

衛星海色データから求めた水柱光吸収量の 基礎生産量推定への応用

報告者 北海道大学大学院水産科学研究院・平譚 享

1. 要旨

2016年11月15日から12月3日にかけて、米国カリフォルニア大学サンディエゴ校スクリプス海洋研究所のRobert Frouin博士を北海道大学大学院水産科学研究院に招聘した。本招聘の目的は、Frouin博士が開発中の「海色による水柱全体への光エネルギー吸収量(APAR)」を、平譚が進める「海色による水柱積算基礎生産量推定」に応用し、OMIXで使用する海洋基礎生産推定方法を高度化するためである。本招聘期間中、APARに関する研究論文等の収集と他のアルゴリズムとの違いを整理し、昨年度から始めている予備的解析結果の評価を行うとともに、今後の解析に向けて必要なパラメータの洗い出しと解析方法を検討した。

2. 研究の背景

「新海洋混合学」の計画班A02-3では、衛星観測による基礎生産量の時空間変動と栄養物質の循環との関連を明らかにすることを目的としている。その達成のためには、衛星データを利用した、より高精度の基礎生産量推定が必要となる。

基礎生産量を衛星データから推定する場合、主に可視域リモートセンシング(海色リモートセンシング)データを利用し、現場データに基づいて構築された経験的モデルに入力することによって基礎生産量を推定する。その経験的モデルとして、過去には光合成光曲線(P-Eカーブ)を利用したもの(例えば、Platt and Sathyendranath, 1988)、植物プランクトンのクロロフィル *a* 濃度、光合成量子収率(定数)および海面の光合成有効放射(PAR)を単純に掛けたもの(例えば、Falkowski, 1981)等が存在した(基礎生産量推定の基本とその他の文献については、Behrenfeld and Falkowski (1997a), Lee et al.

(2015)、笹岡ら(2006)を参照)。その後、海面クロロフィル *a* 濃度と、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, Behrenfeld and Falkowski, 1997b)が多用されるようになった。

しかしながら、VGPMの海面水温による光合成活性推定値は、低温海域においてその推定誤差に温度依存性を示すことが確認された(Hirawake et al., 2011)。さらに、衛星によるクロロフィル *a* 濃度推定は、懸濁物や有色溶存有機物、あるいは、植物プランクトンのパッケージ効果(色素が重なりあって、単位クロロフィル *a* 濃度あたりの光吸収係数が小さくなる)によって、過大評価または過小評価されることが数多く報告されている。

これらの問題を解決するための代替方法として、植物プランクトン光吸収係数の利用が挙げられる。光吸収係数は、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、海面の光吸収係数と海面付近の最大基礎生産量との間には、海域を問わず直線関係があることを示した。

この直線関係を利用し、Hirawake et al., (2011; 2012)は、VGPMにおける光合成活性とクロロフィル *a* の項を光吸収係数(a_{ph})の関数に置き換えたアルゴリズムを南大洋およびベーリング・チャクチ海について開発した。光吸収係数を利用することは、栄養塩、光条件など水温以外の外的海洋環境に対する応答を含めた植物プランクトンの光合成活性の変化として捉えられるため、海面水温の関数として求めたものよりも生物学的な意味合いが強い。さらにクロロフィル *a* 濃度推定の不確実性を排除することが可能となった。

以上のように、衛星によって基礎生産量を推定するモデルは改良されたものの、根本的には VGPM を基礎としており、鉛直方向の積算については完全に VGPM に依存している。したがって、クロロフィル *a* の推定に起因する誤差は軽減できるものの、VGPM による鉛直積算方法は何らかの誤差を生じさせる可能性がある。

そこで、Frouin 博士が開発中の水柱全体の植物プランクトンによる光吸収量 (APAR: Absorbed PAR) 推定を、基礎生産量推定に応用することにより、鉛直積算に関しても VGPM に頼らないモデルに改良することを検討した。

3. 実施内容と成果

1) 関連研究論文の整理と理論

2016 年 11 月 16 日から 22 日にかけて、APAR および衛星基礎生産推定に関連する文献を整理・分類するとともに、APAR の光学的理論と海洋への応用について以下の議論を行った。

APAR はもともと陸域の基礎生産量を推定するために利用しているパラメータであり (例えば Field et al. 1998), その関係は以下のように表される:

$$PP = \varepsilon \times APAR = \varepsilon \times FAPAR \times PAR \quad (1)$$

ここで *PP* は 1 日あたりの純基礎生産量, ε は光合成炭素固定量子収率, *FAPAR* は *PAR* あたりの *APAR* である。陸域の場合、鉛直方向の積算を考慮することは稀であるが、(1) 式を海域に応用するためには、Kirk (1994) にしたがって、水中における放射照度の消散係数と光吸収係数の鉛直分布を考慮し、鉛直方向に積算して *APAR* を計算する必要がある。また、(1) 式は Falkowski, (1981) が提唱したアルゴリズムに類似しているが、クロロフィル *a* を使わずに光学的に同様のモデリングをしているため、光学的な物理量を測定する衛星リモートセンシングによって、より直接的な定量が可能である。

これらの議論と理論について、Frouin 氏がとりまとめ、Review paper 執筆を検討することになった。

2) 予備的解析の評価

本招聘に先立って、NASA bio-Optical Marine Algorithm Dataset (NOMAD) の海面放射照度および海面の光吸収データ ($n=1126$) を利用して APAR と FAPAR を計算した。この場合、クロロフィル *a* バイオマスや光吸収係数は鉛直的に一様分布していることを仮定した。この結果を用い、11 月 24 日から 25 日にかけて、海面反射率による *FAPAR* 推定の可能性を検討した。

FAPAR の実測値と推定値には有意な関係が得られたものの、クロロフィル *a* 濃度が高い海域において *FAPAR* を過小評価する傾向にあった。有色溶存有機物や植物プランクトン以外の懸濁物が極めて少ない場合のシミュレーションや、清澄な海域で得られた鉛直分布を使って同様の解析をした場合は、実測値と推定値は 1:1 に近い関係にあったため、植物プランクトン以外の物質の影響と鉛直分布を一定と仮定した影響が過小評価に関係していると示唆された。

3) 今後の解析について

11 月 28 日以降、今後の解析とそのデータセットについて議論を行った。

光吸収係数の鉛直分布と放射照度の鉛直分布が揃ったデータセットはほとんど存在しない。そのため、海面の光吸収係数とクロロフィル *a* の鉛直分布 (および蛍光の鉛直分布) を使って、光吸収係数の鉛直分布を復元し、APAR を計算することになった。

また、極めて経験的であるが、海面反射率そのものが基礎生産量をどの程度表すかを調べることになった。その後、過去に平澤が収集したものを調べたところ、約 200 観測点分存在した。

以上のデータセットを整理した後、解析を行い、2017 年 5 月にポルトガルで開催される International Ocean Color Science Meeting (IOCS) で再度議論を行うことになった。

4) その他

11 月 29 日から 12 月 2 日にかけて基礎生産によって生じた有機炭素と移流についても議論を行った。さらに、11 月 29 日に海氷

下の基礎生産に関するセミナーを開催した。これらの現象については、衛星から推定することが困難であるため、数値モデルとの融合が重要になるとのことで見解が一致した。

4. 謝辞

Frouin 博士の招聘に際し事務手続き等で大変お世話になりました。東京大学大気海洋研究所の安田一郎教授および小林奈緒美さんに感謝申し上げます。

5. 引用文献

- 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.
- Bricaud, A., A. louse 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.
- Falkowski, P. G. (1981): Light-shade adaptation and assimilation numbers. *J. Plankton Res.*, **3**, 203–216, doi:10.1093/plankt/3.2.203.
- Field C. B., M. J. Behrenfeld, J. T. Randerson, and P. Falkowski (1998): Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, **281**, 237–240, doi: 10.1126/science.281.5374.237
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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的展望. 月刊海洋, **38**(6), 425-432.