

第 2 章

2

地球温暖化現象の  
解明に向けて

## 第2章 地球温暖化現象の解明に向けて 目次

狛江研究所	大気科学部	上席研究員	小林 博和
狛江研究所	大気科学部	主任研究員	下田 昭郎
狛江研究所	大気科学部	主任研究員	門倉 真二
我孫子研究所	環境科学部	主任研究員	坂井 伸一
我孫子研究所	応用生物部	主任研究員	西岡 純
我孫子研究所	環境科学部長	上席研究員	丸山 康樹

2 - 1 地球観測衛星による温室効果気体の観測 .....	23
コラム3：人工衛星による海洋環境の観測 .....	26
2 - 2 海洋生態系を介した炭素循環機構の解明 .....	27
2 - 3 まとめ .....	30



小林 博和（1973年入所）  
発電所排ガス拡散に係わる気象の研究に従事の後、1985年より原子力情報センター。1989年より、通産省の衛星搭載温室効果気体センサIMGの開発プロジェクトに取り組む。1992年より大気科学部。1999年までIMGの運用と評価等を実施。現在、IMG後継機用のアルゴリズム開発、衛星データを活用した環境評価研究等を実施。



下田 昭郎（1990年入所）  
人工衛星（IMG）データを用いた温室効果気体濃度の測定手法に関する研究に従事。現在は、リモートセンシングを用いた大気環境モニタリング手法の開発に取り組んでいる。



門倉 真二（1993年入所）  
人工衛星搭載温室効果気体センサIMGの解析アルゴリズム開発、気候変化予測研究に従事。現在、温暖化時の影響評価に重要な、極端な気象現象の頻度の変化を予測する課題に取り組んでいる。



坂井 伸一（1989年入所）  
衛星リモートセンシングや海洋レーダの観測データを用いた海域流動解析、温排水の環境影響評価、3次元温排水拡散予測手法の開発に従事してきた。現在は、高分解能沿岸海洋レーダの開発と、その観測データとデータ同化（アシミレーション）モデルを用いた3次元沿岸流動解析手法の開発に取り組んでいる。



西岡 純（1995年入所）  
海洋の植物プランクトンの増殖と微量栄養物質に関する研究に従事。現在は北太平洋亜寒帯域を中心に、微量栄養物質である鉄の供給に対する生態系の応答の解明など、海洋生態系の炭素固定量の評価研究に取り組んでいる。

丸山 康樹（8ページに掲載）

## 2 - 1 地球観測衛星による温室効果気体の観測

環境問題は地球全体として考えるべきであるというコンセンサスが一般化する中で、地球を均一にかつ短時間で観測することのできる衛星観測手法の必要性はますます高まっている。

通商産業省（現経済産業省）は、大気中の各種温室効果気体の実態を把握することを目的に、宇宙開発事業団、環境庁、NASA 等が提供する 8 つの地球観測センサと共に、地球観測衛星 ADEOS に搭載する温室効果気体センサ IMG（Interferometric Monitor for Greenhouse gases）の開発プロジェクトを平成元年度（1989 年）から推進した。

地球大気から放射される赤外スペクトルを衛星から測定すると（図 2-1-1）、大気中の温室効果気体など各種気体による赤外線吸収を示す特徴的なスペクトルが得られる。IMG は、地球から放射される微弱な赤外光を高い精度で測定するために開発された世界に類を見ない高分解能、大口径の衛星搭載用赤外フーリエ分光計である。この赤外放射スペクトルを解析することによって、大気

中の温室効果気体の濃度を求めることができる。本プロジェクトで当所は、IMG データから温室効果気体の濃度を求める解析ソフトウェアの開発、IMG データの処理・解析設備となるデータ利用地上システムの開発と運用、IMG データを用いた温室効果気体の挙動解明研究、等を担当した。

### 2-1-1 温室効果気体濃度解析アルゴリズム開発と検証

温室効果気体の全球分布を求めるために、IMG 生データから、大気放射スペクトルを解析するアルゴリズム、大気放射スペクトルから気温・湿度・温室効果気体濃度を解析するアルゴリズム、および大気の運動による温室効果気体の移流・拡散の効果を取り込んで気体濃度の全球的挙動を解析する 4 次元同化アルゴリズムを開発した。これらの開発作業は IMG センサの打ち上げに数年先立って開始された。

衛星打ち上げ後、直ちにセンサから電送されたデータを解析して、赤外フーリエ分光計としての IMG センサ

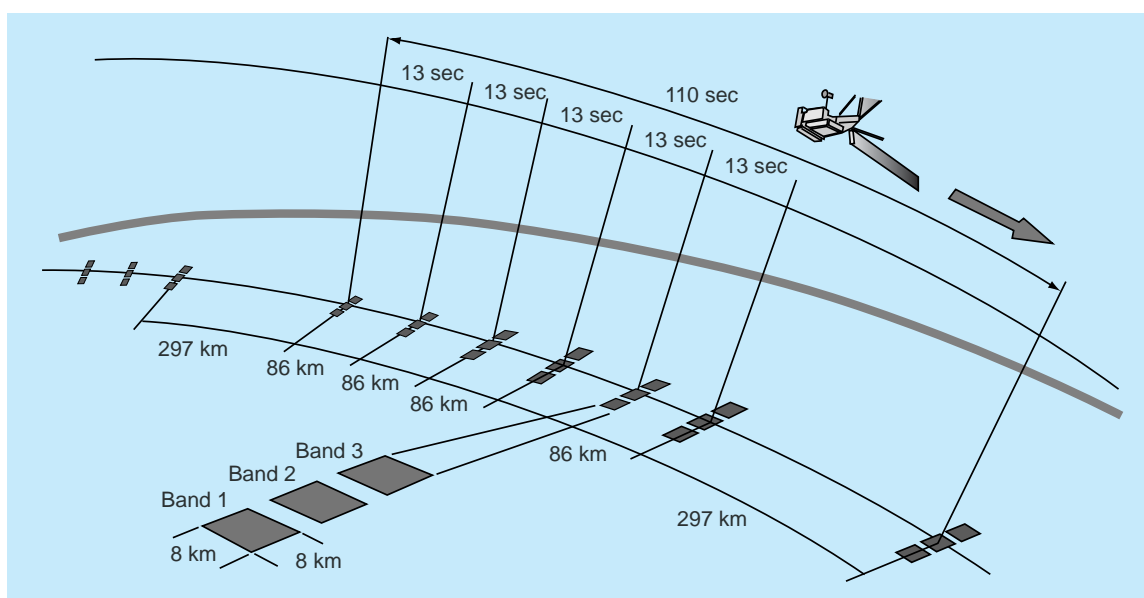


図2-1-1 ADEOS衛星に搭載されたIMGによる観測概念図  
衛星軌道直下の地球大気と地表を波長域の異なる三つの検出器によりとびとびに観測され、合成される。

のハードウェアの評価を実施した。ハードウェアの評価においては、センサに内蔵される参照黒体と深宇宙空間の測定データを基準値として地球大気観測データを解析し、得られた大気放射スペクトルが予想される値であることを確認した。

次に、開発した解析アルゴリズムが適切なものであることを検証するために、気温・湿度の鉛直分布などのグラントルースデータを収集し、これとIMGデータの開発アルゴリズムを通して得られた気温・湿度の鉛直分布を比較検討し、開発したソフトウェアが適切であることを検証した。また、検証と同時にソフトウェアの解析精度を向上させるために、地表におけるIMGセンサの観測エリアと同一のエリアを、航空機等を用いて観測するという、いわゆるキャンペーン検証計画を作成し、これを実行した。また検証計画に用いるために、IMGをシミュレートする航空機搭載型の赤外フーリエ分光計を開発した。

衛星を利用した地球観測では、天候に左右されず、ま

た全球を短時間で走査できるため、大量の観測データを取得することができる。そこで、大量のデータを能率よく処理するために、開発したアルゴリズムを多数のワークステーション群で実行する、IMGデータ利用地上システムを開発、運用した。このシステムにより、IMGデータをほぼリアルタイムで処理解析することができた。

IMGデータ利用地上システムにより処理解析されたデータは、地球環境研究に役立たせるために、データを必要とする世界の研究者に配布された。

## 2-1-2 温室効果気体の全球分布図の作成

IMGの目的は温室効果気体の全球的な挙動解明である。挙動解明研究の一部として、取得生データから、当所が開発した解析プログラム群により、メタン等温室効果気体の全球分布図を作成した。IMGセンサから電送されてきたデータを解析処理して大気放射スペクトルデータを求め（図2-1-2）、これから気温、水蒸気量、各

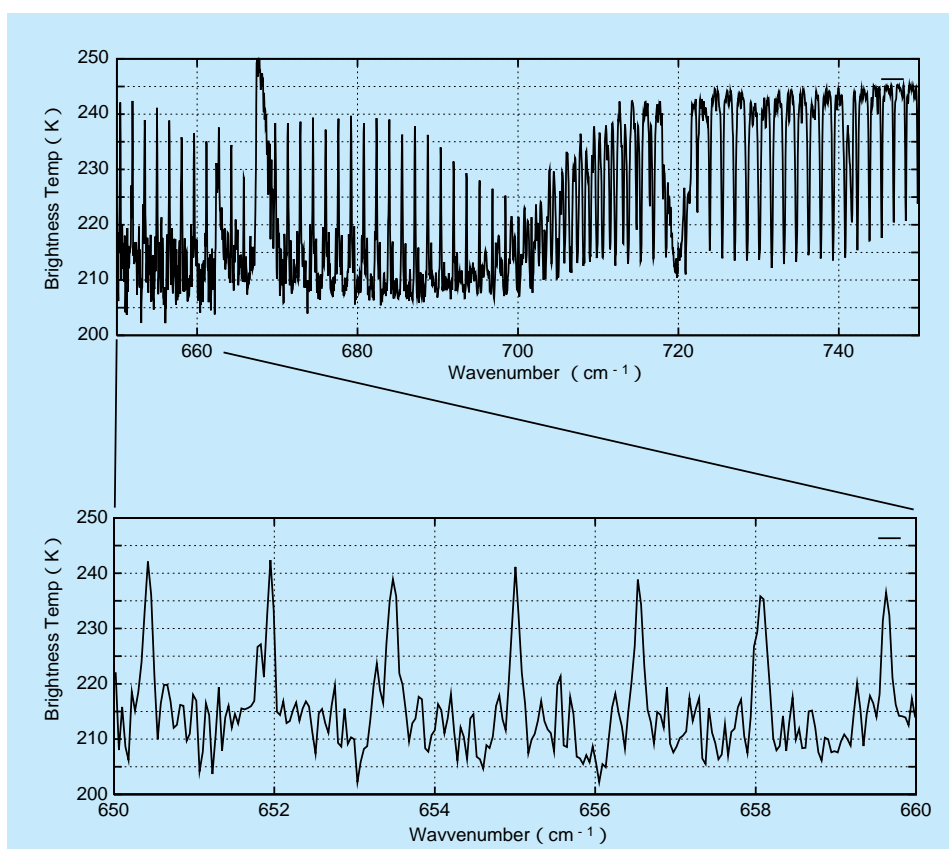


図2-1-2 IMGが測定した大気放射スペクトルの例

IMGの測定範囲（714～3030cm<sup>-1</sup>: 3.3～14マイクロメートル）の一部（上図）とそれをさらに拡大したもの。CO<sub>2</sub>の吸収線が高い分解能で精度よく得られた。

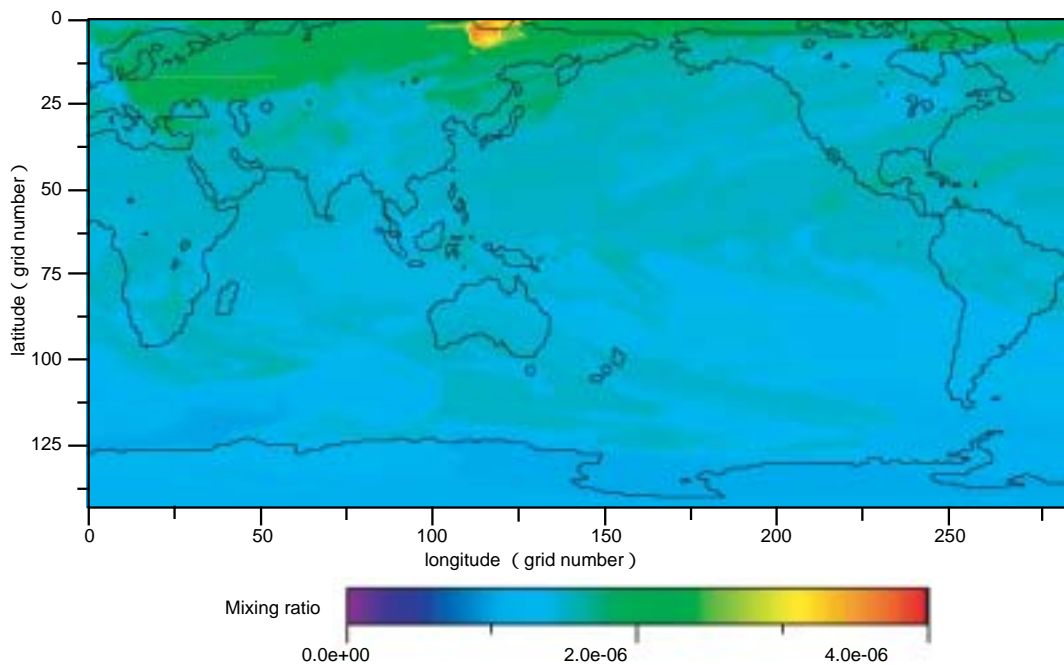
種温室効果気体濃度等を計算する。これを重ね合わせて  
全球的な温室効果気体の分布図を得ることができる（図  
2-1-3）。

### 2-1-3 IMG の活用

本計画の最終目的は、IMGを搭載した観測衛星による  
温室効果気体の実態解明である。しかしながら  
ADEOS衛星故障のため、取得されたIMGデータは平

成8年（1997年）11月から翌年6月末までの8ヵ月間  
に限られ、温室効果気体の全球的な季節変動や経年変化  
等を捉えることができなかった。

宇宙開発事業団の地球観測データ解析研究センターで  
は、次世代温室効果モニタリング用高スペクトル分解能  
センサ（ATRAS）の研究を開始した。ATRASはIMG  
センサの実質的な後継機であり、当所がIMGデータ解  
析ソフトウェア開発を通じて蓄積してきた研究成果がこ  
れに活用される予定である。



**図2-1-3 IMG観測開始後7.5ヶ月後のメタン濃度（高度1000 hPa）のスナップショット**  
IMGの観測は衛星軌道直下に限られるので、全球の温室効果気体濃度の瞬時値を求めることができない。  
そこで、IMG観測から得られた気体濃度を大気の運動による移流・拡散を考慮した4次元同化モデルに投  
入して、得られた結果である。北半球、特に北極域で高い濃度が観測されている。

### コラム3：人工衛星による海洋環境の観測

地球温暖化予測において、海洋の果たす役割は重要であるが、地球規模で見た場合、未だに海洋の実体は十分に解明されていない。その主な理由として、観測対象である海洋が非常に広大で深いため、その全体を観測すること自体が不可能であり、また海洋の観測は、天候に左右されやすく技術的に非常に難しいという点が挙げられる。過去において、船舶などによる海洋観測が多く行われているが、観測範囲は限定され、また時間的にも不定期なため、海洋の全体像を把握するには至っていない。しかし、1980年代頃から、米国の気象衛星NOAAなどの熱赤外センサーを搭載したリモートセンシング・データが整備されるようになり、観測範囲が表層に限定されるものの、全海洋の水温分布が定期的に観測されるようになってきた。さらに近年になって、衛星高度計によって海面高度（海面の凹凸）が観測できるようになり、ほぼ全球の海流の変動が推定できるようになってきた。

当所では、衛星高度計GEOSAT<sup>(\*)1</sup>とTOPEX/POSEIDON<sup>(\*)2</sup>のデータを利用して、日本周辺の海域環境に大きな影響を及ぼす黒潮とそれに続く

\*1：米国海軍がJohns Hopkins大学と共同開発して1985年に打ち上げた初の本格的な衛星

\*2：米国航空宇宙局と仏国立宇宙研究センターが共同開発して1992年に打ち上げた高精度な衛星

黒潮続流の実態を調べた。ただし、海流を推定するためには、高度計の観測データから等重力ポテンシャル面であるジオイドの値を差し引かなければならない。しかし、現状では、精度のよいジオイドデータがないため、何らかの工夫をする必要がある。そこで、これまでの黒潮（黒潮続流）の調査結果を基に、力学的な特性を仮定することによって、黒潮と黒潮続流域の実態を推定した。解析した海面高度の分布と、同時期に得られた漂流ブイ（流れに沿って動く浮標）の軌跡を図1に示す。図中、海面高度は高い方を赤色、低い方を青色で示し、漂流ブイは移動開始点を大きな黒丸で示してある。黒潮や黒潮続流などの大規模な海流は、地球自転効果によるコリオリ力と圧力勾配が釣り合った、いわゆる地衡流バランスが成り立っており、その場合北半球においては、海流が図1に示した海面高度の高いところから低い方へ向かって右向きに等値線に沿って流れることになる。図1より、等値線が混み合った黒潮続流の中心付近において、漂流ブイが等値線に沿って流れていることが分かり、用いた手法の妥当性が確認できる。

このような海流の時間的・空間的変動を調べることにより、地球温暖化予測に必要な海洋大循環モデルや大気・海洋結合モデルなどの数値モデルの精度向上が期待できる。

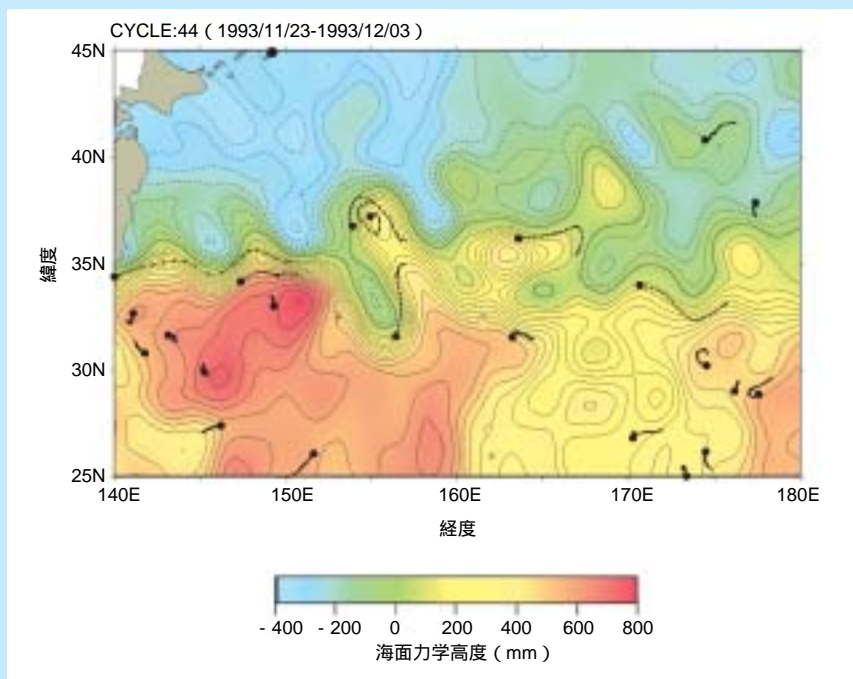


図1 TOPEX/POSEIDONによる海面高度分布と漂流ブイの軌跡との比較

## 2 - 2 海洋生態系を介した炭素循環機構の解明

### 2-2-1 はじめに

地球規模の炭素循環を定量的に把握することは、地球温暖化の実態を明確にし、将来の気候変動を予測するための科学的知見をもたらす重要な意味をもつ。中でも海洋は、海面において大気とガス交換を行い、大気中二酸化炭素を吸収・放出しているため、地球の炭素循環に果たす役割は大きい。

### 2-2-2 海洋における二酸化炭素の吸収過程

大気中二酸化炭素は、いくつかの過程を経て海洋に固定されている。その一つは、大気中の二酸化炭素が無機的全炭酸として海水に溶け込む過程である。溶解ポンプと呼ばれるこの過程で海洋に取りこまれる二酸化炭素量は、海水の持つ二酸化炭素の無機的な溶解度（水温・塩分によって決まる）と海面での気体交換（主に風）によって決まる。また、炭酸カルシウムの殻を持つ円石藻や有孔虫などのプランクトンの死骸が沈降し溶解していくと、中・深層の海水中のアルカリ度が增加する。アルカリ度の増加は海水中の二酸化炭素分圧を減少させるため、このような海水が物理的な過程で海面にもたらされると、二酸化炭素を吸収することになる。このアルカリポンプと呼ばれる過程は、海洋の循環過程によって支配されるため、数百年以上の長いタイムスケールで大気中二酸化炭素濃度を変動させている可能性がある。

大気中の二酸化炭素は、海洋の植物プランクトンの光合成によって、有機物としても固定される。この海洋表層で生産された有機物の粒子は、海底に向かって沈降していく。この沈降有機炭素は、中・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っていくが、その一部は海底に堆積物となって蓄積される。また、中・深層に溶け込んだ炭素も数百年のオーダーで大気に触れることなく隔離される。このような海洋の生物過程を介した二酸化炭素の固定は、生物ポンプと呼ばれている。海洋の生物ポンプの効率が高ければ、過去の氷河期

に大気中二酸化炭素が減少したことも説明が可能であり、生物ポンプで固定される炭素の変動が将来の気候変動に与える影響は大きいと考えられる。しかし、生物ポンプで海洋に固定される炭素を定量的に見積もることは難しく、海洋炭素循環を考える上での大きな課題となっている。

### 2-2-3 生物ポンプにおける鉄の役割

生物ポンプによる炭素の固定量を把握するために、海水中の生物生産量の測定や有機物沈降粒子を捕捉するセジメントトラップ実験等の現場観測が行われており、生物ポンプの効率が海域によって大きく違っていることが明らかになっている。東部北太平洋亜寒帯域や南極海、東部太平洋赤道域などでは、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残存し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る。これらの海域では、大陸から大気を通して供給される鉄分の量が少ないため、鉄不足となって植物プランクトンの増殖が生理的に制限される結果、栄養塩が残存すると考えられている。このような海域では、天然の鉄分の供給が植物プランクトンの増殖を大きく変化させ、生物ポンプの効率に大きな影響を与える。海洋への鉄の供給量の変動が、過去の海洋炭素循環および、地球全体の気候を大きく変動させていた可能性もある。近年、生物海洋学、化学海洋学、さらには海洋炭素循環モデルの研究者の間では、鉄とプランクトン生態系の関係を明らかにすることは、海洋の生物学的な炭素循環を解明する上で無視できない重要な課題となっている。また、地球温暖化対策の一つとして、このような特徴を持つ海域に鉄を散布することで、植物プランクトンの光合成による有機炭素生成量を増やし、生物ポンプの効率を上げることが提案されている。この、鉄散布については、炭素固定の経済的効率などを含めた賛否両論が交わされ、現在においても大きな議論を呼んでいる。一方では、米国のベンチャー企業が、鉄散布を排出権取引を絡めた商業として

行う動きもみられる。しかし現時点では、科学的調査として行われた鉄散布実験によって、実際に鉄が海洋表層の植物プランクトン量を増加させることが明らかになったのみで、鉄の供給によって海洋プランクトン生態系の構造がどのように変化し、どれだけの炭素が有機物として海洋に固定されるか、環境にどれだけの影響をおよぼすのかについては十分な知見がない。さらなる科学的調査・研究をおこなって、それらの知見に基づいた議論が急務となっている。

#### 2-2-4 生物ポンプ解明の為の当研究所の取り組み

当所では、生物ポンプによって海洋に固定される有機炭素量を見積もることを目的として、鉄と植物プランクトンの増殖に主眼を置いて、海洋生態系内の生物学的な炭素循環について研究を進めている。

海洋において鉄濃度は極めて微量であり、容易に汚染を受ける。当所では先ず、海水中の極微量な鉄濃度を測定し低濃度環境を維持しながら実験をおこなうためのクリーン技術を開発して研究を進めてきた。研究の対象を夏季の東部北太平洋亜寒帯域とし、当該海域の海洋プランクトン生態系の特徴を明らかにするため、船上培養実験により鉄を人為的に供給した場合の海洋プランクトン生態系の応答を調べ、生態系構造の変化について解析を

試みた。その結果、鉄が不足している現場の生態系では、小型の植物プランクトンが優占し、固定された炭素は海洋表層で分解してしまう再生生産型（図2-2-1A）と呼ばれるプランクトン生態系が優占することが明らかとなった。一方、鉄の供給はおもに大型植物プランクトンの増殖を促進し、固定された炭素は沈降粒子となって中・深層に運ばれる新生産型と呼ばれるものになることが明らかになった（図2-2-1B）。

また、鉄を供給した際の海洋プランクトン生態系における有機炭素沈降量を見積もるために、海洋プランクトン生態系をビニールバッグで隔離して系内の物質循環の観測を行う閉鎖生態系（メソコスム）実験（図2-2-2）を実施した。この結果、植物プランクトンの増殖（ブルーム）期における栄養塩・炭素・各生物量等の化学的・生物学的な物質のフローを、生物間の相互作用を含めて定量的に解析することに成功した。

生物ポンプによって海洋の中・深層に沈降していく有機炭素を定量的に評価するために、モデルを利用したシミュレーションを行うことは一つの有効な手段である。当所では、東部北太平洋亜寒帯域に鉄が供給された場合に起こる、中・深層に運ばれる有機炭素の変化を定量的に表すことを目的として、海洋プランクトン生態系モデルを構築した。モデルの構築には、前記した実験で得られた海洋生態系の構造変化についての定性的な知見と、生態系内の物質間の定量的な解析結

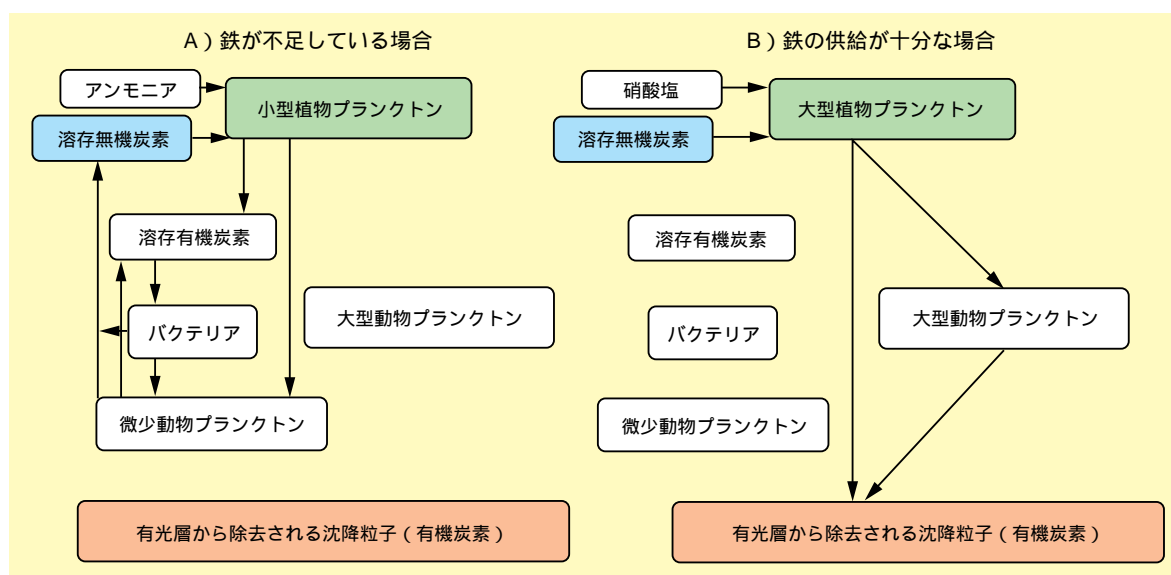


図2-2-1 東部北太平洋亜寒帯域の海洋プランクトン生態系の特徴



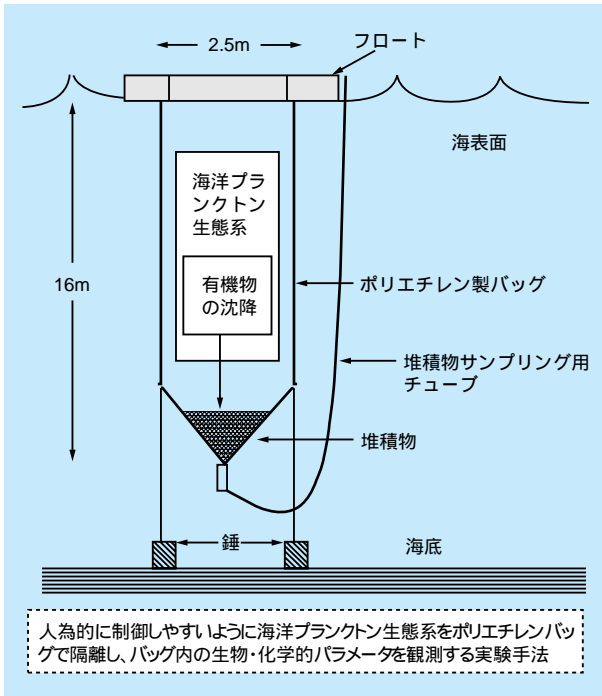


図2-2-2 閉鎖生態系実験（メスコスム実験）概要図

果を利用した。当所の海洋生態系モデルでは、光と栄養塩濃度に加えて、鉄濃度と植物プランクトン増殖の関係を表す式を組み込んで、鉄に対する植物プランクトンの増殖応答を表している。モデルの概念図を図2-2-3に示す。

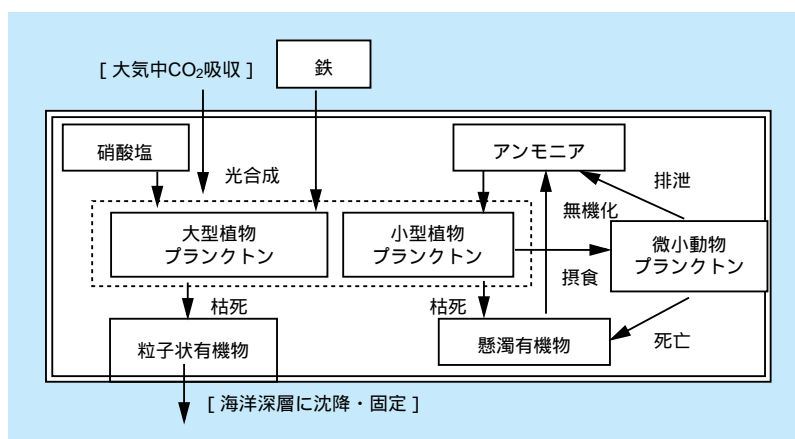


図2-2-3 鉄供給を組み込んだ東部北太平洋亜寒帯域の海洋プランクトン生態系モデル概念図

## 2-2-5 生物ポンプの定量的な評価を目指して

本研究はこれまで東部北太平洋亜寒帯域を中心に進められてきた。しかし、実際の海洋では海域によって物理、生物、化学的環境が大きく異なるため、微量栄養物質である鉄の役割も大きく違ってくる可能性がある。特に北太平洋亜寒帯域では、黄砂などのダストとして大気から海洋表層へ供給される鉄のフラックスの東西における差が、東西海域の生態系構造および生物による深海への炭素移送量の違いを生み出す要因になっていると考えられている。現在われわれは、北太平洋亜寒帯域を対象を広げ微量栄養物質である鉄の役割を評価するため、東西海域の鉄供給に対する生物の応答の違いと、生物学的炭素等の循環・移送機構に関するデータを集めている。また国際共同プロジェクトとして、北太平洋における鉄散布実験が平成13年度より立ち上げられている。当所もこのプロジェクトに参加し、科学的知見を集める立場でデータの収集を行っている。今後は、これらのデータをもとにモデルの高度化を行い、より正確に生物ポンプによって海洋の中・深層に運ばれる有機炭素量を見積もることにより、地球規模の炭素循環に果たす海洋プランクトン生態系の役割を定量的に評価することを目指す。

## 2 - 3 ま と め

本章では、温暖化の原因となる温室効果ガスの観測に関して、2つの研究成果を紹介した。以下に補足説明を行うとともに、今後の課題を整理する。

### 地球全体の炭素収支

化石燃料の燃焼やセメント製造によって発生するCO<sub>2</sub>は、図2-3-1の地球全体の炭素収支に示したように、海洋や森林がそれぞれ約1/4を吸収し、残りの約1/2が大気中濃度として残存する。しかし、これらはマクロ的な評価であって、森林や海洋の吸収量を正確に推定するため、世界中で研究が進められている。本章では、大気中のCO<sub>2</sub>濃度の観測に関しては、メタン等の温室効果ガス観測とあわせて2-1節で紹介した。海洋のCO<sub>2</sub>吸収については、2-2節で述べているが、森林によるCO<sub>2</sub>吸収については、4-5節の中で、CO<sub>2</sub>の固定化方法の一つという視点から紹介しているので、そちらを参照されたい。

### 温暖化効果ポテンシャルGWP

京都議定書で削減対象となる温室効果ガスは、CO<sub>2</sub>、メタン等6種類である(表1-1-1参照)。大気中に放出されたこれらガスの残存時間や温室効果の程度は様々である。そのため、CO<sub>2</sub>を基準とした相対的な尺度として温暖化効果ポテンシャルGWP(Global Warming Potential)という尺度が用いられている。例えば、メタンの大気中残存期間は平均12年程度で、その後は減少し、CO<sub>2</sub>の残存期間約100年に比べて相対的に短い。したがって、排

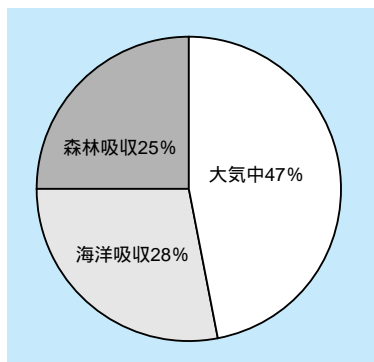


図2-3-1 排出されたCO<sub>2</sub>の地球全体の収支バランス (IPCC第二次評価書(1995年)より)

出後20年間の期間で比較すると、メタンの温暖化効果ポテンシャルGWPは56となり、CO<sub>2</sub>に比べて56倍も温室効果が大きい。しかし、100年では21倍に低下する。

メタンは、水田や牛のゲップが主な発生源とされているが、大気中濃度分布には不明な点が多い。2-1節で紹介したように、人工衛星観測によってメタンの全球分布が明らかになったが、十分にデータを蓄積する前に、衛星が故障してしまったことは残念なことである。再度の挑戦が待たれるところである。

### 気候モデル中の温室効果ガスの取り扱い

IPCCの第二次評価書(1995年)までは、各種の温室効果ガスは温暖化効果ポテンシャルGWPを用いてCO<sub>2</sub>濃度に換算され、大気中に一様に分布するCO<sub>2</sub>とみなされていた。その換算された総CO<sub>2</sub>濃度に対して、気候モデル(大気・海洋結合モデル)を用いて温暖化が予測されていた。しかし、大気中に排出された硫酸化物SO<sub>2</sub>が寒冷化効果を持つことへの関心が高まってきた。このため、第二次評価書以降の結合モデルでは、メタン等の各種の温室効果ガスの大気中濃度分布をあらかじめ予測し、それらを加算した上で温暖化を予測するという、複雑かつ高度な取り扱いを行うモデルが現れてきた。3-1節で紹介する米国NCARの結合モデルCSMは、そうした高度なモデルの一つである。

### 気候変化とCO<sub>2</sub>吸収の相互作用

温暖化が進んで南半球の降水量が増えると、海水の塩分が薄くなることから成層化が進み、海洋表層での鉛直混合が生じ難くなる可能性がある。その結果、表層の植物プランクトンへの栄養塩の供給が不足し、海洋のCO<sub>2</sub>吸収が減少することが考えられる。これにより、大気中CO<sub>2</sub>濃度が一層増加し、温暖化が加速するという予測がある。これはいわゆるポジティブ・フィードバックといわれる現象の一つで、現状では科学的な仮説の一つと言ってよい。当所では、NCARと共同で、大気・海洋結合モデルに炭素循環モデルを組み込んだモデルの開発に取り組む予定であり、これにより気候とCO<sub>2</sub>吸収のフィードバックの解明が進むものと期待される。