

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00513

研究課題名(和文)画像処理技術と生物光学を融合した新型海洋一次生産者別基礎生産算出アルゴリズム

研究課題名(英文)A novel algorithm to estimate marine primary production using bio-optics and image processing

研究代表者

平田 貴文(HIRATA, Takafumi)

北海道大学・地球環境科学研究所・特任准教授

研究者番号：80576231

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、地球海洋に生息する植物プランクトンの光合成速度を、地球観測衛星を用いて推定する新たな技術を開発した。この技術は、生物学と光学と画像処理技術を組み合わせた、これまでにない新たな技術である。この技術を利用して、実際の地球観測衛星のデータを10年間分解析すると、光合成速度やその変動の要因は植物プランクトンの分類群ごとに異っていた。特に、珪藻と呼ばれる植物プランクトンでは、その生物量の変化が光合成速度の変動に重要であるが、藍藻では光生理が重要であると考えられた。ハプト藻は、いわばその中間で、生物量と光生理の両方の影響が見られる結果を得た。このような知見は今までになく、本研究の成果である。

研究成果の概要(英文)：A satellite remote sensing algorithm was developed to estimate the group-specific primary production of marine phytoplankton. A novelty of the algorithm is that it integrates bio-optical modeling with image processing. Analysis of the 10-year long satellite data of the group-specific primary production obtained from the new algorithm showed that 1) the photosynthetic rate is different among the groups and 2) factors affecting variability of the photosynthetic rate also differ among the groups: the photosynthetic rate of diatoms are mainly regulated by their biomass, whereas that of cyanobacteria by photo-physiology. The rate of haptophytes are affected by both their biomass and photo-physiology, depending on season/months in consideration.

研究分野：リモートセンシング

キーワード：リモートセンシング 海色 植物プランクトン 一次生産 生物光学

### 1. 研究開始当初の背景

人工衛星から可視光を用いて地球海洋を観測する遠隔探査(衛星海色リモートセンシング)は、海洋一次生産速度を衛星観測できる可能性があり、これまで研究が進められてきた(例: Behrenfeld et al., 1998)。近年では、海洋一次生産者(植物プランクトン)の分類も衛星観測を用いて行われるようになり(例: Alvain et al., 2004; Uitz et al., 2006; Brewin et al., 2010; Hirata et al., 2011)、それら分類群別の一次生産速度を推定できる可能性が生まれてきた。一方、これまでの海色リモートセンシングによる一次生産速度の推定は、生物光学的手法が利用されている(例: Behrenfeld et al., 1998; Westberry et al., 2005; Uitz et al., 2008)。生物光学的手法は模式化(数式モデル化)が簡単であるが、模式中の各種パラメータを適切に決定することが難しく、結果として群集別の一次生産推定への応用は行いにくいものとなっている。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、衛星海色リモートセンシングにより、海洋の植物プランクトンの群集別一次生産速度を推定する方法を開発し、世界の宇宙機関などによる技術開発の可能性を判断するための材料を提供することを目的とする。さらに、新たに得られた方法で、群集別一次生産速度の衛星データを解析することにより、その時空間分布を評価し、また、その変動要因を生理生態学的視点から明らかにすることを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では、これまでの行われてきた生物光学的手法に加え、異分野技術である画像処理技術を取り入れる新しい方法を開発し、従来の手法では解決が難しかった問題点を克服する。

#### (1) 一次生産速度の生物光学模式

全植物プランクトン群集の一次生産速度( $PP$ )を各群集による成分( $PP_i$ 、添字  $i$  は各群集を示すインデックスで 1:珪藻, 2:ハプト藻, 3:藍藻)に分解すると以下の式となる。

$$PP = PP_o + \sum PP_i = PP_o + (k_i \Phi_i PAR a_{ph,i}) \quad \text{式(1)}$$

ここで  $PP_o$  は上記 3 群集以外の  $PP$ 、 $\Phi_i$  は光合成量子収率[mol C / mol quanta]、 $PAR$  は光合成有効放射[mol quanta/m<sup>2</sup>/d]、 $a_{ph,i}$  は  $PAR$  領域における各植物プランクトン群集の波長別光吸収係数の平均値[1/m]、 $k_i$  は各群集に対して定義される比例係数[-]であり、 $PP_i = k_i \Phi_i PAR a_{ph,i}$  である。従来の手法では、各  $PP_i$  に関するパラメータ群をあらかじめ仮定しなければならないという問題がある。図 1 によると、 $a_{ph,i}$  は、特定波長  $\lambda$  (す

なわち、510 nm)の光吸収係数値に一致する。したがって、 $PP_i$  を求めるには、 $k_i$ 、 $\Phi_i$ 、 $PAR$  および  $a_{ph,i}(510)$  が分からなければならない。このうち、 $PAR$  はすでに衛星から得られる量である(例:Frouin et al., 2002)。本研究では、 $PAR$  を除くこれら変数を取得する方法を、画像技術を応用して開発する。

#### (2) 群集別光吸収係数

群集別ではない、全群集の 510nm における光吸収係数( $a_{ph}(510)$ )は、すでに衛星から得られる量である(e.g. Smyth et al., 2006; Werdell et al., 2010)。以降、表示簡略化のため、波長依存性の表記はしない(例:  $a_{ph}(510)$  は単に  $a_{ph}$  と示す)。群集別に全群集の(510nm における)光吸収係数を分解すると

$$a_{ph} = a_{ph,o} + \sum (a_{ph,i}^* Chla_i) \quad \text{式(2)}$$

となる。ここで、 $a_{ph,i} = a_{ph,i}^* Chla_i$  で、 $a_{ph,o}$  は前述 3 群集以外の 510nm における  $a_{ph}$ 、 $a_{ph,i}^*$  は各群集の 510nm におけるクロロフィル-a に対する吸収係数[m<sup>2</sup>/mgChla]、 $Chla_i$  は各群集のクロロフィル-a [mg/m<sup>3</sup>]である。 $Chla_i$  は Hirata et al. (2011)により、衛星から得られる量である。よって、衛星データとして利用可能な  $a_{ph}$  と  $Chla_i$  との間での重回帰分析をすることにより  $a_{ph,i}^*$  を重回帰係数として得る。その結果を利用し、 $a_{ph,i} = a_{ph,i}^* Chla_i$  を得る。

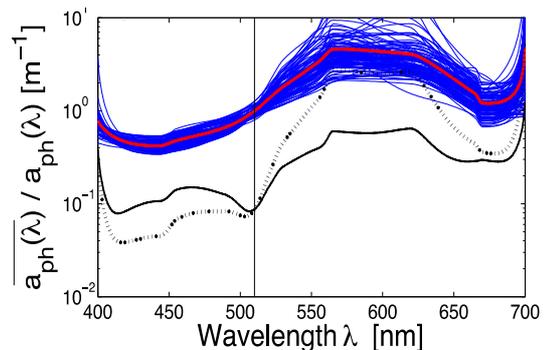


図 1. NASA による全球現場データセット(NOMAD)より得られた、 $PAR$  領域の波長別光吸収係数( $a_{ph}$ )とそれらの平均値  $\bar{a}_{ph}$  との比(青実線):波長別比の平均(赤実線);標準偏差(黒点線);変動係数(黒実線)。波長 510nm で比は 1.0 に近く、かつ、変動係数も最小であることから、510nm における  $a_{ph}$  は近似的に  $\bar{a}_{ph}$  を代表する。

#### (3) 群集別一次生産

前節の方法で得られる  $a_{ph,i}$  を式(1)に代入することを考える。今、 $PP$  と  $a_{ph,i}$  (および  $PAR$ ) は衛星から得られる量である。 $PP$  と  $PAR \cdot a_{ph,i}$  の間で重回帰分析を行うことにより、光合成量子収率指標である  $k_i \Phi_i$  を重回帰係数として得る。結果として、 $PP_i = k_i \Phi_i PAR a_{ph,i}$  が衛星から得られる。

#### (4) 画像処理技術の応用

上記の $a_{ph,i}$ および $PP_i$ の導出は重回帰分析で行う。同一時刻に同一の場所で衛星観測された画像データ( $PP, PAR, a_{ph}, Chla_i$ )を用いることで、その重回帰分析は可能となる。衛星観測は通常数多くの観測点を一度にカバーするので、重回帰に必要なデータ数は、通常、容易に確保できる。一方、各変数(式1では、 $PP$ と $a_{ph,i}$ 、式2では $a_{ph}$ と $Chla_i$ )について、画像1 scene内に含まれる全てのデータ(各衛星観測点あるいは各画素におけるデータ)を使って重回帰を行うと、衛星観測された領域全体に対し、1セットの重回帰係数しか得られない。そこで、衛星から得られる各変数( $PP, PAR, a_{ph}, Chla_i$ )の同一時刻・同一領域 scene内で、それらに共通するサブ領域(例えば5x5画素で定義される領域)を切り出し、その共通領域に対して重回帰分析を行うと、サブ領域に対する $PP_i$ が得られる。そのScene内でサブ領域を順次移動させて重回帰分析を繰り返すような画像処理を行うことにより、結果として $PP_i$ の画像が作成できる。

#### (5) 一次生産速度の変動要因

一次生産速度は、光合成量子収率や植物プランクトンの光吸収係数に比例する。光生理の指標である光合成量子収率や、生物量に強く依存する光吸収係数の変動が、どのように一次生産速度の変動に寄与しているかを評価するために、衛星観測から得られた(規格化された)一次生産速度を目的変数、同様に得られた(規格化された)光合成量子収率と光吸収係数を説明変数として、月別気候値を利用してそれぞれの月で重回帰分析を行う。得られた重回帰係数間の比較により、各説明変数の一次生産速度への相対的貢献度を月別に評価する。

### 4. 研究成果

#### (1) 群集別一次生産の地理分布

図2に珪藻、ハプト藻、および藍藻の $PP_i$ (a-c)、 $k_i\Phi_i$ (d-f)、および $a_{ph,i}^*$ (g-i)の2002年の例を示す。どの群集とも、亜熱帯循環域で低い $PP_i$ を示している。珪藻およびハプト藻では高緯度域や大陸沿岸域で高い $PP_i$ を示した。全球規模ではハプト藻の $PP_i$ は珪藻の $PP_i$ を上回った。

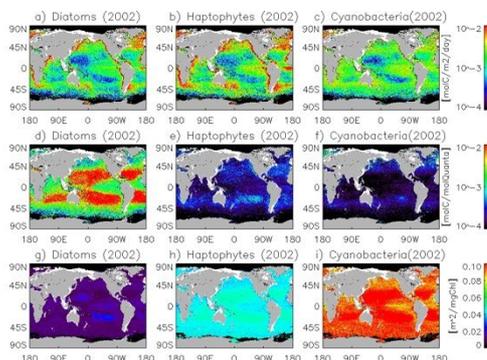


図2. 群集別一次生産(a-c)、光合成量子収率指標(d-f)、およびビクロロフィル光吸収係数(g-i); 左段)珪藻、中段)ハプト藻、右段)藍藻

また、量子収率指数 $k_i\Phi_i$ では珪藻>ハプト藻>藍藻の順で大きかった。一方で、 $a_{ph,i}^*$ はその逆となり、藍藻>ハプト藻>珪藻であった。 $PP_i$ や $k_i\Phi_i$ の現場観測は極めて難しいが、 $a_{ph,i}^*$ は珪藻をマイクロプランクトン(>20 $\mu\text{m}$ )、ハプト藻をナノプランクトン(20 $\mu\text{m}$ > $x$ >2 $\mu\text{m}$ )、藍藻をピコプランクトン(<2 $\mu\text{m}$ )と仮定すると、近似的測定値が得られる(例: Ciotti et al., 2002)。これらと比較すると、本研究で得られた $a_{ph,i}^*$ は藍藻>ハプト藻>珪藻となっており、近似的測定値と定性的によく一致した。

#### (2) 群集別一次生産速度の変動要因

日本近海の各植物プランクトン群集における、光合成量子収率と光吸収係数の一次生産速度に対する重回帰係数の季節変化(1月から12月)を図3に示す。日本近海において、植物プランクトンの一次生産の変動は、異なるグループで異なる要因に強く影響を受けていることがわかる。つまり、珪藻類の一次生産速度の変動はその生物量の変動に強く依存しているのに対し、藍藻ではその生物量の変動は光生理(光合成量子収率)の変動に強く依存していた。これらの結果は、季節性が多少みられたものの、総じて年間を通して見られるものであった。一方で、ハプト藻の一次生産速度の変動は複雑であり、季節によりその変動要因が異なることが示された。つまり、冬季(11月以降、翌年3月まで)には、ハプト藻の一次生産速度の変動はその光生理の変動に強く影響を受けている一方、春季から秋季(4月から10月まで)では生物量の変動と光生理の変動が共に同等程度に一次生産速度の変動へ寄与していた。生物量の変動は動物プランクトンによる捕食などの効果も考えられる一方、光生理には海洋環境(日射など)の影響が含まれると考えられるので、結果として、海洋の一次生産変動機構の解明には、植物プランクトンをグループ別に分けて考える必要がある可能性が示唆された。

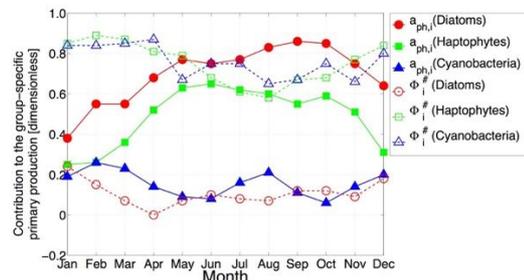


図3. 日本近海の植物プランクトン群集別の一次生産速度に対する光合成量子収率

(光生理指標)と光吸収係数(生物量指標)の相対的寄与(重回帰係数)。(Hirata and Suzuki, 2017)。

<引用文献>

- Behrenfeld, M.J. and P.G. Falkowski, photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration, *Limnology and Oceanography*, 42, 1997, 1-20.
- Alvain et al., Remote sensing of phytoplankton groups in case 1 waters from global SeaWiFS imagery. *Deep-Sea Research I* 1 (52), 1989–2004.
- Frouin, R., McPherson, J., Ueyoshi, K., and Franz, B. A.: A time series of photosynthetically available radiation at the ocean surface from SeaWiFS and MODIS data. *Rem. Sens. Mar. Environ* II, 2012, <http://dx.doi.org/10.1117/12.981264>.
- Uitz et al., Vertical distribution of phytoplankton communities in open ocean: an assessment based on surface chlorophyll. *Journal of Geophysical Research* 111, 2006, CO8005.
- Brewin et al., A three component model of phytoplankton size class for the Atlantic Ocean, *Ecological Modelling*, 221, 2010, 1472-1483.
- Hirata et al., Synoptic relationships between the surface chlorophyll a and diagnostic pigments specific to phytoplankton functional types, *Biogeosciences*, 8, 2011, 311-327.
- Westberry et al., Carbon-based primary productivity modeling with vertically resolved photoacclimation, 22, 2005, *Global Biogeochemical Cycles*, GB2024, doi:10.1029/2007GB003078.
- Uitz et al., Relating phytoplankton physiological properties to community structure on large scale, *Limnol. Oceanogr.*, 53, 2008, 614–630.
- Smyth, T. J., Moore, G. F., Hirata, T., and Aiken, J.: Semianalytical model for the derivation of ocean color inherent optical properties: description, implementation, and performance assessment. *App. Opt.*, 45, 2006, 8116-8131.
- Werdell, P. J., B. A. Franz, S. W. Bailey, G. C. Feldman, E. Boss, V. E. Brando, M. Dowell, T. Hirata, S. J. Lavender, Z. P. Lee, H. Loisel, S. Maritorena, F. Melin, T. S. Moore, T. J. Smyth, D. Antoine, E. Devred, O. H. F. d'Andon, A. Mangin. Generalized ocean color inversion model for retrieving marine inherent optical properties, *Appl. Opt.*, 52, 2013, 2019-2037.

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- Bracher, A., H. Bouman, R. J. W. Brewin, A. Bricaud, V. Brotas, A. M. Ciotti, L. Clementson, E. Devred, A. Di Cicco, S. Dutkiewicz, N. Hardman-Mountford, A. E. Hickman, M. Hieronymi, T. Hirata, S. N. Losa, C. B. Mouw, E. Organelli, D. E. Raitsos, j. Uitz, M. Vogt, A. Wolanin, Obtaining Phytoplankton Diversity from Ocean Color, *Frontiers in Marine Science*, 査読有, 2017, <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00055>
- Kostadinov, T. S., A. Cabre, H. Vedantham, I. Marinov, A. Bracher, R.J.W. Brewin, A. Bricaud, T. Hirata, T. Hirawake, N.J. Hardman-Mountford, C. Mouw, S. Roy, J. Uitz, Inter-comparison of phytoplankton functional type phenology metrics derived from ocean color algorithms and Earth System Models, *Remote Sensing of Environment*, 査読有, 190, 2017, pp.162-177, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2016.11.014>
- Hirata, T. and K. Suzuki, Seasonal effects of photophysiology and chlorophyll-a abundance on phytoplankton group-specific primary production in the Kuroshio region as revealed by SeaStar/SeaWiFS, 査読なし, *Biogeosciences Discussion*, 2017, <http://dx.doi.org/10.5194/bg-2017-164>
- Aiken, J., R.J.W. Brewin, F. Dufois, L. Polimene, N.J. Hardman-Mountford, T. Jackson, B. Loveday, S.M. Hoya, G. Dall'Olmo, J. Stephens, T. Hirata, *Progress in Oceanography*, 査読有, 158, 2017, pp.236-254, <https://dx.doi.org/10.1016/j.pocean.2016.08.004>
- 平田貴文、鈴木光次、衛星からみる黒潮域の植物プランクトン群集別一次生産速度, *海洋と生物*, 査読なし, Vol 37, No.5, 2015, pp.478-485.

[学会発表] (計 4 件)

- 平田貴文、山下洋平、Nick Hardman-Mountford, Astrid Bracher, Artur Palacz, 松岡敦、相田(野口)真希、Seung-Hyun Son、気候変動観測ミッション多波長光学放射計のための海洋生物・生物地球化学変数の衛星観測技術開発、日本海洋学会春季大会, 2016
- Hirata, T. and K. Suzuki, Remote sensing of taxon-specific primary productivity and quantum yield of photosynthesis, The 3<sup>rd</sup> Asian Workshop on Ocean Color, 2016

Hirata, T. and K. Suzuki, Development of new ocean colour products: moving toward estimation of phytoplankton photophysiology, Japan Geoscience Union 2016 Meeting, 2016

Hirata, T. and K. Suzuki, Phytoplankton group-specific size structure and primary production in the Kuroshio waters by satellite observation, Japan Geoscience Union 2017 Meeting, 2017

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

出願状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

平田 貴文 (HIRATA, Takafumi)  
北海道大学・地球環境科学研究院・特任  
准教授

研究者番号： 80576231

##### (2) 研究分担者

なし

##### (3) 連携研究者

なし

##### (4) 研究協力者

村上 浩 (MURAKAMI, Hiroshi)