

北極海の海水減少

1. はじめに

海水が接岸する国は世界で限られる中、日本は冬の北海道東部沿岸に行けば海水を体験できる。海水には厚さの不均一性による凸凹があり、雪が積もっている。ぶつかり合うときはきしむ音が鳴り、海水同士が重なり合うとさらに厚みを増す。氷盤のサイズは様々でたくさん割れ目があり、そこで露出した海面は大気によって冷やされ次第に薄い氷で覆われる。北極海の海水も上記と基本的に同じ特徴だが、それ以外に、平均的な厚さが場所によっては数mあり、夏季には積雪の融解水によって水溜りが形成される。夏に融けきらず、複数年にわたって生き残る多年氷の存在も北極海における海水の大きな特徴である。高度な大気海洋結合モデルにはこのような特徴・プロセスがパラメタライズされているものの、北極海の海水面積の年々変動は観測結果となかなか一致しないのが現状である。

衛星による広範囲の海水域の観測によれば、北極海の海水面積は確実に減少してきていることが分かっている。冬季は北極海全域が氷で覆われるものの、夏に消失してしまう一年氷域が次第に広がりつつあり、北極海の平均的な氷厚が減少している。本解説では、社会的にも注目されるようになった北極海の海水減少について、そのメカニズムと影響を最近の研究動向に基づいて紹介する。

2. 海水の減少とは？

「海水の減少」と聞けば、まず融けてなくなることをご想像するだろう。実際、海水は表面・側面・底面のいたるところで融解が引き起こされる。初夏までは、まだ割れ目も少なく氷上の積雪のみが融解し、水溜りが形成される(メルトポンド)。メルトポンドはアルベドが低いいため、太陽放射をより吸収し、海水の融解を加速させる。このとき氷厚が1m程度であれば、海水を透過して海水下の海水を加熱し、海水底面からも融解が進行することが知られている。7月～8月に

なると海水が割れ始め、太陽放射が効率的に海洋に入射し、海の加熱が顕著になる。海水と接する海水の側面と底面の融解が優勢になり、急激に海水面積が減少していくアイス・アルベドフィードバックが進行する。特に最近の太平洋側北極海では、海水減少の80%は海水表面に蓄積された熱が原因であり、海洋の熱移流の効果は小さく沿岸域数百kmに限られる(Steele *et al.* 2010)。

海水の減少に関わる2つ目のプロセスは、秋から春に海水が十分に成長できなくなりつつあることに起因している。海が結氷し始めるには、夏に蓄えた表層の熱をまず大気に放出する必要がある。夏の貯熱が多くなればなるほど、海水が形成される時期が遅くなるとともに、北極海上の大気は加熱されるため海面の冷却も弱化し、真冬の海水生成速度が鈍化する。また、開放水面の増加によって氷縁域では雲量が増加している。特に春先の雲量の増加は下向き長波放射の増加トレンドに対応し、これが春先の海水成長を抑制するため、春の雲量の変動と夏の海水後退位置とは相関が高い(Francis and Hunter 2006)。

3つ目のプロセスは上記の熱力学的プロセスではなく、海水が風で流され北極海から流出する点である。海水が著しく減少した2007年など、夏季に高・低気圧のArctic Dipole Anomaly(Wang *et al.* 2009)が出現する年は、海水が大西洋側に向けて著しく吹き流される。9月の海水面積の減少トレンドは、シベリア側沿岸で頻繁に発生・持続する低気圧の中心気圧の深まりなどに関連している(Simmonds and Keay 2009)。さらに、近年の薄氷化に伴い、海水の漂流速度も夏季には10年で8.5%速くなっており(Rampal *et al.* 2009)、これに伴う海水の攪拌効果で海水の底面融解が促進されることもある。

3. 海水減少で何が起きるか？

IPCC第4次報告書などで示されている将来予測では、高緯度ほど顕著に温暖化することが示されている(Arctic Amplification)。特にこの傾向は海水の少な

い夏季ではなく冬季に強く現れ、これは夏の海水減少に伴う開放水面の拡大が原因とされる (Screen and Simmonds 2010). すなわち、夏季海洋表層に太陽放射で蓄積された余分な熱は、冬季の結氷が始まるまでに大気へ放出され、余計に大気を加熱するため温暖化が強化される。また強力な温室効果作用を持つ水蒸気が、開放水面の増加及び気温上昇によって夏から秋にかけての増加することも Arctic Amplification の原因とされている。したがって、海水の減少がさらなる北極圏の温暖化を引き起こしていると言えよう。

海水減少は大気-海洋間の熱交換過程を通じて中緯度の気候循環にも影響を及ぼす。特に対流圏下部の温暖化と不安定化・雲量の増加・極向き層厚勾配の緩和などの影響で、秋から冬にかけてユーラシア大陸を除く中・低緯度で暖冬傾向かつ北大西洋やアメリカ本土・アラスカ付近で少雨になることが示されている (Francis *et al.* 2009). また日本にとっては、東部北極海の海水面積の多寡が続く冬の気温に影響が及ぶことも指摘されている (Honda *et al.* 2009). 夏季の海水減少に伴う冬季シベリア域の寒冷化については上記の文献以外にも報告されており、今後海水域がさらに後退した際の大気場の応答が注目される。

海水減少によって北極海の生態系も変化し始めている。例えば、炭酸カルシウムを殻に持つプランクトンなどの海洋生物にとって北極海カナダ海盆は世界でも住みにくい海になっている (Yamamoto-Kawai *et al.* 2009). これは大気中の二酸化炭素濃度の上昇に伴って海中への二酸化炭素の取り込みが増えることに加え、海水融解により増えた開放水面で大気-海洋間のガス交換が活発化し海洋酸性化が進むためである。さらに、融解水による希釈効果で、炭酸イオンとカルシウムイオン濃度が減少し、水素イオンを十分に中和できない効果が重要であることも指摘されている。

4. おわりに

北極海はそのアクセスの困難さから観測データが極めて限定される。しかし、衛星や数値モデルを併用することで見え隠れしていた海水減少のメカニズムとその影響などが解明されつつある。一方、海水の消失に伴い従来から使用されてきた氷上ブイなどの観測システムでは十分な観測網が維持できない困難な状況も待ち受けており (Inoue *et al.* 2009), 観測体制を再考する必要も出てきた。これからは海水が少ない状況が常態化するため、海水減少の影響評価・対策が喫緊の研

究課題となるであろう。大気・海水・海洋・陸面・生態系など様々な観測結果を有機的につなぐ解析的・数値的研究によって、北極圏とその周辺の気候システムがどのように変貌していくのか今後の進展が望まれる。

参考文献

- Francis, J. A. and E. Hunter, 2006: New insight into the disappearing Arctic sea ice. *Eos Trans. AGU*, 87, 509-524.
- Francis, J. A., W. Chan, D. J. Leathers, J. R. Miller and D. E. Veron, 2009: Winter Northern Hemisphere weather patterns remember summer Arctic sea-ice extent. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L07503, doi: 10.1029/2009GL037274.
- Honda, M., J. Inoue and S. Yamane, 2009: Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L08707, doi: 10.1029/2008GL037079.
- Inoue, J., T. Enomoto, T. Miyoshi and S. Yamane, 2009: Impact of observations from Arctic drifting buoys on the reanalysis of surface fields. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L08501, doi: 10.1029/2009GL037380.
- Rampal, P., J. Weiss and D. Marsan, 2009: Positive trend in the mean speed and deformation rate of Arctic sea ice, 1979-2007. *J. Geophys. Res.*, 114, C05013, doi: 10.1029/2008JC005066.
- Screen, J. A. and I. Simmonds, 2010: The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification. *Nature*, 464, 1334-1337.
- Simmonds, I. and K. Keay, 2009: Extraordinary September Arctic sea ice reductions and their relationships with storm behavior over 1979-2008. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L19715, doi: 10.1029/2009GL039810.
- Steele, M., J. Zhang and W. Ermold, 2010: Mechanisms of summertime upper Arctic Ocean warming and the effect on sea ice melt. *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1029/2010JC006160 (in press).
- Wang, J., J. Zhang, E. Watanabe, M. Ikeda, K. Mizobata, J. E. Walsh, X. Bai and B. Wu, 2009: Is the Dipole Anomaly a major driver to record lows in Arctic summer sea ice extent? *Geophys. Res. Lett.*, 35, L05706, doi: 10.1029/2008GL036706.
- Yamamoto-Kawai, M., F. A. McLaughlin, E. C. Carmack, S. Nishino and K. Shimada, 2009: Aragonite undersaturation in the Arctic Ocean: Effects of ocean acidification and sea ice melt. *Science*, 326, 1098-1100.

(海洋研究開発機構 猪上 淳)