

北極圏の温暖化による遠隔気候影響

森 正人（九州大学 応用力学研究所）

1. はじめに

地球温暖化の進行に伴い、北極の海氷が減り続けている。人工衛星による観測が始まった 1979 年以降の 43 年間のうち、9 月の海氷面積が最も少なかった 15 の年は全て 2007 年以降の年に該当し（図 1）、2010–2019 年の 10 年平均値は 1979–1988 年平均に比べて約 40% も減少している。一年のうち最も海水域が拡大する 3 月においても 10% 減少しており、全ての月で海氷面積が縮小している。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の最新の評価報告書（AR6）によると、検討された 5 つの将来シナリオにおいて、9 月の北極海氷は 2050 年までに少なくとも一度は実質的になくなる可能性が高いと予測されている（IPCC AR6 2021 SPM）。

このように、北極の海氷減少は最も明瞭な温暖化シグナルの一つであり、海氷減少が気候システムへ与える影響の解明が重要な課題となっている。その中で近年、北極海氷の減少が、北極域のみならず中緯度・熱帯域の気象や気候にも影響を与え得ることが明らかになってきた。

本講義では先ず、異常気象や遠隔影響（テレコネクション）の基本的な考え方を説明した上で、北極で起きている気候変化が我々が住んでいる東アジア中緯度域へどのように影響するのか、最新の研究成果を交えて紹介する。

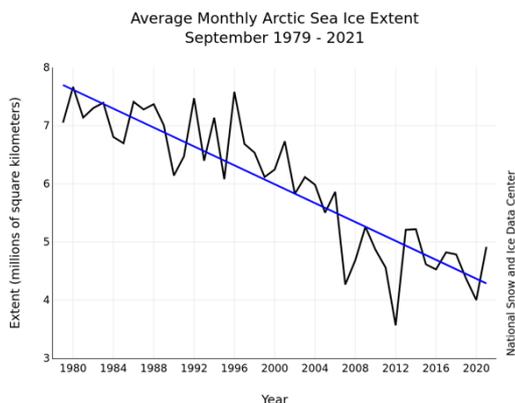


図 1. 9 月の北極海氷面積の年々変動（黒線）とその線形トレンド（青線）。National Snow and Ice Data Center (NSIDC, <https://nsidc.org>) より。

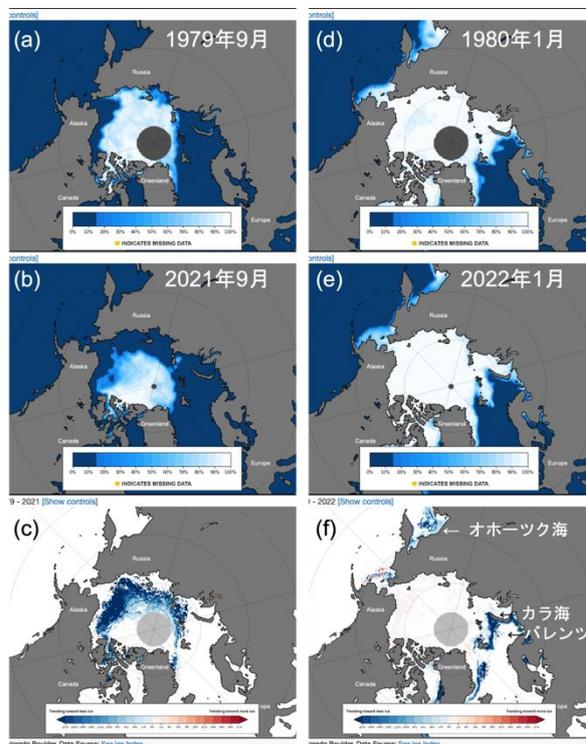


図 2. (a) 1979 年、(b) 2021 年 9 月の海氷濃度。 (c) 1979-2021 年の期間で評価した 9 月の海氷濃度のトレンド (%/10 年)。同様に、(d) 1980 年、(e) 2022 年 1 月の海氷濃度。(f) 1980-2022 年の期間で評価した 1 月の海氷濃度のトレンド (%/10 年)。NSIDC (<https://nsidc.org>) より。

2. 北極海の海氷減少

図 2 に人工衛星で観測された海氷濃度とその長期変化を示す。北極海の海氷は 9 月に最も縮小し、冬に最も拡大するという季節性があるため、長期的な変化（トレンド）を評価するためには同じ月の年毎の変化を見る必要がある。9 月には北極の太平洋側を中心に広い範囲で海氷の減少傾向が顕著であるのに対して（図 2c）、1 月は北極海の大部分は海氷に覆われ、減少傾向はその縁辺海（バレンツ海など）で顕著である（図 2f）。

3. 海氷減少と北極温暖化、ユーラシアの寒冷化

地球温暖化による地上気温の上昇は空間的に一様ではなく、場所や季節によって異なる。現在、地球上で最も急速に温暖化が進んでいるのが冬の北極域であり、地球全体の平均よりも 2 倍以上の速さで温

暖化している（「北極温暖化増幅現象」と呼ばれる）。図 3 に 1 月の地上気温の長期変化傾向（トレンド）を示す。他の緯度帯に比べ、北極域でトレンドが大きいことがわかる。中でも海氷が減少しているバレンツ・カラ海上の気温上昇が顕著で（最大で約 4°C/10 年）、これは、露出した海面（約マイナス 2°C）から大気（冬の場合、約マイナス 30°C）へ大量の熱が放出されるため、北極温暖化の大きな要因の一つになっている。

一方で、ユーラシア大陸中央部の中緯度域では同緯度帯の他の陸域に比べて温暖化の進行が遅く、北極域の顕著な温暖化とは対照的に一部地域では寒冷化している（図 3a）。これはシベリア高気圧と呼ばれるユーラシア大陸上を覆う地上の気候学的高気圧が、その西側で年々強まっており（図 3a 等値線）、高気圧に伴う時計回りの風が北極の冷たい空気を中緯度域へ運ぶためである。このような大規模循環場の長期変化は、ユーラシア中緯度域で近年、厳冬や異常寒波が頻発していること（e.g., Horton et al.

2015; Johnson, et al. 2018, Nishii et al. 2022）と関係していることが示唆される。では、どうしてシベリア高気圧は自身の西側で強まっているのだろうか？地球温暖化の影響だろうか？もしそうだとすれば、温暖化による大規模循環場の変化が寒冷化をもたらしていることになる。近年、この問題の解明は世界的な研究課題の一つとなっており、多くの研究が行われている。先ず観測データを用いた解析結果を紹介する。

4. 海氷変動に連動した大気の経年変動

観測された 1 月の地上気温偏差(0-180E, 20-90N) に対して経験的直交関数展開 (EOF 解析) を適用した結果を図 3b、c に示す。EOF 解析とは、物理量（気温や気圧など）の時空間変動 $R(x,y,t)$ を複数の空間パターン $P_n(x,y)$ の時間変動 $Q_n(t)$ (PC 時系列と呼ぶ) に、変動が大きい順に展開する統計解析手法である (P_n と Q_n の組みをモードと呼ぶ)。ここで x は緯度、 y は経度、 t は時間（今の場合は年）である。

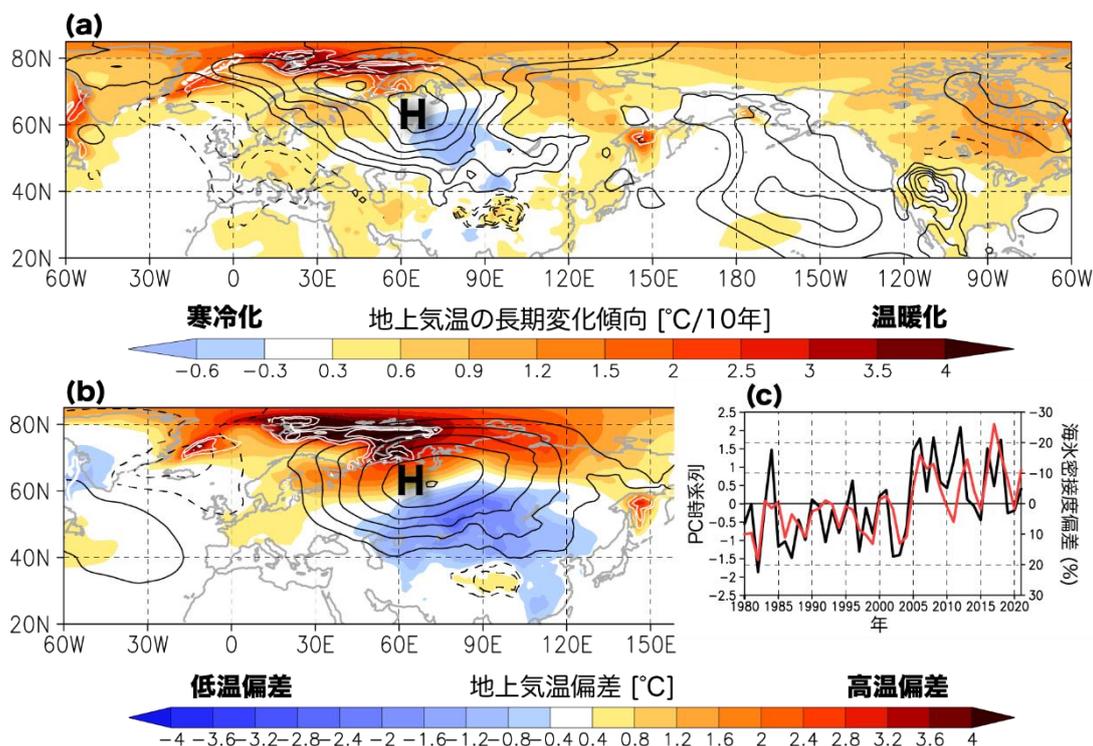


図 3. (a) 1980-2021 年のデータを用いた 1 月の長期変化傾向。JRA55 再解析データの地上気温（色、°C/10 年）と海面気圧（黒等値線、0.3 hPa/10 年間隔、破線が負値）。HadISST の海氷密度度（白等値線、5%/10 年間隔、細線が負値、太線が正值）。カラーバーが不等間隔であることに注意。(b) 同期間の地上気温偏差の EOF 解析によって同定された WACE パターン (Mori et al. 2014 の定義に従う)。地上気温（色、°C）、海面気圧（黒等値線、1hPa 間隔、破線が負値）、海氷密度度の（白等値線、-5、-10、-15）の PC 時系列に対する回帰偏差。(c) PC 時系列（黒線）とバレンツ・カラ海 (20-70E, 65-85N) で平均した海氷密度度偏差（赤線：縦軸を反転していることに注意）。

$$R(x, y, t) = \sum_{n=1}^N P_n(x, y) Q_n(t)$$

当該領域の地上気温偏差の経年変動のうち 2 番目に卓越する (変動が大きい) モードの空間パターン $P_2(x, y)$ は、北極域で高温偏差、ユーラシア中央部から東アジアの中緯度域で低温偏差のパターンになり (図 3b 色)、これは WACE (Warm-Arctic Cold-Eurasia/East Asia) パターンと呼ばれている (Mori et al. 2014) (ちなみに 1 番目に卓越するモードは北極振動に対応する変動である)。両気温偏差にまたがるような高気圧偏差 (図 3b 等値線) を伴っており、シベリア高気圧の経年変動を表したモードと言える。また、北極のバレンツ・カラ海では海氷密接度が有意に減少しており (図 3b 白等値線)、海氷の変動とも強く関連している。実際に、このモードの時間変動を表す PC 時系列 $Q_2(t)$ を見ると (図 3c 黒線)、バレンツ・カラ海で平均した海氷密接度 (赤線) と連動していることが分かる (相関係数 $r = -0.66$)。これは、海氷の減少域と高温偏差の極大域が一致していることから整合的である (海氷が減ると海洋から大気への熱放出が増え、大気が暖まることは前述の通りである。逆に、大気が暖まった結果、海氷が減るという見方もできるが、その点は後述する)。またこの結果は、バレンツ海海氷変動は、海氷減少域の気温だけでなく東アジア中緯度域の気温変動とも関連していることを意味しており、海氷が少ない時に低温偏差になりやすい (逆に、海氷が多い時には高温偏差になりやすい)。

WACE パターンやそれに付随する海面気圧、海氷密接度の偏差 (図 3b) は、図 3a に示したそれぞれのトレンドのパターンと良く似ていることが見て取れ、WACE パターンの長期的な変化が生のトレンドパターンに色濃く反映されていることがうかがえる。実際に、PC 時系列 (図 3c) から明らかなように、WACE パターンは長期的に強まる傾向にあり、1980~90 年代は負の位相 (図 3b の極性を反転させた極が低温で中緯度が高温のパターン) になることが多かったのに対し、2005 年くらいを境に正の位相が現れる頻度が増えている。従って、なぜシベリア高気圧が強まっているのか? という問題は、なぜ WACE パターンが強まっているのか? という問題に置き換えて考えることができる。

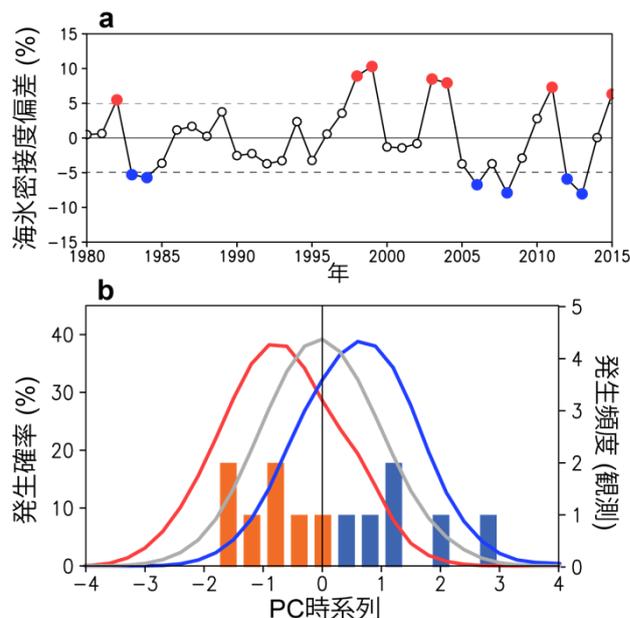


図 4. (a) バレンツ・カラ海で平均した冬季 (12-2 月) の海氷密接度偏差の年々変動。トレンドは除去済み。1 標準偏差 (点線) を上回る年を多氷年 (赤丸)、下回る年を少氷年 (青丸) と定義。(b) PC2 の確率密度関数。CLM 実験 (灰色線)、ALL 実験による多氷年 (赤線) と少氷年 (青線)。ERA-Interim 再解析データの PC2 のヒストグラムを、多氷年 (赤) と少氷年 (青) に分けて示す (右軸)。

5. 大気大循環モデルによる数値実験

前述のように、東アジア中緯度域の気温変動がバレンツ海海氷変動と有意な相関関係を示すことから、地球温暖化による海氷減少が、東アジア中緯度域に異常寒波や寒冬をもたらす一因となっている可能性が指摘されている。しかし、相関関係は必ずしも因果関係を説明しないため、海氷分布や海面水温を境界条件に与えて駆動する大気大循環モデル (AGCM) を用いた検証実験が数多く行われた (e. g., Honda et al. 2009; Petoukhov and Semenov 2010; Kim et al. 2014; Mori et al. 2014; Nakamura et al. 2015, 2016; Kug et al. 2015; Semenov and Latif 2015)。その中の一例を図 4 に示す。実際に観測された海面水温と海氷密接度を与えた実験 (ALL 実験) と、海面水温・海氷密接度とともに気候値 (平年値) へ固定した実験 (CLM 実験) の 2 種類の実験を行った。期間は 1979 年から 2015 年までで、それぞれの実験を 40 回繰り返した (40 メンバーのアンサンブル実験)。その中から、バレンツ・カラ海で海氷が多かった年 (多氷年) と少なかった年 (少氷年)

を抽出し (図 4a)、それぞれで WACE パターンの発生確率を評価した (図 4b)。

その結果、海水の変動が無い CLM 実験であっても WACE パターンは現れる (図 4b 灰色線) が、バレンツ・カラ海で海水が少ない (多い) 冬ほど正 (負) の WACE パターンの出現確率が増えることが分かった (図 4b)。すなわちこの結果は、WACE パターンが中緯度大気にもともと備わっている内部変動モードで、海氷変動とは本来、無関係に生じる得る変動であるが、海氷偏差は何らかの作用を通して、WACE パターンの存在そのものではなく、WACE の強さや出現確率に影響を与えることができることを意味している。従って、この実験から「海氷減少が正位相の WACE パターンの出現確率を増加させることで、東アジア中緯度域で寒冬になる確率を増加させている」と言える。

しかし一方で、モデル実験でユーラシアの寒冷化に対する海氷の影響を検出できず、「寒冷化は海氷減少による大気応答ではなく大気の内部分動によるもの (たまたま厳冬が続いているだけ)」と結論付けている研究もある (e. g., Sun et al. 2016; McCusker et al. 2016; Ogawa et al. 2018)。このような研究間の結論の不一致をもたらす大きな要因の一つとして、海氷が大気へ与える影響をモデルが過小評価してしまっていることが挙げられる (Mori et al. 2019a)。調査した 7 つ全ての AGCM で、WACE パターンの振幅が観測よりも弱く、そのうち海氷によって駆動されていると推定される成分も弱かった。これは、モデルがまだ発展途上であることに加え、AGCM では元々考慮されていない大気-海洋-海氷間の相互作用が、海氷減少に対する大気応答のより正確な表現に不可欠である可能性を指摘している。実際に大気海洋結合モデル (CGCM) と AGCM とで海氷駆動の WACE パターンの振幅を比較したところ、CGCM の方が AGCM よりも大きくなることが明らかとなっており (Mori et al. 2019b)、メカニズムは未解明であるものの、大気-海氷間の正のフィードバックの存在が示唆されている。

従って、北極海氷の減少が中緯度域の気象や気候に与える遠隔影響を理解し、その影響をより正しく評価するためには、海氷から大気への影響だけでなく、大気から海氷への影響も考慮した包括的なメカニズムの解明が求められている。

6. 日本への影響と今後の推移

WACE パターンは東アジア中緯度域の寒気を東へ拡大させることで、時に日本へ寒波をもたらす。近年では 2017/18 年の寒冬や、2020 年 12 月の寒波に WACE の寄与があったと考えられる (e. g., Nishii et al. 2022)。しかし日本の異常天候は様々な要因が複合的に作用した時に現れやすく、WACE パターン単独で寒冬の要因を説明することは一般的に難しい。また、海氷が変え得るのは WACE パターンの強さや出現確率だと考えられるため、海氷が減っている冬にいつでも必ず発生するわけではないことにも注意する必要がある (それでも冬の日本の天候を左右する重要な因子の一つであることには変わらない)。

もし海氷減少が東アジア中緯度域の寒波や寒冬に影響しているとする、さらなる海氷減少によって (シベリア高気圧のさらなる強まりによって)、東アジアの寒波・寒冬のリスクがこれからますます増えることが予期される。しかしその一方で、地球温暖化による気温上昇が、いずれこの効果を相殺することも考えられる。今後の冬季東アジアの異常天候リスクの評価を精度良く行うためには、数値モデルのさらなる改良を進めると同時に、北極からの遠隔影響のメカニズムの理解を進展させていく必要がある。

参考文献

- Honda, M., J. Inoue and S. Yamane (2009), Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters, *Geophysical Research Letters*, 36, L08707, doi:10.1029/2008GL037079.
- Horton, D. E., N. C. Johnson, D. Singh, D. L. Swain, B. Rajaratnam and N. S. Diffenbaugh (2015), Contribution of changes in atmospheric circulation patterns to extreme temperature trends, *Nature*, 522, 465-469, doi:10.1038/nature14550.
- IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K.

- Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. In Press.
- Johnson, N. C., S.-P. Xie, Y. Kosaka and X. Li (2018), Increasing occurrence of cold and warm extremes during the recent global warming slowdown, *Nature Communications.*, 9, 1724, doi:10.1038/s41467-018-04040-y.
- Kug, J.-S., J.-H. Jeong, Y.-S. Jang, B.-M. Kim, C. K. Folland, S.-K. Min and S.-W. Son (2015), Two distinct influences of Arctic warming on cold winters over North America and East Asia, *Nature Geoscience*, 8, 759-762, doi:10.1038/ngeo2517.
- Kim, B.-M. S.-W. Son, S.-K. Min, J.-H. Jeong, S.-J. Kim, X. Zhang, T. Shim and J.-H. Yoon (2014), Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea-ice loss, *Nature Communications.* 5, 4646, doi:10.1038/ncomms5646.
- McCusker, K. E., J. C. Fyfe and M. Sigmond (2016), Twenty-five winters of unexpected Eurasian cooling unlikely due to Arctic sea-ice loss, *Nature Geoscience*, 9, 838-842. doi:10.1038/ngeo2820.
- Mori, M., M. Watanabe, H. Shiogama, J. Inoue and M. Kimoto (2014), Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades, *Nature Geoscience*, 7, 869-873, doi:10.1038/ngeo2277.
- Mori, M., Y. Kosaka, M. Watanabe, H. Nakamura and M. Kimoto (2019a), A reconciled estimate of the influence of Arctic sea-ice loss on recent Eurasian cooling, *Nature Climate Change*, 9, 123-129, doi:10.1038/s41558-018-0379-3.
- Mori, M., Y. Kosaka, M. Watanabe, B. Taguchi, H. Nakamura, and M. Kimoto (2019b), Reply to: Is sea-ice-driven Eurasian cooling too weak in models? *Nature Climate Change*, 9, 937-939, doi:10.1038/s41558-019-0636-0
- Nakamura, T., K. Yamazaki, K. Iwamoto, M. Honda, Y. Miyoshi, Y. Ogawa and J. Ukita (2015), A negative phase shift of the winter AO/NAO due to the recent Arctic sea-ice reduction in late autumn, *Journal of Geophysical Research*, 120, 3209-3227, doi:10.1002/2014JD022848.
- Nakamura, T., K. Yamazaki, K. Iwamoto, M. Honda, Y. Miyoshi, Y. Ogawa, Y. Tomikawa and J. Ukita (2016), The stratospheric pathway for Arctic impacts on midlatitude climate, *Geophysical Research Letters*, 43, 3494-3501, doi:10.1002/2016GL068330.
- Nishi, K., B. Taguchi, M. Mori, Y. Kosaka, and H. Nakamura (2022), Arctic Sea ice loss and Eurasian cooling in winter 2020-21, *SOLA*, accepted.
- Ogawa, F., N. Keenlyside, Y. Gao, T. Koenig, S. Yang, L. Suo, T. Wang, G. Gastineau, T. Nakamura, H. N. Cheung, N.-E. Omrani, J. Ukita, V. Semenov (2018), Evaluating impacts of recent Arctic sea ice loss on the Northern Hemisphere winter climate change, *Geophysical Research Letters*, 45, 3255-3263, doi:10.1002/2017GL076502.
- Petoukhov, V. and V. Semenov. (2010), A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents, *Journal of Geophysical Research*. 115, D21111, doi:10.1029/2009JD013568.
- Semenov, V. A. and M. Latif (2015), Nonlinear winter atmospheric circulation response to Arctic sea ice concentration anomalies for different periods during 1966-2012, *Environmental Research Letters*, 10, 054020, doi:10.1088/1748-9326/10/5/054020.
- Sun, L., J. Perlwitz and M. Hoerling (2016), What caused the recent "Warm Arctic, Cold Continents" trend pattern in winter temperatures? *Geophysical Research Letters*, 43, 5345-5352, doi:10.1002/2016GL069024.