

## 海洋への鉄散布による二酸化炭素固定について

山口大学名誉教授 梶原忠彦

### 1. はじめに

地球温暖化の原因物質としては、二酸化炭素、フロン（クロロフルオロカーボン）、メタン、亜酸化窒素などが知られている。1995年にはフロンガス生産の廃止が決められていることなどから、今日では、二酸化炭素濃度の増加は、気温上昇に対して60%以上の比重を占めると見積もられている。地球に到達する太陽光の大部分は可視光線で、可視光線は大気中の二酸化炭素に吸収されることなく地表を暖める。この熱は、地表から大気に遠赤外線として放射される。このように、二酸化炭素は地球の気温調整をすると同時に、光合成生物にとっては不可欠な化合物である。つまり、大気中の二酸化炭素が増え続けると気温が異常に上昇してしまうので、二酸化炭素の平衡を保つことが環境保全の観点から重要と考えられる。

新人（クロマニオン人など）が世界に分散していたと考えられている15万年前から今日まで、大気中の二酸化炭素濃度はどれくらい増加したのだろうか。南極の氷面から2 Kmほど掘り下げた氷中に閉じ込められている空気は、15万年前の空気に相当する。その空気中の二酸化炭素濃度が測定された結果、220~290 ppmの範囲にあった。つまり、過去15万年前に遡っても二酸化炭素濃度の変動は小さかったことが分かった。2000年に世界気象機構（WMO）は、20世紀に入って化石燃料の使用量が激増するにともない、大気中の二酸化炭素は急激に増加し、世界平均で369 ppmに達したと報告した。それ以来今日まで、大気中の二酸化炭素濃度増加を抑制するための多彩な研究が展開されてきた。なかでも、鉄不足の海域に飛行機などにより鉄を散布する最新の研究が話題になっている。つまり、鉄散布により海藻や植物プランクトンが増殖することによって海水中の二酸化炭素が固定されると、それにとまって大気中の二酸化炭素が海水に溶け込み、結局大気中の二酸化炭素を減少させることができるという戦略です。ここでは、それらの研究について解説し、若干の考察を加えたい。

### 2. 海洋への鉄散布の戦略

江戸時代から、魚を集める森のことを「魚つき林」といって、森が大切に管理されていたところもすでにあったようであるが、明治44年の農商務省水産局の「漁業と森林との関係調査」には、「沿岸域に鬱そうとした森林がある場所は好漁場があり、森林の荒廃した場所では魚が近づかなくなった事例が多い」と記録に残されている。おそらく、わが国では江戸時代以前から沿岸部の森林の破壊による水産資源の減少と森林の復活による水産資源の回復に深い関係が

あることが経験的に知られていたと考えられている。森林の腐植土層の鉄は枯葉にも含まれており、枯葉の分解により腐食土中に再生される。腐植土中のフルボン酸とうまく結合できなかつた鉄イオンも存在するが、これは粒子に変わって河川に運ばれる。このように、鉄は腐植土中のフルボン酸とは強い絆で結ばれ、河川をとおして、あるいは海岸まで森林が迫っている場合には、山の森林地帯から直接海に流れ込んでいるのである。

海水中では、植物プランクトンや海藻を増やさなければ、それに続く貝や魚は増えることができない。基本的には、二酸化炭素と水、それに太陽があれば植物プランクトンや海藻は生長、増殖するが、窒素とリンが必須成分である。植物プランクトンや海藻が硝酸塩を体内に取り込むには先に鉄を取り込まなければならない。なぜなら、体内に硝酸塩を取り込むと、これを還元しなければならず、その還元には硝酸還元酵素が必要であり、鉄はこの酵素に大きく関与しているからです。ほかに、光合成する生物にはクロロフィルなどの光合成色素が不可欠ですが、これらの生合成には鉄は極めて大きく関与しており、鉄なしではこれらの色素は生合成されない。例えば、コンブは晩夏から遊走子を放出しはじめる。海水に、鉄とEDTA（エチレンジアミン四酢酸鉛）という人工的に合成した試薬を加える。この試薬は鉄と結合し、鉄が粒子になるのを防ぎ、鉄を水に溶けた状態に保つ役割をしている。つまり、この試薬は腐植土中のフルボン酸と同様の働きをしていることになる。鉄を入れないと遊走子は全く生長しない。鉄を添加した溶液（培地）の遊走子は、一ヶ月後にはコンブの幼葉にまで生長する。このような科学的根拠に基づいて、鉄不足の海域に飛行機などによって鉄を散布して植物プランクトンを増やすことによって、二酸化炭素を減少させようという壮大な戦略が生まれた。

### 3. 鉄散布による二酸化炭素固定

外洋の鉄はどこから運ばれてくるのか。河川から海に流入した鉄は、沿岸域で海底に沈んでしまうため、外洋まで到達しない。偏西風によって、鉄を含有している大陸の土壌が外洋に運ばれている。アラスカ湾より西側（日本側）の太平洋では、偏西風により大気から鉄が供給されており鉄は不足していない。しかし、アラスカ湾までは鉄は運ばれないため、その海域は鉄不足になる。米国の J.K. マーチンという学者が行なった研究によると、アラスカ湾で鉄不足の海水を採水して、これにごく微量の鉄を加えた場合、植物プランクトンは著しく増殖すると報告している。すなわち、これらの海域では硝酸塩、リン酸塩など光合成に不可欠な成分は存在していても、鉄不足でプランクトンの増殖ができないことを意味する。鉄不足の海域から海水を採取し、これに鉄を加えずに海水のみで培養すると、植物プランクトン（クロロフィル）はほとんど増えな

いのに反し、鉄を加えると著しく増加していることが実証された。

1995年にアメリカが実施した鉄散布実験（図1）では、太平洋の赤道直下にあるガラパゴス諸島の沖1000平方キロメートルの海域に数百キログラムの硫酸鉄が散布された。その結果、植物プランクトンの増殖速度が倍加し、生物量が20倍に増加しました。同時に海水の二酸化炭素濃度が20%低下した。海洋への鉄散布が植物プランクトンの増殖に効果があり、大気中の二酸化炭素削減に役立つだろうということが示めされた。その後、2001年には、北海道区水産研究所と東京大学海洋研究所のグループ（代表 津田 敦）は、鉄濃度が低いため植物プランクトンが増殖できないサハリン東部海域カムチャッカ沖（図2参照）で南北八キロメートル、東西十キロメートルに約350キログラムの硫酸鉄溶液を約一日掛けて散布した。そのときに散布した鉄の量は、25メートルプールに耳搔き一杯程度と見なされる。散布後、図3のように二週間にわたって、植物プランクトンの分布を裏付ける葉緑素や二酸化炭素濃度を測定した。その結果、散布後6日目ころから、プランクトンの増殖が著しく認められた。プランクトンの増殖にともなって、海水中の二酸化炭素濃度は400ppmから230ppmへと減少した。これらのことから、海洋への鉄散布が植物プランクトンの増殖に効果があり、大気中の二酸化炭素削減に役立つだろうということが示めされた。海洋における鉄は、植物プランクトンの生長を支える微量金属元素の中でも、最も重要な金属の一つである。しかしながら、酸化環境下の海水中では鉄のほとんどは3価の粒状鉄（3価の水酸化鉄など）として存在しており、その溶解度は極端に低い。そのため海水中の溶存鉄濃度は著しく低く、海洋における基礎生物生産を支配する重要な因子である。また海洋における溶存鉄は、ある種の有機配位子と溶存有機錯体鉄を形成しており、それらの有機配位子の存在は、海洋における溶存鉄の鉛直分布を決定づける重要な因子であるとともに、藻類による鉄の取り込み、その後の増殖に重要な役割を果たしていると考えられている。

地球温暖化対策の一つとして、海洋を利用した様々な二酸化炭素固定技術が検討されているが、鉄散布により海洋表層の植物プランクトンの光合成活性を増幅して二酸化炭素をより吸収させようとする方法は、中深層隔離法などと比べると、生物を利用するため効率は落ちるかも知れないが、比較的安価で実施も容易である。しかしながら、海洋への鉄の供給量の変動が、過去の海洋炭素循環および、地球全体の気候を大きく変動させていた可能性もある。近年、生物海洋学、化学海洋学、さらには海洋炭素循環モデルの研究者の間では、鉄とプランクトン生態系の関係を明らかにすることは、海洋の生物学的な炭素循環を解明する上で無視できない重要な課題となっている。また、地球温暖化対策の一つとして、このような特徴を持つ海域に鉄を散布することで、植物プランク

トンの光合成による有機炭素生成量を増やし、生物ポンプの効率を上げることが提案されている。この鉄散布については、炭素固定の経済的効率などを含めた賛否両論が交わされ、現在においても大きな議論を呼んでいる。

#### 4. おわりに

1992年の地球サミットで、先進国が二酸化炭素放出量を1990年のレベルに戻すという条約をとりかわした。しかし、発展途上国による化石燃料の使用はますます高まることが予想されており、また先進国の抑制もなかなか難しい。この場合、大気中の二酸化炭素濃度が地球の危険濃度とされる600 ppmに到達する時期は、いつ頃になるのか。あるシミュレーションによると、鉄を散布しなければ2050年前後、散布すれば2070年前後と予測されている。つまり、散布すれば10パーセント程度の二酸化炭素を減少させることができることになる。実際の鉄散布を二酸化炭素吸収方策として考えていくには、鉄散布にてきた環境要因を持つ海域を選定し、経年スケールの長期的な視野にたって散布効果を検討することが必要である。現在、熱帯地方や南半球では地上の二酸化炭素観測地点が少なく、地球全体では十分な精度での測定が難しい。日本は2008年8月、宇宙航空研究開発機構（JAXA）と国立環境研究所、環境省が共同で温室効果ガス観測技術衛星（GOSAT）を、米国は同9月米航空宇宙局（NASA）が二酸化炭素観測衛星（OCO）を打ち上げる計画である。日米が打ち上げた宇宙衛星からの観測で「空白地帯」を補い、二酸化炭素の「収支分布」を明らかにするとともに、世界のどこで手当てをしなければならぬかも分かってくるかと期待がよせられている。他方、海洋への鉄散布によって増殖する植物プランクトンのうち珪素の殻をもっている珪藻は海洋食物網を支えており、われわれの食卓の動物性蛋白の40パーセント以上を占める魚介類の増産の面からも注視されている。最近、ドイツのある研究グループによって、珪藻のポピュレーションが揮発性のオキシリピンによって制御されていることが発見された。つまり、植物プランクトン（珪藻, *Thalassiosira rotula*)が、動物プランクトン（草食動物）によって食害を受けると、数秒以内にリパーゼが活性化され、酸素添加酵素やヒドロペルオキシド分解酵素が働き、結局、揮発性オキシリピンが生成する。興味深いことに、この場合食害によって誘導生成されたオキシリピンが捕食者の摂食を直接抑制するのではなく、捕食者の卵の孵化を阻害し、越冬捕食者数を減少させることによって次世代の捕食圧を低くし間接的に防衛することが分かった。このことは食糧資源の有効利用の観点からも重要であり、オキシリピンによる珪藻の化学防御がプランクトンダイナミクスにどのように影響を及ぼしているかを解明するために、地球規模での調査が始められようとしている。揮発性オキシリ

ピンの研究では山口大学（生物活性揮発成分研究推進体 代表 松井健二教授）は世界に知られており、海洋への鉄散布の研究が環境問題のみならず、食糧問題の両面から深められることを期待したい。しかし、ごく最近には、北極海のある海域での水温変化により、二酸化炭素固定に優れた珪藻とされている円石藻（図4参照）が異常発生し、動植物プランクトン、海藻、魚類の生育と分布に異変が引き起こされ、結果として食物連鎖の上位に位置する海鳥（みずなぎどり）が多数餓死したと報告された。海洋への鉄散布による二酸化炭素固定については、さらに生態系のバランスについての研究を重ね、慎重な実施が望まれる。

#### 参考図書等

- 1) 松永勝彦： 森が消えれば海も死ぬ、講談社、東京(1993).
- 2) 竹中弘行： 生命の源マイクロアルジェ、成山書店、東京((2003).
- 3) 栗原紀夫： 豊かさと環境、化学同人、京東(1997).
- 4) 津田 敦 他： 海洋鉄散布による二酸化炭素固定と生物群集の応答、平成13年度北海道区水産研究所成果報告集 No. 2.
- 5) A. Tsuda et al.: A mesoscale iron enrichment in the western subarctic pacific induces a large centric diatom bloom, Science, **300**, 958(2003).
- 6) 亜寒帯西部北太平洋の鉄散布実験 SEED s I I I における微量金属元素の動態（代表 京都大化学研究所 宗林由樹）.

図の説明文。

図 1: 海洋鉄散布実験実施概念図 (文献 6 を改変)

図 2: 実験海域 (文献 4, 5 を引用)

図 3: 鉄散布域の外と中における二酸化炭素分圧、クロロフィル濃度、  
栄養塩 (硝酸塩) 濃度の日変化 (文献 4, 5 を引用)

図 4: 高い二酸化炭素固定能を有する円石藻

