

Research 研究紹介

海洋中深層循環を駆動する海水生成とその変動

大島 慶一郎 (共同研究推進部)

海洋の大規模な中深層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（熱塩）循環です。重い水が生成されるのが極域・海氷域の海であり、海氷生成の際にはき出される高塩分水（ブライン）が重い水の生成源になっています。南極の沿岸ポリニヤ（風や海流によって生産された海氷が次々と沖へ運ばれて維持される薄氷域。海氷生産が極めて高い海域）で作られる重い水は南極底層水の起源水であり、南極底層水は世界で一番重い水として世界中の深・底層に拡がっていき、約2000年かけてゆっくり湧き上がっています。北太平洋では、最も重い水は、オホーツク海の北西陸棚ポリニヤで作られ、それが中層（200–1000m）まで潜り込み、北太平洋スケールでの中層の循環を作っています。一方で、極域・海氷域は近年の温暖化に非常に鋭敏な海域であり、例えば、オホーツク海では30年で約20%の割合で海氷面積が減少しています。海氷の大きな変動は、重い水の生成量を変え、さらには中深層循環まで変えうる潜在力を持っています。古海洋学の知見から類推すると、中深層循環の変動は地球の気候や生態系にも大きな変化をもたらすと考えられています。

このように、海氷生産量が大きい海域で重い水が作られるわけですから、海氷生産量は中深層循環とその変動を決める最重要な因子ということになります。しかし、それを捉える現場観測が極めて困難であることから、その変動はもとより平均的な量・分布さえもよくわかっていませんでした。海洋大循環モデルにおいても、海氷生産量は海氷域での熱塩フラックス境界条件を与えることになり、これがわからないことは海氷域での適切な境界条件・検証データがないことに相当します。実際に従来のほとんどのモデルでは、南極海域での表層からの重い水の潜り込みは、本来あるべき沿岸ポリニヤからではなく深い外洋域で生じており、正しく熱塩循環が表現されているとは言えません。

我々研究グループは、海氷生産量のグローバルマッピング（全球分布の作成）を行うことをめざし、現場観測データとの比較・検証も取り入れて、衛星データと大気客観解析データから海氷生産量を見積もるアルゴリズムを開発しています（詳細は<http://www.odl.wottem.hokudai.ac.jp/~ohshima/kaken.html>）。海氷の生産は主に沿岸ポリニヤのような薄氷域で行われますので、そこでの海氷の厚さがわかれば、熱収支計算から、奪われた熱量分だけ海氷が生成されると仮定すると原理的には海氷生産量が求まります。このように

して、南大洋では初めて海氷生産量のマッピングを行ったのが図1です(Tamura et al., 2008)。海氷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氷生産量があることなどがよく表現されています。図1から特筆すべきは、昭和基地東方約1200kmにあるケープダンレー沖のポリニヤが、第2の高海氷生産海域であることが明らかになったことです。

南極底層水は、ロス海・ウェッデル海・アデリーランド沖の3海域が主な生成域とされ、これらの海域では多くの研究観測がありますが、最近になってフロンの底層での分布等から東南極にも底層水生成域があることが示唆されました。それがどこであるかはよくわかっていなかったのですが、我々は、図1のマッピングから、ケープダンレー沖が未知（第4）の南極底層水の生成海域ではないかと推測しました。そして、ここを日本のIPY（International Polar Year）観測ターゲット海域として、長期係留観測や東京海洋大・海鷹丸などによる集中海洋観測を行ってきました。

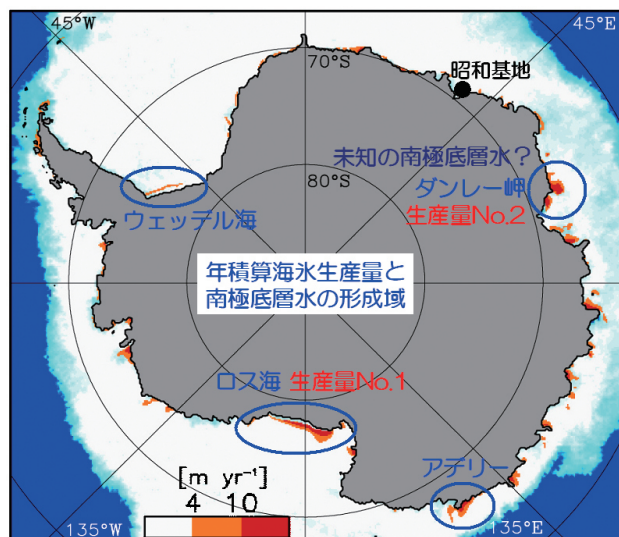


図1：南極海における年積算の海氷生産量のマッピング（厚さに換算） Tamura, Ohshima, and Nishashi (2008)に一部加筆。

その結果、「予想通り、ここで底層水ができていく！」という証拠をついに得ることができました。まず、海鷹丸によるCTD・採水観測からは、底層に顕著な低温・高酸素の層が見られ、南極底層水の生成が示唆されました。さらに直接的な証拠として、1年間の係留観測からは、海氷生産が盛んになった直後に低温高密度水の潜り込みが生じ、冬季には底層水の厚さは300m以上にもなっていることが明らかになりました。

図2は、ケープダンレー沖の(重い水の通り道と予想した)深い峡谷沿いの係留点での、(上)水温と(下)流速の1年間の時系列です。低温・高密度の水の到来する時期に対応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。さらに詳しく見ると、低温・高密度の水がほぼ4日周期で間歇的に到来し、それに合わせて0.5m/sにも及ぶ峡谷を下る下降流が生じていることもわかります。これらのデータは底層水の挙動を直接捉えることができた稀な観測データであり、また地球流体力学的にも興味深い材料を提示しています。

我々は、これらの結果にも意を強くし、今後4年間、日本南極地域観測隊(JARE51-54)において、ケープダンレーポリニヤをターゲットに係留系を中心とした海洋海氷観測を集中的に行なうことを計画しています(課題名:係留系による、未知の南極底層水と海氷生産量・厚さの直接観測)。このプロジェクトでは、①南極底層水生成過程及び生成量の定量的把握、②ポリニヤ形成過程(なぜ、大きな海氷生産が生ずるのか?)、③衛星海氷トゥルースデータの取得(海氷厚及び海氷生産量アルゴリズムの検証及び高精度化)、④底層水生成に伴う物質循環・生物生産へのインパクト、などをテーマに、モデリングや化学・生物のグループなどとも連携して研究を推し進める予定です。

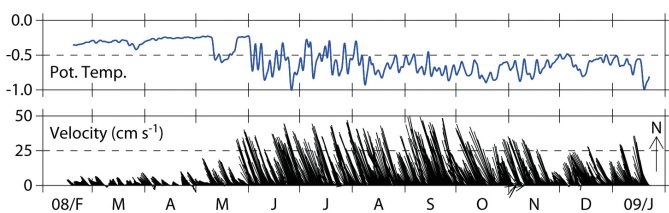


図2: ダンレー岬沖峡谷での、(上)水温と(下)流速ベクトル(上が北向きで水深の大きい方向)の1年間(2008年2月-2009年1月)の時系列。深町康氏作成。

最近、南極ロス海を起源に南極底層水が低塩・低密度化していることがいくつかの研究で報告されています(例えば Aoki et al., 2005)。これは、底層水生成が減少し全球にも及ぶ深層循環が弱体化している可能性を示すものでもあります。この原因の一つとして、南極氷床融解量の増加の他に、ポリニヤでの海氷生成の減少も考えられます。その意味でも、南極底層水とともに海氷生産量をモニターしていくことは非常に重要になります。

海氷生産量のマッピングの話に戻しますと、このマッピングには、氷厚を人工衛星より精度よく見積もるアルゴリズムを開発することが鍵となります。当グループがこの10年来開発してきた係留による高精度の海氷データ取得技術を活かすことで、過去には得られなかったポリニヤ域での比較・検証海氷データを取得し、高精度の氷厚及び海氷生産量を求めるアルゴリズムを開発することを進めております。

北極海で最も海氷生産量が高い海域の一つであるチャクチ海バロー沖においても、アラスカ大学のEicken教授と共同で係留観測を2009年8月より開始しました。さらに、次に述べますオホーツク海北西陸棚ポリニヤでも同様の係留観測を計画中です。これらも比較・検証データに用いて、グローバルに汎用性のある海氷生産量アルゴリズムを開発することをめざしています。このようにして作成される、海氷生産量及び海氷域での熱塩フラックスのグローバルデータセットは、インターネット上で公開する予定で、例えば、大気・海洋・気候モデルの境界条件データや検証データとして広く世界中の研究者に有用されることになれば、と考えています。

北太平洋では、南極底層水程の重い水は作られませんが、中層(200-1000m)まで潜り込む程度の重い水は作られます。その重い水が作られるのがオホーツク海なのです。北半球の寒極はオホーツク海の風上にあり、そのために、オホーツク海北西陸棚ポリニヤは北半球で最も海氷生産が高い海域の一つとなっていて、ここで重い水が作られています(低温研と米露との共同研究により明らかになった成果)。このオホーツク海起源の重い水は潜り込むことで、北太平洋全域の中層(200-1000m)まで及ぶ鉛直(上下方向)の循環を作っています。オホーツク海からの潜り込みは、全球への影響という意味では南極底層水のような役割はないものの、以下に述べますように、温暖化の影響を大きく受けること、物質循環や生物生産への影響、という意味で大きなインパクトをもっています。

オホーツク海の見積面積は、大きな年々変動をしますが、前述したようにこの30年では約20%減少しています。オホーツク海の風上は温暖化が顕著に出る領域であり、この50年で2°Cの気温上昇があります(地球全体の平均では50年で0.65°Cの上昇: IPCC, 2007)。このことが海氷減少の主な原因と考えられます。一方、我々の観測と解析から(Nakanowatari et al., 2007)、この50年でオホーツク海の中層水は顕著に昇温・酸素濃度が減少していることがわかってきました(図3)。これは、冷たい重い水の生成・潜り込みが減少していることを示しています。北太平洋の中層の水はオホーツク海から潜り込んでいるので、この変化は北太平洋にまで及ぶのではないかと考えられます。そこで、北太平洋まで広げて、この50年間で中層の水温がどれだけ上昇しているかを調べますと(図4)、オホーツク海で最大の昇温があることがまずわかります。北太平洋の亜寒帯域は反時計回りの循環(図4の緑線が流線に相当)になっているのですが、オホーツク海を起点にして昇温のシグナルがこの循環に沿って広がっているということがわかります。つまり、オホーツク海で冷たい水の潜り込みが弱まっているというのが、北太平洋までの上下方向の循環をも弱めていることを示唆している図になるわけです。

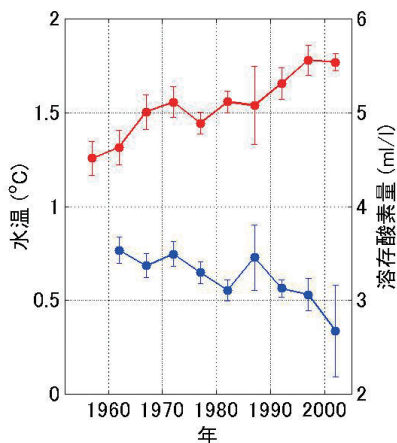


図3：オホーツク海の中層水の水温(赤線)と溶存酸素量(青線)のこの50年の変化。中層のある密度層(水深約500mの層)で調べたもの。Nakanowatari, et al., (2007) より加筆。

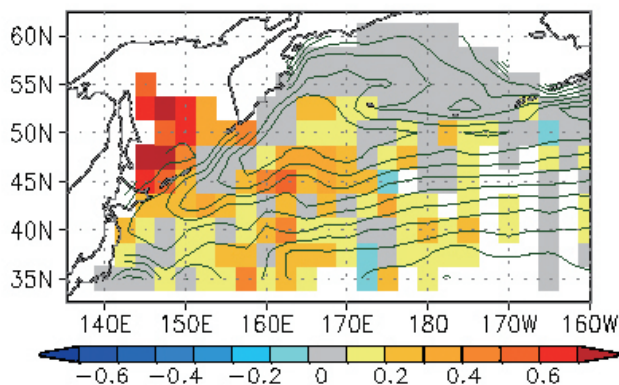


図4：北太平洋及びオホーツク海の中層水温のこの50年の変化。中層のある密度層(水深約300-500mの層)で、この50年間で何度変化したかを示す。Nakanowatari, et al., (2007) より加筆。

このような循環の弱化は、物質（特に鉄分）の循環にとっても重要となります。最近の研究により、鉄分が海の生物生産量を決定しているという説が有力視されています。実は、ロシアとのオホーツク海共同観測では、海氷生成によりできる重い水が潜り込む際に同時に

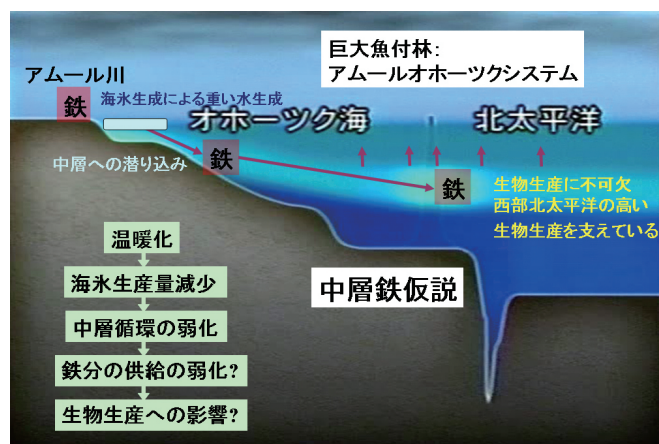


図5：オホーツク海を起源とする中層(鉛直)循環と鉄分の循環、その温暖化による影響

多量の鉄分も中層に送り込まれていること、が発見されました(中塚武・西岡純、私信)。この鉄分は陸面よりアムール川を介して海へ運ばれたものと考えられます。

現在、低温研が中心となって、「鉄分はアムール川からオホーツク海中層へ、さらに北太平洋へと拡がっていき、西部北太平洋の高い生物生産を支えている(図5)」という説(中層鉄仮説)が提案されています(Nishioka et al., 2007)。この仮説を明らかにするために、総合地球環境学研究所と北大低温科学研究所が共同でアムールオホーツクプロジェクト(代表：白岩孝行)を2005年より開始しております。この仮説が正しいとすると、温暖化でオホーツク海の海水生成が弱まると、北太平洋まで含めて鉄分の供給が弱まり、生態系や生物生産にも多大な影響を及ぼす可能性があります(図5左)。これらの仮説の更なる検証や将来の予測のためには、分野の枠や国境を超えた研究が今後ますます重要になってきます。

謝辞：南極海での係留・海洋観測では、東大海洋研究所、白鳳丸、東京海洋大学、海鷹丸の関係者等多くの皆様から多大なるご協力を頂きました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

Aoki, S. et al., 2005: Freshening of the Adelie Land Bottom Water near 140°E, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L23601, doi: 10.1029/2005GL024246.

Nakanowatari T, K. I. Ohshima, M. Wakatsuchi, 2007: Warming and oxygen decrease of intermediate water in the north-western North Pacific, originating from the Sea of Okhotsk, 1955-2004. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L04602, doi:10.1029/2006GL028243.

Nishioka, J. et al., 2007: Iron supply to the western subarctic Pacific : importance of iron export from the Sea of Okhotsk. *J. Geophys. Res.*, **112**, C10012, doi: 10.1029/2006JC004055.

Tamura, T., K. I. Ohshima, and S. Nihashi, 2008: Mapping of sea ice production for Antarctic coastal polynyas, *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L07606, doi: 10.1029/2007GL032903.