

特集記事・8

SDGsの目標実現に貢献する鉄鋼業

鉄鋼スラグを活用した海の森再生技術の開発の歩みとSDGs 開発目標への貢献

History of Application for Restoring Seaweed Bed Using Steelmaking Slag, and Contribution for SDGs

小杉知佳
Chika Kosugi日本製鉄(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

1 はじめに

鉄鋼スラグは、国内で年間4,000万トン弱が生産されている、鉄鋼製品の製造時に発生する副産物である。これまでは、セメント用材料や道路用路盤材、土木工事用資材として広く建設工事に利用されてきた¹⁾。しかし、昨今の国内の公共事業や建設需要の低迷、他副産物との競合や廃コンクリートなどのリサイクル材の利用促進といった社会情勢の変化から、市場の需給状況の予測が困難になっており、販路の拡大に向けた新規用途開発が求められてきた。

日本製鉄では、このような背景を受け、鉄鋼スラグ、特に転炉系製鋼スラグの特性を生かした「環境用資材」としての

沿岸域における利用技術の開発に取り組んできた。具体的には、海向けの鉄分供給材である「ビバリー®ユニット」、港湾や航路の浚渫で発生する浚渫土砂の改質技術「カルシア改質」、そして製鋼スラグを骨材に用いた人工石材「ビバリー®ロック」、「ビバリー®ブロック」である(図1)。いずれもSDGsの中で掲げられる開発目標を達成する技術であるが、本報では、3つのSDGs(12持続可能な生産と消費、13気候変動、14海洋資源)に合致し、開発の端緒から幅広い関係者の尽力により実海域における実証データおよび基礎科学的なデータの蓄積、水産関係者、漁業者からの理解、安全性の担保など、いくつもの障壁を超えてきたビバリー®ユニット(以下、鉄分供給ユニット)による海の森再生技術に焦点を当て、



図1 鉄鋼スラグの海域利用技術

将来の持続可能な社会を築いていく上での鉄鋼スラグの海域利用技術の具体的な貢献策を紹介したい。

以下では、鉄分供給ユニットの開発背景から受益者との連携体制の構築に根差した技術の発展について述べる。そのあとで、3つの開発目標に関する接点について記し、最後にSDGsの3つの開発目標に即して本技術の今後の展望を示す。

2 鉄分供給ユニットによる海の森再生技術

2.1 鉄分供給ユニットの開発背景

沿岸域に広がる海藻の群落、海藻藻場は、多くの生物が息場として利用する重要な一次生産の場である。そのため、藻場の衰退（磯焼け）は、漁獲高の減少に直結する問題である。磯焼け対策は、単なる生態系の回復にとどまらず、漁業の継続、発展に関わる重要な課題である。

戦後の高度成長期に合わせるように日本各地で藻場の急速な衰退が確認されている。実際、1988～1992年に調査された20万haの藻場のうち、10年後には約20%が失われたことが水産庁「藻場資源調査等推進事業（平成18～20年度）」の中で示されている²⁾。

磯焼けの原因としては、高水温やウニやアワビ、アイゴといった植食動物による食圧の増加など複数考えられているが、候補の一つとして河川からの鉄分の供給量の減少も挙げられている^{3,4)}。従来、海水中の鉄分は土壌中の鉄と配位子（腐植酸など）とが錯体を形成し、河川を通じて沿岸に供給されてきたが、護岸工事やダム建設などにより、その供給量が減少したと考えられている（図2）。実際、コンブ類は、配偶体の成熟（卵や精子の形成）に鉄が不可欠であることが実験的に示されており⁵⁾、そのほかノリ⁶⁾や珪藻⁷⁾でも鉄の重要性が実証されている。



図2 陸域およびビバリー®ユニットによる鉄分供給

我々は、鉄分を磯焼け海域に効果的に供給すべく、鉄分を約20%含有する製鋼スラグを鉄源とし、腐植酸を含む人工腐植物質を混合した鉄分供給ユニットを開発した。

2.2 地元との連携体制の構築に根差した効果の実証

海水中に人為的に鉄分を供給すること、加えて鉄源に製鋼スラグを用いることは、前例のないことであったため、技術の確立にはいくつかの工夫と着実な成果の積み上げ、そして地道な認知活動が必要であった。

2004年に北海道増毛町において初めて鉄分供給ユニットの開発と効果検証を目的とした実海域実験に着手した。実施に当たっては、当社単独ではなく「海の緑化研究会」を産学で組織した（東京大学、西松建設、当社など）。海の緑化研究会メンバーの様々な専門家（土木工学、生物学など）と施工方法や効果の定量的評価手法について討議しながら、また実験サイトを提供いただいた増毛町漁業協同組合（以下、増毛漁組）の理解を得ながら、計画から実施、検証を進めてきた。

最初の実験サイトである舎熊海岸（第1期、2004年10月～）は、底質が玉石で沖合約100mが水深3～4mの遠浅で、藻場造成に適した地形であった。鉄分供給ユニットを汀線部25mにわたって6tを埋設し、潮汐変動によって、鉄分供給ユニットの間隙水（栄養成分）を海水中に溶出させる施工方法を選択した。海の緑化研究会が施工前に潜水調査を行った結果では、舎熊海岸はホソメコンブ（*Saccharina japonica var. religiosa*）が点在するのみで、それ以外は一面、底質の玉石はサンゴ藻の死骸に覆われるという典型的な磯焼け海域であった（2004年10月、図3）。

施工前は0.3haであった舎熊海岸のホソメコンブを主とする藻場は、施工から半年後の2005年6月には約0.6haに拡大し（図4）、2年後には約1haまで拡大した。その後、2014年までほぼ毎年調査をした結果、ばらつきはあるものの概ね対照区よりも実験区で海藻の繁茂量が多く、鉄分供給ユニット



図3 増毛町舎熊海岸（施工前、2004年10月）

の効果が維持されていると判断できた(図5)。一方、海水中の鉄濃度は、5年目までは上昇傾向であったが、その後、周辺海域(対照区)と比較して、顕著な差が見られなかったことから、鉄分供給ユニットによって藻場が形成され、そこでホソメコンブが再生産したことで、生態系全体が藻場の拡大に好転し、鉄分供給ユニットに頼ることなく、藻場が維持、拡大した可能性が高いと考える⁸⁾。

舎熊海岸での実証実験(第1期)では、増毛漁組と現場海域の特徴やその年の周辺海域の様子など、密に連携を取りながら情報を収集し、効果の検証を続けてきた。その結果、増毛漁組や地元関係者との強固な連携体制を構築することができ、次のステップとして、大規模実証事業の実施へと発展した(第2期、2014年10月～)。第2期では、藻場造成による経済効果、水産振興の定量評価を行うことを目的とした。対象海域である別荘海岸は、従来そこを漁場とする漁師がおらず、藻場の造成による漁獲高の変化を正確に捉えられる点が最大の選定理由であった。鉄分供給ユニットは第1期の約6倍である45tを汀線部275mに6区画に分けて埋設した。経済効果を見積もる上で、対象水産物をキタムラサキウニ(*Strongylocentrotus nudus*)に設定した。キタムラサキウニは、ホソメコンブをエサとして好み、かつ地元漁港に水揚げ



図4 増毛町舎熊海岸(施工1年後、2005年6月)

される有用水産物である。

鉄濃度は、施工直後から増大し、3年間で71倍に増えた(0.4 $\mu\text{g/L}$ から25.6 $\mu\text{g/L}$)。藻場面積は、ドローン空撮とその画像データから精密に算出した結果、2年目から急激に拡大し、3年目(2017年)には6.4倍(約3,500 m^2)にまで達し、その年の最盛期には、沖合50mまでホソメコンブの繁茂が確認された(図6)。キタムラサキウニについては、当初の予想通り、藻場の拡大とともに周辺海域からキタムラサキウニが増集し、別荘海岸での漁獲高は1.8倍に増えた(図7)。

上記の増毛町での実証実験の成果として、藻場の拡大だけでなく、ほか海域への適用事例の増大がある。増毛町と同じく藻場の衰退に困っている他県の漁業関係者が、増毛町に多く視察に訪れ、鉄分供給ユニットの効果を目の当たりにし、その結果、徐々に実験事例が増えていき、現在までに38か所以上の施工事例を積み上げてきた。

2.3 安全性の担保と技術の公知化

技術や材料については、鉄分供給ユニットの実証実験サイトで収穫された海藻やウニに対して、重金属など含有成分を調査することで、安全性の担保に努めた。さらには有用水産生物(クロアワビ、クルマエビ、マダイ、スサビノリ)に対して急性毒性試験を実施し、第三者機関の審査を経て、全国漁業協同組合連合会から安全製品認証を取得した(2011年)。技術の公知化に向けては、水産庁が漁業関係者向けに磯焼け対策の具体的手法をまとめた「磯焼け対策ガイドライン」を改定する際に、水産庁との共同試験に取り組んだ。その結果、

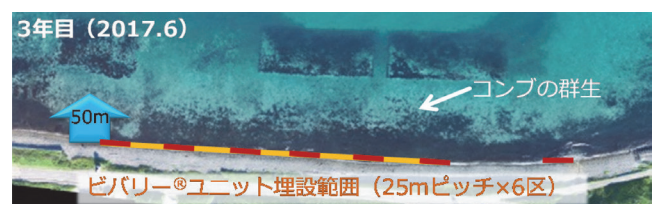


図6 増毛町別荘海岸での海藻藻場の航空写真(赤線：埋設区)

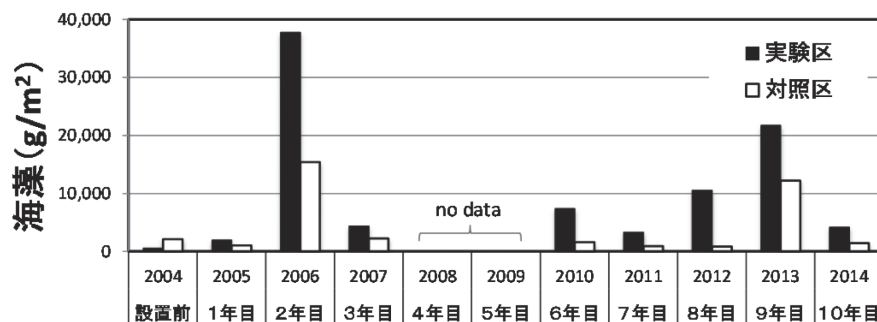


図5 北海道増毛町舎熊海岸における海藻繁茂量の変遷

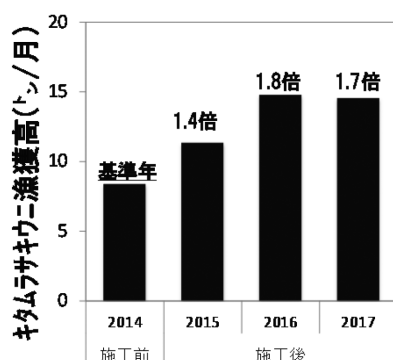


図7 増毛町別荘海岸でのウニの漁獲高の推移

施肥材の適用事例として本文に掲載され、鉄分供給ユニットによる施肥技術が広く認知された⁹⁾。

以上のように、鉄分供給ユニットによる海の森再生技術は、開発の過程で技術や材料の安全性を都度確認しながら、地元との連携体制を構築することで、全国に拡大し、着実に成果を積み上げられてきた。このような、科学的根拠に基づいた開発と受益者との信頼関係による技術の確立も持続可能な社会を築く上での重要な戦略であり、SDGsの理念に合致するものと考えられる。

③ 鉄分供給ユニットによる海の森再生技術のSDGsへの貢献

3.1 12持続可能な生産と消費

鉄分供給ユニットは、リサイクル資材である製鋼スラグと腐植物質を混合した、海向けの鉄分供給材である。製鋼スラグは、鉄鋼1t製造に際し約110kg発生する製鉄プロセスの副産物であり、当社では年間約500万tが生産される。腐植物質は、廃木材チップを人工的に腐葉土化したものであり、いずれもリサイクル資材で、安価に安定的に調達できる。

製鋼スラグには他金属結晶に混在しない遊離CaOが含まれるため、海水に投入するとpHが上昇し、海水中の Mg^{2+} が $Mg(OH)_2$ となり、海水が白濁してしまう。そのため、製鋼スラグをそのまま鉄分供給材として利用することができなかった。そこで、製鋼スラグ中の遊離CaOを炭酸ガスで処理して、炭酸カルシウム($CaCO_3$)として安定化する手法を開発した。

製鋼スラグの炭酸化処理技術は、従来製鋼スラグ同士を固結させ、ブロックに成形することを目的に開発された手法であるが¹⁰⁾、日本製鉄では、炭酸化反応を起こす際に介在する水分と炭酸ガスの流量を最適化することで、製鋼スラグ同士を固結させることなく内部の遊離CaOを炭酸化させる手法を確立した¹¹⁾。また、この処理法であれば、製鋼スラグの多孔質の構造を維持できるため、海水が内部まで浸透し、製鋼

スラグ中の鉄を効率的に利用できるようになった。

3.2 13気候変動

鉄分供給ユニットによる海の森再生技術は、地球温暖化対策の大きな柱である「緩和 (mitigation)」と「適応 (adaptation)」の両方に効果を及ぼす。

緩和策として、鉄分供給ユニットによって造成される海藻藻場は、沿岸生態系で吸収・固定化される炭素、すなわちブルーカーボンを生み出す場 (ブルーカーボン生態系) として期待できる。ブルーカーボンとは、2009年に国連の環境計画部門 (United Nations Environment Programme、UNEP)、食糧農業機関 (Food and Agriculture Organization of the United Nations、FAO) および教育科学文化機関 (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization、UNESCO) が共同で発表した報告書「Blue Carbon」(以下、UNEPレポート) において初めて定義され¹²⁾、その全球的な CO_2 固定量のインパクトの大きさが注目されている^{13,14)}。ブルーカーボンは、マングローブ林やアマモ (海草) 場で主に貯留され、そのメカニズムは海底の底質中 (たとえば、マングローブ林やアマモ場の根本付近や底質中) にデトリタス (生物遺体や生物由来の物質の小片などの微細な有機物) が堆積・埋没して、物理化学的に分解・無機化されにくい環境に長期間隔離されるというものである。そのため、岩礁域で底質中への有機物の貯留・隔離がほとんどない海藻藻場は、現状、ブルーカーボン生態系として認知されていない (UNEPレポートの試算に含まれていない)。しかし、Krause-Jensen and Duarte (2016) は、1,000 m以深の深海の水中や底質中、そして深海生物の胃内容物から海藻片が多く見つかることを報告し、それらがブルーカーボンとして与える影響が大きいことを示唆している¹⁵⁾。このほかにも海藻藻場における大気からの CO_2 吸収を実証する事例が報告されつつあり¹⁶⁾、今後の研究の進捗によって海藻藻場がブルーカーボン生態系として認知、評価されることを期待するところである。

上記の背景から、鉄分供給ユニットによって造成される藻場の維持と拡大、そして他海域への展開は、 CO_2 固定量の増大と捉えることができる。開発から現在までの約15年間で全国38箇所の施工実績があり、1袋25kgを6,500袋余り施工してきた。そのうち事後モニタリングを実施した30箇所では約3.2haの藻場の再生を確認している。今後も施工事例を積み上げ、炭素固定量を定量評価することで、ブルーカーボンに貢献していく。

適応策として、海藻藻場は、近年の気候変動に伴う自然災害の巨大化に対しても効果を発揮する。鉄分供給ユニットを海岸線や沖合に施工し、藻場を造成することで、波浪を減衰でき、防波堤の機能を補助し、グレーインフラ (コンクリー

ト構造物)の長寿命化が期待できる。これは、近年自然災害への有効な対応策の一つとして注目されている「生態系を活用した防災・減災 (Eco-DRR, Ecosystem-based Disaster Risk Reduction)」¹⁷⁾に合致している。

鉄分供給ユニットだけでなく、冒頭に紹介したスラグ人工石材によっても同様の効果が期待でき、鉄鋼スラグによる海域環境改善技術は、レジリエント(強靱)なインフラの整備にも展開できる。この効果は、SDGsの「9インフラ、産業化、イノベーション」にも合致する。

今後はSDGsに基づいた気候変動への具体的対抗策として、鉄鋼スラグの海域利用技術が一層広く普及できるよう、引き続き研究開発を推進していく。

3.3 14海洋資源

鉄分供給ユニットで再生した藻場には、ウニをはじめとした海洋生物が餌場や生息場を求めて蟄集してくる。以下では、その効果を定量評価した実例として北海道函館市沖で実施した実証実験について紹介する。

2010年に函館市の沖合300mの地点に鉄鋼スラグで作った人工石材を使ってマウンドを2箇所造成し、一方のマウンドの中央に鉄分供給ユニットを設置して実験区とし、もう一方は鉄分供給ユニットを置かない対照区とした(ウニあり実験区、ウニあり対照区)。また、ウニの摂餌圧の有無による海藻の繁茂の程度を比較するため、ウニが加入し難い砂地にスラグ人工石材で基質を設けて「ウニなし実験区(鉄分供給ユニットあり)」と「ウニなし対照区」を設定した(図8)。

施工から1年後には、ウニなしの実験区および対照区では、いずれもマコンブ(*S. japonica*)が主に繁茂した。一方、ウニあり実験区では、ウニなし実験区ほどではないものの、マコ

ンブが確認された。ウニあり対照区については、ほとんど海藻が見られなかった(図9)。

各エリアで方形枠を用いて海藻を刈り取り、湿重量を測ることで、単位面積当たりの海藻繁茂量を求めた。その結果、ウニなし区では、マコンブの湿重量、個体数ともに実験区で高く、鉄分供給ユニットの効果が示された。一方、ウニあり区では、対照区に比べて実験区で顕著に個体数が多かった。しかし、湿重量の差は個体数ほどではなく、ウニあり実験区の湿重量は、ウニなし実験区の1/10以下であった(図10)。これは、ウニあり実験区ではコンブが発芽し、成長したものの、ウニに捕食され縮小化したためと推測された。

さらに、ウニあり区に出現したウニは、1m²当たりの生息密度が実験区で高く、また、重量あたりの生殖腺量(実入り)

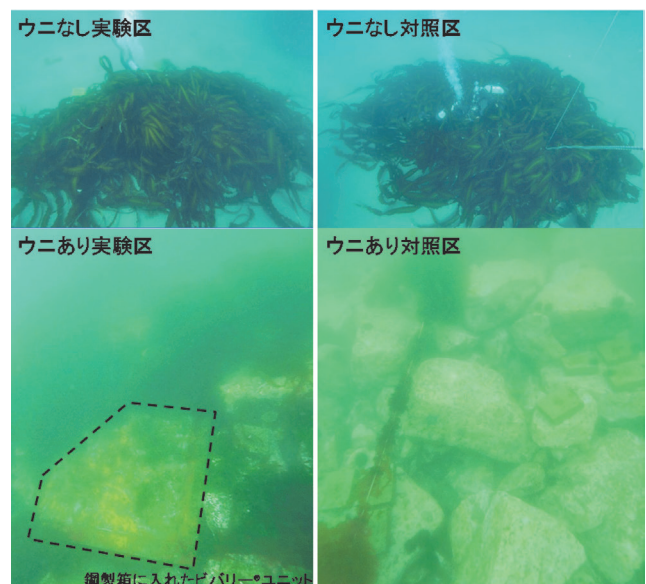


図9 各エリアのコンブの繁茂状況



図8 北海道函館市での実証実験概要(航空写真は、Google マップの転載)

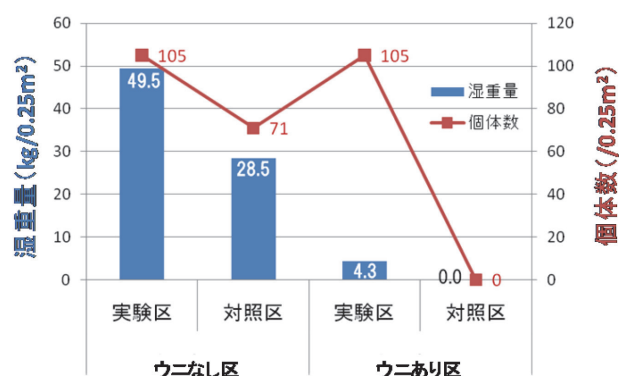


図10 各エリアのコンブの繁茂量

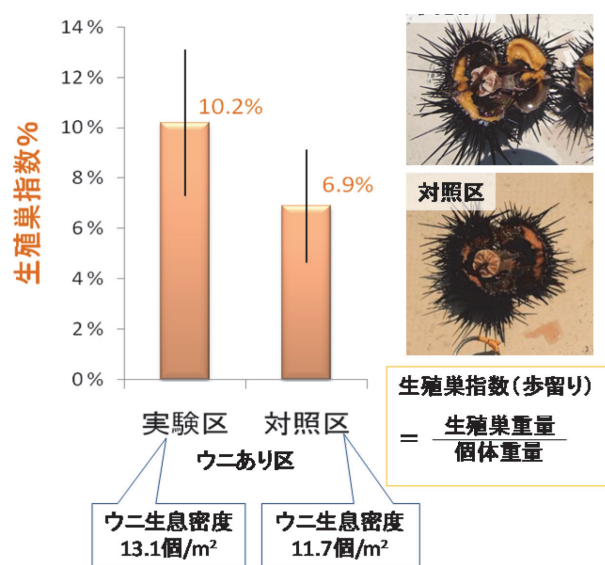


図11 ウニあり区に蟠集したウニの実入り調査

も多くなっていた(図11)。

以上の結果から、鉄分供給ユニットを設置して藻場を造成することで、ウニの生息環境が創出され、かつウニの実入りが高まることが示された。本事例では、藻場造成による海洋資源の回復を実験的に実証することができた。

4 おわりに

SDGsに即して、ビバリー®ユニットによる海の森再生技術の展望について以下に述べる。

12 (持続可能な生産と消費)：ビバリー®ユニットにとどまらず鉄鋼スラグを活用した環境改善効果技術や商品を開発していく。

13 (気候変動)：気候変動への効果を定量的に評価することで、藻場造成技術や活動の意義を明確化し、ブルーカーボンを推進する。

14 (海洋資源)：藻場造成による効果として、継続して水産振興を推進するとともに、レジャーや景観といった多面的評価を試み、藻場造成の意義を広く浸透させる。

参考文献

- 堀井和弘, 堤直人, 加藤敏朗, 北野吉幸, 菅原敬介：新日鉄住金技報, 399 (2014), 3.
- 水産庁：藻場資源調査等推進事業について(平成18年度～20年度), (2009)
- K.Kuma, S.Nakabayashi, Y.Suzuki, I.Kudo and K.Matsunaga：Mar. Chem., 37 (1992), 15.
- 松永勝彦：森が消えれば海も死ぬ(第2版) 陸と海を結ぶ生態学, 講談社, (2010)
- T.Motomura and Y.Sakai：Jpn. J. Phycol., 32 (1984), 209.
- 植木知佳, 村上明男, 加藤敏朗, 嵯峨直恆, 本村泰三：日本水産学会誌, 76 (2010) 3, 375.
- K.Kuma, Y.Tanaka and K.Matsunaga：Mar. Biol., 134 (1999), 761.
- M.Yamamoto, T.Kato, S.Kanayama, K.Nakase and N.Tsutsumi：J. Wat. Env. Tech., 15 (2017) 5, 186.
- 水産庁：改訂磯焼け対策ガイドライン, (2014)
- 高橋達人：コンクリート工学, 38 (2000) 2, 3.
- 堤直人, 務川進, 田崎智晶, 亀山鋭司, 天田克己, 工藤耕太, 今戸肇, 三木理：新日鉄住金技報, 399 (2014), 90.
- C.Nellemann, E.Corcoran, C.M.Duarte, L.Valdes, C.DeYoung, L.Fonseca and G.Grimsditch：Blue Carbon. A rapid response assessment., United Nation Environment Programme, GRIS-Arendal (<http://www.grida.no>), (2009)
- 堀正和, 桑江朝比呂：ブルーカーボン, 浅海におけるCO₂隔離・貯留とその活用, 地人書館, (2017)
- 桑江朝比呂, 吉田吾郎, 堀正和, 渡辺謙太, 棚谷灯子, 岡田知也, 梅澤有, 佐々木淳：土木学会論文集B2 (海岸工学), 75 (2019) 1, 10.
- D.Karause-Jensen and C.M.Duarte：Nature Geoscience, 9 (2016), 737.
- K.Watanabe, G.Yoshida, M.Hori, Y.Umezawa, H.Moki and T.Kuwae：Biogeosciences, 17 (2020), 2425.
- 環境省自然環境局：生態系を活用した防災・減災に関する考え方, (2016)

(2020年9月10日受付)