

## 1. 海水の気候変動における役割：北極海 vs. 南極海

大 島 慶一郎\*

### 1. はじめに

北極海を特徴付けるのは海水の存在である。海水は、北極海と南極海に同程度の面積をもって大きく広がっている。北極海では、2000年代に入り夏の海水面積が1970/80年代に比べ半分近くに減少し、北極海は多年氷域から、夏に海水のない季節氷域へとシフトしつつある (Stroeve *et al.* 2012)。2012年9月には、日本の衛星・センサー (AMSR2) により、海水面積の最小が記録されている。海水は、以下の3つの特性・役割により、気候 (変動) に対して大きなインパクトを持つ。

- A) 高アルベド (日射に対する反射率が高い)
- B) 大気－海洋間の断熱材
- C) 熱と塩の再分配・輸送 (中深層水の形成)

これらの特性により、海水域は温暖化等の気候変動に対して鋭敏に応答するとともに、海水域・極域が全球の気候変動を増幅しうる (polar amplification) ことにもなる。本稿では、北極海の海水の気候変動への関わりを南極海の場合と対比させて議論する。

### 2. 海水－海洋アルベドフィードバック効果

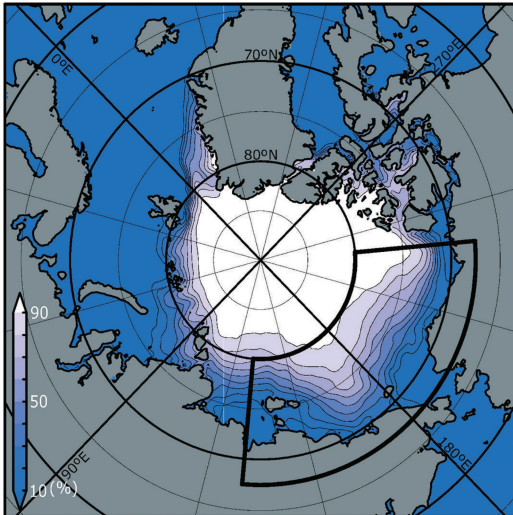
上記の特性 A の高アルベドは、数値で言うと、開水面 (海面) のアルベドが0.07であるのに対し、海水は積雪があるため0.7程度となる。この大きな違いは、日射が大きくなる夏季に圧倒的な効果を生む。すなわち、夏季は日射により開水面にインプットされる熱が大きく、海水表面より1～2オーダー大きくなる。そのため、ある程度の開水面域が生じる南極海やオホーツク海といった季節氷域においては、日射により開

水面を介して海洋表層に吸収された熱が海水融解の主要な熱源となっている (Ohshima *et al.* 1998)。このような状況では、融解期に一旦海水密度度が低下すると、開水面からより多くの日射が吸収され、その熱によって海水が融解、さらに海水密度度が低下することでその後の融解が加速される、正のフィードバック (海水－海洋アルベドフィードバック) が働く。南極海やオホーツク海では、この効果が海水後退の年々変動をある程度決めている (Nihashi and Cavalieri 2006; Nihashi *et al.* 2011)。一方、多年氷域であった北極海では、夏でも海水密度度が低下しにくかったため、海水表面に吸収された熱による表面融解が卓越すると考えられていた (Maykut and Untersteiner 1971)。しかし、2000年代以降、季節氷域化しつつあることで、南極海などと同様に、開水面から入る熱 (日射) が増し (Perovich *et al.* 2007)、海水－海洋アルベドフィードバックが働くように変化した可能性がある。

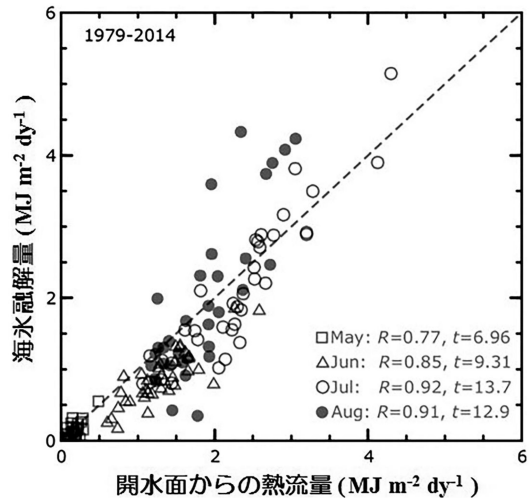
北極海の夏の海水減少は、主に太平洋側の北極海で起こっているため、第1図の扇形領域に対して、開水面を通じて海洋表層に吸収される熱量と、海水密度度の変化から推定される海水融解量の関係を各年各月で比較したのが第2図である (Kashiwase *et al.* 2017)。第3図aは、両者の年ごとの積算の時系列を示したものである。これらの図から、海水融解量 (融解に必要な熱量に換算して示す) は、開水面から入る熱量と定量性をもってよい関係にあることがわかる。すなわち、主に開水面を介して入った熱によって海水が融解することが示唆され、それが海水後退の年々変動を説明しえる。特に海水減少の進んだ2000年代以降は、開水面を介して入る熱が大きくなり、海水融解量も増加したことがわかる。

第3図bは、融解期初期 (5～6月) の海水発散

\* 北海道大学低温科学研究所。  
ohshima@lowtem.hokudai.ac.jp  
© 2019 日本気象学会



第1図 北極海の9月の海水密度の気候値(1979~2014年平均)。扇形領域は第2~3図での解析領域。

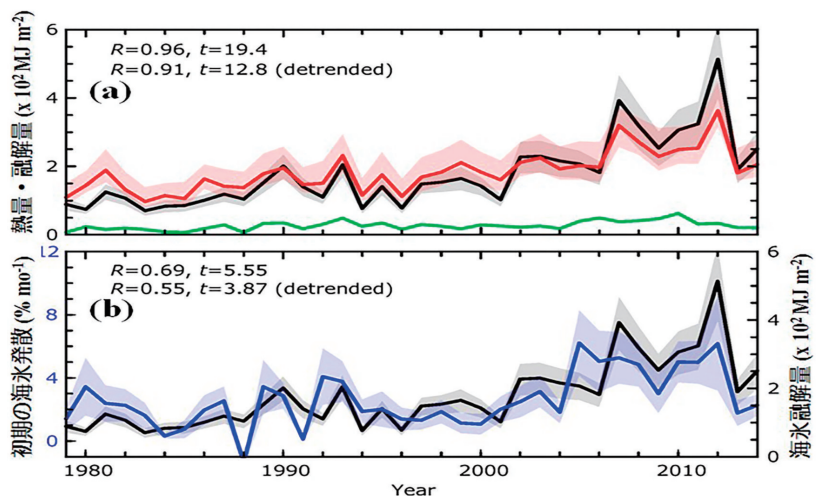


第2図 第1図の扇形領域における各年各月の、海水域の開水面に入る熱量(横軸)と海水融解量(縦軸)の関係。海水融解量は相当する熱量に換算してある。□が5月、△が6月、○が7月、●が8月。Kashiwase *et al.* (2017) を加筆・修正。

と5~8月の海水融解量の年々変動を示したもので、両者はよい対応を示している。これは、融解初期に海水発散が大きいと、それによる開水面の増加が引き金となって、海水-海洋アルベドフィードバックが効果的に働き、2~3ヶ月遅れてより大きな融解偏差を生むことを示唆している。これは、融解期初期(5~6月)の海水発散成分から、海水最小期(8~9月)の海水偏差を予測できる可能性も示している。

また、海水発散とその後の融解量との関係は2000年以降において特に顕著であることも示される。この結

果は近年の季節海水域化に伴って海水-海洋アルベドフィードバックの効果がより顕著になっていることを示唆する。これは、多年氷域の割合および1年氷の平



第3図 第1図の扇形領域における、(a) 5~8月積算の海水域開水面に入る熱量(赤線)、海水融解量(黒線)、正味流出する海水量(緑線)、(b) 融解期初期(5~6月)の海水発散(青線)と5~8月積算の海水融解量(黒線)の年々変動。海水(融解)量は熱量に換算。シェードは見積もり誤差を示す。Kashiwase *et al.* (2017) を加筆・修正。

均氷厚が減少したことで(Kwok and Rothrock 2009)、海水がより動きやすく発散が生じやすくなり、フィードバックの感度が増したと考えられ

る。2000年以降はそれ以前より、2倍程度海水の発散成分が大きくなっている（第3図b）。この差自体による海水密度の減少はわずかであるが、これが引き金となってフィードバックが働き2000年以降、開水面への熱量インプットが増加し（第3図a）、融解が加速したと考えられる。

ただし、北極海の夏の海水激減は、他の要因も関わっており、複合的なものであると考えるべきである。具体的な他の要因としては、気温上昇の他には、大気循環や雲量の変化、太平洋から流入する熱量の増加（Woodgate *et al.* 2012）、北極海の外部へ流出する海水量の増加などが挙げられている。

近年の北極海の海水激減は、上記の特性B（断熱材）の働きを減少させ、海洋から大気への熱フラックスが増す効果を生んでいると考えられる。近年、北極海域及びその周辺域では、全球平均よりずっと大きい気温上昇が生じており、それはこの効果による部分が大きいと考えられる。いっぽう南極海では、北極海のような海水面積の有意な減少トレンドは見られず、むしろ若干ながら海水面積は増加傾向にある。北極海のように、特性Aによるフィードバック効果や特性Bの断熱効果が海水面積や気温のトレンドをもたらすというようなことは現時点では有意には起こっていないようである。

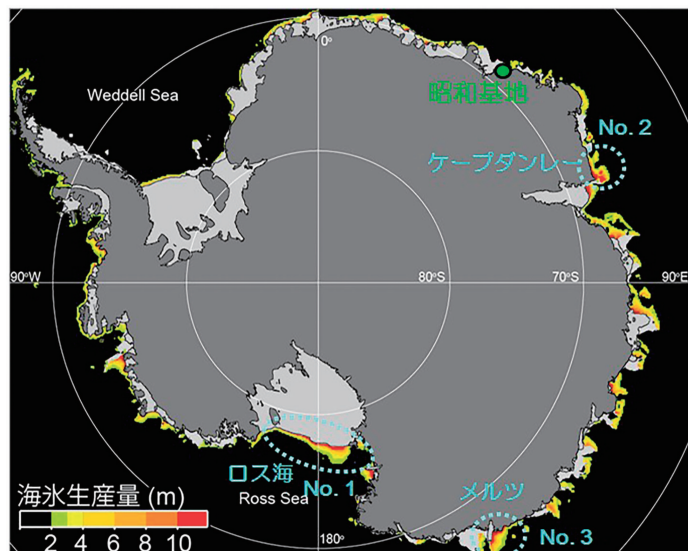
### 3. 熱と塩の再分配・輸送(中深層水の形成)

Cの特性、海水による塩の再分配は、海水が凍って海水となるときの海水の塩分の7〜9割ははきだされ、濃縮された高塩分水（ブライン）が下の海へ排出されることで生じ、それによって中深層水の起源水となる重い水が作られる。この効果は特に南極海で重要であり、このようにして生成される南極底層水は全大洋の底層に拡がっており、全海水の30〜40%をも占め（Johnson 2008）、全球の深層循環の起点となっている。底層水の起源水は、沿

岸ポリニヤと呼ばれる高海水生産域で生成される。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疎水域・薄水域が維持される海域である。

沿岸ポリニヤでは現場観測が困難なため、中深層水の起源水がどこでどれくらい生成されているかは全球的にもよくわかっていなかった。近年、衛星マイクロ波放射計データを用いることで、どこに薄水域（ポリニヤ）があるかを検知することが可能となってきた。さらに、その氷厚を推定することができれば、熱収支計算から大気より奪われる熱量が計算でき（氷が薄いほど多く熱を奪われる）、奪われた熱量から海水生産量が推定できる（Tamura *et al.* 2008）。第4図及び第5図は、このようにして求めた年積算海水生産量の最新のマッピングを、南半球、北半球それぞれで示したものである（Ohshima *et al.* 2016）。南極海は外洋に開かれた海なため、沿岸では海水が発散場となりポリニヤができやすく、そのため海水生産が大きくなるのに対し、北極海は周りを陸に囲まれ、沿岸では海水が発散場となりにくく、海水生産が抑えられる。このことが、南極海では重い深層水が形成されるのに対し、北極海では深層水は形成されない状況をつくっている。

南大洋の海水生産量マッピング（第4図）から、南



第4図 AMSR-Eによる、南半球の年積算海水生産量のマッピング。Ohshima *et al.* (2016)を加筆・修正。データはNihashi and Ohshima (2015)による。



極底層水の主生成域であるロス海に次ぐ第2の海水生産海域が、南極昭和基地の東方約1200 kmにあるケーブダンレーポリニヤにあることがわかる。海水生産量が大きいほど重い水が生成されるので、ここが未知の南極底層水生成域と予測され、日本を中心とした現場海洋観測により、その予測が正しいことが証明された (Ohshima *et al.* 2013)。

一方、第3の底層水生成域アデリーランドはメルツ氷河の風下・下流にできる巨大なメルツポリニヤでの高海水生産が底層水生成の起源となっているが、2010年の氷河崩壊後に、このポリニヤでの海水生産量が激減したことが明らかになった (Tamura *et al.* 2012)。その後の海洋観測でここでの底層水生成が大きく減じていることもわかった (Aoki *et al.* 2013)。このように、海水生産量を見積もる手法が開発されたことによって、新たな底層水生成域の発見に加え、底層水の変動まで予見できることが示された。



第5図 AMSR-Eによる、北半球の年積算海水生産量のマッピング。Ohshima *et al.* (2016) を加筆・修正。データは Iwamoto *et al.* (2014) による。

北半球のマッピング (第5図) からは、オホーツク海やベーリング海の方が北極海より海水生産がずっと高いことがわかる。北半球で一番海水生産量が大きいのはオホーツク海の北西陸棚ポリニヤであり、ここで北太平洋では一番重い水が生成され、北太平洋の中層 (鉛直) 循環を形成する (Shcherbina *et al.* 2003)。

北極海のポリニヤでの海水生産でできる陸棚水は深層水までは重くならず、Cold Halocline Layer (CHL) に貫入し、北極海を特徴づける CHL を形成していると考えられている。CHL というのは、表層を覆う結氷温度に近い層の下部に存在する塩分 (密度) 躍層のことで、この層があることで、下層にある暖かい大西洋起源の水からの熱を遮断し海水が生成されやすい条件を保持していると考えられている (Aagaard *et al.* 1981)。

CHL の形成に関しては、ベーリング海からの重い水の流入の重要性も指摘されている (Woodgate *et al.* 2005)。第5図から、ベーリング海では、特にアナディールポリニヤでの海水生産が格段に高いことがわかる。我々はこのアナディールポリニヤで作られる高密度水が北極海に流入し CHL の形成に大きく寄与しているのではという仮説を持っており、今後の観測での実証が期待される。

#### 4. おわりに

以上のように、北極海及び南極海は、海水の存在によって気候 (変動) に対して大きなインパクトを持つと考えられる。近年の温暖化に対して北極海は、海水の持つ高アルベド (A) と断熱材 (B) の特性によって、即時・鋭敏に応答し、その海水減少が温暖化を増幅しているとも考えられている。一方、南極海は、温暖化に即時に応答しているとは言い難い。しかし、海水生成による高密度水生成 (C) によって形成される南極底層水が近年、顕著に高温化・低塩化しており、生成量の大きな減少が示唆される (IPCC 第5次評価報告書)。海は莫大な熱容量を持つため、重い水の沈み込む量や場所の変化が深層循環を変え、その結果として地球気候が激変したことが過去地球の歴史から示唆されている。このような変動は、数百～千年の時間スケールを持つと考えられているが、かつてない速度で温暖化が進行している現在、もっと早い速度での変動も十分考えられる。



## 謝 辞

本原稿は、柏瀬陽彦博士、二橋創平博士、岩本勉之博士、田村岳史博士、Hajo Eicken 博士との共同研究を中心に紹介した。図の作成にもご協力頂いた。ここに感謝の意を表するものである。

## 参 考 文 献

- Aagaard, K., L. K. Coachman and E. Carmack, 1981: On the halocline of the Arctic Ocean. *Deep Sea Res. Part A*, **28**, 529-545.
- Aoki, S. *et al.*, 2013: Widespread freshening in the seasonal ice zone near 140°E off the Adélie Land Coast, Antarctica, from 1994 to 2012. *J. Geophys. Res.*, **118**, 6046-6063.
- Iwamoto, K., K. I. Ohshima and T. Tamura, 2014: Improved mapping of sea ice production in the Arctic Ocean using AMSR-E thin ice thickness algorithm. *J. Geophys. Res.*, **119**, 3574-3594.
- Johnson, G. C., 2008: Quantifying Antarctic Bottom Water and North Atlantic Deep Water volumes. *J. Geophys. Res.*, **113**, C05027, doi:10.1029/2007JC004477.
- Kashiwase, H., K. I. Ohshima, S. Nihashi and H. Eicken, 2017: Evidence for ice-ocean albedo feedback in the Arctic Ocean shifting to a seasonal ice zone. *Sci. Rep.*, **7**, 8170, doi:10.1038/s41598-017-08467-z.
- Kwok, R. and D. A. Rothrock, 2009: Decline in Arctic sea ice thickness from submarine and ICES at records: 1958-2008. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L15501, doi:10.1029/2009GL039035.
- Maykut, G. A. and N. Untersteiner, 1971: Some results from a time-dependent thermodynamic model of sea ice. *J. Geophys. Res.*, **76**, 1550-1575.
- Nihashi, S. and D. J. Cavalieri, 2006: Observational evidence of a hemispheric-wide ice-ocean albedo feedback effect on Antarctic sea-ice decay. *J. Geophys. Res.*, **111**, C12001, doi:10.1029/2005JC003447.
- Nihashi, S. and K. I. Ohshima, 2015: Circumpolar mapping of Antarctic coastal polynyas and landfast sea ice: Relationship and variability. *J. Climate*, **28**, 3650-3670.
- Nihashi, S., K. I. Ohshima and H. Nakasato, 2011: Sea-ice retreat in the Sea of Okhotsk and the ice-ocean albedo feedback effect on it. *J. Oceanogr.*, **67**, 551-562.
- Ohshima, K. I. *et al.*, 1998: Relationship between the upper ocean and sea ice during the Antarctic melting season. *J. Geophys. Res.*, **103**, 7601-7615.
- Ohshima, K. I. *et al.*, 2013: Antarctic Bottom Water production by intense sea-ice formation in the Cape Darnley polynya. *Nature Geosci.*, **6**, 235-240.
- Ohshima, K. I., S. Nihashi and K. Iwamoto, 2016: Global view of sea-ice production in polynyas and its linkage to dense/bottom water formation. *Geosci. Lett.*, **3**, 13, doi:10.1186/s40562-016-0045-4
- Perovich, D. K. *et al.*, 2007: Increasing solar heating of the Arctic Ocean and adjacent seas, 1979-2005: Attribution and role in the ice-albedo feedback. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L19505, doi:10.1029/2007GL031480.
- Shcherbina, A. Y., L. D. Talley and D. L. Rudnick, 2003: Direct observations of North Pacific ventilation: Brine rejection in the Okhotsk Sea. *Science*, **302**, 1952-1955.
- Stroeve, J. C. *et al.*, 2012: The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis. *Clim. Change*, **110**, 1005-1027.
- 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.
- Tamura, T., G. D. Williams, A. D. Fraser and K. I. Ohshima, 2012: Potential regime shift in decreased sea ice production after the Mertz Glacier calving. *Nature Commun.*, **3**, 826, doi:10.1038/ncomms1820.
- Woodgate, R. A. *et al.*, 2005: Pacific ventilation of the Arctic Ocean's lower halocline by upwelling and diapycnal mixing over the continental margin. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L18609, doi:10.1029/2005GL023999.
- Woodgate, R. A., T. J. Weingartner and R. Lindsay, 2012: Observed increases in Bering Strait oceanic fluxes from the Pacific to the Arctic from 2001 to 2011 and their impacts on the Arctic Ocean water column. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L24603, doi:10.1029/2012GL054092.