

海洋への鉄散布による二酸化炭素固定の 加速実験における鉄と温度の複合要因

学位論文内容の要旨

北太平洋亜寒帯海域は、栄養塩が豊富に存在するにも関わらず、植物プランクトン現存量の指標である Chl-*a* 濃度が $1 \mu\text{g L}^{-1}$ 以下の極めて低い海域（HNLC : High Nutrient Low Chlorophyll）として知られている。1980 年代にクリーン分析技術が確立され、鉄濃度が表層で低く深度とともに高くなるというリサイクル型の鉛直分布を示すことが初めて明らかにされた。この HNLC 海域では、表層で鉄が枯渇し、表層水に極微量の鉄を添加し船上で培養すると、植物プランクトンの増殖と栄養塩の消費が促進されることから、鉄制限の可能性が指摘された。また、1991 年に Martin は、氷期には海洋に現在より多くの鉄が大気から供給され、生産力が高まった結果、生物ポンプの働きによって大気中 CO_2 濃度が低下したという「鉄仮説」を提唱した。この「鉄仮説」に基づいた、温暖化対策技術としての海洋鉄散布による人為起源 CO_2 固定策が注目されている。これまで、鉄散布実験が太平洋赤道湧昇域と南極海で行われ、珪藻の増殖、劇的なクロロフィル *a* 濃度の増加及び表層の CO_2 分圧の減少が観測された。これら 2 海域と異なる海洋学的特徴を有する亜寒帯太平洋において、鉄散布実験の実施が PICES（北太平洋の海洋科学に関する政府間機構）によって推奨された。

鉄は生体内での酸化還元反応に必要な電子伝達体のたんぱく質や酵素の構成成分あるいは活性中心としての役割を担うため、植物プランクトンは鉄が不足すると、光合成や栄養塩取り込みなどの生理反応速度が低下する。また、一般に植物プランクトンは、高温で生長する種は至適温度が高く、低温で生長する種は至適温度が低く、比較的狭い温度範囲でしか生長できない。このような温度に対する異なる応答は、藻類種間の競合に影響を与えると考えられる。しかし、これまで行われてきた鉄散布実験

において、植物プランクトン群集組成に及ぼす鉄と温度の複合要因に言及した研究はほとんど例がない。本研究の目的は、亜寒帯太平洋の東西で鉄散布による二酸化炭素固定の加速実験を行い、東部亜寒帯太平洋と西部亜寒帯太平洋の応答特性を明確にした上で、植物プランクトン組成に及ぼす鉄と温度の複合要因を考察することである。

西部亜寒帯循環域 (WSG) において、2001 年に SEEDS-I、2004 年に SEEDS-II、アラスカ循環域 (AG) では、2002 年に SERIES の各航海で鉄散布実験を行った。鉄散布水塊 (パッチ) の内と外で、鉄、Chl-*a*、栄養塩、植物プランクトン種組成、基礎生産速度、窒素態栄養塩の取り込み速度の経時変化を比較した。また、海水をクリーン採取し、船上でボトル培養実験を行った。培養実験は、比較のために何も添加しないコントロール区及び 0.3-2.0 nM の無機鉄添加区について、温度を SEEDS-I では 5、9、13、18°C、SERIES では 12、16°C に設定して行った。また、SEEDS-II では黄砂を予め雨水に溶解したものを中心に、比較のために何も添加しないコントロール、雨水のみ添加、乾燥した状態の黄砂を添加、無機鉄を添加した条件で培養を行った。

その結果、SEEDS-I では鉄散布から 9 日目に Chl-*a* が 18 $\mu\text{g L}^{-1}$ という大規模な珪藻ブルームが形成され、栄養塩と CO₂ 分圧 (パッチ内外の差が最大で 94 μatm) は顕著に減少し、基礎生産力は約 2000 $\mu\text{g m}^{-2}\text{d}^{-1}$ に達した。また、硝酸塩の取り込み速度が増加し、*f*ratio が 0.9 以上と高く、窒素利用が鉄散布前のアンモニウム塩利用の再生産型から硝酸塩利用の新生産型へと移行した。植物プランクトンのサイズ組成は、ピコ・ナノサイズからマイクロサイズへ変化し、中心目珪藻の *Chaetoceros debilis* が優占種となった。培養実験から、マイクロサイズが高い K_{Fe} 値 (9°C で 0.77 nM) と最大生長速度 (9°C で 1.05 d^{-1}) を示し、高濃度鉄環境に適応した種組成であった。5-13°C では、鉄添加によって珪藻が優占するが、18°C では珪藻は増殖を示さず、小型の Prymnesiophyceae が優占した。その要因として、この海域の珪藻の至適温度が 5-13°C の範囲であること、Prymnesiophyceae は高温適応種であることが考えられる。このように、鉄濃度が高くても、高温では珪藻の生長が制限され、小型の藻類によるブルームが発生する可能性が示唆された。

SERIES では 14 日目に Chl-*a* が約 6 $\mu\text{g L}^{-1}$ に達し、鉄とケイ酸塩の枯渇によってブルームは終焉し、その後は 25 日目までブルームの衰退が観測された。優占種は羽状目珪藻の *Pseudo-nitzschia* spp. であった。また、培養実験からマイクロサイズの

K_{Fe} 値は 12℃で 0.10 nM と低く、低濃度鉄環境に適応した種組成であった。温度の影響は 12℃と 16℃の比較では、マイクロサイズの K_{Fe} 値が 16℃の方が 0.19 nM と高く、高温では高濃度鉄環境に適した種が鉄添加によって増殖することが示唆された。基礎生産速度と硝酸塩の取り込み速度は 14 日目に最大となり、その後減少したことからブルームの衰退が確認された。

SEEDS-II では鉄散布に対する植物プランクトンの応答が鈍く、8 日目に $3.3 \mu\text{g L}^{-1}$ の最大値に達し、12 日目以降は減少した。サイズ組成は終始ピコ・ナノサイズが優占し、栄養塩はわずかに減少を示した。一方、培養実験では、珪藻が増殖し、栄養塩が枯渇した。これは無機鉄と同様に黄砂を添加した培養区でも同様で、羽状目珪藻の *Pseudo-nitzschia* sp. が優占種であった。この結果から、黄砂に含まれる鉄を利用した増殖が確認された。このように、ボトルと現場では全く異なる結果が得られた。現場で増加しなかった原因として、混合層が SEEDS-I よりも深かったために高い鉄濃度が維持できなかったこと、*C. debilis* のような応答の速い種が存在しなかったこと、動物プランクトンによる捕食などが挙げられる。

以上の結果から、亜寒帯太平洋でも太平洋赤道域及び南極海と同様に鉄散布によって植物プランクトンの増殖速度が高まることが示された。しかし、その応答は一様ではなく、植物プランクトンの構成種や水塊の安定性、水温などの条件によって、全く異なる応答を示すことが明らかとなった。ボトル実験が現場を反映する場合と反映しない場合が確認され、改めて鉄散布実験の必要性が認識された。

本研究では、鉄散布実験において、鉄と温度が植物プランクトンの群集組成の応答に大きく影響する重要な要因であることが明らかとなった。近年、二酸化炭素排出量の増加による地球温暖化の加速が環境に悪影響を及ぼしていることが懸念されており、海洋においても水温の上昇が海洋生態系などに及ぼす影響は計り知れない。したがって、温度と鉄の複合要因に関するデータを蓄積することは、海洋生物資源の変動の予測や生物地球化学的な物質循環、過去から将来までの気候変動などを理解する上で役立つものと考えられる。

学位論文審査の要旨

主 査	助教授	工 藤	勲
副 査	教 授	門 谷	茂
副 査	教 授	岸	道 郎
副 査	助教授	津 田	敦

学 位 論 文 題 名

海洋への鉄散布による二酸化炭素固定の 加速実験における鉄と温度の複合要因

北太平洋亜寒帯海域は、栄養塩が豊富に存在するにも関わらず、植物プランクトン現存量の指標であるクロロフィル a 濃度が $1\text{ }\mu\text{g L}^{-1}$ 以下の極めて低い海域として知られている。この理由としてこの海域の表層水中の鉄濃度が極めて低濃度であるため、鉄が海洋の一次生産者である植物プランクトンの生長を制限していると認識されている。このことを利用してこの海域に微量の鉄を海洋表層に添加することによって植物プランクトンの生長を促進させ、二酸化炭素を植物プランクトンに固定させることにより、現在地球温暖化の原因とされている大気中の二酸化炭素を海洋に吸収させる方策が注目されている。

本研究は、2001年に西部北太平洋亜寒帯域で行われた中規模鉄散布実験（SEEDS）および2002年に東部北太平洋亜寒帯域で行われた中規模鉄散布実験（SERIES）において鉄濃度と水温環境を変化させた場合の植物プランクトンの生長応答について検討を行った。得られた結果として、北太平洋亜寒帯域では鉄濃度の増加により植物プランクトンの生長は増長され、鉄濃度と生長の関係が理論式で表現できることを明らかにした。珪藻類に代表される大型の植物プランクトン群集の最大比生長速度は、西部でおよそ 1.0 （1/日）であるのに対して東部では 0.7 （1/日）と東部の方で 1.5 倍生長速度が高く、環境中の鉄濃度が高濃度に保たれた際の速やかな増殖応答を裏付ける結果である。鉄取り込みに対する親和力の指標である半飽和定数は、大型の植物プランクトン群集で東部が 0.1 nM に対して西部は 0.6 nM であった。これは、東部の植物プランクトン群集がより低濃度の鉄環境で高い生長速度を維持するように適応した結果であると推察された。中型の植物プランクトン群集については、鉄濃度の増加に対して大型の群集同様に生長速度の増加が確認された。しかし、最大比生長速度は、東部、西部ともに 0.5 （1/日）程度と東西の差は存在せず、か

つ大型植物プランクトン群集のそれより低い値であった。これは、中型の植物プランクトン群集の生長は鉄によって制限を受けているが、現場海域に於いては動物プランクトンによる捕食の影響を強く受けていることから、鉄散布実験において現存量の増加が見られなかったことを説明する結果である。しかし、半飽和定数は、大型の植物プランクトン群集と同様に東部海域で低い値を示し、低い鉄濃度環境に適応していることを示唆している。以上のように北太平洋亜寒帯域内でも東西で応答の違いが観測され、西部北太平洋の植物プランクトン群衆が東部北太平洋の植物プランクトン群衆より鉄添加による生長応答が早く、生長量も大きいことを明らかにした。また、実験海域より高い水温で培養した結果、鉄添加により現場とは異なるプランクトン種が生長した。このことは、北太平洋亜寒帯域における植物プランクトンによる一次生産は、鉄のみならず水温によっても強く影響を受けていることを示唆した。

以上の結果は、北太平洋亜寒帯域における植物プランクトンの生長と二酸化炭素固定に与える鉄と水温環境の重要性に関する新たな知見を与え、この知見は亜寒帯域における基礎生産過程の理解に対して有益であり、高く評価できる。よって審査員一同は本論文が博士（水産科学）の学位を授与される資格のあるものと判定した。