

「海の森」再生による水産業の振興に向けて

——沿岸域の溶存鉄不足に着目した藻場修復・造成の取り組み——

東京大学海洋アライアンス 山本 光夫

1. 日本各地における磯焼けの問題

日本の沿岸域において深刻化している問題の一つとして磯焼けが挙げられる。磯焼けとは、浅海の岩礁・転石域において、藻場（海藻群落）が衰退または消失して草原状もしくは森林状の景観を失い焼け跡のようになる現象（註1）を指す。その発生要因としては、海水温の上昇、ウニや魚類など植食動物による食害、また栄養塩（窒素、リン）や溶存鉄の不足など、多くが挙げられている。これらの要因がきっかけとなって、海藻生産量と植食動物の摂食量のバランスが崩れ、前者が後者を上回るために磯焼けが持続するとも考えられている（註2）。藻場は、魚の産卵場、幼稚仔の保育場としての役割があり、沿岸生態系保全とともに水産業における漁業資源確保の点からも重要である。したがって、磯焼けからの藻場修復・造成に向けて、ウニの除去や防御フェンス・ネットなどの設置のほか、植食動物の過剰な食

圧への対策（註2）、海藻着生基質の設置、窒素やリンの海域への施肥など、これまで多くの方法が行われてきた。

その中で最近注目されているものに、溶存鉄不足に着目した対策がある。海藻生育には、窒素やリンといった栄養塩以外にも、鉄、マンガン、コバルト、銅、亜鉛などの微量元素が必要である（註1）。海域における溶存鉄は、陸域の鉄が森・川・海のつながりで運ばれてくるものが大きく影響するとされるが、その輸送に大きな役割を果たすのが腐植物質（フルボ酸・フミン酸）をはじめとした有機物質である。腐植物質とは、水圏や土壌環境に広く存在しているもので、土壌からアルカリによって抽出される分画のことを指す。森林や湿地の土壌中に含まれる腐植物質が、同じく土壌などに含まれる無機態の鉄と結合して溶存可能な形態（有機態鉄）となり、川から海への鉄の輸送に大きな役割を果たすとされる。ところが、近年になって陸域から海域への鉄の供給量が、護岸工事や砂防ダム建設などの

人為的要因によって減少し、沿岸域の鉄不足が生じている（註3）と考えられている。

2. 産業副産物と未利用バイオマスを活用した藻場再生技術

この溶存鉄不足に対して、製鉄過程の副産物である製鋼スラグと腐植物質（フルボ酸・フミン酸）を含む堆肥を利用した藻場再生技術の研究開発が行われている。この技術は、製鋼スラグから溶出する鉄と堆肥中の腐植物質（有機物質）から生成した有機態鉄を海域に供給することによって、沿岸域の溶存鉄濃度を上昇させようというものである。この技術には転炉系製鋼スラグを用いており、約二〇パーセントの二価鉄が含まれているほか、腐植物質源として利用する堆肥の原料は間伐材などの木材チップである。したがって、磯焼けからの藻場修復・造成とともに、産業副産物および未利用バイオマス資源を有効活用できる点が本技術の大きな特長である。

本技術の開発は、故・定方正毅東京大学名誉教授によって一九九〇年代後半より開始された研究が基盤となつて

図1 北海道増毛町舎熊海岸の位置



参考文献(4)中の図を日本語に改変

いる。二〇〇三年には産学連携の共同研究へと発展し、その後、定方教授を中心として、東京大学などの大学・研究機関の研究者と新日本製鐵株（現・新日鐵住金株）をはじめとする企業などから構成される海の緑化研究会が発足した。この研究会の大きな特徴は、大学と企業が連携した取り組みを行っているとともに、研究者の専門分野も化学工学、環境化学、分析化学、藻類学など多岐にわたっていることである。現在は、筆者が定方教授の後を継ぐ形で研究会の活動を行っているが、研究開始より一五年が経過した現在では、全国三〇カ所以上で本技術の実証試験・事業が実施されるまでに至っている。

すでに実用化に向けた段階にある本技術が、全国各地で注目されるようになった理由としては、二〇〇四年一〇月より行われた北海道増毛町^{ちよう}における実証試験の成果によるところが大きい。そこで本稿では、同町でのフィールド試験の概要とその成果を紹介し、その後の研究開発過程で実施した離島でのフィールド試験などの事例についてもあわせて記述することにした。

3. 増毛町での実証試験

本技術において最初の実証試験は、増毛町内にある舎熊海岸^{しけうかい}で行われた（図1）（註4、5）。こ

これは、海岸線が数百メートル以上にわたって勾配がほぼ等しい遠浅の海域であり、干満の差が小さく玉石の地盤であることが特徴である。この海岸の汀線に沿って、製鋼スラグと腐植物質（堆肥）を体積比一対一で混合し、ヤシ繊維の袋に入れて作製した鉄分供給ユニットを埋設（図

図2 鉄分供給ユニットの設置方法（註6）



図3 増毛での実証試験概要図

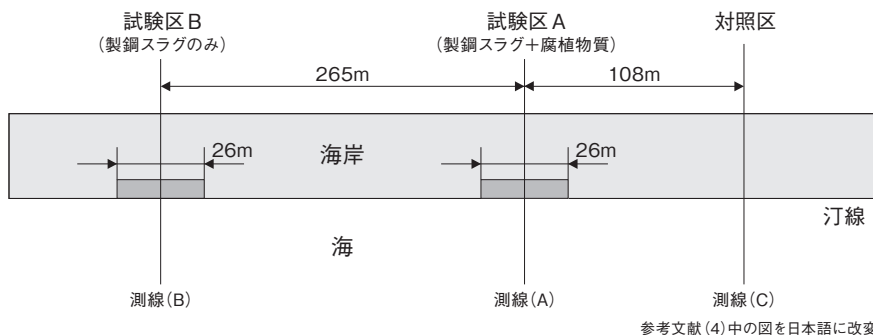


図4 実証試験開始前の海底(a)と試験開始翌年5月の海域の様子(b)（註6）



2) し、対照区と比較することによって効果の検証を行った。具体的には、海岸汀線付近に二つの試験区と対照区を設置し、各試験区に鉄分供給ユニット（試験区A）、製鋼スラグだけのユニット（試験区B）を幅二六メートルにわたって埋設した（図3）。

その結果、試験前には貧植生状態であった海域で翌年には海藻が繁茂し（図4）、海藻生育調査（表1）においても対照区や試験区Bと比較をして試験区Aが最も海藻生育量が多いことが確認された。表1の各区における海藻湿重量は、海岸汀線から三メートル、五メートル、一〇メートル、二五メートル、そして五〇メートルの地点でツボ刈り（コドラート調査）を行い、一平方メートルあたりの海藻湿重量についてホソメコンブとそれ以外の海藻類に分けてまとめた値を示している。これをみると、一年目は試験区Aのホソメコンブは対象区に比べて約

表1 試験海域における3年間の海藻現存量変化
(各数値は汀線から3, 5, 10, 25, 50m地点の海藻湿重量の平均値(kg/m²))

	対照区		試験区A		試験区B	
	ホソメコンブ	その他	ホソメコンブ	その他	ホソメコンブ	その他
2005	7	1,037	1,581	370	491	552
2006	12,253	3,327	36,486	2,174	11,393	7,580
2007	1,680	420	4,077	281	4,284	292

参考文献(5)中の図を日本語に改変

二三〇倍になっていることがわかり、さらに二年目は海藻量が大幅に増えていることが示された。また三年目も効果の継続が確認された。なお、三年目に製鋼スラグだけ埋設した試験区Bも海藻量が多くなっているのは、試験区Aから試験区Bに潮の流れがあるためであると考察されている。この海藻生育調査とともに、海域において鉄、および窒素やリン、電気伝導度といった水質調査を実施しており、鉄が海域に溶出・拡散されていることも示された。これらの結果を総合して、増毛町海域での本技術導入効果が確認された。試験開始四年目以降も効果継続確認のための調査は毎年行われており、すでに一〇年が経過している。

以上の増毛町での研究成果を契機として、北海道函館市、三重県志摩市、長崎県対馬市・壱岐市をはじめ、全国各地で実証試験・事業が実施されるに至っている。

4. 離島での取り組み

離島での事例として、長崎県対馬市における取り組みを紹介したい。

対馬における磯焼けは、南部や西側において特に磯焼けが進行している一方で、東部においても藻場が次第に減少していると考えられる。実証試験は、対馬の東側にある峰町松島付近（峰町東部漁業協同組合）の海岸で二〇〇七年一月下旬に開始され、北海道増毛町の試験と同様の方法で、試

図5 試験開始翌年(2008年5月)の鉄分供給ユニット埋設海域の様子
(対馬市峰町松島付近、海岸から写真中央付近まで拡がるのが海藻群落)



験区の海岸汀線付近に長さ四五メートルにわたって鉄分供給ユニットが埋設された。試験海域の特徴としては、増毛海域が一年生のホソメコンブが優占種であったのに対し、ホンダワラ類のほか、アラメなど多年生の海藻類が分布し

ていることである。そこで対馬の試験では、鉄分供給ユニットの埋設効果の評価にあたって、増毛のように海藻を採取して種類・重量を測定する方法ではなく、海藻の被度と種類で経年変化をモニタリングすることとした。そのため、特に長期的な効果継続性も検討していくことを目標とし、鉄分供給ユニット設置による環境影響についても評価した。このように対馬での実証試験は、(1) 北海道日本海側以外での海域における効果確認、(2) 鉄分供給ユニットの効果継続性と環境影響評価の二つが主な目的となり、本技術の研究開発における重要な位置づけとなった。

図5は、試験開始翌年の二〇〇八年五月に調査を実施した際に撮影した試験海域の写真である。写真奥の玉石の海岸汀線付近にユニットは埋設されているが、施肥した海域の全面にわたってホンダワラ類を中心とした海藻が繁茂している様子が見て取れた。ただし、この海域では藻場減少は見られていたものの、海藻が残っていた海域であったこともあり、この写真だけではユニットの効果があるとは言えない。そこで毎年六月頃を中心に試験区のコドラート調査(被度)、および潜水による海藻状態の観察(長崎大学・桑野和可准教授、海域の鉄分析(有明工業高等学校・劉丹教授)を継続的に実施した。

継続調査の結果、海藻の分布域が拡大している様子、また海藻状態も改善している様子が観察されたとともに、試

実験開始四年後の水質調査では、汀線から沖合にかけて鉄濃度が減少し、ユニットからの鉄溶出を示す結果も確認された。この海域調査は現在も行っているが、試験開始五年以上が経っても藻場が維持されていると言える結果が得られており、鉄分供給ユニットの効果継続性が示唆されている。また、あわせて実施した環境影響評価では、海水中の重金属濃度（カドミウム、鉛、クロムなど）や海藻中の重金属含有量（カドミウム、鉛、ヒ素など）について分析をした結果、対馬の試験条件の場合、環境基準などに照らして問題となるような影響は見られないことが示唆された。以上のように対馬での試験では、目的とした（1）および（2）の項目を両者とも満たす重要な成果を得ることができた。

5. 対馬での基礎研究

増毛と対馬のフィールド試験結果によって本技術の有用性が確認された一方で、技術の確立に向けての課題・検討項目は依然として存在している。それらは大きく分けると次の三項目（註7）となっており、海の緑化研究会に所属する大学・企業によって基礎研究が進められている。

- ① 藻場修復・造成への鉄供給効果に関する基礎的知見の検討
 - ② 環境影響・安全性の評価
 - ③ 沿岸生態系との藻場再生技術との関係性評価
- これらの課題に対して、対馬をフィールドとした検討も

行われている。まず①については、実験室におけるユニットからの鉄溶出試験や培養試験による海藻生育への鉄添加効果の検討などの結果に基づき、対馬においてフィールドに近いパイロット試験的な位置づけとして、鉄溶出試験を実施した。長崎県対馬栽培漁業センター（対馬市美津島町）の協力を頂きながら、センター内に三〇〇リットルの水槽を設置し（図6）、ユニットからの鉄溶出特性の評価を行った。また、あわせて安全性の評価（項目②）も実施している。

図6 対馬栽培漁業センターに設置した水槽（300L）



その結果、鉄の溶出に及ぼす有機物（堆肥）の効果について重要な知見が得られたほか、巻貝など生物への重金属蓄積可能性も検討し、実施された水槽実験の条件では、基準などに照らした場合に問題となるような影響は見られないことが示唆された。

一方で項目③は、本藻場再生技術を効

果的に利用するために特に重要な課題である。本技術の導入にあたっては、海藻群落の衰退・消失の要因として溶存鉄不足が主要因である海域、あるいは鉄添加が藻場造成に効果的と考えられる海域を選択する必要がある。また、これら海域であればすべて良いということもなく、海域の鉄濃度が上昇するのに必要となる適切なユニット設置量、あるいは設置場所の検討を事前に行うことが重要と考えられる。そのためには、森・川・海のつながりを踏まえた沿岸域での鉄の動態に関する調査研究によって生態系での鉄の役割をまず理解することが重要と言える。さらには対象海域における海藻群落衰退の主要因を評価できるモデルや予測手法を確立することが望まれる。

以上を踏まえて、海域における磯焼け発生要因を明らかにするための環境調査を開始したが、そのフィールドの一つとしたのが対馬である。その理由としては、島の東部と西部で藻場の生育状況に違いのある対馬において水質環境との相関が取れば、藻場減少の主要因解明への大きな手がかりになると考えられたためである。また対馬市からの支援が得られたことと、地元企業である(株)大川建設工業の協力があつたことが大きい(なお、前述の実証試験や対馬栽培漁業センターでの水槽試験においても同社の協力を受けている)。具体的な調査方法としては、南北一地点と東西二地点ずつの計六地点の沿岸の海水や東側と西側海域に流れ込む河川

水(上・中・下流)の水質分析を定期的に行った結果、場所ごとの鉄や全窒素の濃度に差があることは確認できた。その上で、海藻分布や現存量と溶存鉄や栄養塩濃度との関係性を明らかにするため、今後もさらなる調査を行っていきたいと考えている。

なお、沿岸域における鉄の動態調査で、鉄濃度の挙動が森・川・海のつながりと相関があることが示唆された場所がある。それは宮城県気仙沼湾・舞根湾^{もうね}であり、東日本大震災後の沿岸生態系回復を明らかにするための生物環境調査が実施される中で、海域の鉄濃度のモニタリングを実施しているものである(註8)。これまでの調査の結果、海域の鉄濃度と降水量の相関を示す結果が得られており、河川によって運ばれてくる鉄が海域の鉄濃度の増減に寄与していることが示唆された。このような鉄の動態に関する調査を他の海域でも実施していけば、沿岸生態系における鉄の役割が理解されていくものと期待される。

6. 今後の展望

本稿では製鋼スラグと腐植物質による藻場再生技術の実用化に向けた経緯と現状について、離島での取り組みを含めて紹介してきた。繰り返しにはなるが、本技術導入によって最大限の効果をを得るために重要なことは、鉄供給に最適な海域を選択することである。藻場の修復・造成には、鉄、

あるいは栄養塩（窒素、リン）の施肥だけではなく、食害対策、着生基質の利用、移植・播種などさまざまな方法がある。藻場修復・造成を必要とする海域においては、既存の方法とともに鉄供給の有用性を検討し、最適な藻場修復・造成の手法を選択していくことが重要と言える。

その一方で、最適な手法の選択が容易でないのもまた事実である。したがって筆者は、今後とも単に鉄分供給ユニットによる藻場再生技術の開発にとどまらず、多くの藻場修復・造成法の中から、最適なものを選択していく方法論の確立を目指していきたい

と考えている。そのためには、まずは①～③の研究を継続して進めていくことが重要である。あわせて、全国三〇カ所以上の実証試験結果のうち代表的なものについて、海藻現存量変化に対する栄養塩・鉄などの水質、植食動物の有無、海水温や潮流・流れといった海象条件などとの関係を総合的に評価し、その結果を整理することが必要と考えている。

【註・参考文献】

- (1) 藤田大介・村瀬昇・桑原久美編著『藻場を見守り育てる知恵と技術』成山堂書店（2010）
- (2) (社)全国漁港漁場協会『磯焼け対策ガイドライン』水産庁（2007）
- (3) 山本光夫「鉄鋼スラグと未利用のバイオマスによる『海の森』の再生」化学工学、73巻8号（2009）、390～393頁
- (4) 山本光夫ほか「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巻12号（2006）、971～978頁
- (5) Yamamoto et al., Application of Iron Humates to Barren Ground in a Coastal Area for Restoring Seaweed Beds, Journal of Chemical Engineering of Japan, 43, (2010) 627-634.
- (6) 山本光夫「『海の森』再生に向けて～鉄鋼スラグと腐植物質による磯焼け回復技術～」海洋政策研究財団編『人と海洋の共生をめざして～150人のオピニオンV』（2011）、90～91頁
- (7) 山本光夫「製鋼スラグと腐植物質を利用した藻場再生技術」環境浄化技術、116号
- (8) 山本光夫ほか「気仙沼舞根湾海域における水質の推移」海洋と生物、35巻6号（2013）、547～553頁

山本光夫（やまもと みつお）

昭和48年東京都生まれ。東京大学大学院工学系研究科博士課程修了（博士（工学））。専門は環境化学工学で、鉄を利用した藻場再生技術の開発を中心に環境技術と沿岸生態系保全に関する研究に従事する。

これらの取り組みを通して沿岸域の環境と藻場生育の関係性も明らかにになり、科学的知見に裏付けられた環境低負荷型の技術の確立へとつながっていくことが期待される。今後とも、技術の実用化や沿岸域の環境調査を進めながら、離島をはじめ日本の沿岸域の環境修復・保全に少しでも貢献していきたいと考えている。

