

磯焼けの話⑦ 溶解性鉄は磯焼け対策の切り札か！

～溶解性鉄の働きと鉄供給による藻場回復事例！～

裏方 思考

はじめに

これまで「環境施設」第148号から152号では、貧栄養化を予見させる貧弱な海藻類の現実、他方、富栄養化が要因の一つである湘南海岸や東京湾で発生する赤潮あるいは青潮の発生メカニズムについて独自の考え方から合理的な説明を試行し、寄稿した。

磯焼けは、海藻類が減少あるいは死滅して魚介類が生息しない、もしくは生息しにくい状態を指すが、それを引き起こす原因としては、海藻がウニなどによる食害、海の汚れ、土砂の流入、人為的な栄養分の供給不足や海水温の上昇などが挙げられている。このように磯焼けの原因は、自然界の環境変化と人為的な要因があり、対策を講じても必ずしも効果が現れるとは言い難い。最近では国もガイドラインを作成し、藻場再生と磯焼け対策に取り組んでいるので、その内容を取り上げた。

これまでに寄稿した磯焼けに関連した調査に基づくと、海に大量に投入されたコンクリート構造物であるテトラポットが非常に気になる。海中に投入されたテトラは、海水中にわずかながら溶けてカルシウムの供給源となろう！ 海底の白い岩肌で繁殖する石灰藻をみるとテトラが思い浮かぶ。また、テトラ周辺はアルカリ性が強くなるのでその影響も気になる。いわば、「海に石灰を散布するとどうなるか！」ということになるが！

1. 磯焼けの原因と対策について！

私は北海道の漁師町に育ったので、「磯焼け」のことは数十年前に聞いたことがある。二、三十年周期で海藻が枯れてウニやアワビ、あるいは漁獲

量が激減すると言われていた。とくに、北海道南西の日本海沿岸はニシン御殿が立ち並ぶほど豊漁に沸いていたにもかかわらず、激減したのである。磯焼けは、明治時代中頃から全国各地で発生し、水産業に大きな影響を及ぼしてきた。昔から磯焼けは起こっていたのではあるが、近年は、磯焼けである藻場の減少が急速に拡大しており、全国的に深刻な問題になっている。

（1）磯焼けの原因は！

磯焼けは海の砂漠とも言われており、海藻類が極端に減るのは、海藻が、過度に喰われる、枯れる、芽生えがなくなる、引き剥がされる、あるいはその組み合わせで起こると言われている。砂漠と言っても、そこには石灰藻の無節サンゴモが広がり、藻食動物であるウニが高密度に棲息し、また付着珪藻やバクテリアなども生息している。磯焼けの原因は複雑であり、次のような様々な説が提唱されている。イメージとしては図1に示したイラストがわかりやすい。

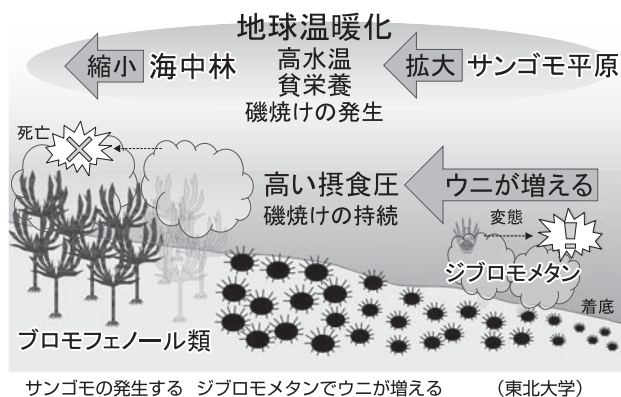


図1 磯焼けの発生と持続機構

- ①コンブなどの大型海藻の発芽期である冬季に水温が上昇すると、発生が抑制されるため海藻が減少するという水温上昇説がある。また、海水温が高い海域では、底層からの栄養分の移流がないので栄養塩が不足し大型海藻の生長が抑制されるという貧栄養説がある。なお、生活排水などの規制強化により海に流出していた栄養分、特に窒素やリンおよび微量な必須成分が減少し、栄養塩不足との指摘もある。
 - ②ウニや植食性魚類などの藻食動物による過剰な摂食が、海藻群落の衰退を招くという食害説
 - ③コンブなどの海藻に必要な不可欠な鉄イオンが不足しているため、大型海藻が繁茂できないという鉄イオン不足説
 - ④その他;大時化（しけ）による海藻群落の流出説、無節サンゴモ類が他の海藻の着生を阻害するという剥離説
- …など、自然界の環境変化と人為的な原因に大きく分類される。

（２）「磯焼け対策ガイドライン」について

2007年２月に水産庁が「磯焼け対策ガイドライン」を作成し、国を挙げて「藻場回復」に取り組んでいる。これらの取り組みで明らかになった諸問題あるいはより効果が期待できる方法等について、ガイドラインは平成28年度に改訂された。

磯焼け対策のうち、漁業者等による改善の取り組みは比較的実用化の目処が立っており、ウニや植食性魚類による食害対策を柱として解説している。とくに、17都道府県の協力を得て実海域における調査、実証試験を行い、その成果を反映することで実用的な対策事例を紹介している。

- ①植食動物の食害の有無を把握するための調査；磯焼け海域に海藻を移植し、食害に遭うかどうか、ウニまたは魚のいずれの食害であるかを確認する。
- ②海藻の生育環境の違いを把握する調査；磯焼け海域と近隣の良い藻場海域で「流向流速」、「漂砂」、「照度」等の比較調査を行い、磯焼けに影響を及ぼしていると思われる環境項目を確認

する。

- ③原因に対し、『どのような磯焼け対策に取り組めばよいか』を解説している。

- ・ウニ食害に対して潜水作業による駆除
- ・母藻場が少ない場合、移植や種供給を検討
- ・魚食害に対しては、大規模な対策は難しいので、網などで藻場を防御

以上のようにガイドラインでは、磯焼けである藻場の減少の原因を明らかにし、藻場回復の取り組み方法を示したものであり、いわば対処療法と言える。現在の対策は、ウニや魚などの植食動物の食害などによる恒常的な磯焼け傾向の中で対策を実施しているが、これで大規模に藻場が回復することは極めて困難と言われている。

さらに、このような藻場回復の実施は、大掛かりな工事や作業を伴うので、膨大な費用を要する。しかも、長期間にわたって継続して藻場を維持する必要があるので、対策を実施した範囲内での効果は期待できるものの、自然に藻場が広がる事例は少ないと報告されている。

このような取り組みは、現場での失敗や成功などの多くのデータを取得できるが、抜本的な取り組みとは言い難い。いずれ海水温の上昇や栄養塩あるいは鉄など必須成分の不足や栄養分のアンバランスが生じると、せっかく回復した藻場も再び磯焼けの被害が起こるのではないかと危惧される。

2. 植物プランクトンの増殖には溶解性鉄が必須！

上記で磯焼けガイドラインの概要と問題点を述

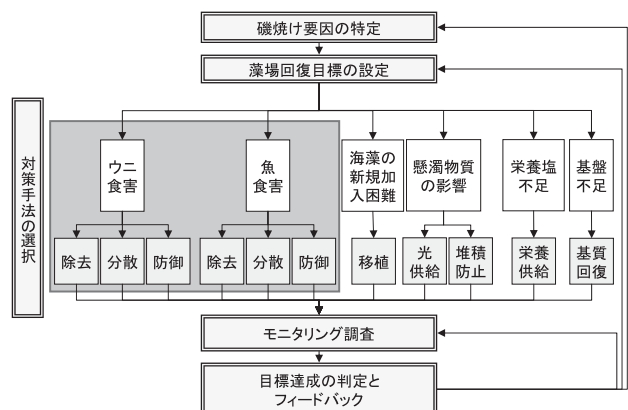


図2 磯焼け対策のフロー図

において短時間に数え切れないほどの海の生き物が世界中から集まり、膨大に発生したオキアミを餌として繰り広げる「アリューション・マジック」を紹介した。

南極海（写真1）においても、 -2°C 程度の表層付近の海水温に対して、底層水は 4°C 程度と温かい。水は 4°C で最も重くなるので底層部が凍ることはない（図4）。冷却された表層水は重いので沈み込むと、暖かい底層水が上昇して対流が起こる。とくに、底層には、プランクトンなどの死骸等の有機物が溜っているので栄養分を豊富に含んでいる。太陽光が当たると光合成により植物プランクトンが爆発的に発生し、これを餌とするオキアミが膨大に発生、豊富な漁場を作り出す（写真2）。

しかしながら、南極海では、植物プランクトンの繁殖に必要な「栄養塩」が多いにも関わらず、植物プランクトンの発生量は意外と少ないのである。豊富な栄養分と白夜と呼ばれる長い日照条件を考慮すると不思議であり、その原因は長い間謎で、「南極パラドックス」と呼ばれていた。1980年代後半に米国の海洋学者ジョン・H・マーティン博士は、その海域では鉄濃度が低いため植物プランクトンの成長を制限しているのではないか、という「鉄仮説」を提唱した。博士の考えは、「沿



写真1 南極は氷の大陸

岸域では河川を通して鉄が供給されるが、外洋では偏西風や貿易風に乗ってしか鉄が運ばれない。

つまり、南極海は、海流で運ばれる水溶性の栄養分は供給されるが、鉄分は溶存酸素で酸化されて不溶性鉄になるので沈殿するので、南極までは移流しにくいことになる。「南極大陸は陸地がほとんどなく、氷に覆われているため鉄が供給されず、植物プランクトンが発生しにくい」という考えである。とくに、鉄イオンは、植物プランクトンの光合成に必須の微量元素である。1990年頃には、このようなメカニズムが解明され、広範囲の海域に鉄を散布してプランクトンの発生が検証されたとの報告もある。

最近では、北洋などでも広範囲に鉄（水に溶ける硫酸鉄などの二価鉄）を散布して、植物プランクトンの増殖が確認されている。また、植物プランクトンは、海水中の炭酸イオン（二酸化炭素がイオン化して溶存）を消費して濃度を低下させるの

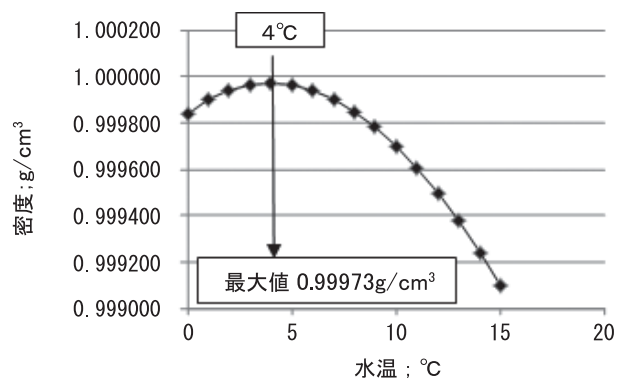


図4 水温と密度の関係（作成；鍵谷）



写真2 南極海のオキアミの群れ

で、逆に大気中からの二酸化炭素が取り込まれやすくなる。つまり、大気中の二酸化炭素濃度を下げる効果があるので、地球温暖化対策の一環としても注目され、大規模な検証が行われ始めている。

3. 溶解性鉄の役割と海藻の増殖事例について！

(1) 鉄分の役割と挙動について

①溶解性鉄の役割

植物プランクトンや海藻は、陸上の植物と同様に二酸化炭素と水と太陽光による光合成により増殖・成長する。溶解性鉄以外に窒素やりんも十分に存在していることが必須である。海中では、窒素は安定な硝酸塩として、りんはりん酸塩として溶存している。つまり、植物プランクトンや海藻の増殖・成長に必要な栄養分はすべて海水に溶けているので、細胞に吸収されて利用される。このように植物は、光合成で増殖・成長するが、光をエネルギーとして利用するためには、光合成色素であるクロロフィル等が必要であり、これらは鉄の関与により生成する。つまり、鉄分がなければ光合成は難しくなる。

一方、陸上には、土壤中に大量の鉄（不溶性の三価鉄）が存在する。枯葉などの有機物は微生物で分解されて有機酸を生成する。不溶性鉄はこの有機酸に溶けて植物に吸収され、クロロフィル等の光を吸収する色素が生成し、効率よく光合成が行われる。

このように植物が利用できる鉄は水に溶ける二価鉄イオン（ Fe^{2+} ）である。鉄は酸化（赤サビ）されやすく、酸化すると水に溶けにくい三価鉄（ Fe^{3+} ）になって沈殿し、植物には取り込まれない。自然界では、豊かな腐葉土がある広葉樹の森で、フルボ酸という腐食酸と土壤中の二価鉄イオンが結びつき、「フルボ酸鉄」という溶解性の錯体（キレート）ができる。これが川から海に運ばれて海藻や植物プランクトンの増殖の引き金になるのである。¹⁾

②鉄の挙動

地球の地表面には、鉄が5%程度存在する。乾

燥土壌1kgあたり鉄が50g程度含まれているが、地表には酸素が大量に存在するので不溶性の酸化鉄（三価鉄）として存在する。水に溶けていない鉄は細胞に取り込めないで、何の役にも立たない。つまり、鉄は十分に存在していても、水に溶けていなければ生物に対してほとんど役立たない。

しかしながら、このような不溶性の鉄も酸には溶けるし、酸素の少ない条件下では還元されて溶解性の鉄に化学変化する。たとえば、森林には、落葉や落枝などの有機物がたくさん存在し、これらが微生物で分解されると有機酸が生成される。その中でもフルボ酸は鉄を溶かして「フルボ酸鉄」となり、植物プランクトンや海藻に取り込まれる。また、空気の少ない地層や、溶存酸素の少ない湖底や海底では、酸化鉄が還元されて溶解性鉄（二価鉄）として存在する。

このように、森から河川により溶解性鉄が海に供給されるとともに、森の様々な栄養塩も供給される。湖底や海底では、溶存酸素が少ないので、不溶性鉄は還元されて溶解性鉄になり、これが底層から表層へ移動すると、表層が栄養豊富になり、赤潮が発生することを紹介した。

③栄養バランス：海藻を対象としてレッドフィールド比

植物の生長は、最も不足する栄養分の供給量によって制限を受ける。とくに、植物プランクトンの増殖に必要な栄養塩の比率は、一般的な外洋で

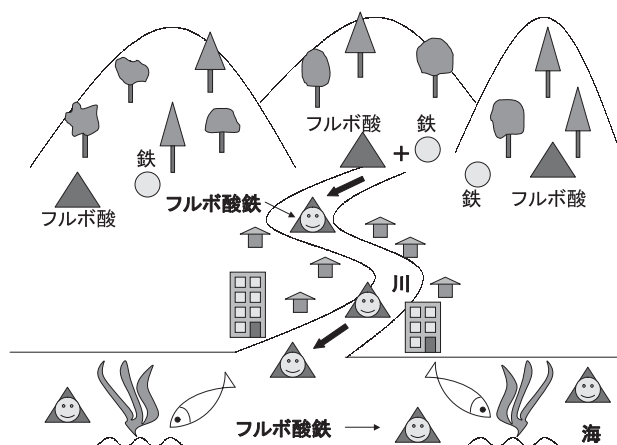


図5 フルボ酸鉄の挙動¹⁾

は、C（炭素）：N（窒素）：P（りん）の比率は、モル比で100：16：1とされている。これをレッドフィールド比と呼んでおり、海洋の栄養塩の状態を判断する重要な指標である。さらに、これに鉄を付加して示すと0.005と言われており、鉄の必要量はりんの1/200程度と非常に少ない。

この比は、海藻の種類、季節や海域などで変動するが、植物プランクトンの増殖や海藻の生長に必要な栄養分を決める場合に大いに参考になる。増殖に必要なバランスのとれた栄養分を重量で表すと、C：N：P：Fe（鉄）の比率は、100：18：2：0.02になり、重さではりんの1/100程度になる。いずれにしても非常に低濃度であるので、供給は容易と考えがちであるが、溶解性鉄として供給する必要がある。このように植物においても、ヒトと同様に栄養は豊富であってもバランスが悪いと健康に生長できないのである。

なお、海水には塩分やマグネシウムなど分析を阻害する物質が大量に含まれているので、分析精度を確保することが難しそうである。

（2）鉄供給による藻場回復事例について

磯焼けの一因として栄養塩不足が指摘され、その対応策として施肥が注目されている²⁾。施肥には、窒素系肥料や鉄分供給による磯焼け対策試験が行われており、施肥剤の選定や施肥方法など基礎的な技術資料が集まりつつある。ここでは、窒素やりんなどの栄養分に不足がない海域における鉄供給による植物プランクトンの増殖および藻場が回復した事例について紹介する。

《事例①》北海道増毛町の藻場再生実証試験³⁾

2004年10月より増毛町の遠浅海岸において鉄鋼スラグと廃木材チップを発酵させた腐植物質を体積比1：1で混合した施肥ユニット（図6）を海岸の汀線に埋設した事例である（写真3）。波や潮汐によってユニット中のフルボ酸鉄・フミン酸鉄が海水へ供給される仕組みである。試験開始翌年の2005年6月には、写真5のようにコンブをはじめとした大型海藻が海岸に繁茂し、海藻群落が再

生した。施肥した試験区と何もしない対照区（写真4）では、海藻湿重量の差は約230倍にも達した。また、翌2006年も効果が増大し、再生した海藻群落の範囲はさらに広がった。現在は効果の持続性評価を行う段階に入っている。

増毛町での実験成功を受けて、藻場再生実証試験が日本各地で行われるようになった。北海道内をはじめ、長崎県、三重県、和歌山県など、その

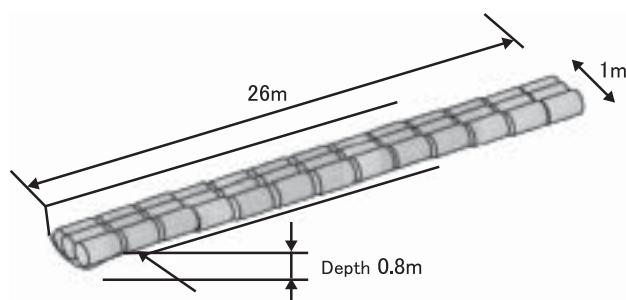


図6 鉄分供給ユニット



写真3 施肥ユニットの設置方法



写真4 実証試験前の海底の様子



写真5 試験後の海岸の様子

数は現在では約20ヵ所以上になり、各地で藻場再生効果が確認されるなど、この技術の有効性・汎用性が確認されている。

《事例②》「鉄炭だんご」による水質浄化と藻場回復事例

上記の事例のように大がかりな藻場回復技術では、日本中の磯焼け地帯で実施することは難しい。一般市民が実践できるような海の水質浄化や藻場回復技術の普及が磯焼けの解決の「切り札」になると思う。ちょうど、漁師が山に植林し、長期間かけて海の栄養分を安定に供給することにより豊かな海に変わり、カキ養殖が復活した仙台気仙沼の事例は有名である。現在では全国で漁師も参加して大規模に植林が実践されている。^{4),5)}

ところで、溶解性の鉄を簡単に供給する方法として、使用済みの使い捨てカイロの中身を再利用した「鉄炭（てったん）団子」を磯焼け地帯に投入して藻場回復を図る取り組みが注目されている。使用済みカイロは、鉄分と活性炭が密着しているので、水に浸すと鉄と炭素の間に電位差が生じ、二価鉄イオンが水中に溶け出して海藻に取り込まれ、増殖するという仕組みであり、研究者の名前から「杉本理論」と言われている。

山口県立水産高校（長門市）では、平成18年11月、同校前の岸壁から磯焼けした藻場に30kgの鉄炭団子を投入したところ、平成21年5月には、投入していないところと比べて豊かな藻場が形成さ

れたという（写真7、写真8）。また、海藻のアオサを使った実験では、生長の速度が2倍になったと報告されている。⁶⁾

一方、環境省資料編「地域の物質循環に係る情報整理」によると、干潟のヘドロの減少、藻場の再生、漁獲量の増大に効果があるとされる「鉄炭団子」を撒布し、底生生物や底質等の調査を実施した結果では、明確な改善効果が認められないとし、この場合、海域に十分な栄養塩がなかったため、団子の効果が発揮されなかったと想定されているとの報告もある。

以上、溶解性鉄の供給による植物プランクトンの増殖や海藻の生長が注目され、様々な取り組みが試行されている。しかし、その効果は海水の水質、とくに水素イオン濃度（pH）は鉄の溶解性に大きく影響するにもかかわらず、ほとんど検討されていない。このため、試験区でもアルカリ供給源となりうるテトラポットなどのコンクリート構造物の有無、まったく人工的な構造物のない自然海岸などの比較の検討も行われていない。海水中の溶解性鉄は非常に低濃度であり、しかも塩分や



写真6 鉄炭団子（5cm角）

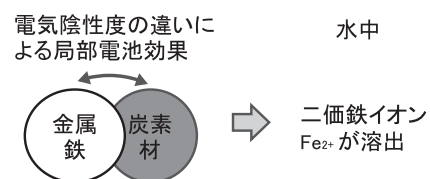


図7 二価鉄イオンの発生原理

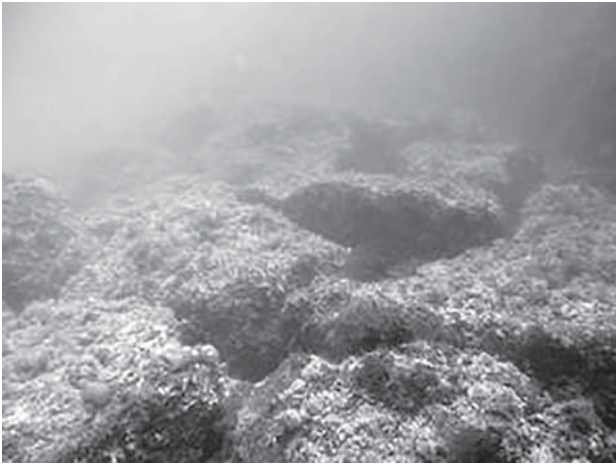


写真7 海底はサンゴ藻が繁殖

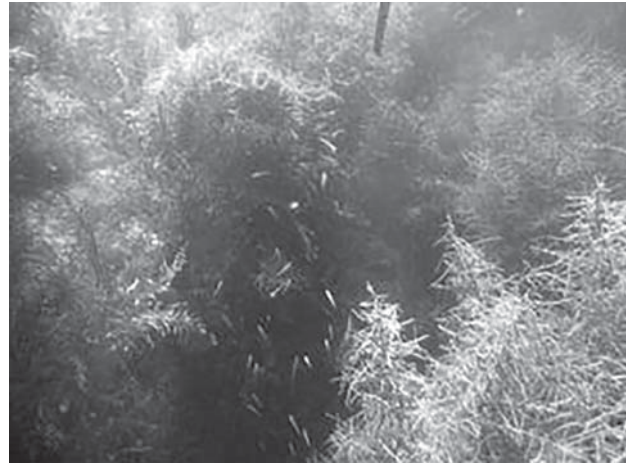


写真8 海藻が繁殖（小魚が集まる）

重金属類も多く含まれているので分析が難しい。pHは測定が簡単で費用もほとんどかからない。鉄の溶解性がpHと大きな関係があるのでもっと注目したい。なお、海水のpHは、8.1～8.2程度で弱アルカリ性であるが、様々な物質が溶存しているのでpHがほぼ一定になる「緩衝効果」があることも知られている。測定にも工夫が必要かもしれない。

おわりに

今回は、植物プランクトンや海藻は光合成により増殖・生長するが、鉄分が不足すると起こらないこと、鉄分の存在量は豊富であるが、ほとんど不溶性鉄であり、海藻などに取り込まれ難いこと、森林の有機物が微生物で分解して生成したフルボ酸と鉄が結合すると溶解性鉄が供給されること、海水中の栄養分とそのバランスが重要であるが、とくに溶解性鉄が増殖の引き金になりうることを解説し、溶解性鉄分の供給による植物プランクト

ンの発生や藻場回復の事例を紹介した。

一方、大量に海中に投入されているテトラポットはコンクリート製であり、もとはセメントである。セメントが溶けるとアルカリ性が強くなり、溶解性鉄分は不溶性鉄に変化し沈殿する。こうなると粒子状の鉄は細胞に取り込めない。つまり、植物性プランクトンの発生抑制あるいは海藻の成長阻害を引き起こし、磯焼けを促進することになりかねない。

今年の夏休みは、以前から磯焼けが進行している北海道南西部の日本海側の漁師町に滞在する。あの奥尻地震から20年以上にわたって、海中に投入されたテトラポットに付着する海藻の繁茂状況を観察したがほとんど付着しない。しっかり現場を観察して次回に報告したい。

技術士（衛生工学・建設・環境）
環境計画センター専任理事 鍵谷 司

〈参考文献〉

- 1) 後藤豊；情報アラカルト「森から海への贈り物；フルボ酸鉄」、大分県農林水産センター林業試験場
- 2) 磯焼け対策における施肥に関する技術資料；水産庁漁港漁場整備部（平成27年3月）
- 3) 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～』、海洋政策研究所 Ocean Newsletter（平成20年12月）
- 4) 畠山重篤；「森は海の恋人」、文藝春秋（2006年9月10日、第1刷）
- 5) 畠山重篤；「鉄が地球温暖化を防ぐ」、文藝春秋（第三刷発行：2010.2.20）
- 6) 福田、杉本ら；鉄イオン供給技術と藻場再生事例、土木学会第67回年次学術講演会、Ⅱ-116（平成24年9月）