

# 海洋における炭素循環 ーグローバルマッピングから気候変動研究へー

川幡 穂高

(独立行政法人 産業技術総合研究所・東北大学大学院 理学研究科)

## 摘 要

地球環境問題がクローズアップされているが、人類は地球全体を精度よく評価する手段をこれまでもたなかった。新世代センサを搭載した地球観測衛星は表面のみではあっても、地球全体を見渡すという優れた能力を有する。また、この衛星による観測は繰り返し実施することが可能なので、時系列のデータをとることによって、時間とともに変化する地球の様子を把握することもできる。地球温暖化では、炭素化合物の中でも重要な二酸化炭素が温室効果を有し、地球表層のエネルギーバランスに影響を与えている。また、炭素は生物の体を構成する最も重要な元素なので、地球表層の物質循環にとっても大きな役割を果たしている。そこで、地球温暖化問題に関連した炭素循環の研究では、(1)地球生物化学を対象とした物質循環、(2)気候変動との関連の両側面を絶えず考慮する必要があり、二酸化炭素はこれらをつなぐ鍵物質ということが出来る。「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」プログラムでは、プロセス研究およびヴァリデーションを基に地球的規模での一次生産図を完成させるとともに、周期的気候変動として注目されているエルニーニョ・南方振動に海洋の炭素循環がどのように呼応しているのかについて明らかにした。

**キーワード：**一次生産、エルニーニョ・南方振動、気候変動、グローバルマッピング、炭素循環

## 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、気候変動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<sup>1)</sup>。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。

地球温暖化では、大気中の二酸化炭素濃度の増加が温室効果をまねき、地球表層のエネルギーバランスに影響を与えるとされている。炭素は、生物の体を構成する最も重要な元素で、地球表層の物質循環にとっても大きな役割を果たしている。そこで、地球温暖化問題に関連した炭素循環の研究では、地球生物化学を対象とした物質循環と気候変動との関連という両側面を絶えず考慮する必

要がある(図1)。

これまで、全球規模での炭素循環リザーバ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、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。この大きな原因は、人類が地球全体を精度よく評価する手段をこれまでもたなかったことにある。しかしながら、1997年にクロロフィル測定などの新世代センサを搭載した地球観測衛星が日本から打ち上げられ、表層のみではあっても一次生産を推定できるようなパラメータが地球的規模で取得できるようになってきた。そこで、炭素循環に関するプロセス研究と一次生産の地球的規模でのマッピングを目的として、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月から5年間にわたり実施された。なお、プロセス研究を地球的規模で展開するのは困難があるので、西赤道太平洋に精査海域を設定して研究を行った。本論では、研究の背景や結果の概要について述べることにする。

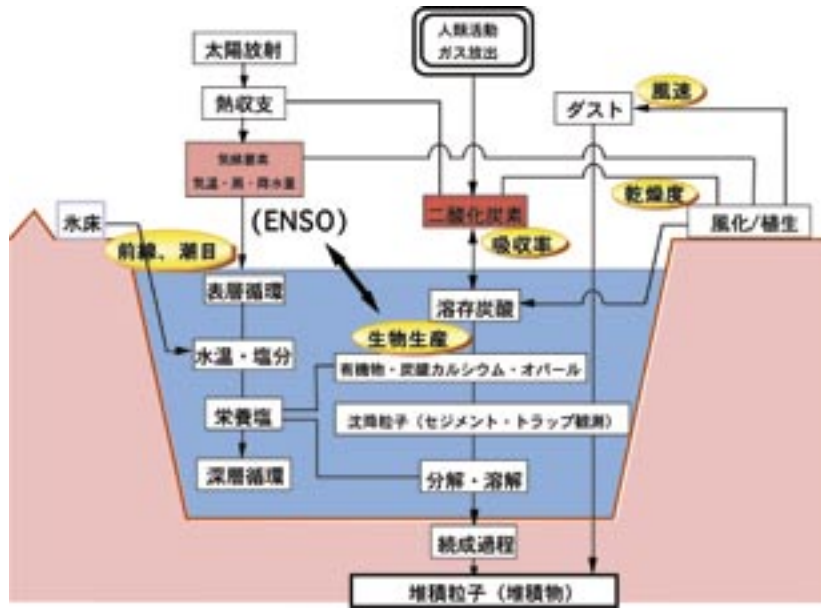


図1 海洋環境の支配因子。気候(エネルギー輸送・水循環)と生物活動も含めた物質循環の模式図。

## 2. 現代の炭素循環の概要

地球表層に炭素が蓄積されている場合は、リザーバー(Reservoir)と呼ばれている。大気に存在している炭素を1とすると、海洋、陸上生物、土壤に存在している量は、約50:1:2となっている<sup>2)</sup>。そこで、海洋リザーバーが少しでも変化すると、その他のリザーバーに大きな変化がもたらされる。

次に、年あたりの炭素の移動量ということについてみると、人為的に化石燃料の燃焼とセメントの生産等で大気へ放出される炭素量の年あたり  $6.3 \pm 0.4 \text{ PgC}$  ( $\text{Pg} = 1 \times 10^{15} \text{ g} = 10 \text{ 億 t}$ )のうち、その半分の  $3.2 \pm 0.4 \text{ PgC yr}^{-1}$  が大気に残存する。先に述べたように、海洋に存在する炭素の総量は大気の50倍なので、新たに大気に放出された炭素のほとんどは海洋に吸収されるはずと考えられるかもしれないが、実際には、短時間で表層水に溶解する量が限られているために、大気にかんりの量が残存してしまう。吸収される炭素の行く先は大気と土壤を含む陸上生態系である。大気中の二酸化炭素と酸素の濃度変化を精密に測定することにより、大気と土壤でほぼ等量ずつ炭素を吸収していると推定されている<sup>1)</sup>。ただし、どの季節にどこで吸収されやすいのかといったことについてはよくわかっていない。

## 3. 温暖化研究において、なぜ一次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  $22 \sim 60 \text{ PgC}$  ( $10^9 \text{ t}$ )程度と推定され、化石燃料の燃焼で放出される炭素量の約3~7倍にも達している<sup>3),4)</sup>。

しかしながら、これらの推定の基となったデータは地域的にも断片的で、かなりの誤差が生じてきた。それは面的観測に端的に表われている。例えば、従来の船による観測では、停船し採水して、海水の分析を行ってきた。その分析精度は溶解無機炭素濃度などのように、有効数字4桁にのぼる程高いものもある。しかしながら、停船観測は点の観測、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、比較的単純に面積を乗ずる程度なので、大きな誤差がもたらされた。

## 4. 衛星データを用いた海の一次生産の推定

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、衛星から得られた情報を海洋情報に変換する作業が必要で、この操作の妥当性を確認するヴァリデーション(検証)が必須である。

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とき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ために、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関係しているので複雑になる(図2)。

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、深度や栄養塩の分布によっても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。

これまでも、衛星データを用いた一次生産力モデルが幾つか提案されてきた。特にBehrenfeld and Falkowski<sup>5)</sup>の深度積分型を用いた、一次生産力の推定モデルは有名である。しかしながら、実際の太平洋赤道海域に適用すると、一次生産力が過少評価される傾向があった。浅沼ほか<sup>6)</sup>の指摘によると、赤道直下の海域ではクロロフィルに関して深層極大層が形成されるのに対して、1層モ

デルでは深度分布依存性を表現することが困難であり、また、炭素同化効率を全球均一として、温度依存性のみが考慮されているので、緯度の差による光合成有効照度の差について十分な検討が行われていない。そこで、浅沼ほか<sup>6)</sup>は、深度方向の光合成有効照度深度分布、クロロフィルa濃度分布、炭素同化効率の時間変化を考えた時間および深度解析型の一次生産力モデルを新たに開発した。日本周辺海域においても、現場海域における一次生産力測定値との比較により一次生産力モデルの検証を行い<sup>7)</sup>、全球の海の一次生産図が月ごとに推定された<sup>6),8),9)</sup>(図3)。

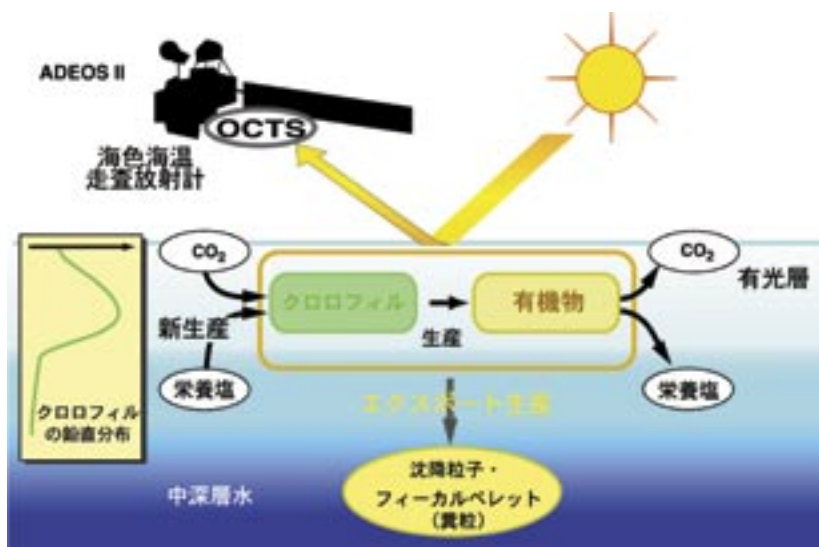


図2 クロロフィル量と基礎生産力のヴァリデーシンの模式図。  
通常、クロロフィル量は深度によって変化が見られる。一次生産は、クロロフィル量、光度、栄養塩によって支配されているので、これらの因子の水深方向の変化を求める必要がある。合成された有機物の一部が沈降粒子となって下方に除去される。

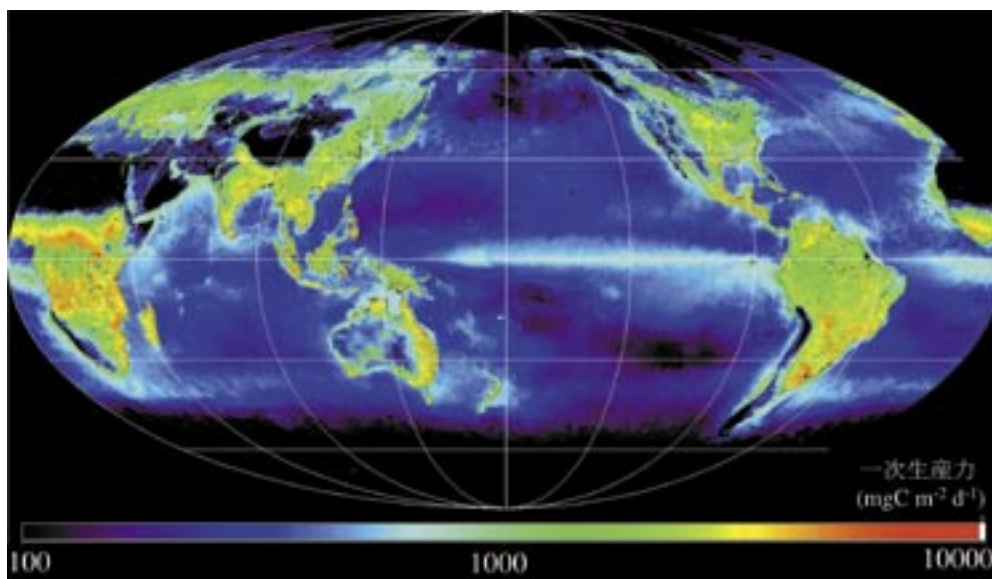


図3 全球一次生産図<sup>6),8),9)</sup>。

### 5. 周期的気候変動と炭素循環

これまで一次生産の推定について述べてきたが、図1にも示したように海洋における炭素循環では、大気から海洋への二酸化炭素の溶解、生物生産、そして、生物遺骸の鉛直下方への輸送などにより、炭素は最終的に海洋深部に移動することになる。

一方、これらの一連のプロセスは気候変動とともに大きく変わることが知られているものの、その知見は非常に限られていた。そこで、気候・海洋変動であるエルニーニョ・南方振動(ENSO)が炭素循環に対してどのような影響を及ぼすのかを調べるために、GCMAPSでは赤道域でプロセス研究を実施した(図4)。なお、ENSOはモデリングなどの結果を総合すると、温暖化した将来の地球環境では、エルニーニョ・南方振動の中の、エルニーニョのフェイズが卓越するだろうと予想されており、これらに対する海洋環境の呼応に関心が集まっている。

#### 5.1 東西方向の水塊の分布

GCMAPSでは海洋地球研究船「みらい」を使用して、赤道にそって東経135度から西経160度の範囲の太平洋で観測を行った。その結果、赤道域の海洋表層は、東西方向で3つの海域に分類することができ、これらはエルニーニョやラニーニャに呼応して緯度方向に大きく移動していた<sup>10)</sup>。

(a) 赤道湧昇域：低温(<28℃)かつ高塩分(>35.0)で特徴づけられる表層水が、観測海域の

中部から東部にかけて分布していた。基本的に東に向かって表面水温とpHが低く、溶存無機炭素濃度が高くなる傾向があるが、これは南赤道海流に乗って西へ移流しながら、大気への二酸化炭素放出と海洋生態系による二酸化炭素消費によって変質しているためと考えられる。しかし、全アルカリ度の変化は時間・空間的にほとんどないことから、生態系による二酸化炭素消費は有機物生産のみに起因し、ハプト藻などによる炭酸カルシウム殻形成の寄与はごく小さいと結論できる。表面水の二酸化炭素分圧は>450 μatmにも達し、二酸化炭素の強い放出域になっている。これは高い溶存無機炭素濃度と高い塩分のためである。栄養塩も高い傾向が見られる。

(b) 西太平洋暖水域東部：西部に広がる最も高温(>30℃)かつ最も低塩分(~34.0)の海域では、溶存無機炭素濃度は極小値、pHは極大値を示す。このため、水温が高いにもかかわらず表面水の二酸化炭素分圧は極小となり、二酸化炭素の弱い吸収域にさえなる。栄養塩も低い傾向がある。

(c) 西太平洋暖水域西部：最も西部に位置する高温(~29.5℃)かつ塩分が中程度(~34.5)の海域では、溶存無機炭素濃度が低く、pHが高いにもかかわらず、二酸化炭素の弱い放出域となっている。この状況は、エルニーニョが発生したときのみ顕著に観測される。

#### 5.2 植物プランクトンの分布

海洋地球研究船「みらい」の観測によると、太

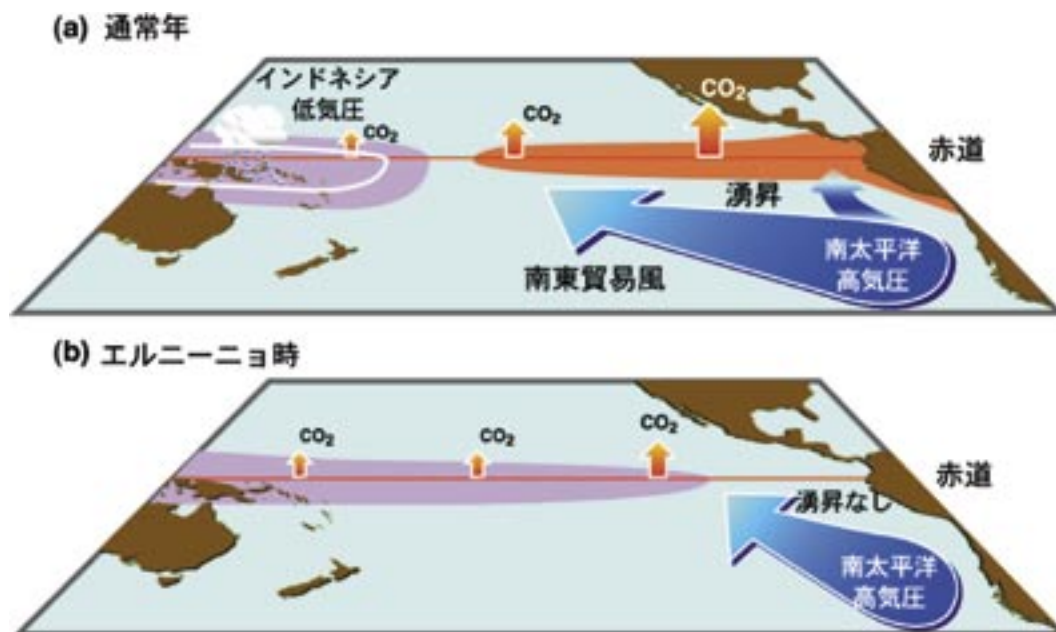


図4 エルニーニョ・南方振動の(a)通常年と(b)エルニーニョ時の赤道太平洋での海洋表層環境の概要。西太平洋暖水域に示された白色の線内は水温が28℃より高いことを示す。



平洋赤道域などの熱帯外洋域では、植物プランクトンの大部分を、ピコ植物プランクトンと呼ばれる、2~3 $\mu\text{m}$ 以下の非常に小さな植物プランクトンが占めていた。ラニーニャ状態であった2001年1月の赤道太平洋の東西断面では、ピコ植物プランクトンの中では、西太平洋暖水塊では原核緑藻類、フロント(境界)域ではらん藻類、赤道湧昇域では真核ピコプランクトンが増殖していた。基本的にそれぞれのピコ植物プランクトングループは、それぞれ最大分布域を違えて生息していることが明らかとなった<sup>11)</sup>。

これらの分布を規制しているのは栄養塩と光である。すなわち、西太平洋暖水塊中では栄養塩が乏しいため、植物プランクトンはほとんど繁殖せず、暖水塊中下部の栄養塩躍層付近で大量に増殖していた。一方、湧昇域では下層から豊富な栄養塩が表層にもたらされるため、十分な光が利用できる表層に多くの植物プランクトンが分布していた。

このような植物プランクトンの量や種類も、気候がエルニーニョ状態であるか、あるいはラニーニャからエルニーニョへと移っていく途中の状態であるかによって、大きく変化することが明らかとなった。

5.3 海洋からの二酸化炭素の放出

Ishii and Inoue<sup>12)</sup>は、赤道域における表面水温の月毎分布、暖水域・湧昇域それぞれの海域における塩分平均値、そして経験式などから、1990年~2000年までの表面水中の溶存無機炭素濃度の時間・空間変動と全アルカリ度の時間・空間変動を評価し、その結果を用いて、表面水の二酸化炭素分圧の時間・空間変動が $\pm 20 \mu\text{atm}$ の誤差で推定された。その結果、太平洋赤道域における二酸化炭素放出量は、エルニーニョになると減

少し、ラニーニャになると増加する傾向があり、0.1~0.9 PgCの範囲で大きく変化していると推定された

5.4 エルニーニョ・南方振動と沈降粒子

赤道域での生物生産の時系列の変動は、セジメントトラップ観測による沈降粒子の研究から解析できる(図5、図6)<sup>13)-16)</sup>。

インドネシア多島海周辺の西太平洋暖水塊では、生物起源物質、アミノ酸、石質成分の粒子束は、エルニーニョ時と比べるとラニーニャ時には減少した。栄養塩の躍層が浅くなるために、エルニーニョ時には粒子束が高くなった。

西太平洋暖水塊中央部の貧栄養海域では、エルニーニョ時、およびラニーニャ時の影響が簡単に識別できる。すなわち、エルニーニョ時には、全粒子束、主要成分、アミノ酸の粒子束が減少していた。

赤道湧昇域では、エルニーニョ時とラニーニャ時の違いが、沈降粒子中の有機物の流量や組成の変化に明らかに反映されていた。東経175度の赤道上の測点のセジメントトラップ観測では、他のパラメータと同様に、全粒子束、生物起源粒子束、アミノ酸粒子束はエルニーニョ時よりラニーニャ時に増加した。赤道湧昇帯では生物起源オパールの寄与が顕著であるが、ラニーニャ時には赤道湧昇帯が西側に移動するので、生物起源オパール粒子束も増加するが、有機炭素の生物ポンプにはほとんど差が認められなかった。

これらの結果が示すように、沈降粒子の全粒子束、炭酸塩粒子束、オパール粒子束、有機物粒子束の変動は、エルニーニョ・南方振動による水塊の移動によって説明できた。しかしながら、有機物の分解の程度を示すベータアラニン、ガンマアミノ酪酸の含有量はラニーニャ時にいずれの海域

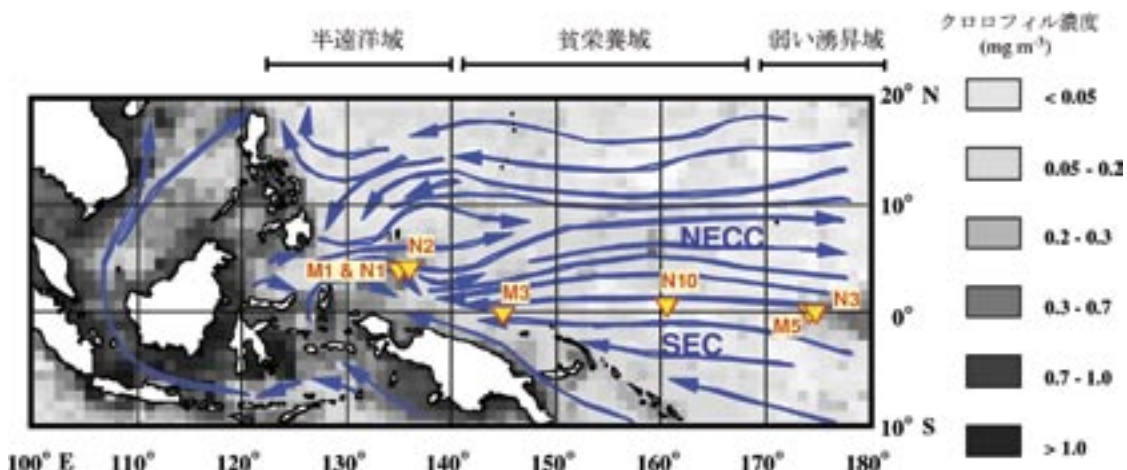


図5 西太平洋暖水塊域の測点(N1, N2, N3, N10, M1, M3, M5)とクロロフィル濃度。

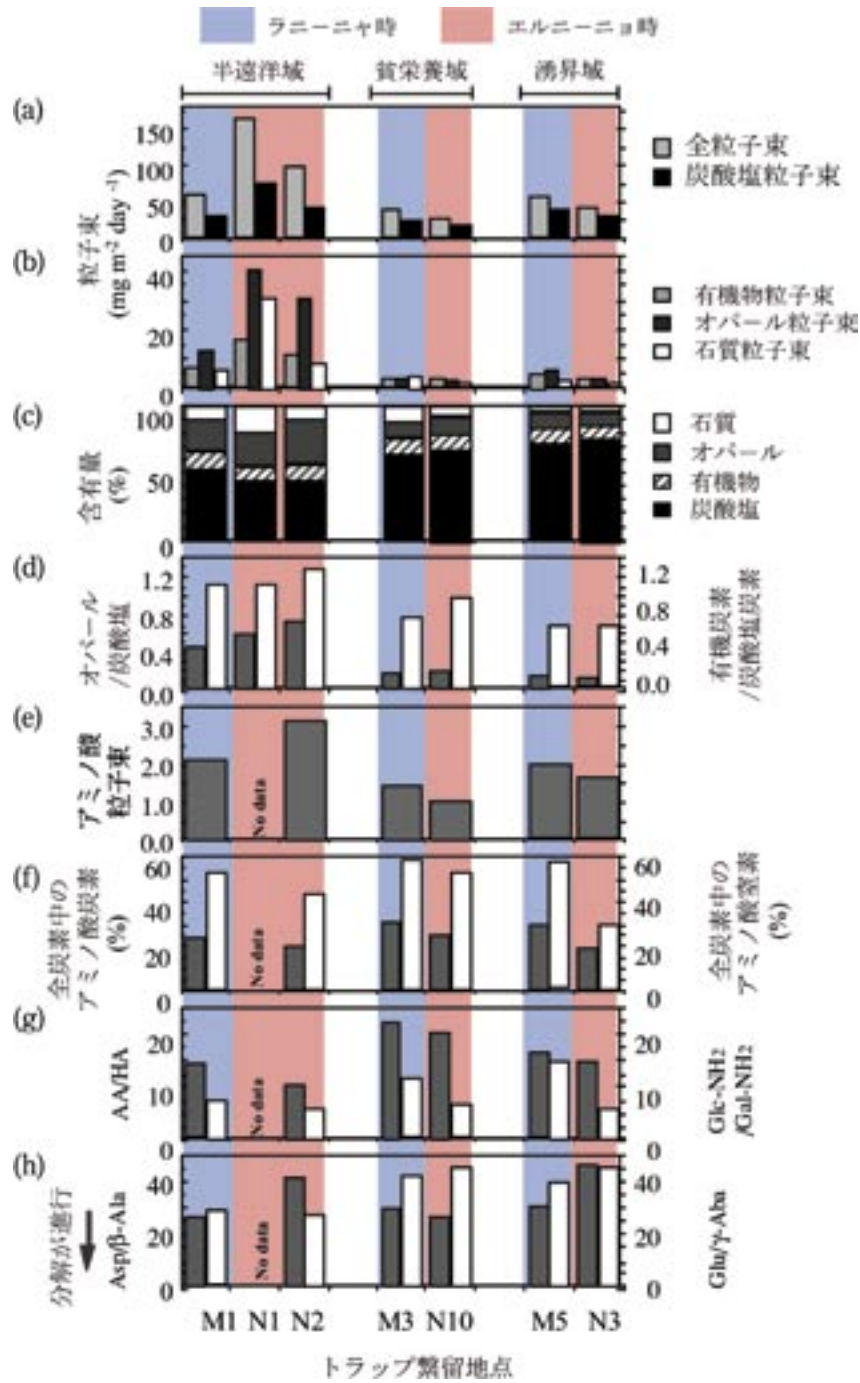


図6 エルニーニョ・南方振動に呼応した西太平洋暖水塊における沈降粒子の挙動<sup>13)-16)</sup>。この中で、測点N1, N2, N3, N10のデータは、エルニーニョ時に、測点M1, M3, M5のデータはラニーニャ時に得られた。  
 全粒子束と炭酸塩 (a), 有機物, 生物起源オパールおよび石質成分 (b)の平均粒子束。これら4成分の相対寄与度 (c)。  
 生物起源生物起源オパール/炭酸塩比 (■) および有機炭素/炭酸塩炭素比 (□) (d)。  
 全アミノ酸粒子束 (e)。  
 アミノ酸炭素/有機炭素比 (THAA-C%) (■) およびアミノ酸窒素/有機窒素比 (THAA-N%) (□)の平均値 (f)。  
 アミノ酸/ヘキサミン比 (AA/HA) (■) とグルコースアミン/ガラクトースアミン比 (Glc-NH<sub>2</sub>/Gal-NH<sub>2</sub>) (□) (g)。  
 アスパラギン酸/ベータアラニン比 (Asp/\_-Ala) (■) とグルタミン酸/ガンマアミノブチリク酸比 (Glu/\_-Aba) (□) (h)。

でも増加し、いまだ理由は不明であるが有機物の分解が全域で進行することがわかった。

## 6. 将来への課題

### 6.1 海洋観測におけるプラットフォーム

衛星観測が得意とするのは、物理量の測定を面的、そして時系列的に行えることである。現在、衛星データから得られる水温記録の最高精度は0.1°Cで、ENSO等の変動によって水塊がどのように移動しているのかが詳しく解析されつつある。一方、クロロフィル量、一次生産、新生産、ダスト量等の化学量の推定については衛星データは多少苦手である。しかしながら、プロセスを理解した高度な検証により、新しいアルゴリズムが作られれば、信頼性の高い地球環境図が作られるはずである。しかも、現在は衛星画像では推定することが難しい珪藻や円石藻の活動なども特定のスペクトルを組み合わせることによって可能になるかもしれない。

衛星画像がもつ面的情報、そして時系列情報という2つの側面は、海洋観測航海などから得られたデータを解釈する際に、最も基礎となるデータを提供することになる。表面水温などは衛星画像からかなり正確な情報が得られるので、海洋観測船を用いた観測は、現場でなければできないより精密な化学分析をしたり、衛星で観測できない中深層の物質循環の研究を行ったりすることに重点が置かれるであろう。このように、海洋観測におけるプラットフォームの充実により、海洋観測の一部は研究というより、将来の地球環境予測へのモニタリングの対象として位置づけられる要素が増加してくるものと予想される。

### 6.2 衛星の時系列データの利用

時系列データは、海洋では繫留観測等により得られる場合が多い。この種の観測を衛星と組み合わせることで、新たな物質循環研究の局面が開かれると期待される。特に、セジメントトラップ等での観測は試料が採取でき、衛星データを通じてトラップの点観測を面に広げることで、これまで難しかった生物ポンプによる炭素除去流量の評価も高い精度で行えるようになるであろう。また、これからの研究では、例えば、春の観測データといっても、低緯度域であればENSO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、といった情報を衛星データから得て、その上に物理量や化学量をのせて解釈していくことが求められる。

また、衛星による海洋観測から得られる面的かつ時系列のデータは、モデリングの研究に対して束縛条件、あるいは検証データを提供することになり、モデリングの研究にも大きな貢献をするものと期待される。

### 6.3 より長期的な変動解析に向けて

気候変動と物質循環をより理解するためには、現在の気象台の観測データがそろっている過去30年位のデータでは不十分で、100年以上のデータが必要である。特に、ENSO等低緯度域が重要な役割を演じる気候/海洋変動の場合には、サンゴ年輪に記録された情報を高時間精度で解析することが有用である<sup>17)</sup>。現在のところ、サンゴ骨格から過去100年以上にわたって水温が復元されているのは、世界中でも十数地点にとどまっている。特に西太平洋暖水域および周辺海域は、熱エネルギーの輸送でも重要な海流システムの複雑な場所として知られている。例えば、黒潮の盛衰はアジアや北米大陸の気候にも大きな影響があるし、インドネシア通過流は地球規模での海洋大循環にとって重要な位置を占めている。サンゴ年輪に記録されている情報としては、水温の他にも塩分、光量、湧昇、栄養塩、酸化還元、重金属汚染などがあるが、これまでのデータ収集は非常に不十分であると言える。

## 参考文献

- 1) IPCC (2001) IPCC Third Assessment Report-Climate Change 2001, Summary for Policymakers. A report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- 2) Sundquist, E.T. (1985) Geological perspective on carbon dioxide and the carbon cycle. *In: Sundquist, E.T. and Broecker, W.S. eds., Natural Variation in Carbon Dioxide and the Carbon Cycle, Archean to Present*, Geophys. Monogr. Ser., 32, AGU, Washington, D.C. pp.5-59.
- 3) Eppley, R.W. (1989) New production: history, methods, problem. *In: Berger, W.H., Smetacek, V.S. and Wefer, G. eds., Productivity of the ocean: present and past*. John Wiley & Sons, Chichester, UK., pp.85-97.
- 4) Koblentz-Mishke, O.J., V.V. Volkovinsky and J.G. Kabanova (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., 183-193.
- 5) Behrenfeld, M.J. and P.G. Falkowski (1997)

- Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnol. Oceanogr.*, 42, 1-20.
- 6) 浅沼市男・松本和彦・河野 健(2004)衛星データを利用した全球一次生産の推定：海洋の一次生産量モデルと分布. 地球環境, 9(2), 239-244.
  - 7) 津田 敦・横内克己・桑田 晃・浅沼市男・足立久美子・市川忠史・廣田裕一・葛西広海・石田 洋(2004)衛星データを用いた海洋一次生産見積もりのための日本近海Sea-truthデータの集積. 地球環境, 9(2), 145-152.
  - 8) 下田陽久(2004)一次生産量のグローバルマッピング. 地球環境, 9(2), 245-250
  - 9) 栗屋善雄・小谷英司・庄 大方(2004)衛星データを利用した全球一次生産の推定陸域生態系の一次生産の分布. 地球環境, 9(2), 231-238
  - 10) Ishii, M., H. Y. Inoue, H. Matsueda, S. Saito, K. Fushimi, K. Nemoto, T. Yano, H. Nagai and T. Midorikawa (2001) Seasonal variation in total inorganic carbon and its controlling processes in surface waters of the western North Pacific subtropical gyre. *Mar. Chem.*, 75, 17-32.
  - 11) 松本和彦(2004)太平洋赤道域の植物プランクトン分布. 地球環境, 9(2), 139-144.
  - 12) Ishii, M. and H. Y. Inoue (2004) Variability of surface layer CO<sub>2</sub> parameters in the equatorial zone of the western and central Pacific Ocean. In: Shiomi, M. and Kawahata, H. eds., *Global environmental change in the ocean and on land*. Terra, Tokyo. (in press)
  - 13) Kawahata, H., A. Suzuki and H. Ohta (2000) Export fluxes in the Western Pacific Warm Pool. *Deep-Sea Res. I*, 47, 2061-2091.
  - 14) Gupta, L.P. and H. Kawahata (2000) Amino acid and hexosamine composition and flux of sinking particulate matter in the equatorial Pacific at 175 degrees E longitude. *Deep-Sea Res. I*, 47, 1938-1960.
  - 15) Gupta, L.P. and H. Kawahata (2003) Vertical and latitudinal variations in amino acid fluxes and compositions of settling particles along 175 degrees E in the North Pacific Ocean. *Tellus B*, 55, 445-455.
  - 16) Kawahata, H. and L. P. Gupta (2003) El Nino/Southern Oscillation (ENSO) related variations in particulate export fluxes in the western and central equatorial Pacific. *J. Oceanogr.*, 59, 663-670.
  - 17) 鈴木 淳・菅 浩伸・川幡穂高(2004)サンゴ骨格記録から復元される近過去のENSO変動の変遷. 地球環境, 9(2), 171-180.

(受付2004年6月23日、受理2004年7月12日)