

— 総 説 —

衛星による海洋基礎生産力の推定*

平譚 享^{1**}・高尾 信太郎²・鈴木 光次³・
西岡 純⁴・渡邊 豊³・伊佐田 智規⁵

要 旨

海洋の物質循環や生態系の時空間変化を考える上で、海洋植物プランクトンによる基礎生産を大きな時空間スケールで正しく推定することが必要不可欠である。そのため、海色リモートセンシングによる基礎生産の推定が行われている。本稿では、基礎生産を推定するためのモデルの発展と改良についてその概要を紹介する。また、海色リモートセンシングで得られたクロロフィル *a* (Chl-*a*) 濃度や基礎生産の変動解析研究の課題について議論する。基礎生産の推定モデルには Chl-*a* をベースにしたものが多用されているが、衛星によって推定される Chl-*a* は懸濁物や有色溶存有機物 (CDOM) による光吸収の影響を受けやすい。そのため、近年では炭素ベースあるいは光吸収ベースの基礎生産推定モデルが開発され、Chl-*a* の推定誤差が大きい海域においても、比較的良好な精度で基礎生産が推定できるようになった。今後、これらのデータを利用した長期変動の研究のためには、海色衛星ミッション間の差異を考慮した結合とセンサーの劣化等によるドリフトの補正が必要である。

キーワード：海色リモートセンシング、植物プランクトン、基礎生産、クロロフィル *a*

1. はじめに

ここ数十年の間に、北極海の急速な海水後退 (Arrigo *et al.*, 2008; Comiso, 2006) や南極棚氷の崩壊、熱波や洪水などの局地的異常気象など、大気・海洋の温暖化の影響とされる現象が世界各地において頻発している。この地球温暖化の原因とされる主要な温暖化効果ガスは二酸化炭素 (CO₂) である。2014 年には気候変動に関する政府間パネル (IPCC) が、CO₂ 放出に関して現状を放置した場合に人類や生態系は深刻で広範に及ぶ不可逆的な影響を受ける可能性が高いことを警告し (IPCC AR5 WG2, 2014), 途上国や新興国を含む世界各国が放出量削減に向けて様々な努力を始めている。その削減量の成果を評

* 2016 年 9 月 23 日受領; 2017 年 1 月 24 日受理
著作権: 日本海洋学会, 2017

1 北海道大学 大学院水産科学研究

〒041-8611 函館市港町 3-1-1

2 国立極地研究所 生物圏研究グループ

〒190-8518 立川市緑町 10-3

3 北海道大学 大学院地球環境科学研究院

〒060-0810 札幌市北区北 10 条西 5 丁目

4 北海道大学 低温科学研究所 環オホーツク観測研究センター

〒060-0819 札幌市北区北 19 条西 8 丁目

5 北海道大学 北方生物圏フィールド科学センター 厚岸臨海実験所

〒088-1113 厚岸郡厚岸町愛冠 1 番地

** 連絡著者: 平譚 享

TEL/Fax: 0138-40-8844

e-mail: hirawake@fish.hokudai.ac.jp

価する上でも、地球上の現存する CO₂ の貯蔵量とフラックス（海洋、大気などの炭素プール間の移動量）を正確に見積もる必要がある。

陸上および海洋中の植物や藻類は、CO₂ 固定者として、光合成によって CO₂ のフラックスをコントロールする。微細藻類である海洋植物プランクトンのバイオマスは陸上植物のそれに比べると非常に小さい。しかしながら、植物プランクトンが光合成によって取り込む CO₂ は陸上植物によるそれに匹敵すると見られている (Raven, 2009)。

海洋においては、主に植物プランクトンが光合成により CO₂ から有機物を生成する（基礎生産）。また、その一部の有機物が中深層へ沈降することにより、表層の CO₂ は除去され、新たに大気中の CO₂ が海洋に吸収される（生物ポンプ）。その他にも、海洋では、溶解ポンプおよびアルカリポンプが存在する (Volk and Hoffert, 1985)。このため、地球表面の 70% を覆う海洋は CO₂ の収支に、そして、海洋植物プランクトンによる基礎生産は地球規模の炭素循環に、大きな役割を果たしていると考えられている。また、海洋の基礎生産が地球規模の水温変動と連動していること（例えば、Behrenfeld *et al.*, 2006）や、海洋の食物網を支える重要なプロセスとして魚類生産に影響を与えていること（例えば、Friedland *et al.*, 2012）も示唆されている。さらに、光や温度だけでなく、硝酸塩等の主要栄養塩や鉄等の微量元素といった栄養物質の供給過程と量によっても制御される基礎生産は、栄養物質の濃度や分布を反映していると考えられている (Pinedo-González *et al.*, 2015)。

炭素固定量としての海洋の基礎生産の測定は、Stemann Nielsen (1952) 以降、放射性同位体 ¹⁴C を利用して世界の海洋において行われてきた。その後、それらのデータが取りまとめられ、Koblentz-Mishke *et al.* (1970) に代表されるような基礎生産地図が作成され、地球規模の基礎生産の推定などに頻りに利用されてきた。現在でも多くの国では ¹⁴C 法によって基礎生産量が測定されている。しかし、Marra (2009) によって、昼間（夜明けから日没迄の培養期間）に取り込まれた ¹⁴C 量から求めた値は、純基礎生産（植物プランクトンが光合成によって生産した全ての有機物の量（総基礎生産）から植物プランクトンの呼吸量を差し引いた値）に相当するのに対し、

24 時間培養から得られた値は、酸素明暗瓶法から見積もられた純群集生産（純基礎生産から従属栄養生物の呼吸量を差し引いた生産量）に近いことが指摘されている。我が国においては、1960 年代までは ¹⁴C 法による測定結果が数多く報告されていた。しかし、その後、放射性物質の取り扱いの規制が強化され、野外での ¹⁴C 使用が著しく困難となったため、1980 年代以降は、Hama *et al.* (1983) によって確立された ¹³C を利用した測定が広く行われている (濱・柳, 2007)。ただし、¹⁴C または ¹³C を利用して得られるデータは、ある限られた時間に、船舶で観測された点あるいは線上のデータであった。このため、時空間的な変動の大きい海洋の基礎生産を推定し、地球規模の物質循環や生態系との関連を調べる目的での使用には適さないという大きな問題があった。この問題に対し、より広域な空間を同時に観測し、さらにその観測を反復し、継続することが可能な人工衛星による各種リモートセンシング技術が有用な手段と考えられた。特に、1978 年に打ち上げられた Coastal Zone Color Scanner (CZCS)/Nimbus-7 (Hovis *et al.*, 1980) に端を発する海色リモートセンシングによって、基礎生産者である植物プランクトンが持つクロロフィル *a* (Chl-*a*) バイオマスを地球規模で推定することが可能となった。CZCS が停止した 1986 年以降の約 10 年間、運用された海色センサーは存在しなかったが、1996 年に日本の Ocean Color Temperature Scanner (OCTS: Kawamura *et al.*, 1998) が打ち上げられたのに続いて、米国の Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS: McClain *et al.*, 2004)、MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS: Esaias *et al.*, 1998)、日本の Global Imager (GLI: Murakami *et al.*, 2005; Murakami *et al.*, 2006)、ヨーロッパの MEdium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS: Rast *et al.*, 1999) が打ち上げられた（海色衛星ミッションの歴史については、Acker (2015) に詳しく解説されている）。最近では 2010 年に韓国が打ち上げた初の静止海色センサー Geostationary Ocean Color Imager (GOCI: Choi *et al.*, 2012) や 2011 年に米国が打ち上げた Visible Infrared Imager Radiometer Suite (VIIRS: Cao *et al.*, 2014) がある。さらに 2017 年には日本の Second generation GLObal Imager (SGLI: Imaoka *et al.*, 2010) が打ち上げられる予定である。これらのミッショ

ンによって、少なくとも1996年以降ほぼ継続して地球規模の海色データが取得・蓄積されてきた。その結果、10-20年間の変動傾向を地球規模で調べることが現実のものとなり、Chl-*a*濃度や基礎生産の長期変動の解析に利用されている (Gregg and Conkright, 2002; Antoine *et al.*, 2005; Gregg *et al.*, 2005; Behrenfeld *et al.*, 2006; Boyce *et al.*, 2010; Mélin, 2016)。

このように、海色センサーの開発と打ち上げが各国で進んでいるが、基本的な原理はCZCSから変わらず、センサーは「海の色(海色)」つまり、海面から上向きに射出する放射輝度(海面射出放射輝度)または、海面へ入射する放射照度に対する海面射出放射輝度(リモートセンシング反射率)の分光分布を測定している。海面射出放射輝度に含まれる海中の情報の多くは海面付近からの情報であり (Gordon and McCluney, 1975)、海色から推定されるChl-*a*等も海面付近の値である。したがって、水柱の基礎生産力を求めるためには、海面の情報のみから、仮定あるいは経験式や理論によってChl-*a*、光合成活性、光強度(光量子量)の鉛直分布を推定する必要がある。Behrenfeld and Falkowski (1997a)によって海面のChl-*a*、水温、光量子量から水柱の基礎生産力を推定するモデル (Vertical generalized production model, VGPM) が開発され、SeaWiFS打ち上げ後には、数日から1週間に1回の時間分解能で全球の基礎生産力を推定できるようになった。しかしながら、海面Chl-*a*の推定や光合成活性の推定には精度やパラメータ化の問題が残され、その後も様々な推定方法が提案されると同時に、推定モデル間の比較研究 (Primary production Algorithm Round Robin, PPARR) が海盆スケールまたは全球スケールで行われている (Campbell *et al.*, 2002; Carr *et al.*, 2006; Friedrich *et al.*, 2009; Saba *et al.*, 2010; Saba *et al.*, 2011; Lee Y. J. *et al.*, 2015)。また、海水固有の光学的性質 (Inherent Optical Properties, IOPs) の推定アルゴリズムの発達 (Werdell *et al.*, 2013) に伴い、海色リモートセンシングの新たなパラメータとして後方散乱係数や光吸収係数などを推定することが可能となったため、Chl-*a*以外のパラメータを利用した基礎生産力推定モデルも開発された。

さらに、前述の通り長期間の海色データセットが利用可能となった結果、地球規模でのChl-*a*、基礎生産の変

動傾向およびブルームの大きさや長さなどに注目した生物季節学的 (Phenological) な解析結果が報告されるようになった (Platt and Sathyendranath, 2008; Racault *et al.*, 2012)。その一方で、長期データを作成するために必須となるミッション間のデータ結合に関する問題点も指摘されている (Gregg and Rousseaux, 2014; Mélin, 2016)。

そこで本稿では、海色リモートセンシングによる基礎生産力推定モデルの発達と改良の概略を紹介する。また、それらのデータセットを利用した基礎生産力の長期変動傾向の研究の課題について議論する。なお、本文中で使用する記号の定義と単位をTable 1にまとめて示す。

2. 基礎生産力の海色リモートセンシングデータによる推定

2.1 Chl-*a* ベースの推定モデル

炭素固定量としての海洋の純基礎生産力 (*NPP*) は、単位時間 (*t*) あたりに、ある深度 (*z*) に生息する植物プランクトンに吸収された光子エネルギーが、光合成回路に伝達し、有機物として固定された炭素量として表される。Chl-*a*は光合成に必須の色素であると同時に植物プランクトン現存量の指標となるため、*NPP*は一般にChl-*a*を使って次の式で表される (Bidigare *et al.*, 1987; Morel, 1991; Lee *et al.*, 1996; Behrenfeld and Falkowski, 1997a; Lee Z. *et al.*, 2015)。

$$NPP(\lambda, t, z) = \Phi(\lambda, t, z) \times a_{ph}^*(\lambda, z) \times Chl-a(z) \times PAR(\lambda, t, z) \quad (1)$$

ここで、 a_{ph}^* はChl-*a*あたりの光吸収係数、PARは波長(λ)400-700 nmにおける光合成有効放射である。 Φ は、Chl-*a*あたりの光合成炭素固定量子収率である (Morel, 1978)。また、 $a_{ph}^* \times Chl-a \times PAR$ は植物プランクトンによって吸収された光子エネルギーを表す。

(1)式を波長(400-700 nm)、時間(日の出から日没)および深度(海面から有光層深度)について3重積分することにより、1日あたりの水柱積算の純基礎生産 (PP_{eu})を求めることができる。このモデルは最も複雑な

Table 1. Definition and unit of symbols.

Symbol	Definition	Unit
Chl- <i>a</i>	Chlorophyll <i>a</i>	mg m ⁻³
<i>NPP</i> (λ, t, z)	Net primary productivity	mg C m ⁻³ h ⁻¹ nm ⁻¹
<i>t</i>	Time	
<i>z</i>	Depth	m
λ	Wavelength	nm
Φ (λ, t, z)	Photosynthetic quantum yields of carbon fixation for absorbed PAR	mg C photons absorbed ⁻¹ h ⁻¹ nm ⁻¹
a^*_{ph}	Chl- <i>a</i> specific absorption coefficient of phytoplankton	m ² (mg Chl- <i>a</i>) ⁻¹
Chl- <i>a</i> (<i>z</i>)	Chl- <i>a</i> at depth <i>z</i>	mg m ⁻³
$a^*_{\text{ph}}(\lambda, z)$	a^*_{ph} at wavelength λ and depth <i>z</i>	m ² (mg Chl- <i>a</i>) ⁻¹
PAR (λ, t, z)	Photosynthetically available radiation	photons s ⁻¹ nm ⁻¹
<i>K</i> (0-)	Diffuse attenuation coefficient at just below the sea surface	m ⁻¹
ψ	Water column light utilization index	g C m ² (g Chl- <i>a</i> mol photons) ⁻¹
ζ	Optical depth = $z \times K_{\text{PAR}}$	
K_{PAR}	Diffuse attenuation coefficient of PAR	m ⁻¹
<i>PP</i> _{eu}	Daily net primary productivity integrated from the surface to <i>Z</i> _{eu}	mg C m ⁻² d ⁻¹
$P^{\text{B}}_{\text{opt}}$	Maximum photosynthetic rate within a water column	mg C m ⁻³ (mg Chl- <i>a</i>) ⁻¹ h ⁻¹
Chl- <i>a</i> (0-)	Chl- <i>a</i> at the surface	mg m ⁻³
<i>E</i> ₀	Sea surface daily PAR	mol photons m ⁻² d ⁻¹
<i>Z</i> _{eu}	Euphotic zone depth	m
<i>DL</i>	Day length	h
<i>T</i>	Sea surface temperature	°C
μ	Phytoplankton growth rate	divisions d ⁻¹
<i>C</i>	Carbon biomass of phytoplankton	mg m ⁻³
<i>b</i> _{bp} (440)	Backscattering coefficient of particles at 440 nm	m ⁻¹
Chl- <i>a</i> : C	Chl- <i>a</i> -Carbon ratio	mg Chl- <i>a</i> (mg C) ⁻¹
$a_{\text{ph}}(\lambda, z)$	Absorption coefficient of phytoplankton at wavelength λ and depth <i>z</i>	m ⁻¹

モデルであり (Behrenfeld and Falkowski (1997b) では Wavelength-resolved models (WRMs) として分類されている), 海面に到達する各波長の放射強度と水中での透過率, Chl-*a* の鉛直分布, 光合成-光曲線パラメータなど多くの要素の各々をモデリングし, 計算することを必要とする (例えば, Morel, 1991; Sathyendranath and Platt, 1988; Platt and Sathyendranath, 1988; Smyth *et al.*, 2005; Uitz *et al.*, 2010; Bélanger *et al.*, 2013)。

しかしながら, (1) 式の右辺の変数の中で一般的に利用できる海色リモートセンシングデータは, 海面の Chl-*a* (Chl-*a* (0)) および時間と波長について積算された海面

の PAR (PAR (0)) に限られ, 他は別の衛星データから推定する必要がある。そのため, 波長, 波長・時間, あるいは波長・時間・深度について初めから積分したモデルが海色リモートセンシングでは利用しやすい。Asanuma (2007) は, 太平洋における現場観測データを用い, 波長について積分されたモデル (時間・深度分布については, それぞれ海面の値から経験的に推定する) を開発した。波長・時間・深度について積分したモデル (Behrenfeld and Falkowski (1997b) では Depth-integrated models (DIMs) として分類されている) は簡便であるため, 後述の通り多くの研究で用いられている。なお, 基

礎生産力推定モデルの分類については、Behrenfeld and Falkowski (1997b) の他、笹岡ら (2006) および浅沼 (2013) を参照されたい。

DIMs は、現場データを用いたモデルとして、海色リモートセンシングが稼働するよりも前の 1950 年代に構築されていた (Talling, 1957; Ryther and Yentsch, 1957)。その後、Smith and Baker (1978), Smith *et al.* (1982) および Eppley *et al.* (1985) は、海色リモートセンシングデータを利用することを目的として、PAR に関する項を省略し、 PP_{eu} が海面、水柱、または、光の強さが海面の $1/e$ になる深度 (Gordon *et al.*, 1975, the first optical depth または effective penetration depth (z_{90}), 海面直下の放射照度の消散係数 ($K(0-)$) の逆数とほぼ等しい) までの Chl-*a* に比例する最も単純なモデルを提案した。その中で、Eppley *et al.* (1985) は、実際に現場データでモデルを構築すると、 PP_{eu} と Chl-*a* との関係が直線的ではないこと、係数が海域、季節によって変化すること、さらに、その比例係数が光、水温、栄養塩などの環境要素によって変動することを示し、光と水温のデータをモデルに取り入れることにより、推定値の精度が高くなることを報告している。一方、Falkowski (1981) は、海面における日射量のパラメータを加えた形のモデルを提唱し、水柱全体の平均的な量子収率を表す光利用指数 ψ (water column light utilization index) というパラメータを導入している。Falkowski (1981) は一日の積算 PAR が約 $10\text{--}70 \text{ mol quanta m}^{-2}\text{d}^{-1}$ の範囲において $\psi = 0.43 \text{ g C m}^{-2} (\text{g Chl-}a \text{ mol photons})^{-1}$ であると報告している。また、Platt (1986) は ψ が海域、季節によらずほぼ一定であると仮定し、表層の光量を与えることにより基礎生産量を推定している。しかしながら、現場データの解析からは、 ψ の値が海域によっては非常に高いこと (Yoder *et al.*, 1985; Campbell and O'Reilly, 1988), さらに全地球的規模では変動が大きいこと (Balch and Byrne, 1994) が報告されている。

Behrenfeld and Falkowski (1997a) は、約 1700 点の現場データセットを用い、海面 Chl-*a* と、海面水温の関数として求めた光合成活性を利用した基礎生産力モデル Vertical Generalized Production Model (VGPM) を発表している。VGPM では、各深度の基礎生産量 $PP(z)$ ($\text{mg C m}^{-3}\text{d}^{-1}$) を Chl-*a* と日射時間で標準化後 ($PP^*(z)$ ($\text{mg C (mg Chl-}a)^{-1}\text{h}^{-1}$)), 光学深度 (optical depth ζ , PAR の消散係数 (K_{PAR}) の逆数で深度を割った値) に対するその鉛直分布に対して光合成-光曲線と同様の関数を当てはめている。さらに、 $PP^*(z)$ の最大値を P_{opt}^B とし、鉛直分布の形状を海面における一日あたりの PAR (このモデルでは E_0) で表現している。これらのモデル化により、VGPM では、一日当たりの水柱内積算基礎生産力 (PP_{eu}) を以下の式で推定することができる。

$PP_{eu} = P_{opt}^B \times \text{Chl-}a(0) \times \frac{0.66125 \times E_0}{E_0 + 4.1} \times Z_{eu} \times DL$ (2)

ここで、 P_{opt}^B は水柱内最大光合成活性、Chl-*a* (0) は海面 Chl-*a* (出典論文内では Chl_{surf} と表記されている), E_0 は海面における一日当たりの光合成有効放射 (PAR), Z_{eu} は有光層深度 (光強度が海面の 1% となる深度), DL は日射時間である。ここで、水柱内の Chl-*a* は鉛直方向に一様であることを仮定している。また、(2) 式の P_{opt}^B は、実測値に基づき 1°C 毎の海面水温 (T) とそれぞれの水温における P_{opt}^B の中央値を以下の 7 次関数で表わしている。

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

本モデルは、彼らの持つ PP_{eu} データ ($n = 1013$) の変動の 58% を説明できたため、利用される頻度も高いが、(3) 式で推定される P_{opt}^B の誤差は大きく、低温の海域では推定値の誤差に系統的な温度依存性も確認されている (Hirawake *et al.*, 2011)。Kameda and Ishizaka (2005) は Chl-*a* に基づき植物プランクトン群集のサイズ組成を大型と小型に区分し、各サイズの P_{opt}^B の水温に対する応答の違いを考慮して推定精度を向上させている。

以上のように、Chl-*a* をベースとした基礎生産力推定モデルは、衛星による推定を目的としない期間を含め約 60 年かけて発達してきた。しかしながら、懸濁物や有色溶解有機物 (IOCCG, 2000), あるいは、植物プランクトンのパッケージ効果 (色素が重なり合うことにより単位 Chl-*a* あたりの光吸収係数が小さくなる効果, 例えば, Kirk, 1975a, b; Kirk, 1976; Morel and Bricaud, 1981; Bricaud *et al.*, 1988; Bidigare *et al.*, 1990; Kirk, 1994;

Bissett *et al.*, 1997) によって、衛星による Chl-*a* は過大評価または過小評価される (例えば, Mitchell, 1992; Hirawake *et al.*, 2000; Cota *et al.*, 2003; Matsuoka *et al.*, 2007)。これは、Chl-*a* をベースとした基礎生産力推定にとって致命的な誤差となる。また、 a_{ph}^* は上述のようにパッケージ効果によって同じ Chl-*a* 濃度に対しても 4 倍以上変動する (Bricaud *et al.*, 1995) ため、その変動を無視することは基礎生産力の推定誤差に直結する。

2.2 炭素ベースの推定モデル

Chl-*a* ベースの基礎生産力推定では、Chl-*a* バイオマス推定と光合成炭素固定量子収率推定の両方に難点があったため、Behrenfeld *et al.* (2005) は炭素ベースの基礎生産力モデル (Carbon-based productivity model, CbPM) を開発した。VGPM は PP_{eu} を推定するために Chl-*a* と P_{opt}^B を用いたが、CbPM では植物プランクトンの炭素バイオマス (C (mg m⁻³)) と増殖速度 (μ (divisions d⁻¹)) を使用し、次式で推定している。

$$PP_{eu} = C \times \mu \times Z_{eu} \times [0.66125 \times E_0 / (E_0 + 4.1)] \quad (4)$$

ここで、 C は後方散乱係数 (b_b) と相関があるという知見 (例えば, Stramski *et al.*, 1999; Loisel *et al.*, 2001) に基づき、現場データを使用して、次の式で計算される。

$$C = 13000 \times (b_{bp}(440) - 0.00035) \quad (5)$$

ここで $b_{bp}(440)$ は波長 440 nm における粒子の後方散乱係数である。また、0.00035 は、Chl-*a* と $b_{bp}(440)$ の直線回帰の切片として求めた植物プランクトン以外の粒子の $b_{bp}(440)$ の値である。 μ は Chl-*a*: C 比 (mg Chl-*a* (mg C)⁻¹) から推定される。ただし、 μ は水温、栄養塩、光量と関係するため、室内実験の結果や混合層のデータおよび PAR の消散係数 (深さに対する減衰率) もその推定式に組み込まれている。また、海色データから Chl-*a* と $b_{bp}(440)$ を推定するために、懸濁物等による誤差が少なく、光吸収係数や後方散乱係数も算出可能な半理論的アルゴリズム、Garver-Siegel-Maritorena (GSM) アルゴリズム (Garver and Siegel, 1997; Maritorena *et*

al., 2002; Siegel *et al.*, 2002) を用いている。

しかしながら、このモデルでは、Chl-*a*: C 比から算出したパラメータ μ に C を乗じているため、このモデルで推定される PP_{eu} は Chl-*a* に比例すると考えられる (Lee Z. *et al.*, 2015)。Westbery *et al.* (2008) は、水柱全体における植物プランクトンの光馴化および栄養塩ストレスをパラメータ化するために、CbPM に表層の光の場と硝酸塩躍層の深度の情報を取り込み、より現場データに合うモデルとした。その一方で、モデルが複雑となり、多くの補助データが必要となった。

2.3 光吸収ベースの推定モデル

Chl-*a* ベースの推定モデルの問題点を解決するためのもう 1 つの方法は、植物プランクトンの光吸収係数 (a_{ph}) を利用する方法である (Lee *et al.*, 1996; Marra *et al.*, 2007)。(1) 式における a_{ph}^* は Chl-*a* 当たりの a_{ph} であるため、次のように変形できる。

$$NPP(\lambda, t, z) = \Phi(\lambda, t, z) \times a_{ph}(\lambda, z) \times PAR(\lambda, t, z) \quad (6)$$

a_{ph} は、海洋環境によって変化した植物プランクトンの生理的状态とバイオマスを総括的に反映した有力なパラメータであることが示唆されている (Bricaud *et al.*, 1998; Marra *et al.*, 2007)。さらに、Marra *et al.* (2007) は、様々な海域の現場データを用いて海面の光吸収係数と海面付近の最大基礎生産力との間には、海域を問わず直線関係があることを示している。同様に、Hirata *et al.* (2009) および Isada *et al.* (2010) はそれぞれベンゲラ湧昇域および親潮域の現場観測結果に基づき、 a_{ph} と表層の基礎生産力との間に直線関係があることを報告している。

Hirawake *et al.* (2011) および Hirawake *et al.* (2012) は、南大洋およびベーリング・チャクチ海のデータにこの直線関係を応用し、(3) 式における $P_{opt}^B \times \text{Chl-}a(0)$ を a_{ph} の関数に置き換えることにより、海面水温と Chl-*a* 濃度を使用しない光吸収ベースの基礎生産力推定モデルを開発し、Chl-*a* ベースの推定による誤差を軽減することに成功している。例えばベーリング・チャクチ海に

おいては、次のような関係が得られた。

$$P_{\text{opt}}^{\text{B}} \times \text{Chl-}a(0) = 102.44 \times a_{\text{ph}}(443, 0^-)^{1.431} \quad (7)$$

ここで、 $a_{\text{ph}}(443, 0^-)$ は海面直下における波長 443 nm の植物プランクトンの光吸収係数である。

鉛直方向の積算方法や Φ の推定方法は上記とは異なるが、Lee *et al.* (1996) および Lee *et al.* (2011) も a_{ph} を利用して水柱積算の基礎生産力を求め、現場のデータと良く一致した推定値を得ている。さらに、Isada *et al.* (2013) および Barnes *et al.* (2014) もまた、沿岸域の観測データを用い、表層および水柱内積算基礎生産力を a_{ph} から精度良く推定できることを示している。

光吸収係数は、栄養塩、光条件、水温などの外的海洋環境に対する累積的な光合成活性の応答とみなせる (Claustre *et al.*, 2005) ため、基礎生産を推定するためのより直接的なアプローチである (Marra *et al.*, 2007)。また、(6) 式の通り、光吸収ベースの推定モデルには、不確実性の高い a_{ph}^* や Chl-*a* が含まれていないことが大きな特徴であり、かつ利点である。特に、夏季の南大洋や北極海のように大型の珪藻類が優占していてパッケージ効果が認められる海域や、北極海のように有色溶存有機物 (CDOM) や陸からの懸濁物質の影響が大きい海域において極めて有効である。

3. 海色リモートセンシングを利用した長期変動傾向

OCTS や SeaWiFS が打ち上げられた当初は、CZCS と現場データ、あるいは CZCS と SeaWiFS をつなぎ合わせるにより Chl-*a* の経年変動が議論され、その結論として CZCS の運用期間 (1979-1986 年) においては全海洋平均 Chl-*a* が増加傾向にあること (Gregg and Conkright, 2001), CZCS の期間と SeaWiFS の期間 (1997-2000 年) を比較すると北半球高緯度域で減少し、低緯度では増加傾向にあること (Gregg and Conkright, 2002) が報告された。その一方で Antoine *et al.* (2005) は、同上の CZCS と SeaWiFS の期間を比較し、全海洋平均 Chl-*a* が増加傾向にあると報告している。

基礎生産力については、Gregg *et al.* (2003) が CZCS

と SeaWiFS の期間を比較し、1980 年初めから 6% 以上減少していると報告している。また、Behrenfeld *et al.* (2006) は 1997 年から 1999 年にかけて基礎生産は増加し、1999 年から 2006 年にかけて減少していることを示している。

以上のような短い期間や不連続なデータセットを用いた解析では、長期傾向に統一した見解を得ることが困難である (Henson *et al.*, 2010)。しかしながら、複数の海色衛星ミッションが立ち上がり、現在では約 20 年間のデータセットが蓄積され、より長期の解析が可能となった。その一方で、ミッション間の結合が課題となっている。ミッションが異なると当然センサーの設計が異なり、それに付随する運用方法や推定アルゴリズムも異なる。さらに、雲や氷によるデータの欠損は、長期傾向を検出する上で障害となる。これらを解決するために、Gregg and Rousseaux (2014) は現場データを用いて SeaWiFS および MODIS の最終レベルの海面射出輝度を補正し、両センサーに対して同一の水中アルゴリズムを適用することにより Chl-*a* を推定した。さらに彼らは、海洋生物地球化学モデルに同化し、沿岸域や海水域のデータ欠損の影響を抑え、夏季しかデータが得られない極域もデータ同化によって Chl-*a* を再現した。その結果、全海洋における Chl-*a* の中央値に有意な増減は検出されなかったが、海盆スケールでは、北半球および赤道インド洋で有意な減少傾向が検出された。

彼らの研究のように衛星観測結果とモデルの結果を同化することの有効性については、今後の更なる研究が求められる。一方、ミッション間の差異やセンサーのドリフト (劣化など) はそれらが長期データの解析結果に影響する (Mélin, 2016) ため、それらの補正は必須である。また、影響を受けるのは Chl-*a* だけではない。差異やドリフトは、本質的には Chl-*a* の推定に使用するリモートセンシング反射率の変化に起因している (Mélin *et al.*, 2016; Huot and Antoine, 2016) ため、炭素ベースおよび光吸収ベースの基礎生産力推定に用いる後方散乱係数や光吸収係数にも影響を及ぼす。ペーリング・チャクチ海の例ではあるが、SeaWiFS と MODIS の差異を補正する前後で、Chl-*a* と $a_{\text{ph}}(443, 0^-)$ の推定値に有意な差が認められている (Fujiwara *et al.*, 2016)。

4. 今後の展望

コンピューター、センサー、通信技術の性能向上にともなって、海色リモートセンシングは発達してきた。しかしながら、衛星から得られる情報が海面付近のデータであることに変わりはない。純基礎生産を衛星リモートセンシングデータから精度良く推定するためには、光合成に関する情報をより正確に表現できる光学的なパラメータを探すとともに、深度方向の積算に関するモデリングの改良が必要である。

今日までに様々な純基礎生産モデルが提唱されているが、波長分解モデルか非波長分解モデルかを除いて、式の構造は式(1)が出発点となっており基本的には大きく変わらない。しかしながら、衛星リモートセンシングデータの利用を考えた場合、どのパラメータを選択するのか(Chl-*a* ベース、炭素ベース、および光吸収ベース)が純基礎生産を高い精度で推定する鍵となる(Sathyendranath and Platt, 2007; Sathyendranath *et al.*, 2007)。さらに、炭素ベースあるいは光吸収ベースの推定モデルが提唱された陰には、リモートセンシング反射率から海水固有の光学的性質(IOP)を導くアルゴリズムの発達があった。そのアルゴリズムには、2.2で紹介したGSMの他にも、Lee *et al.* (2002)によって開発されたQuasi-Analytical Algorithm(QAA)やSmyth *et al.* (2006)によって開発された半理論的アルゴリズム、さらにそれらを統合したGeneralized IOP(GIOP)モデル(Werdell *et al.*, 2013)などがある。これらのアルゴリズムによって、500 nm以下の短い波長において光吸収と後方散乱係数を比較的高い精度で推定することは可能であるが、長波長の推定誤差は大きい(IOCCG, 2006)。また、衛星リモートセンシングデータに適用した際、光学モデルパラメータの対象海域に対する不適合や衛星リモートセンシングデータ(リモートセンシング反射率)の誤差に起因した欠損がChl-*a*に比べて多い。これらの問題を解決することで、より高度な基礎生産力推定が可能となると考えられる。

また、現在では各国の宇宙開発機関によって複数の海色センサーが運用されているが、それらの品質を保つためには、現場における検証データの取得が必要である。

各研究者や各国が船舶によって取得できる海域や時期およびデータの種類のそれぞれ異なるため、国際的な協力体制とデータの相互比較が求められる。

謝辞

本稿を執筆する機会を提供して下さった、東京大学大気海洋研究所の安田一郎博士および小畑元博士に感謝いたします。本稿は文部科学省科学研究費補助金「新学術領域研究(研究領域提案型)海洋混合学の創設」(領域番号4702:A02-3 No.15H05820)および宇宙航空研究開発機構「地球環境変動観測ミッション(GCOM)」委託研究によるものです。

References

- Acker, J. (2015): *The color of the atmosphere with the ocean below: A history of NASA's ocean color missions*. Createspace, USA, 362 pp.
- Asanuma, I. (2007): Depth and Time resolved primary productivity model examined for optical properties of water, p. 89–106. In *Global Climate Change and Response of Carbon Cycle in the Equatorial Pacific and Indian Oceans and Adjacent Landmasses*, Elsevier Oceanography Series **73**, edited by H. Kawahata and Y. Awaya, Elsevier Science, doi:10.1016/S0422-9894(06)73004-5.
- 浅沼市男 (2013): 海色センサーによる基礎生産力推定モデル. 写真測量とリモートセンシング, **52** (5), 247-250.
- Antoine, D., A. Morel, H. R. Gordon, V. F. Banzon, and R. H. Evans (2005): Bridging ocean color observations of the 1980s and 2000s in search of long-term trends. *J. Geophys. Res.*, **110** (C6), C06009, doi:10.1029/2004JC002620.
- Arrigo, K. R., G. van Dijken, and S. Pabi (2008): Impact of a shrinking Arctic ice cover on marine primary production. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L19603, doi:10.1029/2008GL035028.
- Balch, W. M., and C. F. Byrne (1994): Factors affecting the estimate of primary production from space. *J. Geophys. Res.*, **99**, 7555–7570, doi:10.1029/93JC03091.
- Barnes, M. K., G. H. Tilstone, T. J. Smyth, D. J. Suggett, R. Astoreca, C. Lancelot, and J. C. Kromkamp (2014): Absorption-based algorithm of primary production for total and size-fractionated phytoplankton in coastal waters. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **504**, 73–89, doi:10.3354/meps10751.
- Behrenfeld, M. J., E. Boss, D. A. Siegel, and D. M. Shea (2005): Carbon-based ocean productivity and phytoplankton physiology from space. *Global Biogeochem. Cycles*, **19**, GB1006, doi:10.1029/2004GB002299.
- Behrenfeld, M. J., and P. G. Falkowski (1997a): A consumer's guide to phytoplankton primary productivity models. *Limnol. Oceanogr.*, **42**, 1479–1491, doi:10.4319/lo.1997.42.7.1479.
- Behrenfeld, M. J., and P. G. Falkowski (1997b): Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnol. Oceanogr.*,

- 42, 1–20, doi:10.4319/lo.1997.42.1.0001.
- Behrenfeld, M. J., R. T. O'Malley, D. A. Siegel, C. R. McClain, J. L. Sarmiento, G. C. Feldman, A. J. Milligan, P. G. Falkowski, R. M. Letelier, and E. S. Boss (2006): Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature*, **444**, 752–755, doi:10.1038/nature05317.
- Bélanger, S., M. Babin, and J.-É. Tremblay (2013): Increasing cloudiness in Arctic damps the increase in phytoplankton primary production due to sea ice receding. *Biogeosciences*, **10** (6), 4087–4101, doi:10.5194/bg-10-4087-2013.
- Bidigare, R. R., M. E. Ondrusek, J. H. Morrow, and D. A. Kiefer (1990): In vivo absorption properties of algal pigments, p. 290–302. In *Ocean Optics X*, edited by R. W. Spinrad, SPIE.
- Bidigare, R. R., R. C. Smith, K. S. Baker, and J. Marra (1987): Oceanic primary production estimates from measurement of spectral irradiance and pigment concentrations. *Global Biogeochem. Cycles*, **1** (3), 171–186, doi: 10.1029/GB001i003p00171.
- Bissett, W. P., J. S. Patch, K. L. Carder, and Z. P. Lee (1997): Pigment packaging and Chl *a*-specific absorption in high-light oceanic water. *Limnol. Oceanogr.*, **42**, 961–968, doi:10.4319/lo.1997.42.5.0961.
- Boyce, D. G., M. R. Lewis, and B. Worm (2010): Global phytoplankton decline over the past century. *Nature*, **466** (7306), 591–596, doi:10.1038/nature09268.
- Bricaud, A., M. Babin, A. Morel, and H. Claustre (1995): Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization. *J. Geophys. Res.*, **100**, 13321–13332, doi:10.1029/95JC00463.
- Bricaud, A., A.-L. Bédhomme, and A. Morel (1988): Optical properties of diverse phytoplanktonic species: Experimental results and theoretical interpretation. *J. Plankton Res.*, **10** (5), 851–873, doi:10.1093/plankt/10.5.851.
- Bricaud, A., A. Morel, M. Babin, K. Allali, and H. Claustre (1998): Variations of light absorption by suspended particles with chlorophyll *a* concentration in oceanic (case 1) waters: analysis and implications for bio-optical models. *J. Geophys. Res.*, **103**, 31033–31044, doi:10.1029/98JC02712.
- Campbell, J. W., D. Antoine, R. Armstrong, K. Arrigo, W. Balch, R. Barber, M. Behrenfeld, R. Bidigare, J. Bishop, M.-E. Carr, W. Esaias, P. Falkowski, N. Hoepffner, R. Iverson, D. Kiefer, S. Lohrenz, J. Marra, A. Morel, J. Ryan, V. Vedernikov, K. Waters, C. Yentsch, and J. Yoder (2002): Comparison of algorithms for estimating ocean primary production from surface chlorophyll, temperature, and irradiance. *Global Biogeochem. Cycles*, **16** (3), 1035, doi:10.1029/2001GB001444.
- Campbell, J. W., and J. E. O'Reilly (1988): Role of satellites in estimating primary productivity on the northwest Atlantic continental shelf. *Cont. Shelf Res.*, **8**, 179–204, doi:10.1016/0278-4343(88)90053-2.
- Cao, C., F. J. De Luccia, X. Xiong, R. Wolfe, and F. Weng (2014): Early on-orbit performance of the visible infrared imaging radiometer suite onboard the suomi national polar-orbiting partnership (SNPP) satellite. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **52** (2), 1142–1156, doi:10.1109/TGRS.2013.2247768.
- Carr, M.-E., M. A. M. Friedrichs, M. Schmeltz, M. N. Aita, D. Antoine, K. R. Arrigo, I. Asanuma, O. Aumont, R. Barber, M. Behrenfeld, R. Bidigare, E. T. Buitenhuis, J. Campbell, A. Ciotti, H. Dierssen, M. Dowell, J. Dunne, W. Esaias, B. Gentili, W. Gregg, S. Groom, N. Hoepffner, J. Ishizaka, T. Kameda, C. Le Quéré, S. Lohrenz, J. Marra, F. Mélin, K. Moore, A. Morel, T. E. Reddy, J. Ryan, M. Scardi, T. Smyth, K. Turpie, G. Tilstone, K. Waters, and Y. Yamanaka (2006): A comparison of global estimates of marine primary production from ocean color. *Deep-Sea Res. II*, **53**, 741–770, doi:10.1016/j.dsr2.2006.01.028.
- Choi, J. K., Y. J. Park, J. H. Ahn, H. S. Lim, J. Eom, and J. H. Ryu (2012): GOCI, the world's first geostationary ocean color observation satellite, for the monitoring of temporal variability in coastal water turbidity. *J. Geophys. Res. Ocean.*, **117**, C09004, doi:10.1029/2012JC008046.
- Claustre, H., M. Babin, D. Merien, J. Ras, L. Prieur, and S. Dallot (2005): Toward a taxon-specific parameterization of bio-optical models of primary production: A case study in the North Atlantic. *J. Geophys. Res.*, **110** (C07), C07S12, doi:10.1029/2004JC002634.
- Comiso, J. C. (2006): Abrupt decline in the Arctic winter sea ice cover. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L18504, doi:10.1029/2006GL027341.
- Cota, G. F., W. G. Harrison, T. Platt, S. Sathyendranath, and V. Stuart (2003): Bio-optical properties of the Labrador Sea. *J. Geophys. Res.*, **108**, 3228, doi:10.1029/2000JC000597.
- Eppley, R. W., E. Stewart, M. R. Abbott, and U. Heyman (1985): Estimating ocean primary production from satellite chlorophyll. Introduction to regional differences and statistics for the Southern California Bight: *J. Plankton Res.*, **7**, 57–70, doi: 10.1093/plankt/7.1.57.
- Esaias, W. E., M. R. Abbott, I. Barton, O. B. Brown, J. W. Campbell, K. L. Carder, D. K. Clark, R. H. Evans, F. E. Hoge, H. R. Gordon, W. M. Balch, R. Letelier, and P. J. Minnett (1998): An overview of MODIS capabilities for ocean science observations. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **36** (4), 1250–1265, doi:10.1109/36.701076.
- Falkowski, P. G. (1981): Light-shade adaptation and assimilation numbers. *J. Plankton Res.*, **3**, 203–216, doi:10.1093/plankt/3.2.203.
- Friedrichs, M. A. M., M.-E. Carr, R. T. Barber, M. Scardi, D. Antoine, R. A. Armstrong, I. Asanuma, M. J. Behrenfeld, E. T. Buitenhuis, F. Chai, J. R. Christian, A. M. Ciotti, S. C. Doney, M. Dowell, J. Dunne, B. Gentili, W. Gregg, N. Hoepffner, J. Ishizaka, T. Kameda, I. Lima, J. Marra, F. Mélin, J. K. Moore, A. Morel, R. T. O'Malley, J. O'Reilly, V. S. Saba, M. Schmeltz, T. J. Smyth, J. Tjiputra, K. Waters, T. K. Westberry, and A. Winguth (2009): Assessing the uncertainties of model estimates of primary productivity in the tropical Pacific Ocean. *J. Mar. Sys.*, **76**, 113–133, doi:10.1016/j.jmarsys.2008.05.010.
- Friedland, K. D., C. Stock, K. F. Drinkwater, J. S. Link, R. T. Leaf, B. V. Shank, J. M. Rose, C. H. Pilskaln, and M. J. Fogarty (2012): Pathways between primary production and fisheries yields of large marine ecosystems. *PLoS One*, **7** (1), e28945, doi:10.1371/journal.pone.0028945.
- Fujiwara, A., T. Hirawake, K. Suzuki, L. Eisner, I. Imai, S. Nishino, T. Kikuchi, and S. I. Saitoh (2016): Influence of timing of sea ice retreat on phytoplankton size during marginal ice zone bloom period on the Chukchi and Bering shelves. *Biogeosciences*, **13**, 115–131, doi:10.5194/bg-13-115-2016.
- Garver, S. A., and D. A. Siegel (1997): Inherent optical property inversion of ocean color spectra and its biogeochemical interpretation I. Time series from the Sargasso Sea. *J. Geophys. Res.*, **102**, 18607–18625, doi:10.1029/96JC03243.
- Gordon, H. R., and W. R. McCluney (1975): Estimation of the depth of sunlight penetration in the sea for remote sensing. *Appl. Opt.*, **14**, 413–416, doi:10.1364/AO.14.000413.
- Gregg, W. W. (2003): Ocean primary production and climate: Global decadal changes. *Geophys. Res. Lett.*, **30** (15), doi:10.1029/2003gl018889.

- Gregg, W. W., N. W. Casey, and C. R. McClain (2005): Recent trends in global ocean chlorophyll. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L03606, doi:10.1029/2004GL021808.
- Gregg, W. W., and M. E. Conkright (2001): Global seasonal climatologies of ocean chlorophyll: Blending in situ and satellite data for the Coastal Zone Color Scanner era. *J. Geophys. Res.*, **106**, 2499–2515, doi:10.1029/1999JC000028.
- Gregg, W. W., and M. E. Conkright (2002): Decadal changes in global ocean chlorophyll. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1730, doi:10.1029/2002GL014689.
- Gregg, W. W., and C. S. Rousseaux (2014): Decadal trends in global pelagic ocean chlorophyll: A new assessment integrating multiple satellites, in situ data, and models. *J. Geophys. Res. Ocean.*, **119** (9), 5921–5933, doi:10.1002/2014JC010158.
- Hama, T., T. Miyazaki, Y. Ogawa, T. Iwakuma, M. Takahashi, A. Otsuki, and S. Ichimura (1983): Measurement of photosynthetic production of a marine phytoplankton population using a stable ^{13}C isotope. *Mar. Biol.*, **73**, 31–36, doi:10.1007/BF00396282.
- 濱 健夫, 柳 勝美 (2007): 海洋物質循環の研究における安定同位体トレーサ法の利用. *Radioisotopes*, **56** (9), 543–551.
- Henson, S. A., J. L. Sarmiento, J. P. Dunne, L. Bopp, I. Lima, S. C. Doney, J. John, and C. Beaulieu (2010): Detection of anthropogenic climate change in satellite records of ocean chlorophyll and productivity. *Biogeosciences*, **7**, 621–640, doi:10.5194/bg-7-621-2010.
- Hirata, T., N. J. Hardman-Mountford, R. Barlow, T. Lamont, R. Brewin, T. Smyth and J. Aiken (2009): An inherent optical property approach to the estimation of size-specific photosynthetic rates in eastern boundary upwelling zones from satellite ocean colour: An initial assessment. *Prog. Oceanogr.*, **83**, 393–397, doi: 10.1016/j.pocean.2009.07.019.
- Hirawake, T., H. Satoh, T. Ishimaru, Y. Yamaguchi, and M. Kishino (2000): Bio-optical relationship of Case I waters: The difference between the low- and mid-latitude waters and the Southern Ocean. *J. Oceanogr.*, **56**, 245–260, doi:10.1023/A:1011147515805.
- Hirawake, T., K. Shinmyo, A. Fujiwara, and S.-i. Saitoh (2012): Satellite remote sensing of primary productivity in the Bering and Chukchi Seas using an absorption-based approach. *ICES J. Mar. Sci.*, **69** (7), 1194–1204, doi:10.1093/icesjms/fss111.
- Hirawake, T., S. Takao, N. Horimoto, T. Ishimaru, Y. Yamaguchi, and M. Fukuchi (2011): A phytoplankton absorption-based primary productivity model for remote sensing in the Southern Ocean. *Polar Biol.*, **34** (2), 291–302, doi:10.1007/s00300-010-0949-y.
- Hovis, W. A., D. K. Clark, F. Anderson, R. W. Austin, W. H. Wilson, E. T. Baker, D. Ball, H. R. Gordon, J. L. Mueller, S. Z. El-Sayed, B. Sturm, R. C. Wrigley, and C. S. Yentsch (1980): Nimbus-7 Coastal Zone Color Scanner: System description and initial Imagery, *Science*, **210**, 60–63, doi:10.1126/science.210.4465.60.
- Huot, Y., and D. Antoine (2016): Remote sensing reflectance anomalies in the ocean. *Remote Sens. Environ.*, **184**, 101–111, doi:10.1016/j.rse.2016.06.002.
- Imaoka, K., M. Kachi, H. Fujii, H. Murakami, M. Hori, A. Ono, T. Igarashi, K. Nakagawa, T. Oki, Y. Honda, and H. Shimoda (2010): Global change observation mission (GCOM) for monitoring carbon, water cycles, and climate change. *Proc. IEEE*, **98** (5), 717–734, doi:10.1109/JPROC.2009.2036869.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), AW5 Working Group II (2014): *Impacts, adaptation and vulnerability*. <http://ipcc-wg2.gov/AR5/report/full-report/>.
- International Ocean-Colour Coordinating Group (IOCCG) (2000): *Remote sensing of ocean colour in coastal, and other optically-complex, waters*. edited by S. Sathyendranath, Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, No. 3, IOCCG, Dartmouth, Canada, 140 pp.
- International Ocean-Colour Coordinating Group (IOCCG) (2006): *Remote sensing of inherent optical properties: Fundamentals, tests of algorithms, and applications*. edited by Z.-P. Lee, Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, No. 5, IOCCG, Dartmouth, Canada, 126 pp.
- Isada, T., A. Hattori-Saito, H. Saito, T. Ikeda, and K. Suzuki (2010): Primary productivity and its bio-optical modeling in the Oyashio region, NW Pacific during the spring bloom 2007. *Deep-Sea Res. II*, **57** (17–18), 1653–1664, doi:10.1016/j.dsr2.2010.03.009.
- Isada, T., T. Iida, H. Liu, S.-I. Saitoh, J. Nishioka, T. Nakatsuka, and K. Suzuki (2013): Influence of Amur River discharge on phytoplankton photophysiology in the Sea of Okhotsk during late summer. *J. Geophys. Res. Oceans*, **118**, 1995–2013, doi:10.1002/jgrc.20159.
- Kameda, T., and J. Ishizaka (2005): Size-fractionated primary production estimation by a two-phytoplankton community model applicable to ocean color remote sensing. *J. Oceanogr.*, **61**, 663–672, doi:10.1007/s10872-005-0074-7.
- Kawamura, H. (1998): OCTS mission overview. *J. Oceanogr.*, **54**, 383–399, doi:10.1007/BF02742442.
- Kirk, J. T. O. (1975a): A theoretical analysis of the contribution of algal cells to the attenuation of light within natural waters I. General treatment of suspensions of pigmented cells. *New Phytol.*, **75** (1), 11–20, doi:10.1111/j.1469-8137.1975.tb01366.x.
- Kirk, J. T. O. (1975b): A theoretical analysis of the contribution of algal cells to the attenuation of light within natural waters II. Spherical cells. *New Phytol.* **75** (1), 21–36, doi:10.1111/j.1469-8137.1975.tb01367.x.
- Kirk, J. T. O. (1976): A theoretical analysis of the contribution of algal cells to the attenuation of light within natural waters III. Cylindrical and spheroidal cells. *New Phytol.*, **77** (2), 341–358, doi:10.1111/j.1469-8137.1976.tb01524.x.
- Kirk, J. T. O. (1994): Photosynthesis as a function of the incident light, p. 271–313. In *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems* (second edition), edited by J. T. O. Kirk, Cambridge University Press, Great Britain.
- Koblentz-Mishke, O. J., V. V. Volkovinsky, and J. G. Kabanova (1970): Plankton primary production of the world ocean, p. 183–193. In *Scientific exploration of the South Pacific*, edited by W. S. Wooster, National Academy of Sciences, Washington.
- Lee, Y. J., P. A. Matrai, M. A. M. Friedrichs, V. S. Saba, D. Antoine, M. Ardyna, I. Asanuma, M. Babin, S. Bélanger, M. Benoit-Gagné, E. Devred, M. Fernández-Méndez, B. Gentili, T. Hirawake, S.-H. Kang, T. Kameda, C. Katlein, S. H. Lee, Z. Lee, F. Mélin, M. Scardi, T. J. Smyth, S. Tang, K. R. Turpie, K. J. Waters, and T. K. Westberry (2015): An assessment of phytoplankton primary productivity in the Arctic Ocean from satellite ocean color/in situ chlorophyll-*a* based models. *J. Geophys. Res. Oceans*, **120**, 6508–6541, doi:10.1002/2015JC011018.
- Lee, Z. P., K. L. Carder, and R. A. Arnone (2002): Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters. *Appl. Opt.*, **41** (27), 5755–5772, doi: 10.1364/AO.41.005755.

- Lee, Z. P., K. L. Carder, J. Marra, R. G. Steward, and M. J. Perry (1996): Estimating primary production at depth from remote sensing. *Appl. Opt.*, **35**, 463–474, doi:10.1364/AO.35.000463.
- Lee, Z., V. P. Lance, S. Shang, R. Vaillancourt, S. Freeman, B. Lubac, B. R. Hargreaves, C. Del Castillo, R. Miller, M. Twardowski, and G. Wei (2011): An assessment of optical properties and primary production derived from remote sensing in the Southern Ocean (SO GasEx). *J. Geophys. Res.*, **116**, doi:10.1029/2010jc006747.
- Lee, Z., J. Marra, M. J. Perry, and M. Kahru (2015): Estimating oceanic primary productivity from ocean color remote sensing: A strategic assessment. *J. Mar. Sys.*, **149**, 50–59, doi:10.1016/j.jmarsys.2014.11.015.
- Loisel, H., E. S. Boss, D. Stramski, K. Oubelkheir, and P. -Y. Deschamps (2001): Seasonal variability of the backscattering coefficient in the Mediterranean Sea based on satellite SeaWiFS imagery. *Geophys. Res. Lett.*, **28** (22), 4203–4206, doi:10.1029/2001GL013863.
- Maritorena, S., D. A. Siegel, and A. R. Peterson (2002): Optimization of a semianalytical ocean color model for global-scale applications. *Appl. Opt.*, **41** (15), 2705–2714, doi:10.1364/AO.41.002705.
- Marra, J. (2009): Net and gross productivity: weighing in with ¹⁴C. *Aquat. Microb. Ecol.*, **56**, 123–131, doi: 10.3354/ame01306.
- Marra, J., C. C. Trees, and J. E. O'Reilly (2007): Phytoplankton pigment absorption: A strong predictor of primary productivity in the surface ocean. *Deep-Sea Res. I*, **54**, 155–163, doi:10.1016/j.dsr.2006.12.001.
- Matsuoka, A., Y. Huot, K. Shimada, S.-I. Saitoh, and M. Babin (2007): Bio-optical characteristics of the western Arctic Ocean: implications for ocean color algorithms. *Canadian J. Remote Sens.*, **33** (6), 503–518, doi:10.5589/m07-059.
- McClain, C. R., G. C. Feldman, and S. B. Hooker (2004): An overview of the SeaWiFS project and strategies for producing a climate research quality global ocean bio-optical time series. *Deep-Sea Res. II*, **51**, 5–42, doi:10.1016/j.dsr2.2003.11.001.
- Mélin, F. (2016): Impact of inter-mission differences and drifts on chlorophyll-*a* trend estimates. *Int. J. Remote Sens.*, **37** (10), 2233–2251, doi: 10.1080/01431161.2016.1168949.
- Mélin, F., G. Sclap, T. Jackson, and S. Sathyendranath (2016) Uncertainty estimates of remote sensing reflectance derived from comparison of ocean color satellite data sets. *Remote Sens. Environ.*, **177**, 107–124, doi:10.1016/j.rse.2016.02.014.
- Mitchell, B. G. (1992): Predictive bio-optical relationships for polar oceans and marginal ice zones. *J. Mar. Sys.*, **3**, 91–105, doi:10.1016/0924-7963(92)90032-4.
- Morel, A. (1978): Available, usable, and stored radiant energy in relation to marine photosynthesis. *Deep-Sea Res.*, **25**, 673–688, doi:10.1016/0146-6291(78)90623-9.
- Morel, A. (1991): Light and marine photosynthesis: a spectral model with geochemical and climatological implications. *Prog. Oceanogr.*, **26**, 263–306, doi:10.1016/0079-6611(91)90004-6.
- Morel, A., and A. Bricaud (1981): Theoretical results concerning light-absorption in a discrete medium, and application to specific absorption of phytoplankton. *Deep-Sea Res.*, **28A** (11), 1375–1393, doi:10.1016/0198-0149(81)90039-X.
- Murakami H., K. Sasaoka, K. Hosoda, H. Fukushima, M. Toratani, R. Fouin, B. G. Mitchell, M. Kahru, P. Y. Deschamps, D. Clark, S. Flora, M. Kishino, S. Saitoh, I. Asanuma, A. Tanaka, H. Sasaki, K. Yokouchi, Y. Kiyomoto, H. Saito, C. Dupouy, A. Siripong, S. Matsumura, and J. Ishizaka (2006): Validation of ADEOS-II GLI ocean color products using in-situ observations. *J. Oceanogr.*, **62**, 373–393, doi: 10.1007/s10872-006-0062-6.
- Murakami, H., M. Yoshida, K. Tanaka, H. Fukushima, M. Toratani, A. Tanaka, and Y. Senga (2005): Vicarious calibration of ADEOS-2 GLI visible to shortwave infrared bands using global datasets. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **43**, 1571–1584, doi:10.1109/TGRS.2005.848425.
- Pinedo-González, P., A. J. West, A. Tovar-Sánchez, C. M. Duarte, E. Marañón, P. Cermeño, N. González, C. Sobrino, M. Huete-Ortega, A. Fernández, D. C. López-Sandoval, D. Blasco, M. Estrada, and S. A. Sañudo-Wilhelmy (2015): Surface distribution of dissolved trace metal in the oligotrophic ocean and their influence on phytoplankton biomass and productivity. *Global Biogeochem. Cycles*, **29**, 1763–1781, doi: 10.1002/2015GB005149.
- Platt, T. (1986): Primary production of the ocean water column as a function of surface light intensity: algorithms for remote sensing. *Deep-Sea Res.*, **33**, 149–163, doi:10.1016/0198-0149(86)90115-9.
- Platt, T., and S. Sathyendranath (1988): Oceanic primary production: Estimation by remote sensing at local and regional scales. *Science*, **241**, 1613–1620, doi:10.1126/science.241.4873.1613.
- Platt, T., and S. Sathyendranath (2008): Ecological indicators for the pelagic zone of the ocean from remote sensing. *Remote Sens. Environ.*, **112** (8), 3426–3436, doi:10.1016/j.rse.2007.10.016.
- Racault, M.-F., C. Le Quéré, E. Buitenhuis, S. Sathyendranath, and T. Platt (2012): Phytoplankton phenology in the global ocean. *Ecol. Indic.*, **14** (1), 152–163, doi:10.1016/j.ecolind.2011.07.010.
- Rast, M., J. L. Bezy, and S. Bruzzi (1999): The ESA Medium Resolution Imaging Spectrometer MERIS a review of the instrument and its mission. *Int. J. Remote Sens.*, **20** (9), 1681–1702, doi:10.1080/014311699212416.
- Raven, J. A. (2009): Primary production processes, p. 358-362. In *The Upper Ocean – A derivative of Encyclopedia of Ocean Sciences*, 2nd Edition, edited by J. H. Steele, S. A. Thorpe and K. K. Turekian, Academic Press.
- Ryther, J. H., and C. S. Yentsch (1957): The estimation of phytoplankton production in the ocean from chlorophyll and light data. *Limnol. Oceanogr.*, **2**, 281–286, doi:10.1002/lno.1957.2.3.0281.
- Saba, V. S., M. A. M. Friedrichs, D. Antoine, R. A. Armstrong, I. Asanuma, M. J. Behrenfeld, A. M. Ciotti, M. Dowell, N. Hoepffner, K. J. W. Hyde, J. Ishizaka, T. Kameda, J. Marra, F. Mlin, A. Morel, J. O'Reilly, M. Scardi, W. O. Smith, T. J. Smyth, S. Tang, J. Uitz, K. Waters, and T. K. Westberry (2011): An evaluation of ocean color model estimates of marine primary productivity in coastal and pelagic regions across the globe. *Biogeosciences*, **8**, 489–503, doi:10.5194/bg-8-489-2011.
- Saba, V. S., M. A. M. Friedrichs, M. E. Carr, D. Antoine, R. A. Armstrong, I. Asanuma, O. Aumont, N. R. Bates, M. J. Behrenfeld, V. Bennington, L. Bopp, J. Bruggeman, E. T. Buitenhuis, M. J. Church, A. M. Ciotti, S. C. Doney, M. Dowell, J. Dunne, S. Dutkiewicz, W. Gregg, N. Hoepffner, K. J. W. Hyde, J. Ishizaka, T. Kameda, D. M. Karl, I. Lima, M. W. Lomas, J. Marra, G. A. McKinley, F. Mélin, J. K. Moore, A. Morel, J. O'Reilly, B. Salihoglu, M. Scardi, T. J. Smyth, S. Tang, J. Tjiputra, J. Uitz, M. Vichi, K. Waters, T. K. Westberry, and A. Yool (2010): Challenges of modeling depth-integrated marine primary productivity over multiple decades: A case study at BATS and HOT. *Global Biogeochem. Cycles*, **24**, GB3020, doi:10.1029/2009GB003655.
- 笹岡晃征, 平澤 享, 齊藤誠一 (2006): 衛星を用いた海洋基礎生産推定の

- 現状と将来の展望. 月刊海洋, **38** (6), 425–432.
- Sathyendranath, S., and T. Platt (1988): The spectral irradiance field at the surface and in the interior of the ocean: A model for applications in oceanography and remote sensing. *J. Geophys. Res.*, **93** (C8), 9270–9280, doi:10.1029/JC093iC08p09270.
- Sathyendranath, S., and T. Platt (2007): Spectral effects in bio-optical control on the ocean system. *Oceanologia*, **49**, 5–39.
- Sathyendranath, S., T. Platt, and M.-H. Forget (2007): Oceanic primary production: Comparison of models, p. 1-3. In *OCEANS 2007-Europe*, IEEE, Aberdeen, doi: 10.1109/OCEANSE.2007.4302468
- Siegel, D. A., S. Maritorena, N. B. Nelson, D. A. Hansell, and M. Lorenzi-Kayser (2002): Global distribution and dynamics of colored dissolved and detrital organic materials. *J. Geophys. Res.*, **107** (C12), 3228, doi: 10.1029/2001JC000965.
- Smith, R. C., and K. S. Baker (1978): The bio-optical state of ocean waters and remote sensing. *Limnol. Oceanogr.*, **23** (2), 247–259, doi:10.4319/lo.1978.23.2.0247.
- Smith, R. C., R. W. Eppley, and K. S. Baker (1982): Correlation of primary production as measured aboard ship in Southern California coastal waters and as estimated from satellite chlorophyll images. *Mar. Biol.*, **66**, 281–288, doi:10.1007/BF00397033.
- Smyth, T. J., G. F. Moore, T. Hirata, and J. Aiken (2006): Semianalytical model for the derivation of ocean color inherent optical properties: description, implementation, and performance assessment. *Appl. Opt.*, **45** (31), 8116–8131, doi:10.1364/AO.46.000429.
- Smyth, T. J., G. H. Tilstone, and S. B. Groom (2005): Integration of radiative transfer into satellite models of ocean primary production. *J. Geophys. Res.*, **110** (C10), C10014, doi:10.1029/2004JC002784.
- Steemann Nielsen, E. (1952): The use of radioactive carbon (C^{14}) for measuring organic production in the sea. *J. Cons. Int. Explor. Mer.*, **18**, 117–140, doi:10.1093/icesjms/18.2.117.
- Stramski, D., R. A. Reynolds, M. Kahru, and B. G. Mitchell (1999): Remote Sensing Estimation of Particulate Organic Carbon in the Ocean from Satellite Remote Sensing. *Science*, **285**, 239–242, doi:10.1126/science.285.5425.239.
- Talling, J. F. (1957): The phytoplankton population as a compound photosynthetic system. *New Phytol.*, **56** (2), 133–149, doi:10.1111/j.1469-8137.1957.tb06962.x.
- Uitz, J., H. Claustre, B. Gentili, and D. Stramski (2010): Phytoplankton class-specific primary production in the world's oceans: Seasonal and interannual variability from satellite observations. *Global Biogeochem. Cycles*, **24**, GB3016, doi:10.1029/2009GB003680.
- Volk, T., and M. I. Hoffert (1985): Ocean carbon pumps: Analysis of relative strengths and efficiencies in ocean-driven atmospheric CO_2 changes, p. 99–110. In *The Carbon Cycle and Atmospheric CO_2 : Natural Variations Archean to Present*, edited by E. T. Sundquist and W. S. Broecker, American Geophysical Union, Washington, D. C., doi:10.1029/GM032p0099.
- Werdell, P. J., B. A. Franz, S. W. Bailey, G. C. Feldman, E. Boss, V. E. Brandt, M. Dowell, T. Hirata, S. J. Lavender, Z. Lee, H. Loisel, S. Maritorena, F. Mélin, T. S. Moore, T. J. Smyth, D. Antoine, E. Devred, O. H. F. D'Andon, and A. Mangin (2013): Generalized ocean color inversion model for retrieving marine inherent optical properties. *Appl. Opt.*, **52** (10), 2019–2037, doi:10.1364/AO.52.002019.
- Westberry, T., M. J. Behrenfeld, D. A. Siegel, and E. Boss (2008): Carbon-based primary productivity modeling with vertically resolved photoacclimation. *Global Biogeochem. Cycles*, **22**, GB2024, doi:10.1029/2007GB003078.
- Yoder, J. A., L. P. Atkinson, S. S. Bishop, J. O. Blanton, T. N. Lee, and L. J. Pietrafesa (1985): Phytoplankton dynamics within Gulf Stream intrusions on the southeastern United States continental shelf during summer 1981. *Cont. Shelf Res.*, **4**, 611–635, doi:10.1016/0278-4343(85)90033-0.

Estimation of ocean primary production from satellite remote sensing

Toru Hirawake^{1*}, Shintaro Takao², Koji Suzuki³, Jun Nishioka⁴,
Yutaka W. Watanabe³ and Tomonori Isada⁵

Abstract

Accurate estimations of ocean primary production by phytoplankton at large spatial and temporal scales are essential to determine variations in marine biogeochemical cycles and ecosystems. Consequently, satellite ocean color remote sensing has been used to estimate primary productivity on a global scale. This paper reviews the development of models for primary productivity retrieval from satellite data and summarizes the available literature on long-term variations in ocean color chlorophyll and primary production. Although chlorophyll-based models are often applied to estimate primary productivity, carbon- and light absorption-based models were developed recently to reduce errors due to satellite chlorophyll *a* data attributed to packaging effect and the influence of suspended and colored dissolved organic matter. Furthermore, correcting drift in ocean color data and gaps among ocean color satellite missions is necessary to achieve adequate evaluations of long-term variations in ocean color chlorophyll and primary production.

Key words : Ocean color remote sensing, phytoplankton, primary production, chlorophyll *a*

(Corresponding author's e-mail address : hirawake@fish.hokudai.ac.jp)
(Received 23 September 2016 ; accepted 24 January 2017)
(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2017)

1 Faculty of Fisheries Sciences, Hokkaido University, 3-1-1 Minato-cho, Hakodate 041-8611, Japan

2 National Institute of Polar Research, 10-3 Midori-cho, Tachikawa, Tokyo 190-8518, Japan

3 Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University, North 10 West 5, Kita-ku, Sapporo 060-0810, Japan

4 Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, North 19 West 8, Kita-ku, Sapporo 060-0819, Japan

5 Field Science Center for Northern Biosphere, Hokkaido University, Aikappu 1, Akkeshi-cho, Akkeshi-gun, Hokkaido 088-1113, Japan

* Corresponding author : Toru Hirawake

Tel and FAX : +81138408844

e-mail : hirawake@fish.hokudai.ac.jp