

磯焼けの話⑫ 溶解性鉄で海を再生できるか！（2）

～海洋における溶解鉄の散布実験について～

裏方 思考

はじめに

地球温暖化を抑制するためには、CO₂の排出削減や吸収促進などが重要であり、とくに、陸域の植物や海域の海藻や植物プランクトンはCO₂吸収に大きな効果をもたらしている。これらは海水に吸収された大気中のCO₂を、光合成により植物プランクトンとして固定して大気中の濃度を低下させる。陸域の植物は毎年、排出量の約半分を吸収しており、地球の全面積の約7割を占める海域では、約30%を吸収しているといわれている。

海には膨大な海水並びに大気中から溶け込んだCO₂が豊富に存在する。したがって、太陽光が当たると植物プランクトンが増殖し、さらに窒素やリンなどの栄養塩が十分に存在する等条件が整うと、爆発的に増殖することができる。しかしながら、世界の海には、植物プランクトンの成長に必要な「栄養塩」が多いにも関わらずその発生数が少ない海域がある。

このような海域では、光合成をつかさどる微量栄養素の溶解性鉄分が不足していることが明らかにされている。つまり、海域に鉄を撒くことによって植物プランクトンを増やすことができる。その結果、海中のCO₂が消費され、この消費分が大気から吸収されるので大気濃度が低下し、地球温暖化防止の効果が期待できるとして大規模な鉄散布実験が行われている。

以下、海洋における溶解性鉄の働きや、植物プランクトンの増殖の鍵となる「鉄仮説」及び鉄散布実験の概要を紹介します。

1. 植物プランクトンの光合成における栄養塩類の働き

（1）溶解性鉄等の微量栄養塩の働き

植物プランクトンの増殖に必要な栄養素とその働きを図1に示した。植物プランクトンは基本的には、海中に豊富に存在するCO₂と水を材料として、太陽光により葉緑体を光合成して増殖する。例えば、窒素はアミノ酸やタンパク質合成に、リンは核酸やATP（アデノシン三リン酸）などの合成に、珪素は珪藻の殻の成分として必要であり、いずれも海洋では濃度が低いので不足することが多い。しかし、これだけでは細胞は増殖することはできない。光合成を促す微量栄養成分である溶解性鉄が必須元素であり、不足すると光合成、つまり、増殖は制限される。

ところで、最近、窒素やリンなど栄養分が豊富に存在するにもかかわらず、植物プランクトンがあまり増えない。つまり、クロロフィルが少ない海洋が存在することがわかってきた。このような海域をHNLC（High Nutrient Low Chlorophyll）海域というが、光合成に必須の微量栄養素である溶解性鉄が不足していることがわかってきた。

鉄は、光合成の電子伝達系、光合成色素の合成系、硝酸還元系などに深く関わっており、必須微量元素の中でも最も重要な元素であり、欠乏すると光合成が阻害される。地球上には鉄分が大量に存在しているが、難溶性の固体として分布している。光合成には、水に溶解している鉄のみが機能するのである。さらに、水に溶存している鉄も空気中の酸素や海中の溶存酸素と速やかに反応して難溶性の水酸化鉄（3価鉄）に変化するので、常

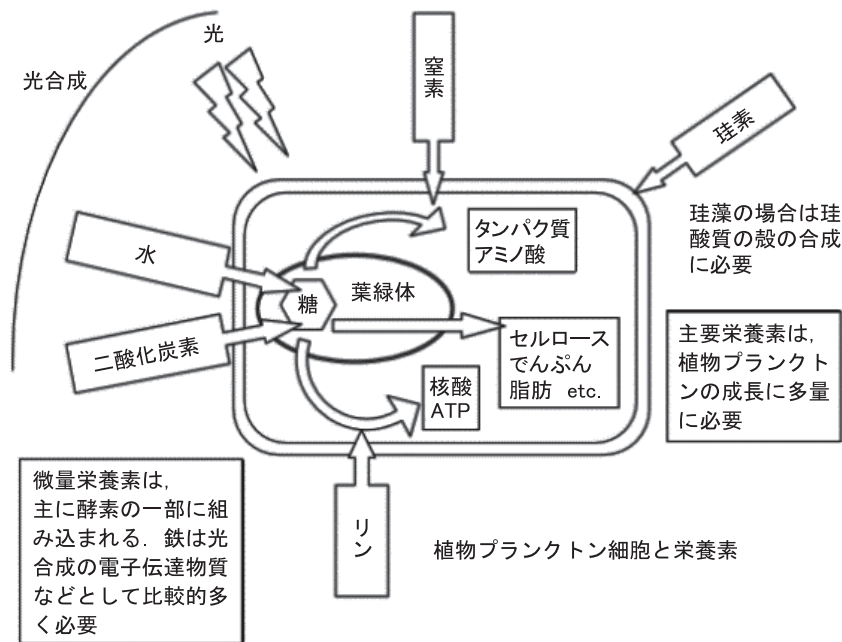


図1 プランクトン細胞と栄養素の関わり¹⁾

に鉄不足に陥りやすい。難溶性の鉄の溶解度は極めて低い（1 ng/l以下⇒ppb オーダ：ppm の1/1,000）ので、溶解性鉄供給は難しい。

一方、植物プランクトンの豊富な海域は、高緯度域、沿岸浅海域、沿岸湧昇域、赤道湧昇域などの底層水から表層水への流れがある海域である。一般的に底層部は、動植物の死骸等が沈殿するので栄養分は豊富に存在し、かつ溶存酸素の少ない還元雰囲気になるので、難溶性（固体）の鉄が還元されて溶解性鉄に変化しやすい。昇流等により太陽光の当たる表層へと移流すると植物プランクトンが大発生するのである。しかし、南極海は有名な湧昇域であり、窒素やリンが多いにも関わらず植物プランクトンは少ないことが知られており、「南極パラドックス」と呼ばれ、長い間、その原因は謎であった。

(2) 植物等の生育と栄養バランス²⁾

植物等の生育や収量、植物プランクトンの増殖には、光合成を行う微量栄養分が必要であり、必要とする無機養分のうち最も少量に存在するものによって支配されるという「リーベッツヒの最小律」という法則があり、これを栄養塩のレッドフィールド比（Redfield ratio）という。植物プランクト

ンは、海中から栄養分である炭素（C）、窒素（N）、りん（P）を106：16：1の比率で摂取し、同じ比率で体組成を合成し維持する。植物プランクトンの生息の場である海水中に栄養塩として存在するNとPの比はやはり16：1であり、それは世界の海洋の表層から深海まで共通している。

最近では、太平洋の高緯度海域や赤道湧昇域で植物プランクトンの光合成を遅らせている（律速）原因は溶存鉄（Fe）であり、レッドフィールド比は炭素（C）：窒素（N）：ケイ素（Si）：りん（P）：鉄（Fe）＝106：16：15：1：0.001としている。この比から、例えばFeが枯渇している海域に1モル（26g）の溶存鉄を散布すると、106,000モルのCO₂（約4.7トン）が有機物として固定されると算定される（重さは筆者が計算）。なお、上記のレッドフィールド比は、任意の場所における栄養塩のバランス状態を把握する判断指標として使うには有効であるが、海域により、あるいは同一の種であっても環境により代謝が変化しうるので、一定不変ではないことに注意する必要がある。

(3) 「生物ポンプ」による炭素循環

ところで、CO₂が植物プランクトン（有機物）に変換されたとしても、その後の動態（固定、分

解等)が重要なのである。動物プランクトンに採餌されれば漁場が豊かになるが、動物プランクトンの増殖は植物プランクトンよりも遅いので多くが残存する。残存したプランクトンが死滅して分解すると再びCO₂を生成することになるので、その行方が問題なのである。

海洋では図2に示したように、生成した植物プランクトンは、有機物の粒子として沈降するが、中・深層でバクテリアなどにより分解・再生され、無機炭素に戻る。その一部は海底に堆積物となって蓄積し、中層や深層に溶け込んだ炭素は数十年から数百年の間、大気から隔離され海中に存在する。このような植物プランクトンによるCO₂の移送を「生物ポンプ」(Biological pump)といい、炭素循環の要である。

つまり、HNLC海域に鉄を散布し、植物プランクトンが爆発的に発生して、生物ポンプの作用により中層や底層部に炭素分が移流して固定した場合には、大気中のCO₂を長期間にわたって封じ込めることができ、一方、分解するとCO₂が再び大気へ供給されることになる。

2. HNLC海域とマーチン博士の「鉄仮説」

(1) HNLC海域とはどこか？

HNLC海域は、表層に栄養塩が高濃度で存在するにもかかわらず、微量栄養塩の鉄が不足しているため、植物プランクトンの増殖が抑制された海域である。世界の三大HNLC海域は、図3に示すように東部太平洋赤道域、南極海、北太平洋亜寒帯域であることが知られている³⁾。なお、カリフォルニア沖やペルー沖もHNLC海域であることが知られているが、一時的に高栄養塩・低クロロフィル状態が起こるような海域はHNLC海域とは呼ばない。

HNLC海域における溶解性鉄不足の要因として次のように報告されている。

- ①溶解性鉄は陸水、海底から供給されるが、溶存酸素と反応して速やかに不溶性の水酸化鉄になる。他の粒子に吸着して沈降し、海中の溶解鉄濃度が低下する。
- ②大陸から偏西風によって鉄分を含む黄砂として運ばれる量が多いが、太平洋の東側にはあまり届かない。
- ③窒素やリンは沈殿しないので遠方まで届けられ、深層水中にも十分に溶解している。

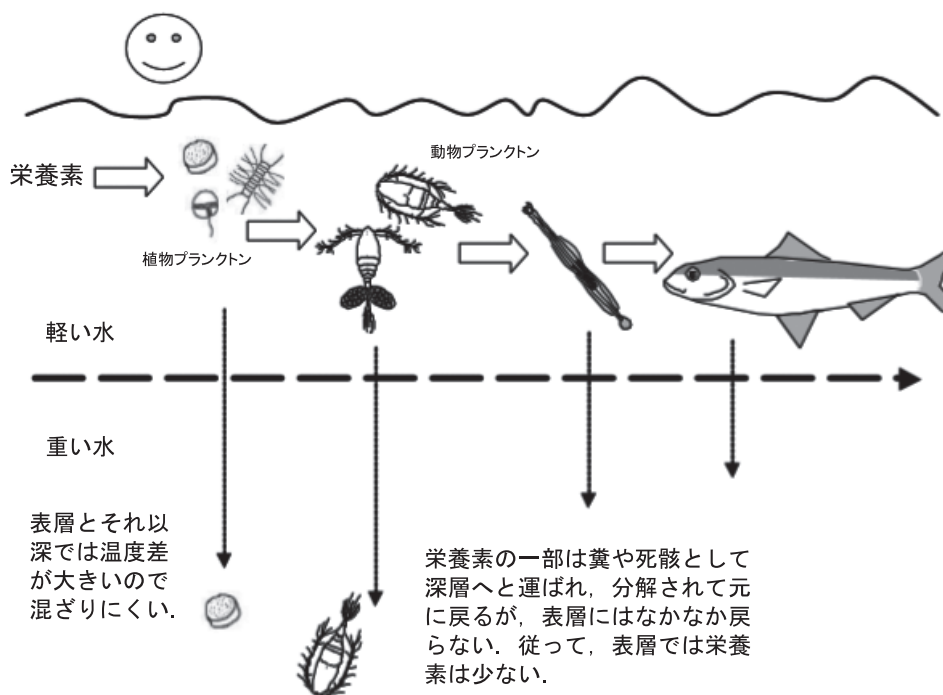


図2 「生物ポンプ」による炭素循環¹⁾

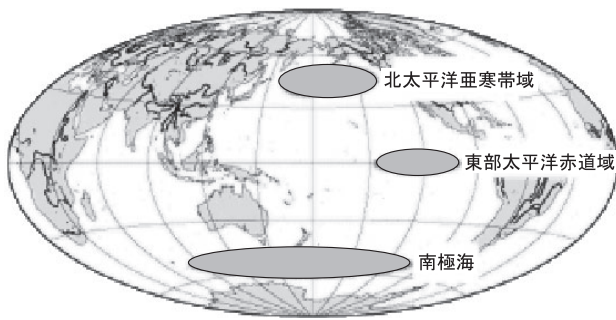


図3 代表的なHNLC海域³⁾

④鉄分は、溶存酸素との反応で速やかに難溶性の水酸化鉄に変化して沈降するので、陸域から遠方には届かない。

このように、固体として沈殿した難溶性鉄は、深層部における還元雰囲気の中で溶解性鉄に変化するが、栄養塩等の材料は豊富に存在しても太陽光が届かないので光合成は起こらない。植物プランクトンが増殖するためには、深層の溶存酸素が低く栄養分に富んだ還元水が表層へ移流する必要がある。とくに、北太平洋亜寒帯域は栄養塩に富む深層水の湧昇によって世界有数の高い生物生産性を誇る海域であるが、この海域は微量栄養塩である鉄の供給が不足していることで生物生産が制限を受けていることでも知られている。この海域は、栄養分やミネラルが豊富なベーリング海の外側に位置しており、アリューシャン列島により流出が制限されているため、溶解性鉄が不足しているといわれている。

(2) マーチン博士の「鉄仮説」とは！⁴⁾

以下に「鉄仮説」が実証された経緯を示す。

- ①HNLC海域で植物プランクトンの発生が少ないのは、溶解性鉄不足によると予想されていた。
- ②海洋学者マーチン博士は、南極海がHNLC海域になるスキームを「鉄仮説」によると提案した。
- ③博士らは、極微量鉄分の分析においては様々な要因で鉄分が混入するが、クリーン化により精度の高い測定に成功した。
- ④博士らは、南極海などのHNLC海域で採水し

て船上で溶解性鉄分を添加し、太陽光を当て植物プランクトンの発生を確認した。

- ⑤その後、南極海等のHNLC海域において飛行機から鉄分を散布して植物プランクトンの発生や海中のCO₂濃度の低下を確認した。

このように、栄養塩が豊富に存在するにもかかわらず植物プランクトン等が少ない海域があることは1930年には知られていた。海水中の鉄の特性から溶解鉄濃度が極めて低くなると考えられることから、前述した「リービッヒの最少律」に基づき鉄が最も欠乏しやすい成分であるとの類推に基づくものであった。

HNLC海域における植物プランクトンの発生を制限する様々な説の中で、海洋学者マーチン博士が「鉄仮説」を提示した。代表事例である南極海は栄養分が豊富で、太陽光も十分にあるにも関わらず植物プランクトンの発生が制限されており、その原因は長い間謎であり「南極パラドックス」と呼ばれていた。

ここは大陸から離れすぎているため溶解性鉄が到達せず、また、陸地がほとんどなく、水にも覆われているため鉄が供給されないことから、植物プランクトンが発生しにくい、という説である。

しかしながら、海水中の極微量の鉄分を測定する技術がなかったため仮説にすぎなかった。当時の測定技術では、海水中の極微量(ppbレベル)の溶解性鉄は、鉄製の観測船や実験室、採水や実験器具、試薬、培養実験操作過程などから微量に鉄分が混入することを防ぐことができず、高い精度で測定できなかったのである。

その後、博士らは北太平洋において鉄分の混入しないクリーンな海水中の鉄濃度を測定することに成功した。彼らは、HNLC海域の一つである北太平洋東部亜寒帯域の表層水を採取し、船上でこの試料に極微量の溶解鉄を添加し、太陽光を当てて培養実験を行った。その結果、わずかな鉄添加により植物プランクトンが増殖されたことを初めて確認した。しかし、これらの結果が実際の海洋表層におけるより低濃度の溶存鉄においても植物プランクトンの増殖が起こるか否かは不明であった。

その後、東部赤道太平洋と南極海で100km²ほどの海域に飛行機から鉄を散布する現場実験が行われ、鉄制限がなくなれば、植物プランクトンが増殖し、海水中のCO₂濃度が低下することが明らかにされた。地球温暖化の原因となるCO₂を、海洋に鉄を撒くことにより海に吸収させることができることから、温暖化対策技術の一つとして注目されている。

3. 海洋への鉄散布実験について

鉄散布によって増えた植物プランクトンの行方（海底に沈降するか、表層で分解するか）及び生態系や漁業への影響に関しては不明な点が多い。このため、CO₂の吸収手法としての鉄散布手法の評価とその影響を明らかにするために、北太平洋亜寒帯のHNLC海域における鉄添加実験の実施が強く求められていた。このような背景のもとで環境省研究費によりCO₂吸収技術としての海洋鉄濃度調節の有効性ならびに鉄濃度変化が海洋生態系や漁業生産に与える影響を明らかにすることを目的に大規模な鉄散布実験が行われた。

（1）「鉄濃度調節が海洋生物に及ぼす影響に関する研究」要旨より

平成13～15年度にかけて、「海水中微量元素である鉄濃度調節によるCO₂吸収機能の強化と海洋生態系への影響に関する研究（1）鉄濃度調節が海洋生物に及ぼす影響に関する研究」が、環境庁予算約5,800万円を用いて実施された。

2001年6～8月に水産庁調査船「開洋丸」を用いて鉄濃度調節および生物の応答調査を西部亜寒帯太平洋（実験名「SEEDS」）、また、2002年7～8月にカナダグループとの共同研究により東部亜寒帯太平洋（実験名「SERIES」）において観測を実施した。2002年実験では、2001年実験とは異なり、植物プランクトンブルーム（爆発的に増殖した塊）のピークは2週間後に観察され、観測終了時の植物プランクトン濃度はピーク時の1/4以下になった。すなわち高緯度域鉄濃度調節実験では初めてブルームの消滅期を観測したといえる。2

回の実験を通して以下8項目のおもな成果が得られた。

- ①外洋域における鉄濃度調整技術を確立した。
- ②SF₆（六フッ化硫黄）の連続測定技術、これを用いた水塊追跡技術を確立した。
- ③外洋域における鉄濃度調整に対する生物応答観測法を確立した。
- ④動物プランクトンの摂餌速度は4～15倍に上昇し、増えた珪藻を摂餌し、生残率、成長速度が高くなることが明らかになった。
- ⑤鉄濃度調整実験で初めて微量金属の変動が測定され、その動態が明らかになった。
- ⑥国際的協力体制のもと鉄濃度調節実験を行い、長期（26日間）の観測を実現した。
- ⑦東部・西部亜寒帯太平洋にける鉄濃度調節に対する生物化学的応答の差が明らかとなった。
- ⑧東部では珪藻の応答が西部に比べ遅く、珪藻増殖前に円石藻が増殖し、植物プランクトンの放出するDMS（硫化メチル）を観測した。

なお、参考に海洋における鉄散布実験が日本やカナダなどで実施されてきたので、実験海域を図4に、また、実験名と実施年度を以下にまとめて示す。詳細はネットで検索して下さい。

- ① IronEx- I（1993年）、② IronEx- II（1995年）、③ SOIREE（1999年）、④ EisenEx（2000年）、⑤ SEEDS- I（2001年）⑥ SOFEX-North（2002年）、⑦ SOFEX-South（2002年）、⑧ SERIES（2002年）、⑨ EiFex（2004年）、⑩ SAGE（2004年）、⑪ SEEDS- II（2004年）、⑫ FeEP（2004年）
- なお、大西洋亜熱帯域の貧栄養海域で行われた⑫ FeEPでは、鉄とりんが同時に散布された。

（2）西部亜寒帯太平洋で行われた鉄散布実験の事例

2001年7月に水産庁調査船によって図5に示す西部亜寒帯太平洋で行われた。およそ80km²の範囲に350kgの鉄（硫酸鉄）を、海水に溶かして船上から散布した（写真1）。散布後の海水中のCO₂濃度、クロロフィル数、硝酸塩濃度の変化を図6に示す。散布した鉄濃度は極微量であるが、2日

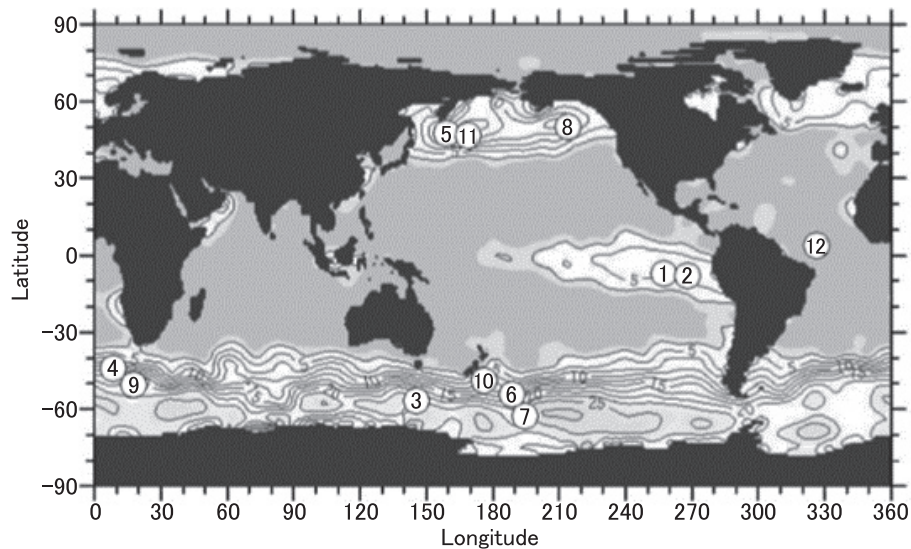


図4 海洋表層の硝酸塩濃度分布と鉄散布実験の実施海域⁴⁾ (Latitude；緯度、longitude；経度)

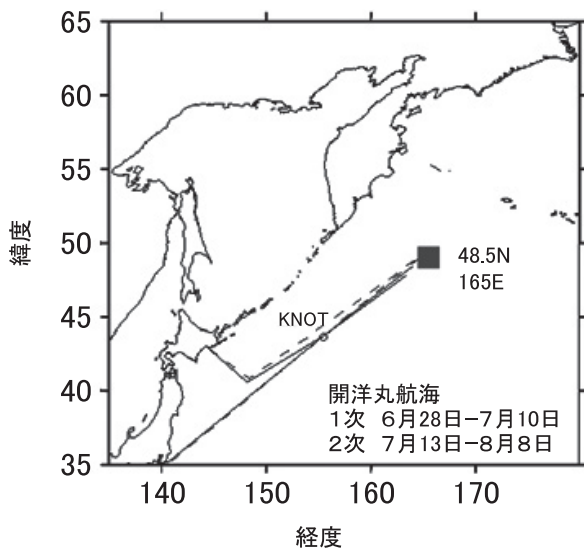


図5 鉄散布実験の海域（西部亜寒帯太平洋）

目には植物プランクトンの増殖に効果が現れ、4日目から植物プランクトン生物量の指標となるクロロフィル濃度が増え始め、9日目には鉄濃度調節前のほぼ17倍に増加した。このころになると、植物プランクトンで海水が色づき、鉄濃度調節域とその外を肉眼でも区別することが可能となったと報告されている。

特徴的な実験結果を以下に示す。

- ①海中のCO₂濃度が170ppm減少した。このことは大気中から吸収していることを意味し、大気中の濃度を低下させる効果が期待できる。
- ②植物プランクトンの目安であるクロロフィル

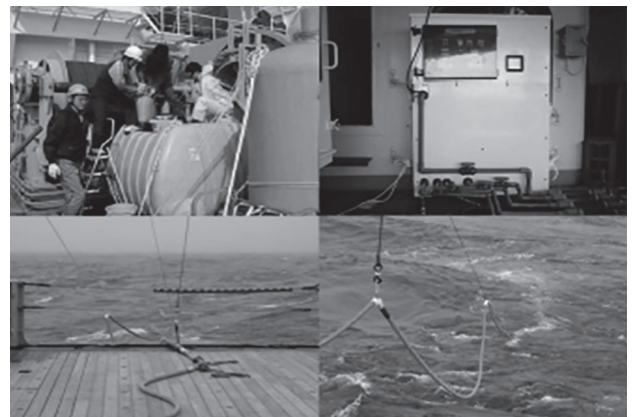


写真1 開洋丸による船上からの鉄散布状況

が約20倍増加した。

- ③海中の硝酸塩濃度が約1ppmに低下した。植物プランクトンの増殖に使用されたことを示す。

その後の実験でも植物プランクトンの種類が変化するなどの違いはあるが、いずれの実験でも栄養塩が消費され、海水中のCO₂濃度が大きく低下した。このことは、鉄濃度調節によって海洋のCO₂吸収能力が増加したことを示している。今後の大きな課題は、鉄散布により増殖した植物プランクトンに取り込まれた炭素の行方を明らかにすることであると指摘されている。

おわりに

これまでセメントから製造したテトラポットが

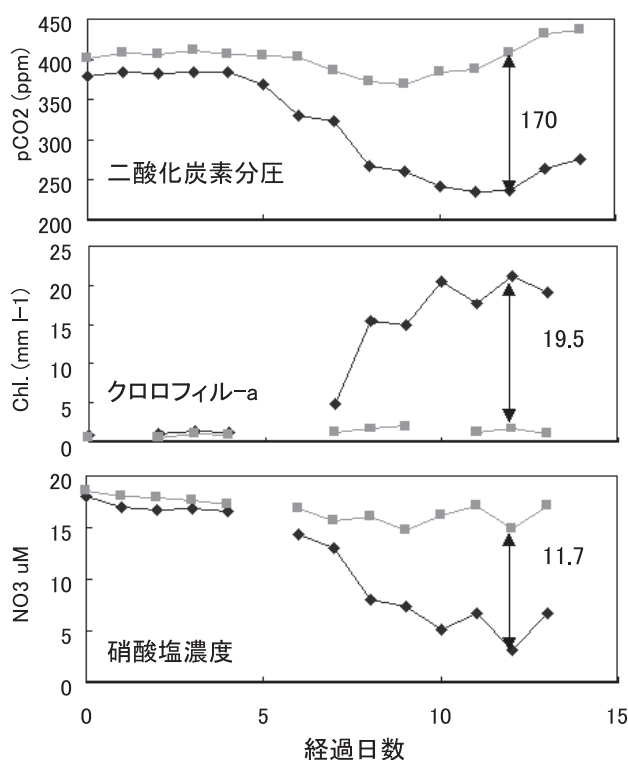


図6 海洋に鉄散布した後の環境要因の変化

「磯焼けを助長しているのでは？」との疑念からシリーズ「散歩の道;磯焼け」を12回にわたって寄稿した。海環境に及ぼすテトラポットの影響をテーマにした論文や報文は見当たらなかったが、溶解性鉄が磯焼け防止、藻場回復の切り札になるとの報文に出会い、ついで海洋への鉄散布が植物プランクトンの増殖、これが大気中のCO₂の低減に大きく寄与する、つまり地球温暖化防止の切り札にもなりうる壮大な可能性を秘めることに行き着いた。今後とも海洋への鉄散布による実験、研究、調査の推移に注目したい。

地球面積の約7割を占める海は、人類の生存あるいは滅亡に大きく関わる可能性がある。とくに、地球温暖化の要因であるCO₂は、排出削減と吸収

促進が対応策の柱である。地球温暖化の影響は、想定された以上の大災害を引き起こしているように感じる。が、災害のみならず、人類の生存に必須である水産物や魚介類など食料生産に大きな影響を及ぼすのではないかと危惧している。

次回以降は、視点を変えて、磯焼けの原因となっているウニを野菜で育てるニュースを取り上げます。

鍵谷 司（ペンネーム；裏方思考）

環境計画センター専任理事
技術士（衛生工学・建設・環境）

【連載の契機とペンネームの由来】

1993（平成5）年7月に発生した北海道南西沖地震（奥尻地震）の後に、津波対策として沿岸部に延々と高さ5mの防潮堤と、海藻の繁茂していた浅瀬には膨大な数のテトラポットが設置された。私は海育ちなので、20年以上にわたってテトラ周辺の海藻類の生育状況を観察してきた。周りにはほとんど海藻が付着、生育していないことに気づき、本誌に磯焼けシリーズとして寄稿してきた。

連載にあたり、海環境は専門外であるので、各種文献や報文等の資料を調査して自分なりに考えてまとめた。専門外になると、逆に自由な発想と視点を変えることができる。つまり、論理思考である垂直思考を少し裏側から考える水平思考を意識してペンネームを「裏方思考」と名付けた。以前に富山県南砺市福光町でゴミ固形燃料化施設の計画、建設に携わった折に、あの有名な版画家の「棟方志功記念館」を思い出して語呂合わせで作った造語です！

〈引用・参考文献〉

- 1) 東京水産大学練習船海鷹丸ホームページ 植物プランクトンと栄養素；
<http://www.s.kaiyodai.ac.jp/ship/umitaka/umitaka9/phyto-plankton.pdf>
- 2) 三洋テクノマリン(株)通信No.13 海の言葉⑫
- 3) 財電力中央研究所 電中研ニュースNo.357
- 4) 武田重信；平成18年度水産学進歩賞「鉄による海洋一次生産の制御機構」、Nippon Suisan Gakkaishi, 73 (3)、pp.429-432 (2007)
- 5) 東京大学海洋研究所 津田敦等；「鉄濃度調節が海洋生物に及ぼす影響に関する研究」