

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

浅沼 市男・松本 和彦・河野 健
(独立行政法人 海洋研究開発機構)

摘 要

衛星データを利用した、海洋一次生産量のモデルを提案した。このモデルは、深度および時間解析型の一次生産量モデルであり、衛星搭載センサーによるクロロフィルa分布、海表面温度分布、光合成有効照度のデータを用いる。深度方向の光合成有効照度の適切なモデル化により、一次生産量の推定精度を向上することができた。太平洋赤道域、中高緯度海域における現場の一次生産量と良い相関を示した。また、一次生産量の海域ごとの経年変動が観察された。

キーワード：一次生産量、海色センサー、基礎生産量、クロロフィルa、炭素同化効率

1. はじめに

化石燃料の消費、森林の伐採など、人類活動にともなう炭酸ガス濃度の増加などが主な原因と考えられる地球温暖化傾向の予測と、その影響評価が重要な研究課題となっている。大気、陸域、海域間の炭酸ガスのフラックス、蓄積量は十分に理解されておらず、炭酸ガス濃度増加の影響評価が十分な精度で行われていない。海洋では、大気-海洋間の炭酸ガスのフラックス、海水中における一次生産による炭酸ガスの固定量、生物ポンプとしての海底へのフラックスなど、観測とそのモデル化の研究が急務となっている。現在は、海洋表層の植物プランクトン分布が、衛星搭載の海色センサーにより観測されている。リモートセンシング初期の沿岸域海色走査計(CZCS)が1986年に停止し、10年の間において、海色水温走査計(OCTS)、海色広域走査計(SeaWiFS)、中間解像度画像化分光放射計(MODIS)と継続的な観測が実現した。これらの海色センサーにより観測された全球ベースの植物プランクトン分布は、海洋における炭酸ガス固定量、さらに、海洋-大気間の炭酸ガスフラックスなどの推定を可能とする。また、植物プランクトン分布の時空間変動は、気候変動との関わりを示すものであり、非常に貴重なデータを与える。この植物プランクトンの分布データなどを利用し、植物プランクトンの炭素同化能力である一次生産量のモデル研究が進められている。一次生産量モデルは、衛星搭載の海色センサーから得られるクロロフィルa濃度分布および

光合成有効照度、熱赤外センサーから得られる海表面温度分布から、植物プランクトンの一次生産量を推定するモデルである。ここでは、科学技術振興調整費「全球炭素循環グローバルマッピング」において得られた赤道海域、東シナ海などの亜熱帯海域、東北から北海道沖合いの亜寒帯海域において計測された現場基礎生産力のデータをもとに、一次生産量モデルを開発した。

2. 一次生産量モデル

Behrenfeld and Falkowski¹⁾の深度積分型の一次生産量を衛星データに適用したとき、赤道直下の海域では、モデルの一次生産量が過少評価を示し、中高緯度海域では過大評価の結果となった。Behrenfeldらの一次生産量の式を次に示す。

$$PP_{eu} = 0.66125 P_{opt}^B [E_0 / (E_0 + 4.1)] Z_{eu} C_{opt} D_{irr} \quad (1)$$

ここで、 PP_{eu} は有光層の一次生産量($\text{mgC m}^{-2} \text{day}^{-1}$)、 P_{opt}^B は最適炭素同化効率($\text{mgC mgChl}^{-1} \text{hour}^{-1}$)、 E_0 は光合成有効照度(mol quanta m^{-2})、 Z_{eu} は1%までの有光層深度(m)、 C_{opt} は最適炭素同化効率深度におけるクロロフィルa濃度(mg m^{-3})、 D_{irr} は日照時間(hour)を示す。この式は、1層モデルとなり、低緯度海域において観測される深層クロロフィル極大層の再現が困難なため過少評価を、また、中高緯度における表層から亜表層極大に対して計算対象層が大きく見積もられ、過大評

価を示したと考えられる。

この深度方向の植物プランクトンの分布と一次生産力の問題を解決するため、深度方向のクロロフィルa 濃度分布、光合成有効照度、クロロフィルa 濃度あたりの炭素同化効率の深度分布を与え、深度解析型の一次生産力モデルの構築を進めてきた²⁾。

2.1 光合成有効照度の深度分布モデル

最も基本となるパラメータとして、光合成有効照度の深度分布を求めた。これは、過去の赤道海域における光生物観測データから、光合成有効照度の深度方向への対数軸における減衰直線と、クロロフィルa 濃度の真数軸におけるクロロフィルa 極大層以深の深度分布とが一致する現象を見出したことによる³⁾。(2)式に光合成有効照度の深度方向の強度比を与える経験式を示す。

$$\ln(PAR\%(z)) = (-0.0018 C_0^3 + 0.022 C_0^2 - 0.11 C_0 - 0.024)Z \quad (2)$$

ここで、 $PAR\%(Z)$ は表層の光合成有効照度を100%としたときの深度 z (m)における光合成有効照度比を示す。 C_0 は表層のクロロフィルa 濃度($mg\ m^{-3}$)であり、衛星観測データにより与えられる。この式は、表層のクロロフィルa 濃度のみにより光合成有効照度の深度分布を推定するものである。多くの場合、表層のクロロフィルa 濃度がその海域の光学特性を決定するため、この経験式が有効となる。

2.2 クロロフィルa 濃度の深度分布モデル

さらに、光合成有効照度の深度分布と、クロロフィルa 濃度の深度分布とがクロロフィルa 極大層以深で一致することから、(3)式に示すような経験式を提案した。

$$C(z) = [(0.1 - 0.7 C_0) \exp\{-0.8 PAR\%(z)\}] \exp\{-0.8 PAR\%(z)\} + C_0 \quad (3)$$

ここで、 $C(z)$ は深度 z (m)におけるクロロフィルa 濃度($mg\ m^{-3}$)である。表層からある深度まで表層と同じクロロフィルa 濃度を示し、その直下にクロロフィルa 極大層を形成する。さらに、光合成有効照度の減衰直線に沿って、クロロフィルa 濃度も減少する。従来から提案されていたクロロフィルa 濃度の深度分布は、正規化分布を仮定するものがほとんどであるが、正規分布であり物理化学的根拠がなかった。本研究では、クロロフィルa 極大層が光合成有効照度の減衰線と一致することを経験的につかみ、この経験式を立てた。

図1は、光合成有効照度の深度分布とクロロフィルa 濃度の深度分布推定アルゴリズムを説明する概念図である。第1-X軸に光合成有効照度の表層100%に対する深度方向の割合、第2-X軸にクロロフィルa 濃度、Y軸に深度をとった。右上からの斜線が、(2)式により与えられる種々のクロロフィルa 濃度に対する光合成有効照度の深度分布を示す。指数関数的に減衰する光合成有効照度は、第1-X軸の対数により直線として表現される。表層のクロロフィルa 濃度に応じ、第2-X軸のレンジを適宜調整することにより、

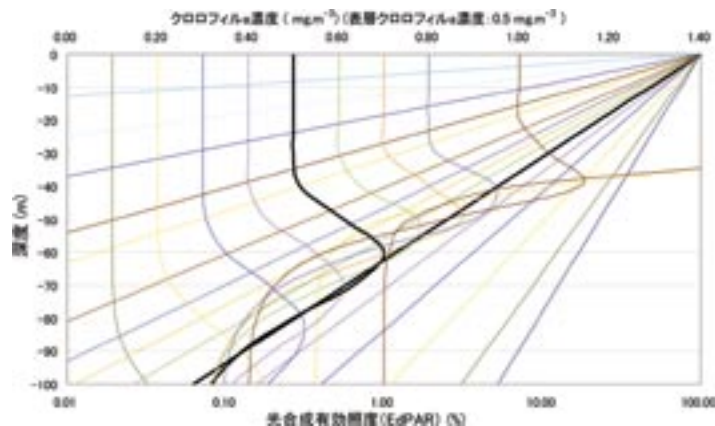


図1 光合成有効照度の深度分布((2)式)とクロロフィルa 濃度深度分布((3)式)。

クロロフィルa 濃度が $0.5\ mg\ m^{-3}$ の場合の光合成有効照度深度分布とクロロフィルa 濃度深度分布の関係を示す。X-2軸は、表層のクロロフィルa 濃度が $0.5\ mg\ m^{-3}$ の場合に合わせ濃度レンジを設定した。他のクロロフィルa 濃度では、X-2軸のレンジを変更し、光合成有効照度の深度分布と一致させる。

あるクロロフィルa 濃度の深度分布と、光合成有効照度の深度分布の斜線が一致する。図1では、クロロフィルa 濃度のレンジを0.00から1.40 mg m⁻³ とすることにより、表層において0.5 mg m⁻³を示す場合のクロロフィルa 濃度の深度分布(太い曲線)と、このクロロフィルa 濃度における光合成有効照度の深度分布(太い斜線)とが一致する。この例では、クロロフィル極大が60 mに推定され、極大以深では光合成有効照度の深度分布に沿ってクロロフィルa 濃度の減少する様子が再現される。

2.3 光合成有効照度依存型炭素同化効率のモデル

Behrenfeldら¹⁾が提案したクロロフィルa 濃度当たりの最適炭素同化効率 P^B_{opt} は温度の関数として(4)式に与えられる。

$$P^B_{opt} = -3.27 \times 10^{-8} T^7 + 3.4132 \times 10^{-6} T^6 - 1.348 \times 10^{-4} T^5 + 2.462 \times 10^{-3} T^4 - 0.0205 T^3 + 0.0617 T^2 + 0.2749 T + 1.2956 \quad (4)$$

ここで、 T は水温を示す。図2に破線によりBehrenfeldらの最適炭素同化効率を示す。Behrenfeldらは、多くの現場計測から最も代表的な炭素同化効率として、(4)式を回帰的に求めた。しかし、実際のデータのばらつきは非常に大きく、必ずしも炭素同化効率を示す最適式とはなっていない。この式を実際のデータに適用し、試験的に一次生産量を求めたところ、低緯度海域において過少評価、あるいは中高緯度海域において過大評価を与えたことから、緯度の差で生じる光合成有効照度の差により炭素同化効率に変化する

モデルを提案した。

ここでは、(5)式に示されるように1日の光合成有効照度(Ein m⁻² day⁻¹)から、南中時の深度 z (m)における炭素同化効率(mgC mgChl⁻¹ hour⁻¹)を水温、および光合成有効照度により与えた。

$$P^b = 17 [1 - \exp \{-0.04a \text{ PAR}\%(z) / 100\}] \exp \{-0.3 b \text{ PAR}\%(z) / 100\} \quad (5)$$

ここで

$$a = 0.1 s \text{ PAR}(0) + i \quad (5-1)$$

$$s = -0.0001 T^3 + 0.0036 T^2 - 0.007 T + 0.2557 \quad (5-1-1)$$

$$i = 0.0024 T^3 - 0.0113 T^2 + 0.0868 T - 0.1042 \quad (5-1-2)$$

$$b = 0.00048 T^3 - 0.019 T^2 + 0.1 T + 3.1214 \quad (5-2)$$

ここで、 T は海表面温度(deg-C)、 $\text{PAR}(0)$ は1日あたりの海面直上の光合成有効照度(Ein m⁻² day⁻¹)である。図2に、代表的な光合成有効照度が与えられたときの温度の関数であるクロロフィルa 濃度あたりの炭素同化効率を実線により示した。Behrenfeldらが一つの式により、クロロフィルa 濃度あたりの最適炭素同化効率を示した。しかし、現場観測により与えられた炭素同化効率は、提案された数式に対し大きな分散を示し、数式が十分な代表性を持つものではなかった。これに対して、(5)式では現場観測により与えられる炭素同化効率の分散を説明することが可能となった。

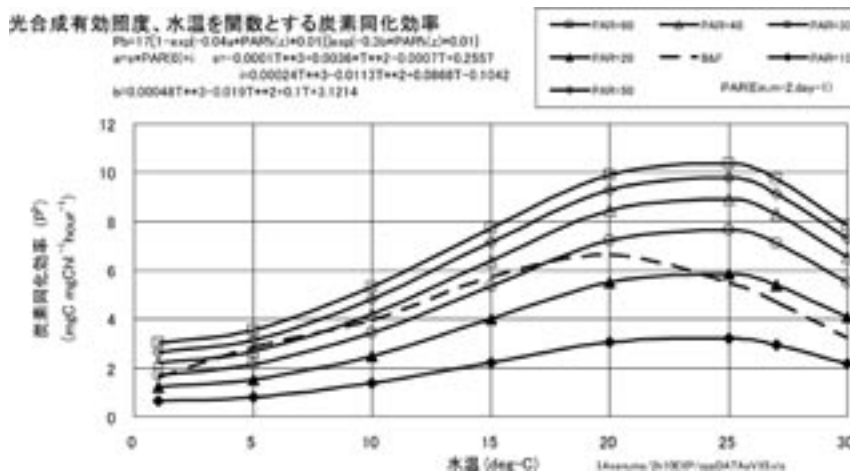


図2 炭素同化効率。Behrenfeldらのクロロフィルa 濃度当たりの最適炭素同化効率を破線により示す。温度の関数として与えられる。これに対して、本研究では、光合成有効照度(PAR)及び水温によりクロロフィルa 濃度当たりの炭素同化効率を与える。この図では、代表的な光合成有効照度についての、クロロフィルa 濃度あたりの炭素同化効率を実験により示した。

2.4 深度および時間解析型一次生産量モデル

本研究では、以上のパラメータをまとめ、(6)式に0.1% 光合成有効照度を与える光合成有効層に相当する深度(eu)までの水柱あたりの一次生産量(PP_{eu} ($\text{mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$))の推定式を示す。

$$PP_{eu} = \int_{-0.5:t+0.5} \int C(z) P^b \{day, z, T, PAR\% (z)\} PAR(0, t - 0.5:t+0.5) / PAR(0, 0:24) dz dt \quad (6)$$

dt は24時間の積分時間を採用し、高緯度海域の24時間に渡る一次生産量を計算に加えた。ここで、 $P^b \{day, z, T, PAR\% (z)\}$ は、(5)式により与えられる光合成有効照度に対応する一日あたりの炭素同化効率であり、一日あたりの光合成有効照度から与えられる。 $PAR(0, t - 0.5:t+0.5)$ は、 t 時の単位時間あたりの海面直上における光合成有効照度、 $PAR(0, 0:24)$ は一日あたりの海面直上における光合成有効照度であり、放射伝達モデルMODTRANを用いて計算した。この光合成有効照度は、理想的な大気状態(海洋モデル)における各月ごと、各時間ごと、各緯度ごとの計算値である。

2.5 基礎データ

クロロフィルa濃度分布は、SeaWiFSプロジェクトチームから提供される月平均のクロロフィルa濃度分布データ、光合成有効照度データを利用した。海表面温度は、米国ジェット推進研究所(JPL)が提供する週間平均の多波長海表面温度(MCSST)データセットを用い、月平均の海表面温度分布データを作成した。

図3は、本研究における一次生産量計算の流れ図を示す。クロロフィルa分布、および光合成有効照度のデータをもとに、表層に対する光合成有効照度%強度の鉛直分布を求める((2)式)。続いて、光合成有効照度の深度分布と表層におけるクロロフィルa濃度から、クロロフィルa濃度の深度分布を求める((3)式)。また、光合成有効照度分布、および光合成表面における光合成有効照度から炭素同化効率を求める((5)式)。さらに、理想的な大気状態における光合成有効照度の時間分布を組み合わせ、24時間の積算一次生産量を求め、また、深度方向に積分し水柱あたりの一次生産量を求める((6)式)。

3. 一次生産量モデルの検証

1998年から2002年まで、文部科学省科学技術振興調整費「炭素循環グローバルマッピングの研究」の参加各機関により取得された一次生産量のデー

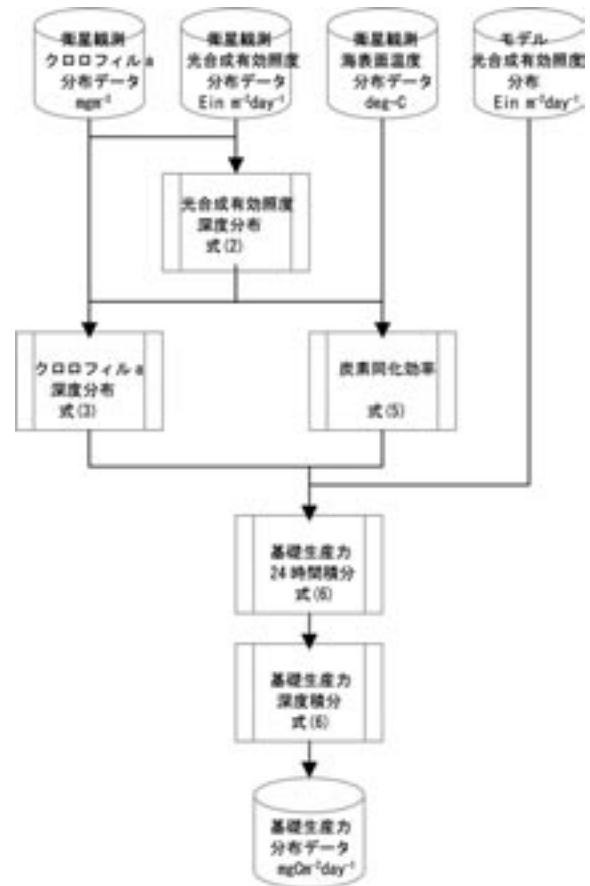


図3 一次生産量計算フローチャート。

タをモデルの検証に利用した。参加各機関は、太平洋赤道域、太平洋日本沿岸域および東シナ海において、SeaWiFSと同期した一次生産量観測を実施した。一次生産量計測は、トレーサーとして ^{13}C を用いた。培養は、培養瓶を海中の採水深度へ戻す現場法、あるいは培養瓶をデッキ上の水槽に投入し、フィルターにより光条件を制御する擬似現場法を、各機関の観測に合わせて採用した。培養時間は24時間あるいは12時間とし、1日あたりの一次生産量を求めた。各層における一次生産量を水柱方向に積算し、単位面積あたりの一次生産量とした。

図4に現場観測の一次生産量(X軸)とモデルにより推定した一次生産量(Y軸)の散布図を示す。全体の相関係数は0.768となった。一部のデータについて、モデル値が現場観測データに対して過少評価を示した。これは、モデルが月平均のクロロフィルa分布を採用するのに対し、現場観測データが特定日のクロロフィルa分布を採用しているため、水塊の差が誤差の原因として考えられる。理想的には、現場観測時の衛星データを用い、検証を行いたい。しかし、雲による欠測が多く、週間平均あるいは月間平均の衛星データを用いざるを得ない。

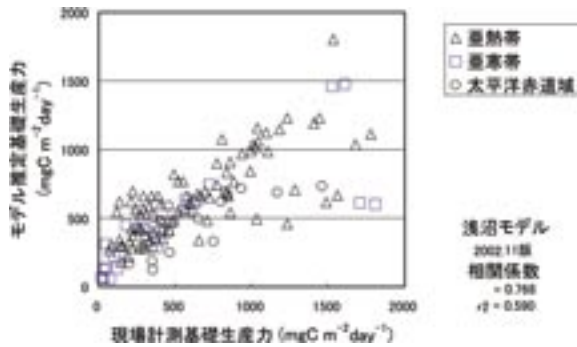


図4 一次生産量モデルの検証。
太平洋赤道域(●), 北西太平洋亜寒帯域(□), 西部太平洋亜熱帯域(△)におけるSeaWiFS観測と同期した一次生産量計測データを用いて, 本研究の一次生産量モデルの検証を行った。

4. 一次生産量の変動

図5-1から図5-5に1998年から2002年までの全球一次生産量分布図を示す。この全球一次生産分布図は、各月ごとに求められた一日あたりの一次生産量($\text{mgC m}^{-2} \text{day}^{-1}$)を積算したものである。フルスケールで0から500 $\text{gC m}^{-2} \text{year}^{-1}$ を寒色から暖色へ配色した。

太平洋赤道直下の一次生産量に注目すると、1998年は他の年度に対し東西方向に広がりを持つものの、南北方向への広がりが小さい。また、2002年は南北方向に広がりを持つものの東西の広がりが小さく、西部太平洋において低い一次生産量が観測された。1998年当初のエルニーニョは、1997年後半から1998年前半に出現した現象であり、一次生産量の年間積算がエルニーニョを正確に反映するものではないが、ひとつの目安として利用可能である。東部太平洋の赤道湧昇の西進度合いと西部太平洋の暖水プールの盛衰はエルニーニョ現象に対応するもので、1998年と2002年には、太平洋赤道域全体の一次生産量が低めに観測された。2001年から2002年にかけて、1998年に比較すると規模は小さいものの、エルニーニョ状態となり、赤道湧昇の西進が抑制され、西部太平洋に暖水プールが維持され、高い一次生産量の分布が東太平洋に限定された。1998年のエルニーニョ時には偏東風が弱く、パナマ西方沖合いの湧昇も抑制され、一次生産量が低めに推定された。このエルニーニョに同期し、1998年の西部インド洋赤道域からアラビア海までの一次生産量が低めに推定された。

三陸沖合いの一次生産量に注目すると、1998年の一次生産量が低めに推定され、エルニーニョの周期に同期した現象と推定される。これは、エルニーニョにともない、西岸境界流である黒潮の

北上が抑制され、暖水の供給が少なく、結果として一次生産量が抑制されたと考えられる。

ベーリング海およびアラスカ湾の経年変化に注目すると、アラスカ湾の一次生産量の経年変化は小さいものの、2001年および2002年にベーリング海東方の一次生産量が多めに推定された。ベーリング海東方海域は、ココリス(Coccolith)・ブルームの発生海域として知られ、エルニーニョの周期とは異なる経年変化を示した。

インド洋側の南アフリカ沖合いに注目すると、1999年に一次生産量の高い海域が南極周遊海流の北側に広がって観測された。これは、偏西風、南極周遊海流及び南極周遊海流から分派する南インド海流の強度に依存するものと考えられ、エルニーニョの周期とは異なる経年変化を示した。同様に南極周遊海流の影響を受ける南大西洋では、2000年と2002年に低めの一次生産量が推定された。これは、ブラジル沖合いを南下するブラジル暖流と南極周遊海流から分派する南大西洋海流の勢力に依存すると考えられ、エルニーニョの周期とは異なる経年変化を示した。

特異現象として、大西洋のニューファウンドランド南東沖合いを東側へ流れるメキシコ湾流が、北大西洋において、2002年に低めの一次生産量を示した。この現象は、ニューファウンドランド東側沖合いを南下するラブラドル寒流の勢力に依存するものと考えられる。2002年はラブラドル寒流の勢力が弱まるとともに、メキシコ湾流の勢力が弱いために、栄養塩濃度の高い海水とメキシコ湾流の混合が弱く、低めの一次生産量を示したと考えられる。

これまでの一次生産量モデルの開発において、OCTSとSeaWiFSとの海色観測システム間の整合性が欠如していたため、一次生産量の経年変化をモニターすることが困難であった。これは、衛星観測データを利用する一次生産量モデルが、クロロフィルa、光合成有効照度、海表面温度の複合関数として機能することによるもので、特にクロロフィルa濃度の整合性の欠如が原因と考えられる。今後の継続的かつ整合性のある衛星による海色観測により、植物プランクトンの一次生産量がエルニーニョなどの気候変動の影響をどのように受けるか、解明が期待される。

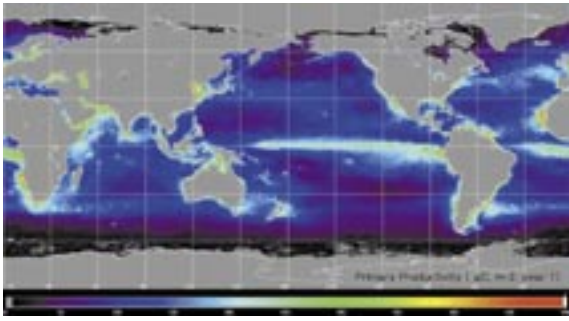


図 5 - 1 一次生産量分布図(1998年).

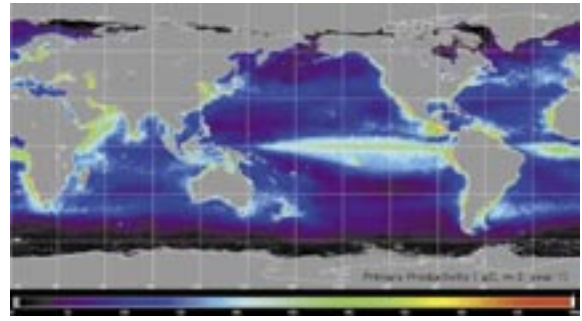


図 5 - 3 一次生産量分布図(2000年).

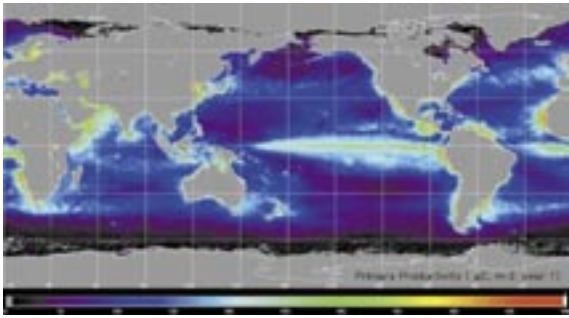


図 5 - 2 一次生産量分布図(1999年).

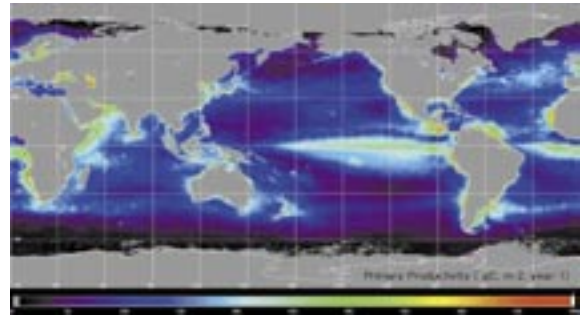


図 5 - 4 一次生産量分布図(2001年).

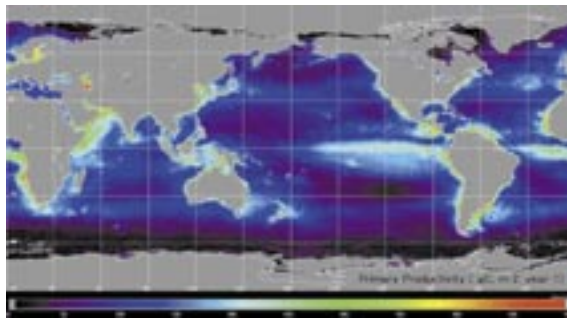


図 5 - 5 一次生産量分布図(2002年).

参考文献

- 1) Behrenfeld, M.J. and P.G. Falkowski (1997), Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration, *Limnol. Oceanogr.*, 42, 1-20.
- 2) Asanuma, I., T. Tanaka, K. Matsumoto and T. Kawano (2000) Primary Productivity Model Based on Photosynthetically Available Radiation, *Hyperspectral Remote Sensing of the Ocean*, Proceedings of SPIE, 4154, 153-158.
- 3) Asanuma, I., K. Matsumoto, T. Kawano, C. Saitoh, M.R. Lewis and S.D. McLean (1996) Chlorophyll maximums controlled by under water current and solar irradiation, *Ocean Optics XIII*, SPIE Vol.2963, 828-833.

(受付2004年3月25日、受理2004年6月9日)