

# 深海アルゴ型フロートデータの新しいデータ統合手法

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<sup>\*1</sup>, 邊見 忠<sup>\*1</sup>, 長船 哲史<sup>\*1</sup>, 杉浦 望実<sup>\*1</sup>, 土居 知将<sup>\*1</sup>

\*1 海洋研究開発機構 地球環境観測研究開発センター

深海アルゴ型フロートは、これまで通常のアルゴフロートではカバーできていなかった 2,000m 以深をモニタリングする観測機器で近年、国際的な協力体制の下、全球展開が進みつつある。しかしながらそのカバーエリアはまだ小さい。そのような背景で、フロートの投入台数を増加させるとともに、船舶 CTD データをはじめとする他の海洋観測データと統合することで、中深層の海洋科学を進めることが期待されている。本研究では海洋研究開発機構 (JAMSTEC) で投入している深海フロート (DeepNINJA) のデータを UK MET Office が編集する海洋観測データセット (EN4) に統合する海洋環境再現実験を実施した。その際、DeepNINJA の持つセンサーバイアスを軽減するためのデータ同化手法を考案し、近海にリファレンスとなる大深度観測データが存在しなくても、海洋環境再現に一定の寄与を与えることを確認した。これにより、深海アルゴ型フロート観測の全球展開をさらに加速することができる。

キーワード：海洋, 気候変動, アルゴフロート, データ同化, 深層

## 1. 背景と目的

2000 年から始まった国際アルゴ計画は準リアルタイムで全球の水温、塩分をモニタリングすることを目的とした海洋観測計画である (例えば Argo Science Team, 2001)。全球的な海洋表層 2,000m までの貯熱量変動、熱膨張による海面高度変化などをこれまででない精度で把握するなど、多くの科学的知見の獲得に貢献し (例えば Riser et al., 2016)、気候変動に関する政府間パネル第 5 次レポート (IPCC5) などにも大きなインパクトを与えた。

近年の船舶による高精度 CTD 観測から、十年から数十年という短いスケールで海洋深層に明らかな変化があることがわかってきた (例えば Fukasawa et al., 2008)。これらの変化がより浅い深度、あるいは大気での気候変動とどのような関連を持つのが重要な課題として認識されつつある。

そこで全球的な準リアルタイムの深海モニタリングの必要性が各国で議論されるようになり、アルゴ計画と同様の観測スキームをよりおおきな深度での海洋モニタリングに応用することが考案されるようになった。2010 年台半ば以降、4,000-6,000m まで観測可能ないくつかの深海アルゴ型フロートが開発され、2017 年現在、徐々に観測プロファイルが増加している状況である。

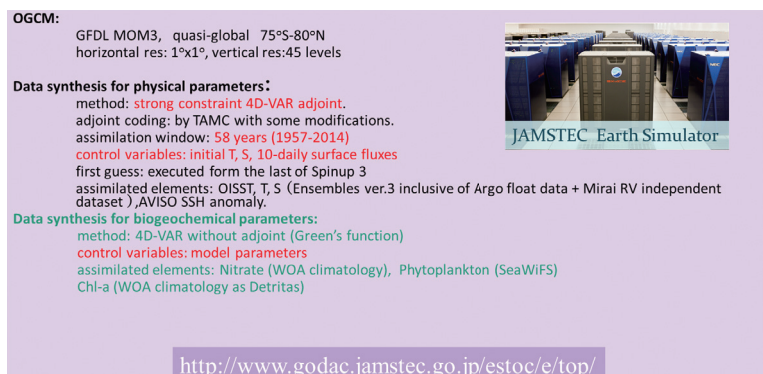
JAMSTEC でも DeepNINJA と名付けられた 4,000m 級の深海フロートを投入し性能調査と中深層モニタリングを実施している。2017 年末までに 23 台の投入が完了しており、それらのデータを基にセンサーバイアスの情報なども得られるようになってきた。

全球的に展開される深海アルゴ型フロ

ートの数はアルゴフロートの展開数に比べるとまだまだ少ないものの、データ統合などを通して、深海の海洋環境把握に即時的な貢献が期待されている。本研究では、JAMSTEC の「気候変動研究のための海洋環境再現データセット: ESTOC」に DeepNINJA データを統合し、投入が比較的多かった南大洋の海洋環境再現にどの程度のインパクトがあったかを定量的に調べた。データの統合に際しては、観測から得られたセンサーバイアス情報などを元に、データ同化手法を新たに提案した。

## 2. 深海アルゴ型フロートのデータ統合

米 Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL; NOAA, USA) の Modular OceanModel (MOM3) (Pacanowski and Griffies, 2000) 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 (Osafune et al., 2015; Doi et al., 2015)、海洋環境再現実験を実施する (図 1)。ここでは、2000 年から 2016 年までの 17 年間を同化ウィンドウとし、30 イテレーシ



**OGCM:**  
GFDL MOM3, quasi-global 75°S-80°N  
horizontal res: 1°x1°, vertical res: 45 levels

**Data synthesis for physical parameters:**  
method: strong constraint 4D-VAR adjoint.  
adjoint coding: by TAMC with some modifications.  
assimilation window: 58 years (1957-2014)  
control variables: initial T, S, 10-daily surface fluxes  
first guess: executed form the last of Spinup 3  
assimilated elements: OISST, T, S (Ensembles ver.3 inclusive of Argo float data + Mirai RV independent dataset), AVISO SSH anomaly.

**Data synthesis for biogeochemical parameters:**  
method: 4D-VAR without adjoint (Green's function)  
control variables: model parameters  
assimilated elements: Nitrate (WOA climatology), Phytoplankton (SeaWiFS)  
Chl-a (WOA climatology as Detritus)

<http://www.godac.jamstec.go.jp/estoc/e/top/>

JAMSTEC Earth Simulator

図 1 四次元変分法海洋データ統合システム ESTOC の概要。

ンの最適化を実施した。

DeepNINJA のデータ統合には深層での明らかな塩分バイアス (Kobayashi et al., 2016) を軽減するため、それぞれの DeepNINJA から得られる断続的なプロファイルを時間変化する気候学的な月ごとの海洋変動場と比較し、そのプロファイル平均値を各 DeepNINJA ごとに計算することで、各搭載センサーのバイアスを定義する。気候学的な海洋変動場は NODC が提供する World Ocean Atlas 2013 をベースに UK MET Office の EN4 データセット (Good et al., 2013) を最適内挿することで作成した。

### 3. 海洋環境再現へのインパクト

図2はこの方法によって DeepNINJA データを統合した海洋環境再現データセットと、通常の ESTOC との 3,500m 深における差を表したものである。DeepNINJA が特に集中的に投入された東経 100-150°、南緯 60° 以南の海域で、塩分に明らかな差がみられる (図中赤い長方形の海域)。

この海域での時間変化を詳細に見てみる。図3は DeepNINJA データが存在する 2012 年から 2016 年までのデータが存在するローカルなポイントでの平均値を比較したものである。月ごとに短い時間スケールの変動を示す Deepfloat (黒線: DeepNINJA の観測データ) の変

動はモデル解像度やデータ同化手法の設定により、再現できていないが、6か月の移動平均値と比較すると、Deepfloat の黒丸に対して、水温、塩分の両方の時間変化とも、reference (青丸: ESTOC) よりも DN (赤丸: 新しい手法でデータ統合したデータセット) の方が差が小さくなっていることがわかる。2乗平均誤差でみると、水温で 48%、塩分で 50% の軽減している。

### 4. おわりに

Deep NINJA などの深海アルゴ型フロートによる観測網は、徐々にそのカバー海域を増やしていつているが、センサーにバイアスが存在する場合には深層でのリファレンスとなる CTD 観測が少ないことから、データの扱いが難しくなるケースも少なくない。ここではセンサーバイアスを軽減するデータ統合手法を提案し、その有効性を、ローカルな海域ではあるが、示すことができた。この研究成果は、今後観測網がさらに拡大したとき、たとえ近海にリファレンスとなる大深度観測データが存在しなくても、スタンドアロンなモニタリングとして最大限情報を活用することができる一つの方法を示しており、深海アルゴ型フロート観測の全球展開をさらに加速することにつながる。

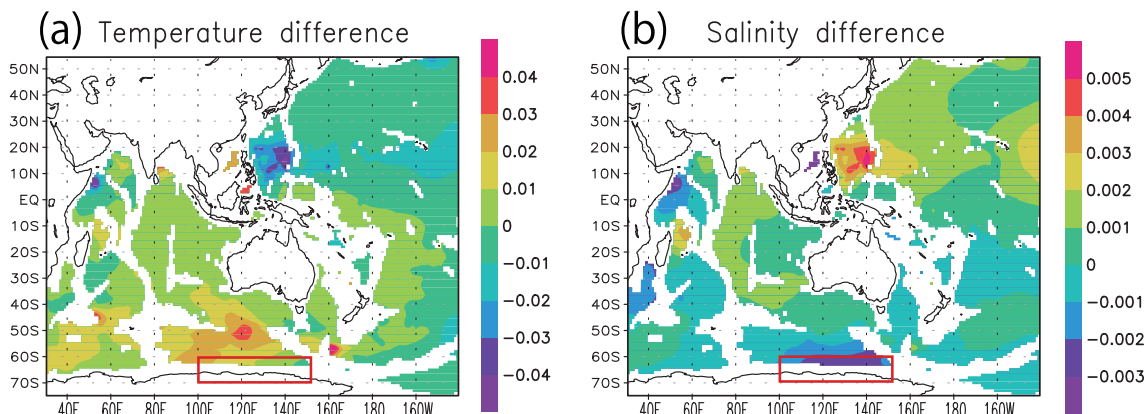


図2 DeepNINJA データを提案した同化手法で統合した結果と ESTOC との 3,500m における差の分布。2007 年から 2016 年の平均値。(a) 水温、(b) 塩分。赤い長方形の海域については本文参照。

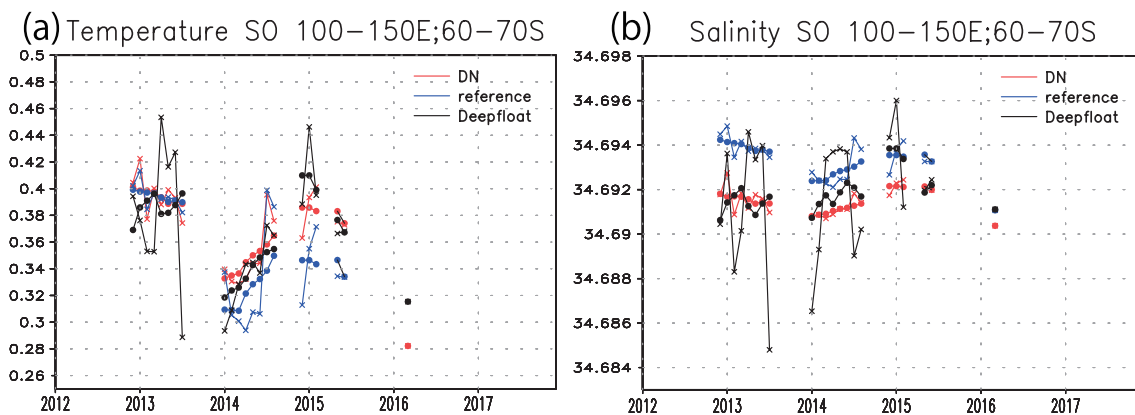


図3 東経 100-150°、南緯 60° 以南の海域での (a) 水温 (b) 塩分の時間変化。DeepNINJA のデータがある地点での平均値。DN (赤線) が DeepNINJA データを統合した結果、reference (青線) が ESTOC の結果、Deepfloat (黒線) が DeepNINJA の観測値。丸は 6 か月の移動平均値を示す。

## 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、および JSPS KAKENHI Grant 17H04579 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] 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.
- [3] M. Fukasawa, H. Freeland, R. Perkin, T. Watanabe, H. Uchida, and A. Nishina, "Bottom water warming in the North Pacific ocean", *Nature*, 427, 825–827, doi:10.1038/nature02337, 2004.
- [4] S. A. Good, M. J. Martin and N. A. Rayner, "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.
- [5] T. Kobayashi, "Deep NINJA observation", *The seventeenth Argo Steering Team meeting document 7*, 2, 1-12, [http://www.argo.ucsd.edu/DeepNINJA\\_AST17.pdf](http://www.argo.ucsd.edu/DeepNINJA_AST17.pdf), 2016.
- [6] 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
- [7] R. Pacanowski, and S. Griffies, Mom 3.0 Manual, 680 pp, Geophys. Fluid Dyn. Lab., Princeton, NJ, 2003.
- [8] S. C. Riser et al., "Fifteen years of ocean observations with the global Argo array", *Nature Climate Change*, 6, pp145–153, 2016.

# A New Technique of Deep-float Data Process for Deep 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<sup>\*1</sup>, Tadashi Hemmi<sup>\*1</sup>, Satoshi Osafune<sup>\*1</sup>, Nozomi Sugiura<sup>\*1</sup> and Toshimasa Doi<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> Research and Development Center for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

The importance of deep ocean observations has been recognized. Sustainable deep ocean monitoring networks that use autonomous profiling floats have been widely proposed by the ocean observation community and there is an increasing number of deep-float deployment initiatives around the world. Deployed floats promise to provide unprecedented deep ocean information. However, current deep-float data are known to have biases. This paper proposes a new approach to utilize ongoing deep-float data by reducing the bias in global full-depth ocean state estimation. It reports results from comparative experiments with and without deep-float data by using the proposed approach to examine the impact of data input from the ongoing deep floats on the ocean state estimation. The results demonstrate that the available float data enables corrections of the modeled ocean state locally for each float.

**Keywords:** Ocean, Climate Change, Data Assimilation, Argo float, deep ocean

## 1. Introduction

The deep ocean has gained attention from climate researchers since Fukasawa et al. (2004) documented bottom-water warming in the abyssal North Pacific Ocean. However, deep ocean climate change still includes large ambiguity, mainly because deep ocean observations are too sparse in tempo-spatial resolution.

After 2000, Argo profiling floats is capable of continuously monitoring ocean properties upper 2000 m (e.g., Argo Scientific Team, 2001). The success of the monitoring network (e.g., Riser et al., 2016) motivates the construction of a similar global network for the deep ocean.

Recently, several types of deep floats have been developed or released. Although interesting information about the deep ocean state has been obtained, it is known that their data are sometimes biased (Kobayashi, 2016). We propose a new technique to blend these problematic but scientifically valuable data into full-depth ocean state estimates (e.g., Osafune et al., 2015). Then, we examine the impact of available Deep NINJA data on deep ocean state estimation by comparing two data sets with and without the deep-float data.

## 2. Method

The data synthesis system is based on “Estimated State of global Ocean for Climate research (ESTOC),” by applying a four-dimensional variational (4D-VAR) adjoint approach (Osafune et al., 2015; Doi et al., 2015).

We propose an improved data process for biased Deep NINJA data. We compared the data from each Deep NINJA with a background ocean state of a monthly reference field. The reference was made by a conventional optimal interpolation of a monthly gridded ENSEMBLES (EN4) dataset compiled by the Hadley Centre of the UK Meteorological Office (Good et al., 2013) dataset on the basis of the World Ocean Atlas 2013 (WOA13) produced by the National Oceanographic Data Center.

## 3. Results

Figure 1 shows the temporal development of the temperature and salinity in the Southern Ocean area of 100–150°E, 60–70°S, where Deep NINJA has been deployed intensively, for the period of 2012–2016. The area average is determined for the grid points and times where deep-float observations exist. The results for the DN case (the case where DeepNINJA is

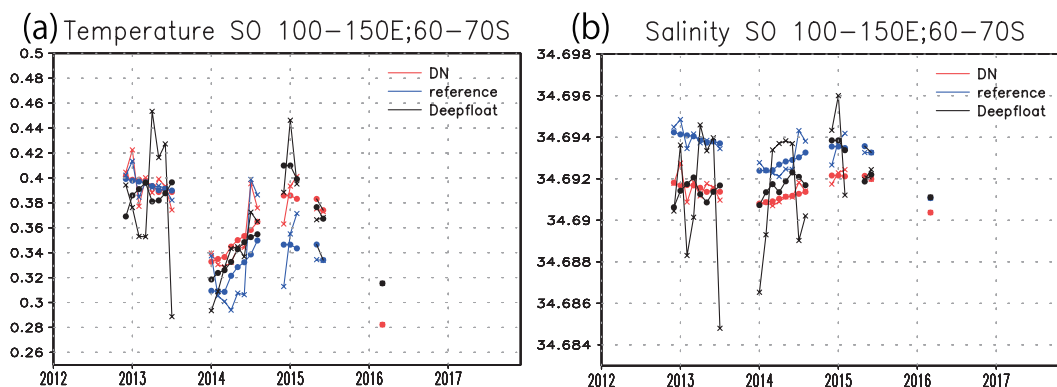


Fig. 1 Temporal development of area-mean (a) temperature and (b) salinity for 100–150°E, 60–70°S. The black curves indicate deep-float observations, and blue and red lines denote the reference and DN cases, respectively, averaging only where deep-float observations exist (see the text for more details). Crosses denote monthly values and dots denote 6-month running mean values.

assimilated) tend to follow the deep-float data closely. The root mean square difference values are reduced by 48% for temperature and 50% for salinity from reference case (ESTOC values), comparing the 6-month running mean values (dots in the Figure).

#### 4. Concluding remarks

These subtle but apparent impacts demonstrate the importance of deep-float observations for estimating the local deep ocean state. These results can contribute to global deep-float network planning in the near future by helping to define the deep-float observational density required to uncover deep ocean climate change.

#### Acknowledgement

This work was partly supported by a Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas (MEXT KAKENHI-JP15H05817/JP15H05819) and JSPS KAKENHI Grant 17H04579. WOA13 data are provided by the NOAA National Centers for Environmental Information, from their web site at <https://www.nodc.noaa.gov/OC5/woa13/>.

#### References

- [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] 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.
- [3] M. Fukasawa, H. Freeland, R. Perkin, T. Watanabe, H. Uchida, and A. Nishina, "Bottom water warming in the North Pacific ocean", *Nature*, 427, 825–827, doi:10.1038/nature02337, 2004.
- [4] S. A. Good, M. J. Martin and N. A. Rayner, "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.
- [5] T. Kobayashi, "Deep NINJA observation", *The seventeenth Argo Steering Team meeting document* 7, 2, 1-12, [http://www.argo.ucsd.edu/DeepNINJA\\_AST17.pdf](http://www.argo.ucsd.edu/DeepNINJA_AST17.pdf), 2016.
- [6] 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
- [7] S. C. Riser et al., "Fifteen years of ocean observations with the global Argo array", *Nature Climate Change*, 6, pp145–153, 2016.

