

海洋の炭素循環における地球環境観測衛星の役割

- GCMAPS プログラム その1 -

川幡 穂高¹⁾・浅沼 市男²⁾・粟屋 善雄³⁾

1. はじめに

地球的規模の環境変化に関する問題は、人類の当面の最重要課題となっており、温暖化に関する政府間パネル(IPCC)は、温暖化が気候変化をもたらし、地球環境へ様々な影響を与えることを指摘してきた。この地球温暖化は、気温の上昇を通じて、海水準の上昇、気候の変化、生態系の変化等様々な分野に深刻な影響を及ぼすと危惧されている。特に、温暖化の原因物質のうち最も重要な二酸化炭素に関しては、人類活動に伴う二酸化炭素の放出について、その排出規制の問題が真剣に議論されるなど、生活習慣や産業基盤への大幅な変更が近い将来要請される可能性が高い。

これまで全球規模での炭素循環リザーバーについて収支計算が行われてきたが、いずれも断片的な研究成果を基にしたもので、必ずしも確固とした科学的根拠があるわけではなく、海・陸域も含めた収支の整合性や面的な精度に大きな問題があった。しかも、これまでの方法では、季節・年変動を含めた時系列データの把握は困難であり、プロセス研究の成果との整合性も不十分で、海陸を併せた一次生産(基礎生産)のグローバルマッピングさえ行われてこなかった。そこで、炭素循環に関する高精度のプロセス研究とそれをグローバルスケールに展開したマッピングが強く求められることとなり、科学技術振興調整費「炭素循環に関するグローバルマッピングとその高度化に関する国際共同研究(GCMAPS プログラム, Global Carbon cycle and related Mapping based on Satellite imagery)」が

平成10年4月より開始された。

このプログラムでは、従来の船を用いた海洋観測とともに、将来大きく発展すると思われる衛星を海洋観測のプラットフォームとして扱っているところに大きな特徴がある。地球環境研究に実質貢献できる衛星データについては、現在のところまだ水温などに限られているが、21世紀初頭にはさまざまなパラメーターをプロットした全球地球環境図が作られると予想される。その最大の理由は、2年程前から飛躍的に性能が向上したセンサーを搭載した衛星が日本、アメリカ合衆国、ヨーロッパから次々に打ち上げられ始めているからである。衛星データの利用についても、衛星関係者に限定されていたものから、将来は衛星に直接関係のない研究者が自分の海洋研究のために衛星データにアクセスするような、新たな発展が予想される。

この小論では、炭素循環に関連して衛星データを使う意義、各種のセンサーの特徴、そしてそのデータを意味あるように使うためのヴァリデーション(検証)について概略をまとめる。

2. 温暖化研究において、なぜ生物生産の測定が必要か?

海洋表層で生物によって固定される炭素量は基礎生産(あるいは一次生産, Primary production)と呼ばれ、この炭素量は現在の海洋で1年当り22~45 Gt (109t) と推定されている(Sundquist, 1985)。この量は化石燃料の燃焼で放出される二酸化炭素に含まれる炭素量の約3~7倍にも達し

1) 地質調査所 海洋地質部
2) 海洋科学技術センター
〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町2-15
3) 農林水産省林野庁森林総合研究所
〒305-8687 茨城県稲敷郡笠崎町松の里1

キーワード: 炭素循環, 地球環境観測衛星, グローバルマッピング,
気候変動

ている (Koblentz-Mishke *et al.*, 1970; Eppley, 1989). そこで, 生物による炭素の固定量をおさえることは非常に重要である.

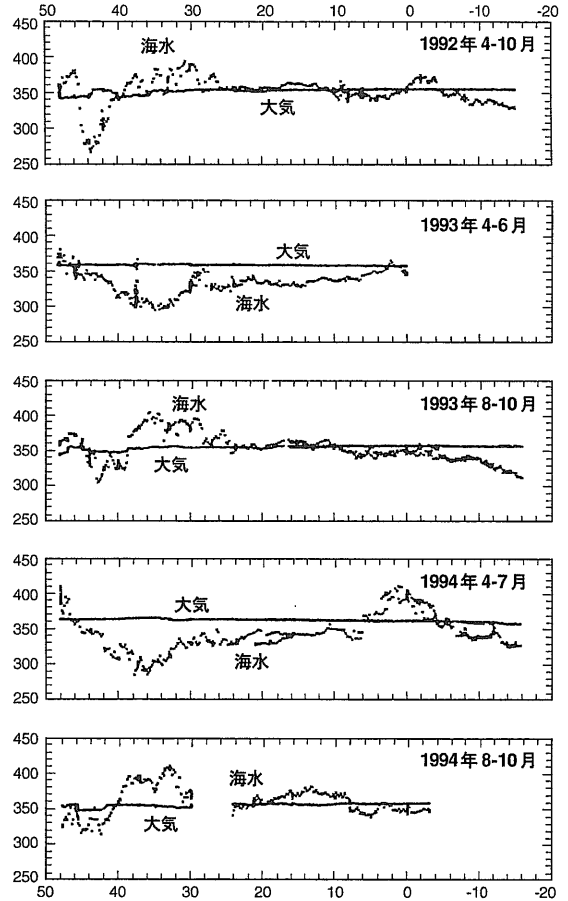
IPCCの1997年の報告によると, 地球表層で発生する二酸化炭素は年間 7.1 ± 1.1 Gt Cで, 大気中に残存する炭素量は, 年間 3.2 ± 0.2 Gt Cである. 残りの約3.9 Gt Cのうちの 2.0 ± 0.8 Gt Cは海洋に吸収され 0.5 ± 0.5 Gt Cは北半球森林生態系により吸収されるが, 残りの約1.4 Gt Cは現時点ではどこで吸収されているのかよくわかっていない. この量は全体 (7.1 Gt C) の実に20%にも達している. このような大きな食い違いが依然として残っている事実は, 現在の炭素循環のフラックス (流量) 研究で, 全球の問題の取り扱いに未だ決定的な方法を見い出せていないという事を意味している. その原因の一つは, 炭素循環の研究といっても「海」と「陸」との間で, 手法の違いがあったり, 各々の研究項目ごとに学問の発展段階が異なり, それによって誤差にも違いがあるのである.

一方, 「海」と「陸」両方に共通するような問題点も多数存在している. 例えば「海」の場合には以下のようなになる.

これまで私達は全球的な問題を扱うのが不得手であった. それは面的観測に端的に表れている. これまでの船による観測では, 通常停船し, 採水して海水の分析を行ってきた. その分析精度は有効数字4桁にのぼる程高いものもある. また, 停船せず, 航走中の海水中の二酸化炭素分圧の測定などでも有効数字は3桁位保証されている. しかしながら, 停船測点は点の観測, 航走観測でも線の観測であってこれを面に拡大する際には, 単純に面積をかける程度で, 大きな誤差が生じていた.

衛星画像から計算された太平洋赤道域での基礎生産の図 (口絵参照) では, 暖水プールと赤道湧昇の物理構造の異なる海水の分布に対して, それ以上の不均一性が存在している事がわかる. まして, 全球の基礎生産を求める際に, 実際のクロロフィル量の観測値に表面のクロロフィル量に対応する基礎生産力を乗ずる方法では, 有効数字がせいぜい1桁位になってしまい, どれだけ妥当な推定値がえられるのかについては疑問が残る.

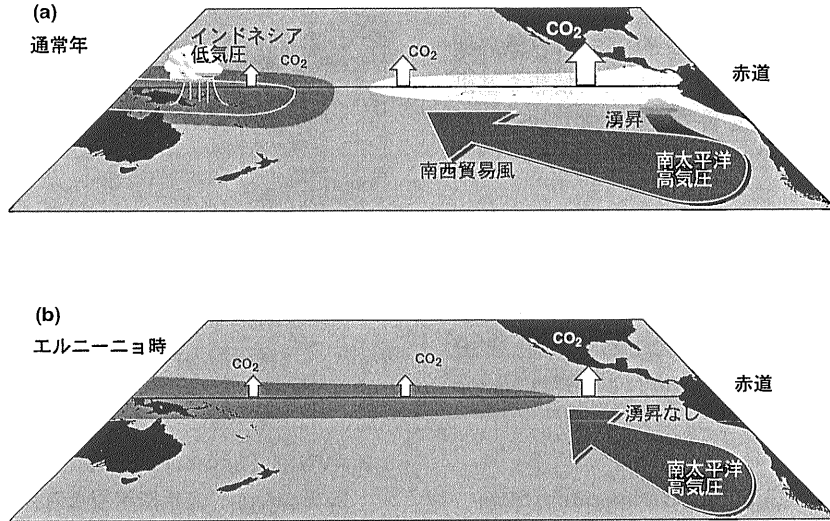
第二の問題は, 時系列データに関するものである. これには, 対象とする時間の長さによって異な



第1図 東経175度線での大気及び表層海水中の二酸化炭素フィガシティー (μ atm) の緯度分布 (原田ほか, 1996). 横軸は緯度 (北緯が正), 大気中の二酸化炭素フィガシティー (μ atm) を実線で, 表面海水中のフィガシティー (μ atm) を点で示した.

ってくる. 例えば, 日周変動, 季節変動, 年変動, 10年単位の長期変動などがあげられる. 第1図に東経175度ライン上での海水の二酸化炭素分圧の季節あるいは年変動を示すが, 季節が異なれば二酸化炭素分圧のプロファイルも当然大きく異なるのはもちろんのこと, 同じ季節であっても年ごとに変動していることがわかる.

数年単位の時間スケールでは, エルニーニョ・南方振動などによる影響が挙げられる (例: 川幡・鈴木, 1999; 鈴木・川幡, 1998; 鈴木ほか, 1999). この周期的気候・海洋環境変動では, 赤道太平洋の海洋表層構造が, 西側と東側で大きく異なることが知られている (第2図). エルニーニョ現象は東部赤道



第2図 エルニーニョ・南方振動の (a) 通常年と (b) エルニーニョ時の赤道太平洋での海洋表層環境の概要。白色の線は水温が28℃より高いことを示す。

太平洋域一帯の海面水温が数年周期で異常に高くなる現象を指している。南方振動は東部インド洋からインドネシアにかけての地域と東部南太平洋域との間で、地上気圧が逆位相で変動する大規模な東西方向の振動を表している。これを対流圏全体の現象としてみると、インドネシア付近の対流活動による上昇流と、冷たい東部南太平洋上での下降流をつなぐ東西循環の強弱の変動としてとらえることができる。

通常の赤道太平洋の表層水温は、東部で25℃以下と低温であるのに対して、西部では28℃以上と高温で、この高温水は西太平洋暖水塊 (Western Pacific Warm Pool; WPWP) と呼ばれており、地球上で最も水温の高い水塊となっている。もし、この西太平洋暖水塊を28℃を越える表層水温をもつ水塊と定義すると、その分布範囲は西太平洋にとどまらず、東インド洋にまでまたがる東経100度～170度、北緯10度～南緯10度とかなり広い海域となっている (Webster, and Yang, 1992)。

この暖水塊では温度躍層の深さが最大200mに達するほど表層水が厚くなっている。逆に、東部赤道太平洋では、西向きの貿易風に表層水が吹送されて躍層の下の低温の水塊が湧昇してくるため表層水は低温となっている。表層水温の東西勾配と西向きの貿易風とは、それぞれ対をなして、赤

道太平洋域の大気-海洋結合系の準安定状態を構築している。この状態が崩れ、暖水塊が東方に移動し、多雨域も暖水塊に伴って中部太平洋域に移動し、赤道太平洋全域にわたり表層水温が上昇する現象が一般にエルニーニョと呼ばれるもので、ENSOの「温暖期」(Warm Episode) に対応している (第2図)。また、逆に東部太平洋域で水温が顕著に低下する状態はラニーニャと呼ばれており、ENSOの「寒冷期」(Cold Episode) に対応している。今世紀最大級の「温暖期」は1982-83年、1986-1987年、1992年、1997年に発生している。

このエルニーニョ・南方振動については、近年の衛星画像では最高0.1℃という精度で、海水温の変化として精密に把握することができるまできており、エルニーニョに伴った西太平洋暖水塊が東に移動していることが明瞭に観察できる。現在全球の表層水温については、毎月の画像がインターネットでみることができる。一方、他のパラメーター、例えば、クロロフィル量、一次生産量、風向、風速についてはそこまで到達していないが、前述したように新しい衛星で観測が開始されているので近い将来、これらの全球情報も時系列で得られることになるであろう。

21世紀初頭の海洋研究では、例えば、春の観測データといっても、低緯度域であればエルニーニ

ヨ・南方振動の影響をまともに受けるので、どのような春の観測なのか、あるいはどのような状態の期間を繫留観測でとらえたのか、といった情報を基礎として物理量や化学量を併せて解釈していく時代に入ると考えられる(第3図)。

3. 最近の衛星と新世代センサー

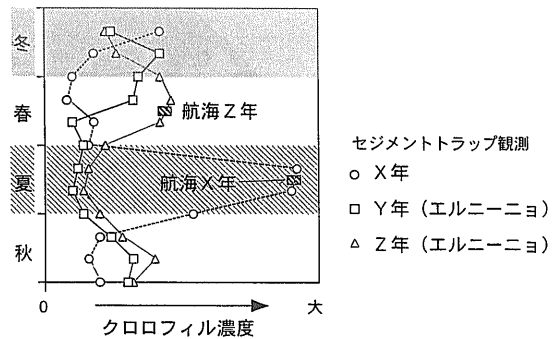
日本が開発した地球観測プラットフォーム技術衛星に搭載される新世代センサーなどについて、宇宙開発事業団のパンフレットを参考にして概要を紹介する。

3.1 OCTS (Ocean Color and Temperature Scanner; 海色海温走査放射計)

OCTSは1978年に打ち上げられたCZCS (Coastal Zone Color Scanner)の観測ミッションを引き継ぐもので、ADEOS 1 (Advanced Earth Observing Satellite, 地球観測プラットフォーム技術衛星)に搭載された。OCTSは可視近赤外域8バンド、赤外域4バンドの観測波長をもった光学センサーで、地表分解能約700m、幅1,400kmで測定をするため、海洋に比べて不均一性が高い沿岸域及び陸域への適用も考慮されている。これは、海洋の水色及び水温データを高頻度に測定し、クロロフィル濃度、浮遊物、溶存物、及び水温の把握を行うことによって、基礎生産及び炭酸ガスの循環の把握、漁海況情報の把握、環境モニター等に利用された。

3.2 GLI (Global Imager; グローバル・イメージャ)

GLIはADEOS2 (Advanced Earth Observing Satellite, 地球観測プラットフォーム技術衛星)に搭載が予定されているセンサーで、OCTSを発展させたものである。海ばかりでなく陸域も含めた地球表面あるいは雲等からの太陽反射光あるいは赤外放射光を多くの波長で観測することにより、生物に関係したさまざまなパラメーター、すなわち、クロロフィル濃度、有機物、植生、また、温度、雪氷、雲の分布などを高精度で測定し、全球の炭素循環や気候変動を把握するためのデータの取得が予定されている。



第3図 これからの海洋観測データの位置づけを表した模式図。

3.3 AVNIR (Advanced Visible and Near-infrared Radiometer; 高性能可視近赤外放射計)

AVNIRは、陸域及び沿岸域から反射される可視から近赤外域の太陽光を観測する高分解能の光学センサーで、約16mの空間分解能の4バンドと約8mの空間分解能の1バンドをもっている。AVNIRは、基本的には衛星の上からその直下の約80kmの範囲を細かく分割して観測しており、衛星が地球を周回することにより地球上を広範囲に観測する。AVNIRの観測データは、熱帯林破壊、砂漠化、水質汚染等の現在主要な環境問題として注目されている現象の把握・監視のために使われている。同種のセンサーとしては、LANDSAT (ランドサット) (米国)に搭載されたTM等数種類あるが、AVNIRの特徴には、①約16m及び約8mの高分解能で、②観測領域をクロストラック方向に±40度の広範囲で設定できるポインティング機能を持っており、③沿岸、湖沼等の観測に有益な水色帯(0.4 μm帯)のバンドを持ち、④太陽光、内部光源による高精度の光学的校正機能を持つ。

3.4 NSCAT (NASA Scatterometer; NASA散乱計)

NSCATは特殊なマイクロ波レーダであり、アンテナから地球表面の広い海域にわたって14GHz帯のパルス電波を放射し、同一アンテナで海上からの後方散乱波を受信する。6本ある3mの長さのアンテナは、衛星進行方向の両側の海域を600kmの幅で走査し、2つの観測域の間隔は330kmである。

NSCATは氷に覆われていない全海域の90%の風速と風向を天候に左右されることなく観測でき、2-3日毎に同じ地点のデータをとることができる。

風は局地的な気象と地球規模の気候を決定する重要な要素であるが、現在はそのデータのほとんどを船舶からの報告に頼っている。船舶からの報告は不定期であるうえに精度も不十分であるという欠点がある。海域は地表面の70%を占めており、NSCATのデータは地球の気象を理解したり、予測するのに役立つ。また、風は湧昇などを通じて海洋表層の栄養塩の分布にも影響を与えるので炭素循環にとっても重要である。

3.5 POLDER (Polarization and Directionality of the Earth's Reflectances; 地表反射光観測装置)

POLDER(地表反射光観測装置)は、CNES(フランス国立宇宙研究センター)により開発されたセンサーで、地球表層、エアロゾル、雲、海で反射される太陽光の偏光、方向性及び分光特性を測定する。この測定によって、①雲、エアロゾル、反射の相互作用、また、温室効果ガスが着実に増加している状況における、地球放射の潜在的な影響、②対流圏におけるエアロゾルの循環、③全球的な炭素循環の解明、の研究に役立つと考えられている。

3.6 TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer; オゾン全量分光計)

TOMSは、NASAのGSFS(ゴダード宇宙飛行センター)が開発したセンサーで、すでにNimbus(ニンバス)7等の衛星に搭載され、極域のオゾン層の

観測を行ってきた。

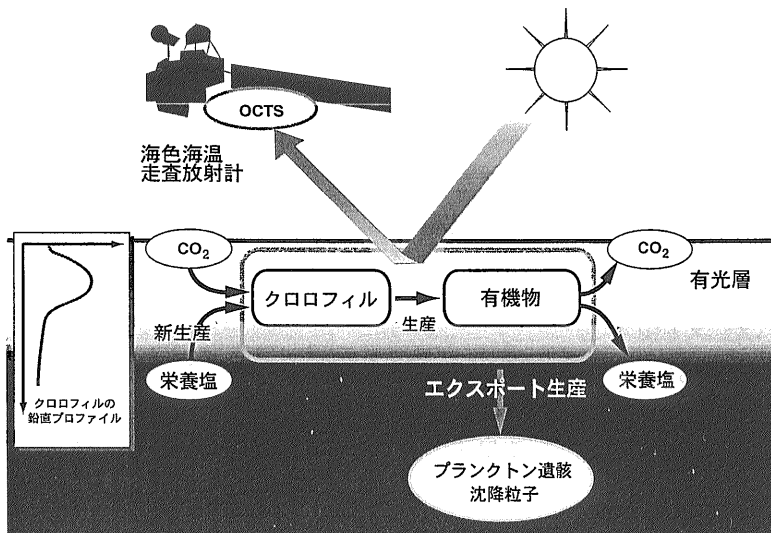
TOMSは、高分解能でオゾンの総量を計測し、生物に有害な紫外線の強度を評価することができ、火山の爆発に伴う二酸化炭素イオウの検出を通じて火山の爆発を知ることができる。

4. 衛星データのヴァリデーション(validation) (検証)

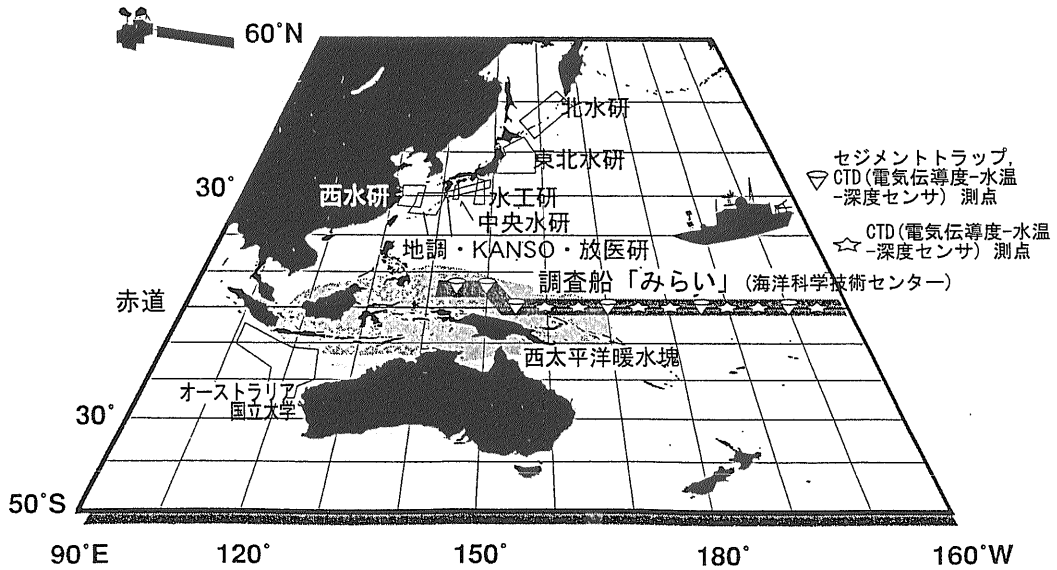
衛星データはあくまでも光に関する情報であるから、この利用に際しては、衛星からえられた情報を海洋情報に変換する作業が必要で、これはヴァリデーションと呼ばれている。ここでは、海洋の基礎生産について実例を簡単に述べる。

水色に関する衛星データからクロロフィル量を推定するためには、衛星レベルのセンサーへ到達する全分光輝度値について、大気による散乱、吸収を除去するための大気補正アルゴリズムを適用し、海面直上の分光輝度を求める。それを、海域ごとに求められた水中アルゴリズムを用いて、海面直上での分光輝度値から水中のクロロフィル量を推定する。

各々のステップでは、①衛星センサーも他の観測機器と同様にその特性値は時間及び条件とともに変化するので、その較正が必要となる。そして、②大気補正については、大気中のエアロゾルを含む散乱、吸収媒体の種類と量を正確に評価するこ



第4図
クロロフィル量と基礎生産力のヴァリデーションの模式図。通常、クロロフィル量は深度によって変化が見られる。一次生産は、クロロフィル量、光度、栄養塩によって支配されているので、これらの因子の水深方向の変化を求める必要がある。合成された有機物の一部が沈降粒子となって下方に除去される。



第5図 日本列島周辺海域及び赤道太平洋で調査船でのクロロフィル-aのデータを測定し、クロロフィル-aの表層での濃度と深度方向での変化の関係を明らかにして、アルゴリズムを発展させ、SeaWiFSやOCTS (GL1)などの衛星データのヴァリデーション(検証)を行う海域。赤道上では、海洋科学技術センター所属の海洋地球研究船「みらい」を使用してさまざまな海洋観測が実施される。ヴァリデーションの結果、これらの海域に適用できる精度の高いアルゴリズムが開発され、衛星データから毎月の基礎生産が推定される。一方、赤道域の東経135度から西経170度の範囲で、水中には6つの繫留系が設置されセジメントトラップ観測が行われる。空と海中から海洋表層の状況をモニターし、エルニーニョ・南方振動に呼応する海洋の炭素循環の変動の仕組みが解明されると期待される。

とが大切である。次に、③水中については、クロロフィル量の水柱での分布は海域、あるいは季節ごとに異なっているため、実際にどのような分布になっているのかを調査しておく必要がある。例えば、高緯度域での秋から冬にかけては表層付近にも高濃度のクロロフィルが観察されるが、亜熱帯ジャイアと呼ばれる外洋域の中緯度域ではクロロフィル濃度も低くなり、深層極大が形成される場合が多い。

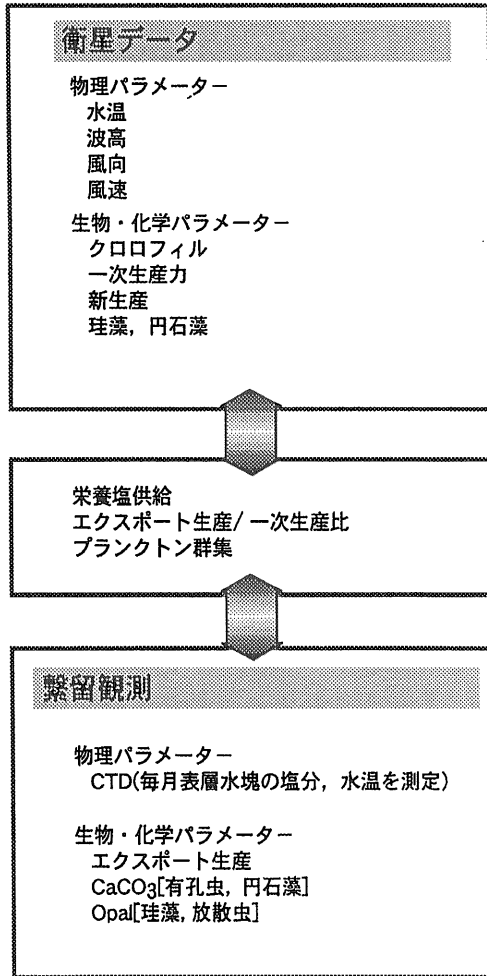
さて、一次生産のヴァリデーションの場合には、衛星データがとられた時に実海域で一次生産を測定し、両者を比較する必要がある。特に、一次生産は、クロロフィル量、光量、栄養塩、水温によって支配されているので、クロロフィル量のみを衛星データから推定するよりははるかにいろいろな因子がはいってくるので複雑になる(第4図)。さらに、クロロフィル量の単位重量(例えば、1g)あたりの基礎生産力は一定ではなく、深度や栄養塩の状況によって変化することが知られているので、十分な解析が必要である。このようにして、ある海域ごとの

衛星データから海洋情報を推定するアルゴリズムを作成して、全球的なものへと発展していくことになる。第5図に示したものは、GCMAPSプログラムで予定されている西太平洋域でのヴァリデーション海域である。

2、3年後の近い将来には、クロロフィル量、一次生産などの生物活動に関連したパラメーターが、エルニーニョ・南方振動などの気候変動によってどのように変わっていくのかを解析できるだろう。これによって、エルニーニョ・南方振動が太平洋の赤道域のみならず、インド洋の低緯度域、あるいは太平洋の中高緯度域の炭素循環ともリンクしていることが明らかになるだろう。

5. 衛星と繫留系を用いて海洋表層のモニタリング

衛星データが得意とするところは、物理量の測定を面的そして時系列的にとれることである。大気中の二酸化炭素濃度など化学量の測定は多少苦



第6図 衛星と繫留系を組み合わせた空と水中からの海洋表層のモニタリングを表す模式図。衛星からは面的な情報が得られるとともに地球観測プラットフォーム技術衛星は約3日に1度同じ場所を通過するので、晴れていればその都度クロロフィル量、基礎生産量に関するデータを取得できるため、時系列データの取得が可能である。一方、繫留系は定点観測であるものの、約2週間の解像度で沈降粒子を1年間にわたって採取することができる。リモートセンシングではわからない粒子状物質の化学組成、鉱物組成、生物群集などの情報を解析することにより、海洋表層のより詳細な環境変動をとらえることができる。

手である。炭素循環研究は地球表層の物質循環研究の中で最も進んでいるので、衛星データから多少補正をほどこして求めた海水中の二酸化炭素分圧値では誤差が大きくて研究者の間ではほとんど

役に立たない。そこで、どうにかして物質量を時系列でとることが必要となってくる。海洋生物の活動をトレースするにはセジメントトラップ観測が有用である。セジメントトラップは、繫留系にとりつけられて自動的に観測を続けるが、約2週間毎の解像度で1年間にわたって沈降粒子を採取することができる。もちろん、繫留するわけであるから定点観測であるが、一度沈降粒子の試料が手に入れば、第6図に示したようにエクスポート生産量、炭酸カルシウム殻を作る有孔虫・円石藻の群集組成、生物起源オパール殻を作る珪藻・放射虫の群集組成、有機化合物組成、炭素同位体比、窒素同位体比、粘土鉱物組成などの分析が行われ、海洋環境が特定されたり、海洋表層の炭素循環のプロセスが解明されたりする。繫留系の最上部には、このプログラムで開発した自動的に上下するCTD(電気伝導度-水温-深度センサー; Conductivity, Temperature Depth Sensor)装置がとりつけられており、厚さ300mの水柱の水温、塩分を年に数回測定する。これにより、観測船がでかけていけない間も衛星画像との対比が可能となる。

衛星は、現在のところ、水温、波高、風向、風速などの物理パラメーターやクロロフィル量などのデータを供給しているが、将来は特定のスペクトルを組み合わせて珪藻や円石藻の活動などをトレースできる可能性をもっている。

6. GCMAPS プログラムと国際共同研究

GCMAPSプログラムは全球を対象として研究するとともに、精査域での精密なプロセス研究を併せて行うために、外国の研究機関と共同して研究を実施してきている。国際的なプログラムとの関係では、IGBP(International Geosphere-Biosphere Programme; 地球圏-生物圏国際共同研究計画)-JGOFS(Joint Global Ocean Flux Study; 共同地球規模海洋フラックス研究計画), PAGES(Past Global Changes; 地球環境変動), TEMA(Global Change Impacts on Terrestrial Ecosystems in Monsoon Asia; モンスーンアジア陸域生態系における地球変化のインパクト), DIS(Data and Information Systems; データ及び情報システム)への貢献も期待されている。また、二国間では、海

洋ではオーストラリアと、陸では中国、タイなどと調査を共同で実施してきており、現地での観測も軌道にのってきている。

謝辞：本稿は、科学技術振興調整費「炭素循環に関するグローバルマッピングとその高度化に関する国際共同研究」の内容の一部を紹介するものである。本稿の図はすべて永好けい子さんに描いていただいた。また、石井武政博士に査読していただき感謝いたします。

引用文献

- Eppley, R.W. (1989) : New production: history, methods, problem. In *Productivity of the ocean: present and past*. eds. Berger, W.H., Smetacek, V.S. and Wefer, G., John Wiley & Sons (Chichester, U.K.), p.85-97.
- 原田 晃・村山昌平・後藤浩一 (1996) : 北太平洋東経175線で観測された表層海水中二酸化炭素の変動. *月刊海洋*, 28, p.472-475.
- 川幡穂高・鈴木 淳 (1999) : サンゴ年輪を用いた高時間解像の環境解析 - アジアモンスーン, ENSOに伴う海洋表層環境の復元 -. *海の研究*, 141, p.141-156.
- Koblentz-Mishke, O.J., Volkovinsky, V.V. and Kabanova, J.G. (1970) : Plankton primary production of the world ocean. In: Wooster, W.S. (eds.), *Scientific Exploration of the South Pacific*, National Academy of Sciences, Washington DC., p.183-193.
- 鈴木 淳・川幡穂高 (1998) : 特集「炭酸塩生物殻を用いた高分解能海洋環境復元」にあたって. *地質ニュース*, 527, p.6.
- 鈴木 淳・谷本陽一・川幡穂高 (1999) : サンゴ骨格を用いた古海洋学的情報の復元. *地球化学*, 33, p.23-44.
- Sundquist, E.T. (1985) : Geological perspective on carbon dioxide and the carbon cycle. In *Natural Variation in Carbon Dioxide and the Carbon Cycle, Archean to Present*, Geophys. Monogr. Ser., 32, eds. Sundquist, E.T. and Broecker, W.S., p.5-59, AGU, Washington, D.C.
- Webster, P. J. and Yang, S. (1992) : Monsoon and ENSO: Selectively interactive systems. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 118, p.877-926.

KAWAHATA Hodaka, ASANUMA Ichio and AWAYA Yoshio (2000) : Contribution by Advanced Earth Observing Satellite to the study on global carbon cycle in the ocean. - GCMAPS program, part 1 -.

< 受付:1999年7月30日 >