

## 北極海の海水激減における海水-海洋アルベドフィードバック効果

柏瀬陽彦<sup>1,2</sup>、大島慶一郎<sup>2</sup>、二橋創平<sup>3</sup>、Hajo Eicken<sup>4</sup><sup>1</sup> 国立極地研究所<sup>2</sup> 北海道大学低温科学研究所<sup>3</sup> 苫小牧工業高等専門学校<sup>4</sup> アラスカ大学フェアバンクス校

## Ice-ocean albedo feedback effect on recent drastic reduction in Arctic sea ice cover

Haruhiko Kashiwase<sup>1,2</sup>, Kay I. Ohshima<sup>2</sup>, Sohey Nihashi<sup>3</sup>, and Hajo Eicken<sup>4</sup><sup>1</sup> National Institute of Polar Research<sup>2</sup> Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University<sup>3</sup> Tomakomai National Collage of Technology<sup>4</sup> University of Alaska Fairbanks

Associated with the recent global warming, the Arctic sea ice has drastically changed (e.g. reduction of summer ice extent, decrease of mean ice thickness, and decrease of multi-year ice) particularly in the Pacific Sector beginning in the 2000s. A positive feedback caused by the difference in surface albedo between ice and ocean ( $\sim 0.7$  and  $\sim 0.07$ , respectively), called as “ice-ocean albedo feedback”, is considered as a possible mechanism for the rapid change of the Arctic sea ice cover. However, the impact of this feedback on the Arctic sea ice retreat is still poorly understood. This study examines how the ice-ocean albedo feedback affects the Arctic sea ice retreat and recent drastic reduction of summer ice extent, based on analyses using sea ice data from satellite microwave radiometers and a simplified ice-ocean coupled model. First, focusing on the Pacific Sector (fan-shaped area in Figure 1), we calculated the daily net heat budget over the ice covered area (defined as ice concentration  $\geq 30\%$ ) and the volume of ice melt and export. Here we show the heat input through the open water fraction (Figure 2; gray thick line) and the melt ponds (gray thin line), volume of ice melt (black solid line) and export (black dashed line). Figure 2 indicates that ice extent in the analysis domain is mainly reduced through the ice melt caused by the solar heating at the open water fraction; this is the necessary condition for the ice-ocean albedo feedback. Then we compared the ice divergence with the ice melt volume, and found that the divergence on early melt season (from mid-May to early-June) has significant correlation with the 1-2 months lagged ice melt (Figure 3). This means that a small difference in ice concentration induced by the ice motion acts as the trigger of ice-ocean albedo feedback. Also it is remarkable that the heat input through the open water fraction, ice melt volume, and early summer divergence have a distinct increasing trend beginning in the 2000s, suggesting that recently this feedback has become sensitive. These results are also confirmed by a simplified ice-ocean coupled model.

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。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水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。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、衛星観測による海水データ (SMMR および SSM/I) 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。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。図 2 からは、北極海太平洋セクターにおいては海水後退がほとんど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、海氷–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年代以前と比べ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）、初夏の海氷発散には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。これらは全て2000年代以降の海氷を減少させる方向に働くため、海氷–海洋アルベドフィードバック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氷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、これが海氷–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。

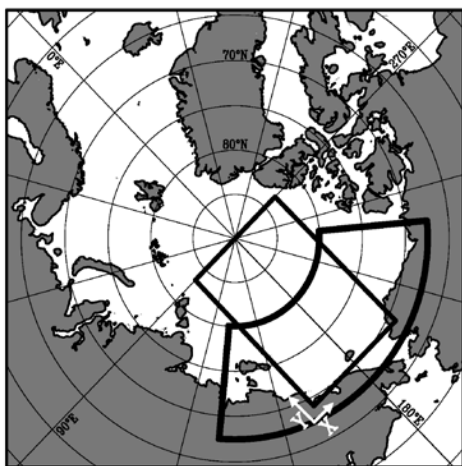


Figure 1. Map of the Arctic Ocean. The heat budget analysis and calculation of ice divergence were completed for the fan-shaped area. The simplified model was applied for the rectangular region.

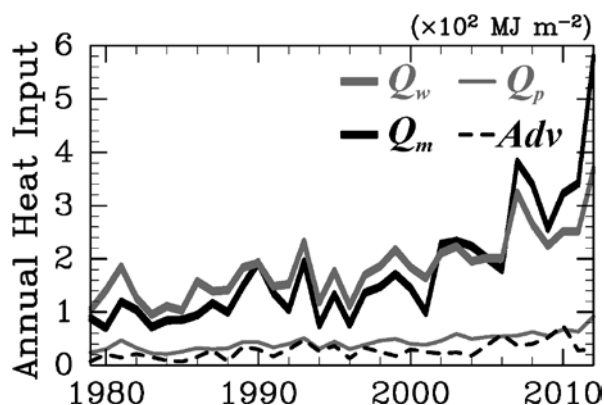


Figure 2. Results of the heat budget analysis. Interannual variations in heat input at the open water surface (gray thick line) and melt pond surface (gray thin line), and the volume of ice melt (black solid line) and ice export (dashed line) are plotted. The volume of ice is converted to the heat required for melt.

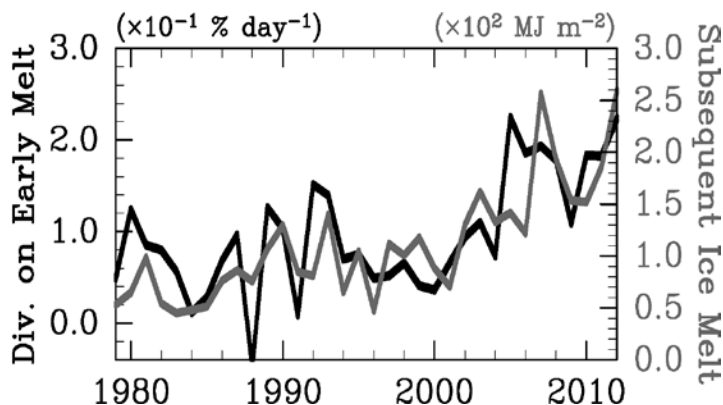


Figure 3. Comparison between ice divergence averaged from mid-May to early-June (black line) and volume of ice melt averaged from mid-June to early-August (gray line). Ice divergence indicates the change in ice concentration over the analysis domain induced by ice motion.

## References

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, 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.