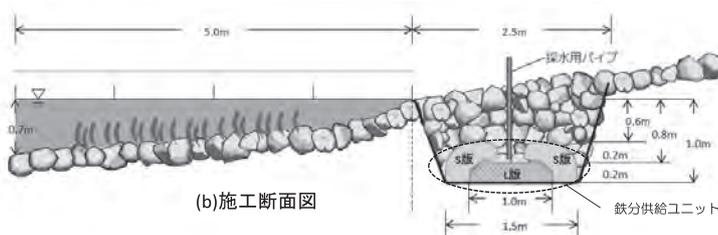


図-6 増毛町別荘地区での藻場造成事業の施工区図

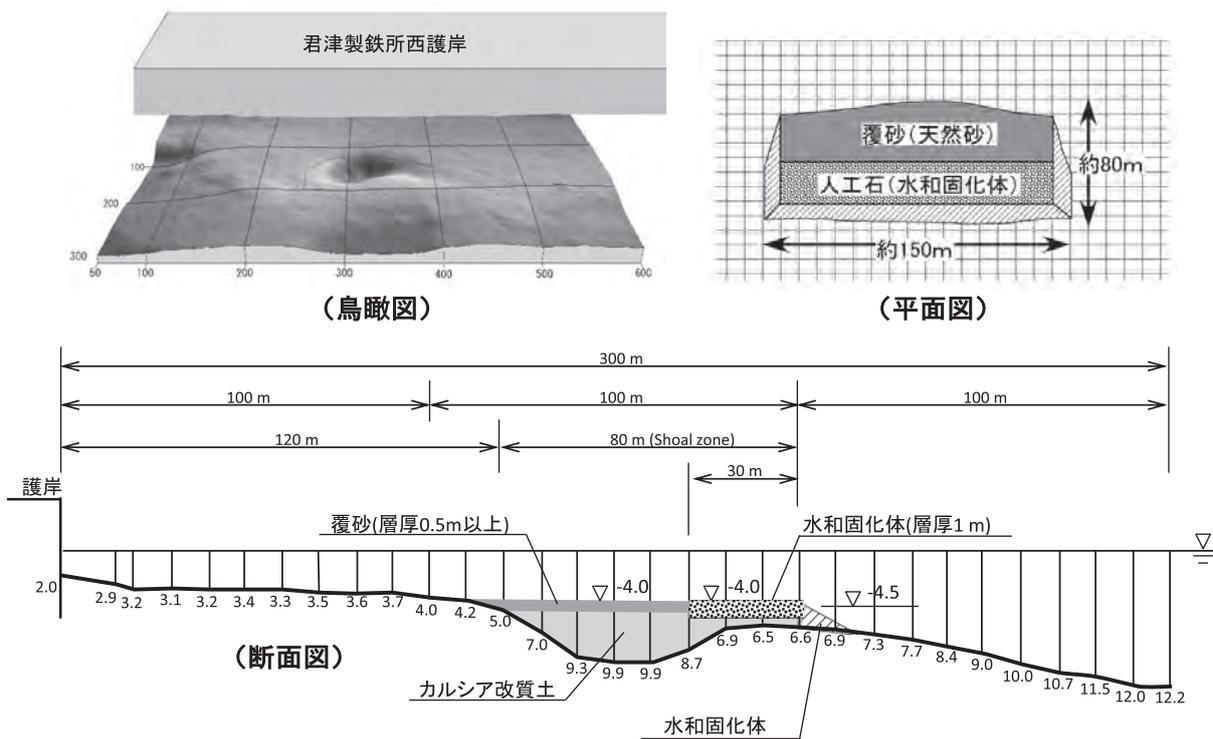
ていく予定である。

(3) 千葉県君津における浅場造成事例^{3), 4)}

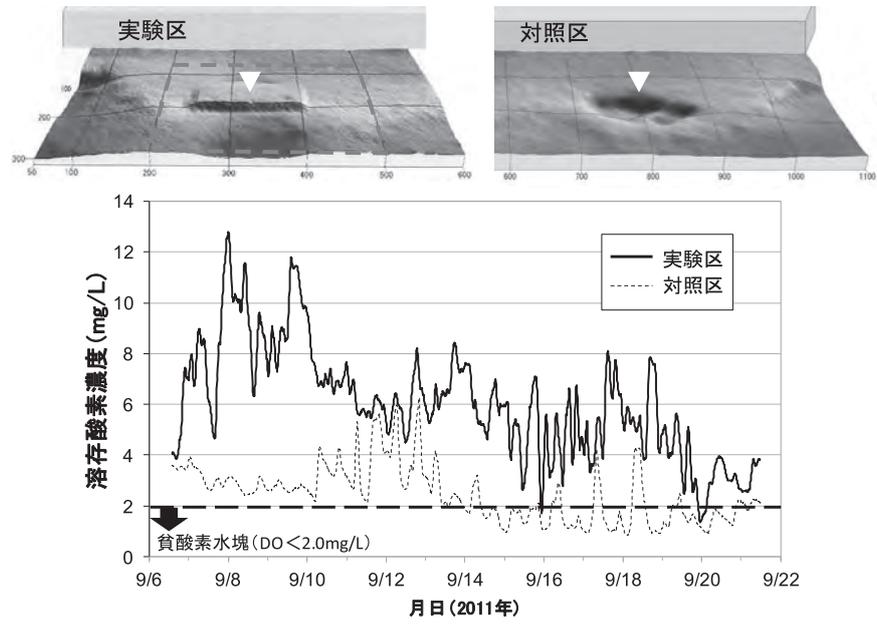
新日鐵住金(株)君津製鉄所の沖合に浅場を造成する目的で、君津製鉄所西護岸沖浅場造成工事(2011年6~7月)において、カルシア改質土を海底の窪地に投入した。図一七に示すように、浅場の造成は最大水深9mの小規模な深掘れ窪地の周囲を水和固化体で築堤した後に、窪地に改質土を投入し、カルシア改質

土上面を山砂と水和固化体でそれぞれ覆土する施工を行った(浅場面積:70m×160m)。改質土は、全開式の土運船上で大型バックホウを用いて混合し、混合後に最大水深約10mの海底まで直接投入する方法で施工した。なお、改質土の製造・投入数量は15,200m³であった。

軟弱な浚渫土はカルシア改質材を混合した直後に、カルシア改質材による吸水作用により強度(粘性)が速やかに増大する。これにより、カルシア改質土は、



図一七 君津製鉄所沖での浅場造成実験工事の概要図³⁾



図一八 浅場造成による溶存酸素濃度の変化³⁾

混合直後の水中投入時においても、濁りが生じにくいと考えられる。この特性については水槽実験で検証するとともに、本稿の実施事例においても確認した。

浅場造成後には、周辺の水質や海藻、生物の生育状況に関するモニタリング調査を継続している。造成した浅場を実験区とし、実験区から護岸に沿って300 m離れた地点を対照区として選定した。対照区は、水深が6 m程度であり、実験区の施工前の状況に類似していることから、両区を比較することで浅場造成の効果を評価できると考えた。2011年9月に実施した溶存酸素の測定結果を図-8に示す。溶存酸素濃度が2.0 mg/L未満の状態は貧酸素状態と呼ばれ、その期間が短い方が、生物が生息しやすい環境とされる。実験区は対照区と比較して貧酸素状態になる期間が極めて短くなっており、深掘れ窪地をカルシア改質土で埋戻すことで貧酸素状態が解消されていることがわかる。

その後も環境調査を継続しており、写真-4に示すような生物が観測されるようになり、良好な藻場・漁場環境に変遷しつつあることが確認され、ここで操業している潜水器漁業者より高い評価を得ている。

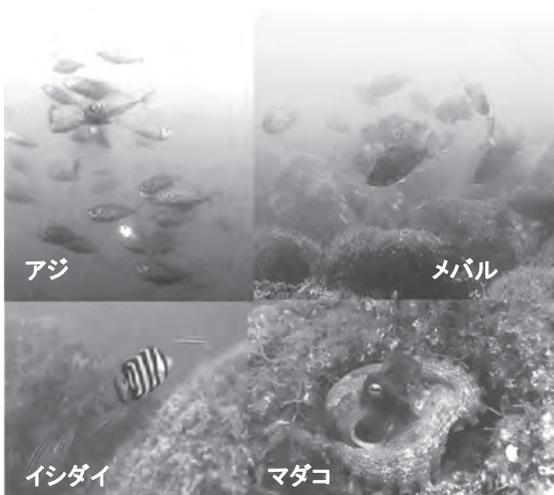


写真-4 造成した浅場で観察された水産有用生物例

5. おわりに⁵⁾

転炉系製鋼スラグ資材を実際の沿岸域へ適用する事例を重ねるばかりでなく、これら資材の有用性や安全性について客観的なデータを集積する必要があると考えている。しかし、実際の海域は、気象や海象など変動要因が多く、開発技術の有効性や持続性を定量的に検証することが困難なため、著者らはひとつでも多くの客観データを取るために2009年に海域環境シミュレーション設備（通称シーラボ I；写真-5）を開設し、検討を進めている。シーラボでは藻場や浅場を再

現した水槽を設置し、沿岸海域環境や藻場再生に関する様々な模擬実験を実施してきた。現在までに、ノリの生長や色彩に及ぼす鉄分供給の効果の実証⁶⁾、カルシア改質材による底質環境改善効果の実証など実験データを取得してきた⁷⁾。さらに、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」を増設した（写真-6）。この水槽設備は鉄鋼スラグ資材の実際の適用場を想定して干潟ゾーンと浅場ゾーンを備えた2段構造となっており、日照と水温の調節が可能な仕様とし、シーラボ Iでは困難であった年間を通じた実験が可能となり、現在、アサリやアマモを用いた生育試験を行っている⁸⁾。

以上のように、鉄鋼スラグは有用な環境資材として新たな用途での活用が進み始めており、安心して使っ

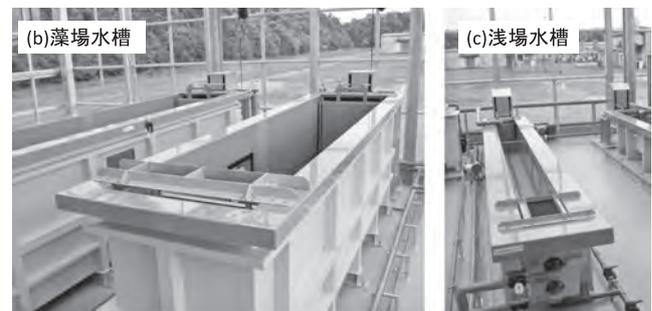
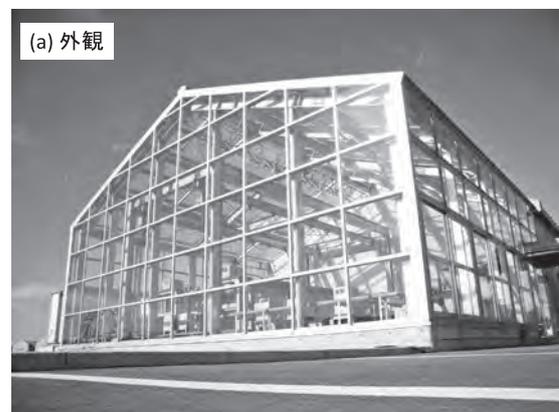


写真-5 海域環境シミュレーション設備「シーラボ I」



写真-6 海域環境シミュレーション設備「シーラボ II」

ていただくために必要な情報をひとつでも多く確保するための研究開発に取り組んでいく。



《参考文献》

- 1) 加藤, 鉄鋼スラグの環境資材としての資源化, アロマティックス, 67, 春季号, 94-103, 2015
- 2) 加藤ら, 転炉系製鋼スラグ資材を用いた海域藻場造成技術の開発, 新日鉄住金技報, 399, 79-84, 2014
- 3) 中川, 鉄鋼スラグ製品による海域環境改善技術への取り組み, 環境技術, 42, 7, 411-416, 2013
- 4) 山越ら, カルシア改質土による浅場造成, 新日鉄住金技報, 399, 59-64, 2014
- 5) 加藤ら, スラグ資材の海域適応時の影響評価, 新日鉄住金技報, 399, 85-89, 2014
- 6) 植木ら, ノリの生育に対するスラグ系施肥材の効果実証実験, 海洋理工学会誌, 17, 1, 49-55, 2011
- 7) 小杉ら, 製鋼スラグを活用した海域底質からの微細藻類の増殖抑制, 20, 1&2, 1-9, 2014
- 8) 小杉ら, 干潟・浅場一体型メソコスム水槽を活用した製鋼スラグの浅場造成材としての安全性の検証実験, 海洋学会, 2015年度秋季大会

[筆者紹介]

加藤 敏朗 (かとう としあき)

新日鉄住金(株)

技術開発本部 先端技術研究所 環境基盤研究部

上席主幹研究員



小杉 知佳 (こすぎ ちか)

新日鉄住金(株)

技術開発本部 先端技術研究所 環境基盤研究部

主幹研究員



山越 陽介 (やまごし ようすけ)

新日鉄住金(株)

君津製鉄所 資源化推進部 スラグ製品室

主査

