

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

Application of Steelmaking Slag to Marine Forest Restoration

加藤 敏朗*
Toshiaki KATO

小杉 知佳
Chika KOSUGI

木曾 英滋
Eiji KISO

鳥井 孝一
Koichi TORII

抄 録

転炉系製鋼スラグ資材の海域利用技術のひとつとして、磯焼け等によって衰退、消失した沿岸域の藻場を再生するための資材の開発に取り組んできており、海藻の栄養素のひとつである鉄分を供給する技術としてビバリー®ユニットと人工ミネラル、海藻着生の基材としてビバリー®ロック・ブロックを提案している。鉄分供給技術を中心に室内実験での効果メカニズムの解明や安全性の確認などのこれまで得られた知見をレビューするとともに、北海道や三重などにおける実海域での実証実験事例を紹介した。

Abstract

Steelmaking slag is a valuable material, which can be used as fertilizer or artificial rock, also in the coastal area as well as on the land. First, we focus on ferrous ion, which is the essential element in seaweed growth, from the slag. We carry out the fundamental experiments from laboratory scale to actual field scale to demonstrate the efficacy of slag as ferrous fertilizer. Second, we propose the usage of slag stone for seaweed bed basement and succeed in seaweed growing on the surface of slag stone in several field tests. We continue to evaluate the efficacy and safeness of the steelmaking slag when using it in marine.

1. 緒 言

我が国の沿岸域においては、魚類の産卵や生育の場となる大型海藻類の群落が消失する磯焼けと呼ばれる現象が進行し、漁獲高の減少等の問題をもたらしている。

磯焼けは、海水温の上昇、開発等による水質の悪化、ウニや魚類の過剰な食圧といった諸原因が複合して発生すると考えられており、食害に遭いにくい基質を投入する方法や、食害動物を直接駆除する方法等の種々の対策がはかられている。さらにこの他にも、海域によっては海藻の生育に必要な栄養塩や鉄分の濃度が極端に低いことが磯焼けの原因となっている可能性が示唆されてきた。

転炉系製鋼スラグは、その成分に、海藻の生育に必要な二価鉄やけい素を多く含むことから、アルカリ溶出を抑制する加工を行うことで、貧栄養化した沿岸域の藻場造成を行うための栄養塩供給材や基質材として活用することが可能である。

昨今、川を通じた森と海の栄養の循環が重要視され、森が栄養塩や鉄分の重要な供給源となっていると言われてい

る。海藻の生育に必要とされる鉄分の形態は水中に溶存する二価鉄と考えられているが、この二価鉄は海水中の溶存酸素により速やかに三価鉄に酸化されて水酸化コロイドとして沈殿してしまう。これに対し、森林土壌中では、二価鉄が腐植酸と錯体を形成して酸化に対して安定的となっており、これが河川を通じて海藻に供給されると考えられている。

新日鐵住金(株)で開発した“ビバリー®ユニット”は、二価鉄を多く含有する転炉系製鋼スラグと、廃木材チップを発酵させて製造した人工腐植土を混合した藻場造成材料であり、海域へ鉄分を供給し、藻場の造成を助ける資材である。2004年10月に北海道増毛町の実海域実験での初適用以来、国内30か所程度の海域に適用され、その間、安全性や有用性に関する知見を蓄積し、2010年7月には全国漁業協同組合連合より委託を受けた(一社)全国水産技術者協会にて、漁場造成に有用な利用技術として鉄鋼スラグ製品安全確認認証制度で認定されるに至っている。

また、鉄分やりん等の栄養塩類の供給製品として人工ミネラルを開発し、2012年度の環境省 環境技術実証事業

* 先端技術研究所 環境基盤研究部 上席主幹研究員 博士(学術) 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

(ETV 事業)にて効果と安全性の実証を行っている。さらに、海藻の着生用基質材としては、製鋼スラグのアルカリ刺激で高炉スラグ微粉末をコンクリート状に水和固化させて製造するブロックや石材であるビバリー®ブロックやビバリー®ロックについても開発を手掛け、ビバリー®ユニットと同様に全国水産技術者協会より漁場造成に有用な利用技術として鉄鋼スラグ製品安全確認認証制度で認定されている。

本稿では、これら藻場造成技術に資する転炉系製鋼スラグ資材の研究開発成果の報告として、有用性や安全性に関する研究成果、および適用事例について紹介する。

2. 鉄分供給技術の作用機構と安全性の考察

2.1 海藻生育に及ぼす鉄の効果

海藻類は、孢子体 (Sporophyte) の世代と配偶体 (Gametophyte) の世代を繰り返す生活環をなしている。例えばコンブ目植物では、図1に示したような生活環を1年のサイクルで完結させており、我々にとって親しみ深い長さ数 m に達する“昆布”は孢子体である。孢子体からは減数分裂によって生じた遊走子が放出され、基物に付着した後に単列糸状の微小な雌・雄配偶体を形成し、雌・雄配偶体はそれぞれ適当な条件で卵と精子とに成熟し、それらが受精して孢子体へと発生する。つまり、各ステージへの移行が阻害された場合には新しい“昆布”は再生産されないということになる。本村ら²⁾はコンブ配偶体の成熟に鉄が必要不可欠であることを突き止めており、筆者らはこの点を再確認することから研究をスタートさせた。

北海道増毛町沿岸にて採集したホソメコンブ (*Laminaria religiosa*) から遊走子を単離培養して得られた雌・雄配偶体をそれぞれ用い、人工合成培地である ASP12NТА 培地を基本培地として鉄イオンの添加実験を実施した。その結果、鉄を加えない ASP12NТА 培地では雌・雄配偶体は単列糸状の栄養成長をするのに対して、鉄を 0.5 mg/L, 1 mg/L, 2 mg/L と加えていくにしたがい、雌性配偶体は造卵器を、雄性配偶体は造精器を形成し、それぞれ卵と精子を放出し、受精卵は孢子体へと発生した (図2)。このことからコンブ配偶体の成熟には鉄が必須であることを確認できた。その後の研究において、ビバリー®ユニットから抽出した腐植酸鉄溶液について同様の培養実験を行い、ホソメコンブ雌・雄配偶体の成熟や孢子体の生長に効果があることを確認した³⁾。

また、鉄は、海藻の生長ばかりでなく、質的な面でも海藻にとって効果があることを確認している。例えば、ノリの品質劣化として問題視されている色落ち現象に対して、従来から言われているような窒素やりん欠乏ばかりでなく、窒素やりんが十分量存在する条件下であっても鉄欠乏によって色落ちが生じることを明らかにしている⁴⁾。

海藻類の生長に及ぼす鉄の効果を実海域で検証すること

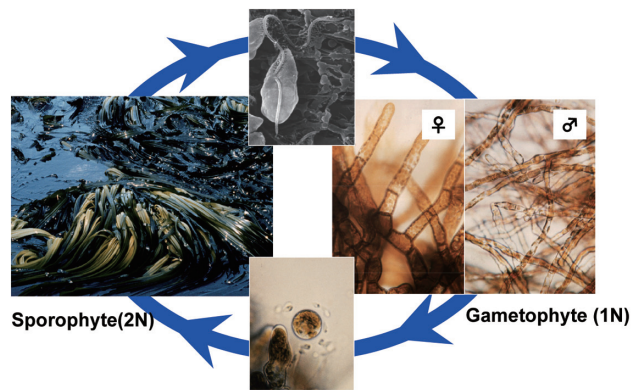


図1 コンブ目植物の生活環
Lifecycle of *Laminaria religiosa*

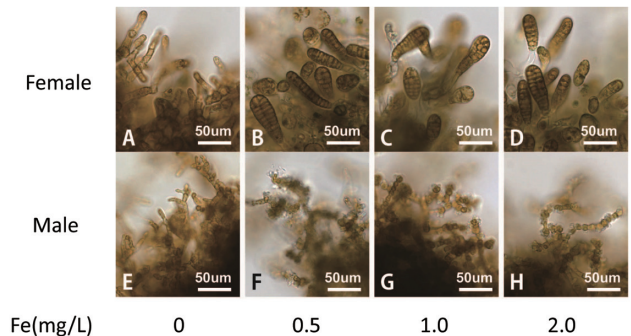


図2 ホソメコンブ雌雄配偶体の成熟に及ぼす鉄 (as Fe-EDTA) の影響

Effect of ferrous ion on oogonium formation of *Laminaria religiosa* female and male gametophytes
Female (A-D) or male (E-H) gametophytes were incubated in Fe-free ASP12NТА medium supplemented with 0 mg/L (A,E), 0.5 mg/L (B,F), 1 mg/L (C,G), or 2 mg/L (D,H) as Fe for three weeks at 10°C.

は困難であるため、筆者らは鉄濃度が比較的強く安定している富山湾海洋深層水 (富山県入善町) を使った水槽実験を実施した⁵⁾。屋内水槽 (容積 100L) に深層水を引き、ビバリー®ユニットを投入の有無を比較するためのバッチ培養を行ったところ、施肥によって鉄その他栄養塩類の溶出を確認するとともにマコンブの孢子体の発芽密度が高いうえに葉体の色が濃くなる観察結果を得た。

また、新日鐵住金 RE センターに設置した大型水槽実験設備 (シーラボ) に東京湾海水を引き入れ、スサビノリの栽培実験を行った⁶⁾。2槽ある FRP 製実験水槽 (内寸: 幅 1 m × 奥行 5 m × 深さ 1.6 m) の一方にビバリー®ユニットを投入した実験区とし、対応を対照区として、海水の水質変化、ノリの生育状態について観察を行った。その結果、実験区では 10 日目までに窒素、りん、けい素、鉄の溶出が確認でき、対照区ではこれら栄養成分は緩やかに減少した。実験開始から 16 日目には両区ともに葉長 100 μm 未満のノリ葉体が確認できたが、48 日目頃からは実験区のノリ葉体は目視できる程度 (葉長 1 ~ 2.5 cm) にまで生長したが、対照区では葉体の生長が観察できなかった。このことから

表1 ビバリー® ユニットからの鉄分溶出速度測定例
Results of Fe elution rate from slag fertilizer

Elution condition	Elution test type	Elution rate [mg-Fe/kg-unit/d]	Relative value
Static	Small water tank	0.14	1
Static	Big water tank	0.20	1.4
Flow-through	Colum elution	0.70	5.0
Strong stirring	Bottle shaking	7.0	50

ビバリー® ユニットからの栄養塩類の供給はノリの生育促進に効果があることが確認できた。これらの栽培実験では、鉄単独の効果を確認したわけではないのでこの点を水槽実験で明らかにすることが課題である。

2.2 ビバリー® ユニットからの鉄分溶出の考察

ビバリー® ユニットからの鉄分溶出量については前記の水槽実験においても定量的に評価できるが、波あたり等の物理的な条件の差異でも溶出量は異なることが容易に予想されるため、いくつかの条件下での溶出量を定量比較した。

結果を表1⁷⁾に示す。まず、炭酸化した転炉系製鋼スラグと人工腐植度を単独もしくは混合した資材について人工海水 (Lyman & Fleming 組成) を用いた24時間振盪抽出し、遠心残渣を再び人工海水で抽出するシリアルバッチ溶出実験を行った⁸⁾。その結果、スラグ単独では初期の鉄溶出が少なく、また、腐植土からは鉄が溶出するものの、スラグと混合することによって鉄の溶出が高まることを確認した。また、同時にこのような強制的に攪拌する条件下での鉄分溶出速度は7.0mg/kg/dであった。

次いで、同様の混合物を円筒形のカラムに充填し、上部から人工海水を通水する実験では、鉄分溶出速度が0.7mg/kg/dであった。さらに、前記したシーラボ水槽を用いた実験では0.20mg/kg/dを、別途実施した水槽底面に敷設した実験では0.14mg/kg/dとの結果を得ている。以上のように、ビバリー® ユニットからの鉄分溶出は、ユニットが置かれている物理的な環境によって溶出速度が50倍程度変化することが分かった。

山本ら⁹⁾は、スラグと腐植物質の混合物に関する流水条件下での溶出実験を実施し、鉄の溶出速度として表1におけるカラム実験と同程度の値(0.76mg/kg/d)を報告している。

筆者らは、沿岸海域の海水中の微量鉄分析手法を確立¹⁰⁾し、後述する北海道増毛町における藻場造成実験海域の鉄分析を実施し、ユニット埋設箇所から沖合に向かって鉄が拡散している状況が観測され、埋設地点に近い汀線より3mの位置で18μg/Lであり、沖合に向かって緩やかに減少し、沖合50mで2.6μg/Lであり、平均で4.8μg/Lであった¹¹⁾。当該海域は沖合50mで深さ1.5m程度の遠浅の海岸であり、前述の溶出速度(0.7mg/kg/d)にて24時間溶出した場合、埋設した6tの施肥材から4.2gの鉄が溶出したと見積もられ、埋設幅26mで沖合50mまでの海水体積(975m³)

に拡散した場合、平均で4.3μg/Lと概算され¹²⁾、観測値の平均値とよく一致したことから、ビバリー® ユニットからの鉄分溶出速度についてはほぼ定量できたものと考えている。

2.3 安全性の評価

藻場造成用の資材である商品群ビバリー® シリーズ (ユニット、ロック・ブロック) についての、全国漁業協同組合連合会が制定した鉄鋼スラグ製品安全確認認証制度で安全性に関する認証の過程で、マダイ、クロアワビ、クルマエビなどの魚介類に対する急性毒性がないことを確認するとともに、“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)”における水底土砂に係る判定基準に準拠して有害物質の溶出がないことを確認する品質管理を実践している。また、実際の施工現場において海水や海産物を採取し、重金属類の溶出や生物への異常な濃縮がないことを継続的に観測している。

さらに、気象や海象などの変動要因がある実海域での検証を補完するため、海域環境シミュレーション設備“シーラボI”を2009年に開設し、有用性や安全性についての客観データの取得に努めている¹³⁾。また、2011年には“シーラボII”を増設し、海域環境に対する長期的な影響評価を試みている¹³⁾。

3. 藻場造成への適用事例

3.1 ビバリー® ユニットの適用事例

ビバリー® ユニットを用いた藻場造成の最初の試みとして2004年に開始した北海道増毛町の舎熊海岸での実証実験^{12, 14-16)}は、今年で10年目を迎え、これまで水質や海藻生育状況などについて継続的な定期調査を実施してきた。当該海域の主たる海藻であるホソメコンブの繁茂量は、図3に示すように年次により変動はあるものの、対照区に比べて実験区で高い傾向が継続している。また、測定法が整った2007年以降に分析できるようになった海水中の溶存Fe濃度¹⁷⁾は、図4に示したように設置後5年目までは実験区で高い傾向にあることを確認している。溶存Fe濃度の差が顕著でない6年目以降も海藻が継続して繁茂している事

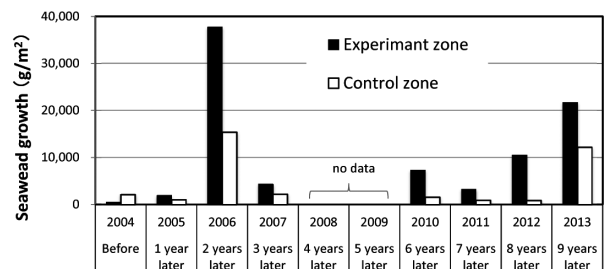


図3 海藻平均繁茂量の経年変化
Time course change of seaweeds fresh weight in June during years 2004-2013

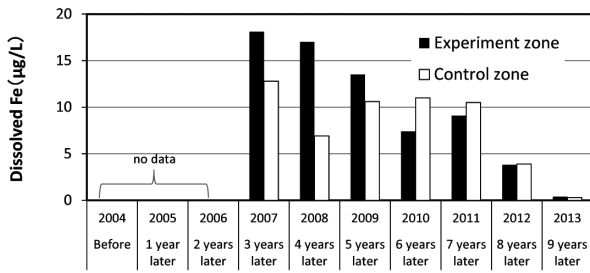


図4 海水中溶存 Fe 濃度の経年変化

Time course change of dissolved Fe concentration in seawater in June during years 2007-2013

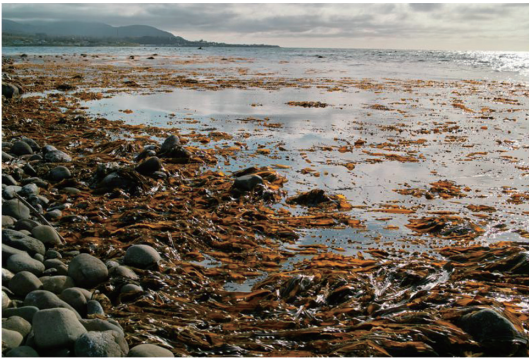


写真1 増毛町実験海域の状況 (2013年6月撮影)

Photograph of experimental field in Mashike town on June in 2013

実より (写真1), それまでに形成された植生が核藻場として機能している可能性がうかがえた。

3.2 人工ミネラルの適用事例

海域生態系の回復を目的に、製鋼スラグと人工腐植を配合した人工ミネラル M 型がカジメの成長にどのように効果があるか実証実験を行った¹⁸⁾。

図5に人工ミネラル M 型の構造を示す。スラグから溶出するミネラルを保持するために製鋼スラグと人工腐植を配合し、不透水素材にに入れて両端を孔の開いたラバーで封印し流入する海水量を調整した。海域での設置は模擬磯場ブロックに保護ケースを取り付けその中に人工ミネラル M 型を設置した。

本実証実験は環境省環境技術実証事業の 2012 年度閉鎖性海域における水環境改善技術分野で行った。設置場所は三重県度会郡南伊勢町神崎浦の水深約 10m の砂地に沈設した。人工ミネラル M 型の設置数は実験区 1 に 6 本、実験区 2 に 3 本、対象区には 0 本をブロックに設置し、それぞれの区画に 4 ブロック沈設し、カジメの着生株数と藻長を調査した (図6, 表2)。

沈設 6 か月後の結果を図7に示す。各区画でカジメ幼体の着生を確認したが、ブロックに設置した人工ミネラル M 型の設置本数に応じてカジメ幼体の着生数および藻長が大きくなることを確認した。図8には沈設 10 か月後の生育状

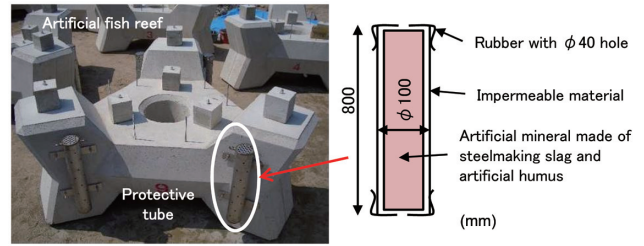


図5 人工漁礁ブロックと人工ミネラルユニット
Artificial fish reef and artificial mineral unit

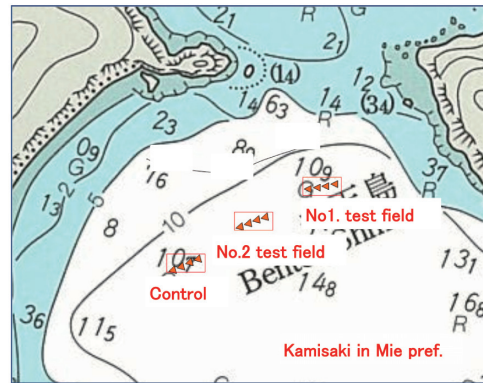


図6 試験フィールド
Map of test fields

表2 試験区における基材の設置数
Number of installed block and units

	Control	Test field	
		No. 2	No. 1
Artificial fish reef (block)	4	4	4
Artificial mineral (unit/block)	0	3	6

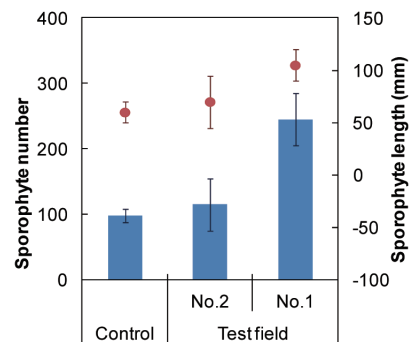


図7 沈設 6 か月後のカジメ幼体の着生数と藻長の比較
Comparison of sporophyte number and length

況を示すが、実験区 2 よりも実験区 1 のほうが生長の良いことを確認した。

3.3 ビバリー® ロックの適用事例

海藻が着生する基盤がない砂地においては、鉄鋼スラグ水和固化体 (ビバリー® ロック)¹⁹⁾ 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9に模式し

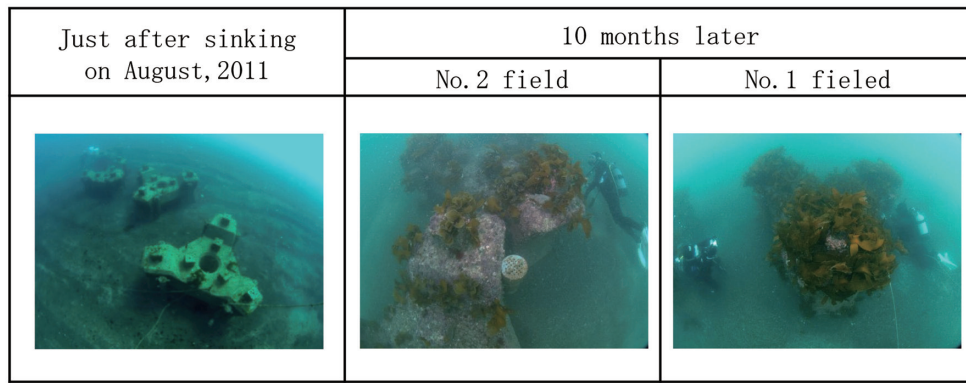


図8 沈設 10 か月後の状況
10 months later after sinking artificial fish leaf with artificial mineral

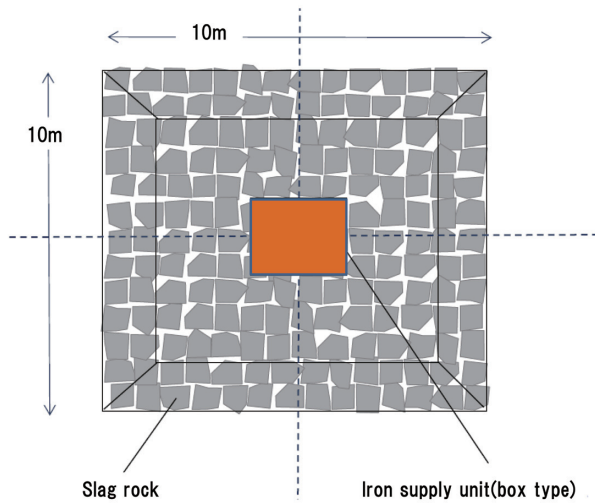


図9 吉崎市での藻礁施工模式図
Diagram of the breeding ground for seaweed

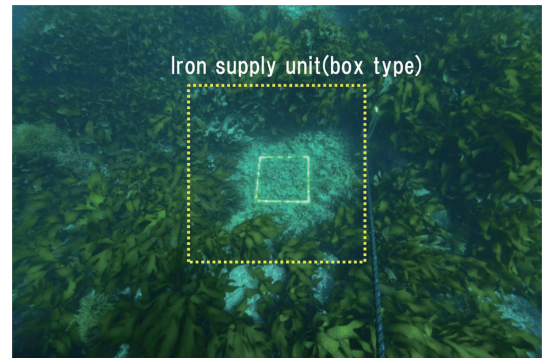


写真2 吉崎市実験海域の状況 (2013年7月撮影)
Photograph of experimental field in Iki lland on July in 2013

たような藻礁を2010年に設置した。藻礁の中心には鉄分供給のビバリー®ユニット(鋼性ボックス仕様)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2に示すようにアラメ・カジメ類の繁茂を確認した。また、ユニットの直上でのみ二価鉄が検出され²⁰⁾、生物利用性が高いとされる二価鉄がビバリー®ユニット近傍で観測されたことは、非常に意義深く、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。

4. 結 言

磯焼け等により衰退または消失した沿岸域の藻場を再生するには、その原因を究明して必要な対策を講じていくことが肝要と考えている。鉄鋼スラグを用いた鉄分供給の技術はひとつの対策にすぎないが、鉄分供給の効能を検証するとともに、鉄分供給を必要とする海域やその適用条件の見極めが必要と考えている。

沿岸域の藻場の再生は、沿岸漁業の活性化に通じるばかりでなく、二酸化炭素の吸収源として海洋をとらえるブルーカーボンの視点からも藻場の重要性について着目して

おり²⁰⁾、海洋立国としての我が国の海域環境の改善に資する技術を提供する取り組みをしていきたい。

参考文献

- 1) 藤本健一郎 ほか：新日鉄技報. (391), 206 (2011)
- 2) Motomura, T. et al.: Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries. 47 (7), 1535 (1981)
- 3) 植木知佳 ほか：平成23年度日本水産工学会学術講演会講演要旨集. 東京, 2011
- 4) 植木知佳 ほか：日本水産学会誌. 76 (3), 375 (2010)
- 5) 植木知佳 ほか：海洋深層水研究. 13 (1), 7 (2012)
- 6) 植木知佳 ほか：海洋理工学会誌. 17 (1), 49 (2011)
- 7) 加藤敏朗：平成23年度磯焼け対策全国協議会, 東京, 2011
- 8) 加藤敏朗 ほか：平成21年度日本水産工学会学術講演会講演要旨集. 神奈川, 2009
- 9) 山本光夫 ほか：鉄と鋼. 97 (3), 159 (2011)
- 10) 相本道宏：海洋科学研究. 22 (1), 19 (2009)
- 11) 加藤敏朗 ほか：第20回海洋工学シンポジウム, 東京, 2008
- 12) 加藤敏朗 ほか：環境技術. 42 (7), 404 (2013)
- 13) 加藤敏朗：水産学会誌. 79 (4), 747 (2013)
- 14) 木曾英滋 ほか：第20回海洋工学シンポジウム, 東京, 2008
- 15) Yamamoto, M. et al.: Journal of Chemical Engineering of Japan. 43 (7), 627 (2010)

- 16) 堤直人：環境浄化技術. 12 (6), 63 (2013)
- 17) 相本道宏：海洋科学研究. 22 (1), 19 (2009)
- 18) 鳥井孝一 ほか：材料とプロセス. 25 (2), 1011 (2012)
- 19) 中川雅夫 ほか：海洋理工学会誌. 17 (1), 21 (2011)
- 20) 松元愛 ほか：日本分析化学会第 62 年会, 大阪, 2013
- 21) (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



加藤敏朗 Toshiaki KATO
先端技術研究所 環境基盤研究部
上席主幹研究員 博士(学術)
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



木曾英滋 Eiji KISO
スラグ・セメント事業推進部 主幹



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)



鳥井孝一 Koichi TORII
和歌山製鉄所 環境・エネルギー部
リサイクル技術室長