

磯焼けの話⑪ 溶解性鉄で海を再生できるか！（1）

～磯焼け沿岸部における溶解鉄の供給実験から学ぶ～

裏方 思考

はじめに

海に囲まれた我が国では、年々台風が巨大化し、甚大な災害を被っている。今回（2019年10月）の台風19号では、上流域なので安全であると思っていた長野県千曲川までも氾濫し、住宅地帯が広範囲にわたって浸水した。この巨大台風は、太平洋沿岸部の海水温が高いため日本に近づいた台風にさらに水蒸気が供給されたためであるとの報道があった。つまり、地球温暖化による海水温の上昇が大きな要因である。海水温の上昇は、海の生態系にも大きな影響を及ぼしており、身近では「磯焼け」にはじまり、過去には豊富に採れたニシン、サンマ、イカなども極端に不漁になってきている。

地球温暖化防止は、大気中の二酸化炭素（以下、CO₂）の濃度を増加させない、できれば減少させることが基本である。最大の原因であるCO₂の排出源である「化石燃料を減らす」ことであるが、短期間では不可能であろう。他方、CO₂を植物に取り込むことにより吸収量を促進することも有効であり、大気中の濃度を減らすことができる。陸上では光合成によりCO₂を取り込んで生長・繁茂する植物が大きな効果を果たしている。しかも植物は豊かな生態系を育み、人類の食料供給の源である。しかし、森林地帯は全地球面積の約1割程度であり、あらたに広大な森林を創造することは至難であり、むしろ開発や食料生産のために荒廃している。

一方、海は全地球の約7割強を占めており、CO₂排出量の3割を吸収するといわれている。海水中には大気からCO₂が溶存しているので光合成が起こり、植物（藻類、プランクトン）が生育し、海

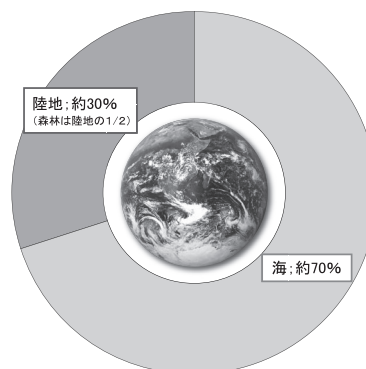


図1 地球に占める海の割合

洋生物の栄養供給の源となり、豊かな生態系を創造している。この広大な海のCO₂を消費する植物の増殖を促進できれば「温暖化防止の切り札」になるかもしれない（図1）。

このように、光合成による植物（海藻やプランクトン）の成長、繁茂には太陽光、CO₂と水のほかに窒素などの栄養分や微量のミネラルが必須である。とくに、微量でも水に溶けている鉄分が光合成に重要な役割を担っており、その事例を当誌155号において、溶解性鉄供給による藻場回復事例として「鉄炭団子」の投入事例や鉄鋼スラグ等を海岸部に埋設した事例を紹介した。今回は、これらの鉄供給実験結果を独自の視点から検討し、自称「化学者」の考えを紹介する。

1. 沿岸部における鉄供給による藻場回復事例 ～北海道増毛町における藻場再生実証試験～

海洋における植物プランクトンの発生も、沿岸部における藻場回復も、海水に溶存しているCO₂と水と太陽光による「光合成」により起こるのであり、陸上の植物の生育と同じメカニズムである。

いずれもCO₂を使って「固体の植物」に変えて固定するので、大気中濃度が低下し、地球温暖化の抑制に寄与するのである。

従来より沈没した鉄の船周辺は良好な漁場となっていることは良く知られている。また、これまでに鉄と炭で固めた「炭団子」を磯焼け地帯に投入する簡易な方法と大がかりな実証試験をしては「鉄鋼スラグの鉄分を溶解しやすい方法で沿岸に埋設した藻場回復事例」について概要を紹介した。後者についてより詳しい資料を入手できたので、これらのデータを詳しく検討し、より効率的な溶解鉄の供給方法について考えてみた。

(1) 実証試験地の北海道増毛町の位置図

北海道の日本海沿岸部は、昆布やワカメなどの海藻やニシン、ホッケなどが豊富に水揚げされる豊饒の海であった。しかしながら「磯焼け」が進行するとともにこれら「海の幸」が消えつつある。海流変化、地球温暖化や水質汚染などが原因と言われているが明確でない。

図2に示した増毛町（ましけちょう）は、磯焼けの影響を受けている北海道西沿岸部に位置する漁業の町である。戦後にはニシンが海を埋め尽くすほどの豊穡の海であり、小さな水路までニシンが遡上したと言われており、各地に網元の居宅兼作業場である「ニシン御殿」（写真1）がその面影を残す。明治時代の最盛期には100万トンもの漁獲量だったが、昭和30年代になると100トン程度になったとの記録がある。その後、稚魚放流や刺

し網の目を大きくする等の対策を講じたことにより、ゆっくりと回復傾向にある。なお、ニシンの卵はおなじみの「カズノコ」である。大衆魚のニシンよりも高価なカズノコが目当てであり、とくに「子持ちコンブ」が有名である。ニシンは、産卵期になるとぶつかった海藻に卵を産み付ける習性があり、昆布が豊富に繁茂していたことを伺わせる。

(2) 鉄分供給ユニットを海岸に埋設した事例^{1)~3)}

1) 試験方法

2004年10月に増毛町舎熊海岸において、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3）を海岸の汀線に埋設した事例である（写真2）。鉄鋼スラグは鉄分を含んでいるが、①溶解性が低いこと、②海水の溶存酸素により酸化されるので海中には溶存しにくい、植物の腐食により発生するフルボ酸は鉄と化合して溶解鉄が生成することが知られている。いわば、森林から供給される溶解性鉄であるフルボ酸鉄の供給メカニズムを応用した方法である。具体的には、①製鋼スラグと②腐植土を混合したものをヤシの袋に詰めた鉄分補給ユニットを強固な鉄製ボックスに入れた人工的な腐食酸鉄を、海の波打ち際と沖合いとの両方から埋め立てた。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。なお、実験区は図4に示すように、対照区から汀線で約100m程度より離れていない。

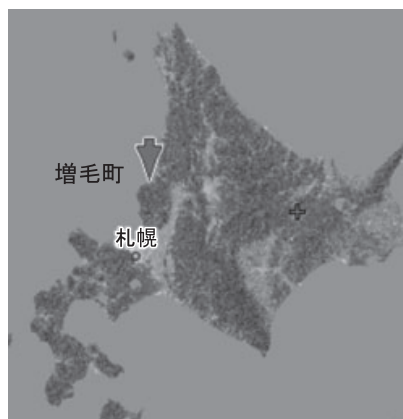


図2 実証試験を行った増毛町の位置図



写真1 留萌の「ニシン御殿」



写真2 施肥ユニットの設置



写真3 実証試験前の海底の様子



写真4 試験後の海岸の様子

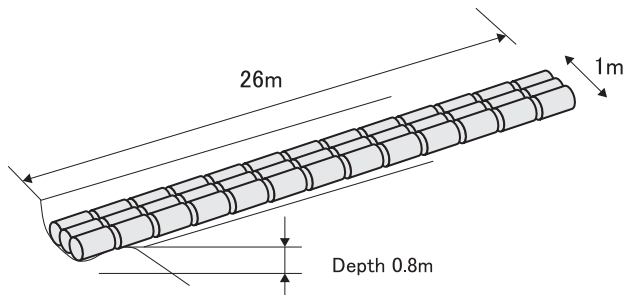


図3 鉄分供給ユニット

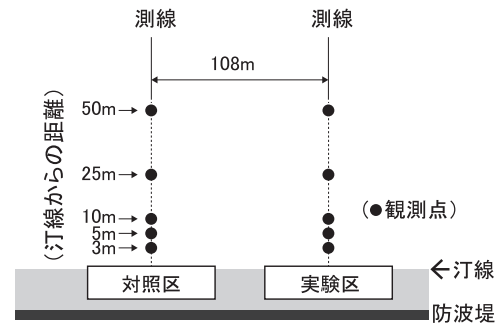


図4 実験区と対照区の位置

2) 試験結果

試験開始翌年の2005年6月には、写真4に示したように試験前の写真3と比べてコンプ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、さらに翌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との簡易報告がある。

実験区と対照区の溶存鉄濃度および昆布等の単位面積当たりの海藻重量の経年変化を図5および図6に示す。設置後の半年(1年目)は特に変化がなかったが、2年目の2006年には実験区の浅瀬における海藻の現存量が対照区より多くなった。同時に実施された水質調査で全窒素と全リンの濃度は調査区と対照区とも同じであったので、海藻が増殖した理由は鉄分供給効果と考えられた。

溶解鉄の測定は3年目から実施されたが、5年目までは実験区で濃度が高かった。沿岸の海水はpHや溶存酸素が高く、鉄鋼スラグから鉄は溶出しにくいことが予想されるが、海岸に埋設したことによる還元条件、pHの低い地下水の浸透によって鉄の溶出量が多かった可能性があるとの報告されている。

鉄鋼スラグを用いた磯焼け対策は、新日鐵により実施されており、北海道増毛町のほかに寿都町、函館市、東京都三宅島、千葉県館山市、三重県伊勢志摩、和歌山県田辺市や串本町、福岡県北九州市、長崎県松浦市や西海市を含め、全国の20ヵ所で実験されている。地域によって海中、海況条件が異なり、一律の成果が上がっているわけではないと報告されているが、磯焼け対策の一つとして注目されている。

2. 鉄供給による藻場回復フィールド実験から学ぶ

溶解鉄供給が藻場回復に有効であることが目視で確認できるが、フィールドにおいては時々刻々と変化する海流や海水温や水質、あるいは地下水や水質汚染物質の流入など、多くの項目が影響を及ぼす可能性がある。今回の実証試験についても詳細な報告書ではなく、投稿された報文や講演資料に掲載されたデータなので必ずしもすべてではない。データは取得されていると思うが、次のような事項について調査、測定が行われていれば、より有効な方法を見出せるのではないだろうか。

①図5で示した溶解鉄濃度は3年目以降に測定され、海藻重量の測定も欠落があり、溶解性鉄濃

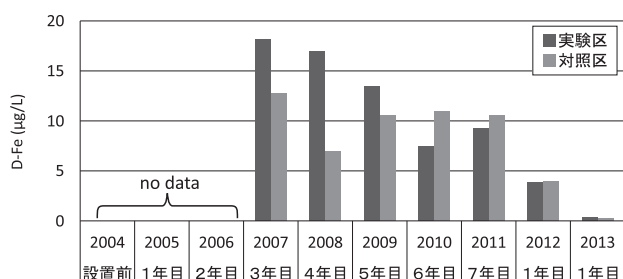


図5 溶解鉄濃度の経年変化

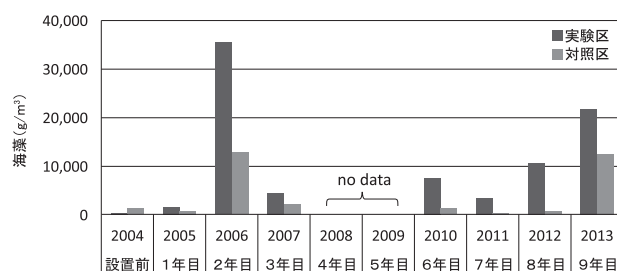


図6 海藻密度の経年変化

度と海藻密度の相関を定量的に確認できない。当然、実験前の海水の測定データが重要である。とくに、海藻類の生育に必須の栄養素の濃度と割合（C：N：P：Fe）を明らかにし、成分バランスから不足している成分を見出して供給することが合理的であろう。

＊リービッヒの最小律；海藻類の繁茂で必要とする無機養分のうち最も少量存在するものによって支配されるという法則

②実験区と対照区はわずか100m程度より離れていないので、海流の影響で対象区の濃度が高くなるなど対象区の役割が機能していないのではないかと。例えば、500mと1,000mの離れた位置に複数の対象区を設定すればより正確な判断ができるのではないかと。

③海藻重量は、単位面積当たりの重量で示されているが、より広い範囲について海底写真を定期的に撮影し、繁茂状態を判断する方法が合理的で有効ではないかと。あるいは海藻の所定量を網かごで育てる等も有効ではないかと。

④鉄鋼スラグは鉄分を含むが、そのほかにも微量ではあるが様々な有害な重金属が含まれている。これが海中に埋設（投棄）された場合の環境への影響を把握する必要がある。これについては詳細に測定が行われており、その結果が公表されているが、ここでは省略する。

⑤実験前の海底の海藻の生育状況から、溶解鉄供給により藻場が大きく改善されていたが、フィールド実験なので、気象条件の影響を受けやすく、ほかにも要因がある可能性が高い。例えば、テトラポットや護岸などコンクリート構造物の有無、沿岸部の地下水量と水質、河川の影響、pH

と海水温度の連続測定、海水の溶存酸素、窒素などの栄養分やレッドフィールド比など、海藻の繁茂に必要な成分分析が不足している（未公表かも！）。しかしながら、溶解鉄供給が藻場回復に大きな効果を果たしている可能性が高いことを検証した価値はあるので、様々な地区における実験データの蓄積とデータの公表が望まれる。とくに、効果が確認されなかった事例の原因究明は重要な知見になる。

⑥当誌153号で「鉄炭団子」による溶解性鉄の供給による藻場回復事例を紹介したが、投入前の栄養分やpHなどの測定値がないことや、二価鉄イオンの発生原理は解説されているが、実際の測定データがない。投入により藻場回復に寄与したとする定性的な実験結果である。藻場回復が目視でも明らかなので、本当に溶解鉄の供給効果なのかをきちんと検証する必要がある。ビーカ試験でも確認できそうである。図7の二価鉄イオンの発生原理で本当に反応が起きていることを検証することは基本である。

《海水中の溶解鉄の分析について》

海水中に多くの成分が高濃度で含まれている。このため、これら不純物の除去が必要であるので、微量の溶解鉄の定量的に正確に分析することは難しい。

【参考事例；当誌153号に掲載】

水質浄化と藻場回復事例として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「鉄炭団子」を磯焼け地帯に投入して藻場回復を図る取り組みを紹介した。使用済みカイロは、鉄分と活性炭が密着している

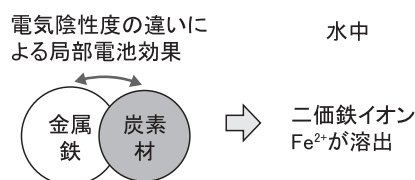


図7 二価鉄イオンの発生原理

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る。磯焼けした藻場に鉄炭団子を投入したところ豊かな藻場が形成された、あるいは、海藻のアオサを使った実験では、生長の速度が2倍になったと報告がある。

しかし、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の報告もある。

おわりに；提案！

「豊かな漁場は豊かな森林により形成される」ことは良く知られたことである。植物の分解過程で生成する有機酸であるフルボ酸と土壤中に豊富に存在する鉄分と反応してフルボ酸鉄が生成され、これが河川から海に供給され、微量ではあるが光合成の引き金になる。フルボ酸鉄は、空気中あるいは河川、海域の溶存酸素では酸化されにくいので溶解性鉄として供給される。つまり、自然のメカニズムを真似て人工的に溶解鉄を供給する方法は合理的である。藻場回復の効果は、対象区と実験区と比較することが基本であるが、上記の事例ではその距離は100m程度しか離れていない。そ

の結果、対象区の溶解性鉄分の方が高いこともあり、比較のベースであるバックグラウンドとして機能していない。対象区は複数設定することが適切である。また、フルボ酸鉄以外の溶解鉄は海水中の溶存酸素により酸化されて不溶性鉄に変化する。海中の溶存酸素 (DO) 濃度も重要な測定項目であるがデータがない。

ところで、溶解性鉄分の供給方法に「鉄炭団子」の散布や鉄鋼スラグ等の埋設方法が試行されているが、もっと効率の良い供給方法はないのであろうか？ この事例では、鉄と炭あるいは鉄と腐食物質との化学反応により、溶解性の二価鉄を化学的に生成し供給する方法である。より簡易に溶解鉄を供給する方法は、二価鉄化合物を散布する方法が浮かびあがる。その条件は、安価な固体で入手が容易なもので、かつ水質汚染の懸念がない化合物が使用の条件である。たとえば、塩化第一鉄 (FeCl_2) は水に溶解しやすい重い固体 (比重2.7) である。粘土などで固めてゆっくりと溶かして供給する方法、さらに海水の条件によっては、窒素やリンなど栄養分を練りこんだ固化物を投入するなどの実験も有効と思われるがいかななものか!!

これを磯焼けした海底の溝などにスポット的に投入すれば、効率良く溶解性鉄を供給できる。



次回は、海洋に鉄を大規模に散布して植物プランクトンの増殖実験の結果を紹介します。

鍵谷 司 (ペンネーム；裏方思考)

環境計画センター

技術士 (衛生工学・建設・環境)

〈引用・参考文献〉

- 1) 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)
- 2) 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回年次溶解鉄学術講演会、II -116 (平成24年9月)
- 3) 地域活性化シリーズ講演会記録 (2010-1)；「鉄鋼スラグを用いた藻場再生について」新日本製鐵株式会社 技術開発本部 堤直人 (2010年5月18日)