

## 南極大陸に向かって海流が接近中

～南極海の深層が暖まるメカニズムを発見～

### ポイント

- ・1990年代以降、東南極沖の南極周極流は南極大陸に向かって拡大している。
- ・南極周極流が南極大陸に近づくと、南極の沿岸付近で海洋深層が暖まる。
- ・地球温暖化によって風が強くなると、海による南極の氷の融解が加速する可能性。

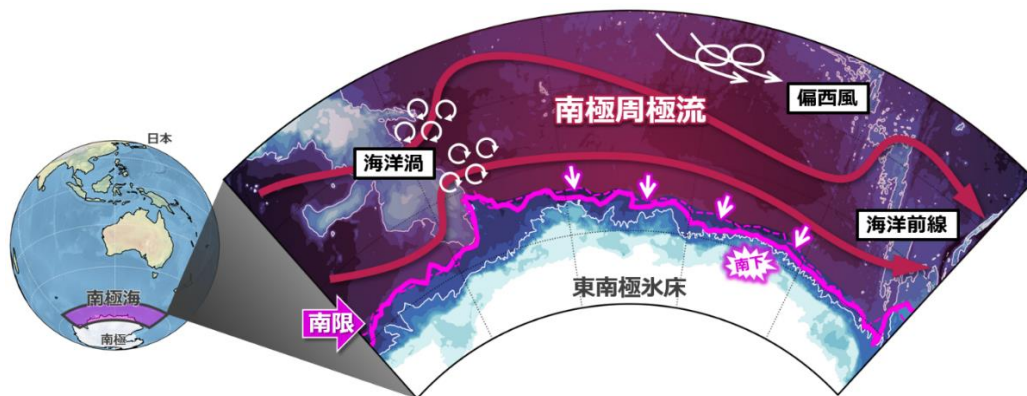
### 概要

北海道大学大学院環境科学院博士後期課程の山崎開平氏と、同低温科学研究所の青木 茂准教授、平野大輔助教（当時。現所属：国立極地研究所）、中山佳洋助教、海洋研究開発機構の勝又勝郎主任研究員らの研究グループは、地球上で最大の海流である「南極周極流」が、南極大陸に向かって拡大することで、南極海の深層が暖まっていることを発見しました。

この研究では、東南極沖\*1を対象とし、海洋現場観測データの時空間解析と数値シミュレーションを組み合わせることで、南極周極流の「南限」が、過去30年間に50km以上南下したことを突き止めました。さらに、海の力学的な分厚さを調べることによって、海洋前線の南下と南北深層循環の強化が、南限の移動を引き起こしていることがわかりました。今回発見された南極周極流の極向き拡大は、海洋の持つ熱が南極氷床へ近づきつつあることを示しています。地球温暖化などによって南極海に吹き付ける偏西風が強くなったことが、その原因である可能性があります。南極海の深層水は南極沿岸付近では最も暖かい水で、南極の氷を融かす主な熱源であると考えられます。暖かい深層水が氷床に向かって流れ込めば、より多くの融け水が海に放出されることで、海面上昇と気候システムに影響することが懸念されます。

本研究は水産庁「開洋丸」による観測航海で取得されたデータを使用しており、科学研究費補助金（課題番号 17H01615, 17H06317, 19K23447, 21H04918, 21K13989）の助成を受けて実施されました。

なお、本研究成果は、2021年6月11日（金）の *Science Advances* 誌にオンライン掲載されました。



東南極沖の海洋構造。背景の青系色は海底地形で、明るい色ほど浅い。

南極周極流の南限（ピンク色の線）について、2010年代を実線、1990年代を点線で示す。

## 【背景】

「吠える 40 度、狂う 50 度、叫ぶ 60 度」—これは、南極海を航行した船乗りが「南極周極流」の荒波を緯度ごとに形容したフレーズです。実は、南極海の面積のほとんどを、この南極周極流が占めています。南極周極流は、太平洋・大西洋・インド洋の 3 大洋を繋ぐ唯一の海流で、地球上で最も流量が多い海流です。南極周極流は東西を大陸に遮られずに周回し、強い偏西風の影響を受けて波が非常に高くなります。南極海を西から東に流れる南極周極流は、水深 3,000m 以上の深海まで及ぶ分厚い流れの構造を伴っています。

南極周極流域を含む南極海を輪切りにすると、「子午面循環」と呼ばれる、地球規模で南北・鉛直方向に循環する構造がみられます（図 1）。この子午面循環は上部と下部に分かれていて、子午面循環の上部は、南極周極流に吹き付ける偏西風が駆動する北向き表層流と、その流量を補償する「南極大陸に向かって深層から湧き上がる循環」から成ります（図 1 の時計回りの循環）。南極海は子午面循環が大气に触れる「深海の窓」であり、地球上の熱と物質の循環のまさに中枢であるといえます。

近年、南極の氷が融ける主な原因として、南極海が供給する熱に注目が集まっています。南極の沿岸付近では、最も暖かい水は海洋深層に存在しています。暖かいとはいっても真冬の日本海より遙かに冷たい 1-2°C ではありますが、海水が凍る温度の約 -2°C に比べれば、格段に暖かいといえます。この暖水は「周極深層水」と呼ばれる、北大西洋のグリーンランド沖から南極海に流れてくる海水です。南極海では子午面循環によって、この暖かい深層水が南極大陸に向かって運ばれています（図 1）。南極周極流の「南限」は、上部子午面循環の南端に対応しています。実は、海水に覆われない部分の南極周極流域の深層は、過去半世紀に渡って昇温してきたことが、現場海洋観測のデータからわかっていました。しかし、頻繁に海水に覆われる南極周極流の「南限」付近では、観測が少なく断片的なため、変動の実態はよくわかっていませんでした。

## 【研究手法】

海洋子午面循環の構造は、海水の水温・塩分・溶存酸素量などを、船舶を使って観測することによって調べることができます。上部子午面循環の南端には、海面から沈み込んで最も時間が経った「古い水」、つまり最も溶存酸素が少ない深層水が存在しています。1990 年代に東南極沖で行われた観測によると、溶存酸素が少ない古い水は深層で水温 1.5°C を示すことがわかっていました。その後、2019 年に同じ地点で実施した繰り返し船舶観測の結果から、この古い水の溶存酸素と水温との対応関係は、1990 年代と同じであることがわかりました。そこで、「深層の水温 1.5°C」という水温指標を「南極周極流の南限」として定義して、過去 30 年間に渡るその指標の変動を調査しました。

研究グループが携わった同一観測線の繰り返し観測を含む世界各国による船舶海洋観測、自動海洋プロファイリングフロート観測、南極海に生息するゾウアザラシに装着したセンサー観測など、利用可能な全ての深層水温観測データを統合して解析することで、東南極沖の南極周極流の南限の変動を復元しました。結果の妥当性を評価するために、数値シミュレーションを使って変化傾向の再現を試みました。さらに、南限が変動するメカニズムを詳しく理解するために、ジオポテンシャル\*<sup>2</sup>と呼ばれる海水の力学的な厚さを計算することで、南極周極流を構成する東向きジェットに対応する「海洋前線」の移動を評価し、南限の位置の変化との対応関係を調べました。

## 【研究成果】

東南極沖の 1996 年と 2019 年の船舶観測データを比較すると、南極周極流の南限が南極大陸に向かって、50-120km 南下していることがわかりました（図 2A の青/赤点）。また、1990 年代以降の深

層水温データによって復元された南限の10年ごとの変位(図2Aの曲線)は、2回の船舶観測によって得られた変化傾向と整合的で、「南極周極流の拡大」が着実に進行していることを裏付けました。先行研究として、衛星海面高度計を用いて南極周極流の南限の変動を推定した例はあったものの、「南極周極流の南限が南下している」という現象を、深層水温データを用いて直接的に示したのは、南極海の他の海域を含めても、この研究が世界で初めてです。さらに、南極周極流が拡大するパターンは、海底地形の構造に対応していることがわかりました。大陸棚斜面の形と南限の位置を比べると、谷状地形となっている東経120度で120km程度と、移動距離が最も大きくなっていることがわかりました。以上の観測結果は、研究グループが実施した数値シミュレーションと定量的に整合していました。

繰り返し船舶観測データにより構造変化を詳しく調べると、1996年から2019年にかけて、海洋全層に渡る、大幅な昇温と密度の減少が生じていることがわかりました。南極周極流の南限の南下は、深層の暖水が南に移動することに対応します(図1)。その原因としては、①南極周極流の東向きジェットを構成する海洋前線の南下、②上部子午面循環の強化による暖水の南下、の2つが考えられます。海洋前線の位置の指標であるジオポテンシャルを用いて①の効果を定量化すると、海洋前線も南下はしているものの、南極周極流の南限である1.5°Cの深層水の南下距離に比べると小さく、その全ては説明できないことがわかりました(図2B)。南極周極流の拡大に対して、平均的には①が7割程度、②が3割程度寄与していると思われました。

### 【今後への期待】

過去半世紀以上に渡って、南極海に吹き付ける偏西風は強くなっています。偏西風は、海洋渦などによる南北水平循環を通じて上部子午面循環を駆動する(図1)ので、このことが南極周極流の南限の南下の一因であると考えられます。今後、さらなる地球温暖化に伴い偏西風が強くなると、深層の暖水を大陸に向かって運ぶ循環が強化されると考えられます。暖かい深層水が大陸棚に流入した場合、南極沿岸の棚氷<sup>\*3</sup>を融かす海洋の熱が、今までよりも多く供給されて、融解を加速させる恐れがあります。南極の氷の流出や融解が進むと、沢山の氷や融け水が海洋へと放出されることで、世界の海面が上昇するほか、南極海の海水が低塩分となって軽くなることで、南極底層水と下部子午面循環を形成する海水の沈み込みが起きにくくなるので、気候システムに対する地球規模のインパクトがあります。

今回の研究成果は、将来気候予測に用いられる各国の気候シミュレーションを改善するための重要な知見となります。IPCC(気候変動に関する政府間パネル)の海洋・雪氷圏特別報告書(2019)によると、21世紀後半以降の海面上昇予測における最も大きな不確実性は、南極氷床の融解に起因しています。つまり、南極の氷を融かす南極海の振る舞いを理解することは、地球の平均海水位の上昇率を予測するために必要な知見なのです。南極海のモニタリングは、地理的条件、氷の存在もあって困難ですが、地球と人類の未来のため、根気強く続けていく必要があります。

## 論文情報

論文名 Multidecadal poleward shift of the Southern Boundary of the Antarctic Circumpolar Current off East Antarctica (東南極沖における南極周極流の南限の数十年規模の極向きシフト)

著者名 山崎開平<sup>1, 2</sup>, 青木 茂<sup>2</sup>, 勝又勝郎<sup>3</sup>, 平野大輔<sup>2(当時)</sup>, 中山佳洋<sup>2</sup> (1北海道大学大学院環境科学院, 2北海道大学低温科学研究所, 3国立研究開発法人海洋研究開発機構)

DOI 10.1126/sciadv.abf8755

雑誌名 Science Advances

公表日 2021年6月11日(金)

## お問い合わせ先

北海道大学低温科学研究所 准教授 青木 茂 (あおきしげる)

T E L 011-706-5479 F A X 011-706-7142 メール shigeru@lowtem.hokudai.ac.jp

U R L <http://climbsd.lowtem.hokudai.ac.jp/index.html> (大気海洋相互作用分野)

## 配信元

北海道大学総務企画部広報課 (〒060-0808 札幌市北区北8条西5丁目)

T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

## 【参考図】

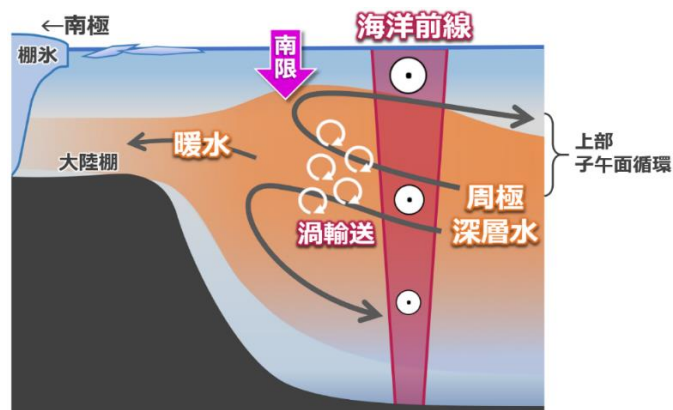


図1. 南極周極流の断面図。上部子午面循環の南限が、南極周極流の南限に対応する。

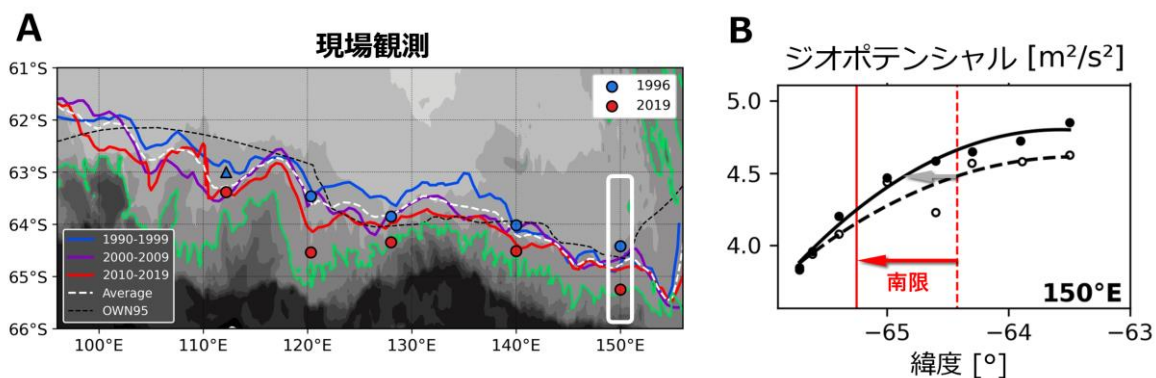


図2. 南極周極流の南限の変動。A：青/赤点が1996/2019年の位置で、青/紫/赤の曲線が1990年代/2000年代/2010年代の位置。白破線が30年間での平均で、黒破線が1990年代以前の位置。背景色が海底地形で、暗い色ほど浅い（緑線が3000m）。B：東経150度での1996年（点線）と2019年（実線）のジオポテンシャルの比較。海洋前線の南下（灰矢印）は、南限の移動距離（赤矢印）よりは短い。

### 【用語解説】

- \*1 東南極沖 … 南極大陸の東経領域（東南極）の沖合の海域のこと。東南極氷床は南極大陸に存在する氷のほとんどを占めており、全て融けると世界の海面が約50m上昇する淡水量を誇る。
- \*2 ジオポテンシャル … 海水の単位質量当たりの体積を高さ方向に積算した量で、海水の力学的な分厚さに相当する。ジオポテンシャルの等値線は、海洋前線に伴う海流の位置によく対応する。
- \*3 棚氷 … 南極大陸の氷が海に突き出して浮いた部分のこと。棚氷が融けると、その背後の大陸の氷をせき止める力が失われて、氷が海に向かって急速に流出する。