

長期海洋環境再現における生物地球化学アルゴデータの活用

課題責任者

増田 周平

海洋研究開発機構 地球環境部門 海洋観測研究センター

著者

増田 周平*, 土居 知将*, 長船 哲史*, 瀨瀬 慎也*

*海洋研究開発機構 地球環境部門 海洋観測研究センター

自動昇降型ブイ「アルゴフロート」の観測システムを活用し生物地球化学変量を感知できるセンサーを搭載した生物地球化学アルゴの全球展開が進みつつある。本研究では、海洋研究開発機構で実施している、四次元変分法データ同化技術を用いた全球の長期海洋環境再現に、これらの新規データがどの程度のインパクトを持ちうるか調べた。フロートから得られた溶存酸素データを対象に、双子データ統合実験を地球シミュレータ上で実施した結果、フロートデータの質が向上するほど、モデル全層で明確なコストの低下が確認できた。このことは力学的整合性を保った同化システムでもフロートデータの拡充が有効であることを示している。

キーワード：海洋，データ同化，海洋混合

1. はじめに

海盆スケールでの海洋環境の変化が社会的に大きな問題になりつつある。その中には海洋酸性化の加速、炭素循環の変化、海洋一次生産量の減少傾向（例えば、Behrenfeld et al., 2006[1]）など、生物地球科学的な要素を含むものも多い。

海洋環境変動を広範に長期的にモニタリングする観測手法として、2000年代からシステムが構築されたアルゴフロートがある（例えば、Argo Scientific Team, 2001[2], Riser et al., 2016[3]）。近年、この観測スキームを生物地球化学変量に応用する観測機器（Biogeochemical Argo float: BGC アルゴフロート）が開発され、全球的な観測網の整備が進んでいる（図1；例えば、Bitting et al., 2019[4]）。

海洋環境変動の理解には観測による把握とそれらを活用したデータ統合を通じたメカニズムの解明が重要である（例えばStammer et al., 2002[5]）。データ同化技術を応用した全球を対象とした観測データの統合（長期海洋環境再現）から多くの知見が得られている（例えば、Osafune et al., 2015[6], 2020[7]）。

本研究では近年、増加してきているBGCアルゴフロートデータを活用し、それらのデータの拡充が海洋環境再現にどのようなインパクトを持ちうるかを調べる。

2. データ

用いた観測データセットは、Argo Information Centerから得られた利用可能なBGCアルゴフロートデータと、UK-MET officeにより編集されたEN4データセットの水温・塩分データ（Good et al., 2013[8]）、およびReynolds, OISSTの海面水温（SST）データ、WOCE, WHP, GO-SHIPクルーズで得られた生物地球化学データである（Osafune et al., 2015[6], Doi et al. 2015[9]）。BGCアルゴフロートデータは、溶存酸素データのみを用い、2002年から2012年までと2002年から2020年までの2つの期間で編集することで、時空間的に疎らなケース1

とより充実したケース2とする（図2）。制御変数としては、酸素窒素比（O/N ratio）と酸素のガス交換係数（ O_2t ）に注目する。

3. グリーン関数法を用いた双子データ統合実験

本研究では、四次元変分法データ同化システムの生物化学変数コンポーネント（図3：Doi et al., 2015[9]）と同様の設定でケース1、ケース2の同化データだけ換装した双子実験を行う。モデルパラメタの最適化はグリーン関数法を応用した（Menemenlis et al., 2015[10]）。

4. 結果

双子データ統合実験の結果を図4に示す。データ統合前後の溶存酸素のフロート観測値とモデル予報値との差の全球平均した鉛直分布では全層にわたり明確な差の減少がみられる。

ケース1の場合、統合前には145m深で $55 \mu\text{mol/L}$ 程度の濃度だったが、データ統合後は $18 \mu\text{mol/L}$ 程度まで減少している。一方のケース2では、統合前には同じく145m深で $38 \mu\text{mol/L}$ 程度の濃度だったが、データ統合後は $5 \mu\text{mol/L}$ 程度まで減少し、データ統合の結果が力学的な整合性を保ちながらも観測に大きく近づいていることがわかる。

ケース1とケース2のデータセットを使ったデータ統合実験結果の100m深での溶存酸素2次元分布を図5に示す。この深度では全体の濃度が観測に近づき、データ統合しない結果に比べて小さくなっていることに加え、熱帯、亜熱帯、亜寒帯のコントラストなどがより現実的に再現されていることがわかる。

これらはモデルパラメタのO/N ratioと O_2t がデータ統合前の値、8.625, 0.200からケース1では9.243, 0.182に、ケース2では9.091, 0.186にそれぞれ最適化された結果である。これらのパラメタ値は必ずしも実験室での値と整合的ではなく、モデル表現誤差などが最適値に人工的に反映している可能性がある。また、実験

室での設定が全球外洋域すべてにあてはまり得るのかなどを含め、得られた最適パラメタの時空間的な依存可能性、ここでの最適パラメタの値そのものと、表現している力学的な意味の解釈をさらに進める必要がある。

文献

[1] Behrenfeld, M., O'Malley, R., Siegel, D. et al. "Climate-driven trends in contemporary ocean productivity", *Nature* **444**, 752–755, doi:10.1038/nature05317, 2006.

[2] Argo Science Team, "Argo: The global array of profiling floats, in Observing the Oceans in the 21st Century", edited by C. J. Koblinsky and N. R. Smith, pp. 248–258, GODAE Project Office, Bureau of Meteorology, Melbourne, 2001.

[3] Riser, S.C., Freeland, H. J., Roemmich, D. et al., "Fifteen years of ocean observations with the global Argo array", *Nature Climate Change*, **6**, 145–153. doi:10.1038/NCLIMATE2827, 2016.

[4] Bittig HC, Maurer TL, Plant JN, Schmechtig C, Wong APS, Claustre H, Trull TW, Udaya Bhaskar TVS, Boss E, Dall’Olmo G, Organelli E, Poteau A, Johnson KS, Hanstein C, Leymarie E, Le Reste S, Riser SC, Rupan AR, Taillandier V, Thierry V and Xing X, "A BGC-Argo Guide: Planning, Deployment, Data Handling and Usage", *Front. Mar. Sci.* **6**, 502, doi: 10.3389/fmars.2019.00502, 2019.

[5] Stammer, D., C. Wunsch, R. Giering, C. Eckert, P. Heimbach, J. Marotzke, A. Adcroft, C. N. Hill, and J. Marshall, "Global ocean circulation during 1992-1997, estimated from ocean observations and a general circulation model", *J. Geophys. Res.*, **107**, C9, 3118, 2002.

[6] Osafune, S., Masuda, S., Sugiura, N., Doi, T., "Evaluation of the applicability of the Estimated Ocean State for Climate Research (ESTOC) dataset", *Geophys. Res. Lett.* **42** (12), 4903–4911, doi:10.1002/2915GL064538, 2015.

[7] S. Osafune, S., S. Kouketsu, S. Masuda, N. Sugiura, "Dynamical ocean response controlling the eastward movement of a heat content anomaly caused by the 18.6-year modulation of localized tidally-induced mixing", *Journal of Geophysical Research -Oceans*, doi:10.1029/2019JC015513, 2020.

[8] Good, S. A., Martin, M. J., Rayner, N. A., "EN4: quality controlled ocean temperature and salinity profiles and monthly objective analyses with uncertainty estimates", *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **118**, 6704-6716, doi:10.1002/2013JC009067, 2013.

[9] Doi, T., S. Osafune, N. Sugiura, S. Kouketsu, A. Murata, S. Masuda, and T. Toyoda, "Multi-decadal change in the dissolved inorganic carbon in a long-term ocean state estimation", *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **7**, 4, 1885-1990, DOI:10.1002/2015MS000462, 2015.

[10] Menemenlis, D., I. Fukumori, and T. Lee, "Using Green's functions to calibrate an ocean general circulation model", *Mon. Weather Rev.*, **133**, 1224–1240, 2005.

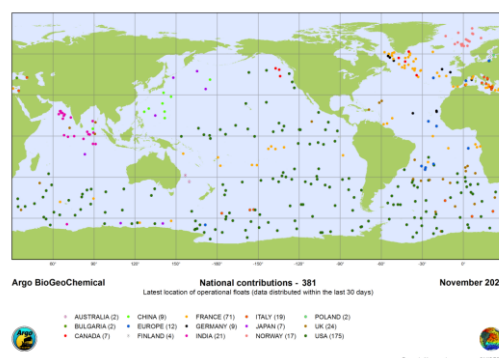


図1 BGC アルゴフロートデータの分布図。2020年11月の国別分布。総台数は381台。アルゴインフォメーションセンターによる。

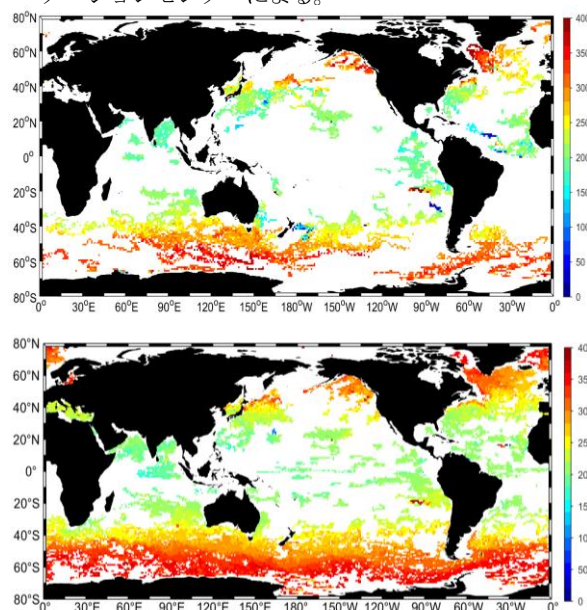


図2 双子実験に用いたケース1（上）とケース2（下）のデータセットによる溶存酸素の2次元分布。単位はμmol/L。

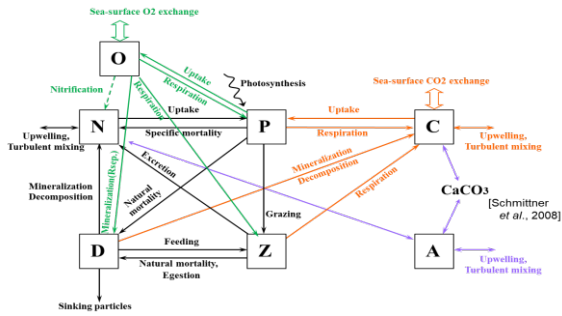


図3 用いたデータ統合システムの生物地球化学コンポーネントの模式図。

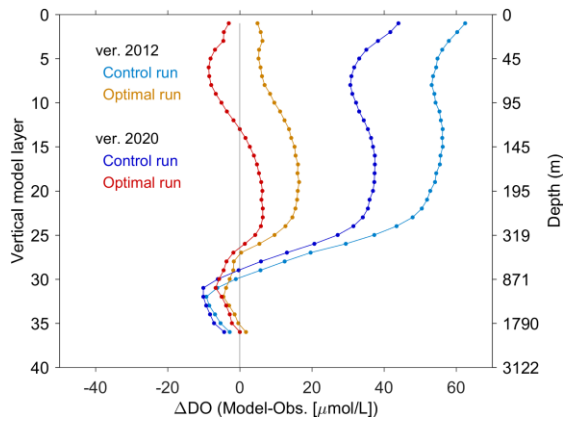


図4 データ統合前後の溶存酸素の観測値との差。全球平均した鉛直分布。ケース1の前(空色)、後(橙)、およびケース2の前(青)、後(赤)。0-3122mまで。単位は $\mu\text{mol/L}$ 。

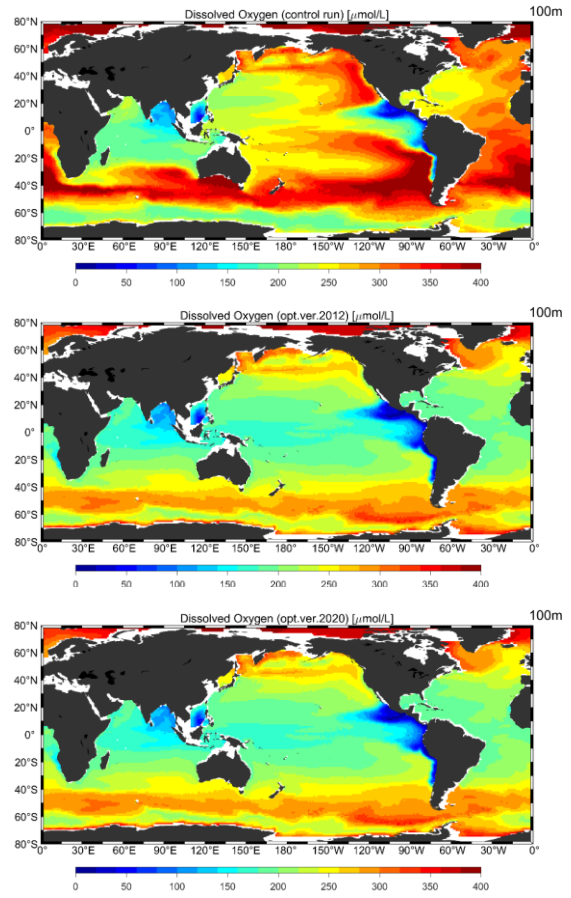


図5 データ統合された溶存酸素の100m深での分布。統合前の結果(上)と、ケース1(中)およびケース2(下)のデータを用いた結果。単位は $\mu\text{mol/L}$ 。

Potential of Biogeochemical Argo Fleet in Improving Global Ocean State Estimation

Project Representative

Shuhei Masuda

Global Ocean Observation Research Center, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Authors

Shuhei Masuda *, Toshimasa Doi *, Satoshi Osafune *, Shinya Kouketsu *

* Global Ocean Observation Research Center, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

The global deployment of Biogeochemical Argo (BGC Argo), which is equipped with sensors that can detect biogeochemical variables is in progress. In this study, we investigated the impact of these new data on the representation of the global long-term ocean state estimation using the four-dimensional variational data assimilation technique. A twin data synthesis experiment was conducted on the Earth Simulator for dissolved oxygen data obtained from floats, and the results showed a clear decrease in cost function for all layers of the model as the quality of the float data improved. This indicates that the further deployment of the BGC Argo can be effective in a dynamically consistent assimilation system.

Keywords : ocean, data assimilation, Biogeochemical Argo

1. Introduction

Changes in the global ocean environment are becoming a major societal issue. Many of them relates to biogeochemical components, such as accelerated ocean acidification, changes in the carbon cycle, and declining trends in ocean primary production (e.g., Behrenfeld et al., 2006[1]).

An observation method for extensive long-term monitoring of ocean environmental changes is the Argo Float, whose system has been established since the 2000s (e.g., Argo Scientific Team, 2001[2], Riser et al., 2016[3]). Recently, instruments that apply this observation scheme to biogeochemical variables (Biogeochemical Argo floats: BGC Argo floats) have been developed, and a global observation network is being developed (e.g., Bitting et al., 2019[4]).

To understand ocean environmental changes, it is important to understand them through observations and to elucidate the mechanisms through data integration using these observations (e.g., Stammer et al., 2002[5]). Many findings have been obtained from the integration of global observation data (long-term ocean state estimation) using data assimilation techniques (e.g., Osafune et al., 2015[6], 2020[7]).

In this study, we utilize BGC Argo float data, which has been increasing in recent years, and investigate how the coverage of these data can have an impact on state estimations.

2. Data

The observational datasets used were available BGC Argo float data from the Argo Information Center, temperature and salinity data from the EN4 dataset compiled by the UK-MET office (Good et al., 2013[8]), sea surface temperature (SST)

data from Reynolds, OISST. The BGC Argo float data we used is only dissolved oxygen data and edited for two time periods, 2002-2012 and 2002-2020, to make a spatiotemporally sparse case (Case 1) and a higher coverage case (Case 2). As control variables, we focus on the oxygen-nitrogen ratio (O/N ratio) and the gas exchange coefficient of oxygen (O₂t).

3. Twin experiment implementation

In this study, we perform twin experiments with Case 1 and Case 2 assimilation data independently on the basis of Doi et al., (2015[9]). The Green's function method was applied to optimize the model parameters (Menemenlis et al., 2015[10]).

4. Result and Discussion

The results of the twin data synthesis experiment are shown in Figure 1. It shows the two-dimensional distribution of dissolved oxygen at 100-m depth for the results of the twin data-synthesis experiments using the Case 1 and Case 2 datasets. Comparing two cases with the result of without data synthesis, we can see the overall concentration is well controlled and closer to the observation. In addition, the contrast between tropical, subtropical, and subarctic zones is reproduced more realistically. The cost of dissolved oxygen (difference between observation and model) of Case 2 is smaller than that of Case 1. This indicates that the further deployment of the BGC Argo is potentially effective in a dynamically consistent assimilation system.

These are the results of optimizing the model parameters O/N ratio and O₂t from 8.625 and 0.200 before data integration to 9.243 and 0.182 for Case 1 and 9.091 and 0.186 for Case 2, respectively. These parameter values are not

necessarily consistent with the laboratory experimental values, and it is possible that model representative errors and other factors are artificially included in the optimal values. Careful investigation will be needed to further interpret the dynamical meanings they represent.

References

- [1] Behrenfeld, M., O'Malley, R., Siegel, D. *et al.* "Climate-driven trends in contemporary ocean productivity", *Nature* **444**, 752–755, doi:10.1038/nature05317, 2006.
- [2] Argo Science Team, "Argo: The global array of profiling floats, in Observing the Oceans in the 21st Century", edited by C. J. Koblinsky and N. R. Smith, pp. 248–258, GODAE Project Office, Bureau of Meteorology, Melbourne, 2001.
- [3] Riser, S.C., Freeland, H. J., Roemmich, D. *et al.*, "Fifteen years of ocean observations with the global Argo array", *Nature Climate Change*, **6**, 145–153. doi:10.1038/NCLIMATE2827, 2016.
- [4] Bittig HC, Maurer TL, Plant JN, Schmechtig C, Wong APS, Claustre H, Trull TW, Udaya Bhaskar TVS, Boss E, Dall'Olmo G, Organelli E, Poteau A, Johnson KS, Hanstein C, Leymarie E, Le Reste S, Riser SC, Rupan AR, Taillandier V, Thierry V and Xing X, "A BGC-Argo Guide: Planning, Deployment, Data Handling and Usage", *Front. Mar. Sci.* **6**, 502, doi: 10.3389/fmars.2019.00502, 2019.
- [5] Stammer, D., C. Wunsch, R. Giering, C. Eckert, P. Heimbach, J. Marotzke, A. Adcroft, C. N. Hill, and J. Marshall, "Global ocean circulation during 1992-1997, estimated from ocean observations and a general circulation model", *J. Geophys. Res.*, **107**, C9, 3118, 2002.
- [6] Osafune, S., Masuda, S., Sugiura, N., Doi, T., "Evaluation of the applicability of the Estimated Ocean State for Climate Research (ESTOC) dataset", *Geophys. Res. Lett.* **42** (12), 4903–4911, doi:10.1002/2915GL064538, 2015.
- [7] S. Osafune, S., S. Kouketsu, S. Masuda, N. Sugiura, "Dynamical ocean response controlling the eastward movement of a heat content anomaly caused by the 18.6-year modulation of localized tidally-induced mixing", *Journal of Geophysical Research -Oceans*, doi:10.1029/2019JC015513, 2020.
- [8] Good, S. A., Martin, M. J., Rayner, N. A., "EN4: quality controlled ocean temperature and salinity profiles and monthly objective analyses with uncertainty estimates", *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **118**, 6704-6716, doi:10.1002/2013JC009067, 2013.
- [9] Doi, T., S. Osafune, N. Sugiura, S. Kouketsu, A. Murata, S. Masuda, and T. Toyoda, "Multi-decadal change in the dissolved inorganic carbon in a long-term ocean state

estimation", *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **7**, 4, 1885-1990, DOI:10.1002/2015MS000462, 2015.

- [10] Menemenlis, D., I. Fukumori, and T. Lee, "Using Green's functions to calibrate an ocean general circulation model", *Mon. Weather Rev.*, **133**, 1224–1240, 2005.

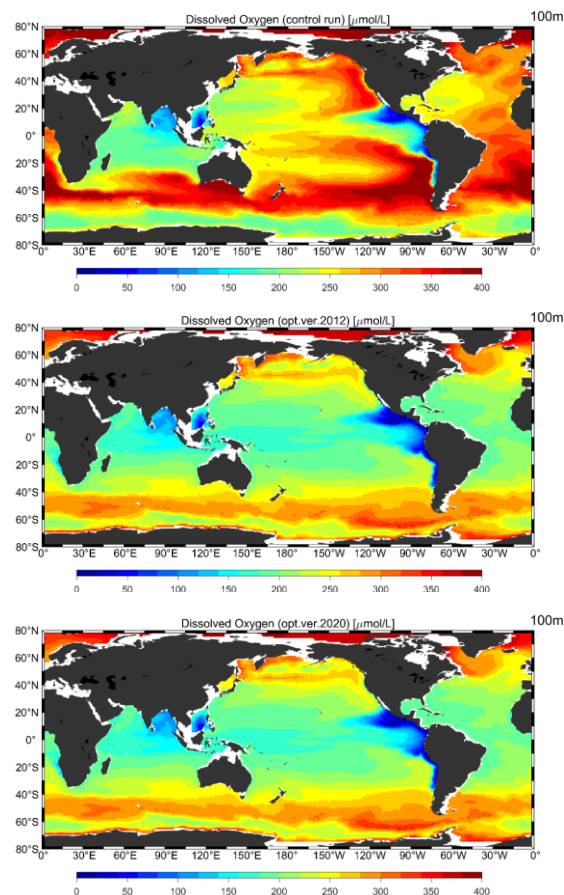


Fig. 1. Distribution of estimated dissolved oxygen at 100 m depth. Result of without data synthesis (top) and results using data from Case 1 (middle) and Case 2 (bottom). Unit is $\mu\text{mol/L}$.