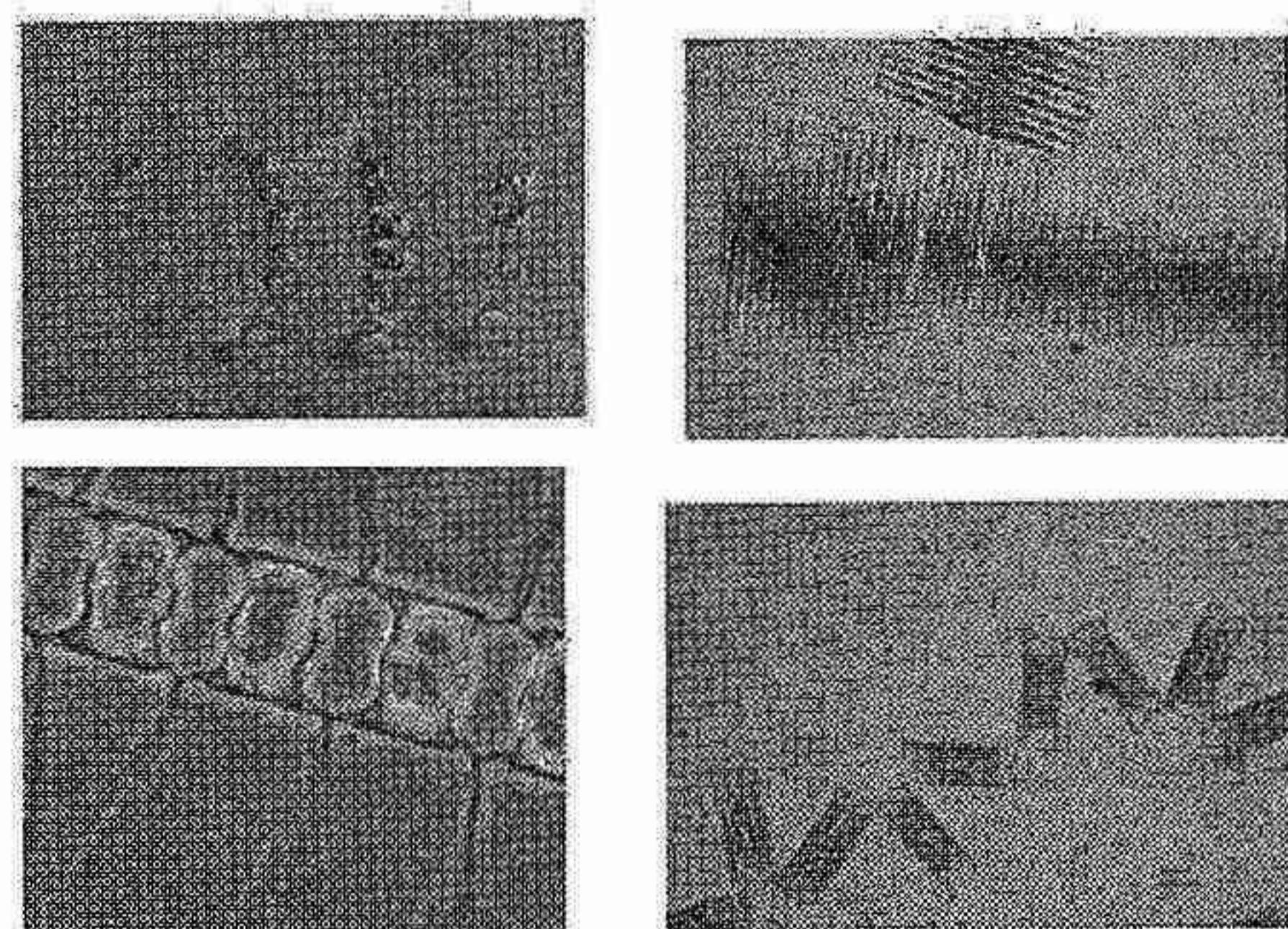


# 3. 海洋の植物プランクトン と鉄が語る地球環境

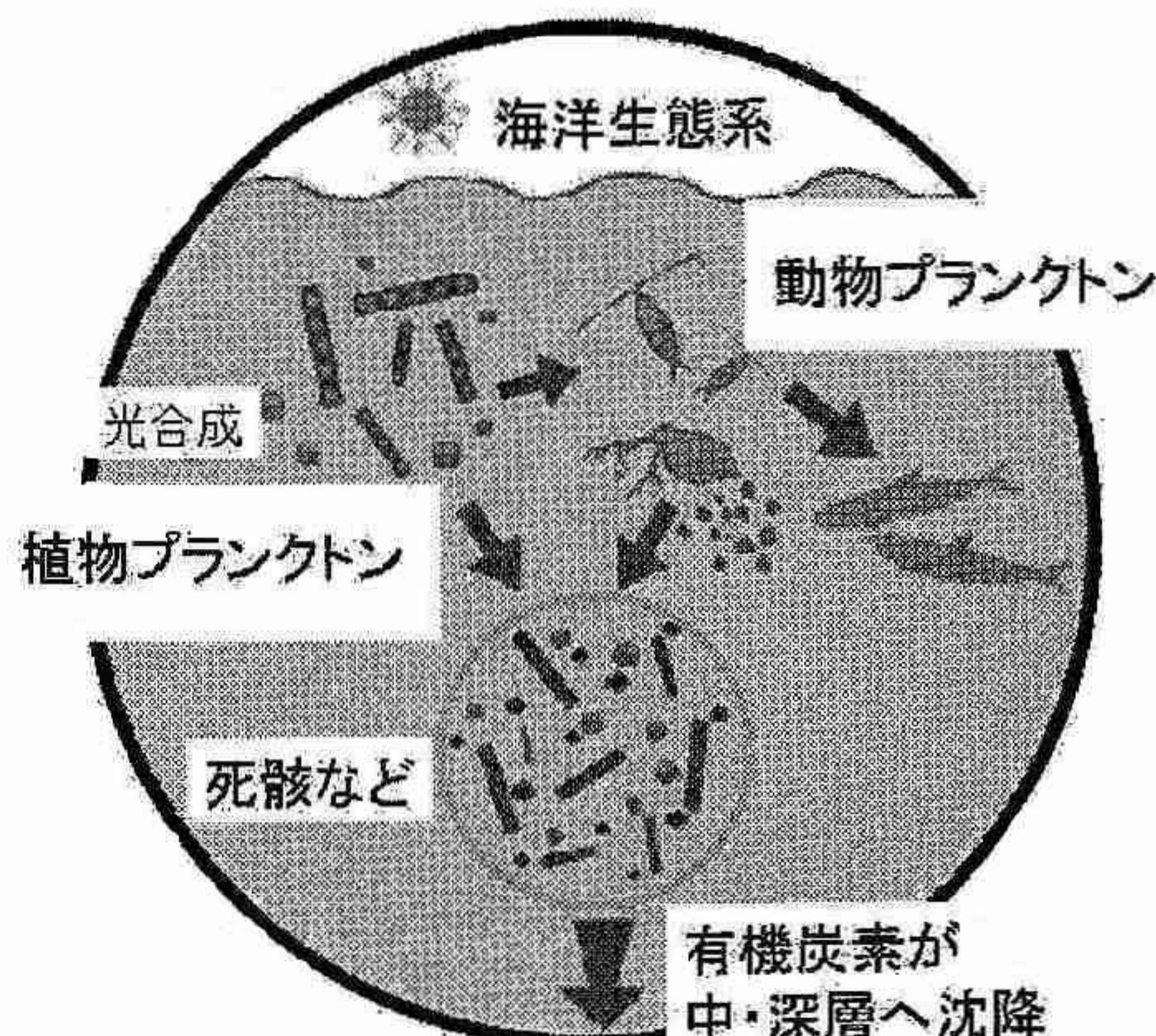
北海道大学 低温科学研究所 西 岡 純

## 1. はじめに

海洋では、植物プランクトン（図一1）が行う光合成によって海洋表層へ溶け込んだ二酸化炭素から有機物が生産されています。このように生産された有機物は食物連鎖の底辺を支え、海洋の生態系を支えているのです。人間活動との関連を考えると、植物プランクトンの増殖は、水産資源を支える重要な要素です。また、海洋の表層で生産された植物プランクトンの死骸や、それを食べた動物プランクトンの死骸や糞、さらに高次生態系にとりこまれた有機物の粒子は、やがて海底に向かって沈降していきます。このような沈降粒子中の有機物に含まれる炭素（有機炭素）は、海洋の中層・深層でバクテリア等の働きを受けて分解再生され無機炭素に戻つて行きますが、その一部は海底にまで達します。また、分解再生され中層・深層に溶け込んだ無機の炭素も、数十～数百年のオーダーで大気に触れることなく海の中に隔離されることになります。このような海洋の生物過程を介した炭素の中層・深層への移送は、海洋生物ポンプと呼ばれています（図一2）。この海洋生物ポンプは、地球温暖化に関わる大気中の二酸化炭素濃度を決定する重要な要因の一つであると考えられています。このため、地球の炭素循環に果たす海洋植物プランクトンの役割が盛んに研究されています。



図一1 海の植物プランクトン



図一2 海洋生物ポンプ

## 2. 海洋植物プランクトンと「鉄仮説」

海で植物プランクトンが光合成を行い増殖していくためには、その細胞を合成するための数多くの元素を海水から取り込む必要があります。元素の中には海水中に豊富に存在しているものから、不足しがちな元素までその濃度は様々です。なかでも硝酸塩、リン酸塩（また珪藻などにとって珪酸塩）は主要栄養塩とよばれ、海水中でも不足しやすい物質です。このように植物プランクトンの増殖は、光合成をおこなうための光の量、栄養塩の量などによって大きく変わってきます。また、水温の影響も受けるし、動物プランクトンに食べられる量によっても植物プランクトンの現存量は変わってきます。

北太平洋亜寒帯域や南極海、東部太平洋赤道域（図-3）は他の海域と比べて特徴のある海域です。これらの海域では、植物プランクトンの増殖に必要な硝酸塩、リン酸塩、珪酸塩など主要な栄養塩が高い濃度で余っているにもかかわらず、植物プランクトンの増殖は低く抑えられていることが知られています。これらの海域を高栄養・低生産海域（high nutrient low chlorophyll）と呼んでいます。1990年代初めまで、「この高栄養・低生産海域でなぜ植物プランクトンが十分に増殖できないのか？」ということが海洋学者にとって謎となっていました。

主要な栄養塩以外にも植物プランクトンの増殖には欠かせないものがあります。さらに低濃度しか存在しないビタミンや、鉄分など微量金属などの必須微量元素も必要不可欠な物質です。鉄分が海洋の生物にとって不足しやすい元素であるについては、1930年代から指摘されていました。しかし、海水中の鉄濃度の測定は、汚染を簡単に受けてしまうため極めて難しい技術でした。近年まで海水中の鉄濃度の正確な値が出せなかつたため、植物プランクトンにとって鉄が不足することは確認出来ませんでした。1980年代の終わりに米国のモスランディング海洋科学研究所のJ. H. Martin博士は、世界で初めて外洋水中の鉄濃度の測定に成功しました。この結果、高栄養・低生産海域の表層の鉄濃度が極低濃度であることが明らかになりました。彼らは、「高栄養・低生産海域と呼ばれる栄養塩の余っている海域の植物プランクトンは、鉄分が不足して増殖が制限されているのではないか？」と考え、これを「鉄仮説」（Martin, 1990）として提唱しました。その後、海洋の生態系や炭素循環の研究分野にとっても微量元素として鉄分が広く興味の対象となりました。

## 3. 「鉄仮説」と地球温暖化対策

J. H. Martin博士によって提唱された「鉄仮説」は、地球温暖化対策案にまで発展しまし

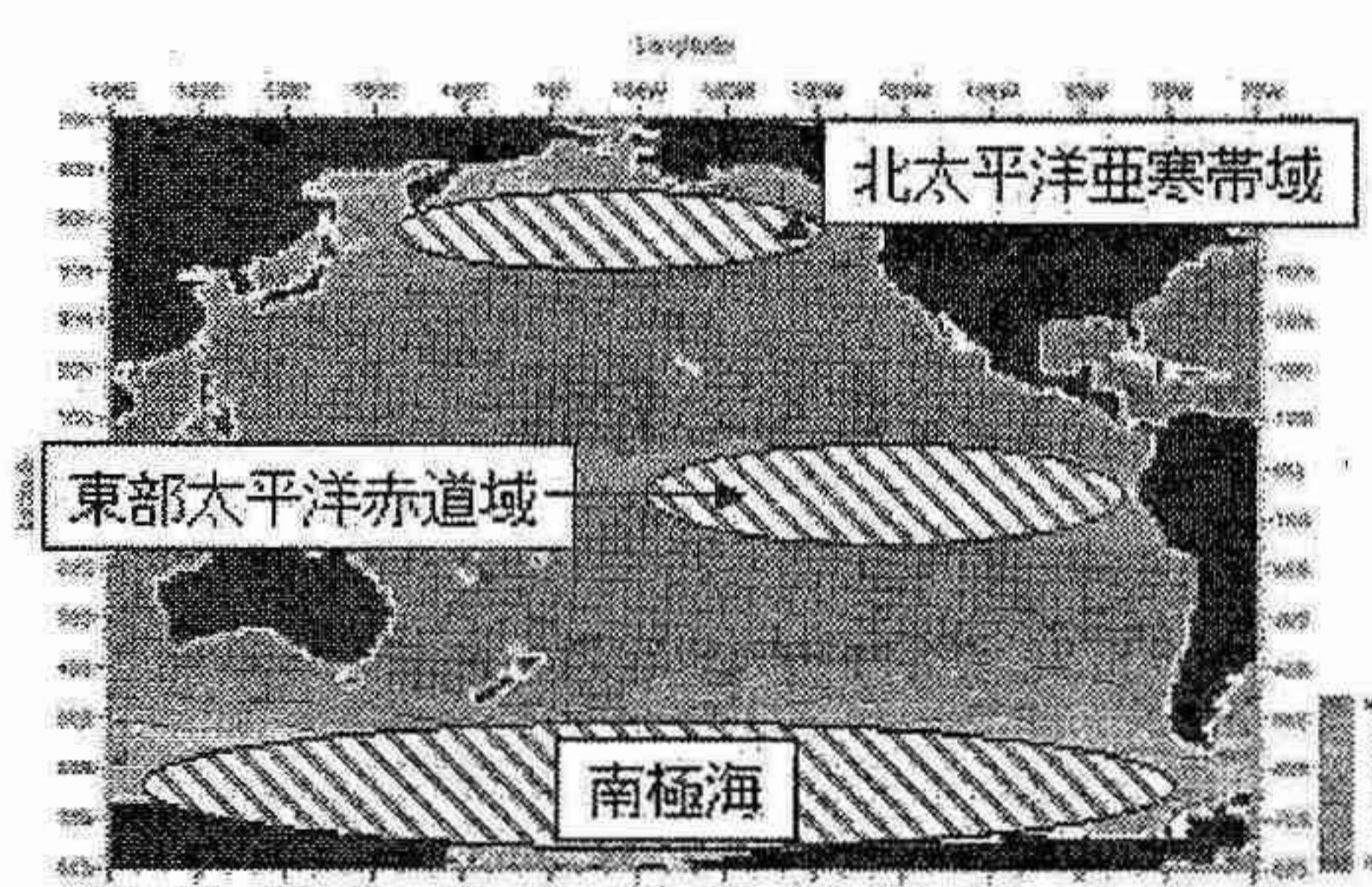


図-3 海洋の高栄養低生産海域

た。高栄養・低生産海域に人为的に鉄を散布することで植物プランクトンの増殖を促進させて、光合成による有機炭素生成量を増やし、海洋生物ポンプを活性化させ、大気中二酸化炭素の海洋への取り込みを高めることができるのでないかと考えたのです。1997年に京都で行なわれた気候変動枠組条約第3回締約国会議(COP 3)後に、CO<sub>2</sub>排出権取引の世界的な市場が生まれる可能性が指摘され、この鉄散布による大気中CO<sub>2</sub>の海洋への固定についても、欧米のベンチャー企業において特許取得の動きも見られました。しかし、人为的な鉄散布による海洋生物ポンプの促進効果については、炭素の固定量や環境への影響などの不確定な要素が多く含まれており、科学的な検証と評価が求められていました。このような背景が後押ししたため、国内外で、鉄と植物プランクトンの研究が数多く行われ、現在この分野は飛躍的に進展しています。その結果、海洋の生態系や物質循環における鉄の重要な役割が次々に明らかになってきています。

#### 4. 海洋における鉄散布実験

実際の海洋における鉄と植物プランクトンの研究は、当初実験手法として、採取した現場の海水をボトルにつめて鉄分を加えて船の甲板上で培養する「船上ボトル培養実験」を中心に展開されていました。この方法は、高栄養・低生産海域の植物プランクトンが生理的に鉄不足であることを示すには十分でしたが、高栄養・低生産海域で植物プランクトンが主要な栄養塩を使い尽くすまで増殖できない理由として、動物プランクトンの捕食や光の環境などの要因も考えられるため、鉄分の重要性を決定づけるには至りませんでした。また地球温暖化対策の視点から見ても、多種の生物群で構成される海洋プランクトン生態系が、人为的鉄の供給にどのように応答し、炭素固定を促進するのにどの程度効果があるのか、また海洋環境をどのように変えてしまうのかについては、船上ボトル培養実験では十分な情報が得られませんでした。これらの問題を解決したのは、実海域に実際に人为的に鉄を数十平方キロメートルスケールで散布して、その散布した海域の観測を行う「鉄散布実験」と呼ばれる方法でした。

この「鉄散布実験」は1993年にMoss Landing海洋研究所のグループによって太平洋赤道域で初めて実現されました。その後2005年までの間に、北太平洋亜寒帯域や南極海で同様の実験が、日本、アメリカ、ヨーロッパ、ニュージーランドのグループによって10回以上行われています(図-4)。

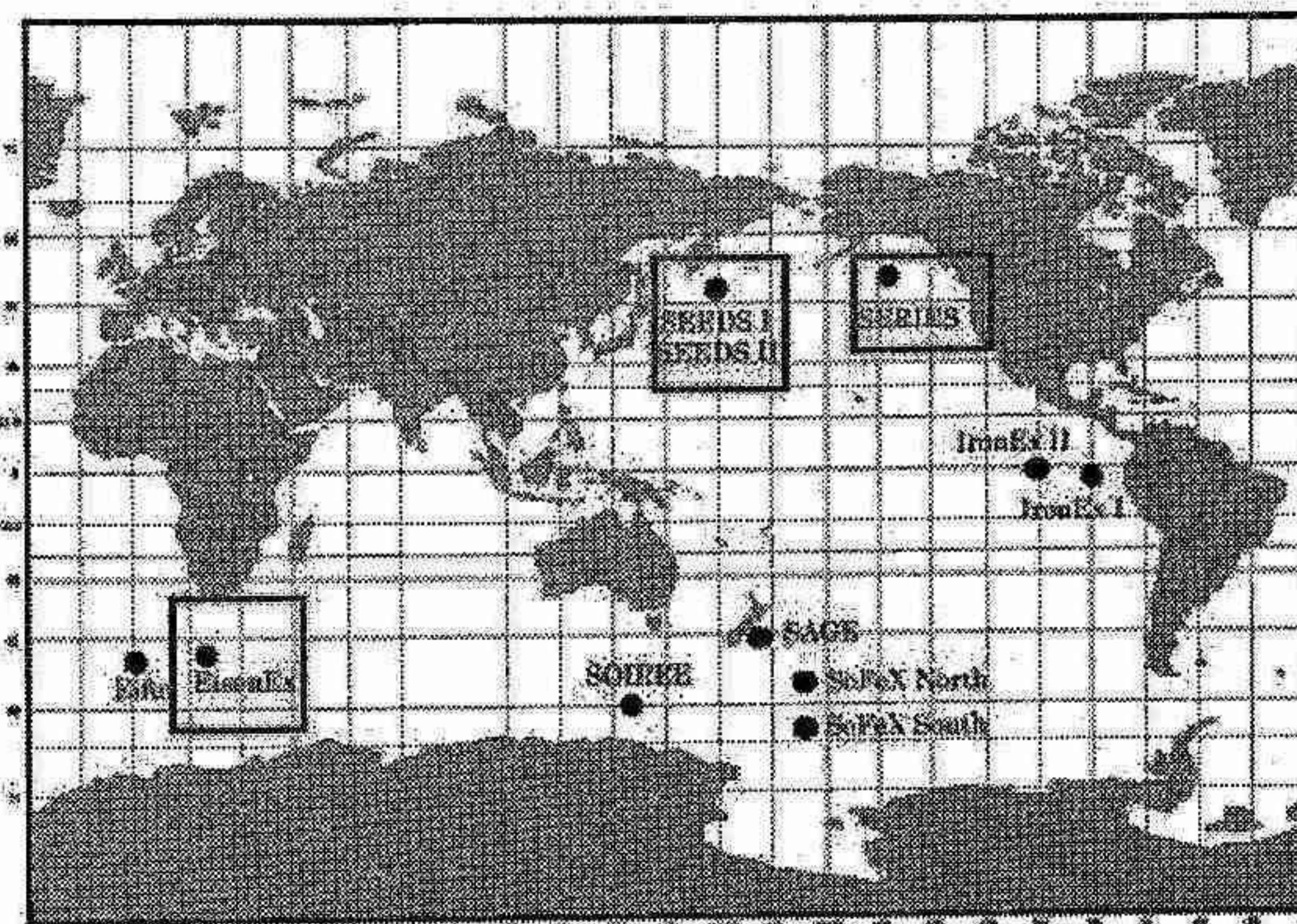


図-4 2005年までに行われた鉄散布実験  
(赤枠は著者が参加した実験)

日本に近い北太平洋亜寒帯域の西側の海域では、黄砂の飛来による大気からの鉄分の供給が他の海域に比べて多いと考えられてきましたが、鉄が植物プランクトン増殖や海洋生態系全体に果たす役割についてはあまり調べられていませんでした。その後、北太平洋亜寒帯域の東西それぞれに見られる植物プランクトンの種類やその増殖量の違いなどを決めている因子として、鉄の供給量の違いが取り上げられ、その重要性が指摘されるようになりました。日本のグループも、北太平洋亜寒帯域を対象として、「鉄分の供給量が植物プランクトンの増殖量を決める要因になるのか?」、「人為的な鉄の供給が地球温暖化対策になり得るのか?」という2つの疑問を明らかにするために、鉄散布実験を行うプロジェクトを立ち上げ、実験を実施しました。この結果、鉄分の供給がほかの海域に比べて多いと考えられてきた北太平洋亜寒帯の西側の海域でも、鉄分の不足が植物プランクトンの増殖を制限していたことが確かめられました(図-5)(Tsuda *et al.*, 2003, Nishioka *et al.*, 2003)。

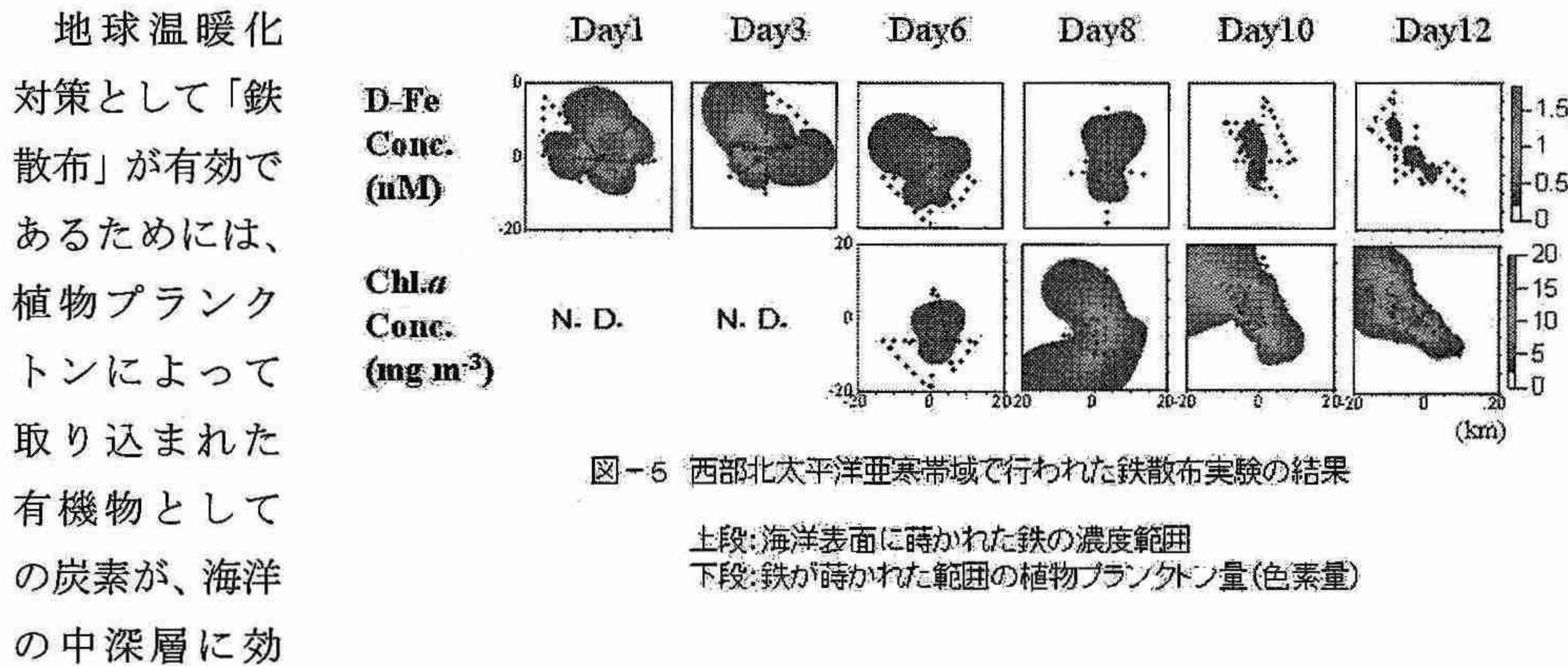


図-5 西部北太平洋亜寒帯域で行われた鉄散布実験の結果

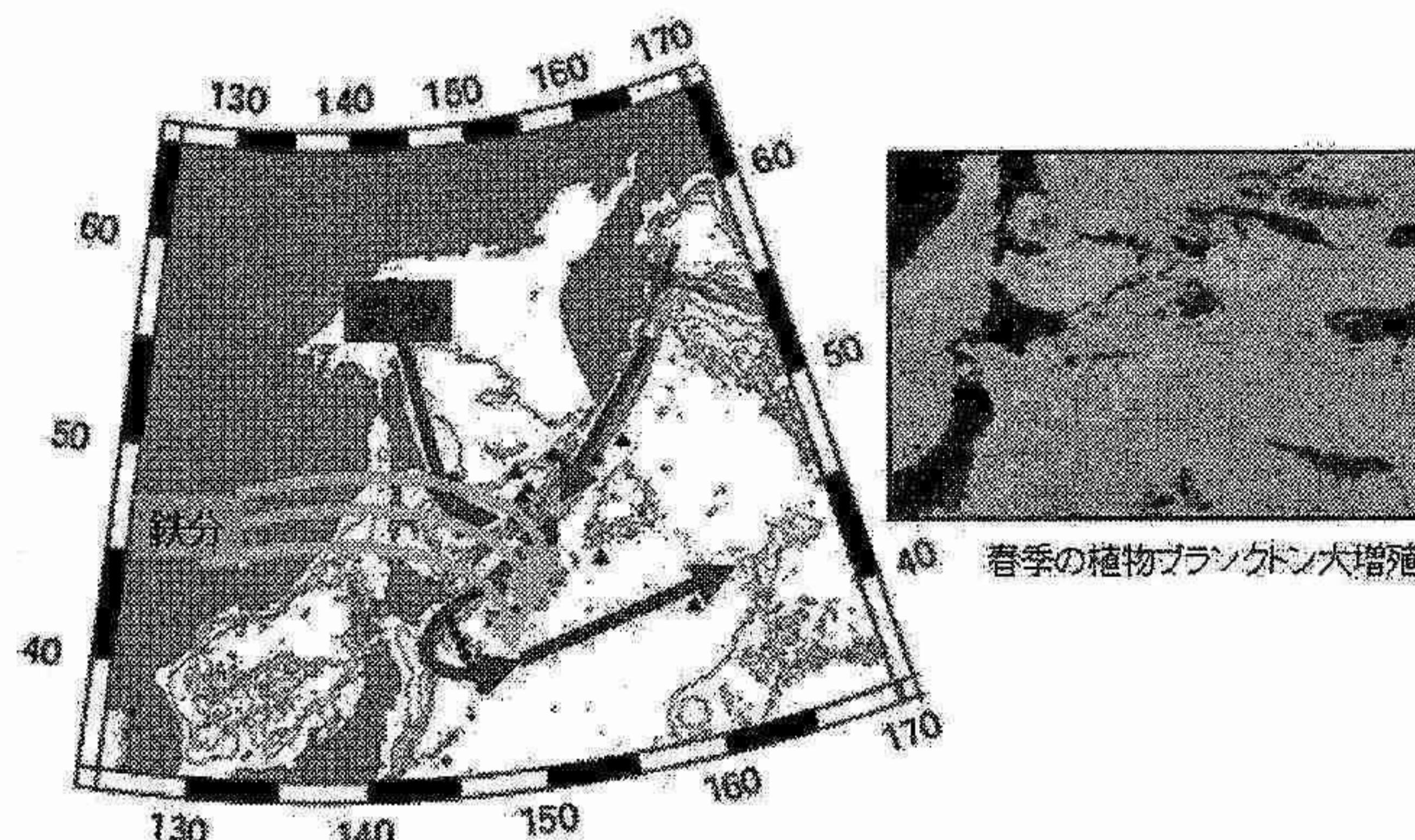
上段: 海洋表面に跨かれた鉄の濃度範囲  
 下段: 鉄が跨かれた範囲の植物プランクトン量(色素量)

## 5. 自然界の植物プランクトン量の変動をコントロールする要因を探る

これまでの研究では、海洋に人为的に鉄を供給する実験手法を用いて、微量栄養素である鉄分が、高栄養低生産海域の植物プランクトンの増殖量を制限している元素であることが分かってきました。しかし、実際の外洋海域で起こっている植物プランクトン増殖量の

季節的な変動や経年的な変動が、本当に天然の鉄の供給量に依存しているのかについては実は未だによく分かっていません。例えば、我々日本人が水産資源の恩恵を受けているオホーツク海や隣接する親潮海域では、春季の植物プランクトンの大増殖が観測されますが、この春季の植物プランクトン増殖を生み出すための鉄分がどこから供給されているのかについてもよく分かっていません。

現在我々は2つの鉄の供給過程を考えて、植物プランクトンの大増殖を生み出す要因を探っています。一つは以前から考えられていた大気を経由してユーラシア大陸の砂漠等から運ばれる黄砂などのダストに含まれる鉄分です。また、近年になってオホーツク海の大陸棚から巻きあがる鉄分が、海洋の中層に流れる水（中層水）の循環によって親潮海域や西部北太平洋に輸送されていることが分かってきました。これらの鉄分を使って、環オホーツク海域では高い生物生産が支えられている可能性があります。これらの植物プランクトン増殖を生み出すメカニズムを明らかにしていくことを目指して現在「環オホーツク海域」の研究を開いています（図一6）。



図一6 考えられる北太平洋への鉄の供給経路(左)と植物プランクトンの大増殖(右)  
1:オホーツク海の大陸棚から中層の循環によってたらされる鉄  
2:大気経由のダストによってたらされる鉄

## 6. おわりに

海水中の微量金属元素である鉄分の地球化学的な循環と植物プランクトン量の変動は密接に関係しています。この自然界における鉄分の供給と植物プランクトンの増殖のメカニズムを説き明かすことは、将来の気候変動や水産資源の変動など地球環境を予測する上でも重要な課題となっています。我々はこのような海洋の微量元素と生態系についてさらによく学ぶ必要があるのです。

## 参考文献

- Boyd, P.W., et al., (2004): The decline and fate of an iron-induced subarctic phytoplankton bloom. *Nature*, **428**, 549–553.
- Coale, K.H., et al., (2004): Southern Ocean iron enrichment experiment: Carbon cycling in high- and low-Si waters. *Science*, **304**, 408-414.
- Martin, J. H. (1990) Glacial-Interglacial CO<sub>2</sub> Change: THE IRON HYPOTHESIS. *Paleoceanography*, **5**, 1-13.

Nishioka, J., S. Takeda, I. Kudo, D. Tsumune, T. Yoshimura, K. Kuma, and A. Tsuda (2003): Size-fractionated iron and iron-limitation processes in the subarctic NW Pacific. *Geophys. Res.Lett.*, **30**, 14, 1730, doi:10.1029/2002GL016853.

西岡 純、(2005) 北太平洋における鉄の存在状態と鉄が生物生産に及ぼす影響に関する研究, 海の研究, 15(1), 19-36

Tsuda, A., et al., (2003): A mesoscale iron enrichment in the western subarctic Pacific induces large centric diatom bloom. *Science*, **300**, 958-961.