

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強化と海洋生態系への影響に関する研究

(1) 鉄濃度調節が海洋生物に及ぼす影響に関する研究

東京大学海洋研究所	津田敦	
独立行政法人水産総合研究センター北海道区水産研究所		
亜寒帯海洋環境部	生物環境研究室	小埜恒夫
京都大学化学研究所		宗林由樹

平成13～15年度合計予算額 58,596千円
(うち、平成15年度予算額 17,708千円)

[要旨] 2001年6月28-8月6日に水産庁調査船開洋丸を用いて、鉄濃度調節および生物の応答調査を西部亜寒帯太平洋において行った(実験名SEEDS)。さらに2002年7-8月にカナダSOLASグループとの共同研究により東部亜寒帯太平洋において実施し、3船でSEEDSの2倍の観測期間となる計26日間の観測を実施した(実験名SERIES)。日本側は水産庁調査船開洋丸を用いて散布から15-26日目を観測した。SERIESにおいて改善された探査サーベイ能力は開洋丸観測期間中、一日だけ、衛星により鉄濃度調節域が観測され実証された。2002年実験では、2001年実験とは異なり、植物プランクトンブルームのピークは2週間後に観察され、我々の観測終了時には植物プランクトン濃度はピーク時の1/4以下になった。すなわち高緯度域鉄濃度調節実験では初めてブルームの消滅期を観測したといえる。2回の実験を通して以下8項目の主な成果を得た。1) 外洋域における鉄濃度調整技術を確立した。2) SF6の連続測定技術、これを用いた水塊追跡技術を確立した。3) 外洋域における鉄濃度調整に対する生物応答観測法を確立した。4) 動物プランクトンの植物に対する摂餌速度は4-15倍に上昇し、増えた珪藻を摂餌し、生残率、成長速度が高くなることが明らかになった。5) 鉄濃度調整実験で初めて微量金属の変動が測定され、その動態が明らかになった。6) 国際的協力体制のもと鉄濃度調節実験を行い、長期(26日間)の観測を実現した。7) 東部・西部亜寒帯太平洋にける鉄濃度調節に対する生物化学的応答の差が明らかとなった。8) 東部では珪藻の応答が西部に比べ遅く、珪藻増殖前に円石藻が増殖しDMSの放出を観測した。

[キーワード] 二酸化炭素、海洋鉄濃度調節、観測技術、微量金属、生物応答

1. はじめに

1997年の京都議定書の採択を受け、大気中の二酸化炭素濃度上昇を抑制するための具体的な政策が求められるようになった。排出規制、排出権取引、二酸化炭素海洋投棄などの方策が考えられているが、海洋生物による二酸化炭素固定量を制限する微量元素の鉄濃度を調節することによって、大気から海洋への二酸化炭素吸収機能を強化させる技術が、効果・コストの面から有力な選択肢の一つとなっている。生物地球工学としての大規模な鉄濃度調節には、二酸化炭素の吸収

や付随して期待されている魚類生産の増加といった正の側面と、底生生物やプランクトン群集に対する人為的関与といった未知または負の側面を有している。そこで、鉄不足によって光合成抑制が顕著な亜寒帯太平洋において中規模（100km²以下）の鉄濃度調節実験を東西2海域で行い、生態系への影響を明らかにするとともに、二酸化炭素吸収機能強化手法としての鉄濃度調節操作の評価を行う。またカナダ側プロジェクトは IGBP-SOLAS（海洋表層-大気下層の相互作用に関する研究）の一部として計画されており、本実験も14年から日本における SOLAS 関連研究として位置付けられた。

2. 研究目的

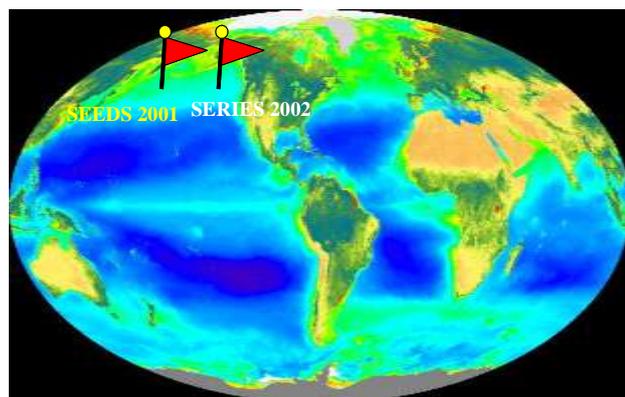
本研究以前には、赤道域で2回、南極海で2回の鉄濃度調節実験が行われているが、日本の研究では初めて、北太平洋では初めての実験になった。そのため外洋域における現場鉄濃度調節技術の確立、調節水塊の追跡・観測技術の確立が第一の課題となった。具体的には鉄溶液の溶解、マーカー物質溶液との混合、散布の技術、およびマーカー物質とした不活性気体 SF₆（六フッ化イオウ）の連続測定技術である。さらに生物応答として、植物・動物プランクトンの応答、炭素物質の挙動などを明らかにする観測技術の確立が続く。

プロジェクトの期間を通した目的は鉄濃度調節に対する生物・化学的応答を、太平洋の東西で比較することがある。H13年度は西部亜寒帯太平洋で、H14年度は東部亜寒帯太平洋を代表する点で実験を行い、東西亜寒帯太平洋の鉄濃度調節に対する生物・化学的応答を明らかにし、結果を比較することである。ここで評価すべき応答とは、第一に鉄濃度調節が二酸化炭素吸収加速技術として効果があるかどうかの検証、および魚類など高次栄養段階生物まで含む海洋生態系への影響を明らかにすることである。

本サブテーマでは、1) 鉄濃度調節技術の確立、2) 動物プランクトンおよび魚類の応答、3) 低濃度では成長律速、高濃度では毒として働く可能性のある鉄以外の微量金属の動態、以上3点での確立または解明を目指した。

3. 研究方法

図1. H14年(SEEDS)およびH15年(SERIES)に行われた鉄濃度調節実験の観測点。



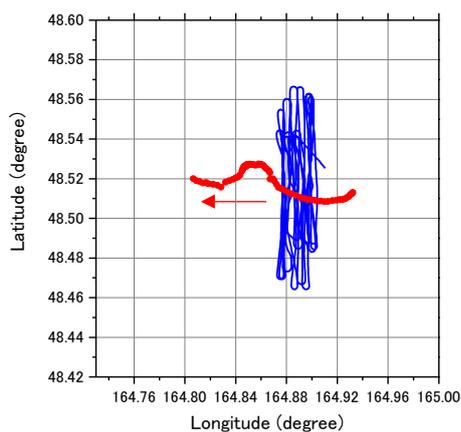
2001年6月28-8月6日に水産庁調査船開洋丸を用いて、鉄散布および生物の応答調査を行った。鉄濃度調節に先立ち調査海域の事前調査を行い、当海域が鉄濃度 (<0.5 nM)、クロロフィル濃度 (<1mg m⁻³) が低く、栄養塩濃度が高い（硝酸 20 μM）海域であることが確かめられた。そこで、西部北太平洋（北緯48度30分、東経164度50分）において、8x10km四方に鉄（硫酸鉄溶液）

を散布し濃度調節を行った。濃度調節には、本プロジェクトで開発した鉄・SF₆溶解、混合、散布装置（写真1）および、ブイを基点として海流を補正するためのソフトウェアを使用し操船した。

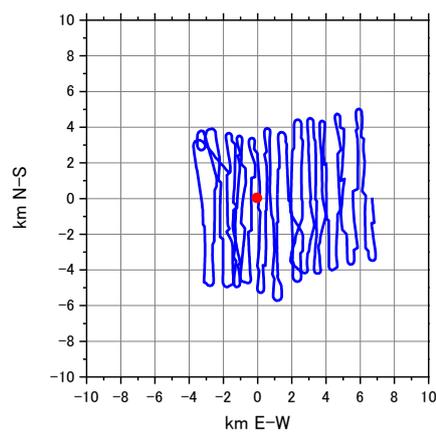


写真1 左：ねずみ色がSF₆溶解タンク、黄色が鉄溶解タンク
中央：混合散布装置、定量ポンプにより二液を混合し放出する
右：散布風景、散布装置からホースが伸び船尾水深3 mより放出

散布は7月18-19日の23時間をかけて行われ、海流補正ソフトも正常に作動し、理想的な航跡で鉄濃度調節域を作り出すことに成功した（図2）。添加量は4ナノモルとごく微量であり、25mプールに耳搔き一杯程度の添加である。鉄濃度調節後は、調節域を追跡しながら、生物・化学的応答を2週間にわたり観測した。観測は、表面連続採水をしながら航行し調整域の形や位置を決めるプロペラサーベイと調整域の内外で停船観測し多くのパラメータを測定するIn-Out観測の繰り返し、および最終日に行ったトロール漁獲調査から成り立っている。微量金属はクリーン採水で試料を採取し、キレート吸着体MAF-8HQのカラムを用いて微量金属元素（鉄、コバルト、ニッケル、銅、亜鉛など）を濃縮し、誘導結合プラズマ質量分析装置（ICP-MS）を用いて濃度を定量した。



Ship and buoy track



Ship track relative to Buoy

図2. ブイの航跡（太線）と船の航跡（細線）左図は海図上、右図はブイを中心とした相対座標での船の航跡。

2002年7月17–8月7日に、水産庁調査船開洋丸を用いて、鉄散布および生物の応答調査を行った（ダッチハーバー出港、バンクーバー寄港）。H14年度実験は東部亜寒帯循環の代表的な観測点 Stn P (50N, 145E)において行われた（図1）。実験にはカナダ調査船 J.P. Tully、カナダが備船したメキシコ調査船 El Puma および開洋丸が参加した（表1）。Tully は鉄濃度調節、基本パラメータ観測、パッチ追跡・マッピングを行い、El Puma は生物・大気パラメータ観測および培養実験を主なミッションとし、開洋丸は Tully ミッションの継続および El Puma ミッションの一部を引き継いだ。開洋丸到着は鉄濃度調節から15日目であり、マーカ物質である SF₆ は低濃度であることが予測されたため、表層二酸化炭素分圧でマッピングを行い、SF₆ は採水試料でのみ測定した。また昼間にメキシコ船との共同観測を行うためマッピングは夜間に行った。

なお、2002年実験はカナダ側の命名で SERIES (Subarctic Ecosystem Response to Iron Enrichment Study) と呼び、2001年度実験は SEEDS (Subarctic Pacific iron-Experiment for Ecosystem Dynamics Study) と呼ぶ。

表1 東部亜寒帯太平洋にける鉄濃度調節実験に参加した3船の日程

SERIES + SEEDS2002 Canada–Japan

6-Jul		steam to Fe site	
7-Jul		survey Fe site, prep injection	
8-Jul			
9-Jul	D0	IF	
10-Jul	D1		
11-Jul	D2		
12-Jul	D3		
13-Jul	D4		
14-Jul	D5		
15-Jul	D6	IF	
16-Jul	D7		
17-Jul	D8		
18-Jul	D9		
19-Jul	D10		
20-Jul	D11		
21-Jul	D12		Depart Dutch
22-Jul	D13		
23-Jul	D14		
24-Jul	D15		
25-Jul	D16		
26-Jul	D17		
27-Jul	D18		
28-Jul	D19		
29-Jul	D20	leave Patch	
30-Jul	D21		
31-Jul	D22		
1-Aug	D23		
2-Aug	D24		
3-Aug	D25		
4-Aug	D26		3D
5-Aug	D27		leave Patch
6-Aug			
7-Aug			
8-Aug			arrive Vancou
8-Aug			



John P. Tully



El Puma

Kaiyo Maru



4. 結果・考察

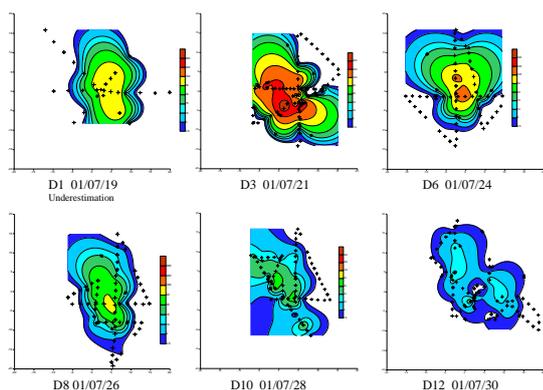


図3. SEEDSにおけるSF₆水平分布の時間変化

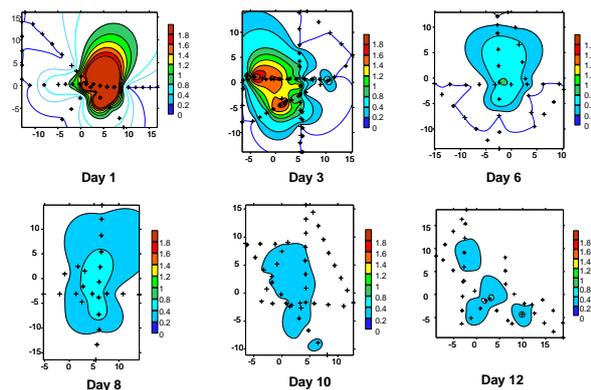
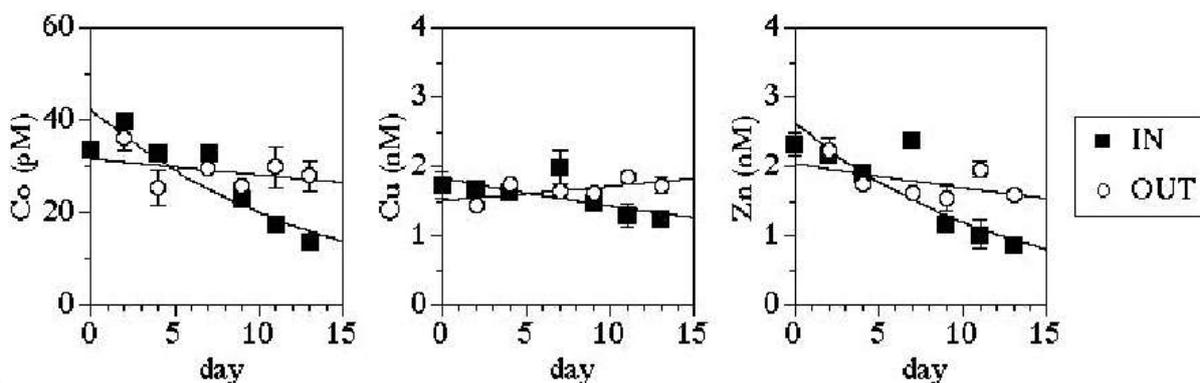


図4. SEEDSにおける溶存鉄濃度水平分布の時間変化

調節域は海流により西に流され2週間で約100 km移動したが、マーカー物質であるSF₆の連続測定により調整域を追いかけることが出来た。SF₆濃度は大気への放出および拡散で濃度が減少したが、2週間の観測期間では、本プロジェクトで開発した連続測定装置の検出限界より高い濃度でとどまった(図3)。また添加した鉄濃度も減少し二週間後では、周辺海域の3倍程度の濃度になった(図4)。植物プランクトンは4-7日目に大きく増加し(詳細はSG2報告)、初期値の1.5倍以上に達した。動物プランクトンとしてはカイアシ類*Necalanus plumchrus*, *Eucalanus bungii*が優占し、消化管色素量の測定を行った結果、植物プランクトンに対する摂餌率は4-1.5倍程度増加したことが明らかになった。過去の実験では鉛直分布が浅くなったり、夜間深層へ移動する生物が浅海に留まったりすることを示唆されることがあったが¹⁾²⁾、SEEDSでは鉛直分布や移動に関して、有意な変化は認められなかった。しかし、優先する2種の初期幼生現存量が実験後半で5-6倍増加した。これは増えた植物プランクトンを摂食することによって産卵速度が増加したため、および、本来これら生物の卵や初期幼生を摂食していた雑食性プランクトンが大型藻類の増加により、卵や初期幼生に対する相対的な摂餌率が低下したためと考えられる。これらの事実



は、

図5. SEEDSにおける溶存コバルト、銅、亜鉛濃度の時間変化

海洋鉄濃度調整が広域・長期間続けられた場合、動物プランクトンは初期死亡率が低下するため、少なくとも一時的には増加することが予測され、この変化は、これら動物を摂餌する高次生物にも大きな影響を与えることが示唆された。観測最終日に行ったトロール調査では、サケマス類は

調整域の内外でほぼ同数採集されたが、キタノホッケ幼魚は調整域のみで大量に採集され、一回のみの最終なので、予備的な知見ではあるが、小型魚が、光透過度の低い（暗い）海域に集まった可能性が示唆され、今後の課題となった。コバルト、銅、亜鉛の表層海水中の溶存態濃度は、鉄散布後2日後にはそれぞれ0.040, 1.7, 2.3 nMであったが、鉄と同じく指数関数的に減少し、13日後にはそれぞれ0.014, 1.2, 0.86 nMとなった（図5）。これらの減少率は生物による利用比に近く、溶存画分だけに減少が認められたことから生物（植物プランクトン）による利用と考えられた。鉄散布に伴う、コバルト、銅、亜鉛の溶存態濃度の変化が捉えられたのは、SEEDSが初めてである。

4-(2) SERIES

2002年に行った実験では、開洋丸到着時は鉄濃度調節から15日目であり、そこから2週間マッピングと観測を行った。マッピングは鉄とSF₆の測定を行わなかったため船速を15ノットに設定し、広い海域を探索し、2001年に比べ精度の高いマッピングが出来た。パッチ（鉄濃度調節域）はゆっくりと東に移動し面積は概算で10倍に広がり、形状も複雑に入り組んだ形状となった（図6）。当海域は夏季、海霧によって晴れることの少ない海域であるが、観測期間中一日だけ晴れ、衛星からの画像を得ることが出来た（図7）。衛星からの画像と我々のマッピングで得たパッチ形状は一致し、我々のマッピング能力が高いことが証明された。また、表面観測ではSF₆は測

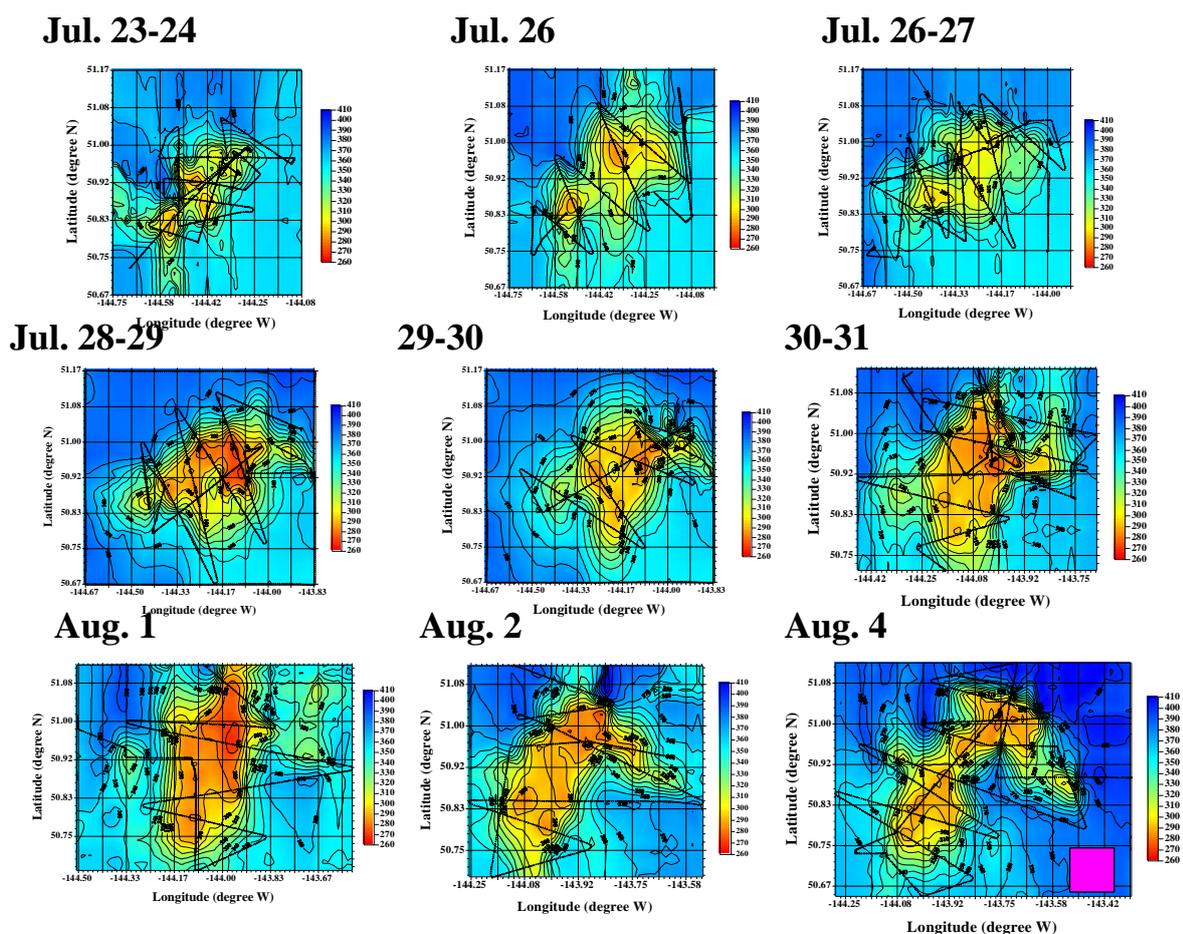


図6 SERIESにおける表層二酸化炭素分圧によってマッピングされた鉄濃度調節域。8月4日の四角は散布時のパッチの大きさを表す。

定しなかったが、採水試料で測定した結果、26日目においても周囲より若干高い濃度が観測され、観測が鉄濃度調節海域を追跡した証拠となっている。

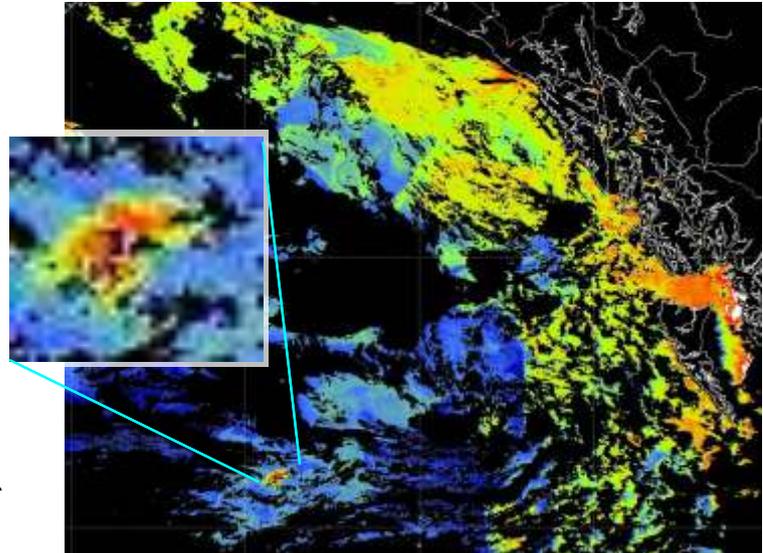


図7 2002年7月29日、水色衛星観測 (SeaWiFS) によって確認された鉄濃度調節海域。

鉄濃度調節から観測終了までの26日間は大きく2つのフェーズに分けられる。第1フェーズは、クロロフィル濃度に代表される植物プランクトン現存量の増加が顕著でなくDMS (硫化ジメチル) が放出された期間で1-12日目である (DMSはカナダ側測定)。第2フェーズは13日目以降であり、植物プランクトン現存量が増大した期間でありDMSの放出は観測されなかった (図8)。生物化学パラメータの多くはカナダ側と共有しており、前半部分をカナダ側が持っているため詳細な議論は、論文の執筆や公表と時期をあわせて行うが、植物プランクトン種組成に関しては実験期間を通じて日本側が受け持っているため詳細に述べる。フェーズ1に増加したのは円石藻および殻を持たないハプト藻である。円石藻およびハプト藻は添加直後から増加し始め8日目前後に初期値の5倍程度に増加し11日目以降急激に減少し、18日目以降、パッチ内外で増加した (図9)。これら藻類、特に円石藻の消長はDMSの消長と一致し、円石藻を含むハプト藻類がDMSをよく生産する藻類であることと整合性がある。鉄濃度調節に伴う円石藻の増殖とDMSの生産は初めて観測された現象であり、海洋生物生産と気候との相互作用を考える礎となる。円石藻の減少に伴い増加したのは珪藻である。SEEDSにおいて、鉄濃度調節前は羽状目珪藻が優占していたが、中心目珪藻 *Chaetoceros debilis* が顕著に増加し単独優占種となったのに対し、SERIESでは最も優占したのは濃度調節前と同じ羽状目珪藻 *Pseudonitzschia* spp. であり、その他、中心目珪藻の *Chaetoceros* spp. *Rhizosolenia* spp. および大型の羽状目珪藻 *Thalassiothrix* spp. などの複数種が優占した。珪藻類の応答はSEEDSに比べて1週間ほど遅くなったが、この理由は2つあり、第一に *Ch. debilis* のように特に増殖速度 (一日3分裂) が速い藻類がいなかったこと、第二に珪藻は鉄濃度調節直後から一日1.5分裂の増殖を示したが、初期値としての珪藻現存量がSEEDSに比べて低いため、現存量が増加するまでに時間を要したことの2点が挙げられる。

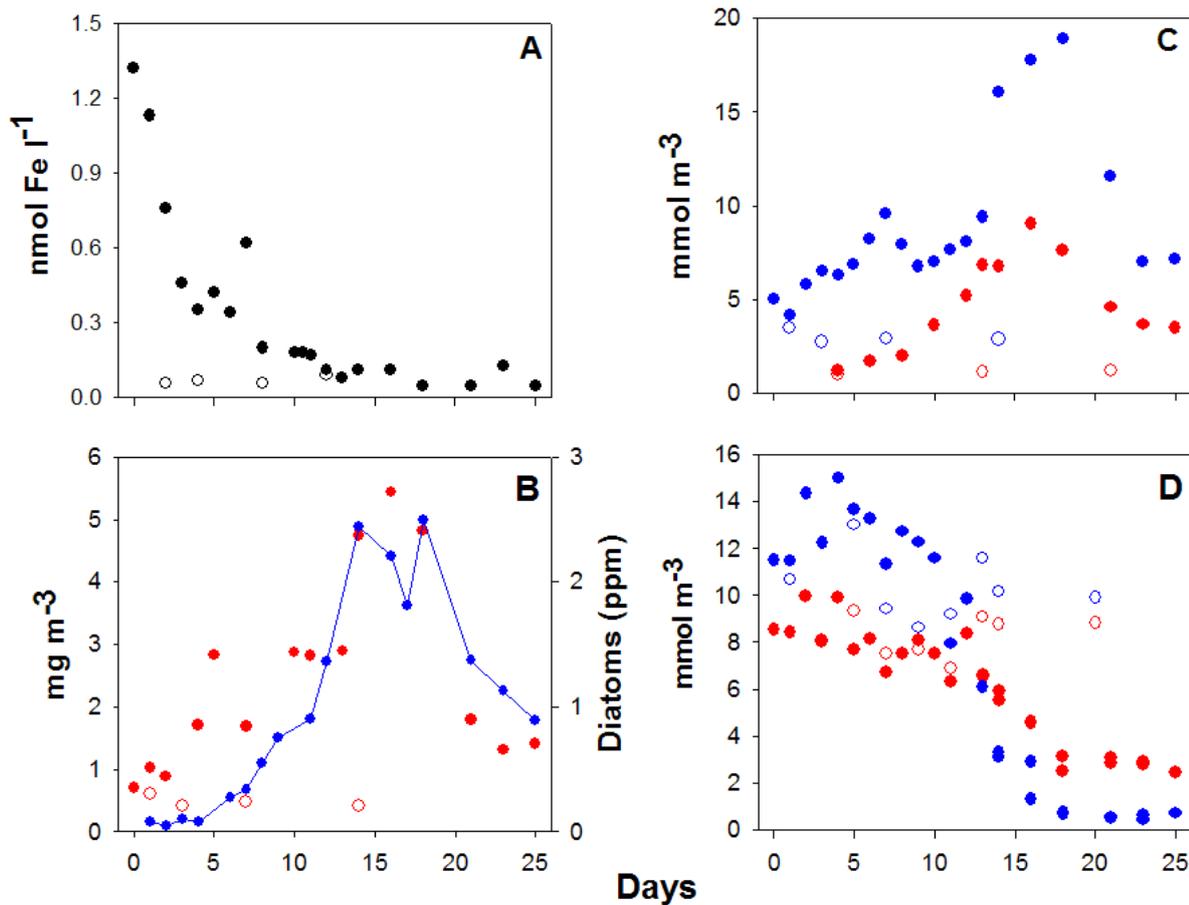
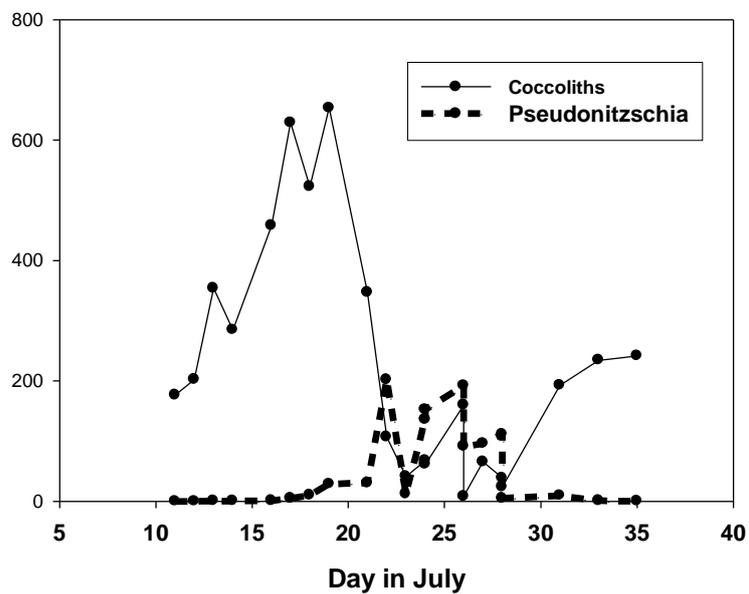


図8 SERIESにおける溶存鉄濃度 (A)、クロロフィル (B)、粒状有機物 (C)、栄養塩 (D) の鉄濃度調節域における変化 (白抜き点は参照海域における測定値)

図9 鉄濃度調節域における円石藻 (Coccoliths) と羽状目珪藻 (*Pseudonitzschia*) 細胞数 (縦軸 cells/ml) の時間変化



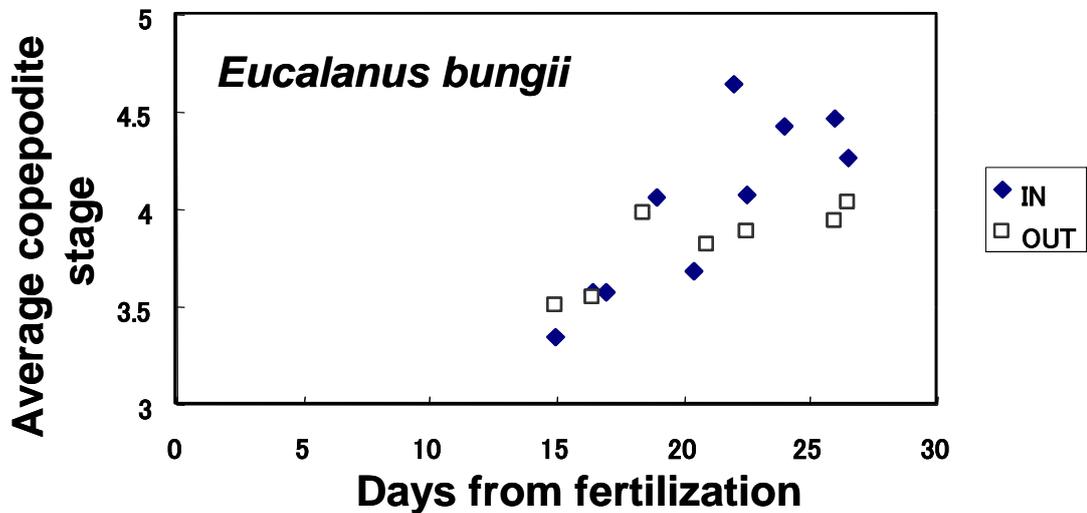


図 10. SERIES におけるカイアシ類 *Eucalanus bungii* の平均成長段階の時間変化
 IN は鉄濃度調節域
 OUT は参照海域

動物プランクトンではカイアシ類 *Eucalanus bungii*, *Calanus pacificus* が優占し、SEEDS と同様、生物量の変化および種組成の変化は認められなかった。カイアシ類幼生の生残率が上昇することも認められなかったが、これは、SERIES 実施時期では主なカイアシ類の再生産の時期が終わっていたことと、SEEDS に比べて植物プランクトン濃度が低く留まったことに要因があると考えられる。しかし、SEEDS 同様に優占するカイアシ類では珪藻の増加に伴って消化管内色素量が 4-10 倍に増加し、珪藻の低下に伴い低下した。さらに表層に生息する優占カイアシ類では 20 日目以降に有意な成長段階の差がパッチ内外で認められ、鉄濃度調節域でカイアシ類の成長が促進されたことが明らかとなった (図 10)。

5. 本研究により得られた成果

- (1) 外洋域における鉄濃度調整技術を確立した。
- (2) SF6 の連続測定技術、これを用いた水塊追跡技術を確立した。
- (3) 外洋域における鉄濃度調整に対する生物応答観測法を確立した。
- (4) 動物プランクトンの植物に対する摂餌速度は 4 - 15 倍に上昇し、増えた珪藻を摂餌し、生残率、成長速度が高くなることが明らかになった。
- (5) 鉄濃度調整実験で初めて微量元素の変動が測定され、その動態が明らかになった。
- (6) 国際的協力体制のもと鉄濃度調節実験を行い、長期 (26 日間) の観測を実現した。
- (7) 東部・西部亜寒帯太平洋における鉄濃度調節に対する生物化学的応答の差が明らかとなった。
- (8) 東部では珪藻の応答が西部に比べ遅く、珪藻増殖前に円石藻が増殖し DMS の放出を観測した。

6. 引用文献

- 1) Bollens GCR, Landry MR (2000) Biological response to iron fertilization in the eastern equatorial Pacific (IronEx II). II. Mesozooplankton abundance, biomass, depth distribution and grazing. MAR ECOL-PROG SER 201: 43-56 2000
- 2) Zeldis J. (2001) Mesozooplankton community composition, feeding and export production during SOIREE. Deep-Sea Res. Part II, 48: 2615-2634

7. 国際共同研究等の状況

2001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に日本側委員として津田ら5名が参加し（委員長C.S. Wong, IOS, Canada）、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、SERIESに関して話し合い、大まかな実験概要をねった。また、2002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）が参加し、観測の継続性のためのパラメータの調節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津田がカナダに招聘され最終確認を行った。10月にはチンタオにおいてPICES-IFEPが開催され2002年度成果が報告された。さらに2003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、武田、齊藤、工藤が参加し、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2003年4月には2004年度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節を行った。2004年2月にカナダにおいてSERIESに関する成果の発表、データ流通、成果発表に関する会議を持った。

現在の主なコンタクトパーソンは

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

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）>

- ① Tsuda, A., S. Takeda, H. Saito, J. Nishioka, Y. Nojiri, I. Kudo, H. Kiyosawa, A. Shiimoto, K. Imai, T. Ono, A. Shimamoto, D. Tsumune, T. Yoshimura, T. Aono, A. Hinuma, M. Kinugasa, K. Suzuki, Y. Sohrin, Y. Noiri, H. Tani, Y. Deguchi, N. Tsurushima, H. Ogawa, K. Fukami, K. Kuma, T. Saino, Science, 300: 958-961 (2003)

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

- ② Nishioka, J., S. Takeda, I. Kudo, D. Tsumune, T. Yoshimura, K. Kuma and A. Tsuda, *Geophys. Res. Lett.*, 300: 958-961 (2003)

Size-fractionated iron distributions and iron-limitation process in the subarctic NW Pacific.

- ③ Harrison, P.J., A. Tsuda, H. Saito, F. Whitney and K. Tadokoro (2004) *J. Oceanogr.*, 60: 93-117.

North Pacific East-West Similarities and Differences in Nutrient and Phytoplankton Dynamics.

- ④ Boyd, P.W. C. S. Law, Y. Nojiri, C.S. Wong, Y. Nojiri, A. Tsuda, M. Levasseur, S. Takeda, R. Rivkin, P.J. Harrison, R. Strzepek, J. Gower, R. Mike McKay, E. Abraham, M. Arychuk, J. Barwell-Clarke, W. Crawford, D. Crawford, M. Hale, K. Harada, K. Johnson, H. Kiyosawa, I. Kudo, A. Marchetti, W. Miller, J. Needoba, J. Nishioka, H. Ogawa, J. Page, M. Robert, H. Saito, A. Sastri, N. Sherry, T. Soutar, N. Sutherland, Y. Taira, F. Whitney, S.-K. E. Wong & T. Yoshimura. (2004) *Nature*, 428, 549–553.

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

- ⑤ Tsuda, A., Saito, H., Nishioka, J. and Ono, T.. *Prog. Oceanogr.*, (in press)

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

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

Responses of diatoms to iron-enrichment (SEEDS) in the western subarctic Pacific, temporal and spatial comparisons.

- ⑦ 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)

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

Iron and Temperature, two factors influencing phytoplankton species composition in the western subarctic Pacific Ocean.

- ⑨ 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.

- ⑩ 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).

- ⑪ Suzuki, K., A. Hinuma, H. Saito, H. Kiyosawa, H.B. Liu, T. Saino, A. Tsuda (in press) *Prog. Oceanogr.*

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.

- ⑫ Saito, H., K. Suzuki, A. Hinuma, T. Ota, K. Fukami, H. Kiyosawa, T. Saino, A. Tsuda (in press) *Prog. Oceanogr.*

Response of microzooplankton to in-situ iron fertilization in the western subarctic Pacific (SEEDS).

- ⑬ 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.

- ⑭ 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.

<学術誌（査読なし）>

なし

<書籍>

なし

<報告書類等>

水産総合研究センター広報、1号、20-21（津田）

「ぶんせき」8：423-424（宗林）

PICES PRESS, 10：12-13(Tsuda, Takeda)

「かんきょう」27巻38-39（津田）

「バイオサイエンスとインダストリー」60:31-34（宗林）

（2）口頭発表

- ①Tsuda, 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)

- ②Takeda, 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 exopolymer particles during in-situ iron enrichment experiment in the western subarctic Pacific (SEEDS).

- ③Kinugasa, 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)

- ④芳村 毅・西岡 純・津田 敦・C. S. Wong：日本海洋学会 2003 年秋季大会、(2003)

西部および東部北太平洋におけるサイズ分画・鉄添加培養実験

- ⑤津田敦：海中海底工学コンファレンセス、(2003)

北太平洋における鉄散布実験 SEEDS, SERIES 概要

- ⑥津田敦：2003 年日本プランクトン学会・日本ベントス学会合同発表会、記念シンポジウム「プランクトン研究とベントス研究のフロンティア」(2003)

海洋生物生産と鉄

- ⑦Tsuda, 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.

- ⑧ 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.

- ⑨ Saito, H., K. Suzuki, A. Hinuma, T. Ota, K. Fukami, H. Kiyosawa, T. Saino and A. Tsuda. ASLO/TOS Ocean Research Conference, (2004).

Responses of micrograzers to the mesoscale iron fertilization in the western subarctic Pacific (SEEDS).

- ⑩ 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.

- ⑪ Kudo, I., Y. Noiri, J. Nishioka, H. Kiyosawa and A. Tsuda: ASLO/TOS Ocean Research Conference, (2004).

Phytoplankton community response to Fe and temperature gradient in the NW and NE subarctic Pacific Ocean.

- ⑫ Yoshimura, 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.

- ⑬ Sohrin, 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).

- ⑭ Boyd, 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.

- ⑮ H. 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.

他35件

(4) 受賞等

- ① 平成15年3月、小埜恒夫（北海道区水産研究所生物環境研究室）、日本海洋学会岡田賞
- ② 平成15年3月、津田敦（北海道区水産研究所生物環境研究室）、日本プランクトン学会 論文賞

(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、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 北海道新聞（14年4月20日道東版、添付資料）
- ⑥ 北海道新聞（14年4月27日釧路版）
- ⑦ 日本経済新聞（14年5月20日）
- ⑧ 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）
- 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との情報（記事は未確認）
- ⑮ 日本経済新聞（H15年5月12日）
- ⑯ NHKニュース道東版（H15年6月21日）
- ⑰ NHKニュース北海道版（H15年7月9日）
- ⑱ 日本経済新聞（H16年2月8日）
- ⑲ YAHOO News（H16年3月18日）

その他4件

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

SEEDS SERIESの成果は二酸化炭素の処理問題を議論するIOC, SCOR協賛のシンポジウムOcean in a High-CO2 World on 10-12 May 2004 in Paris, Franceにおいても取り上げられ、二酸化炭素吸収技術としての海洋鉄濃度調整がもつ可能性と限界を示し、今後の政策決定に貢献すると考えている。また、新聞など報道機関には積極的に情報を公開し地球環境問題の啓蒙に努めた。さらにHPの立ち上げにより、プロジェクトと目的や進行状況の透明化を図った (<http://seeds-exp.jp/>)。