

B-39 製鋼スラグと腐植様物質による 藻場再生技術の効果継続性と環境影響評価

○山本 光夫^{1*}・劉 丹²

¹東京大学教養学部（〒153-8902 東京都目黒区駒場3-8-1）

²有明工業高等専門学校物質工学科（〒836-8585 福岡県大牟田市東萩尾町150）

* E-mail: mitsuo@eco.c.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

浅海岩礁域の大型海藻群落が衰退・消失する磯焼け¹⁾の現象が深刻化しており、その発生要因として、海水温の上昇、ウニなどの藻食動物による食害、鉄や栄養塩の不足など様々な要因が挙げられている。その中で溶存鉄不足については、陸域から海域へ供給される鉄が護岸工事やダム建設など人為的な原因によって、森・川・海のつながりが遮断されることにより減少する結果生じると一般的には考えられている。

この鉄不足に対して、製鋼スラグと腐植様物質による藻場再生技術の研究開発が行われている²⁾。この技術は、転炉系製鋼スラグと間伐材などの木質系チップを嫌気性発酵させた堆肥（人工腐植物質）を混合したユニット（鉄分供給ユニット）を海域に設置することで、鉄と腐植物質の錯体を形成させて鉄を供給するものである。既に2004年10月より行われた北海道日本海側での実証試験によりその効果は確認されている³⁾。この藻場再生技術の現象理解と更なる効果促進に向けて、人工腐植物質と鉄の錯形成能評価⁴⁾や、鉄溶出速度に対する製鋼スラグと腐植物質の相互作用・影響についての評価^{5, 6)}が行われてきた。一方で本技術の導入にあたっては、その効果の継続性と技術導入による海域環境への影響に関する基礎的知見の蓄積を行う必要がある。

本研究においては、実際の実証試験海域における藻場再生技術の効果継続性に関して、これまで行われてきた海藻生育調査に合わせて、海域の鉄濃度分布や鉄分供給ユニット中の腐植物質含有量等から検討を行うことを目的とする。また環境影響については、鉄分供給ユニットに関しては、溶出試験等で環境基準など安全性への検討はなされているが、実海域において改めて評価を行うことは重要と考えられる。本研究では、実証試験の海域における重金属濃度に着目をして検討することを目的とする。

2. 研究方法

本研究は、長崎県対馬市峰町東部の松島付近の海岸で2007年11月よりスタートしている実証試験海域⁷⁾において実施した。図-1にその概略図を示す。ここでは北海道増毛町での実地試験³⁾と同様の方法で、試験区の海岸汀線付近に長さ45mにわたり製鋼スラグと腐植様物質を混合した鉄分供給ユニットが埋設されている。試験区から150m離れた地点に対照区(1)を設置し、300m離れた地点に対照区(2)を設置し、本研究においては主に試験区と周辺海域の水質の違いを評価・検討するために用いた。なお、試験区から対照区(1)に向かって30m付近の海底にも、ユニットを入れたフトン籠が小規模であるが設置されている。

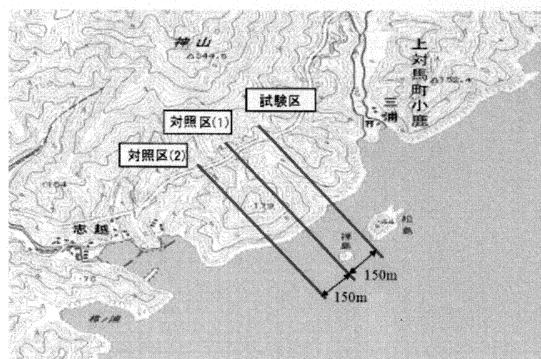


図-1 実証試験海域図

(1) 効果継続性評価

図-1の実験海域においては、これまで海藻生育に関しては、年に一回の頻度でコドラート法による調査が行われてきた⁷⁾。具体的には鉄分供給ユニットが埋設された海岸汀線付近から、定めた距離ごとの1m²あたりのアラメやホンダワラといった海藻種類やそれらの被度等で評

価している。その結果、鉄分供給ユニットの導入により藻場の拡大が確認されている。一方で、鉄濃度と藻場再生の関係性に関しては、汀線付近の海水については試験区と対照区(1)で差があることが確認されているが、沖合方向に向けた鉄濃度変化など、鉄濃度と海藻生育に関する詳細な検討は行われてこなかった。そこで効果継続性評価に関する尺度の一つとして、沖合方向の鉄濃度分布や鉄分供給ユニット中の鉄や腐植物質の含有量変化の検討を行うことは重要であると考えられた。本研究ではこれらの検討のうち、海域における鉄濃度分布の結果について示すこととする。

鉄濃度分布の測定は以下の通り行った。2011年6月に図-1における試験区と対照区(1)において、汀線から5mの地点と10～70mまで10m間隔で海底から50～100cm付近の海水のサンプリングを行い、溶存鉄濃度を分析することでその傾向性を考察した。鉄濃度の分析には、分光光度法⁹⁾を用いた。

(2) 環境影響評価

鉄分供給ユニット設置による海域への環境影響評価として、重金属類の海域への影響について検討を行った。今回の分析では、試験区と対照区の汀線から10mと30m地点の海底から50～100cm付近の海水を採水して分析を行った。溶存鉄濃度分布の検討よりも採水箇所が少ないこともあり、試験区からより距離を離して対照区(2)の地点でサンプリングを行った。分析はICP-MS（誘導結合プラズマ質量分析装置）を用いて実施し、評価する元素としては、カドミウム（Cd）、鉛（Pb）、クロム（Cr）、銅（Cu）、亜鉛（Zn）、マンガン（Mn）の6種類とした。

3. 結果と考察

(1) 効果継続性評価

図-2 に試験区と対照区(1)における汀線から沖合いに向けての鉄濃度分布を示したグラフを示す。対照区(1)においては鉄濃度分布に傾向性が確認されなかったのに対して、試験区では汀線から離れるにつれて鉄濃度が減少していることが確認できた。このことは鉄分供給ユニットから海域への鉄の溶出が、2007年11月に試験を開始して3年半が経過しても継続していることを示す結果と言える。

一方で、試験区にて行っている海藻生育に関するコドラート調査においては、海藻生育範囲が沖側に拡大している様子が確認されている。海水温等の海域環境条件は年により異なるものの、藻場の状態から判断するとユニット設置の効果は継続していることが示唆されている。

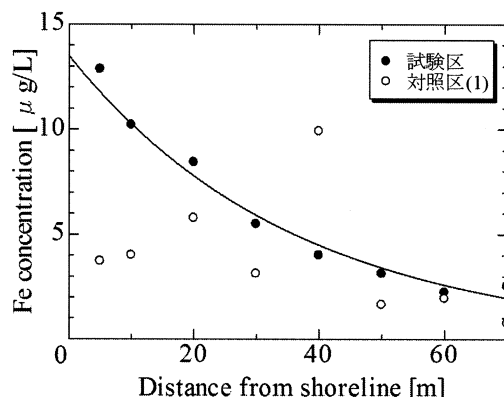


図-2 実証試験海域における鉄濃度分布

この藻場の状態と図-2 を合わせると、鉄分供給ユニットからの鉄溶出とともに藻場修復への効果が継続していることが示唆され、ユニット設置の効果を改めて示す結果を得ることができた。

本藻場再生技術の効果継続性評価の一環として、既往の研究^{5) 9)}において、製鋼スラグのみ、人工腐植物質のみ、製鋼スラグと人工腐植物質の混合の3種類について実海域の海水を利用した実験室内での鉄溶出試験が行われている。表-1 は溶出試験結果から得られた3条件における鉄溶出速度と鉄溶出寿命（鉄含有量のうち1%が溶出と仮定）を示している。この結果によると、製鋼スラグと人工腐植物質を混合した場合には、少なくとも5.9年は鉄溶出が継続することが示されている。本研究で3年半が経過しても鉄溶出の継続が確認されたことは、表-1とも矛盾しない結果となったと言える。

表-1 製鋼スラグと人工腐植物質からの鉄溶出速度と寿命⁹⁾

	Slag	Humus materials	Slag + Humus
Elution rate [μg-Fe/g-sample/d]	0.14	3.36	0.76
Life time of Fe elution [year]	42.1	0.3	5.9

(2) 環境影響評価

試験区と対照区(2)において採水した海水中に含まれる重金属の測定結果を表-2 に示す。表-2 に記載した基準値は、水質汚濁に係る環境基準（Cd, Pb, Cr (Cr⁶⁺), Zn）と水質汚濁防止法に基づく排水規制の一律排水基準（Cu, Mn）を示している。また測定値に関しては、Cr は全クロム、Mn は溶解性マンガンである。今回分析に用いた ICP-MS の定量下限値はそれぞれ 0.005 mg/L で

表-2 重金属分析結果

測定項目	Cd	Pb	Cr	Cu	Zn	Mn
基準値 [mg/L]	0.01	0.01	0.05	3	0.02	10
定量下限値 [mg/L]	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
採水地点	濃度 [mg/L]					
試験区 10m	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
試験区 30m	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
対照区(2) 10m	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
対照区(2) 30m	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.

n. d.: not detected

あったため、環境基準を満たすかどうかの判断は可能であった。分析の結果、試験区、対照区(2)ともに全てのサンプルが定量下限値以下であることが確認された。このことは、鉄分供給ユニット設置による海域への重金属の影響に関しては、少なくとも数年後の段階では水質については見られないことを示している。

製鋼スラグと腐植様物質からの重金属の溶出に関しては、実験室レベルの試験によって、環境安全性が高いことは報告されている⁸⁾。今回の分析結果は、実海域においても重金属の影響が見られないことを示す結果と言える。但し、サンプリングの際の天候等に水質は左右されやすいため、今後も継続的にモニタリングを行っていくことが重要である。また、海水中の重金属濃度だけでなく、海藻等への重金属の取り込みなどについても更に評価を行っていく必要があると考えられる。

4. まとめ

本研究では、製鋼スラグと腐植様物質による藻場再生技術における効果継続性と環境への影響について、長崎県対馬市で行われている実証試験をフィールドとして検討を行った。効果継続性に関しては、試験区においては汀線から沖合への鉄濃度分布結果から、試験開始3年半後でも鉄溶出は継続していることが示唆された。一方で環境影響評価に関しては、試験区と対照区の海水中の重金属濃度の測定を実施した。今回の検討結果からは、6種類の重金属については、海域環境（水質）への影響がないことが示された。

謝辞

本研究は、公益財団法人鉄鋼環境基金より助成（環境助成研究）を受けて行われたものです。また本研究は、

（株）大川建設工業ならびに対馬東部峰町漁業協同組合の多大なる協力のもとに行われました。対馬での実証試験は、（株）エコ・グリーンとともに計画・実施をいたしました。また重金属の測定にあたっては、東京大学大学院総合文化研究科・環境分析化学研究室（松尾基之教授）の協力により行われました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 藤田大介「磯焼け」、堀輝三・大野正夫・堀口健雄編『21世紀初頭の藻学の現況』日本藻類学会、山形、102（2002）。
- 2) 山本光夫ら「スラグと腐植物質による磯焼け回復技術に関する研究」日本エネルギー学会誌、85（2006）、971-978.
- 3) M. Yamamoto et al., "Application of Iron Humates to Barren Ground in a Coastal Area for Restoring Seaweed Beds", J. Chem. Eng. Jpn., 43（2010）627-634.
- 4) M. Yamamoto et al., "Evaluation of iron(II) binding abilities of humic substances from a compost sample", Bioresour. Technol., 101（2010）4456-4460.
- 5) 山本光夫ら「鉄供給による海藻群落再生技術における製鋼スラグと腐植様物質の相互影響評価」環境工学研究フォーラム講演集、（2010）49-51.
- 6) 山本光夫ら「製鋼スラグを利用した藻場再生技術における腐植物質の鉄溶出への影響」鉄と鋼、97(3)（2011）159-164.
- 7) 山本光夫ら「腐植物質－鉄錯体を利用した藻場再生技術の九州沿岸海域における有効性評価」第18回日本エネルギー学会大会講演論文集（2009）170-171.
- 8) 駒井武ら「製鋼スラグと腐植物質による生態系修復技術の受容性」日本エネルギー学会誌、90（2011）449-454.