

流れ藻シリーズ① 磯焼けと藻場回復の取り組み －第20回海の森づくりシンポジウムに参加して！－

技術士（衛生工学・建設・環境）等
環境計画センター 会長代行 鍵谷 司

はじめに

今から5年前に編集委員として『環境施設』に連載で寄稿するにあたり、テーマを探していた。私はもともと海育ちであり、大工の父は自分で磯船をつくり、漁師も兼ねていた。50年以上前のことであるが、すでに海藻が枯れる「磯焼け」の話は聞いていた。

平成5（1993）年7月に起こった奥尻地震（北海道南西沖地震）では、80km離れた故郷の島牧村にも高さ5mもの津波が押し寄せ、浜辺は大きな被害を被った。その数年後には、沿岸部には、高さ5mの防波堤が延々と築かれ、浅瀬は波消しブロックで覆われた。そのころ、「セメントを海に撒いて、影響は出ないのか？」と漠然と心配していた。その後、海藻が生い茂っていた海底はなんとなく白くなる状況を目にし、さらに海藻群は、いっそう貧弱になったことを実感していたので、本誌で「磯焼けの話」をシリーズとして取り上げた。今回のシンポジウムでの発表を契機に「流れ藻」シリーズと題して藻場の再生に関する知見や情報をスポット的に紹介することにした。

昨年、私の報文を検索された「海の森づくり推進協会」副会長の門脇秀策先生（鹿児島大学名誉教授）より、同協会主催の「第20回海の森づくりシンポジウム」での発表を依頼された。私は、現場調査や藻場研究を行っていないので、「話題提供」レベルの紹介として了承し、藻場回復の研究実態を把握するため東京会場に赴いた。

以下に、発表した報文の要旨等と藻場回復の成功事例を紹介する。なお、これまで寄稿した関連報文は環境計画センターのホームページ（URL：

<https://greenlynx2.sakura.ne.jp/epc/>）「磯焼けの話」を参照してください。

【第20回海の森づくりシンポジウム 開催概要】

- テーマ…新しい海藻食品業の現状と磯焼け・藻場再生へのチャレンジ
- 主催…海の森づくり推進協会
- 形式：ZOOMによるオンラインシンポジウム
- 日時…令和4（2022）年11月12日（土曜日）
9：00～17：00

- 発表会場…日本大学理工学部駿河台校舎
- プログラム…発表は下記のとおり2部構成で実施された。なお、発表者名等は省略する。

【第1部 新しい海藻食品業の製造】

- ①紅藻キリンサイからカラギナンと液肥
- ②海藻由来多糖類“寒天”の現状と可能性
- ③アルギン酸の利用分野

【第2部 磯焼けと藻場再生のチャレンジ】

- ①磯焼け対策ガイドライン（水産省）の紹介
- ②宮城県における磯焼け対策とその成果
- ③函館産天然マコンブの藻場再生の今
- ④コンクリート海岸構造物から流出する成分が藻場に及ぼす影響（鍵谷 司）
- ⑤水溶性フルボ酸鉄と移設工法（池田 修）
- ⑥アマモ場の造成技術とブルーカーボン

1. シンポジウム発表報文（鍵谷）の概要

報文内容は、波消しブロックが沿岸に設置された場合、海水にわずかながら溶解するのでアルカリ性になり、海中の溶解鉄を沈澱・除去し、海藻類の吸収量が不足する。その結果、光合成が阻害

され、藻場喪失を招くという趣旨である。本報では、おもに溶解性鉄に焦点を当てて紹介する。

(1) 磯焼けの原因を考察するに至った背景

磯焼けが進んでいる日本海南西沿岸部の浅瀬の藻場を25年以上にわたって観察し、特に波消しブロックの周辺は、海藻の生育密度は低いことが気がかりであった(写真1)。海藻や植物プランクトンは植物であり、光合成により生育・繁殖する。琵琶湖における赤潮発生からヒントを得て、外海及び海洋における豊饒の海に注目し、海藻や植物プランクトンが動物プランクトンや魚類の餌になり、豊かな海を育くむ。本稿では、光合成の作用に欠かせない溶解性鉄の挙動に注目して発表した。

①琵琶湖における赤潮発生とその原因；富栄養化区域では必ずしも赤潮は発生しなかった。その原因は、植物プランクトンの光合成に必要な溶解性鉄の不足であることが解明された。

②富山湾は良好な漁場である。北アルプス連峰から冷たい雪解け水が湾内に流入すると、対流が起こり深海に蓄積した溶解性鉄などの栄養分等を表層に供給し、光合成で植物プランクトンが大発生し、動物プランクトンやアミ類などの餌を豊富に生み出す。

③海洋のベーリング海では、特定の時期に決まって膨大な魚類、海洋生物が集合する。周辺火山からの栄養塩供給、アリューシャン列島に遮られた海盆地では湧昇が起こり、底層の栄養塩が

表層に巻き上げられ、光合成により膨大な植物プランクトンが増殖し、餌のアミ類が膨大量に発生し、世界中から魚介類をはじめ海鳥やクジラなどの海洋動物が海を埋め尽くす。この現象はアリューシャン・マジックと言われている。

このように、良好漁場とは、餌が豊富であることが条件であるが、その源は植物プランクトンであり、底層の栄養塩と適度な太陽光、水温が光合成を促進する要因である(図1)。なお、光合成には、溶解性鉄が必須であり、必要な栄養塩などの条件が揃っていても、溶解性鉄が不足すると光合成作用は抑制される。

(2) 沿岸部の磯焼けと溶解性鉄の働き

現在、日本各地の沿岸で「磯焼け」が急速に進んでおり、水産業に深刻な影響を及ぼしている。その原因には次のような様々な説はあるが、コンクリートのアルカリ成分溶出の影響について注目して研究・調査した事例は見当たらない。水産庁「磯焼け対策ガイドライン」には、磯焼けの基本的な要因が整理されている。

①水温上昇説；コンブ等大型海藻の発芽期の冬季に水温が上昇すると発生が抑制

②食害説；ウニや植食性魚類の藻食動物による過渡な摂食による海藻群落の衰退

③養分不足説；排水の規制強化による窒素やリン等の栄養塩類の不足

④溶解鉄イオン不足説；コンブなどの海藻の光合



写真1 観察を続けた浅瀬の様子
(北海道島牧村；三上順一氏提供)

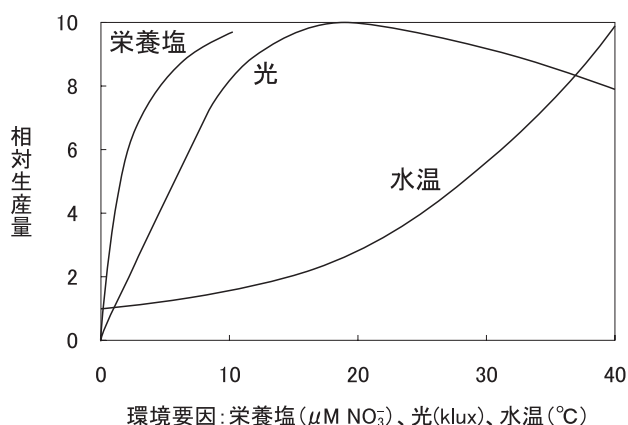


図1 光合成を促す光、栄養塩、水温の条件

成等に不可欠な鉄イオンが不足

- ⑤その他；海藻群落の流出説、濁りによる太陽光不足説、無節サンゴモ類による藻の付着・固着阻害と剥離説、など

シンポジウムにおける意見交換の中で、コンクリートから溶出したカルシウムはアルカリ性であるが、藻場に及ぼす影響については確たる検証が行われていない。特に、海域のpHは、海水の緩衝作用により大きく変動しないだろうとの思い込みがある。海洋の年間平均値のpH 8.1～8.2であることがその理由になっている。しかし、実際の沿岸部の海域における水質保全の環境基準はpH 7.8～8.3（年平均値）であり、現場ではこの数値を超えるほど変動は大きい。一方、藻場回復における溶解性鉄の重要性は多くの文献で報告されているが、海水のアルカリ性と鉄溶解度に言及した事例は見当たらない。

（3）海の生態系を支える栄養分・溶解性鉄の働き

以下に、沿岸部や海洋においてこれらの栄養分や溶解性鉄分がどのように供給されているかについて検討した。

①海藻が生育・増殖する栄養条件とは！

植物プランクトンの生産量は、栄養塩に大きく依存し、重要成分としては窒素、リン及び溶解性鉄がある。窒素やリンは、海藻類や植物プランクトンのたんぱく質を合成するため、溶解性鉄は、クロロフィルなどの光合成に関与する。溶解性鉄なしでは植物は光合成ができない。

植物の生長は、最も不足する栄養源の供給量によって制限を受けるリービッヒの最小律がある。また、植物プランクトンの増殖に必要な栄養塩の比率をレッドフィールド比と呼び、C（炭素）：N（窒素）：P（リン）：Fe（鉄）の重量比率は、100：18：2：0.02であり、溶解性鉄分の必要量は非常にわずかである。

②自然界における鉄の挙動

地表の鉄は、主に酸化鉄として豊富に存在する。酸化鉄は難溶性の固体であり、細胞内に取り込んでも機能しない。溶解性鉄は、森林で堆積した有

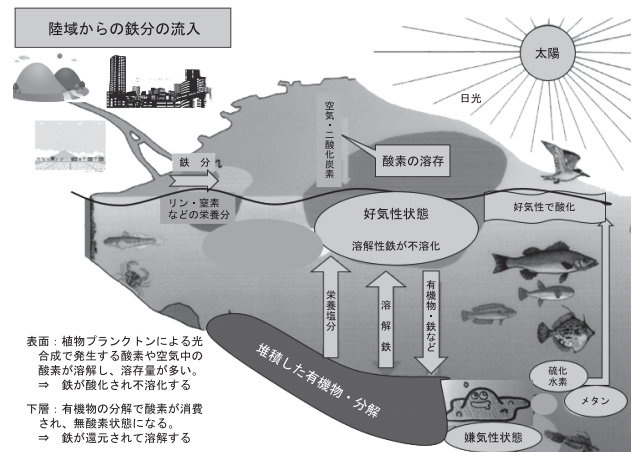


図2 陸域及び海域における鉄の挙動

機酸と土壌中の鉄が反応して、溶解性の「フルボ酸鉄」を生成する。また、酸素濃度の少ない地層深部や湖底や海底では、不溶性の酸化鉄（三価）が還元されて溶解性鉄（二価）に化学変化する（図2）。この化学反応により、対流や湧昇流により底層から表層へ移動すると、溶解性鉄や栄養分が表層に豊富に供給され、太陽光による光合成が起これ、植物プランクトンが大発生するメカニズムが考えられる（図2）。

（4）藻礁用ブロック改良の取り組み

海藻の根（付着器）は、岩場に固定して流されないように機能するのみで、根からは栄養を摂取せず、必要な栄養分は葉全体で海水から取り込み、光合成により生長する。つまり、海藻の胞子が固着しなければ流出し、繁茂することができない。これは藻場用ブロックで工夫すべき重要なポイントである。

①ブロックの表面状態と胞子の付着・固着

波消しブロックは、人工的に製造したコンクリートであり、表面は滑らかであるので、海藻の胞子が付着・固着しにくく、付着しても容易に剥離し、流出しやすいので育ちにくい。自然岩のように表面の粗い状態が望ましい。また、表面や近傍の海水はアルカリ性が高くなり、鉄の溶解度が低くなると、溶解鉄が沈殿・除去され、鉄不足状態に陥りやすい。このため、藻場の生育や繁茂は難しいと考えられる。しかも、波消しブロックのコンク

リートは、微量ながら海水に溶けるので、表面や近傍付近の海水はアルカリ性が高くなると考えられる。

②コンクリートブロックの藻場回復と課題

コンクリートブロックの藻礁の実証試験では、ブロック藻礁の表面を削って溝や微細な凹凸面を作り、胞子の付着性を改善したブロックに、コンクリートからのアルカリ成分の溶出を抑制する工夫などが試行されている。このうち、藻場回復に大きな効果が確認された事例を次章で取りあげる。なお、フィールド実験では、光、海流、栄養分・鉄分、pH、水温、河川等の立地環境条件を明らかにしなければ、磯焼け現象ならびに藻場回復の本質に迫ることは難しいと考えられる。

【感想・コメント】

コンクリート藻礁に繁茂していた海藻群がしだいに貧弱になる事例が報告されている。生育環境の変化に加えて、コンクリートの経年劣化に伴いひび割れが起こり、水和反応や炭酸化が不十分なカルシウム成分が溶けて強いアルカリ成分が滲出したと考えられる。海藻類の生育状態だけでなく、海中に設置された波消しブロックの基盤であるコンクリート構造物の劣化にも注目すべきではないだろうか。

コンクリート製の藻礁でも藻場が回復している事例も数多く報告されている。海流が常に波消しブロック周辺を洗い流すような状況、近くに河川が流入する、海水が滞留しにくい深い場所ではアルカリの影響は軽減されていると考えられる。私が観察した地点は、浅瀬であり（写真1）、海水が滞留しやすい立地環境条件である。

このようにフィールドにおいては、波消しブロックに付着・固着した海藻胞子の生育、繁茂状況だけを確認するだけではなく、立地、深度、海流、水温、河川流入及び流域面積、後背地の森林や保安林の有無、栄養塩や溶解性鉄などの調査・測定データを積み重ねる必要がある。全体的にフィールドにおける観察が中心に行われているが、立地条件や栄養塩などの基本データがほとんど見当たらない

いのが気になる。単に公表していないだけかも知れないが！

2. 藻場回復に成功した現場での実践的な取り組みの事例 ～水溶性フルボ酸鉄と移設工法；池田 修（株朝日テック）より～

私（鍵谷）が、6年前にコンクリート製波消しブロックを海中に投入することは、アルカリ剤をわずかずつ海に散布するごとくであり、海藻や魚介類に影響を及ぼすのではないかと懸念していた。大学での専門は、化学及び物理化学であり、技術士としてコンクリート製造時のアルカリ排水問題、あるいは排水処理時における重金属類の浄化（アルカリ凝集沈殿）など関連した経験は多い。ライフワークとして取り上げている磯焼けの原因に係るメカニズムは、化学反応論を基礎にした理論的な考察である。

ところが、私が磯焼けの原因になると指摘したコンクリートからのアルカリ溶出を抑制し、溶解性鉄を含む栄養塩を供給できるように塗付や練り込んだブロック藻礁が株朝日テックの池田 修氏により特許開発され、藻場回復に大きな成果を上げ、注目の的になっている。

以下に株朝日テック池田 修氏の報文、情報及びYouTube動画などで、改良した藻礁の製造から藻場再生の現場での実証試験などを参考にして、リーフボール藻礁の製造、沈設、移設の過程について紹介する。

（1）藻礁ブロック「リーフボール」とは！

リーフボールは、サンゴ礁の保護を目的としてアメリカで開発された藻礁ブロックであり、基盤はコンクリート製であるが、様々な工夫が施されている。当然、十分な強度を有するとしており、海中における耐用年数が200年以上と報告されており、次の特徴を有している。

①リーフボールは、通常と同じセメント、砂利と小石及びアルカリ中和剤を練り込んで、型枠の流し込み、固化したあとに枠を外すと完成する（写真2）。なお、リーフボールの製造方法は、

特許を取得したとのことである。

- ②その形状は、大きなツボを逆さにした形で、横や上に穴が開いており、底部は丸く広がっているため、安定している。海流は、この穴を通過し、そのまま抜けるか、上の穴から通り抜け、力が分散される。このため、潮の流れによる転倒や移動がしにくい、安定した形状である（写真2、写真3）。
- ③リーフボールは、鉄分の供給とアルカリを中和するとあるので、コンクリート製造時に鉄化合物である硫酸鉄などが練り込まれていると考えられる。また、完成品は濃い茶色になるので、フルボ酸鉄などが添加あるいは吹き付けによる表面処理がされていることが伺える（写真2、写真4）。
- ④リーフボール藻礁の表面は、藻類の胞子が着床・固着しやすいような粗い表面に加工されている（写真5）。



写真2 リーフボールの製造風景

(2) 藻場の苗づくり

陸地では、植林するにあたって種や接ぎ木などにより苗木を育て、これを所定の場所に植林して林や森林を育てる。海の森も同様に藻礁に種を植え付けたロープ等を絡め、設置しやすい試験区で目的とする海藻類を育て、適切な成長時期などを見計らって所定のフィールドに移設する工法が採用されている（写真6～8）。この手法により目的とする海藻類を早期に育成、繁茂させることができる。

- ①設置が容易な試験区で目的とする苗まで育てる（写真6）。
- ②リーフボール藻礁に海藻類が付着・固着し生育した状態まで育てる（写真7）。
- ③鹿児島市与次郎ヶ浜で、海藻類が付着・固着し生育したリーフボールを、魚介類の藻礁として実証試験区に船で移設する工法事例（写真8）。



写真4 完成したリーフボールの表面は茶色



写真3 各種サイズのリーフボール



写真5 表面が粗く加工されたリーフボール

(3) 現場海域に移設したリーフボール藻礁による藻場回復の事例

下の写真(写真6～8)は、種苗・育苗を終えたリーフボールを実証試験区に移設するまでの手順を説明したが、移設後のリーフボールの海藻群の生育・繁茂の状況は、上記の写真とは必ずしも結びついていないことに留意していただきたい。リーフボール藻礁に付着・生育した海藻類は順調に育ち、場所により差異はあるが、設置後、約1年で海藻類が着床・生育し、藻場が回復したことを実証できた。

鹿児島市の長水路において育成に成功した実証試験では、春(5月)に沈設したリーフボールには、わずか6ヵ月後に、アオサとマメダワラが根付いた。これを1年後に所定のフィールドに移設することにより、藻場が回復された(写真9、写真10)。

以上、リーフボール藻礁の特徴を簡潔にまとめ

ると、「従来のコンクリート性藻礁はアルカリ成分の溶出が多いと推測されるが、リーフボール藻礁は、基台がアルカリ成分を中和させて製造しているので、劣化によるアルカリ成分の溶出はない。さらに、鉄分等の栄養塩を供給できる画期的な機能が付与されており、これがコンクリートブロック製の波消しブロックや根固めブロック等とは異なる新しい磯焼け対策の藻礁である」と言える。

おわりに

海藻や植物プランクトンは光合成により生育・繁茂するが、細胞内の溶解性鉄が重要な機能を果たしている。しかし、カルシウムの溶出に伴いアルカリ性が強くなると、海水の溶解性鉄の溶解度が低くなり、藻類の細胞内の鉄分が不足するので、藻場喪失に影響を及ぼすとの理論的な考察をした。これまでの単なるコンクリートブロックから、アルカリ成分の溶出を中和し溶解性鉄などの栄養塩



写真6 リーフボール藻礁を沈設

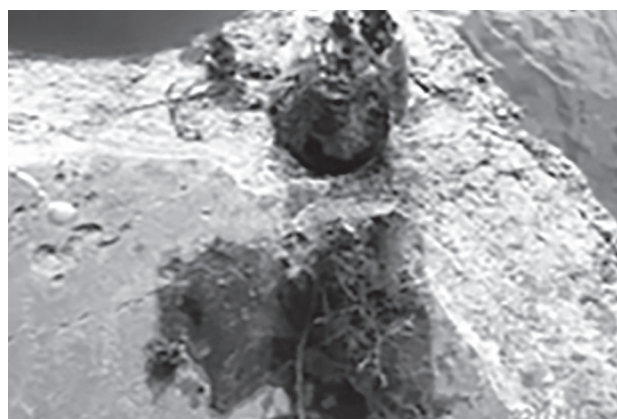


写真7 海藻類が付着・生育する状態まで育苗する



写真8 海藻類が付着・育成されたリーフボール藻礁を実証試験区に移設する様子(令和4年5月28日)

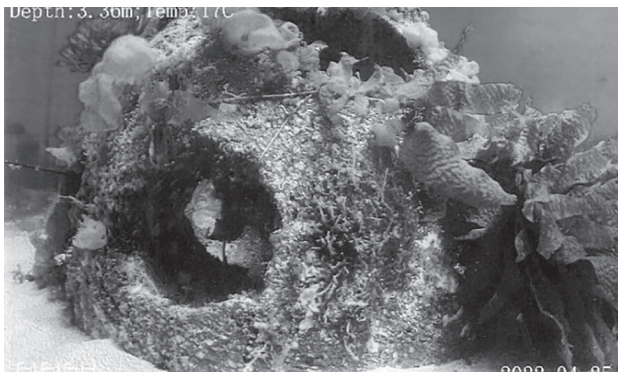


写真9 砂地のリーフボール藻礁に繁茂した海藻



写真10 水溶性フルボ酸含有による海藻繁茂の効果の実証例

を供給できる改良された藻礁が開発されたことにより、藻場回復の切り札として大きな注目を浴びている。いわば、理論と実践が一体となったことを示しており、藻場再生のチャレンジとして大きなヒントを提供できた感がある。

これはあくまでも基本的な取り組みであり、フィールドでは、設置条件により藻場生育環境が大きく異なると想定され、事例ごとに継続的な観察、生育環境の分析などのデータを蓄積することが肝要であろう。特に、藻場が回復できなかった事例についてもその原因を解明することは重要である。

溶解性鉄の利活用は、光合成により生育・繁茂する植物プランクトンあるいは陸上における作物に対しても同じ効果が期待でき、その機能や効能が注目されつつある。また、海の環境を守る観点から展望すると、波消しブロックは、コンクリートからのアルカリ剤の溶出の防止と溶解性鉄分の供給の重要性を考えると、コンクリート製造時に

硫酸鉄のような酸性鉄化合物を混練し、アルカリの中和と鉄分供給を兼ねた改良されたブロックの普及が海の環境保全及び藻場再生に大きな効果を期待できそうである。

次回は、シンポジウムの質疑の中で、様々な問題が指摘されたが、特にアルカリ性と鉄溶解度が十分理解されていないことに鑑みて、pHと水素イオン濃度等について解説を試みたい。

【謝辞】

おわりに、(株)朝日テック・池田 修代表取締役社長には、リーフボールに関する多くの知見と藻場再生に係る現場の実証例を提供していただいた。また、鹿児島大学名誉教授・海の森づくり推進協会副会長の門脇秀策・北海道大学水産学博士には、磯焼けや藻場分野における専門用語をはじめ、論理展開の妥当性などについて指導していただいた。ここに厚く御礼を申し上げ、謝辞といたします。

〈引用・参考資料〉

- 1) (株)朝日テックホームページ (URL ; <https://asahitech.jimdosite.com/>)
- 2) 海の森づくり推進協会；第20回オンラインシンポジウム：会誌3号、p.41-47 (2022)
- 3) 海と日本プロジェクト；磯焼けを防げ！町工場が作る海のオアシス「リーフボール」、日本財団 海と日本PROJECT in ながさき 2021 #04、YouTube (URL ; <https://www.youtube.com/watch?v=j7ug0ffO9ig>)、2021/7/14