

南極沿岸の棚氷の融解を促進するメカニズムの解明

松田 拓朗

北海道大学 地球環境科学研究所

1. はじめに

海洋を介した熱輸送は地球の気候状態をコントロールしている。特に、南半球中緯度から南極大陸への熱輸送は棚氷の融解などを介して気候変化のトリガーとなる。たとえば、Yokoyama et al. (2016)によると、縄文時代に生じた棚氷の融解に伴い南極大陸の氷床が海洋に流出して、海面高度が約5m上昇したことが明らかにされている。また、棚氷の融解によって海洋が淡水化すると、海水の密度差によって駆動される深層循環（海洋のコンベアベルト）が弱まるため、全球規模の気候変動を引き起こす可能性がある(Rahmstorf et al. 2015)。

中緯度から南極大陸への熱輸送を担う鍵となる海流は南極周極流である(図1)。南極周極流は南極大陸の周りを取り囲むように東向きに流れる海流であり、中緯度域と南極域の「境界」を担っている。南極周極流内で多く観測される直径数百km規模の海洋の渦（中規模渦）に伴う熱拡散は、南極周極流の「境界」としての働きを弱めて、中緯度から南極向きの熱輸送を担うと考えられている(Marshall and Speer 2012)。そのため、地球温暖化に伴い南極周極流の渦活動の強さや極向き熱輸送量がどのように変化するかを知ることは、気候システムの将来予測を行う上で重要な課題である。

地球温暖化が南極周極流に影響を与える可能性があるプロセスは大きくわけて二つある。一つ目は南極周極流を駆動する偏西風の強化である。Fogt and Marshall (2020)でレビューされているように、地球温暖化は偏西風を強化する。偏西風の強化の度合いは Southern Annular Mode (SAM) 指数で表現することができる。図2は SAM 指数の時系列を示したものである。SAM 指数は20世紀後半から明確な正のトレンドを示しており、偏西風が強化されていることを示唆する。この偏西風の強化は渦活動に影響を与えることが知られている(e.g., Munday et al. 2013)。地球温暖化に伴う二つ目の影響は熱強制の強化である。Shi et al. (2021)によれば、中緯度で温暖化が顕著に進んでおり、南極周極流の流速に影響を与える可能性がある。しかし、今までの研究では地球温暖化に伴うこれらの外力強制の変化が南極沿岸部にどのような影響を与えるのかは十分に議論されていなかった。

以上のことを踏まえて、本研究は高解像度数値モデルを用いた数値実験に基づき、地球温暖化に対する南極周極流の応答および南極域への影響を考察する。

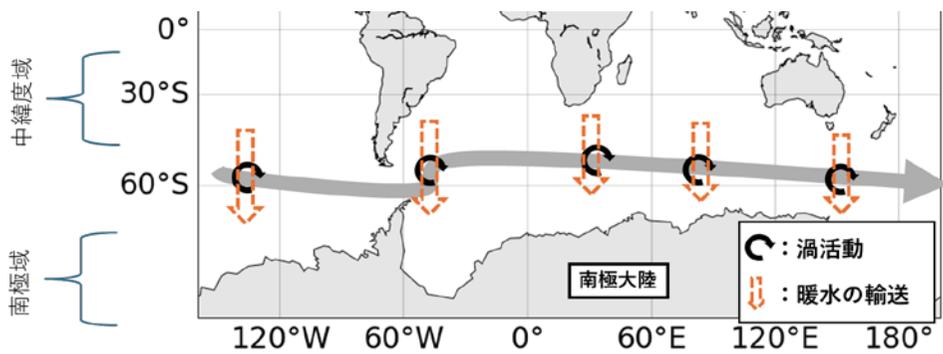


図1 南極周極流の俯瞰図。

南極周極流（灰色矢印）は南極大陸を中心に流れる東向きでのジェットで、東西方向に遮られることなく、三大洋を繋ぐ。また、中緯度域と南極域の境界としての役割を果たす。南極周極流内にはいくつかの顕著な海底地形が存在しており、海底地形の下流域では顕著な渦活動が見られる。この渦活動が中緯度域から南極域に向かって暖水を輸送すると考えられている。

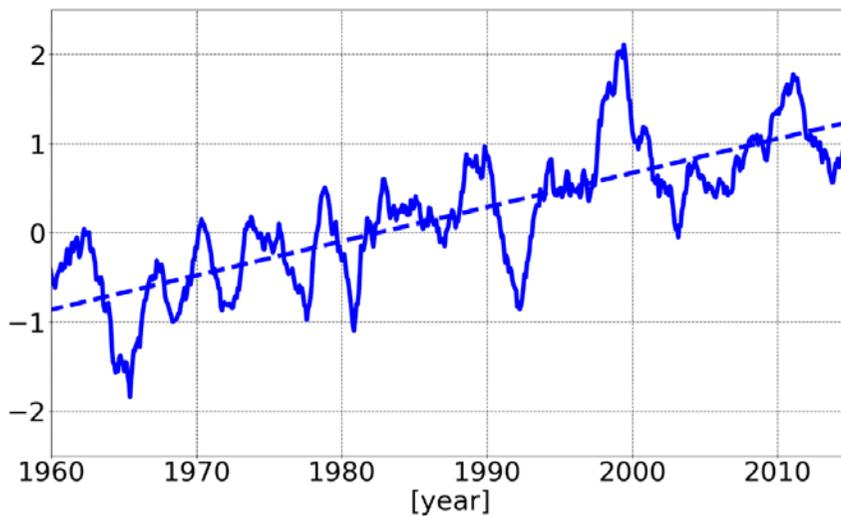


図2 SAM 指数の時系列

NCEP Reanalysis (Kalnay et al. 1996) から算出した SAM 指数の時系列（青線）および SAM 指数のトレンド（青破線）。顕著な増大傾向を示している。

2. 手法

本研究では有限体積法汎用海洋大循環モデル MITgcm を用いて、南極周極流を理想化した β 平面成層チャンネルモデルを作成して、地球温暖化に対する応答を調べる。本研究で作成するチャンネルモデルの俯瞰図を図3に示した。チャンネルの大きさは水平 $6000 \text{ km} \times 2000 \text{ km}$ 、深さ $H=$ 約 4000 m で、水平解像度は 5 km とした。 $x=1000 \text{ km}$ の位置に高さ 1500m 、水平幅 200 km のガウシ

アン型のリッジを配置した：

$$h(x, y) = H - h_0 \exp\left(-\frac{(x - x_0)^2}{\sigma_x^2}\right). \quad (1)$$

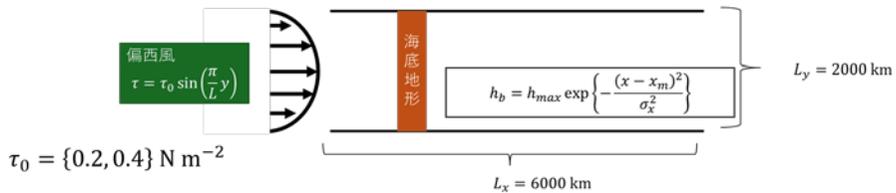
ただし、 $h_0 = 1500 \text{ m}$ 、 $x_0 = 1000 \text{ km}$ 、 $\sigma_x = 200 \text{ km}$ である。北側境界には幅 100 km のスポンジレイヤーを設置して、指数減衰型の水温分布に緩和することで現実的な成層を再現できるようにした。初期条件は静的な状態として、sine 型の偏西風で 30 年間のスピナップを行った。

実験 1 では地球温暖化に伴う偏西風の強化に対する南極周極流の応答を調べるため、積分の 30 年目に風応力の最大値を $\tau_0 = 0.2 \text{ N m}^{-2}$ から $\tau_0 = 0.4 \text{ N m}^{-2}$ に変更してさらに 30 年間の積分を行った。以後、風応力を $\tau_0 = 0.2 \text{ N m}^{-2}$ に保った 60 年間積分した実験を参照実験、 $\tau_0 = 0.4 \text{ N m}^{-2}$ に変更した実験を偏西風強化実験と呼ぶ。

地球温暖化は偏西風の強化に加えて、中緯度での熱強制の増加によって南極周極流北部の流速を増加させることが指摘されている。これが極向き熱輸送に与える影響を調べるため、本研究ではスポンジレイヤーで与える熱強制を 1.5°C 増加させることでこの効果を表現した。この実験を熱強化実験と呼び、参照実験と比較する（実験 2）。

以上のように地球温暖化の影響を偏西風を介した効果（実験 1）と熱強制を介した効果（実験 2）に分けることで、各々のプロセスが南極周極流に与える影響を理解する。

(a) 実験1:偏西風の強度に対する応答



(b) 実験2:中緯度の熱源に対する応答

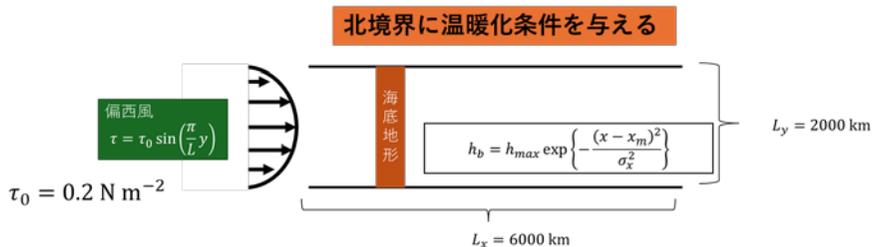


図3 チャネルモデルの俯瞰図と数値実験の概要。

(a) 実験 1 では偏西風に対する感度、(b) 実験 2 では中緯度の熱強制に対する感度を調べる。

3. 結果

図 4 にそれぞれ実験 1 と実験 2 における渦運動エネルギー (Eddy kinetic energy; EKE) 偏差を示す。実験 1 での EKE 偏差は偏西風強化実験と参照実験、実験 2 での EKE 偏差は熱強化実験と参照実験の差で定義した。EKE 偏差は渦活動の強さが外力によってどの程度変化したのかを示す指標である。黒コンターは偏西風強化実験および熱強化実験の流線関数である (単位は $[\text{Sv}] =$

10^6 [m^3])。また、緑線は Geostrophic contour を示している。図 4(a) に示すように、偏西風強化に伴う EKE 偏差は海底地形の下流域 ($x=1000$ km の下流側) で顕著である。これは先行研究 (e.g., Bischoff and Thompson 2014; Abernathy and Cessi 2014; Matsuta and Masumoto 2023) で指摘されているように、風応力が強化されると流線関数偏差から見られるように定在蛇行のサイズが増加して、渦活動のソースとなる傾圧不安定の成長率が大きくなるためである。実験 2 では、実験 1 同様に海底地形下流域に正負の EKE 偏差が見られるものの、領域全体で積分した EKE 偏差は実験 1 と比較して小さい。

渦活動は極向き熱輸送を担うため、渦活動の応答の違いは実験 1 および実験 2 の水温偏差の分布に影響を与える。図 5(a) に東西平均した実験 1 の水温偏差の南北鉛直断面図を示す。1.5°C から 4.0°C コンターに挟まれた層で正偏差が $y=1250$ km 付近から南に向かって広がっていることが分かる。これは渦活動の強化に伴い、極向き熱輸送が増加して、南極沿岸部 ($y=0$ km 付近) で温暖化が生じることを示している。一方、熱強制を強化した実験 2 では北境界付近で海面付近の水温が顕著な増大を示しているものの、極側では顕著な水温変化は見られない。

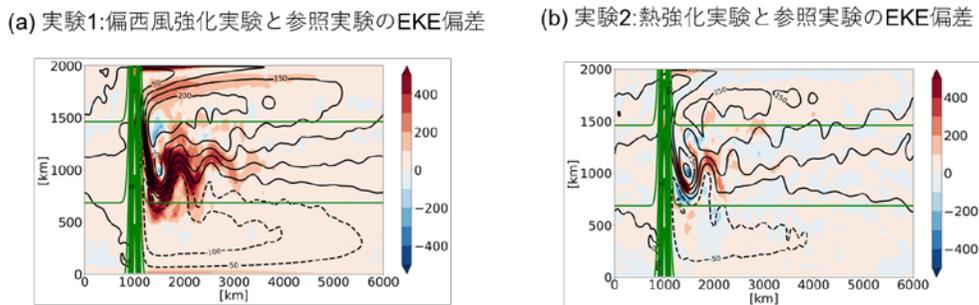


図 4 各実験における EKE 偏差の俯瞰図。

(a) 偏西風強化実験と参照実験の EKE 偏差 (カラー, [$\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$]) および偏西風強化実験の流線関数 (黒コンター, [Sv])。 (b) 熱強化実験と参照実験の EKE 偏差 (カラー, [$\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$]) および熱強化実験の流線関数 (黒コンター, [Sv])。 緑コンターは geostrophic contour を表す。

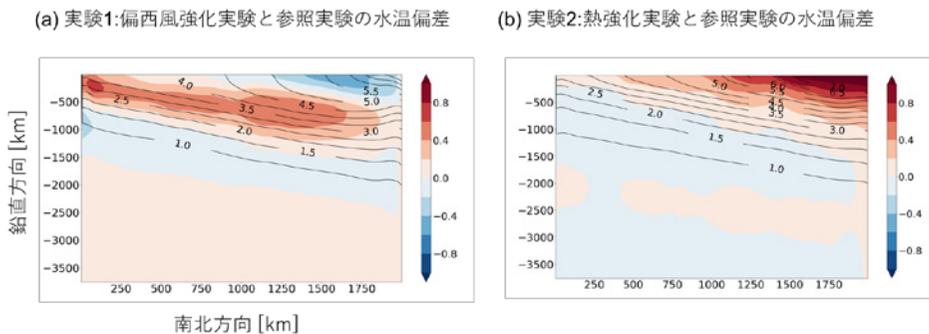


図 5 各実験における東西平均水温偏差の南北鉛直断面図。

(a) 偏西風強化実験と参照実験の水温偏差 (カラー, [$^{\circ}\text{C}$]) および偏西風強化実験の東西平均水温 (黒コンター, [$^{\circ}\text{C}$])。 (b) 熱強化実験と参照実験の水温偏差 (カラー) および熱強化実験の東西平均水温 (黒コンター)。

4. まとめと考察

本研究では高解像度チャンネルモデルを用いた数値実験を行い、偏西風の強化と熱強制の効果が南極周極流を介して極域の水温にどのような影響を与えるのかを調べた。偏西風を強化した場合、図 4(a)に示すように渦活動が顕著に強化されていた。渦の強化に伴う渦拡散の強化に伴い、中緯度から極向きの熱輸送が増加して、図 5(a)に示すように南極沿岸部において顕著な海面水温の増加が見られた。一方、中緯度域における熱強制の変化は図 4(b)に示すように顕著な渦活動の変化を伴わないため、図 5(b)で見たように水温偏差は中緯度に局在していた。以上のことから、中緯度域における熱強制が南極沿岸部に与える影響は限定的であると考えられる。

本研究では偏西風の強化に伴う渦活動の変化が極域の海洋温暖化を効率的に引き起こす可能性が示された。しかし、本研究では棚氷を直接モデル内で表現していない。極域で起きた棚氷融解は成層の変化を通して南極周極流にフィードバックを与える可能性が先行研究(Stewart and Hogg 2017)で示唆されている。今後は棚氷に伴うプロセスをモデル内に取り入れて、さらなる数値実験を進めていくことで、地球温暖化下における中緯度-南極域の相互作用が解明されることが期待される。

最後に、様々な実験設定を検討する中で発見した興味深い事例についても紹介する。従来の研究では偏西風の変化に対する南極周極流の応答は中規模渦が担うと考えられてきた。実際、先行研究や本実験で示されたように、偏西風強化に伴う応答は中規模に伴う熱輸送が重要な役割を果たしている。しかし、成層をなくして中規模渦が生成されない順圧チャンネルモデルで同様の実験を行った場合も、南極周極流は非線形的な振る舞いを示すことが分かった(Matsuta and Mitsudera 2024)。順圧チャンネルモデルは現実の海洋とはかけ離れた設定のため、この効果が現実の南極周極流でどの程度効いているのかは現時点でははっきり分かっていないが、近年は成層モデルであっても順圧プロセスの重要性を指摘する研究も少しずつ発表されてきている(Nadeau and Ferrari 2015; Zhang et al. 2024)。偏西風に対する応答を理解するためには、中規模渦の効果に加えてジェット自体の持つ非線形効果を考慮する必要があるかもしれない。

参 考 文 献

- Abernathey, R., and P. Cessi, 2014: Topographic enhancement of Eddy efficiency in baroclinic equilibration. *J Phys Oceanogr*, **44**, 2107-2126, <https://doi.org/10.1175/JPO-D-14-0014.1>.
- Bischoff, T., and A. F. Thompson, 2014: Configuration of a Southern Ocean storm track. *J Phys Oceanogr*, **44**, 3072-3078, <https://doi.org/10.1175/JPO-D-14-0062.1>.
- Fogt, R. L., and G. J. Marshall, 2020: The Southern Annular Mode: Variability, trends, and climate impacts across the Southern Hemisphere. *Wiley Interdiscip Rev Clim Change*, **11**, <https://doi.org/10.1002/wcc.652>.
- Kalnay, E., and Coauthors, 1996: The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull Am Meteorol Soc*, **77**, 437-471, [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2).
- Marshall, J., and K. Speer, 2012: Closure of the meridional overturning circulation through Southern Ocean upwelling. *Nat Geosci*, **5**, 171-180,

<https://doi.org/10.1038/ngeo1391>.

- Matsuta, T., and Y. Masumoto, 2023: Energetics of the Antarctic Circumpolar Current. Part I: The Lorenz Energy Cycle and the Vertical Energy Redistribution. *J Phys Oceanogr*, **53**, 1467-1484, <https://doi.org/10.1175/jpo-d-22-0133.1>.
- , and H. Mitsudera, 2024: Inertial Effect and Its Dependency on the Topographic Geometries in Barotropic Channel Models under the Weakly Nonlinear Regime. *J Phys Oceanogr*, **54**, 1267-1283, <https://doi.org/10.1175/jpo-d-23-0075.1>.
- Munday, D. R., H. L. Johnson, and D. P. Marshall, 2013: Eddy saturation of equilibrated circumpolar currents. *J Phys Oceanogr*, **43**, 507-532, <https://doi.org/10.1175/JPO-D-12-095.1>.
- Nadeau, L. P., and R. Ferrari, 2015: The role of closed gyres in setting the zonal transport of the antarctic circumpolar current. *J Phys Oceanogr*, **45**, 1491-1509, <https://doi.org/10.1175/JPO-D-14-0173.1>.
- Rahmstorf, S., J. E. Box, G. Feulner, M. E. Mann, A. Robinson, S. Rutherford, and E. J. Schaffernicht, 2015: Exceptional twentieth-century slowdown in Atlantic Ocean overturning circulation. *Nat Clim Chang*, **5**, 475-480, <https://doi.org/10.1038/nclimate2554>.
- Shi, J. R., L. D. Talley, S. P. Xie, Q. Peng, and W. Liu, 2021: Ocean warming and accelerating Southern Ocean zonal flow. *Nat Clim Chang*, **11**, <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01212-5>.
- Stewart, A. L., and A. M. C. Hogg, 2017: Reshaping the Antarctic Circumpolar Current via Antarctic Bottom Water export. *J Phys Oceanogr*, **47**, 2577-2601, <https://doi.org/10.1175/JPO-D-17-0007.1>.
- Yokoyama, Y., and Coauthors, 2016: Widespread collapse of the Ross Ice Shelf during the late Holocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **113**, 2354-2359, <https://doi.org/10.1073/pnas.1516908113>.
- Zhang, X., M. Nikurashin, B. Peña-Molino, S. R. Rintoul, and E. Doddridge, 2024: Maintenance of the Zonal Momentum Balance of the Antarctic Circumpolar Current by Barotropic Dynamics. *J Phys Oceanogr*, **54**, 1565-1581, <https://doi.org/10.1175/jpo-d-23-0042.1>.