

海洋に鉄を撒く

—植物プランクトンを介した海洋のCO₂吸収は促進されるか

武田重信

我々が生活を営んでいる陸域からは、様々な物質が、河川、大気、地下水などを經由して海洋に運ばれ、海洋生物の活動に大きな影響を及ぼしている。例えば、東京湾や瀬戸内海では、窒素やリンの過剰な負荷の結果、日常的に植物プランクトンが増殖し、赤潮を形成している。

一方、地球規模の気候変動や土地利用形態の変化によって、アジア大陸の乾燥地帯が拡大すると、砂嵐によって舞い上がった黄砂が偏西風によって北太平洋に大量に飛来して、青く澄んだ外洋にも東京湾と同じような植物プランクトンの増殖が引き起こされ、大気から海洋に大量のCO₂が吸収される可能性があるというストーリーは、にわかに信じ難いかもしれない。

しかしながら、近年、北太平洋や南極海で実施された鉄撒布実験は、海洋に少量の鉄を撒布することで、植物プランクトンの増殖が著しく促進されることを実証し、多くの海洋研究者に驚きを与えた。

1. 植物プランクトンは海洋のCO₂吸収にどのような役割を果たしているか？

海洋は、大気中に増加しつつあるCO₂を吸収し、急激な環境変化を緩和する能力を持っている。海洋における物理的な海水循環と、植物プランクトンなどの関与する生物地球化学的な物質循環は、相互に作用しながら複雑に大気中の

CO₂濃度に影響を及ぼしている。

微小な単細胞生物である植物プランクトンは、海洋表層で浮遊しながら光エネルギーを利用して光合成を行い、CO₂と水から有機物を作り出す。海洋植物プランクトンの現存量は、陸上植物に比べてはるかに小さいが、年間生産量を現存量で割った回転速度は、植物プランクトンの方が20倍以上の高い活性を示す。これは陸上植物がセルロースなどの構造的な難分解性の炭水化物を多く含むのに対して、植物プランクト体の大部分がタンパク質などの易分解性の有機物で構成されていることによる。

植物プランクトンが光合成で作る有機物は、動物プランクトンからクラゲ、魚、鯨に至るまでの広大な海洋生態系の食物網を支えている。この生産された有機物のほとんどは食物連鎖の過程で酸化分解され、無機炭酸物質として再び表層海水中に放出されるが、有機物の一部は死骸や糞などの形で表層から深層へ沈降し、深層水中で分解されて無機炭酸物質に変わる。すなわち、海洋の生物活動は、大気からCO₂を吸収して有機物に変え、海洋表層から深層へ輸送し、溶存の無機炭酸物質として深層水中に貯蔵する役割を担っている。

このような一連の過程は「生物ポンプ」と呼ばれ、海洋全体で年間110億トン程度の炭素が生物ポンプによって深層に運ばれている。こうして深層水に蓄えられた炭素は、物理的な海水

の熱塩循環で表層にもたらされて大気へ放出されるまでの数十年から数百年以上の間、大気から隔離されることになる。

2. 植物プランクトンの増殖を制御する栄養素

植物プランクトンは、その生体を構成する有機物を、光エネルギーを用いて合成する過程において、海水中から数多くの元素を獲得する。この過程では、比較的多量に必要とされるC、H、O、N、S、P、Mg、K、Ca、Siとともに、ごく少量のFe、Mn、Zn、Cu、Co、Mo、Ni、Cl、B、V、Naなどが要求される。

これらの元素の中で、海洋表層で不足しやすいNとPは、植物プランクトンの有機物合成やエネルギー代謝に関係する重要な元素である。このため、一般に硝酸塩、アンモニウム塩、リン酸塩などの栄養塩の供給量が、植物プランクトンの増殖に因与する最も重要な要因となっている。また、深層水には、表層から沈降してきた有機物粒子の分解に伴って、栄養塩が再生し付加されるため、高濃度の栄養塩が溶けている。従って、海水の鉛直混合や湧昇流の作用で、深層水に含まれる栄養塩が、光の届く表層に多量に供給される高緯度海域や湧昇域では、活発な植物プランクトンの増殖がみられる。

しかしながら南極海の沖合域では、表層水の



PROFILE

武田重信
(たけだ しげのぶ 1963年生)
東京大学大学院農学生命科学研究
科助教授
専門：水圏生物環境学、海洋生物
地球化学

硝酸塩とリン酸塩の濃度が十分高いにもかかわらず、周年にわたり植物プランクトンの現存量が小さいことが示され、海洋生物学上の謎の一つとされてきた。このような海域は、High-Nitrate, Low-Chlorophyll (HNLC) 海域と呼ばれ、南極海のほかに太平洋赤道域、北太平洋亜寒帯域などにも広がっており、海洋全体の20%近くを占めている。

これに対して、海洋における微量元素の分布の研究を進めていた米国の海洋化学者J. Martinは、南極海、北太平洋亜寒帯域、太平洋赤道域に共通する特徴として、表層の鉄濃度が著しく低いことを見出し、HNLC海域では鉄欠乏によって植物プランクトンの増殖が律速されているとの仮説を提示した。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係わっており、植物プランクトンの必須微量元素の中で最も要求量が高い重要な元素である。

鉄は、地殻中の主要元素であるが、海水中では熱力学的に安定なFe(III)が難溶性の水酸化物

海洋鉄を撒く

鉄が植物プランクトンや動物プランクトンに与える影響はどれくらいか

を形成して沈殿除去されるため、その溶解度は海水1リットルあたり 10^{-10} モル以下と極めて小さく、海洋表層だけでなく深層水中の濃度も低い。また、外洋表層は、河川水や大陸棚堆積物などの鉄の主要な供給源から遠く離れており、陸域から大気経由で輸送される土壌粒子から鉄が僅かに溶出して供給されるものの、HNLC海域ではそのような風送塵の降下量も少ない。このため深層から栄養塩が供給されるHNLC海域では、窒素やリンに対して相対的に鉄が欠乏しやすくなっている。

3. 海洋生態系の応答に関する仮説をいかにして検証するか？

鉄による海洋生物生産の制御に関する仮説は、対象となる現象や時空間スケールから以下の三つの段階に分けて考えることができる。仮説(1) HNLC海域における植物プランクトンの生長と栄養塩の利用は、鉄の不足によって制限されている。仮説(2) HNLC海域における一次生産量と生物ポンプによる海洋表層から深層への炭素輸送量は、海洋表層への鉄の供給量によって制御されている。仮説(3) 大陸から大気経由でHNLC海域に供給される鉄の多寡は、海洋の生物ポンプによるCO₂吸収能を制御し、大気中CO₂濃度ならびに地球の気候を変動させる要因となっている。

このうち、仮説(1)については、現場のプランクトン群集を含む表層水を小型のビンに採取して船上で培養し、鉄を添加した場合と何も添

加しない場合で植物プランクトンの生長の違いを比較することにより検証が可能である。しかし、仮説(2)以降を検証するためには、ある程度の時空間的な広がりを持ったプランクトン生態系全体としての応答を調べる必要がある。すなわち、海水の鉛直・水平混合や水中光量の変化などの物理的要因、鉄の化学的形態の変化と水柱からの沈殿除去、ならびに鉄以外の栄養素濃度などの化学的要因、そして動物プランクトンによる摂食や有機物粒子の沈降過程における分解などの生物的要因を実験系内に取り込むことが求められる。また仮説(3)の検証には、古海洋学的な研究に加えて、物理-生物モデルを用いた数値モデルシミュレーションも有効であるが、そのモデル構築には現場実験によるパラメータ情報の取得が不可欠となる。

生物間の相互作用や環境擾乱への応答を定量的に解析する方法としては、これまで主に沿岸域でメソコスム(1~1000m³規模の閉鎖型実験生態系)を用いた実験が行われてきた。これは、自然のプランクトン群集をそのまま大型のビニールバッグ内に閉じ込め、栄養物質添加などの擾乱を与えた際の物質循環の変化を追跡する方法である。

鉄仮説の検証にあたり、このメソコスム実験を外洋に適用しようとする試みもなされたが、海象の影響を受けやすく、メソコスムの設置・回収やサンプリング方法の制約が大きいなどの問題点を抱えていた。そこで、自然海域に鉄を実際に撒布し、鉄撒布域の内側と外側で生物応答の変化を比較する、新しい開放型実験生態系

を用いた実験計画が立案された。

4. 鉄撒布実験とは？

鉄撒布実験では、あらかじめ物理・化学・生物学的な場の均一性を確認した実験海域において、鉄ならびに化学トレーサーを溶解した海水を表層50~100km²の範囲に撒布し、化学トレーサー濃度を指標にして鉄撒布水塊の行方を追跡しながら、水塊内のプランクトン群集の応答を観測する。

これまでの現場鉄撒布実験では、数千リットルのタンクに蓄えた塩酸酸性の海水に硫酸鉄(FeSO₄)を溶解し、ジグザグもしくは渦巻き状に航走する調査船の船尾からポンプとチューブを用いて海水中に放出する方法が取られてきた。撒布による鉄濃度の上昇は、海水1リットルあたり 5×10^{-10} ~ 4×10^{-9} モルとごく微量であり、25mプールに耳掻き一杯以下の鉄添加量である。硫酸鉄は海水中で酸化されて水酸化鉄の微粒子となり、表層から沈降除去されやすいので、鉄濃度の減少速度をモニタリングしながら数日間隔で鉄撒布を繰り返すことが多い。

撒布する鉄の化学的形態は、植物プランクトンによる鉄の利用能を左右する重要な要因である。硫酸鉄を用いる理由としては、(1)大気から海洋表層に供給される鉄の主要な形態の一つとして考えられる、(2)容易に海水に溶解する、(3)比較的純物の少ない結晶が大量に入手可能であり、生物作用を持つ鉄以外の微量元素の混入を抑制できる、(4)塩を構成する硫酸は海

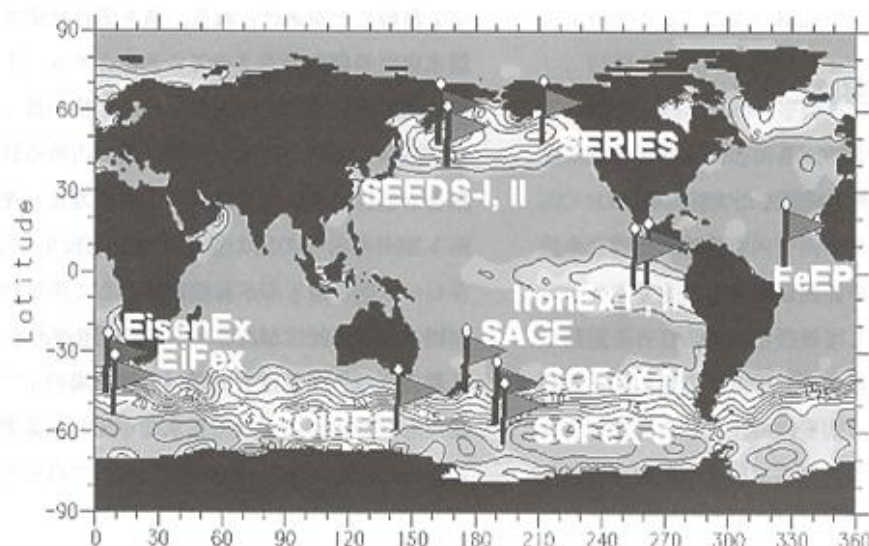
水の主要成分であり、二次的な影響を考慮しなくて良いことがあげられる。鉄を溶存状態で表層水中に長期間残存させるために、キレート鉄の使用も検討されているが、試薬価格が高く大量に確保するのが難しい、分子量に占める鉄の割合が低いため試薬の総量が大きくなる、キレート剤が海水中の他の金属イオンと反応する、キレート剤そのものが有機物源として微生物に利用される可能性があるといった問題がある。

移流・拡散で支配されている流れ場の中で複雑な形状変化を示す鉄撒布水塊を周囲と識別するために、撒布後2~3週間にわたって高感度で検出できる不活性ガスSF₆(六フッ化イオウ)が、化学トレーサーとして用いられる。また、水塊内の生物・化学的な変化を船上で迅速に検出するため、SF₆濃度と同時に、溶存鉄、CO₂分圧、クロロフィル蛍光などの船上連続観測システムが装備される。このようにして鉄撒布水塊とともに移動しつつ、採水やプランクトンネット採集などを集中的に行い、対照として鉄撒布域の外でも観測を行いながら、数十項目にわたる生物、化学パラメータの変化を長期間にわたって観測する。さらに、航空機や人工衛星を用いたりリモートセンシング観測を実施することにより、鉄撒布水塊の全体像の把握も可能になる。

5. 鉄撒布実験で何が明らかになったのか？

HNLC海域における鉄撒布実験は、1993年以

図1 海洋表層の硝酸塩濃度分布と鉄散布実験の実施海域



降、太平洋の東部赤道域 (IronEx-I, 1993年; IronEx-II, 1995年)、南極海のオーストラリア区 (SOIREE, 1999年; SAGE, 2004年)と大西洋区 (EisenEx, 2000年; EiFex, 2004年)および太平洋区 (SOFeX-North, 2002年; SOFeX-South, 2002年)、北太平洋亜寒帯域の西部 (SEEDS-I, 2001年; SEEDS-II, 2004年)および東部 (SERIES, 2002年)で、合計11回実施された (図1)。このうち北太平洋亜寒帯域西部の2回の実験は、日本の研究者が中心となって実施したものである。また最近では、大西洋亜熱帯域の貧栄養海域において鉄とリンを同時に散布する実験 (FeEP, 2004年)も行われている。

これらの実験の結果、数週間の時間スケールにおけるプランクトン生態系の応答として、珪藻類を主体とする植物プランクトンの大規模な

増殖と、表層水中の栄養塩やCO₂濃度の顕著な減少、さらに下層に輸送される有機炭素量の増加が観測された。すなわち、HNLC海域における一次生産量と生物ポンプによる海洋表層から深層への炭素輸送量は、海洋表層への鉄の供給によって促進されることが示された。また、海洋表層の混合層深度が浅くなるほど、これらの生物応答の規模が大きくなる傾向が認められた。

得られた結果の多くは仮説 (2) を支持するものであったが、表層で植物プランクトンにより生産された有機物の大部分が比較的浅い層で分解されるため、生物ポンプの促進効果は当初の予想よりも小さいことも明らかになった。また、同じ季節に同じ海域で同様に鉄を散布しても、年によって応答する生物群集の組成や応答の規模が異なるケースや、海洋表層の混合層が深い

場合には、植物プランクトン生物量の増加がほとんど見られないといった結果も得られている。このように、鉄仮説は初期に実施された実験では十分に検証されたと思われていたが、実験回数が増えるに従って、海洋生態系の持つ複雑な側面が浮かび上がってきたといえる。

6. 残された課題

鉄撒布実験の成功を受けて、研究の流れは仮説(3)の検証へと向かいつつある。しかし、鉄撒布実験結果のとりまとめが進むにつれて、この研究手法が抱える様々な問題点も明らかになってきた。

鉄撒布実験は開放系実験であるために、鉄を撒布した水塊が周辺の表層水と混合し、希釈される。その結果、混合に伴う周囲からの栄養塩の供給や、希釈による生物密度の変化などの影響を強く受けるために、100km²ならびに数週間スケールで得られた鉄撒布実験の結果を、南極海全体あるいはHNLC海域全体といったより大きな時空間スケールに適用することが、数値モデルを使ったとしても、非常に困難になっている。また、動物プランクトンを始めとする高次栄養段階の生物の多くは、数週間以上の生活環をもっており、現時点では、これらの生物の長期的な応答を確かめる術はない。

これらの問題を解決するために、より大規模な鉄撒布実験の技術的可能性の検討だけでなく、黄砂現象やHNLC海域に存在する島嶼および海台からの自然の鉄供給現象に伴う海洋生態系応

答の観測なども進められている。海洋の生物生産活動は、過去の大気CO₂濃度の変化や地球の気候変動に、多大な影響を及ぼしてきたことは間違いのないと思われるが、それは非常に大きな時空間スケールでの相互作用の結果であることを忘れるわけにはいかない。

現在、我々は化石燃料の急激な消費を通して炭素循環に擾乱を与え、地球規模での閉鎖生態系実験を進めていると捉えることもできる。しかし、その結末を目の当たりにする前に、英知を尽くして生態系のバランスや気候変動のメカニズムを理解し、予測される将来像を提示して社会に警告を与えるのが、科学者の使命であろう。地球は一つしかないのである。

参考文献

1. Martin, J.H.: Gracial-interglacial CO₂ change: The iron hypothesis. *Paleoceanography*, 5(1), 1-13, 1990.
2. Martin, J.H. and S.W. Chisholm: *U.S. JGOFS Planning Report*, Vol. 15, 1992.
3. De Baar H.J.W., P.W. Boyd, K.H. Coale, and others: Synthesis of iron fertilization experiments: From the iron age in the age of enlightenment. *Journal of Geophysical Research*, 110, C09S16, doi:10.1029/2004JC002601, 2005.