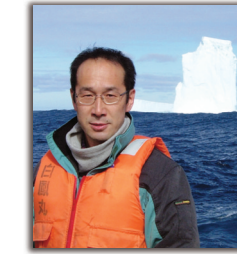


海洋深層循環を駆動する南極底層水

—未知の底層水生成域を探る—

南極海では大量の海水が凍った氷が生成され、その時にできる塩分の高い重い水が南極底層水として、世界中の深海に拡がっていき、世界を巡る大規模な海洋循環が作られます。ここでは、最近の日本の観測により発見された、未知の南極底層水生成域について紹介します。



文・図版
大島 慶一郎 おおしま けいいちろう
 北海道大学低温科学研究所教授
 1985年、北海道大学大学院理学研究科地球物理学専攻博士課程中退。北海道大学低温科学研究所助手を経て、2008年より現職。理学博士。専門分野は海洋物理学、極域海洋学。南極海やオホーツク海などの極域・海水域の海洋を研究対象とする。1990～1992年、日本南極地域観測隊隊員として昭和基地にて越冬。
 (2008年、氷山をバックに南極海にて)

海洋深層循環 —約2000年で世界の海を一巡り—

世界の海洋の深層まで及ぶ最も大きな循環は、重い水が沈み込みそれが徐々に湧き上がってくる、という密度差による循環です。海水の密度は低温ほど大きいので、重い水の潜り込みは寒冷な海で起こります。世界中の海の深層水の元となる重い水は北大西洋北部と南極海の2か所で潜り込み、それぞれ北大西洋深層水、南極底層水とよばれています(図1)。この深層への潜り込みが起点となり、約2000年で世界の海洋を一巡りするゆっくりした循環、「海洋深層循環」が作られます。海洋の密度は塩分によっても決まり、深層への潜り込みが北太平洋では起こらず北大西洋でのみ生じるのは、北大西洋の方が塩分が高いからです。海水の密度は温度(熱)と塩分で決まることから、この密度差による深層循環は熱塩循環ともよばれます。

二つの深層水のうち最も重い水である南極底層水は世界中の底層に拡がっており、冷たさ(負の熱)を全球に輸送しています¹(図1)。最近の研究では、南極底層水の存在量は北大西洋深層水の2倍程度と見積もられています²。太平洋では2000m以深の水は2℃以下であり、そのうちかなりの部分は南極底層水起源の水で占められています。重い水

の沈み込みが弱くなったり、沈み込む場所が変わったりすると、海洋深層循環が変わってしまいます。そうすると、海のもっている熱容量は非常に大きいので、地球上の気候が激変することになります。実際に、古い過去には深層循環が今のものとは異なっている時期があり、そのために当時の気候が現在とは大きく異なっていたことが示唆されています。

北大西洋深層水については、その生成域が米国・ヨーロッパに近いので観測・研究数も多く、実態はかなりわかってきていますが、アクセスが困難で観測が難しい南極底層水に関しては、まだわかっていないことも多いのです。たとえば、南極底層水が南極海のどこでどれくらい生成されているかについても、必ずしもよくわかっているとはいえません。図2は、いままでの研究から南極底層水の生成域とその流出経路を模式的に示したものです³。南極底層水の生成域は、ロス海・ウェッデル海・アデリーランド沖が三大生成域として知られていました。しかし、フロンの観測などが行われるようになると、底層のフロンの分布などから、東南極にもそのソースがあることが示唆されています。図2で矢印に示されるように、アメリカ棚氷^{たなごり}がその候補として挙げられていましたが、決定的証拠は得られていません。

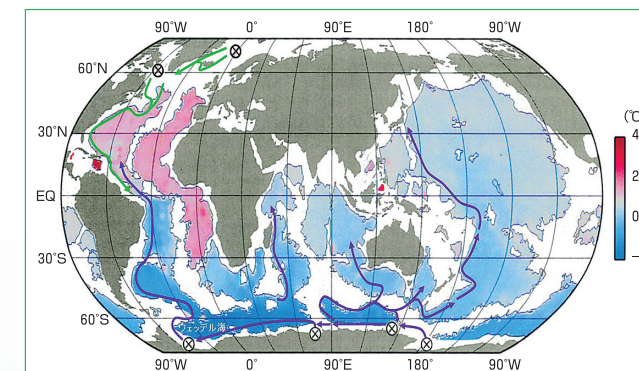


図1 世界の水深4000m以深の海底付近における水温分布と深層水の流れ。紫と緑の矢印は、南極底層水と北大西洋深層水の流出経路。⊗は深層水が潜り込む場所。
 (Gordon (2001)¹を加筆・修正。北海道大学低温科学研究所・北川暁子作成)

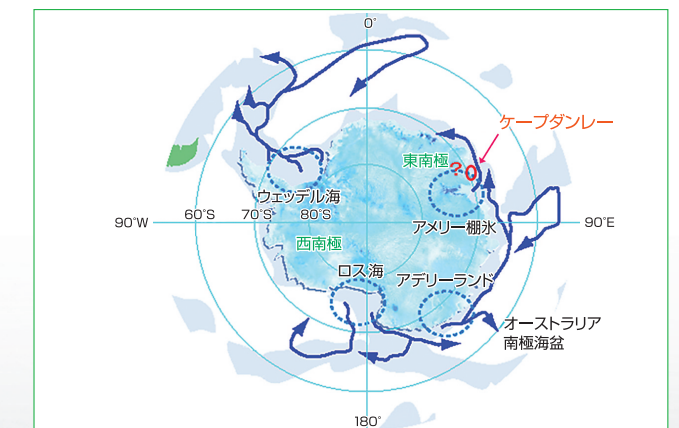


図2 南極底層水の生成域と流出経路。
 (Orsi et al. (1999)³を参考に北海道大学低温科学研究所・青木茂作成)

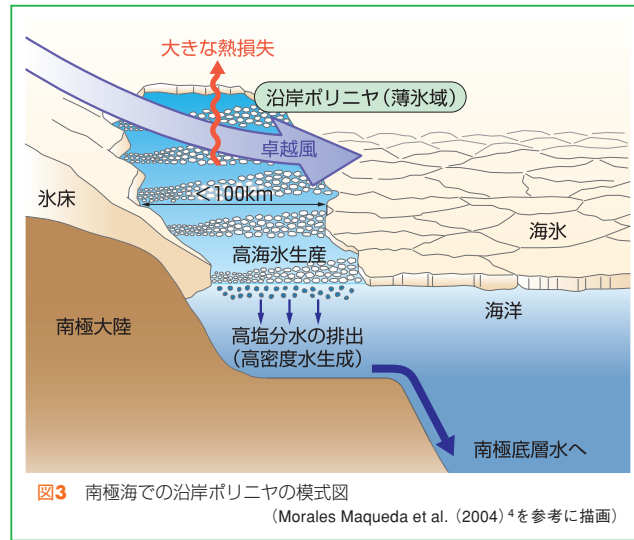


図3 南極海での沿岸ポリニヤの模式図 (Morales Maqueda et al. (2004) 4を参考に描画)

沿岸ポリニヤ —海水と重い水の生産工場—

南極底層水の生成において最も重要になってくるのが、沿岸ポリニヤとよばれる場所での大量の海水(海水が凍った氷)生産です⁴(図3)。海水が生成されるとき、海水の塩分の大半は氷からはき出されるので、塩分の高い、重い水がつくれます。この重い水こそが南極底層水の元となっているのです。沿岸ポリニヤとは、風や海流によって生成された海水が次々と沖へ運ばれて薄水域が維持される場所です。通常、海水は、ある程度厚くなると自らの断熱効果の働きによって、それ以上は成長しません。しかし、沿岸ポリニヤでは、十分成長しないうちに海水が運び去られるため薄水域が維持され、大量の熱が大気によって奪われ、海水が活発に生産されることになるのです。ここでの海水生産が南極底層水の生成の鍵を握っているわけですが、冬期の沿岸ポリニヤの現場観測は、沖に厚い海水が広がっているため非常に難しく、南極海のどこでどのくらい海水や重い水が生成されているのかはまったくわかっていませんでした。

宇宙から海水生産量を計る

そのようななか、私たち研究グループでは、宇宙から人工衛星(マイクロ波放射計)を使って薄氷(ポリニヤ)域を検知し、そこでの氷厚を推定して大気より奪われる熱を計算し、海水生産量を見積もるといった新しいアプローチを開発しました。冬期の海水の生産量はどれだけ大気に熱を奪われたかで決まります。その奪われる熱は氷の厚さによっておおむね決まる(薄いほど多く熱を奪われる)ことを利用したのです。このようにして、南極海での年積算の海水生産量の分布(マッピング)を初めて示したのが図4です⁵。海水生産のほとんどが沿岸ポリニヤで行われていることや、南極底層水の主生成域であるロス海のポリニヤで最大の海水生産量があること、などがよく表現されています。注目さ

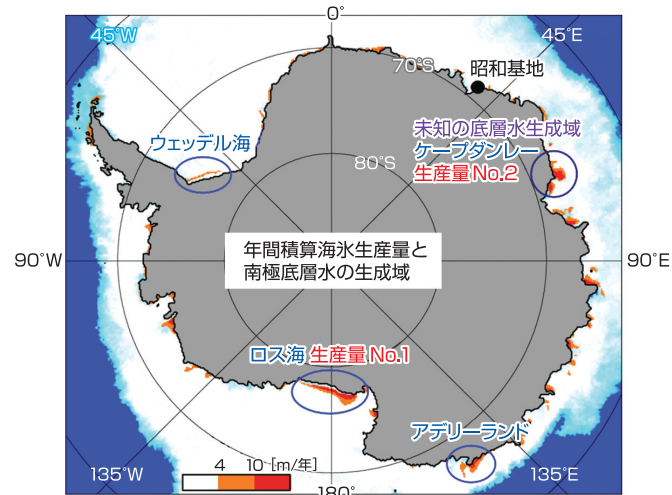


図4 南極海における年積算の海水生産量のマッピング(厚さに換算)。(Tamura, Ohshima and Nihashi (2008) 5を一部加筆)

れるのは、ロス海に次ぐ第2の海水生産海域が、アメリカ棚氷西方に位置するケープダンレー沖(位置は図2も参照)のポリニヤであることがわかったことです。海水生産が高いということは、重い水をつくり得るということで、私たちはこの研究から、ケープダンレー沖が東南極にあるはずの未知(第4)の南極底層水生成域であると予想しました。

未知の南極底層水生成域を探る

ケープダンレー沖では本当に南極底層水ができていますでしょうか? 私たちはそれを明らかにするための観測プロジェクトを提案し、それが認められて2008~2009年に海洋研究開発機構の白鳳丸と東京海洋大学の海鷹丸によって、この海域での集中海洋観測を行いました。その結果、「予想通り、ここで底層水ができています!」という証拠を、ついに得ることができたのです。

2009年1月(南極の夏)に行われた海鷹丸による観測では、ケープダンレー沖周辺の多数の点で、海底までの海水の性質の詳細な観測を行いました。図5はその結果の一つで、ポリニヤ沖での水温と溶存酸素(海水中に溶け込んでいる酸素濃度)の断面図です。表面で大気に接している水には酸素が豊富に含まれていますが、それが潜り込むと、酸素は生物活動に使われるので減少していきます。図5で、海底斜面に沿って底層にみられる低温で酸素濃度の高い水は、表層から低温の水が潜り込んで間もないことを示しています。この層の密度は南極底層水の密度に達しており、この海域周辺で潜り込みが生じて南極底層水が生成されていることを示唆しています。

プロジェクトでは、係留系観測によってさらに決定的な証拠を得ることができました。係留系観測とは、海底に設置した錘からロープを立ち上げて一番上に浮きを付けて張り、そのロープに水温・塩分計や流速計などを固定して、同じ

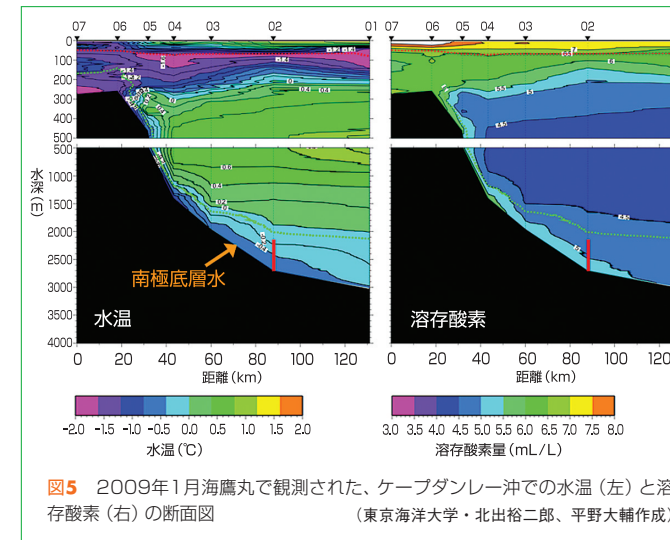


図5 2009年1月海鷹丸で観測された、ケープダンレー沖での水温(左)と溶存酸素(右)の断面図 (東京海洋大学・北出裕二郎、平野大輔作成)

点で長期間連続してデータを取得する観測手法です。図6は、ケープダンレー沖の(重い水の通り道と予想した)峡谷沿いに設置した係留系で得られた、底層での水温と流速の1年間の変化を示しています。海水生産が盛んになる冬期に低温(高密度)の水が到来し、それに同期して峡谷を下る流れが一気に強くなっていることがわかります(図6矢印)。まさに、海水生成によって重い水が潜り込み、南極底層水として拡がっていく過程を直接とらえたわけです。係留系観測からは、低温・高密度の水がほぼ4日周期で脈動して下ることや、底層水の厚さが300m以上にもなることなどもわかりました。

実は、ケープダンレーは、南極昭和基地の東方1200kmにあり(図4)、日本南極地域観測隊の行き帰りの経路沿いにあります。現在、日本南極地域観測隊では、より詳細な理解をめざし、ケープダンレーポリニヤをターゲットにしたプロジェクトが進行中です。このプロジェクトでは、①南極底層水の量がどれくらいできているのか? ②なぜこのような大きなポリニヤができ、大きな海水生産が生ずるのか? ③図4のような衛星で求めた海水生産量の見積もりがどの程度正しいか? ④底層水生成に伴う物質循環・生態系への影響は?などをテーマに、さらなる研究・観測が進められています。

南極底層水にみられる予兆 —深層循環は弱まる?—

温暖化の影響を最も受けているのは北極海で、北極海の夏の海水面積は10年に約10%もの割合で激減しています。南極海でも温暖化による影響や気候変動にかかわるような大きな変化があるのでしょうか。南極海は海水面積に関しては(衛星によって正確な観測ができるようになってからの30年間)ははっきりした減少はみられていません。しかし、その一方で、断片的データながら、南極海の中ではデータが比較的そろっているロス海やオーストラリア南極海盆(場所

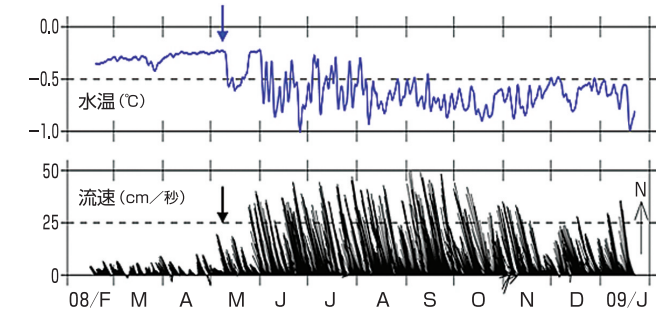


図6 南極海ケープダンレー沖峡谷(図5の赤棒の地点)での、水温と流速ベクトル(上が北向きで水深の大きい方向)の1年間(2008年2月から2009年1月)の変化。(北海道大学低温科学研究所・深町康作成)

は図2参照)では、この30年間で底層水が低塩・低密度化していることが明らかになってきました^{6,7}。これは、重い水の潜り込みが弱まっていることを示唆し、底層水生成が減少し、全球にも及ぶ深層循環が弱体化に向かう可能性を示唆しているともいえます。

この原因としては、ロス海のポリニヤでの海水生成の減少も関係している可能性が挙げられていますが、量的にそれだけでは説明できません。顕著な低塩化はロス海の中層や上層でも生じており、それも考え合わせると、底層水の低塩・低密度化は西南極における氷床融解量の増加によるのではないかと、というのが現在考えられている最も有力な説です。氷床とは、南極大陸を覆う氷塊で、降った雪が圧縮されて氷となったものです。また、氷床が海に押し出され海岸周辺に固着して海に浮いているものを棚氷といいます。ごく最近の衛星を使った研究によると⁸、この氷床と棚氷の量が西南極で大きく減っていることがわかってきました。これは、棚氷が海で融解する量や氷山として流出する量が増加していることを意味します。これらの氷が融解すると、海水は低塩・低密度化し、それが南極底層水の生成にも影響している、というのが考えられているシナリオです。このような氷床・棚氷と海洋との相互作用に関しては、まだよくわかっていないことが多く、今後この分野の研究の進展が望まれます。 □

【引用文献】

- Gordon, A. L. : Bottom water formation, Encyclopedia of Ocean Sciences, Vol. 1, Academic Press, 334-340 (2001)
- Johnson, G. C. : Quantifying Antarctic Bottom Water and North Atlantic Deep Water volumes, J. Geophys. Res., 113, C05027 (2008)
- Orsi, A. H., Johnson, G. C., Bullister, J. L. : Circulation, mixing, and production of Antarctic Bottom Water, Progress in Oceanography, 43, 55-109 (1999)
- Morales Maqueda, M. A., A. J. Willmott, and N. R. T. Biggs : Polynya dynamics: A review of observations and modeling, Rev. Geophys., 42, RG1004 (2004)
- Tamura, T., K. I. Ohshima and S. Nihashi : Mapping of sea ice production for Antarctic coastal polynyas, Geophys. Res. Lett., 35, L07606 (2008)
- Aoki, S., S. R. Rintoul, S. Ushio, S. Watanabe, and N. L. Bindoff : Freshening of the Adelle Land Bottom Water near 140°E, Geophys. Res. Lett., 32, L23601 (2005)
- Rintoul, S. R. : Rapid freshening of Antarctic Bottom Water formed in the Indian and Pacific oceans, Geophys. Res. Lett., 34, L06606 (2007)
- Chen, J.L. et al. : Accelerated Antarctic ice loss from satellite gravity measurements, Nature Geoscience, doi:10.1038/NNGEO694 (2009)