

## 論文の内容の要旨

水圏生物科学専攻  
平成 16 年度博士課程進学  
氏名 近藤能子  
指導教員名 古谷 研

論文題目 太平洋における鉄有機配位子と植物プランクトン群集の動態に関する研究

鉄は海洋の一次生産を担う植物プランクトンの必須栄養素の一つであるが、その海水への溶解度は 0.1 nM 程度と低く、主要な鉄供給源である陸域の影響が及び難い外洋表層では溶存濃度が極めて低い。このため鉄は窒素やリンとともに海洋の一次生産を制御する重要な環境要因として認識されており、鉄循環過程の解明は海洋生物生産を理解する上で主要課題となっている。従来、鉄による植物プランクトンの増殖制限に関する議論では溶存濃度が用いられてきた。しかし、1994 年に海水中の溶存鉄の大部分が有機錯体鉄であることが報告され、鉄の循環や生物利用能を考える上で、鉄有機配位子の役割の解明が必須となった。海洋における鉄有機配位子の起源は明らかにされていない。しかし、その錯形成能や鉄結合部位には、バクテリアが鉄欠乏ストレスを受けた際に生産するシデロフォアと類似した特徴が認められている。また、鉄有機配位子の濃度については、大西洋や南極海の一部で溶存鉄と同程度の値が報告されているものの、太平洋を含めた海洋全体における分布や変動の実態は明らかにされていない。

本研究では、これまで知見の乏しかった太平洋における鉄有機配位子の分布を明らかにし、その変動要因として考えられる植物プランクトンブルーム期間中の鉄有機配位子の挙動の解析と、鉄制限下の植物プランクトン群集の増殖に及ぼす有機錯体鉄の影響の解明により、海洋の鉄循環における鉄有機配位子の役割を明確にすることを目的とした。本研究では、鉄による一次生産の制限が指摘されている西部北太平洋亜寒帯域において、現場海域への鉄撒布に対するプランクトン生態系内での鉄有機配位子生産の応答と、それにより形成される鉄有機配位子の生物利用能に重点を置いた。

## 1. 太平洋における鉄有機配位子の分布

太平洋およびその縁辺海であるベーリング海、東シナ海、南シナ海、セレベス海と、スーロー海および南極海太平洋区の 26 測点において、微量金属の汚染防止に配慮したクリーン採水を行い、溶存の鉄有機配位子の濃度と錯形成能の指標となる条件安定度定数を配位子交換平衡-吸着濃縮カソーディックストリッピングボルタンメトリー法により測定した。

表層水の鉄有機配位子は、0.32~3.34 nM の範囲にあり、南極海氷縁域や南太平洋亜熱帯域で高く、西部北太平洋亜寒帯循環域で低かった。また、季節的に植物プランクトンブルームの生じる海域では、測点間で濃度が大きく変動した。混合層以深では、南極海氷縁域で高濃度存在していたが、南北太平洋の深層水の間には差異はみられなかった。表層水における鉄有機配位子の条件安定度定数については、鉄有機配位子濃度が高い南極海氷縁域と南太平洋亜熱帯域では他の測点よりも約 1 桁低い値を示したものの、大部分の測点で  $10^{12.3} \text{ M}^{-1}$  前後の値が得られ、深度や海域による差異はみられなかった。また、本研究で得られた条件安定度定数は大西洋等での既報値の範囲内であり、鉄有機配位子の錯形成能は海域による差が小さいことが明らかになった。

観測された鉄有機配位子の濃度および条件安定度定数と溶存鉄濃度から、溶存鉄の 56~100% は有機錯体鉄として存在していたと計算された。表層水中の溶存鉄と鉄有機配位子の濃度比は、親潮・黒潮混合域、南極海氷縁域、南太平洋亜熱帯域で 0.038~0.23 と低く、鉄有機配位子が溶存鉄を大きく上回ったのに対し、スーロー海や親潮域では、逆に鉄有機配位子を上回る溶存鉄の存在が認められた。混合層以深では、南極海氷縁域を除き、鉄有機配位子と溶存鉄の濃度比が約 1:1 の割合で分布していたことから、太平洋の中深層水では、鉄有機配位子によって溶存鉄濃度が規定されている可能性を認めた。

太平洋で得られた鉄有機配位子と溶存鉄の濃度比は、他海域における知見と比較すると、大西洋と同程度で、南極海よりも低めであることが示された。海洋全体で比較すると、南極海における深層水の鉄有機配位子濃度は、太平洋や大西洋よりも高いことが明らかになった。

## 2. 植物プランクトンブルーム期間中の鉄有機配位子の挙動

鉄有機配位子の起源としては、バクテリアによるシデロフォア生産とともに、植物プランクトンによる放出、動物プランクトンの摂食過程やウイルスの溶菌作用でのクロロフィル分解物等の生成が主要なものと推測されており、これらの寄与は植物プランクトンブルームの発達と衰退の過程で変化することが予想される。そこで、まず親潮域の春季植物プランクトンブルームを対象に、鉄有機配位子の変動を追跡した。

観測は 2003 年 1~5 月に計 3 回実施し、4 月下旬から 5 月上旬にかけて珪藻類を主体

とする植物プランクトンのブルームが認められた。ブルーム開始前の 1~3 月の溶存鉄と鉄有機配位子の濃度比は 0.48~1.0 と測点間で変動した。溶存鉄と鉄有機配位子はいずれも表層で濃度が高く、冬季鉛直混合により鉄有機配位子が溶存鉄とともに下層から供給されていると考えられる。その後、ブルームの発達に伴い、栄養塩や溶存鉄と同様に鉄有機配位子濃度も減少した。しかし、その減少量は溶存鉄の半分以下であり、鉄有機配位子はブルーム後も残存する傾向にあることが示された。鉄有機配位子の条件安定度定数は、ブルームの前後で差が無かった。

次に、栄養塩濃度が高いにも関わらずクロロフィル *a* 濃度が低い、いわゆる HNLC 海域である西部北太平洋亜寒帯循環域において、鉄撒布により現場植物プランクトン群集のブルーム形成を促し、そこで鉄有機配位子の挙動を調べた。鉄撒布後 4 日目よりクロロフィル *a* 濃度が増加し始め、鉄撒布後 10~12 日目に直径 10  $\mu\text{m}$  以下の植物プランクトンを主体とするブルームがピークに達した。鉄有機配位子濃度は鉄撒布後 24 時間以内に 3~5 倍に増加し、その後の水塊の水平拡散に伴って数日間で撒布前のレベルに戻った。増加した鉄有機配位子濃度は溶存鉄濃度を上回っており、撒布後の溶存鉄の 99% 以上は有機錯体鉄として存在していたと見積もられた。この鉄有機配位子の増加は、鉄供給に刺激された植物プランクトンが放出したものと推測される。その後、クロロフィル *a* 濃度が減少に転じた鉄撒布後 13 日目に、鉄有機配位子濃度は再び急激に増加した。この高い鉄有機配位子濃度は観測を終了した鉄撒布後 23 日目まで認められた。水塊の水平拡散による希釈効果を考慮すると、鉄有機配位子は持続的に生成されていたことになる。このブルームピーク後に生成した鉄有機配位子は、溶菌作用等により流出したクロロフィル分解物の寄与も否定できないが、現場の溶存鉄濃度の変化から判断すると、バクテリアによって生産されたシデロフォアである可能性が高いと考えられ、ブルームピーク後と鉄撒布直後で鉄有機配位子の生成過程は異なる可能性が示唆された。

### 3. 鉄有機配位子が植物プランクトン群集の増殖に及ぼす影響

鉄供給や植物プランクトンブルーム衰退に伴う鉄有機配位子の生成が明らかになったことから、鉄有機配位子が植物プランクトン群集の増殖に及ぼす影響について、現場の植物プランクトン群集を含む表層水を用いた船上培養実験により検討した。実験にはモデル配位子として、海洋細菌が生産するシデロフォアと類似の構造をもつデスフェリオキサミン B およびフェリクロームの 2 種類の陸上微生物由来シデロフォアと、代表的なポルフィリン化合物であるプロトポルフィリン IX を用いた。

西部北太平洋亜寒帯の HNLC 海域において春季および秋季に実施した実験では、プロトポルフィリン IX 鉄錯体あるいはプロトポルフィリン IX 単体の添加により植物プランクトンの増殖が促進された。その傾向は直径 10  $\mu\text{m}$  以下の植物プランクトンで顕著であり、鉄有機

配位子は植物プランクトン群集のサイズ組成にも影響を及ぼすことが明らかになった。一方、デスフェリオキサミン B およびフェリクロムと錯形成した鉄は現場の植物プランクトンにとって利用し難い形態であることが示された。

次に、増殖促進作用をもつことが示されたプロトポルフィリン IX の添加効果を、前述の鉄撒布実験において、鉄撒布直後、ブルーム発達期、ピーク時、衰退期の 4 回にわたり船上培養実験により調べた。プロトポルフィリン IX 添加による増殖の促進は、鉄撒布後 2 日目に採取した植物プランクトン群集においてのみ確認された。他の時期に実施した実験でプロトポルフィリン IX の添加効果が認められなかった理由については、活発な動物プランクトンの摂食やウイルスの溶菌作用によりクロロフィル分解物などのポルフィリン化合物が既に現場の鉄と錯形成していた可能性が挙げられる。また、ブルーム衰退期に実施した無機鉄添加培養実験において、植物プランクトンの比増殖速度が最大に達したのは、現場の鉄有機配位子濃度を上回る高濃度の鉄を添加した場合のみであった。従って、ブルーム衰退期に増加した鉄有機配位子には、生物利用能の低いものが含まれていたと考えられる。

以上、本研究により、これまで知見の乏しかった太平洋の鉄有機配位子の分布と変動様態が初めて明らかになり、鉄有機配位子は表層では植物プランクトンによる鉄利用を促進あるいは抑制して、その増殖と群集組成に大きな影響を及ぼすことが示された。さらに、鉄有機配位子の濃度や性質は、植物プランクトンブルームの発達と衰退に伴って大きく変化することが明らかになった。従って、鉄有機配位子は高次栄養段階を含む海洋生物生産をボトムアップ制御する要因として、鉄とともに重要な役割を果たしていると考えられる。これらの成果は、海洋への鉄供給量の変化に対する海洋生態系の応答など、気候の変化に伴う海洋生物生産の変動予測に貢献するものと期待される。