

多機能アルゴ型フロート観測の全球海洋環境再現へのインパクト

課題責任者

増田 周平 海洋研究開発機構 地球環境観測研究開発センター

著者

増田 周平^{*1}, 邊見 忠^{*1}, 長船 哲史^{*1}, 杉浦 望実^{*1}, 土居 知将^{*1}

*1 海洋研究開発機構 地球環境観測研究開発センター

多機能アルゴ型フロートとして、近年全球展開が進みつつある、2種類のフロートから得られる観測データに関するインパクト実験を行った。一つは、通常アルゴフロートが測定する2,000mより深い深度を観測対象とするDeep NINJAであり、もう一つは複数の生物地球化学変数データを取得することができるBio-Geochemicalフロートである。前者に関してはアジョイント法を用いた5年間の実験を実施し、投入海域以外の広範な海洋環境再現に寄与する可能性を示唆する結果を得た。後者に関してはグリーン関数法を用いた55年間の実験を実施し、全球で3%程度のコスト削減を実現した。これらの結果は、今後、国際的な枠組みでフロート投入数、海域の最適化が議論される際に、一つの重要な情報として提供される。これら多機能アルゴ型フロートデータを反映したデータセットを用い、力学的整合性を最大限活かしたデータ解析を通して気候変動研究を推進していく。

キーワード：海洋, 気候変動, 全球, データ同化

1. 背景と目的

国際アルゴ計画は全球の表層水温、塩分を緯度、経度3度の解像度でリアルタイムに観測する枠組みを構築・維持することを目的としている（例えばArgo Science Team, 2001[1]）。2000年から始まったこの計画は各国の協力の下、現在その目的をほぼ達成し、得られた科学的知見は観測による新たな海洋動態の把握を通して（例えばRiser et al., 2016[2]）、気候変動に関する政府間パネル第5次レポート（IPCC5）などに大きなインパクトを与えた。

同時に、IPCC5で注目された、海洋酸性化や深海が気候変動に及ぼす影響などに関して、同じ枠組みからのアプローチを試みる動きが近年活発になりつつある。Deep NINJAは海洋研究機構が世界に先駆けて完成させた深海観測用のフロートであり、深度4,000mまでの水温、塩分を計測できる（<http://www.jamstec.go.jp/ARGO/deepninja/>）。また、生物化学変数を測定するためのBio-Geochemical (BGC)フロートも各国で開発が進み、全球ネットワークが構築されつつある。

本研究では海洋研究開発機構（以下JAMSTEC）が有する高度な観測技術と四次元変分法アジョイント手法を応用した最適化計算等の先駆的な計算科学技術を最大限に活用して作成された気候変動研究のための四次元変分法海洋環境再現データセット（ESTOC）（例えばOsafune et al., 2015[3]）に現在利用可能なDeep NINJA、BGCフロートデータがどの程度のインパクトを持つかを双子実験による海洋観測システム評価を実施して調べる。

2. 海洋観測システム評価実験

米 Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL; NOAA, USA) のModular OceanModel (MOM3) (Pacanowski and Griffies, 2000[4])をベースとした四次元変分法海洋データ統合システムESTOC（<http://www.godac.jamstec.go.jp/estoc/j/>）を用い、2組の双子実験を行った。一つは利用可能なDeep NINJAデータ（図1a）を統合する実験と統合しない実験で、基本的にはOsafune et al (2015[3])の全球・全層海洋環境再現実験に準じるが、鉛直拡散係数を最適化するスキームを取り込み、

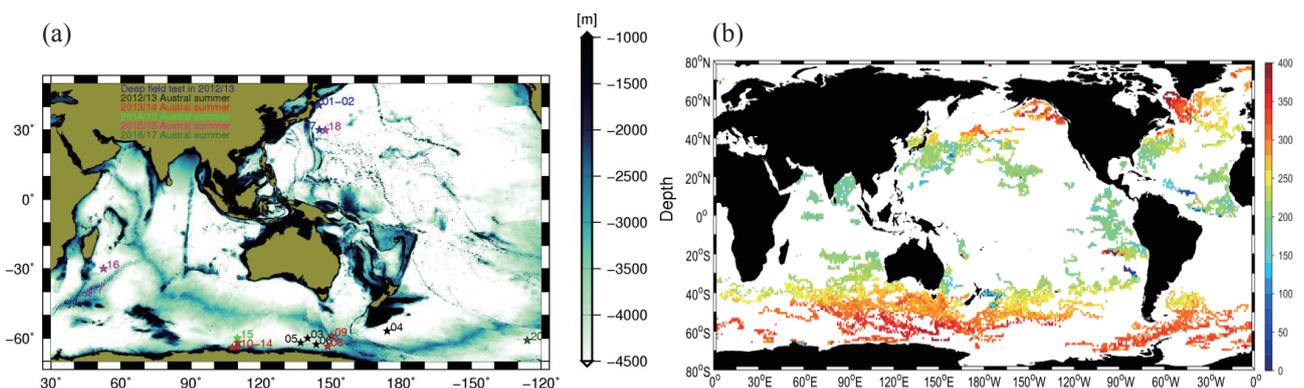


図1 利用可能な(a) DeepNINJAの投入海域と(b) BGCフロートによる溶存酸素データの分布。単位は $\mu\text{mol}/\text{kg}$ 。

同化ウィンドウを5年間と短くした。もう一つは利用可能なBGCフロートデータ(図1b)を統合する実験と統合しない実験でDoi et al.(2015[5])に準じてOsafune et al.(2015[3])の物理場を用い、グリーン関数法(例えばMenemenlis et al., 2005[6])でのパラメタ最適化の際にBGCデータのブレンドするケースとしないケースで海洋環境を推定した。

このようにして行った2組の海洋環境再現実験の結果として得られた統合データセットの差を取ることで、観測データのインパクトを調べた。どちらの最適化計算にも地球シミュレータを利用した。

3. 研究成果

図2は3,000m深で推定された水温分布の差で、Deep NINJAデータを取り入れたケースから取り入れていないケースを引いたものである。図1aのDeep NINJA投入海域で強いインパクトがみられるほか、東部北太平洋亜熱帯域などでも水温の差がみられる。これは四次元変分法によるデータ統合に於いて、フォワード感度、アジョイント感度が伝搬した結果であり、Deep NINJAデータが投入海域以外の特定海域での海洋環境再現にも大きな効果を持っていることを示している。

図3は1,000m深で推定された溶存酸素分布の差で、BGCフロートデータを取り入れたケースから取り入れて

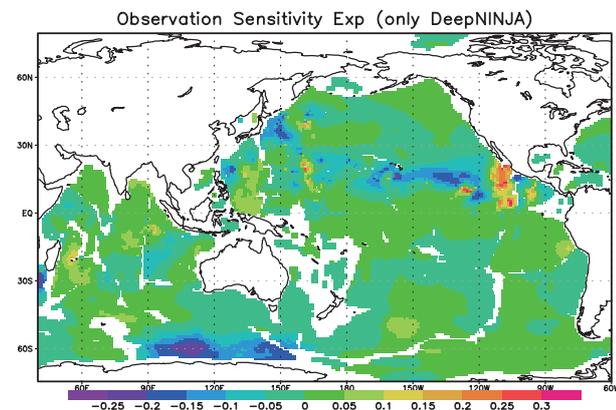


図2 2012-2016の5年間のDeep NINJAデータに関する海洋観測システム評価実験の結果。3,000m深での水温分布再現へのインパクトを示す。単位はK。

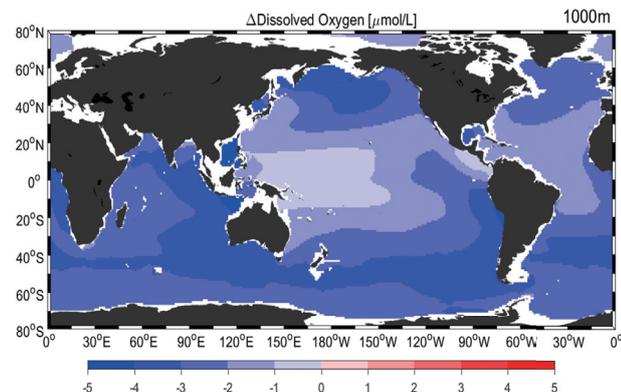


図3 1957-2011の55年間のBGCフロートデータに関する海洋観測システム評価実験の結果。1,000m深での溶存酸素分布再現へのインパクトを示す。単位は $\mu\text{mol/L}$ 。

いないケースを引いたものである。全球で一つの値として代表されるパラメタを最適化するため、インパクトは全球に広がる。データ同化で設定したコストの大きさでそのインパクトを定量的に推定すると、3.05%のコスト削減に相当している。

4. おわりに

Deep NINJAなどの大深度フロートは世界的にみると海域のカバー率は非常に小さく、例えば、最適内挿法などを使って統合データを作成した場合には、非常に限定的なインパクトしか見いだせない(図4)。作成したデータセット群は特定の観測機器に関するインパクトを調べるために使われたが、統合データセットとして解析に耐えるものである。また、得られた結果は今後の国際的なフロート投入計画策定に際して重要な情報となりうる。BGCフロートデータの統合結果も含め、今後、統合する期間の延長や、精度などを改善しつつ、データセットを用いたユニークな中長期の気候変動研究を進めていきたい。

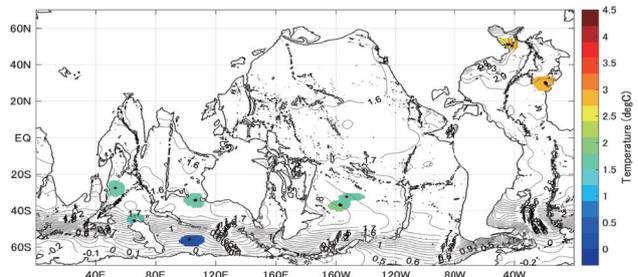


図4 Deep NINJAデータを最適内挿して作成した3,000m深での水温分布。単位は $^{\circ}\text{C}$ 。

謝辞

本研究の一部は、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)」領域番号4702、KAKENHI JP15H05817/H05819の支援を受けて行われました。

文献

- [1] 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.
- [2] S. C. Riser et al., "Fifteen years of ocean observations with the global Argo array", *Nature Climate Change*, 6, pp145–153, 2016.
- [3] S. Osafune, S. Masuda, N. Sugiura, and T. Doi, "Evaluation of the applicability of the Estimated Ocean State for Climate Research (ESTOC) dataset", *Geophys. Res. Lett.*, 42, 12, pp4903–4911, 2015.
- [4] R. Pacanowski, and S. Griffies, Mom 3.0 Manual, 680 pp, Geophys. Fluid Dyn. Lab., Princeton, NJ, 2003.
- [5] T. Doi, 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, pp1885-1990, 2015.
- [6] D. Menemenlis, I. Fukumori, and T. Lee, "Using Green's functions to calibrate an ocean general circulation model", *Monthly weather review*, 133, 5, pp1224–1240, 2005.

Impact of Various Argo-type Observations on Global Ocean State Estimation

Project Representative

Shuhei Masuda Research and Development Center for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Authors

Shuhei Masuda^{*1}, Tadashi Hemmi^{*1}, Satoshi Osafune^{*1}, Nozomi Sugiura^{*1} and Toshimasa Doi^{*1}

^{*1} Research and Development Center for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Wide variety of Argo-type floats are being deployed all over the world. They include Deep NINJA and Bio-geochemical (BGC) floats. The former can monitor temperature and salinity profiles of subsurface ocean upper 4,000-m depth. The latter can observe bio-geochemical variables inclusive of dissolved oxygen. Here we show the impact of the data obtained from these floats on a long-term ocean state estimate through observing system experiment. Data synthesis experiments were conducted by using a 4-dimensional variational data assimilation approach with/without the float data. Deep NINJA data can improve the state estimation apart from the deployment region due to forward/adjoint signal propagation. BGC float data successfully reduces the cost by approximately 3 %. These results can contribute to international planning of global Argo-type float network construction and climate research.

Keywords: Ocean, Climate Change, Global, Data Assimilation

1. Introduction

Following the Argo international program, which successfully archives global ocean coverage (e.g., Riser et al., 2016 [1]), deep-ocean monitoring and observation of bio-geochemical variables are tried by using Argo-like floats. However, the deployment of such floats is still very limited.

An ocean state estimate is a new approach for the climate research. There were a few challenges for long-term global ocean estimations which are dynamically-self consistent (e.g., Osafune et al., 2015 [2]). Recently, super-computers enable us to make state estimation for not only physical parameters but also bio-geochemical ones (e.g., Doi et al., 2015 [3]).

Here, we carried on an ocean observing system experiment with a 4-dimensional variational (4D-VAR) data synthesis system “Estimated State of global Ocean for Climate Research (ESTOC)”. The aim is to clarify the impacts of a newly obtained float data on the long-term state estimation.

2. Observing system experiment

The used OGCM is version 3 of the Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL; NOAA, USA) Modular Ocean Model (MOM3) (Pacanowski and Griffies, 2000 [4]). This is a quasi-global model covering the region between 75°S and 80°N. The horizontal resolution is 1° in both longitude and latitude and involves 45 levels.

The data synthesis method is based on 4D-Var. An adjoint approach is applied for physical parameters (Osafune et al., 2015[2]), a Green's function approach biogeochemical ones (Doi

et al., 2015[3]).

Data synthesis experiments were separately conducted with/without the float data. The targeted floats are Deep NINJA and available BGC floats.

3. Results

Figure 1 shows the estimated subsurface temperature difference between with/without Deep NINJA data input. The differences in Southern Ocean (Indian sector) and North Pacific regions largely show improvement in the state estimation by direct Deep NINJA monitoring. We can see the significant difference subtropical North Pacific where Deep NINJA has not been deployed. This is an advantage of the 4D-VAR data

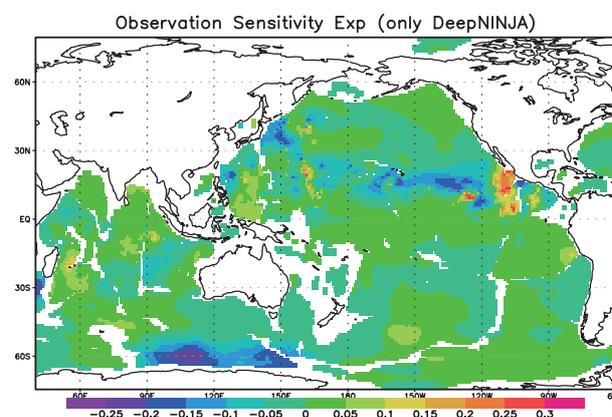


Fig. 1 A Observation System Experiment result of Deep NINJAs for 2012-2016 state estimation. Difference in the 3000m-depth temperature estimation. The units are K.

synthesis. Forward and adjoint signal enable to make such “remote” corrections.

Figure 2 shows dissolved oxygen difference between with/without BGC float data input. In this case, the difference has well organized pattern since we made optimizations for global parameters. The cost reduced by 3.05%, which reveals that the data input has a subtle impact on the global state estimation.

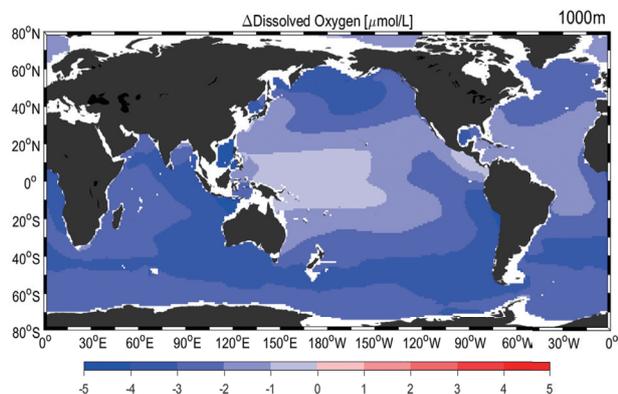


Fig. 2 A Observation System Experiment result of BGC float for 1957-2011 state estimation. Difference in the 1000m-depth dissolved oxygen estimation. The units are $\mu\text{mol/L}$.

4. Discussions

These results can contribute to international planning of global Argo-type float network construction, which is now under debate in the Argo research community.

ESTOC is useful dataset for dynamical analysis of global changes not only for physical parameters but biogeochemical parameters. The obtained dataset by applying Deep NINJA and BGC float data is promising one. We will promote climate research by using these datasets.

Acknowledgement

This work was supported by a Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas (MEXT KAKENHI-JP15H05817/JP15H05819).

References

- [1] S. C. Riser et al., "Fifteen years of ocean observations with the global Argo array", *Nature Climate Change*, 6, pp145–153, 2016.
- [2] S. Osafune, S. Masuda, N. Sugiura, and T. Doi, "Evaluation of the applicability of the Estimated Ocean State for Climate Research (ESTOC) dataset", *Geophys. Res. Lett.*, 42, 12, pp4903–4911, 2015.
- [3] T. Doi, 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, pp1885-1990, 2015.
- [4] R. Pacanowski, and S. Griffies, *Mom 3.0 Manual*, 680 pp, Geophys. Fluid Dyn. Lab., Princeton, NJ, 2003.

