

B-57 海水中微量元素である鉄濃度調節による海洋二酸化炭素吸収機能の海洋生態系への影響に関する研究

(2) 鉄濃度調節が植物生理・生産に及ぼす影響に関する研究

独立行政法人水産総合研究センター

東北区水産研究所 混合域海洋環境部 生物環境研究室 齊藤宏明

北海道大学大学院水産科学研究科

工藤 勲

平成13～15年度合計予算額 24,437千円

(うち、平成15年度予算額 8,766千円)

[要旨] 北太平洋亜寒帯域のHNLC(高栄養塩低クロロフィル)海域において、鉄濃度調節実験を行ない、植物プランクトンの生理・生態の応答を調べると共に、鉄不足が亜寒帯太平洋の生態系に及ぼす影響を調べた。鉄濃度調節実験は、エアロゾルを通じた鉄の供給量が比較的多く、中心目珪藻が比較的多い西部亜寒帯太平洋と、鉄供給量が少なく羽状目珪藻の多い東部亜寒帯太平洋のそれぞれで行った。西部亜寒帯太平洋では、鉄濃度が上昇すると、植物プランクトンの光合成活性の指標である光化学反応中心IIの量子収率が上昇し、調節後6日(D6)にクロロフィルa濃度の増加が確認された。クロロフィルaの増加と共に、硝酸取り込み速度が増加し、水中の硝酸塩および珪酸の減少が見られた。クロロフィルa濃度はD9に以降は 16.5 mg m^{-3} に達して、その後は安定した。このクロロフィルa濃度の上昇は、過去に南極海や赤道湧昇域で行なわれた同様の実験では 4 mg m^{-3} 以下だったことに比較して顕著であった。鉄濃度調節により、ほとんどすべての植物プランクトン種が増加したが、特に、鉄濃度調節以前には極低い密度でしか存在しなかった中心目珪藻の*Chaetoceros debilis*が非常に早い成長を示し、最大増殖速度は 2.9 分裂 d^{-1} に達した。その結果、*C. debilis*は植物プランクトン群集中で最も優占した。東部亜寒帯太平洋において行った実験でも、鉄濃度上昇後、珪藻を中心とした植物プランクトンの増加、PSIIの上昇、栄養塩の消費が見られた。しかし、植物プランクトンの成長速度は西部に比べて低く、クロロフィルa濃度が最大値(5.1 mg m^{-3})に達するまでに15日かかった。東部では、数的に優占したのは羽状目の珪藻であったが、生物量で見ると、中心目の珪藻も羽状目と同程度にまで増加した。以上の結果より亜寒帯太平洋のHNLC海域では、東西両海域において微量の鉄添加が、植物プランクトンの生理状態を改善し、増殖を活性化し、その結果炭素固定量、栄養塩消費量を増加させる効果があることを立証した。しかしその結果増殖する珪藻種や反応速度には違いが見られ、それは主に生態系を構成するプランクトン種組成によることが示された。

[キーワード] 二酸化炭素、鉄、亜寒帯太平洋、HNLC、植物プランクトン

1. はじめに

北太平洋亜寒帯域は、南極海、赤道湧昇域とともに栄養塩濃度が高いにもかかわらず、クロロフィル量が低い(HNLC)海域として知られている。近年、その原因の1つとして、植物プランクトンの光合成過程に重要である鉄が海水中で不足している事が挙げられている。この鉄仮説は

南極海、赤道湧昇域では、現場海域において微量の鉄を添加する鉄濃度調節実験によって確認されており、北太平洋亜寒帯域はこのような現場検証がなされていない唯一の海域である。また、植物プランクトン種組成を始めとする生態系構造や、物理化学環境が他の2海域とは大きく異なり、鉄が果たす役割については不明な点が多い。さらに北太平洋亜寒帯域の西部と東部では、大気経由で降下する鉄を含むダストの量、物理構造、生態系を構成する生物種組成が異なるため、鉄濃度の変化には異なる反応を示す可能性が指摘されている。

人為起源の二酸化炭素濃度の増加による地球温暖化は、人類の生存を脅かす最も重大な地球環境問題である。海洋の二酸化炭素吸収機構を促進させるために、HNLCにおける余剰の窒素栄養塩を利用して植物プランクトンによる二酸化炭素固定量を増加させるための、海洋への大規模鉄散布手法が注目されている。しかし、この手法が生態系に与える影響に対して懸念が寄せられているほか、他の温暖化ガスの発生を促すのではないかと指摘もなされている。そのため、HNLC海域における鉄の役割と、鉄濃度変化に対する生態系の応答を明らかにする必要性が高まっている。

HNLC海域において鉄が植物プランクトン生産を律速していることに関してはいくつかの実験成果が得られている。しかし、鉄濃度変化等の環境変化に対する生態系の応答は複雑であるため、生態系全体の反応を把握できるような研究が求められている。そのためには現場海域の鉄濃度を調節する実験を行い、生態系の応答を様々な面から把握できるような研究が必要である。

2. 研究目的

世界のHNLC海域のうち、赤道域で2回、南極海で2回の中規模現場鉄濃度調整実験が行われている。過去の実験では、鉄濃度調節による鉄不足の解消によって、植物プランクトンの増殖、栄養塩の消費、海水二酸化炭素分圧の減少、優占種の遷移等がみられた。しかし、もうひとつのHNLC海域である亜寒帯太平洋での実験は行われておらず、鉄仮説の検証、すなわち、鉄不足が植物プランクトンの硝酸塩利用を阻害しているため、クロロフィルa濃度が低く硝酸塩が余剰かが不明である。また、西部と東部亜寒帯太平洋では、水温や栄養塩濃度等物理化学環境はよく似ているものの、生態系を構成する植物プランクトン種に違いが見られる。過去の赤道太平洋と南極海における鉄濃度調節実験において生態系の応答に違いがみられたように、西部と東部亜寒帯太平洋でも、この生態系構造の違いに起因して、応答に差が見られることが予測される。

本研究は、西部および東部亜寒帯太平洋において鉄濃度調節実験を行うことによって、鉄が海洋生態系、特に植物プランクトンの生理、生態に及ぼす影響と、大気-海洋間の二酸化炭素収支に与える鉄濃度調節の効果を明らかにすることを目的として実施する。

3. 研究方法

北太平洋亜寒帯海域の西部（北緯48度30分、東経165度、実験名“SEEDS”）および東部（北緯50度、西経145度、実験名“SERIES”）のそれぞれにおいて鉄濃度調節実験を行い、以下の実験、観測を行った。

（1）鉄濃度調節による生物量及び種組成の応答

植物プランクトンの生物量を把握するためにクロロフィルaおよび光合成色素量を蛍光法およびHPLCによって測定した。クロロフィルa量に関しては、孔径の異なるフィルター（10 μm 、2 μm 、0.2 μm ）で海水を濾過することによってサイズ別に測定した。植物プランクトン種組成は、

倒立顕微鏡下で、またはフローサイトメトリーを用いた自家蛍光の測定によって調べた。

(2) 鉄濃度調節による生理特性および生産量の応答

植物プランクトンの光合成潜在能力を把握するために、光化学反応中心IIの量子収率(F_v/F_m)をfast repetition rate 蛍光光度計(FRRf)で測定した。観測は夜間FRRfを水中に降下させるか、海水試料を15分間、現場水温下で暗適応させた後に測定した。一次生産量(炭素固定量)および窒素取り込み速度の測定は、一次生産については6光深度(100, 55, 33, 10, 3, 1%)、窒素取り込みについては55%と10%光深度より採水された試料について行った。鉄濃度調節域(IN)および対象区(OUT)の観測時にテフロンコートされたニースキン採水器を用いて採水した海水に $\text{NaH}^{13}\text{CO}_3$ (一次生産)あるいは窒素態化合物である K^{15}NO_3 , $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, $(^{15}\text{NH})_2\text{CO}$ を添加し、24時間船上で表層水を循環させた水槽内で培養を行った。培養終了時に培養液をワットマンGF/F濾紙で濾過し、濾紙を凍結し保存した。質量分析計によって求められた同位体比から一次生産量および窒素取り込み速度を計算した。

(3) 鉄濃度調節による微小動物プランクトンの応答

西部亜寒帯太平洋の実験において調べた。微小動物プランクトンの植物プランクトンに対する摂食圧は、希釈法を用いて行なった。水深5mからクリーン採水した試水を元の濃度の100、75、50、25%となるように濾過海水で希釈した後、24時間培養した。培養後フローサイトメトリーでピコ植物プランクトン濃度を測定し、また蛍光法にてクロロフィルa濃度を測定して、ピコ植物プランクトンおよび全植物プランクトンに対する微小動物プランクトン摂食圧を求めた。

4. 結果・考察

(1) 西部亜寒帯太平洋の実験結果(SEEDS)

①鉄濃度調節による生物量及び種組成の応答

鉄濃度調節前のクロロフィルa濃度は 0.7 mg m^{-3} であったが、鉄濃度調節後6日目(D6)から顕著な増加が見られ、D9には 16.5 mg m^{-3} に達し、その後は $16\text{--}20 \text{ mg m}^{-3}$ の値を示して安定した(図1)。同時に窒素栄養塩である硝酸塩も減少し、鉄濃度調節によって余剰の硝酸塩の消費が促進された。鉄濃度調節前は $10 \mu\text{m}$ 以上のサイズの植物プランクトンは全体の40-50%を占めていたが、クロロフィルaの増加と共にその割合が増え、D13には95%を占めるに至った。鉄濃度調節によってすべての光合成色素が増加したが、特に珪藻の指標色素であるfucoxanthinは、D13には鉄添加前の90倍の濃度に達した。中心目の珪藻である*Chaetoceros debilis*は1日あたり2.9分裂の速度で増加して、D6以降最優占種となった。過去に南極海および赤道湧昇域で行なわれた鉄濃度調節現場実験に比べると、西部亜寒帯太平洋での本実験でのクロロフィルa増加は顕著であり、また最大値に達するまでの期間も短かった。その理由として、比較的浅い混合層(10-15m)のため光が十分に到達したこと、実験期間中の天候が穏やかだったため鉛直拡散等による植物プランクトンの拡散が少なかったことなどが挙げられるが、もっとも重要と考えられるのは、この海域に*C. debilis*のような、鉄濃度増加に応答して極めて高い速度で増殖できる種が存在した点である。環境変動に対する海洋生態系の応答を理解するためには、その変動に特異的に応答する種の確認とその特性を明らかにすることが重要であることが示された。

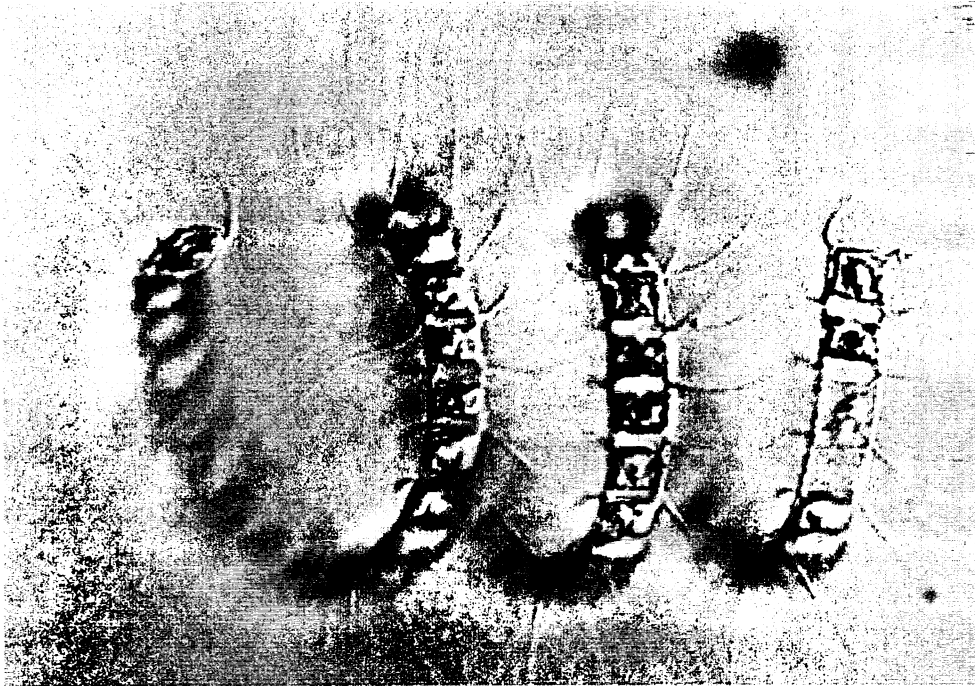


写真1 SEEDS 鉄濃度調節域で最も優占した珪藻 *Chaetoceros debilis* 群体

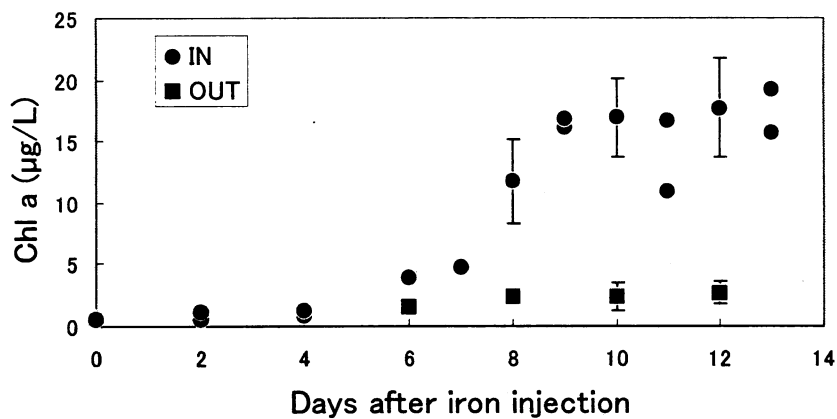


図1. 西部亜寒帯太平洋における鉄濃度調節域 (IN) とその外側 (OUT) におけるクロロフィル a 濃度の変化。

②鉄濃度調節による生理特性および生産量の応答

光化学反応中心 II の量子収率 (F_v/F_m) は、鉄濃度の増加した混合層内で D3 から上昇する傾向が見られ、D9 に最も高くなり、鉄濃度上昇によって光合成活性が高くなっていることが示された (図 2)。しかし、D9 以降は再び減少する傾向がみられ、何らかのストレスがあったことを示唆した。D9 以降、有光層深度は混合層深度よりも浅くなったことから、光合成が光律速されていた

ことが一つの理由として考えられる。

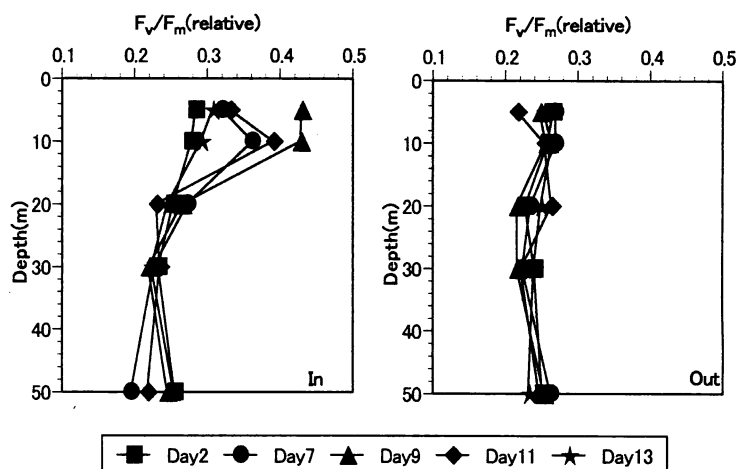


図 2. 西部亜寒帯太平洋における鉄濃度調節後の光化学反応中心 II の量子収率の時間変化。左は鉄濃度調節域、右は調節域の外側を示す。

基礎生産速度は D4 までは $400\text{--}500 \text{ mgC m}^{-2}$ の間で大きな変化がみられなかったが、その後、クロロフィル a 濃度の増加と同様に増加し、D7 以降は $1700\text{--}2300 \text{ mgC m}^{-2}$ にまで増加した。同様の増加は窒素取り込み量でもみられた。これは主に硝酸塩の取り込み増加に因るもので、アンモニア塩の取り込み速度はほとんど変化しなかった。このことは鉄濃度の上昇が、硝酸塩の同化酵素である硝酸還元酵素、亜硝酸還元酵素の活性を高め、水中内で高い濃度で存在する硝酸塩の取り込み能力を高めたことを示唆する。また、船上鉄添加培養実験により、植物プランクトンの増殖速度は、鉄濃度の増加とともに高まることが確認された (図 3)。同じ鉄濃度であれば水温とともに増殖速度は高くなるが、 18°C では低下した。これらの結果から、北太平洋亜寒帯域の西部では、鉄不足のため光合成活性および硝酸・亜硝酸還元酵素の活性が低下し、増殖率が低下するため、硝酸塩が消費されずに残ることが確認された。

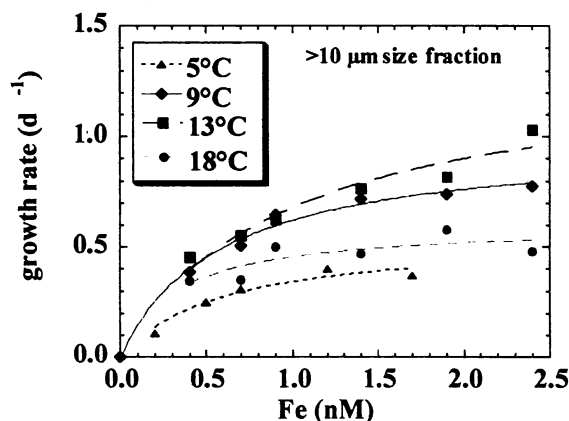


図 3. 鉄添加培養実験による、鉄添加量と $10 \mu\text{m}$ 以上の植物プランクトン増殖率の関係。

③鉄濃度調節による動物プランクトンの応答

ピコ植物プランクトンの増殖速度は鉄濃度上昇後速やかに上昇した。これに対して、ピコ植物プランクトンを摂食するナノ動物プランクトンによるピコ植物プランクトンの摂食速度は2-4日の時間差をもって上昇し、実験終了時にはピコ植物プランクトンの増殖速度とそれに対する摂食速度が均衡した。微小動物プランクトンによる植物プランクトン生物量に対する比摂食速度は、鉄濃度調節前には比成長速度と同様の値(0.4 d⁻¹)を示し、この海域では通常、植物プランクトンの増殖が被食によってコントロールされていることを示した。しかし、鉄濃度上昇に伴って植物プランクトンの増殖速度が増加すると、徐々に低下し、植物プランクトンの比増殖速度が最も高かったD7に最低の値を示した。しかし、D9以降増加し、植物プランクトンの生物量をコントロールしている事が示された。本研究により、鉄濃度上昇後のピコ植物プランクトン増加には、ナノ動物プランクトンが速やかに応答するため、ピコ植物プランクトンの生物量は大きく増加しないことが明らかになった。一方、微小動物プランクトンは植物プランクトンの増加に応答するまでには数日の時間差があるため、その期間に植物プランクトンの増加が可能となることが明らかになった。

(2) 東部亜寒帯太平洋における実験結果 (SERIES)

①鉄濃度調節による生物量及び種組成の応答

鉄濃度調節後、クロロフィル濃度は徐々に増加し、15日後(D15)に最大となった(図4)。クロロフィルa増加に伴って硝酸塩、珪酸は共に徐々に減少したが、珪酸はクロロフィルがピークとなる頃に特に大きく減少し、観測後半には枯渇した。これに対して、硝酸塩は減少はしたものの枯渇することはなかった。鉄濃度調節後最初に増加したのはハプト藻(炭酸カルシウムの殻を持つ円石藻と殻をもたない種類が出現した)であったが、D11から減少し始め、代わって珪藻が優占した。

②鉄濃度調節による生理特性および生産量の応答

光化学反応中心IIの量子収率(F_v/F_m)は、鉄濃度調節前は0.2と低く(図4)、同様に鉄濃度調節海域の外でも低かった。ここでは、硝酸は十分にあったものの、鉄が枯渇していた($<0.1\text{nM}$)ことから、鉄律速によって植物プランクトンによって吸収された光エネルギーの転送が阻害されていたことがわかる。鉄濃度調節によって鉄濃度が上昇すると、D2から F_v/F_m は上昇し、D3後以降は0.3-0.4を示して、鉄ストレスが緩和されたことがわかる。D17から、 F_v/F_m は徐々に減少し、D25には0.15を示して、鉄濃度調節前よりも低下した。鉄濃度は観測期間中徐々に低下し、D17には0.1nM以下となった。硝酸は最後まで枯渇しなかったことから、鉄の再びの枯渇によって F_v/F_m が低下したことが示された。クロロフィルはD15で増加がとまり、その後徐々に低下した。これは、 F_v/F_m の変化が示す、鉄律速による光合成効率の低下および他のストレスが植物プランクトンの総生産率を低下させ、沈降や動物プランクトンによる摂餌によって植物プランクトン生物量が徐々に低下したためであると考えられる。

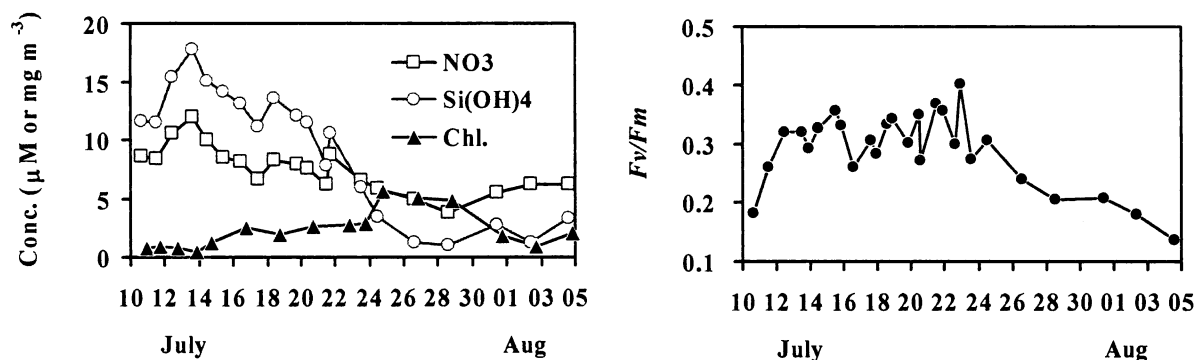


図4. 東部亜寒帯太平洋鉄濃度調節実験中の表層クロロフィル、硝酸塩、珪酸濃度(左図)および光化学反応中心IIの量子収率 (F_v/F_m , 右図) の変化。

窒素態栄養塩である硝酸塩の取り込み速度は、調節域でD16に約 $1 \mu\text{mol l}^{-1}\text{d}^{-1}$ の高い取り込み速度が観測された。対象区における取り込み速度が、 $0.03\text{--}0.08 \mu\text{mol l}^{-1}\text{d}^{-1}$ であることと比較すると鉄濃度調節によってこの海域で利用されずに残っていた硝酸塩の利用速度が10倍以上促進されたことを示す。この高い硝酸塩の取り込み速度は、鉄濃度の低下と共に徐々に減少し、D26には、 $0.05\text{--}0.17 \mu\text{mol l}^{-1}\text{d}^{-1}$ にまで低下した。一方で、再生生産型の栄養塩であるアンモニウム塩の取り込み速度は、D15には、約 $0.2 \mu\text{mol l}^{-1}\text{d}^{-1}$ と対象区の2倍程度であり、鉄濃度上昇の効果は、硝酸塩ほど大きくない。同じく再生生産型の尿素の取り込み速度は、鉄散布海域で $0.1 \mu\text{mol l}^{-1}\text{d}^{-1}$ 前後と対象区の2倍程度で鉄濃度調節の効果は大きくなかった。鉄濃度減少期における一次生産量は、D15に水中積算値で $1.82 \text{ gC m}^{-2}\text{d}^{-1}$ と高かったが、D21には $0.31 \text{ gC m}^{-2}\text{d}^{-1}$ に低下し、D25には $0.23 \text{ gC m}^{-2}\text{d}^{-1}$ にまで低下した(図5)。これらのことから鉄濃度上昇が、植物プランクトンの硝酸塩還元酵素等、硝酸塩利用に必要な機能を活性化させることによって、硝酸塩の取り込みを可能とし、基礎生産が増加したことが明らかになった。基礎生産低下期には、硝酸塩もアンモニアも欠乏していなかった。従って、 F_v/F_m の低下と同様に、実験後半には鉄欠乏によって基礎生産が低下したことが明らかである。

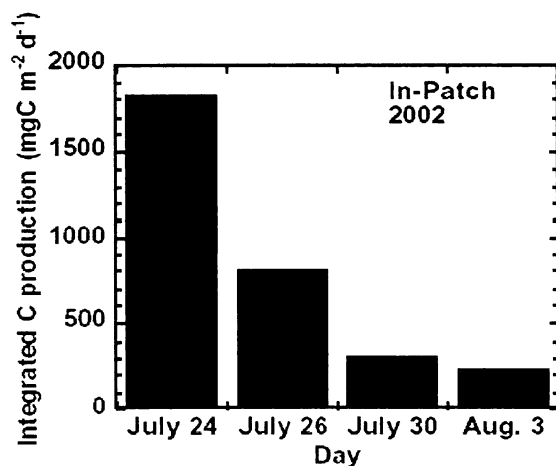


図5. 東部亜寒帯太平洋における鉄濃度調節後の水柱あたり基礎生産速度の変化。

今回の実験結果により、亜寒帯太平洋のHNLC海域では東西両海域ともに、鉄不足の解消によって、植物プランクトンによる硝酸塩の利用が可能となり、光合成の量子収率を向上させ、バイオマスを増加させることが可能となることが明らかになった。従って、南極海、東部赤道太平洋で確認された“鉄仮説”は、亜寒帯太平洋にも適用されることが確認された。

鉄濃度調節によってほとんどすべての植物プランクトン群集が増加したが、そのなかでも珪藻の増加が顕著であり、また、羽状目に比べると中心目の珪藻の増殖層度が高かった。特筆すべきこととして、西部亜寒帯太平洋においては、鉄濃度調節前には密度が非常に低かった中心目珪藻 *Chaetoceros debilis* が、他の種に比べて2-5倍の増殖速度を示し、最終的には全植物プランクトン群衆中の最優占種となったことが挙げられる。鉄濃度調節によって、西部亜寒帯太平洋では東部に比べてクロロフィルa濃度が3-4倍に達し、最大に達するまでの時間も短かった。これは、西部亜寒帯太平洋に、高い鉄濃度で、より速い増殖速度を持つ中心目の珪藻が多く、また *C. debilis* のような極めて高い増殖能を持つ種が存在したためである。従って、人為的な鉄濃度調節および森林火災、ダストイベントのような自然現象による鉄濃度変化が海洋生態系に及ぼす影響は、それぞれの生態系を構成する種やその構造によって変化するものであり、影響の理解および予測のためにも生態系構造の理解が重要であることを示している。

東部亜寒帯太平洋の実験では、西部の実験に比べてより長期の観測によって、鉄濃度調節後2-3週間で鉄が枯渇し、再び鉄律速が発生することが明らかになった。このことは、冬季の鉛直混合によって表層に供給された硝酸塩を用い、二酸化炭素をより効率よく海洋に吸収させるためには、継続的なもしくは数次に亘る鉄濃度調節の必要性を示唆している。しかしながら、過去の研究によって鉄欠乏が珪藻等植物プランクトンの沈降を活発化させる可能性が示唆されている。今後は植物プランクトンによって固定された炭素の沈降や海洋表層の硝酸塩の効率的な利用を考慮して、植物プランクトン沈降および沈降に関連する生理特性の把握が必要である。

5. 本研究により得られた成果

- (1) 国際的協力体制のもと亜寒帯太平洋で最初の鉄濃度調節実験を東西両亜寒帯太平洋で行い、鉄不足が植物プランクトンの硝酸塩取り込みを制限し、クロロフィルa濃度が低い原因であることを確認した。
- (2) 本研究および過去の鉄濃度調節実験から、鉄濃度調節による生態系の応答は一律ではなく、それは生態系を構成する種や構造の違いに起因することが示された。人為的および自然現象による鉄濃度の変化が海洋生態系および炭素循環に及ぼす影響を理解するためには、生態系構成種とその生理特性に関するよりいっそうの理解が必要であることが示された。
- (3) 海洋表層から深層への炭素の隔離手法としての鉄濃度調節実験の有効性を確認するためには、植物プランクトンや動物プランクトンに取り込まれた炭素の沈降機構を理解する必要がある、特に植物プランクトンの沈降に影響する生理特性や環境条件の把握が必要であることが示唆された。

6. 引用文献

なし

7. 国際共同研究等の状況

本プロジェクトはPICES-IFEP等で立ち上げの基礎が作られてきたが、H13年10月には、日本側委員として津田敦、齊藤宏明ら5名が参加し（委員長C. S. Wong, IOS, Canada）、H13年度実験の成果を発表した。この会議では本年度の実験計画についてカナダ、日本、アメリカの担当者による話し合いを行なわれた。H14年2月に開かれたOSM（米国海洋学会）においても、H13年度の成果を発表するとともに、付随して開催された鉄散布に関わる打ち合わせ会議では本プロジェクトから野尻幸宏および武田重信が参加し具体的な航海内容が検討された。さらに、3月には国立環境研究所にカナダ側の直接担当者である（K. Jhonson, F. Whitney IOS Canada, N. Sherry UBC Canada）が来日し、観測の継続性のためのパラメータの調整や試料の分析責任などが討議された。6月下旬には最終的な観測のすり合わせのために研究代表者の津田がカナダに招聘され最終確認を行い、7月に3隻の調査船による中規模現場鉄濃度調節実験を行なった。10月にはチンタオにおいてPICES-IFEPが開催され、本プロジェクトから津田、齊藤、野尻、武田が参加し、2002年度成果が報告された。さらにH15年3月カナダIOSにおいて2002年度実験に関するカナダSOLAS主催のワークショップが開かれ、本プロジェクトから津田、齊藤、工藤、武田が参加し、データの取りまとめや今後の発表方針が討議された。さらにH15年4月には2004年度以降の実験に関して米国のM. Wellsら3人が来日しスケジュールやパラメータに関する調整を行った。H15年6月には、NIWA（ニュージーランド）で野尻が2002年実験の主要なメンバーであるP. BoydおよびC. S. Lawとデータの取り纏めおよび問題点解決のための話し合いを行い、論文発表に関するスケジュール確認を行なった。H16年2月にはカナダVictoriaにてIFEPワークショップが開かれ、2002年実験の取り纏めや、炭素隔離手法としての鉄濃度調節に関する評価について話し合われた。さらに同2月、米国陸水海洋学会および海洋学協会合同大会にて、鉄濃度調節に関する特別セッションを設けて、得られた成果を発表した。

現在の主なコンタクトパーソンは以下のとおりである。

研究全体：C. S. Wong, IOS Canada; P. Boyd NIWA New Zealand

航海関係：N. Sherry, UBC Canada

生物応答：P. Harrison, UBC Canada

化学応答：K. Johnson, ; F. Whitney, IOS Canada

基礎データ：K. Jhonson

気体成分：M. Lavasseur, ; Laval Univ., Canada

米国：M. Wells, University of Maine USA

8. 研究成果の発表状況

（1）誌上発表（学術誌・書籍）

<学術誌（査読あり）>

- ①Atsushi Tsuda, Shigenobu Takeda, Hiroaki Saito, Jun Nishioka, Yukihiko Nojiri, Isao Kudo, Hiroshi Kiyosawa, Akihiro Shiomoto, Keiri Imai, Tuneo Ono, Akihumi Shimamoto, Daisuke Tsumune, Takeshi Yoshimura, Tatsuo Aono, Akira Hinuma, Masatoshi Kinugasa, Koji Suzuki, Yoshiki Sorin, Yoshihumi Noiri, Heihachiro Tani, Yuji Deguchi, Nobuo Tsurushima, Hiroshi Ogawa, Kimio Fukami,

Takeshi Kuma, Toshiro Saino : Science, 300, 958-961 (2003)

「A mesoscale iron enrichment in the western subarctic Pacific induces large centric diatom bloom」

- ②Nishioka, J., S. Takeda, I. Kudo, D. Tsumune, T. Yoshimura, K. Kuma and A. Tsuda:
Geochem. Res. Let., 30, OCE 1-1-1-4 (2003)

「Processes of iron limitation in the subarctic NW Pacific. -Higher particulate iron concentration than in the NE Pacific」

- ③Boyd, P. W., Law, C., Nojiri, Y., Tsuda, A., Levasseur, M., Takeda, S., Rivkin, R., Harrison, P. J., Strzepek, R., Gower, J., McKay, R. M., Abraham, E., Arychuk, M., Barwell-Clarke, J., Crawford, W., Hale, M., Harada, K., Johnson, K., Kiyosawa, H., Kudo, I., Marchetti, A., Miller, M., Needoba, J., Nishioka, J., Ogawa, H., Page, J., Robert, M., Saito, H., Sastri, A., Sherry, N., Soutar, T., Sutherland, N., Taira, Y., Whitney, F., Wong, S.-K. E. Yoshimura, T. : Nature, 428, 549-553 (2004)

「The decline and fate of an iron-induced subarctic phytoplankton bloom」

- ④Saito, H., Suzuki, K., Hinuma, a., Ota, T., Fukami, K., Kiyosawa, H., Saino, T., Tsuda, A. : Prog. Oceanogr., (in press)

「Responses of microzooplankton to in situ iron fertilization in the western subarctic Pacific」

- ⑤Suzuki, K., Hinuma, A., Saito, H., Kiyosawa, H., Liu, H., Saino, T., Tsuda, A. : Prog. Oceanogr., (in press)

「Response of phytoplankton and heterotrophic bacteria in the northwest subarctic Pacific to in situ iron fertilization as estimated by HPLC pigment analysis and flow cytometry」

- ⑥Tsuda, A., Kiyosawa, H., Mochizuki, M., Shiga, N., Saito, H., Kuwata, A., Imai, K., Nishioka, J., Ono, T., Lundholm, N. : Prog. Oceanogr., (in press)

「Similarity and dissimilarity of diatom species composition between iron-induced open ocean bloom and natural blooms in the western subarctic Pacific」

- ⑦Tsuda, A., Saito, H., Nishioka, J., Ono, T. : Prog. Oceanogr., (in press)

「Mesozooplankton responses to iron-fertilization in the western subarctic Pacific (SEEDS2001)」

- ⑧Noiri, Y., I. Kudo, H. Kiyosawa, J. Nishioka and A. Tsuda : Prog. Oceanogr., (in press)

「Influence of Iron and Temperature on growth, nutrient utilization ratios and phytoplankton species composition in the western subarctic Pacific Ocean during the SEEDS experiment」

<学術誌(査読なし)>

なし

<報告書類等>

- ①齊藤宏明 : 海の研究, 12: 346-349. (2003)

「OCEANS (Ocean Biogeochemistry and Ecosystems Analysis) International Open Science Conference 報告」

(2) 口頭発表

- ① Nojiri, Y., K.Imai, T.Ono, Tsurushima, H.Saito and A.Tsuda : Ocean Science Meeting (2002)
「Export flux and carbon system changes in the Subarctic Pacific iron experiment for ecosystem dynamics study (SEEDS)」
- ② Saito, H., K. Suzuki, A. Hinuma, H. Kiyosawa, A. Shiimoto, A. Tsuda : Ocean Science Meeting (2002)
「Biological processes during the Subarctic Pacific iron-experiment for ecosystem dynamics study (SEEDS)」
- ③ Nishioka, J., S. Takeda, D. Tsumune, T. Yoshimura, I. Kudo, H. Tani, and A. Tsuda : Ocean Science Meeting (2002)
「Dynamics of Iron during the Subarctic Pacific Iron Experiment for Ecosystem Dynamics Study (SEEDS)」
- ④ Takeda, S., A.Tsuda, H.Saito, Y.Nojiri, J.Nishioka, I.Kudo, D.Tsumune : Ocean Science Meeting (2002)
「Bio-geochemical Processes During the Subarctic Pacific Iron Experiment for Ecosystem Dynamics Study (SEEDS)」
- ⑤ Kudo, I., Y.Noiri, K.Imai, H.Kiyosawa, J.Nishioka, A.Tsuda : Ocean Science Meeting (2002)
「Primary production and N assimilation during the Subarctic Pacific iron Experiment for Ecosystem Dynamics Study (SEEDS 2001)」
- ⑥ 津田敦 その他 24 名 : 日本海洋学春季大会(2002)
「開洋丸 Subarctic ocean Enrichment and Ecosystem Dynamics Study (SEEDS)航海概要」年春季大会、2002 年 3 月、東京
- ⑦ 津旨大輔、西岡純、嶋本品文、津田敦、武田重信、齊藤宏明 : 日本海洋学春季大会(2002)
「鉄散布実験 SEEDS における鉄散布手法と SF6 トレーサーによる水塊追跡」
- ⑧ 西岡純、津旨大輔、芳村毅、武田重信、工藤勲、津田敦 : 日本海洋学春季大会(2002)
「SEEDS 鉄散布実験中の鉄の挙動」
- ⑨ 谷平八郎、西岡純、工藤勲、久万、津田敦 : 日本海洋学春季大会(2002)
「北西部北太平洋鉄散布航海(SEEDS)における Fe(III)溶解度の変動」
- ⑩ ニーラム・ラマイア、武田重信、古谷研、芳村毅、西岡純、青野辰雄、野尻幸宏、今井圭理、工藤勲、齊藤宏明、津田敦 : 日本海洋学春季大会(2002)
「Vertical profile and flux of TEP during the Subarctic Iron Experiment for Ecosystem dynamic Study (SEEDS)」
- ⑪ 工藤勲、野入善史、今井圭理、野尻幸宏、津田敦 : 日本海洋学春季大会(2002)
「西部北太平洋鉄散布航海(SEEDS 2001)における基礎生産と窒素取り込み過程」
- ⑫ 清沢弘志・鈴木光次・日沼公・齊藤宏明・津田敦 : 日本海洋学春季大会(2002)
「鉄散布実験(SEEDS)における植物プランクトン群集の応答」

- ⑬ 齊藤宏明、鈴木光次、日沼公、津田敦、清沢弘志、才野敏郎 : 日本海洋学春季大会(2002)
「西部亜寒帯太平洋での鉄添加実験(SEEDS)における動物プランクトンの応答」
- ⑭ 野入善史、工藤勲、清沢弘志、西岡純、津田敦 : 日本海洋学春季大会(2002)
「鉄散布における水温の重要性(SEEDS 航海)」
- ⑮ 今井圭理、野尻幸宏、齊藤宏明、津田敦 : 日本海洋学春季大会(2002)
「鉄散布実験航海(SEEDS 2001)における沈降粒子フラックスの挙動」
- ⑯ 青野辰雄、工藤勲、今井圭理、野尻幸宏、津田敦 : 日本海洋学春季大会(2002)
「鉄散布実験 Subarctic Iron Experiment for Ecosystem dynamic Study (SEEDS)航海における Th フラックスと粒子フラックスについて」
- ⑰ 日沼公、鈴木光次、齊藤宏明、才野敏郎 : 日本海洋学春季大会(2002)
「西部亜寒帯太平洋域の鉄散布に対する植物プランクトンの応答(SEEDS)-生物物理学的手法による解析-」
- ⑱ 津田敦・齊藤宏明・Philip Boyd・西岡純・Maurice Lavrasseur・野尻幸宏・Nelson Sherr・工藤勲・武田重信: 日本海洋学会春季大会 (2003)
「Introduction of the iron-fertilization experiment in the eastern subarctic Pacific (SERIES)」
- ⑲ 齊藤宏明・鈴木光次・日沼公・才野敏郎・津田敦 : 日本海洋学会春季大会 (2003)
「西部亜寒帯太平洋鉄添加実験(SEEDS)における海水と植物プランクトン光学特性の応答」
- ⑳ 鈴木光次・日沼公・齊藤宏明・清沢弘志・才野敏郎・津田敦 : 日本海洋学会春季大会 (2003)
「北西太平洋亜寒帯域の鉄散布実験(SEEDS)における植物プランクトン群集の応答2-生物化学的手法による解析-」
- ㉑ 齊藤宏明: 日本海洋学会シンポジウム 表層から深層への炭素輸送- Export Flux の見積もりについて - (2003)
「炭素輸送に果す生物の役割」
- ㉒ 野尻幸宏・今井圭理・齊藤宏明・津田敦: 日本海洋学会シンポジウム 表層から深層への炭素輸送- Export Flux の見積もりについて - (2003)
「海洋鉄散布実験(SEEDS,SERIES)での漂流トラップによる輸送フラックス測定」
- ㉓ 谷 平八郎、西岡 純、工藤 勲、久万 健志、津田敦: 日本海洋学会春季大会 (2003)
「北西部北太平洋鉄散布航海(SEEDS)におけるFe(III)溶解度の変動」
- ㉔ 工藤勲、野入善史、今井圭理、野尻幸宏、津田敦: 日本海洋学会春季大会 (2003)
「西部北太平洋鉄散布航海(SEEDS 2001)における基礎生産と窒素取り込み過程」
- ㉕ 谷 平八郎、西岡 純、工藤 勲、久万 健志、津田敦 : 日本海洋学会春季大会 (2003)
「北西部北太平洋鉄散布航海(SEEDS)におけるFe(III)溶解度の変動」
- ㉖ 工藤勲、野入善史、今井圭理、野尻幸宏、津田敦 : 日本海洋学会春季大会 (2003)
「西部北太平洋鉄散布航海(SEEDS 2001)における基礎生産と窒素取り込み過程」
- ㉗ 野入善史、工藤勲、清沢弘志、西岡純、津田敦 : 日本海洋学会春季大会 (2003)
「鉄散布における水温の重要性(SEEDS航海)」
- ㉘ 西岡 純・芳村 毅・小埜恒夫・齊藤宏明・武田重信・久万健志: 日本海洋学会年春季大会 (2004)
「北太平洋における下層から海洋表層への溶存鉄フラックスの見積もり」

- ⑳ 近藤能子・武田重信・西岡 純・齊藤宏明・鈴木光次・古谷 研：日本海洋学会年春季大会（2004）
「親潮域春季ブルーム期A-LINEにおける植物プランクトン増殖の鉄制限の可能性」
- ㉑ Saito, H., Suzuki, K., Hinuma, A., Ota, T., Fukami, K., Kiyosawa, H., Saino, T., Tsuda, A. :
ASLO/TOS 2004 Ocean Research Conference (2004)
「Responses of micrograzers to the mesoscale iron fertilization in the western subarctic Pacific
(SEEDS)」
- ㉒ Nishioka, Takeda, S., Kudo, I., Tsumune, D., Yoshimura, T., Kuma, K., Ono, T., Saito, H.,
Johnson, Wm.K., Wong, C.S., Tsuda, A. : ASLO/TOS 2004 Ocean Research Conference (2004)
「Iron limitation processes in the NW subarctic Pacific」
- ㉓ Kondo, Y., Takeda, S., Nishioka, J., Saito, H., Suzuki, K., Furuya, K. : ASLO/TOS 2004 Ocean
Research Conference (2004)
「Iron limitation status of phytoplankton community in the Oyashio region during spring」
- ㉔ Tsuda, A., Takeda, S., Saito, H., Nishioka, J., Nojiri, Y., Kudo, I. : ASLO/TOS 2004 Ocean
Research Conference (2004)
「An in-situ iron enrichment experiment in the western subarctic Pacific (SEEDS): introduction and
summary」

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

- ① 読売新聞（H13 年8月16日夕刊全国版、11月14日夕刊関西版）
- ② 共同通信配信 2（岐阜新聞 H13 年 10 月 31 日、北海道新聞 10 月 29 日、高知新聞 10 月 27 日、福井新聞 11 月 7 日、山陰中央新聞 0 月 28 日、徳島新聞 11 月 2 日）
- ③ 北大学生新聞（H13 年 11 月 21 日）
- ④ 釧路新聞（H14 年 1 月 1 日元旦号）
- ⑤ 北海道新聞（H14 年 4 月 20 日道東版）
- ⑥ 日本経済新聞（H14年5月20日）
- ⑦ NHKラジオジャパン、テクノフロンティア（H14年6月11日）
- ⑧ 科学新聞（H14年7月5日）
- ⑨ 読売新聞（H14年7月29日、夕刊）
- ⑩ Tronto Star（カナダ）（H14年8月10日）
- ⑪ 読売新聞（H15年4月16日、夕刊）
- ⑫ 朝日新聞（H15年5月9日）
- ⑬ 毎日新聞（H15年5月9日）
- ⑭ 中央日報（韓国）（H15年5月10日）、その他米国、ドイツでも新聞報道（記事は未確認）
- ⑮ 日本経済新聞（H15年5月12日）
- ⑯ NHKニュース釧路版（H15年6月9日）

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

近年二酸化炭素排出権取引に注目したベンチャー企業が、鉄濃度調節による二酸化炭素吸収手法の有用性を喧伝し、計画している。HNLC海域への大規模な鉄濃度調節の、二酸化炭素吸収効果とその環境影響についての評価はまだ十分とはいえない。そこで、政策決定者がより正しい判断が可能となるよう、“鉄濃度調節による二酸化炭素吸収手法”の評価に関して中立的な立場にたって得られた本研究成果を、学術雑誌に積極的に発表するとともに記者発表等した。