

海洋環境再現データセットを用いた南大洋亜表層水の経年変化

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

海洋研究開発機構 地球環境観測研究開発センター

南極氷床コアを用いた研究から南大洋のインドセクターで数十年以上のスケールにおいて海水が減少している可能性が指摘されている。この海域での海洋観測研究、特に亜表層研究はまれであったため、海水の減少の原因はまだ特定されていない。2008年以降、アルゴフロートネットワークは南極大陸付近までカバーしはじめ、いくつかの船舶観測とともに亜表層の海況を詳しくしつつある。これらの観測データを用い、海面から亜表層の経年変動を調べるとともに、海洋環境再現によって得られた流速情報などを用いて、変動のメカニズムを考察した。この海域での表層200m以浅の経年変動は、南極環状モードに対するfast responseによって決定することが示唆された。深さ1000m以深では温暖化トレンドがみられるが、表層の海況変動にはほとんど影響を及ぼしていないように見える。

キーワード：海洋，南大洋，データ同化，気候変動

1. はじめに

南極氷床の面積の変動は、アルベドの変化による地球が受ける熱フラックス変化を引き起こすなど、最も重要な気候指標の一つとして知られている。南極地域の海水量の経年変動や長期トレンドの原因は、南大洋のインド洋セクターを含め、依然として研究中である。海水面積を制御する主な要因は、海面の大気条件と亜表層の海況である。最近のモデル研究では、原因となる海洋側のメカニズムとして南極環状モード(SAM)に関連する海水の動きが提案されている。[Kostovら,2017; Doddridge and Marshall, 2017]。これらの研究では、海水の三次元的な運動が海洋環境を決定づけているとしている。すなわち、海面のエクマン流による表層水の移動(Fast Response)と、その結果として生じる亜表層水の湧昇(Slow Response)である。

南極海域の観測航海は、特に冬季の厳しい状況と限られたリソースのために非常に制限されている。このため、これまで南大洋の亜表層の特性をモニタリングすることは困難であった。2000年代初頭からArgoフロートによる上層2,000メートルまでの全球海洋監視が始まり、2000年代半ば以降、いくつかのフロートが60°S以南にまで展開され、そこでの海況の時間変動をモニタリングできる状況になってきた。

本研究では、これらの観測データと、それらを四次元変分法により同化した海洋環境再現データセットを用い、現実海洋における海洋応答を調べる。

2. データ

用いた観測データセットはEN4.2.1(EN4)の品質管理済み水温・塩分プロファイルデータである。それらは、the United States National Oceanographic Data Center's

QCed softwareからの利用可能な観測データに加えArgoプロファイルデータなどを英国気象局the Hadley Centreがコンパイルしたものである[Good et al., 2013]。

海洋環境再現データセットとしては「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)」を用いた[Osafune et al., 2015]。

3. 結果

図1は南半球で季節的な海面冷却が開始される4月から6月で平均した水温、塩分とそれらから計算した中立密度の時系列である。特徴的な層として、0-50mのSF層、70-120mSS層、432-532mのUD層、954-1128mのMD層、1894-2115mのLD層、および3685-4115mのUB層を定義し、その層内での平均的な値を用いている。

SF層における水温変化はSS層に浸透しているように見える。海面冷却は2012年と2013年に強く(not shown)、2013年に最も低い水温であったUD層の水温にまで影響を与えた可能性がある(図1a)。

SF層とSS層の塩分変動については、水温変動と同様にSF層と同期したSS層の変動がみられる(図1b)。秋口に冷却による対流やエントレインメントを通して混合が活発になったようにみえる。なお、2008年、2012年、および2015年にみられる正(高塩)のピークがSAMの正の位相に合致しており(図1b)、その結果中立密度も正のピークを持つ(図1c)。

この塩分の経年変動は、SAMに対する南大洋のFast Responseを想起させる。Doddridge and Marshall, [2017]は、SAMが正のフェーズにある年の上半期に顕著な冷却が起こることを示した。これはモデルの中で低温の海水が沖に流されることで水温が低下するためであった。SF層とSS層の塩分の経年変動は、おそらくこの海面温度

(SST)のFast Responseの類似物である可能性であると推測される。すなわち、海面のエクマン流が沿岸の高塩分水を沖合に輸送することでSAMが正のフェーズにあるときに高塩のピークが検知されるわけである。実際に南極大陸周辺でのSSTと海面塩分の南北勾配は、インド洋セクターを含む東部ではほとんど負であった。これは、塩分に関してはFast Responseにより、高塩分水が輸送されると考えると、図1に整合的である。一方で、SSTに関しては、むしろ高温になることが予想されるが、図1(a)ではSAMと水温の明確な関係は見いだせない。これは、水温に関しては大気強制力による冷却や加熱が支配的なことを意味しているのかもしれない。

ESTOCをもちいて定量的に調べると、この海域の南北方向の塩分勾配は1度あたり -0.04 、年平均した海面流速は 0.02m/s と見積もられ、Fast Responseの効果だけを仮定すると、この季節内で 0.06 の塩分変化が推定される。この大きさは図1(b)の振幅とおおよそ整合的であり、実際の海洋でもFast Responseによる海洋応答が機能していたことが考えられる。

解析期間は2008年から2016年と短く、さらに長期間を対象として研究を進める必要はあるものの、このような応答の存在は、海氷分布の経年変動、長期トレンドのメカニズムを考えるうえで、海洋側の要素として、興味深い。Masuda [2019]により詳細な解析結果を公表している。

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] Doddridge, E. W., Marshall, J., “Modulation of the seasonal cycle of Antarctic sea ice extent related to the Southern Annular Mode”, *Geophysical Research Letters* 44, 9761–9768, doi:10.1002/2017GL074319, 2017.

- [2] 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.
- [3] Kostov, Y., Marshall, J., Hausmann, U., Armour, K. C., Ferreira, D., Holland, M. M., “Fast and slow responses of Southern Ocean sea surface temperature to SAM in coupled climate models”, *Climate Dynamics* 48 (5), 1595–1609. doi: 10.1007/s00382, 2017.
- [4] 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.
- [5] Masuda S., “Determining subsurface oceanic changes in the Indian sector of the Southern Ocean using Argo float data”, *Polar Science*, doi:10.1016/j.polar.2019.100498, 2019.

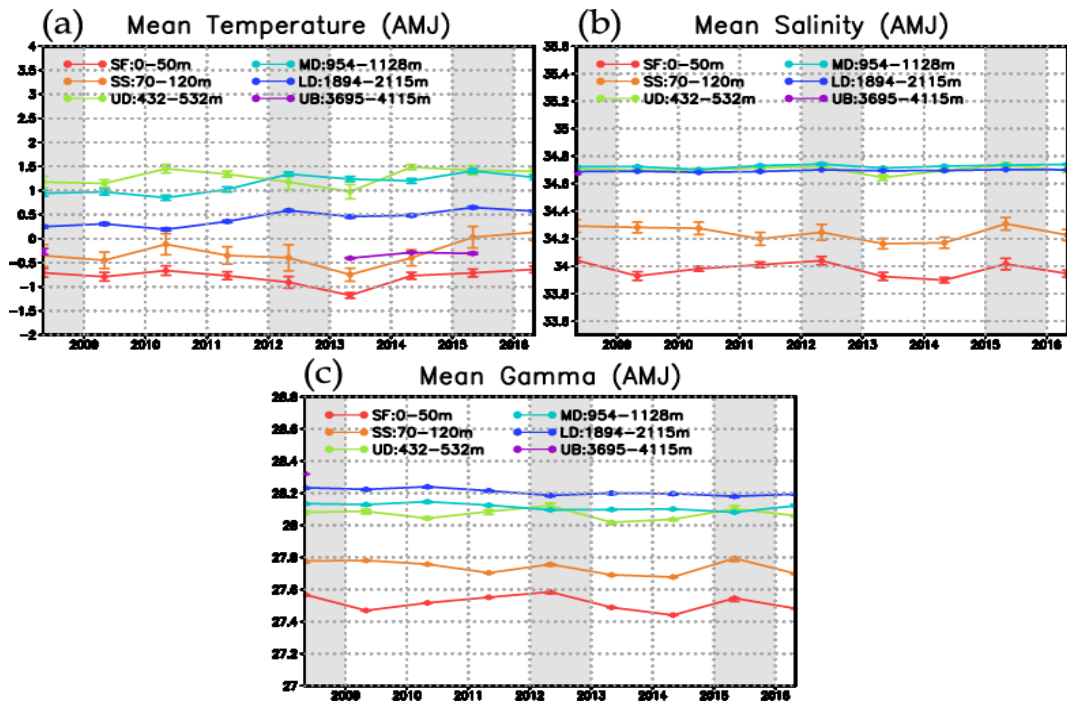


図1 秋季(4~6月)で平均した(a)水温、(b)塩分、および(c)中立密度(γ_n)の時系列。対象海域(80°E~140°E、60°Sより南)での平均値。単位は、それぞれ(a)摂氏度、(b)無次元、および(c)kg/m³。色は異なる深さの層を示す。灰色の陰影は、南極環状モードが正の位相を持っていた年を示す(詳細についてはテキストを参照)。

Interannual Changes in the Subsurface Water in the Indian Sector of the Southern Ocean

Project Representative

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

Author

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

Antarctic sea ice decline has been detected in the Indian sector of the Southern Ocean by using ice core archives. The causes of sea ice decline there have not yet been determined because ocean studies, particularly subsurface ones, have been rare. After 2008, the Argo float network was extended into this high-latitude region in addition to several shipboard observations. The integrated data enable us to investigate the interannual changes in the surface-to-subsurface oceanic state. In this report, recent interannual changes in the near-surface ocean in this region are shown to be determined by a fast response to the Southern Annular Mode. The deep ocean below 1000 m in depth has warmed slightly, but seems to have had little effect on the near-surface oceanic state in this region in the past decade.

Keywords : ocean, southern ocean, data assimilation, climate change

1. Introduction

Antarctic sea ice extent/concentration is usually one of the most important climate indices. The causes of the interannual and longer-term changes in the amount of sea ice in the polar region are still being determined, including in the Indian sector of the Southern Ocean. The major factors that control sea ice concentrations are surface forcing and subsurface water properties. Recent model studies have proposed that causative oceanic mechanisms may control the amount of sea ice related to the Southern Annular Mode [SAM; Kostov et al., 2017; Doddridge and Marshall, 2017]. These studies are considering three-dimensional changes in the oceanic state; that is, surface Ekman advection and the resulting entrainment or vertical motion of subsurface waters.

The subsurface properties of the Southern Ocean are difficult to determine because observatory cruises in the polar region are extremely restricted due to severe conditions and limited resources, especially during the winter season.

In the early 2000s, Argo profiling floats initiated continuous monitoring of global ocean properties in the upper 2000 m. The living space of the Argo floats has gradually been extending until now. In particular, since the mid-2000s, several floats have been covering the Southern Ocean south of 60°S.

2. Methods

Quality-controlled subsurface ocean temperature and salinity profiles of EN4.2.1 (EN4) were used. They were compiled by the Hadley Centre of the UK Meteorological Office [Good et al., 2013], which includes Argo float data,

together with the observations available from the United States National Oceanographic Data Center's QCed software.

An ocean state estimation "Estimated State of global Ocean for Climate research (ESTOC)," is also used [Osafune et al., 2015]

3. Result and Discussion

In the autumn season, when surface cooling initiated, the surface cooling that occurred in the SF layer seemingly penetrated into the SS layer, since the temperature of the SF and SS layers changed mostly in phase. The surface cooling was relatively strong in 2012 and 2013, which may even have affected the water properties of the UD layer, which had the lowest water temperature in 2013 (Fig. 1a). As for the salinity near-surface variations (for the SF and SS layers), the SS layer variations synchronized with the SF layer (Fig. 1b), similar to water temperature variations (Fig. 1a). It is apparent that the vertical entrainment or mixing became active through surface cooling during autumn. Note that three peaks in surface salinity occurred during 2008, 2012, and 2015 (Fig. 1b), which led to prominent increase in surface water density (Fig. 1c).

This interannual variation of salinity reminds us of the "fast response" of the Southern Ocean to SAM [e.g., Kostov et al., 2017]. Doddridge and Marshall [2017] showed that cooling occurs at the first stage in the first half of the year of positive SAM around Antarctica. During the study period of 2008 to 2016, following their definition, 2008, 2012, and 2015 were years of positive phases in terms of SAM. The salinity variation in the SF and SS layers was possibly analogous to

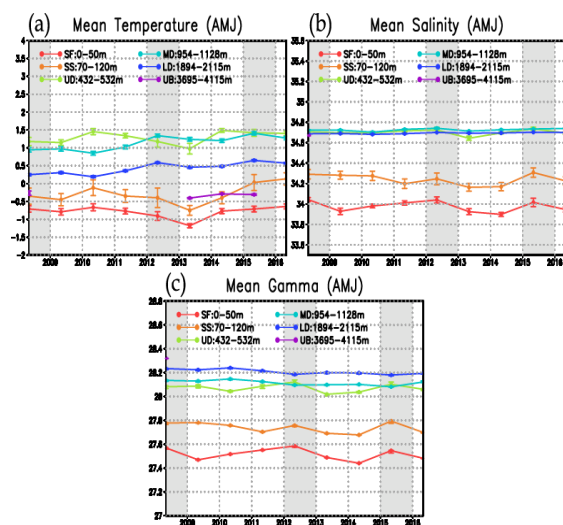


Fig 1 Temporal development of the seasonal mean (a) water temperature, (b) salinity, and (c) neutral density (γ^n) for autumn (April-June [AMJ]), averaged over the target region (80°E to 140°E, south of 60°S). Units are degrees Celsius for (a), non-dimensional for (b), and kg/m^3 for (c). LD, lower deep water; MD, middle deep water; SF, surface layer; SS, subsurface layer; UB, upper bottom water; UD, upper deep water. The gray shading denotes the years when the Southern Annular Mode had a positive phase (see the text for more details).

the fast response of the sea surface temperature (SST). That is, the surface Ekman current conveyed coastal cold water offshore and increased the amount of sea ice. Meridional gradients of SST and surface salinity around Antarctica were mostly negative in the eastern part, including in the Indian sector. This means that there was not a very fast response to the SST. On the contrary, high-salinity water can make a positive advection for salinity. This implies that a positive SAM can promote high salinity in the target region.

The mean salinity gradient of -0.04 per longitudinal degree for the region is relevant to changes in salinity of 0.06 for seasonal changes, assuming a 0.02 m/s annual mean northward surface velocity in this region from a recent ocean state estimation (ESTOC; Osafune et al., 2015), which is consistent with the amplitude of the salinity anomaly seen in 2008, 2012, and 2015 (Fig. 1b). This rough estimation supports the existence of this new type of fast response, particularly in the eastern Southern Ocean.

Although the period investigated here was short [2008 to 2016], the findings suggest that the interannual changes in the subsurface ocean state could be explained by the oceanic changes associated with SAM. More details are published in Masuda [2019].

Acknowledgement

Numerical calculations were performed on the Earth Simulator and DA system of JAMSTEC. 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.

References

- [1] Doddridge, E. W., Marshall, J., “Modulation of the seasonal cycle of Antarctic sea ice extent related to the Southern Annular Mode”, *Geophysical Research Letters* 44, 9761–9768, doi:10.1002/2017GL074319, 2017.
- [2] 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.
- [3] Kostov, Y., Marshall, J., Hausmann, U., Armour, K. C., Ferreira, D., Holland, M. M., “Fast and slow responses of Southern Ocean sea surface temperature to SAM in coupled climate models”, *Climate Dynamics* 48 (5), 1595–1609. doi: 10.1007/s00382, 2017.
- [4] 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:10.1002/2015GL064538, 2015.
- [5] Masuda S., “Determining subsurface oceanic changes in the Indian sector of the Southern Ocean using Argo float data”, *Polar Science*, doi:10.1016/j.polar.2019.100498, 2019.