

季節海氷域化する北極海における海水－海洋アルベドフィードバック効果

柏瀬陽彦^{1,2}、大島慶一郎²、二橋創平³、Hajo Eicken⁴

¹ 国立極地研究所

² 北海道大学低温科学研究所

³ 苫小牧高等工業専門学校

⁴ アラスカ大学フェアバンクス校

近年北極海では夏季海氷面積の減少、平均氷厚の減少、季節海氷域の増加など様々な変化が現れており、これらの変動は特に 2000 年以降の太平洋セクターにおいて顕著である。先行研究ではそのような変化が気温の上昇、大気循環場の変化に伴う海氷流出量の増加、外洋域からの熱流入量の増加など、様々な要因が複合的に働いた結果であることを示唆しているが、その全体像は未だ明らかにはされていない。一方で北極海では近年の気候変動が増幅されることも指摘されており、この polar amplification と呼ばれる現象には海氷激減が関連していると考えられている (Bekryaev et al., 2010)。本研究では北極海の急激な変動の要因の一つとして海水－海洋アルベドフィードバック効果に着目する。これは開水面と海氷表面とでアルベド（日射に対する反射率）が大きく異なる（それぞれ 0.07 および 0.7 程度）ことに起因して生じるものであり、一旦海氷密接度が低下すると開水面に入る日射熱が海氷を融解させ、さらに密接度が低下する正のフィードバック効果である。このフィードバックは南極海やオホーツク海といった季節海氷域の海氷後退をコントロールする要素の一つであることが明らかになっており (Niahshi and Cavalieri, 2006; Niahshi et al., 2011)、近年は季節海氷域化しつつある北極海においても重要な役割を持つことが期待される。しかし、現状では北極海太平洋セクターで海氷密接度の減少と対応して開水面から吸収される日射に有意な増加傾向が見られることが報告されている (Perovich et al., 2007) もの、その熱がどの程度海氷融解の増加に寄与しているか、フィードバック効果が生じるために必要なトリガーとなる物理プロセスは何かがあるかなどの基本的な疑問点もあきらかにはなっていない。

本研究では北極海太平洋セクターの海氷域（海氷密接度 $\geq 30\%$ として定義）を対象として、衛星観測による海氷データおよび簡略化海水－海洋結合モデルを使用してそこでの海水－海洋アルベドフィードバック効果を定量的に評価した。本研究で使用したのは、1979–2012 年の期間の衛星マイクロ波放射計 (SMMR および SSM/I) による海氷観測データの他、海氷漂流速度、ice age データ、ICESat 氷厚データ、および気象再解析データ (ERA-interim) であり、それぞれ 25km の polar-stereographic グリッド上に内挿して使用した。

はじめに、衛星観測から得られた海氷密接度、漂流速度およびアルベドを使用することで太平洋セクター（図 1、扇形領域）での熱収支の年々変動を計算した（図 2）。ここでは、海氷融解に最も重要であると考えられる、開水面およびメルトポンドからの熱吸収量（それぞれ灰太線および灰細線）を示し、海氷融解量（黒太線）および流出量（破線）と比較する。北極海の熱収支においてメルトポンドは無視することができないものであり、本研究では裸氷とメルトポンドのアルベドを一定（それぞれ 0.6 および 0.07）とすることで海氷のアルベドからメルトポンドフラクションを計算している。図 2 からは、北極海太平洋セクターにおいては海氷後退のほとんどが流出ではなく融解によるものであること、融解量が開水面からの日射によって決まることが示唆されている。これは海水－海洋アルベドフィードバックが働くための前提条件が満たされていることを意味する。

次に、フィードバックが実際に働いていることを示すため、海氷融解量と海氷発散との比較を行った。最も有意な相関を示した、初夏（5月中旬–6月上旬）の海氷発散（灰線）および 1–2 ヶ月後（6月中旬–8月上旬）の海氷融解量の経年変動を図 3 に示す。両者に有意な相関（相関係数=0.73）があることは、海氷発散によるわずかな密接度の差がトリガーとして働き、海水－海洋アルベドフィードバックにより 1–2 ヶ月でそれが増幅されることを示している。また、この関係は 2000 年代以降明らかに強まっている傾向も示された。さらに、開水面からの熱量や融解量（図 2）、初夏の海水発散には 2000 年代以降に有意な増加トレンドが見られることも特徴的である。

以上の結果からは、北極海太平洋セクターが季節海氷化したことに起因して、海水－海洋アルベドフィードバックの影響が表面化するようになったことが近年の北極海での海氷激減に関係していることが示唆される。最後に、北極海太平洋セクター（図 1、長方形領域）での海氷後退を簡略なモデルで再現し、そこでのフィードバック効果の影響を検証した。モデルに 2000 年以降で平均した熱フラックスおよび海水漂流速度を与えた場合、観測と同程度の海氷後退を得ることができた。漂流速度を与えなかった場合の実験結果と比較すると、与えた場合の海氷融解量は 1.6 倍程度増加しており、これが海水－海洋アルベドフィードバックによる影響の大きさであるといえる。また、漂流速度のみを特徴的であった 2004 年および 2012 年の値に変更して実験を行うことで、それぞれ

の年の海氷後退を再現することにも成功した。このモデルから推定される海氷後退の時間スケールは初夏では約1ヶ月であり、これは海氷発散が融解に影響するまでのラグと整合的であった。

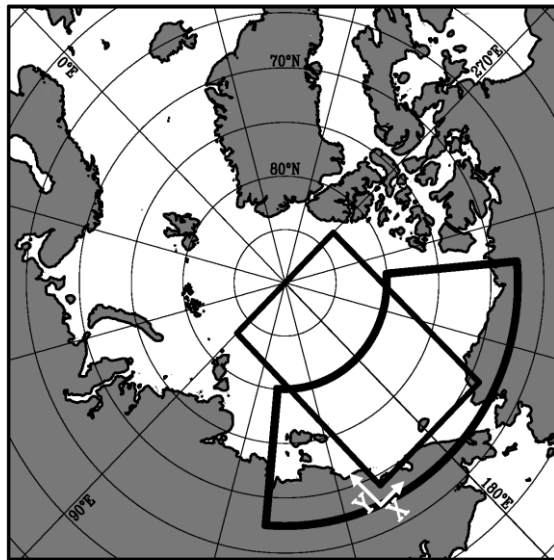


図1. 北極海の地図。熱収支解析および海氷発散の計算を扇型領域内で行った。長方形領域は簡略化海氷-海洋結合モデルによる海氷後退の再現実験に使用した。

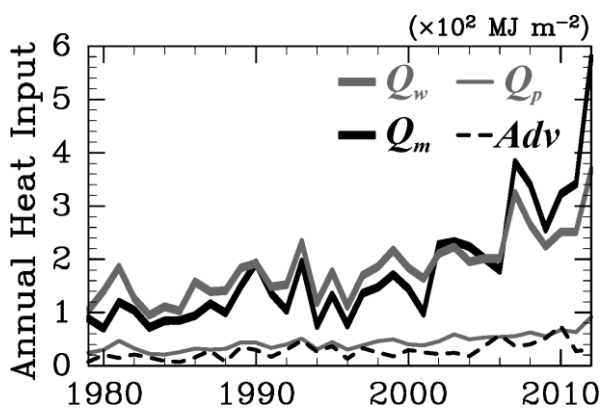


図2. 熱収支解析の結果。融解期（5月-8月）の開水面（灰太線）およびメルトポンド（灰細線）から吸収される熱量、海氷融解量（黒太線）および海水流出量（破線）の経年変動をそれぞれ示す。比較のため、融解量および流出量はそれぞれその量を融解するのに必要となる熱量の形で表現した。

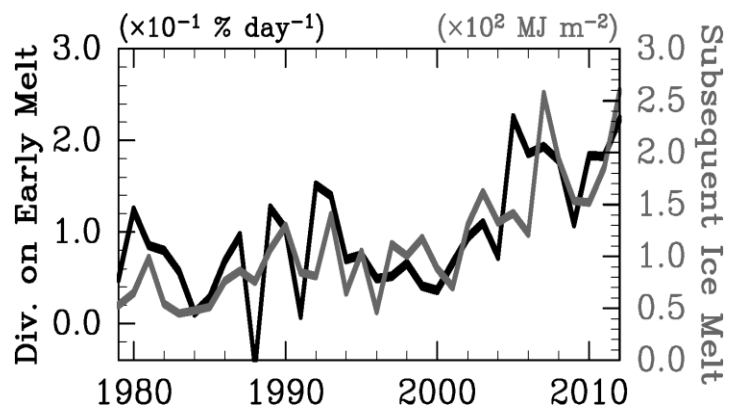


図3. 初夏（5月中旬-6月上旬）の海氷発散（黒線）およびその後2ヶ月間（6月中旬-8月上旬）の海氷融解量（灰線）の経年変動の比較。海氷発散は漂流速度による海氷密接度の変化として示す。

References

Bekryaev, R. V., I. V. Polyakov, and V. A. Alexeev (2010). Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern Arctic warming. *Journal of Climate*, 23(14), 3888-3906.

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., 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. Oceanography*, 67(5), 551-562, doi:10.1007/s10872-011-0056-x.

Perovich, D. K., B. Light, H. Eicken, K. F. Jones, K., Runciman, and S. V. Nghiem (2007). Increasing solar heating of the Arctic Ocean and adjacent seas, 1979-2005: Attribution and role in the ice - albedo feedback. *Geophysical Res. Lett.*, 34(19).