

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

(3) 鉄濃度調節が炭素循環に及ぼす影響に関する研究

独立行政法人国立環境研究所

地球温暖化研究プロジェクト炭素循環研究チーム 野尻幸宏

同 荒巻能史

同 藤井賢彦 (科学技術特別研究員)

同 今井圭理 (科学技術振興事業団研究員)

東京大学大学院農学生命科学研究科

武田重信

平成13~15年度合計予算額 50,686千円

(うち、平成13年度予算額 16,870千円)

[要旨] 栄養塩濃度が高いにも関わらずクロロフィル量が低い海域である北太平洋高緯度海域で、温暖化対策の一つとして提案されている海洋表層への鉄濃度調節の実効性を確認するための海洋中規模実験を行い、温暖化対策としての有効性の評価とそれが及ぼす環境影響評価を行うのが本研究の目的である。海水中の鉄と炭酸物質等の測定、炭素およびその他成分に関する鉛直輸送フラックス測定を2001年7-8月に水産庁「開洋丸」を利用して行われた実験で行った。鉄濃度調節域観測では、 pCO_2 の大きな変化が見られ、11日目には $226 \mu atm$ にまで低下した。実験期間の炭素収支を推定した結果、13日間の植物プランクトン増殖による無機炭酸固定量は $1.30 mol m^{-2}$ であり、固定された二酸化炭素の75%が粒子状炭素として混合層内に留まっていた。このことは、鉄濃度調節によって有機炭素に固定された二酸化炭素が必ずしも速やかな鉛直フラックスの増加につながらず、表層で分解が進むと pCO_2 が回復し、大気からの二酸化炭素吸収につながらないことになる。ただし、今回の実験で大きな増殖が見られた植物プランクトンが比較的大型の珪藻類であったことを考えると、観測終了後に有機炭素の大きな鉛直輸送が起こった可能性が示唆された。

2002年は東西太平洋の対照点ということができるアラスカ湾海域で、日加共同実験として中規模鉄濃度調節実験を行った。実験は、2002年7-8月にカナダ研究機関の研究船2隻と開洋丸を利用して実施された。海水中の化学成分測定、炭素と生元素の鉛直輸送フラックス測定を、水産庁開洋丸で実施した。濃度調節23日後の7月31日以前は、鉄濃度調節パッチ内外の沈降粒子量の差がほとんどなかったのに対し、それ以降8月4日までの観測最終期で、沈降粒子量が著しく増大した。沈降粒子増大は有機炭素の沈降増大を伴っていた。中規模鉄濃度調節実験で、植物プランクトンブルームの終結から生成した粒子の沈降までの一連の現象を確認したはじめての実験であった。しかしながら、固定された炭素の水柱での分解も有意に大きな量であった。

[キーワード] 二酸化炭素、対策評価、海洋鉄濃度調節、炭素循環、植物プランクトン

1. はじめに

栄養塩濃度が高いにも関わらずクロロフィル量が低い海域 (HNLC) への鉄濃度調節は、植物プランクトンの増殖に関わる鉄による制限を解除することでその成長を促進し、海洋

表層から中深層への炭素輸送量を大きくするというアイデアであり、温暖化対策の一つとして提案されている。HNLC海域としては、南極海が最大の面積を占めるのであるが、北太平洋高緯度海域は、それに次ぐ大きさのHNLC海域である。植物プランクトンの増殖が鉄によって制限されていることは、ボトルスケールの培養においてHNLC海域の海水に鉄を添加することで、その増殖促進効果から確かめられている。次に、その対策としての実効性を確認するための海洋中規模（メソスケール）実験が、赤道太平洋と南極海で欧米のグループによって行われた。この研究課題では、これまでにまだ実験が行われていない北太平洋高緯度海域における最初の中規模実験を行い、温暖化対策としての鉄濃度調節の有効性に関する評価とそれが及ぼす環境影響評価を科学的に中立の立場で行う。北太平洋亜寒帯域におけるHNLC海域は、東西に広がっているので、本来の浮遊生物群集構造が異なる東西海域それぞれでの鉄濃度調節実験に対する応答の比較が必要であると考えられた。

研究課題では、2001年7月に北西太平洋亜寒帯海域(SEEDS)、2002年7-8月にアラスカ湾海域(SERIES)でメソスケール実験を行った。本サブテーマ担当機関では、炭素とその他の生元素の収支に関する測定および解析を行った。

2. 研究目的

西部北太平洋における中規模実験を行うにあたり、その実験において必要となる海水中の鉄・炭酸物質等の測定、炭素およびその他成分に関する鉛直輸送フラックス測定の手法を開発した。その手法を2001年7-8月に水産庁「開洋丸」を利用して行われたSEEDS (Subarctic Pacific Iron Experiment and Ecosystem Dynamics Study) 実験に適用し、さらに必要な改良を加えて2002年SERIESに臨んだ。炭素と生元素成分の鉛直フラックスは、海洋中規模実験において鉄濃度調節の有効性を評価する中心的測定であり、表層海水に鉄を加えることによって増殖した植物プランクトンが固定した炭素が海洋表層から除かれ、有効に大気二酸化炭素吸収効果につながるかどうかを明らかにするために行う。

2002年実験はカナダとの共同実験であり、前半がカナダ研究船、後半が水産庁開洋丸による観測分担となった、重要な項目については、サンプルを交換、手法の統一を行った。

3. 研究方法

鉄濃度調節実験は、太平洋赤道海域で実施された米国による手法に基本的に従った。2001年実験では7月18-19日にかけて、北緯48.5度・東経164.9度付近の海域、10km x 8km四方の範囲に硫酸鉄($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、鉄として350kg)と水塊追跡のトレーサー物質として6フッ化イオウ(SF_6 、0.48M)を混合した溶液を散布した。表層混合層の厚み10-15mと散布面積80km²から想定される理論的な全鉄濃度上昇は5.2-7.8nMとなる。鉄散布後のパッチ内外の観測は、当初は SF_6 のシグナルをもとに開始した。2001年の実験では、開洋丸の研究用海水ラインに、国立環境研究所と憐紀本電子が共同開発したタンデム平衡器を用いた二酸化炭素分圧(pCO_2)測定装置を取り付けた。この装置は、 pCO_2 を1分間隔で記録するとともに、船内の他のPCからLAN経由でそのデータにアクセスし、 pCO_2 現在値が常時監視できるシステムとなっている。この装置に、植物プランクトン蛍光の連続センサーを組み合わせ、鉄濃度調節海域を縦横に走って鉄濃度調節パッチの全体を把握するパッチサーベイで高密度データを取得することに成功した。

海域の植物プランクトンが鉄に応答・増殖して、 pCO_2 とプランクトン蛍光が変化した後、 SF_6 による追跡に替わって、これらの濃度変化を測定する追跡が有効であった。また、海中の全炭酸(DIC)・アルカリ度は、濃度調節域中心点と調節域外のレファレンス点でのロゼット各層採水試料を持ち帰って分析した。また、濃度調節海域の鉄濃度測定には鉄の汚染に極力注意を払った採水器による鉛直各層採水と、航走中の表面海水鉄濃度測定のために開発した曳航体からの採水を行った。鉄濃度の測定は、キレート樹脂濃縮-化学発光検出法に基づく自動測定装置で船上分析した。また、ナウアー(Knauer)型のドリフティングセディメントトラップによる沈降粒子捕集を鉄濃度調節海域内外で行った。パッチ内では20, 40, 60, 100, 200mの深度、パッチ外では40, 60, 100mの深度に8連の捕集器を取り付け、植物プランクトンの大規模増殖後は約2日間隔でパッチ内トラップを回収・再設置して粒子を捕集した。試料は持ち帰ったうえ、遊泳性の動物を除いた後に、有機炭素、生物起源ケイ素、鉄を含む金属元素類を化学分析した。

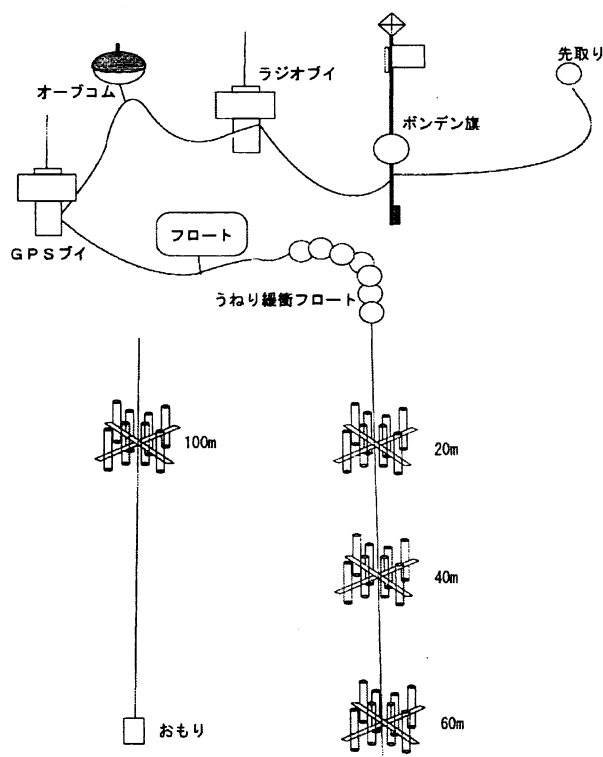


図1 SEEDSおよびSERIESで用いられた炭素および生元素の鉛直フラックスを測定するセディメントトラップ概念図

2002年は、7月9日にカナダ海洋科学研究所研究船CSS J. P. Tullyによって、北緯50度・西経145度付近の海域4.75マイル x 4.75マイル四方の範囲に硫酸鉄と6フッ化イオウが散布された。表層混合層の厚み10mから想定される理論的な全鉄濃度上昇は4nMであった。この1回目の鉄散布後植物プランクトンの弱い応答が直ちに認められたが、7月13-14日の荒天と強風により、表層混合層深度が30mまで深まり、植物プランクトンブルーム形成が止まったため、2回目の鉄散布が7月16日から17日にかけて行われた。2回目の鉄散布による理論的鉄濃度上層は2nMであった。開洋丸観測では、2002年の実験でもパッチ追跡計測装置として、同様な pCO_2 分圧測定装置と植物プランクトン蛍光センサーを用いた。鉛直フラックスの測定では、ナウアー(Knauer)型ドリフティングセディメントトラップによる沈降粒子捕集の

深度を50, 75, 100, 125mとした。各深度に8連の捕集器を取り付け、2日から4日間、鉄濃度調節パッチ内を漂流させ、揚収して試料を回収した。パッチ外のレファレンス点でも同様に2日から4日の漂流で、鉄濃度調節の影響のない状態での沈降粒子捕集を行った。トラップ装置は、国立環境研究所のものを、前半のカナダ船での観測から通して使い、方法による差を避けた。試料の船上処理として、1mmメッシュを通して遊泳性の動物を除き、ヌクレポアフィルターとガラス繊維フィルター(GF/F)でろ過を行った。試料は、国立環境研究所とカナダ海洋研究所で分担して、有機・無機炭素、生物起源ケイ素、生元素類、炭素・窒素同位体比などの化学分析を行った。

4. 結果・考察

2001年SEEDS実験では、鉄濃度調節中規模実験に先立ち、予定海域の予備調査を行った。東経165度線に沿って南北に航走して海域の水溫鉛直分布、 $p\text{CO}_2$ などの測定から北緯48.5度周辺を濃度調節候補海域とした。その周辺海域で鉄濃度測定を行い、鉄が制限因子となる程度に低濃度(0.05 \pm 0.02nM)であることを確認した。この海域の溶存鉄濃度は、表層で低く、深度200m付近から増大する栄養塩型の鉛直分布を示し、600m以深では1nM以上に達した。全鉄濃度は、全層に渡って溶存鉄濃度より約0.2nMほど高い値を示した。また、実験海域の東西南北20マイルにおける観測点での表層混合層中の溶存鉄濃度は、南側の測点における表面付近をのぞくと0.1nM前後の低い値であり、この海域の広い範囲にわたって鉄が植物プランクトンの主たる増殖制限要因となっていたと考えられた。またこのサーベイで、 $p\text{CO}_2$ 測定から海域の鉄濃度調節前の炭酸濃度が空間的に均一であることを確認した。

鉄濃度調整実験期間中における鉄散布パッチ外側の測点における表層70mまでの溶存鉄濃度は、予備調査と同様の低い値を示した。一方、酸可溶性粒子鉄については、実験開始後4日目まで減少したが、10m以浅で7日目から再び増加が見られ、11日目まで0.4nM前後の高い値で推移した。これら表層水中の粒子状鉄濃度の増加は、実験期間中に大気からの鉄供給があったことを示唆しており、大気エアロゾル輸送のモデル計算結果からは、シベリア地方での森林火災により発生したエアロゾルが同時期に実験海域周辺に輸送されていた可能性が示されている。また、鉄濃度調整実験期間中、鉄散布パッチ外側の測点においても若干ではあるが、植物プランクトン量の増加と栄養塩濃度の低下が観測されている。これらの変化が、大気由来の自然起源の鉄供給によるかどうかは検討が必要である。

鉄散布後4.5-11.5時間に行った最初のプロペラサーベイにより、鉄散布パッチ内の溶存鉄(0.22 μm 未満のサイズ画分)濃度は平均1.88nM、最高値6.02nMに増加していたことを確認した。鉄散布後2日目に行った鉄散布パッチ中心付近のサイズ別鉄濃度測定の結果、表層混合層内(表層から約10m深度まで)に存在する溶存鉄の75%以上がコロイド状鉄(200kDaから0.22 μm)の画分に含まれることが明らかになった。溶存鉄濃度は鉄散布3日目まで大きく減少したが(3日目のパッチ内平均濃度は0.99nM)、その後は緩やかな減少に転じ、12日目の時点でパッチ中心付近の溶存鉄濃度は約0.15nMの低濃度になった。

酸可溶性粒子状鉄濃度(>0.22 μm)は、パッチ水塊の物理的な拡散・希釈にも関わらず、実験期間を通して1nM以上の高い値を示した。鉛直断面を見ると、溶存鉄濃度からは時間の経過と共に鉄散布パッチが識別できなくなっているのに対して、酸可溶性粒子状鉄を含む全画分濃度の分布

からは依然として鉄散布パッチの存在を確認することができた。このように、酸可溶性粒子状鉄は、鉄散布後3日目までを除いて、全画分鉄濃度の70%以上をしめており、その比率は実験後半に徐々に増加した。すなわち、散布した鉄は水酸化物として粒子化・凝集して水中から沈降除去されるだけでなく、半分近くの量が、プランクトンなどの懸濁粒子に吸着あるいは取り込まれて表層混合層に留まっていた。ただし、この酸可溶性粒子状鉄が植物プランクトンにとって利用可能な化学的形態であるか否かについては、今のところ明らかではない。

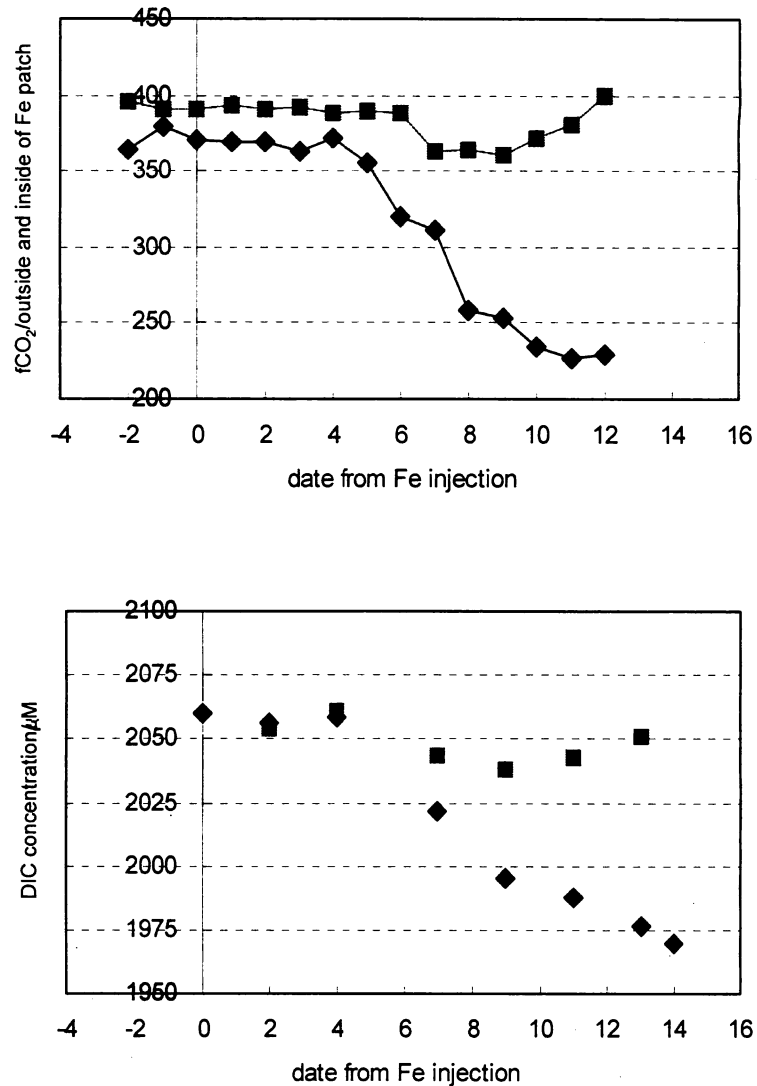


図2 SEEDS鉄濃度調節実験でのパッチ内外におけるCO₂分圧(a)と全炭酸(b)の変化

鉄濃度調節域（パッチ）の観測では、濃度調節域を数方向から横断しながら吸引海水を連続測定するプロペラサーベイで、pCO₂分布の形状を把握した。図2 aは濃度調節2日前からの海域のサーベイで得たpCO₂最大値と最小値を示す。pCO₂のできるだけ均一な海域を選んだので、濃度調節前のpCO₂最大最小値の差は17 μatm程度であった。5日目から表層pCO₂が応答を始め、濃度調節6日目のプロペラサーベイでは、明瞭に周辺域とのpCO₂差が確認

されるようになった。パッチ内での pCO_2 変動は、連続測定した植物プランクトン蛍光とよく対応するパターンであった。11日目に $226 \mu atm$ にまで pCO_2 は低下したが、その後は大量の植物プランクトンの存在により平衡器の維持が困難となって、測定に問題を生じた。

一方、各層採水の試料の分析結果から、深度5mの海水のDICをプロットしたものが図2bである。パッチ外のDICは $\pm 10 \mu atm$ の変動でほぼ一定であったが、パッチ内で植物プランクトンの同化による大きな濃度低下が見られた。その低下は14日目の開洋丸の海域撤退まで続いた。アルカリ度に有意な変動はなく、炭酸殻生成が活発でなかったことが推定された。

2002年の鉄調節実験は、これまでに鉄濃度測定が繰り返された海域であり、その鉛直濃度分布報告が存在する。今回の実験でも、鉄濃度調節水塊の外側の測点では、これまでの報告値と同程度の低い鉄濃度（おおむね $0.1 nM$ 以下）の値が得られた。鉄散布量と散布面積および混合層深度から見積もられる鉄散布直後の理論的な鉄濃度は $4 nM$ であったが、散布後1日後の観測で得られた溶存鉄濃度は約 $2 nM$ であった。そなわち、散布した鉄のうち約半分近くが粒子化していたと推察された。鉄濃度調節水塊内の溶存鉄濃度は、その後急激に減少したため、2回目の鉄散布（ $2 nM$ ）が実施されたが、2回目散布以降の溶存鉄濃度は最大でも $0.5 nM$ 前後と顕著な増大を示さず、その後は実験終了時まで、 $0.1-0.2 nM$ の低い値で推移した。本実験で見られた溶存鉄の減少速度は、これまでに太平洋赤道域や南極海で実施された鉄濃度調節実験と比較して同程度であった。

鉄濃度調節水塊内の溶存鉄の鉛直分布をみると、多少のばらつきは認められるものの、開洋丸が実験海域に到着した実験開始後15日以降には、表層混合層内と下層の間に明瞭な濃度差は認められず、 $0.1 nM$ 以下の低い値がほとんどであった。一方、全鉄濃度は、パッチ水塊の物理的な拡散・希釈にも関わらず、実験開始後15日目に表層混合層内で $0.4 nM$ の比較的高い値が観測され、その後徐々に減少するものの、実験終了時の26日目においても $0.2 nM$ 程度が残存していることが明らかになった。同様な傾向は、鉄濃度調整水塊を横断する形で表面水の連続採水を行ったプロペラサーベイの結果からも見る事ができた。鉄濃度調整水塊内外で、溶存鉄濃度は一様に低い値を示すが、全鉄濃度はパッチ内で明らかに高い値を示した。この結果は、2001年のSEEDS実験と同様であり、散布した鉄は水酸化物として粒子化・凝集して水中から沈降除去されるだけでなく、プランクトンなどの懸濁粒子に吸着あるいは取り込まれて表層混合層に留まり残存することがわかった。

2002年SERIESにおいては、主要な採水とパッチサーベイをカナダ観測船Tullyと水産庁開洋丸が分担した。鉄濃度調節後15日目にあたる7月23日までがTullyで、16日目にあたる7月24日からが開洋丸による。期間中の生物量と海水の化学成分の変化としてクロロフィル、珪酸、硝酸の濃度を図3に示した。パッチサーベイにより鉄濃度調節パッチ中心地点を定め、CTDロゼット採水器によって海水を鉛直的に採取した試料の分析結果である。鉄濃度調節8日後の7月16日に、表層のクロロフィル濃度が $2 \mu g L^{-1}$ を越え、確実な植物プランクトン増殖が認められた。栄養塩である硝酸と珪酸には、鉄濃度調節前の7月7日と2日後の7月10日の間に大きな濃度低下があったように見えるが、これは海域の不均一さによるもので、現実に鉄濃度調節した海域の初期栄養塩濃度は7月10日のものと考えられる。

7月12日には鉛直じょう乱が起こり下層の栄養塩に富む海水と表層との混合で、硝酸 $10 \mu M$ 、珪酸 $15 \mu M$ に濃度上昇した。7月12日では、まだ植物プランクトン増殖が顕著でなく、この濃度を実

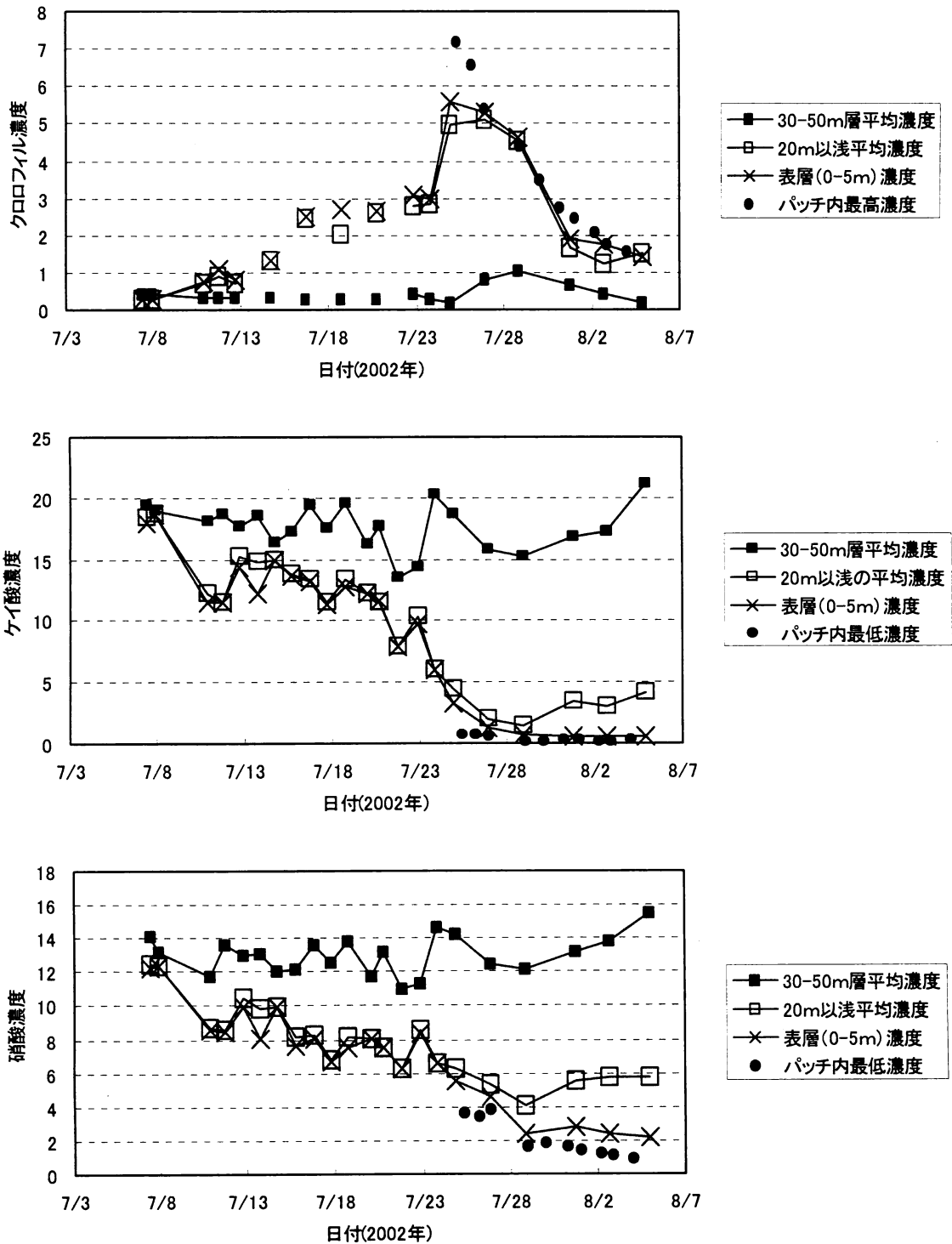


図3 SERIES実験でのクロロフィル濃度 ($\mu\text{g L}^{-1}$)、珪酸濃度 (μM)、硝酸濃度 (μM) の変化

験の初期濃度と考えることができる。濃度調節14日後である7月22日まで硝酸と珪酸の濃度がゆるやかに低下したが、2度、表層栄養塩濃度が回復するイベントがあった。この間、表層の植物プランクトン濃度は2-3 $\mu\text{g L}^{-1}$ が保たれた。これは、海域の密度成層がまだそれほど強くなく、

風によるじょう乱で表層・亜表層の混合が時折起こったことを示す。しかし、7月24日以降は、表層水温の上昇で、密度成層が強まり、鉛直混合による栄養塩供給は見られなくなった。7月24日以降の開洋丸サーベイでは、パッチサーベイによるクロロフィル最高濃度および栄養塩最低濃度を図3に示した。採水位置は極めてよくパッチ中心を捕らえていた。この間の栄養塩の消費比を求めると、7月11日-15日の期間と7月16日-20日の期間の濃度減少においては、珪酸/硝酸消費比としてそれぞれ0.75および1.54というその後の期間より低い値が認められた。これはこの間の珪藻の増殖で、珪酸殻生成に対する有機炭素固定比が大きかったことを示唆し、鉄濃度不足がない状態の珪藻増殖があったと考えられる。また、SiO₂を固定しない珪藻以外の藻類の寄与が大きかった可能性もある。

7月24日以降の珪酸の濃度低下は極めて顕著であり、珪酸/硝酸消費比として2.3-2.8という高い値で珪藻の増殖が続いた。これは、鉄の濃度不足がある珪藻の増殖で、珪酸殻生成が顕著になるという現象であると考えられる。鉄濃度調節23日後である7月31日以降は、20m深度の栄養塩濃度(硝酸、珪酸、リン酸)が顕著に高まったうえに、分解過程が活発化したことを示すアンモニア濃度も表層から20m層で高まった。また、さらに深い30-50m層の濃度も高まりが見られた。7月31日以降20-50m深度の栄養塩は、レファレンス点より高い濃度を示し続けた。7月28日以降は表層水温の上昇で水温躍層が20m深度より浅くなり、表層で増殖して沈降した植物プランクトンの分解で栄養塩が水中に回帰した影響が現われたものと考えられる。また、7月28日以降、表層の珪酸濃度は極めて低濃度となり、硝酸濃度の変化も小さくなった。植物プランクトン粒子の沈降は、30-50m深度のクロロフィル濃度増大と海水中の粒子状ケイ素の分布変化でも示され、珪藻に由来する珪酸殻沈降が顕著になった。pCO₂は、7月29日に最小値の261μatmが記録され、その後は緩やかな上昇に転じた。これは先に述べたアンモニア濃度の増大とともに、表層粒子の分解を示すものと考えられる。

漂流セディメントトラップによる粒子採取は、表1に示した期間に行った。この間のパッチ外トラップの粒子束と合わせ、図4にその時系列変化を示す。

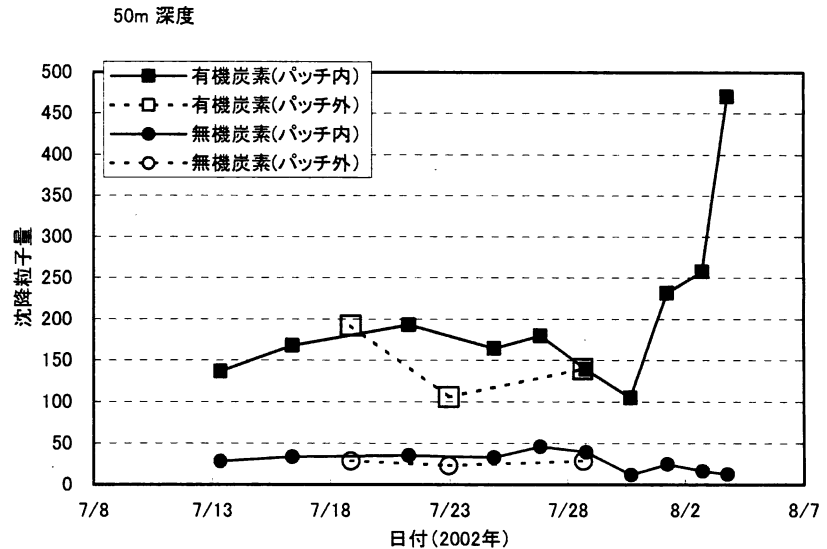
表1 SERIES鉄濃度調節実験における漂流セディメントトラップによる沈降粒子捕集

	投入	回収	漂流期間(日)	50m深粒子束 mg/m ² /day
カナダ1	Jul 11 17:15	Jul 14 09:30	2.68	1041
カナダ2	Jul 14 19:15	Jul 17 09:45	2.60	1143
カナダ3	Jul 20 09:00	Jul 21 14:45	1.24	1267
カナダ-日本1	Jul 23 16:43	Jul 25 10:45	1.75	1156
日本2	Jul 25 12:15	Jul 27 13:15	2.04	1295
日本3	Jul 27 13:55	Jul 29 09:30	1.82	1205
日本4	Jul 29 10:10	Jul 31 09:15	1.96	886
日本5	Jul 30 13:15	Aug 02 09:10	2.83	1938
日本6	Jul 31 13:10	Aug 04 09:10	3.83	1475
日本7	Aug 02 13:55	Aug 04 10:10	1.84	2221

濃度調節23日後の7月31日以前は、パッチ内外の沈降粒子量の差がほとんどなかった。表層のクロロフィル量は、7月16日以降に確実な増加があり、7月24日から数日間は周辺海域の10倍ほどの高濃度を保ったにも関わらず、50m深度への沈降は見られなかった。30m深度では、7月26

日頃から、クロロフィル濃度増大、粒子状ケイ素増大が顕著であって、その粒子の沈降が50m面に達するのに時間のずれが生じたと考えられる。期間を濃度調節後1-7、8-14、15-21、21-28日の4期間に分割し、期間平均の成分フラックスを求めた(図4)。2週目、3週目の全粒子束増大はわずかであるが、炭酸カルシウムの沈降量が大きくなった。このことは、パッチ内でこの期間珪藻以外の植物プランクトンの増殖が見られた観察を支持するものである。

図4 SERIES鉄散布実験における沈降粒子捕集実験結果、鉄散布パッチ内外の50m深度で得られた有機・無機炭素粒子束($\text{mgC m}^{-2}\text{day}^{-1}$)



5. 本研究により得られた成果

海水中の炭酸物質の変化と、海水中の粒子状有機炭素(POC)、粒子の沈降フラックスなどを用いて、実験期間の炭素収支を推定することができた。

濃度調節4日目の各層採水まではDICに応答がなかったが、6日目の各層採水で応答があったので、4日目を起点とし、DICの濃度低下を、13日目までの9日間にわたり、表層20mについて積算した(1.23mol m^{-2} のDIC消費)。期間中の大気からの CO_2 供給推定値は 0.07mol m^{-2} であった。これは、鉄と共に濃度調節した SF_6 の大気への逸脱速度から期間中の平均的なガス交換係数を求めた上、 pCO_2 の大気海洋差から推定した。結局、その和の 1.30mol m^{-2} が、植物プランクトンが同化した炭素量であると、無機炭素測定からは推定された。

一方、各層採水試料の分析で得た粒子状炭素(POC)の実験期間中の増分と、ドリフティングセディメントトラップから概略推定した有機炭素鉛直フラックス(主として動物の糞粒)に、水中の溶存有機炭素の増加量を加えて、有機炭素としての固定量を求めたところ、 1.25mol m^{-2} が得られ、無機炭素から求めた炭素同化量とほぼ等しい値となり観測中の炭素収支がよくあうことがわかった。結果として、濃度調節実験の期間13日では沈降フラックスより水柱の粒子状炭素の増分が圧倒的に大きく、固定された二酸化炭素のほとんどが粒子状炭素(植物・動物プランクトン)として混合層内に留まっていたことが明らかとなった。このことは、濃度調節によって有機炭素に固定された二酸化炭素が必ずしも速やかな鉛直フラックスの増加につながらないことを示し、表層海水中で分解が進むと表層海水中の全炭酸が増加、 pCO_2 が回復し、大気からの二酸化炭素吸収につながらないことになる。ただ

し、今回の実験で大きな増殖が見られた植物プランクトンが比較的大型の珪藻類であることを考えると、開洋丸の海域離脱後に大きな鉛直輸送が起こった可能性を否定できない。

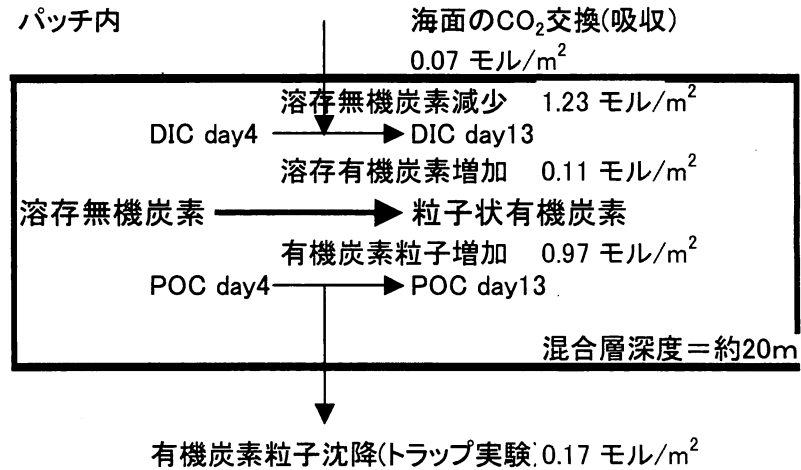


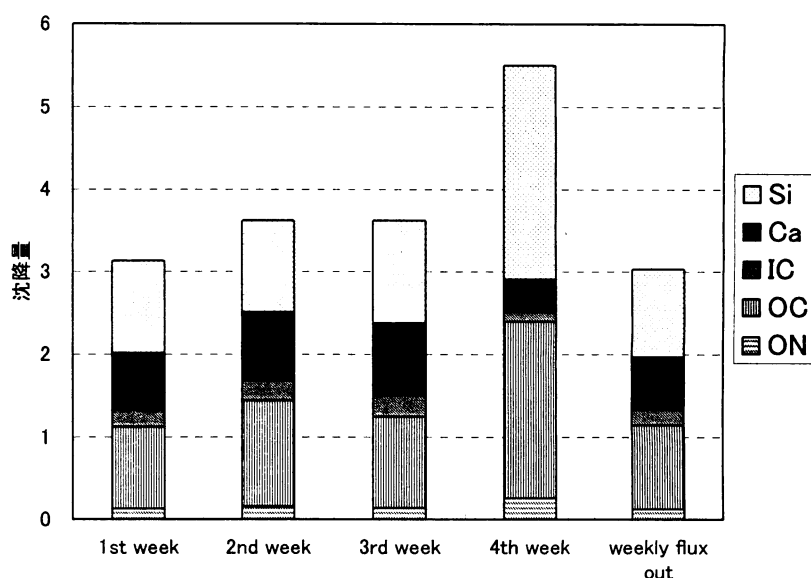
図5 SEEDS鉄濃度調節実験でのパッチ内の炭素収支（濃度調節後4日目と13日目の現存量、その間のフラックス推定による）

$$\begin{aligned} \text{無機炭素の収支} &= 1.23 + 0.07 = 1.30 \text{ モル/m}^2 \\ \text{有機炭素の収支} &= 0.97 + 0.17 + 0.11 \\ &= 1.25 \text{ モル/m}^2 \end{aligned}$$

今回の実験では、過去の実験に例を見ない大きな植物プランクトン増殖が見られ、北西太平洋亜寒帯海域でも鉄の不足による海洋生産の強い制限が起こっていて鉄の濃度調節効果が極めて高いことが明らかになった。しかしながら、その効果の検証には濃度調節後の長期の観察が必要であり、2001年の実験はその期間が不十分であった。

2002年のSERIES実験では、得られた生元素の沈降フラックスと、海水中の無機炭素、栄養塩などの化学成分変化をあわせて、物質収支の推定を行った。観測期間約4週間での表層20m層における無機炭素固定量は、CO₂分圧測定値から1.7モルm⁻²と推定された。これを、有機炭素積算フラックス0.24モルm⁻²と比較すると、14%の沈降水量となる。すなわち、表層海水で無機炭素から植物プランクトンに固定された炭素の14%が50m面を粒子として通過した。これは、2001年に西部亜寒帯太平洋で行った本課題による鉄濃度調節実験（SEEDS）で、約2週間の実験期間の炭素収支（60m面）とほぼ同等であった。2001年のSEEDS実験では、表層の植物プランクトン量が濃度調節9日後に最大値となり、その値をほぼ維持していた濃度調節13日後の段階で観測終了せざるを得なかった。この時、植物プランクトンの大部分は、表層海水中に粒子状炭素として保持されたままであり、その明瞭な沈降が起こる前の段階であった。2002年SERIESでは、植物プランクトン量が最大となるのに16日を要した反面、18日後には30m深度で、23日後には50m深度で明瞭な珪藻粒子の沈降が認められた。50m深度の沈降粒子量だけからみると、観測最終期に急に大きな沈降水量を記録した。これは、植物プランクトンの凝集による沈降であると考えられ、沈降の理論からこの時期のずれの考察を行った。考察からは、粒子沈降による時間差を考えた時、この最終期粒子沈降水量が観測終了後3日程度継続したと考えることがもっともらしく、この場合、表層での無機炭素固定量の約50%が沈降して50m面に到達したと考えられた。すなわち、植物プランクトンが固定化した炭素のうちの残る半分が水柱で分解を受けることになる。

図6 SERIES鉄散布実験における沈降粒子捕集実験で得たパッチ内外50m深度の沈降粒子成分組成 ($\text{g m}^{-2} \text{ week}^{-1}$)、それぞれ酸化物形ではなく元素(Si, Ca, C, N)の1週間あたりの沈降量で示した。



鉄濃度調節を、大気中の二酸化炭素を人為的に固定する手法と考えた時に、沈降率が極めて重要である。これまでの鉄濃度調節実験においては、観測期間が十分でなく、ブルーム終結から粒子沈降に至る過程までを明らかにしたことがなかった。本実験は、それを初めて確認し、沈降率を概算した。東部亜寒帯北太平洋において、十分な炭素の海洋隔離となるのは100m以深の塩分増大で形成される密度躍層以深への輸送であり、その面に達する沈降率はさらに小さくなる。今回の実験では、125mトラップでも、観測最終期の沈降量増大が認められた。これは、沈降粒子のうちのある部分が、大きな沈降速度を持つものであったことを示している。

また、北太平洋亜寒帯の東西の海域には、栄養塩の濃度、季節変化の大きさ、珪酸/硝酸の濃度比にかなり大きな違いがある。2001年のSEEDSにおいては、鉄濃度調節以降の植物プランクトン増殖がその他の海域での鉄濃度調節実験より短期間で起こった。濃度調節から早い時期の増殖のため、鉄濃度制限のない状態で珪藻が生育し、初期の珪酸/硝酸の消費比が小さく(1に近い)、珪酸殻生成の割に大きい炭素固定が認められた。また、硝酸、珪酸が枯渇する前に、植物プランクトン量増加が停止した。しかしながら、今回の東部亜寒帯太平洋の実験では、珪藻増殖に時間がかかり、鉄濃度調節パッチ全体の珪酸/硝酸の消費比が約2.7という大きな値となった。そのため、濃度調節3週間後には、珪酸が先に枯渇し、SEEDSの1/3の植物量の段階で、珪藻量が増加しなくなった。これまでは、植物プランクトンの生育を抑えている最も強い制限である鉄を加えて、主要栄養塩を消費しつくすとして、鉄濃度調節の最大効果を考えていた。しかしながら、東部亜寒帯北太平洋のような海域では、高い珪酸/硝酸消費比で珪藻が増殖すると、硝酸を使いつくす前の段階で、珪酸制限になりうることを示され、鉄濃度調節の効果の大きさを考える新しい知見となった。

東部北太平洋のSERIES実験については、鉄濃度調節による植物プランクトンブルームの形成および消滅と、生産された有機炭素の沈降過程が観測されたことから、パッチ中心部における炭素収支をもとにして、鉄の添加量と固定された炭素量の関係の評価することが

おおむね可能であった。パッチ中心部における鉄添加量と固定された炭素の比 (Fe:C) は 2.6×10^{-5} と見積もられ、これまで植物プランクトン培養株について報告されている Fe:C 比¹⁾ (2×10^{-6} から 7×10^{-6}) よりも高い値となった。この値はパッチ中心部に関するものであるが、パッチ全体について求めた鉄と粒状有機炭素 (POC) の蓄積量比 (Fe:POC 7.9×10^{-5}) も同様な結果となる。表層混合層から 50m 層に鉛直輸送される POC の輸送効率は約 18% であり、50m から 125m にかけては約 50% である。すなわち、POC の多くはバクテリアなどによって表層および 50m 以深でも盛んに分解される。密度躍層以深へ輸送された炭素は長期間の海洋貯留となるが、以浅に留まる炭素は海洋の鉛直混合で比較的速やかに大気に回帰する。鉄散布で増殖した植物プランクトンブルームの場合、下層への有機炭素の輸送効率 (約 8%、セディメントトラップの捕集効率を補正すると約 10%) が低いために、鉄添加量と密度躍層の存在する 125m 以深に輸送される有機炭素の比は 2.1×10^{-3} と極めて大きな値となった。この値は、これまで鉄濃度調節による炭素固定量評価に用いられてきた値に比べて約 1000 倍の高い値であり、従来考えられていた以上に炭素固定には鉄が多く必要になることを示している。

また、炭素固定方策として想定されている大規模な鉄濃度調節では、広範囲の海域に繰り返し鉄を添加することになるが、北太平洋亜寒帯域における実験では、ケイ酸の不足が観測されたことから、長期的かつ大規模な鉄濃度調節では、大型のケイ藻にかわって小型の藻類が増殖する可能性もあり、その場合、鉄添加量と下層への有機炭素輸送量の比はさらに大きくなることも予想される。これらの結果は、炭素固定方策としての鉄濃度調節による炭素固定量の予想がこれまで過大に評価されていた可能性を示唆する。

6. 引用文献

- 1) Sunda, W.G. & Huntsman, S.A. (1995). Iron uptake and growth limitation in oceanic and coastal phytoplankton. *Marine Chemistry*, 50, 189-206.

7. 国際共同研究等の状況

13年10月には、本プロジェクトの立ち上げの基礎となった PICES-IFEP では、本課題担当の武田が共同議長を務め、日本側委員として野尻ら5名が参加し、本年度実験の成果を披露するとともに、カナダ、日本、アメリカの担当者が、2002年に予定されている太平洋の東側で行う実験に関して、実験計画、船舶確保状況、予算獲得状況などを話し合い、実験概要をねった。また、14年2月に開かれた OSM (米国海洋学会) で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課題担当者野尻および武田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) が参加し、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。その後は E-mail によってさらなる調整と情報交換が現在でも継続している。さらに、SOLAS 国内委員会の認知を受けて、6月にアムステルダムで開催される SOLAS 会議に武田が参加し、成果の紹介と今後の予定を討議した。2002年の東部北太平洋実験の結果のまとめのために、16年2月にカナダで会合を行い、本課題担当の武田他が参加した。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表 (学術誌・書籍)

- ① A. Tsuda, S. Takeda, H. Saito, J. Nishioka, Y. Nojiri and et al., *Science*: 300, 958-961 (2003).
A mesoscale iron enrichment in the western subarctic Pacific induces a large centric diatom bloom.
- ② Y. Nojiri, K. Imai, H. Saito, A. Tsuda, and F. Whitney: *Geochim. Cosmochim. Acta*, 18S, A342 (2003).
Export flux and carbon budget in the iron fertilization experiments in the subarctic North Pacific.
- ③ P. W. Boyd, C. S. Law, C. S. Wong, Y. Nojiri, A. Tsuda, M. Levasseur, S. Takeda, and et al.:
Nature, 428, 549 - 553 (2004).
The decline and fate of an iron-induced subarctic phytoplankton bloom.
- ④ Kinugasa, M., T. Ishita, Y. Sohrin, K. Okamura, S. Takeda, J. Nishioka, A. Tsuda. (in press) *Prog. Oceanogr.*,
Dynamics of trace metals during the subarctic Pacific iron experiment for ecosystem dynamics study (SEEDS2001)
- ⑤ Tsumune, D., J. Nishioka, A. Shimamoto, S. Takeda, A. Tsuda (in press) *Prog. Oceanogr.*
Physical behavior of the iron fertilized patch by SF6 tracer release experiment.
- ⑥ Kudo, I., Y. Noiri, K. Imai, Y. Nojiri, A. Tsuda (in press) *Prog. Oceanogr.*
Primary Production and Nitrogenous nutrients assimilation dynamics during the Subarctic Pacific Iron Experiment for Ecosystem Dynamics Study (SEEDS).
- ⑦ Aono, T., M. Yamada, I. Kudo, K. Imai, Y. Nojiri, A. Tsuda (in press) *Prog. Oceanogr.*
Export fluxes of POC estimated from $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ disequilibrium in the subarctic Pacific during the iron-enrichment experiment.
- ⑧ Ramaiah, N., S. Takeda, K. Furuya, T. Yoshimura, J. Nishioka, T. Aono, Y. Nojiri, K. Imai, I. Kudo, H. Saito, A. Tsuda (in press) *Prog. Oceanogr.*
Effect of iron enrichment on the dynamics of transparent exopolymer particles in the western subarctic Pacific.

(2) 口頭発表

- ① Tsuda, A. and S. Takeda: Workshop on Global Carbon Cycle and Related Mapping Based on Satellite Imagery and Climate Change, (2004)
An in situ iron-enrichment experiment in the western subarctic Pacific (SEEDS): Introduction and summary.
- ② Tsuda, A., S. Takeda, H. Saito, J. Nishioka, Y. Nojiri and I. Kudo: ASLO/TOS Ocean Research Conference, (2004)
An in situ iron-enrichment experiment in the western subarctic Pacific (SEEDS): Introduction and summary.
- ③ Nishioka, J., Takeda, S., Kudo, I., Tsumune, D., Yoshimura, T., Kuma, K., Ono, T., Saito, H., Johnson, W.K., Wong, C.S., Tsuda, A.: ASLO/TOS Ocean Research Conference, (2004).
Iron limitation processes in the NW subarctic Pacific.

- ④Yoshimura, T., Ogawa, H., Nishioka, J., Imai, K., Nojiri, Y., Koike, I. and Tsuda, A.: ASLO/TOS Ocean Research Conference, (2004)
Dissolved organic carbon dynamics during in-situ iron enrichment experiment in the western and eastern subarctic Pacific.
- ⑤Sohrin, Y., Kinugasa, M., Okamura, K., Takeda, S., Nishioka J. and Tsuda, A.: ASLO/TOS Ocean Research Conference, (2004).
Dynamics of bioactive trace metals during the subarctic pacific iron experiment for ecosystem dynamics (SEEDS2001).
- ⑥Boyd, P.W., C.S. Law, Y. Nojiri, C.S. Wong, A. Tsuda, M. Lavasseur, S. Takeda: ASLO/TOS Ocean Research Conference, (2004)
Evolution, decline and fate of a subarctic mesoscale iron-induced phytoplankton bloom.
- ⑦H. de Baar, P. Boyd, K. Buesseler, D. Bakker, Y. Bozec, M. Boye, K. Coale, P. Croot, P. Laan, C. Lancelot, M. Lavasseur, J. Nishioka, Y. Nojiri, T. van Oijen, S. Takeda, K. Timmermans, A. Tsuda, M. Veldhuis: IOC/SCOR Symposium The Oceans in a High CO₂ World, (2004)
Synthesis of in-situ Iron Enrichment Experiments.
- ⑧Tsuda, A. T. Ono, H. Saito, K. Suzuki, J. Nishioka, Y. Nojiri, I. Kudo, S. Takeda: IUGG2003 JSM02, (2003) (Invited).
Iron fertilization experiment in the western subarctic Pacific (SEEDS)
- ⑨Takeda, S., N. Ramaiah, K. Furuya, T. Yoshimura, J. Nishioka , H. Ogawa, T. Aono, Y. Nojiri, H. Saito, A. Tsuda: IUGG2003 JSM02, (2003).
Formation of transparent exopolymers particles during in-situ iron enrichment experiment in the western subarctic Pacific (SEEDS).
- ⑩Kinugasa, M., Y. Sohrin, T. Ishita, S. Takeda, J. Nishioka, A. Tsuda: IUGG2003 JSM02, (2003).
Dynamics of dissolved and dissolvable trace metals during the subarctic Pacific iron experiment for ecosystem dynamics study (SEEDS 2001)
- ⑪S. Takeda, A. Tsuda, H. Saito, Y. Nojiri, J. Nishioka, I. Kudo, A. Shiomoto, and D. Tsumune:, Ocean Sciences Meeting (ASLO/AGU), (2002).
Biogeochemical processes during the subarctic Pacific iron experiment for ecosystem dynamics study (SEEDS)
- ⑫Y. Nojiri, K. Imai, T. Ono, N. Tsurushima, H. Saito, and A. Tsuda:, Ocean Sciences Meeting (ASLO/AGU), (2002).
Export flux and carbon system changes in the subarctic Pacific iron experiment for ecosystem dynamics study (SEEDS)
- ⑬Nishioka, 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)
- ⑭Kinugasa, M., Y.Sohrin, T.Ishita, S.Takeda, J.Nishioka, A.Tsuda "" Ocean Science Meeting 2002.

Dynamics of Dissolved Trace Metals During the Subarctic Pacific Iron Experiment for Ecosystem Dynamics Study (SEEDS).

- ⑮津田敦、野尻幸宏、今井圭理、武田重信、その他19名：日本海洋学会2002年春季大会、(2002).
開洋丸Subarctic ocean Enrichment and Ecosystem Dynamics Study (SEEDS)航海概要
- ⑯津旨大輔、西岡純、嶋本晶文、津田敦、武田重信、齊藤宏明：日本海洋学会2002年春季大会、(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
- ⑰西岡純、津旨大輔、芳村毅、武田重信、工藤勲、津田敦：日本海洋学会2002年春季大会、(2002)
SEEDS鉄散布実験中の鉄の挙動
- ⑱衣笠正敏、宗林由樹、石田恒巳、武田重信、西岡純、津田敦：日本海洋学会2002年春季大会、(2002)
鉄散布実験SEEDS2001における微量金属元素の動態
- ⑲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「」日本海洋学会2002年春季大会、(2002).
Vertical profile and flux of TEP during the Subarctic Iron Experiment for Ecosystem dynamic Study (SEEDS)
- ⑳工藤勲、野入善史、今井圭理、野尻幸宏、津田敦：日本海洋学会2002年春季大会、(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
- ㉑今井圭理・野尻幸宏・齊藤宏明・津田敦：. 2002年度日本海洋学会春季大会、(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
- ㉒野尻幸宏・今井圭理・小埜恒夫・鶴島修夫・津田敦：2002年度日本海洋学会春季大会、(2002).
鉄散布実験 (SEEDS 2001) での炭酸物質の挙動とフラックス
- ㉓青野辰雄、工藤勲、今井圭理、野尻幸宏、津田敦：日本海洋学会2002年春季大会、(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
- ㉔S. Takeda, and A. Tsuda: 2002 SCOR-JOS International Symposium, Sapporo, October, 2002.
Open ocean iron enrichment experiment as a test of the iron hypothesis
- ㉕小川浩志、芳村毅、西岡純、今井圭理、野尻幸宏、小池勲夫、津田敦、2002年度日本海洋学会秋季大会、(2002).
西部亜寒帯太平洋-鉄散布実験において生じた珪藻ブルーム時の溶存有機炭素・窒素・リンの挙動
- ㉖野尻幸宏、今井圭理、齊藤宏明、津田敦、2003年度日本海洋学会春季大会シンポジウム、(2003).
海洋鉄散布実験(SEEDS, SERES)での漂流トラップによる輸送フラックス測定
- ㉗津田敦、Philip Boyd、 M. Lavoisier、 N. Sherry、武田重信、齊藤宏明、西岡純、芳村毅、野尻幸宏、工藤勲、久万健志、野入善史、平陽介、清沢弘志、小埜恒夫、嶋本晶文、青野辰雄、宗林由樹、小川浩史、日本海洋学会2003年春季大会、(2003).
Introduction of the iron-fertilization experiment in the eastern subarctic Pacific (SERIES)

(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（13年4月18日夕刊関西版）
 - ② 共同通信配信1（宮崎日日新聞13年6月26日、岐阜新聞6月27日、東奥日報7月2日、河北新報7月2日、中国新聞6月26日、南日本新聞6月26日）
 - ③ 共同通信配信2（岐阜新聞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）
 - ④ 釧路新聞（14年1月1日元旦号）
 - ⑤ 日本経済新聞（14年5月20日、添付資料）
 - ⑥ P I C E S P R E S S、10：12-13（著者津田敦・武田重信）
- ① NHKラジオジャパン、テクノフロンティア（H14年6月11日、2001年実験成果について3分ほど紹介）
 - ② Tronto Star（カナダ）（H14年8月10日）
 - ③ 朝日新聞（H15年5月9日）

9. その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

ホームページを立ち上げ、広く成果の広報・普及に努める。