

2. 近年の極域海洋変動と淡水循環の役割

青 木 茂*

1. 気候システムのなかの極域海洋と淡水循環

「地球は水の惑星」と言われるが、その水の97%は海洋に存在している。海洋は、そのうえを覆う大気と互いに密接に関係しあいながら、地球表層環境システムの中で大きな役割を果たしている。海洋は熱の膨大な貯蔵庫であり、海洋に蓄えられた熱は大気の運動を駆動する。一方、大気の運動量は海洋の運動を規定する。また大気が海面を通して海洋と水を交換し、水蒸気を輸送することで、海面の塩分に影響を与える。海水の水温と塩分は密度を決める変数として最も重要な特性であるが、水温は熱のやりとりを、塩分は水のやりとりを直接反映している点で重要だという見方もできる。

そして海洋にない水—淡水—の70~80%は高緯度域・極域に氷として蓄えられている。高緯度域・極域にはそれだけの淡水ストックがあることに加え、熱収支の結果として水が固体としても存在しうることが、海

洋の運動や淡水循環に、低・中緯度域とは異なる特有の振る舞いを生み出す。大気が海洋から熱を奪うことにより海水は高密度になる。結氷点を超えると海水が形成され、塩分の排出を受けた海水はいっそう高密度化する。大気による冷却をうけて表面付近の成層が弱まって沈み込みが起り、北大西洋北部では北大西洋深層水、南極海沿岸域では南極底層水といった重い水が形成され、やがて世界の深層をゆっくりと流れるという海洋の深・底層循環が形成される。他方、高緯度陸面上へ輸送された淡水のうちのある部分は固体として氷河、氷床を形成し、ゆっくりと海洋に戻る淡水循環を形成している。氷が「流れ」海洋へ戻るまでには何百年・何千年という長い時間を要すると考えられてきた。

極域海洋たる北大西洋北部や南極海では、淡水収支の変化が深・底層循環に極めて大きな影響を及ぼす。淡水循環の変化は、海洋表層の密度成層に変化をもたらす。極域海洋表層における成層の変化は地球規模の深層循環を変えることにもつながり、ひいては世界の気候に大きな影響を及ぼす可能性を持っている。ヤングドライアス期における気候変動と海洋深層循環の

* 北海道大学低温科学研究所。
shigeru@lowtem.hokudai.ac.jp
© 2013 日本気象学会

変化の関係性に、その顕著な実例を見出すことができる。このように海洋と大気および氷床との複雑な絡み合いを通じて、高緯度域・極域は地球規模気候システムの特徴的な振る舞いの起点となっている。

2. 貯熱量の増加と海洋からみた淡水循環の強化

海洋の観測は陸上で観測に比べて限られており、時間的にも十分な蓄積があるわけではないが、気候変動に密接に関連する数十年スケールの中長期的な変動は極めて重要な研究対象である。20世紀中盤以降、地上平均気温の上昇と並行して、海洋の水温にも顕著な暖水化が観測されている。IPCCの第4次評価報告書(AR4)によると、1961年から2003年までの間に海洋表層700 mの平均水温は0.1°C上昇した(Bindoff *et al.* 2007)。地球表層環境を形成するシステムの1955年以降の蓄熱量の増加のうち、80%以上を海洋が蓄えたとされている。AR4以後、測器の補正などによる見積り修正がなされているものの(Domingues *et al.* 2008)、海洋の基本的な蓄熱量の増加傾向には変化がない。

一方、海洋の塩分についてみると、海面の平均的な塩分は、移流や混合の影響はあるものの、おおまかには大気を通した淡水循環で決まっている(Schmitt 2008)。大西洋の塩分が太平洋に比べて高いのも、このような蒸発-降水のバランスでほぼ規定されているものと考えられている。こうした蒸発や降水は、ここ数十年の対流圏の気温上昇に伴う水蒸気量の増加ともなって、全般的に活発化することも考えられている(例えば Bindoff *et al.* 2007; Emori and Brown 2005)。水循環の促進が海洋表面の塩分コントラストに及ぼす影響については、低塩分のところはより低塩分に、高塩分のところはより高塩分になるといったように、高緯度と中・低緯度、太平洋と大西洋にみられる海面塩分のコントラストが強化される傾向がAR4でも報告されている。しかしながら、水温に比べて塩分については精度の良い観測の蓄積が少ないため、そうした傾向の記述にはやや信頼性にかける面があった。

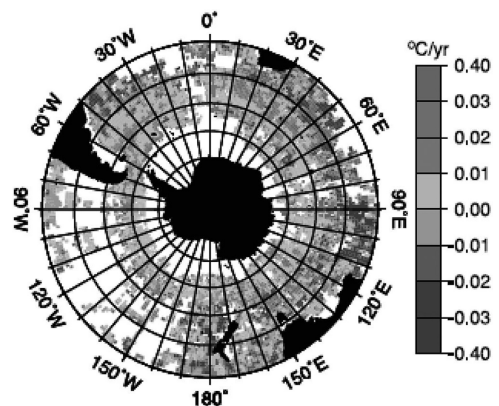
近年、2000年以降に導入された全球中層フロート計画—ARGO—のデータが広く利用できるようになり、海面塩分コントラストの強化がより明瞭に捉えられるようになってきた(例えば Hosoda *et al.* 2009; Durack and Wijffels 2010)。これらの研究によると、大西洋と太平洋の塩分コントラストは、この半世紀の間

に2%ほど増加しているとされる。この海面塩分コントラストの強化は、淡水循環の強化を反映するひとつの証左と見ることができ、降水や蒸発の長期変動に関する直接的な評価については、再解析や衛星観測にもとづくデータセットでは相互の相違が大きく、定量的な議論はまだ難しいが、このように海面塩分を「雨量計」として使うことで全球的な淡水循環の変化を明らかにしていくことが期待される。

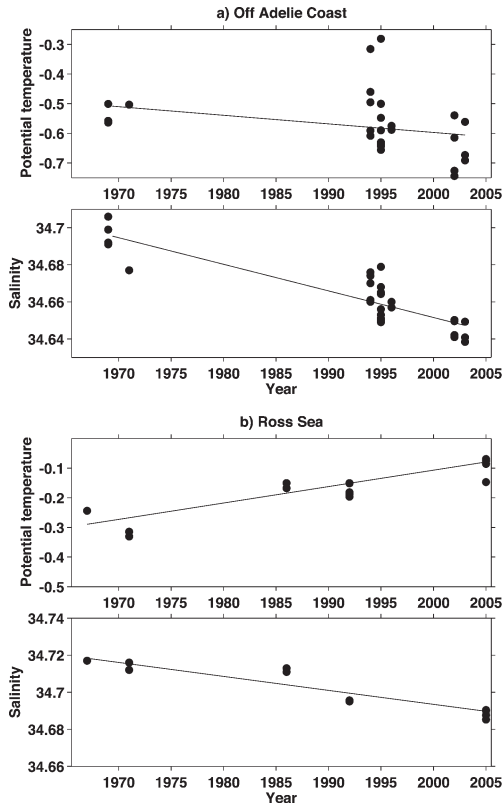
3. 高緯度海洋における中・長期的変動

海洋内部の数十年規模の変動やトレンドに関しては、海域や水塊により異なる特性が報告されている。変動の中には、風系の変化に起因する変動の存在が指摘されている。風系の変化にตอบสนองして等密度面が水平・鉛直方向に移動することで、水温や塩分の空間分布が変化する。北半球と南半球では様相が異なるが、三大洋をつなぐ南半球・南大洋を中心に変動をみていくと、特に表層から中層にかけてここ50年ほどの間に0.17°Cにもなる昇温がみられる(第1図; 例えば Gille 2002。正確には原論文に掲載されたカラーの図の参照を願う。)。同時に低塩化も起こっている(Boning *et al.* 2008)。こうした変動は、南半球環状モード(SAM)のここ数十年程度の正偏差化に伴い、南極周極流のフロントが南下することと対応しているとする見方があるが、海洋の中規模擾乱による熱輸送の効果や亜熱帯循環の影響など、考えるべき課題は多い。

等密度面が上下するだけでなく、海水の性質自体が



第1図 1950-2000年における南大洋亜表層(900 m)の水温トレンドの分布(Gille 2002)。トレンドの強さは右端のグレースケールに示す。



第2図 a) アデリー海岸沖底層におけるポテンシャル水温(上段)と塩分(下段)の時間的変化(1965-2005年)。実線はデータから求めたトレンドを示す。b) 同じくロス海についてのもの。

変化することも考えなければならない。南極中層水(南極周極流のあたりから1000 m 付近を中心として低緯度側に沈み込む低塩分の水塊)の塩分の変化には、等密度面が海面に露出する位置が変わったため、海洋中層へとりこまれる水塊の性質が変わるといった影響がみられる(例えば Durack and Wijffels 2010; Helm *et al.* 2010)。

南極底層水(南極の沿岸から世界中の大洋の底層へ広がる海水で、海域によって少しずつ性質が異なる)についても顕著な水塊特性の変化が報告されている(第2図)。1970年代から2000年代にいたるまでの断片的な観測からではあるが、ロス海における南極底層水は低塩化かつ暖水化していることが報告されている(Ozaki *et al.* 2009)。ロス海の西隣にあるオーストラリア-南極海盆における南極底層水も低塩化しており(例えば Aoki *et al.* 2005; Rintoul 2007)、これにもロ

ス海底層水の水塊変質が大きな影響を与えている可能性が高い。太平洋区やインド洋区の大陸近傍における南極底層水のこうした変化は、太平洋の深海における水温上昇に影響を与えているという指摘もある(Kawano *et al.* 2006; Masuda *et al.* 2010)。また、ウェッデル海や大西洋南部のスコチア海などで南極底層水の水温が上昇している傾向も観測されており、これをSAMの正偏差化と結び付ける議論もある(例えば Meredith *et al.* 2008)。

北大西洋北部においても、20世紀後半には表層から深層にかけて低塩化の傾向が見られている(Curry *et al.* 2003)。しかし、より長期のデータの解析から、顕著な10年規模の変動の存在も明らかになってきた(Reverdin 2010)。北大西洋における深層循環の重要な指標としての子午面循環の流量の長期変動についても、再解析などをあわせてさまざまな見積もりがなされているが、現在のところ変化傾向に関して信頼できる統一的な描像は得られていない。

4. 南極沿岸域の低塩化と大陸氷床・棚氷融解の関係

ロス海は南極底層水が形成される重要な海域のひとつであるが、1960年代以降、沿岸域とその近傍の塩分が低下している(例えば Jacobs and Giulivi 2010)。さきほど述べたように、ロス海やオーストラリア-南極海盆にひろがる南極底層水が低塩化しているのも、この海域における南極底層水の母体の一つである沿岸陸棚氷の変質と強く結びついていると考えられる。

それでは、南極沿岸海洋が低塩化する原因は何であろうか? 水蒸気輸送の増加にともなう降雪の増加の影響も考えられるが、南極縁辺部で観測されている塩分低下(=淡水増加)量は、予想される降雪の増加量を大きく上回っている可能性が高い。現在最も有力視されているのは西南極の棚氷、氷河などの融解や流出が加速している(Rignot *et al.* 2008) ことの影響である。氷河に関する長期にわたる観測の蓄積はほとんどないが、1990年代以降の人工衛星による観測は、西南極氷床にあるパインアイランド氷河などの流動の加速、急激な後退を描き出している。陸水流出の増加は、海水位の上昇につながるのみならず、海洋の成層を変えて、沿岸陸棚氷や底層水の特性変化につながっている可能性がある。

2005年に水産庁・水産総合研究センター遠洋水産研究所がロス海で実施した観測によると、沿岸流域では

低塩で酸素安定同位体比の低い値をもつ分厚い層が観測されている。この事実は、パインアイランド氷河を中心とした陸氷融解水が沿岸流に乗って移流されてきたとすると整合的に理解できる。

何千年という時間スケールをもつと考えられていた氷床の流出が、なぜこのように短期間に加速するのだろうか？ この問題は氷河水床力学の最先端の課題であるが、海洋による棚氷・氷河底面融解の加速がひとつの要因として考えられている。そして、そのような海洋の変動を引き起こす上では、風系の変化が重要な役割を果たしているという議論もあるが、詳細については今後の課題である。

5. おわりに

海洋における中長期的な変動を考えるうえでの必然的ななりゆきとして塩分の重要性がクローズアップされ、研究の対象となる海域も高緯度へとひろがってきた。海面塩分の長期的な変動は、全球規模での淡水循環の強化を映し出している。そして、南極海やグリーンランドにおける氷河水床からは、淡水流出過程の促進がみられている。この陸氷流出の加速も、別の意味で、淡水循環の強化とみることもできる。極域における淡水循環、特に陸上からの流出過程は単調ではなく、海洋に影響を与えると同時に海洋からの影響を受け得る。極域における海洋、大気および氷床との関わりを解明することが、地球規模の気候変動を理解するうえでも鍵となっており、今後の横断的な研究の連携が強く求められよう。

参 考 文 献

- Aoki, S., S.R. Rintoul, S. Ushio, S. Watanabe and N.L. Bindoff, 2005: Freshening of the Adelie Land Bottom Water near 140°E. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L23601, doi:10.1029/2005GL024246.
- Bindoff, N.L. *et al.*, 2007: Observations; Oceanic climate change and sea level. In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC*, S. Solomon, *et al.* eds. Cambridge University Press, Cambridge, 385-429.
- Boning, C.W., A. Dispert, M. Visbeck, S.R. Rintoul and F.U. Schwarzkopf, 2008: The response of the Antarctic Circumpolar Current to recent climate change. *Nature Geosci.*, **1**, 864-869.
- Curry, R., B. Dickson and I. Yashayaev, 2003: A change in the freshwater balance of the Atlantic Ocean over the past four decades. *Nature*, **426**, 826-829.
- Domingues, C.M. *et al.*, 2008: Improved estimates of upper-ocean warming and multi-decadal sea-level rise. *Nature*, **453**, 1090-1093.
- Durack, P.J. and S.E. Wijffels, 2010: Fifty-year trends in global ocean salinities and their relationship to broad-scale warming. *J. Climate*, **23**, 4342-4362.
- Emori, S. and S.J. Brown, 2005: Dynamic and thermodynamic changes in mean and extreme precipitation under changed climate. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L17706, doi:10.1029/2005GL023272.
- Gille, S.T., 2002: Warming of the Southern Ocean since the 1950s. *Science*, **295**, 1275-1277.
- Helm, K.P., N.L. Bindoff and J.A. Church, 2010: Changes in the global hydrological-cycle inferred from ocean salinity. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L18701, doi:10.1029/2010GL044222.
- Hosoda, S., T. Suga, N. Shikama and K. Mizuno, 2009: Global surface layer salinity change detected by Argo and its implication for hydrological cycle intensification. *J. Oceanogr.*, **65**, 579-586.
- Jacobs, S.S. and C.F. Giulivi, 2010: Large multidecadal salinity trends near the Pacific-Antarctic continental margin. *J. Climate*, **23**, 4508-4523.
- Kawano, T., M. Fukasawa, S. Kouketsu, H. Uchida, T. Doi, I. Kaneko, M. Aoyama and W. Schneider, 2006: Bottom water warming along the pathway of lower circumpolar deep water in the Pacific Ocean. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L23613, doi:10.1029/2006GL027933.
- Masuda, S. *et al.*, 2010: Simulated rapid warming of abyssal North Pacific waters. *Science*, **329**, 319-322.
- Meredith, M.P., A.C. Naveira Garabato, A.L. Gordon and G.C. Johnson, 2008: Evolution of the deep and bottom waters of the Scotia Sea, Southern Ocean, during 1995-2005. *J. Climate*, **21**, 3327-3343.
- Ozaki, H., H. Obata, M. Naganobu and T. Gamo, 2009: Long-term bottom water warming in the north Ross Sea. *J. Oceanogr.*, **65**, 235-244.
- Reverdin, G., 2010: North Atlantic subpolar gyre surface variability (1895-2009). *J. Climate*, **23**, 4571-4584.
- Rignot, E. *et al.*, 2008: Recent Antarctic ice mass loss from radar interferometry and regional climate modelling. *Nature Geosci.*, **1**, 106-110.
- Rintoul, S.R., 2007: Rapid freshening of Antarctic Bottom Water formed in the Indian and Pacific oceans. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L06606, doi:10.1029/2006GL028550.

Schmitt, R.W., 2008: Salinity and the global water cycle. *Oceanography*, 21(1), 12-19.
