

技術解説

製鉄副生スラグによる海の森づくり (藻場造成技術開発)

Sea Forest Creation with Utilizing By-product Slag of Steelmaking Process
(Development of Regeneration Technology for Seaweed Bed)藤本 健一郎* 加藤 敏朗
Ken-ichiro FUJIMOTO Toshiaki KATO植木 知佳 堤 直人
Chika UEKI Naoto TSUTSUMI

1. はじめに

我が国は四方を海に囲まれた島国であり、その沿岸総延長は約35000kmにも及び世界でも6位にランクされている。かつては沿岸漁業で栄えていたこれら沿岸域では、現在、コンブやホンダワラなどの有用海藻類が生育できなくなる磯焼け¹⁾と呼ばれる現象が広い範囲で進行し、海藻類の生産量減少にとどまらず、漁獲高も減少してしまい、沿岸漁業に大きな打撃を与えている。この磯焼けの原因に関しては、海水温の上昇やそれに伴う海流の変化、ウニや魚介類による食害などの複合的な要因が考えられており、水産資源確保のために様々な対策が考案され、藻場造成に関する数々の実証試験が進められているところである^{2,4)}。

一方、海域の栄養成分の変化、具体的には藻類の生長にとって必須の微量元素である鉄⁵⁾の存在濃度の低下が磯焼けの発生や進行の別の要因として提案され^{6,7)}、鉄分供給による藻場造成のアプローチも試みられている^{8,9)}。海域に鉄分を供給する際、二価鉄は海水中の溶存酸素の影響で速やかに三価鉄に酸化され、不溶性の水酸化物沈殿となるため¹⁰⁾生物利用性が著しく下がると考えられ、溶存鉄として安定供給することが課題である。

新日本製鐵では、溶存鉄の安定供給の視点に立ち、元来、腐植土中に存在して河川などを介して海域に供給される“鉄イオンが錯体化された腐植酸(フルボ酸)鉄”に着目、腐植土と鉄源とを混合した施肥材を考案し、検討を進めてきた。鉄鋼製造時に発生する副産物の中で二価鉄(FeO)を高濃度で含む転炉系製鋼スラグを鉄供給源として活用し、廃木材チップを発酵させた人工腐植土と混合したビバリー®ユニットという商品名で販売している藻場造成用施肥材料を用いて磯焼け海域へ安定的な鉄分を供給し、コンブ林を造成する実海域実験を、当初北海道日本海側で実施し、藻場再生に大きな成果をあげている¹¹⁻¹²⁾。

中でも、北海道増毛町では、磯焼け対策として独自に発酵魚粕を用いた海域施肥実験を積極的に進めていた増毛漁

業協同組合の協力を得て、2004年10月より磯焼けが深刻な舎熊海岸の汀線部に26mに渡ってビバリー®ユニットを埋設する施肥を実施し、その効果を検証してきたが、2005年6月の調査では、既にコンブをはじめとした海藻類が繁茂し、施肥した実験区海域の単位面積あたりのコンブ生育量は無施肥区海域の100倍以上に及び、かつて海底の岩の表面が石灰藻に覆われ、他の海藻類がほとんどみられない磯焼け状態であった舎熊海岸では、現在もユニット設置部から沖合に向かってコンブなどの海藻類が豊かに生育している。

このように、増毛町舎熊海岸では施肥部を中心に広い範囲で藻場の再生、拡大を確認しているが¹³⁾、この成果を受け、現在では全国約20箇所の海域で各地域の協力を得た“海の森づくり”が展開されている状況であり、三重県志摩市ではアラメやカジメが繁茂し、和歌山県田辺市や大分県姫島ではホンダワラが茂るなど、全国各地で鉄分供給による施肥効果が実証されている。海藻類は魚介類の餌や生息、産卵場所となり、多様な生物を育む藻場の再生は水産資源の向上につながることになることから、その意義は藻類の収穫量増大に留まらず極めて大きいといえる。

筆者らはこれらの“海の森づくり”活動の展開に併せて、ビバリー®ユニットの施肥効果の科学的検証実験を行ってきている。当初、夾雑物が多い沿岸域の海水中の鉄濃度を正確に測定することが困難であり、施肥と実験海域における鉄濃度との関係は明確にできていなかったが¹²⁾、その後、新日本製鐵先端技術研究所解析科学研究部が開発した沿岸域の海水中の微量鉄濃度を正確に測定する技術¹⁴⁾を適用することで、施肥ユニットから溶出した鉄分が広い範囲に拡散している状況を把握するに至っている¹⁵⁾。また、藻類の生長、生活環に鉄が大きな役割を果たしていることが、実験室での培養実験からも明らかになってきた。そこで以下に、鉄が藻類に与える影響に関して種々検討を行い、実験室にて検証を試みてきた結果の一部を報告する。

* 先端技術研究所 環境基盤研究部長 工博 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

2. 藻類（コンブ目植物）に与える鉄の効果検証

2.1 ホソメコンブの配偶体成熟に及ぼす鉄の影響検証

図1はコンブ目植物の生活環を示しているが、我々にとって親しみ深い長さ数mに達する“昆布”は孢子体であることが解る。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となる。雌雄配偶体はそれぞれ適当な条件で成熟して、卵と精子が形成され受精し、受精卵はまた孢子体へと発生する。つまり、“ホソメコンブ”は1年のサイクルでこの生活環を完結しており、何より重要なことは生活環の各ステージへの移行が阻害された場合には新しい“昆布”は生まれにくいということである。本実験ではコンブの生活環に注目して、雌雄配偶体の成熟、すなわち卵と精子の形成に及ぼす鉄の影響を様々な鉄化合物を用いて調査を行った。

材料は、2009年11月に北海道増毛において採集されたホソメコンブ (*Laminaria religiosa*) から遊走子を単離培養して得られた雌雄配偶体で、北海道大学北方生物圏フィールド科学センター室蘭臨海実験所で無菌的に保存培養しているものを使用した。

鉄分を多く含有する転炉系製鋼スラグ(以下、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とを混合した藻場造成用肥料(ビバリー®ユニット)からフルボ酸粗抽出液を調整し¹⁶⁾、Fe-free ASP₁₂NTA (鉄以外の栄養分を豊富に含有する人工海水)にFe濃度として0.2 μg/L ~ 0.1 mg/Lとなるように添加した培地を用い、ホソメコンブ雌雄配偶体の成熟を調べた(図2)。

その結果、Feを10 μg/L以上含むFe-free ASP₁₂NTA培地でホソメコンブ雌雄配偶体は顕著に成熟し、卵は精子と受精した後に孢子体へと発生した。以上の検討結果から、スラグ系施肥材には、自然における腐植物質と同様にコンブ類雌雄配偶体の成熟を誘導できる成分を有していることが確認できた。本実験系では窒素、燐は大過剰に含有されていたことを考慮すると、コンブ類雌雄配偶体の成熟を誘導できる成分は腐植酸鉄のような海水可溶性鉄である可能性が高いと考える¹⁷⁻¹⁹⁾。

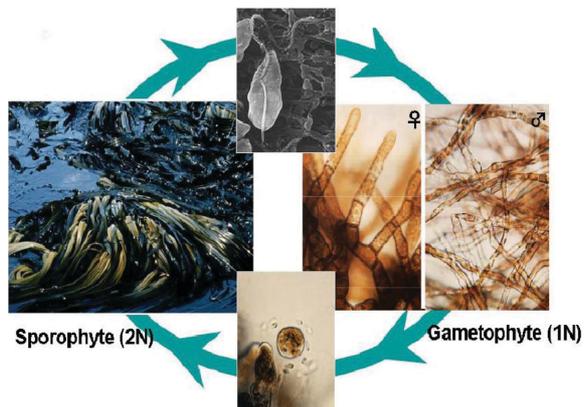


図1 コンブ目植物の生活環

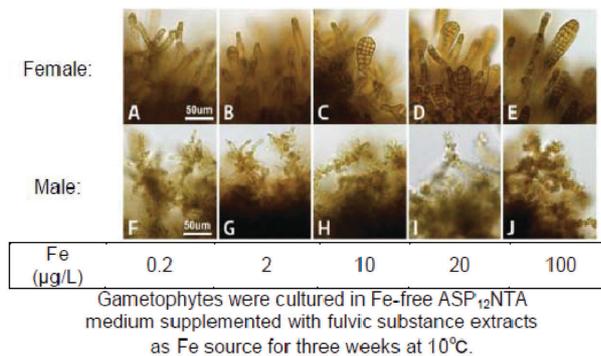


図2 ホソメコンブ雌雄配偶体の成熟に及ぼすフルボ酸粗抽出物の影響

2.2 ホソメコンブ孢子体に対する鉄の効果検証²⁰⁾

ホソメコンブ孢子体の幼体をFe-free ASP₁₂NTA培地もしくは腐植酸鉄抽出物を0.3 ~ 3 mg/L (Fe濃度で2.9 ~ 29 μg/L)添加したFe-free ASP₁₂NTA培地にて10°C、長日条件で3週間培養し、孢子体の生長を観察した。なお、腐植酸鉄抽出物(フルボ酸鉄)は炭酸化した製鋼スラグ50gと人工腐植土50gを純水1Lで24h振盪抽出し、遠心分離して回収した上清に塩酸を加えてpH1とし、さらに24h攪拌した後に遠心分離して得た上清(酸溶解性成分)を凍結乾燥したものを用いた。

培養実験に用いた腐植酸鉄抽出物は、Fe, N, Pをそれぞれ0.97, 1.03, 0.78 % (w/w)の濃度で含有していた。実験ではFe-free ASP₁₂NTA培地に腐植酸鉄抽出物を300mg/Lの濃度で溶解した溶液(Fe濃度実測値=2.9mg/L)をFe-free ASP₁₂NTA培地で100倍ないしは1000倍に希釈した。Fe-free ASP₁₂NTA培地はバックグラウンドとして2.4 μg/L (実測)のFeを含んでいたことから、供試培地中のFe濃度はそれぞれ31.4 μg/L, 5.3 μg/Lと計算される。

3週間培養後の孢子体は図3に示すように、Fe-free ASP₁₂NTA培地(C)ではほとんど生長しなかったのに対して、腐植酸鉄抽出物を添加した区(A, B)では著明に生長したことから、腐植酸鉄はFe濃度で数μg/Lのオーダーでホソメコンブ孢子体の生長を促す効果があることが

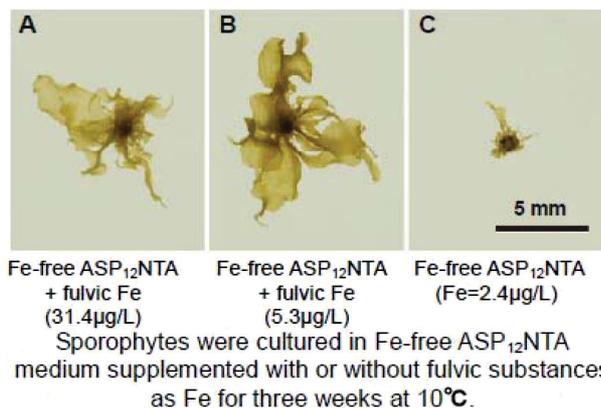


図3 培養後のホソメコンブ孢子体

示唆された。Motomura²¹⁾らはミツイシコンブの配偶体成熟にFeが必須であり、EDTA-Fe(II)を用いた場合、0.5mg/L以上の濃度で配偶体成熟が観察されたと報告している。図3の結果と評価系が異なるため厳密な比較はできないが、腐植酸鉄は人工キレート鉄(EDTA-Fe(II))に比べてより低濃度で生物活性があることが推定される。

3. 今後の展開

新日本製鐵では、鉄鋼スラグ利用の有用性と安全性を科学的に解明するため、2009年4月、千葉県富津市の技術開発本部に海域環境シミュレーション設備(通称:シーラボ)を開設した(写真1)。

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施肥効果を実証しており、また他のスラグ製品の有用性、安全性に関する各種検討も進めている²²⁾。

このような中、新日本製鐵の藻場造成製品“ピバリー®ユニット”、“ピバリー®ブロック・ピバリー®ロック”の2製品が全国漁業協同組合連合会が新たに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を受けた。この認証取得ではマダイ、クロアワビ、クルマエビについて急性毒性試験を実施し、施肥原因による斃死がなかったことを確認するとともに品質管理基準を明確化しており、高い安全性が担保されたと考えている。

更に、“海の森づくり”の展開は、地球温暖化抑制対策としても注目を集めている。2009年8月には、経済産業省北海道経済産業局の“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”の一つとして“農工循環資源を利用した亜寒帯沿岸域藻類によるCO₂吸収実証モデル事業”が採択された。これは海の森づくりによるCO₂吸収の実証を目的として、(財)室蘭テクノセンターが管理法人となり、新日本製鐵、新日鐵化学(株)、(株)エコニクス、(株)テツゲン、五洋建設(株)、北海道大学ならびに静岡大学が共同で実施するものであり、2010年8月に北海道寿都町、同10月に室蘭市の2箇所の海域で実証試験を開始している。

具体的には、①鉄鋼スラグ水和固化体を藻礁ブロックに使うことで従来のセメントブロックと比較して資材製造時

のCO₂排出を低減すると共に、②当該藻場礁で生育した海藻がCO₂を吸収し、③その海藻類を樹脂・オイル化して利用することでCO₂の長期固定化を図るという3つの柱からなるシステムの構築を狙うものである。CO₂削減効果は両海域で本事業期間中に年間44トン、将来、全道へ展開すると約500万トン(約3万ha造成時)に達すると試算している。

4. まとめ

今後も、製鋼スラグの水生生物に対する長期的な影響等、引き続きあらゆる観点から評価を継続していき、ピバリー®ユニットを始めとする鉄鋼スラグを原料とする各種製品の最適利用技術の明確化を進めていく所存である。

参考文献

- 1) Fujita, D.: Barren Ground, In Current State of Phycology in the 21st Century, Hori, T. et al. Eds., The Japanese Society of Phycology, Yamagata, 2002, p.102
- 2) Harrold, C. et al.: Ecology. 66 (4), 1160 (1985)
- 3) Kuwahara, H. et al.: Fisheries Engineering. 38 (2), 159 (2001)
- 4) Horie, H. et al.: J. Hokkaido For. Prod. Res. Inst., 17 (3), 1 (2003)
- 5) Motomura, T. et al.: Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries. 47, 1535 (1981)
- 6) Matsunaga, K. et al.: J. Exp. Mar. Biol. Ecol., 241, 193 (1999)
- 7) Suzuki, K. et al.: Phycologia. 34, 201 (1995)
- 8) Matsunaga, K. et al.: J. Appl. Phycol., 6, 397 (1994)
- 9) Matsuoto, K. et al.: J. Chem. Eng. Jpn., 39, 229 (2006)
- 10) Rose, A. L. et al.: Environ. Sci. Technol., 36, 433 (2002)
- 11) 山本光夫 ほか: Journal of the Japan Institute of Energy. 85, 971(2006)
- 12) 木曾英滋 ほか: 豊かな沿岸を造る生態系コンクリート—磯焼けを防ぎ藻場を造る—, 土木学会シンポジウム, 東京, 2007, p.182
- 13) 木曾英滋 ほか: 第20回海洋工学シンポジウム要旨集, 東京, 2008
- 14) 相本道宏 ほか: 新日鉄技報. (390), 89 (2010)
- 15) 加藤敏朗 ほか: 第20回海洋工学シンポジウム要旨集, 東京, 2008
- 16) Yamamoto, M. et al.: Bioresource Technology. 101, 4456 (2010)
- 17) Motomura, T. et al.: Bull. Jap. Soc. Sci. Fish., 47, 1535 (1981)
- 18) Motomura, T. et al.: Phycologia. 23, 331(1984)
- 19) Suzuki, Y. et al.: Japan Sea. Phycologia. 34, 201(1995)
- 20) 加藤敏朗 ほか: 第21回水産工学会学術講演会講演要旨集, 神奈川, 2009
- 21) Motomura T. et al.: Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries. 47, 1535 (1981)
- 22) 植木知佳 ほか: 海洋理工学会誌. 17, (2011) (掲載待)



写真1 シーラボ外観



藤本健一郎 Ken-ichiro FUJIMOTO
先端技術研究所 環境基盤研究部長 工博
千葉県富津市新富 20-1 〒 293-8511



植木知佳 Chika UEKI
先端技術研究所 環境基盤研究部
研究員 博士(水産科学)



加藤敏朗 Toshiaki KATO
先端技術研究所 環境基盤研究部
主幹研究員 学博



堤 直人 Naoto TSUTSUMI
技術開発企画部
温暖化対策研究企画グループリーダー