北極海の海氷減少と東アジアの寒冬について

森正人¹・小坂優²・渡部雅浩³・田口文明⁴・中村尚²・木本昌秀³ (1:九大学応力研、2:東大先端研、3:東大大気海洋研、4:富山大)

1. はじめに

海氷面積の急速な縮小を伴う北極域の加速 度的な温暖化とは対照的に、冬季ユーラシア 大陸の中央部から東アジアの中緯度域では近 年、異常寒波(Horton et al. 2015; Johnson et al. 2018)や厳冬が頻発し、地域によって は寒冷化の傾向が現れている(Cohen et al. 2014)。観測データの解析は、北極のバレ ンツ・カラ海における海氷の年々変動とユー ラシア中緯度域における気温変動との間に有 意な逆相関を示すため、地球温暖化による海 氷域の縮小が異常寒波や厳冬の一因であるこ とが示唆されていた(e.g., Honda et al. 2009; Inoue et al. 2012; Liu et al. 2012)。

しかし相関関係は必ずしも因果関係を説明 しないことから、上記示唆の検証のために多 くの AGCM 実験が実施されてきた。その中 で、海氷減少がユーラシアの低温偏差を強制 できることを示した研究がある一方(e.g., Honda et al. 2009; Mori et al. 2014; Nakamura et al. 2015)、有意な関係を検出 できなかった複数の研究は、近年の寒冷化は 海氷減少による大気応答(すなわち地球温暖 化の影響)ではなく、大気の内部変動による もの(たまたま厳冬が続いているだけ)と結 論付けている (e.g., Sun et al. 2016; McCusker et al. 2016; Ogawa et al. 2018) 。 このように検証結果が研究間で定性的に異な り、ユーラシアの寒冷化に対する海氷減少の 影響の有無は世界的な論争になっている

(e.g., Shepherd 2016; Screen 2017; Screen et al. 2018; Smith et al. 2018; Cohen et al. 2019)。そこで本研究では、海氷減少の影響の定量化を行うことで、研究間で異なる結論が生じる原因を調査した(Mori et al. 2019, 2019b, 2021)。



図 1:SVD 第一モードの特異ベクトル。 **a**. ERA-Interim、**b**. AMIP 実験。無次元 で空間的に標準化されている(x10²)。

2. 実験と解析の概要

東京大学大気海洋研究所・国立環境研究 所・海洋研究開発機構が共同開発した大気海 洋結合モデル MIROC4h の大気部分 (MIROC4h-AGCM;解像度は T106L56)

を用い、歴史的な海面水温と海氷密接度

(SIC)、外部強制を与えた AMIP-type 実験を行った(1979-2014年、40メンバー)。これに加え、諸外国の研究機関で開発された6つの AGCM による AMIP 実験も使用し、計 219メンバーの大規模な長期アンサンブル実験を解析した。

ERA-Interim 再解析データ(以下、観測デ ータと呼ぶ)ならびに AGCM シミュレーシ ョンの両者に共通に含まれる外部強制成分を 抽出するために、冬季(12-2月)の地表気



図 2:SVD 第1モードの展開係数。ERA-Interim
(赤)、マルチモデルアンサンブル平均(黒)、
各メンバーの2σのスプレッド(灰色)。BKS で
平均した海氷密接度偏差(青:軸反転)。

温平年偏差の観測値と、モデルで得られた地 表気温偏差のアンサンブル平均との間で特異 値分解(SVD)解析を行った(計算領域は0 -180°、20-90°N)。もし両者の間に共 変動する成分があれば、それは外部変動成分 とみなすことができる。解析は線形トレンド を除去した上で行われた。解析の詳細は元論 文(Mori et al. 2019)を参照されたい。

図1にSVD第一モードの特異ベクトルを 示す。観測とAGCMのどちらも北極と中緯 度域で気温偏差が逆転するダイポールパター ンで特徴付けられ、このような地上気温偏差 パターンが両者で共変動している。それぞれ の地上気温偏差を対応する特異ベクトルに射 影することで展開係数(EC)を求め、展開 係数に同質回帰(homogeneous regression) した場を元に議論を進める。

3. 結果

図2に展開係数を、図3a-bに観測と AGCMの地上気温ならびにSLPの同質回帰 偏差図を示す。極で正、中緯度域で負の地上 気温偏差パターンを示すことから、この変動 モードをWarm-Arctic Cold Eurasian (WACE)パターンと呼ぶ(図は正の WACE)。ここで同質回帰偏差は内部・外 部変動の両成分を含むことに注意する必要が ある(これは外部変動としてのWACEと、 内部変動としての WACE が非常によく似た 空間構造を示すため、展開係数に両成分が含 まれてしまうことによる)。図 3a-b の比較 から、AGCM は WACE の空間構造をよく 再現するが、その振幅を過小評価してしまう ことが分かる。すなわち、AGCM は WACE の全変動を過小評価している。

次にWACEの外部変動成分に着目する。 マルチモデルアンサンブル平均した展開係数 (図2黒線)はバレンツ・カラ海(BKS)で 平均した海氷密接度偏差と非常に高い相関を 示す(r=-0.95)。さらに、この展開係数を マルチモデルアンサンブル平均地上気温偏差 に同質回帰させた場は(図3c)、ユーラシ ア大陸上の低温偏差が弱いもののWACEパ ターンを示す。従って、WACEパターンの ある部分は外的に強制されていて、その駆動 源が BKS の海氷変動だと解釈することは妥 当だと考えられる。同様の結論は、MIROC の AMIP 実験において SST や海氷密接度を 気候値に固定した感度実験の解析からも得ら れる(Mori et al. 2019)。

次にWACEの内部変動成分に着目する。 比較的大きなアンサンブルスプレッド(図2 灰色)は、個々のメンバーではWACEの内 部変動成分が卓越することを示唆している。 実際に、地上気温のアンサンブル平均からの ずれに対してEOF解析を行うと、第2モー ドとしてWACEによく似た変動モードが得 られる(図3d)。このことから、WACEの 起源は大気固有の変動モードで、海氷の強制 は新しい循環レジームを強制するというより は、既に存在する循環レジームの振幅や出現 確率を変調していることを示唆している。

このように、個々の realization における WACE 変動は内部変動成分と外部変動成分 の和で表される。では、海氷駆動による外部 変動成分はそのうちどれ程だろうか?そのこ とを調べるために、WACE に伴う地上気温 偏差の変動のうち、全地上気温偏差の変動に 対する割合(分散比)を調べた(図4)。



図 3. 冬平均の地上気温偏差(色)ならびに SLP 偏差(等値線: 0.5hPa 間隔)。a. ERA-Interimの同質回帰図、b. AGCMの同質回帰図。c. マルチモデルアンサンブル平均した展開係数に同質回帰させたマルチモデル平均の偏差場。d. 地上気温のアンサンブル平均からのずれ成分に対するEOF 第2モードとそれに付随する SLP 偏差。射線は 95%以上の統計的信頼性を表す。

前述のように、AGCM は全 WACE 変動を 過小評価している(黄+青棒)。また、外部 変動成分はアンサンブル平均場から見積もら れる(赤線)。このうち海氷駆動成分が、決 定係数(SVD1の展開係数と BKS の海氷密 接度の年々変動との相関係数の2乗)から 評価された(青棒)。この指標を用いること で、アンサンブルメンバーの無い観測データ についても海氷駆動成分を評価するこができ る¹。これを見ると、AGCM は系統的に海氷

¹ AGCM の場合は海氷から大気への影響を表しているが、観測データには大気―海氷間の相互作用の影響が含まれている(影響の向きが双方向)。相互作用は季節よりも短い時間スケールで

生じており(e.g., Park et al. 2016, Gong and Luo 2017)、季節平均場で両者はほとんど平衡 である。すなわち、冬平均の WACE と海氷はお 互いにバランスしていると見ることができ、より

駆動成分の分散を過小評価しており、S/N 比(潜在的予測可能性)がAGCMで過小評 価されていることを意味する。このことが、 研究間で海氷減少の影響の評価が異なる潜在 的な要因と考えられる。なぜならば、シグナ ルがモデルで非常に小さいため、実験設定や 解析手法、アンサンブルサイズを注意深く選 ばない限り、海氷減少によるモデルの WACE 応答が他の影響によって容易に覆い 隠されてしまうからである。

4. 終わりに

AGCM は全 WACE 変動を過小評価して おり、海氷駆動(結合)成分の過小評価がそ れに寄与していることが分かった。ではその 原因は何だろうか?2つの理由が考えられ る。一つ目は、AGCM には含まれていない 大気 – 海氷間の相互作用が WACE の現実的 な振幅の再現に重要である可能性である。実 際に、CGCM による長期シミュレーション と、そこから得られた月平均の海面水温と海 氷密接度で駆動した AGCM シミュレーショ ン (それぞれ 198 年分) との間で地上気温 偏差の SVD 解析を行ったところ、AGCM よりも CGCM の方が WACE の振幅が強く なることが分かった(図 5b-c)。両実験で 月平均の海面水温ならびに海氷密接度は完全 に同一であるが、モデルの各タイムステップ での大気-海洋間あるいは大気-海氷間の相 互作用が AGCM 実験には含まれていないた め、両実験の差は大気-海洋-海氷間の結合 効果を表していると解釈できる。決定係数に よる見積もりによると(図 5a)、海氷駆動 (結合)成分が WACE の分散比の違いをよ く説明している。従ってこの結果は、海氷と WACE の間のフィードバックが WACE の振 幅を増大させていることを強く示唆している (一方で、結合系での WACE の分散が



図 4. WACE の分散比。全変動(黄+青棒)、 全強制変動成分(赤線)、ならびに決定係数か ら評価された海氷駆動変動成分(青棒)。

AGCM では熱的ダンピングによって減衰さ れていると解釈することもできる:Barsugli and Battisti 1998)。このフィードバックは WACE に付随する SLP 偏差が AGCM に比 べて CGCM で増幅されていることによって も支持される(もし大気循環偏差が一方的に 海氷偏差を駆動するだけなのであれば、この ような循環場の強化は決して起こらない)。

AGCM がWACEの変動を過小評価する もう一つの原因として考えられるのは、モデ ルに何らかのバイアスやエラーが共通して存 在する可能性である。図5aで観測と CGCMを比較すると、結合モデルであって も全WACE変動が過小評価されている。モ デル実験が産業革命前の条件で行われている こともその原因の一つだが(海氷が厚く変動 しづらい)、モデルにバイアスが存在する可 能性も否定できない。実際に、モデルが high-top か否かがWACEの振幅に影響を与 えること(Zhang et al. 2018)や、たとえ結 合モデルであってもS/N比が実際よりも過 小評価されていること(Scaif and Smith 2018)が報告されている。

短い時間スケールでの相互作用の正味の帰結であ ると考えられる。その意味で観測データの場合は 「海氷駆動成分」と言うよりは「海氷結合成分」 と呼ぶ方が正確である(Mori et al. 2019b)。



図 5. **a**, WACE パターンの全分散(黄棒+青棒)。ERA-Interim と AOGCM (CESM1-CAM5) 実 験、AOGCM の SST と海氷密接度で駆動された AGCM(CAM5)実験。青棒は決定係数から見積 もられた海氷結合(海氷駆動)成分を表す。縦軸は ERA-Interim の分散でスケールされている。**b**, **c**, SVD の展開係数に射影された冬平均の同質回帰地上気温偏差(色)ならびに SLP 偏差(等値 線;0.6hPa 間隔、負値は点線)。AOGCM(**b**) と AGCM(**c**)。射線は 95%以上の統計的信頼 性を表す。

北極海氷変動が大気へ与える影響の理解は まだまだ道半ばであり、国際的な議論も続い ている。影響を正しく評価し、東アジアを始 めとする地域気候のより信頼性の高い将来予 測や、季節予測可能性の向上のためには数値 モデルの改良が不可欠であると同時に、海氷 がどのように大気循環変動を変調し得るのか というメカニズムの理解を進展させていくこ と必要で、今後の大きな課題である。

引用文献

- Barsugli, J. J. & Battisti, D. S., 1998: The basic effects of atmosphere–ocean thermal coupling on midlatitude variability. J. Atmos. Sci. 55, 477-493.
- 2. Cohen, J. et al., 2014: Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. Nature Geosci., 7, 627–637.
- Cohen, J. et al., 2019: Divergent consensuses on Arctic amplification influence on midlatitude severe winter weather. Nat. Clim. Change 10, 20-29.

- Gong, T. & Luo, D., 2017: Ural blocking as an amplifier of the Arctic sea ice decline in winter. J. Clim. 30, 2639-2654.
- Honda, M., Inoue, J. & Yamane, S., 2009: Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters. Geophys. Res. Lett. 36, L08707.
- 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.
- Inoue, J., Hori, M. E. & Takaya, K., 2012: The Role of Barents Sea Ice in the Wintertime Cyclone Track and Emergence of a Warm-Arctic Cold-Siberian Anomaly. Journal of Climate 25, 2561-2568.
- 8. 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 Commun., 9, 1724, doi:10.1038/s41467-018-04040-y.

- Liu, J., Curry, J. A., Wang, H., Song, M. & Horton, R. M., 2012: Impact of declining Arctic sea ice on winter snowfall. Proc. Natl Acad. Sci. USA 109, 4074-4079.
- Mori, M., Watanabe, M., Shiogama, H., Inoue, J. & Kimoto, M., 2014: Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades. Nature Geoscience, 7, 869-873.
- Mori, M., Kosaka, Y., Watanabe, M., Nakamura, H. & Kimoto, M., 2019a: A reconciled estimate of the influence of Arctic sea-ice loss on recent Eurasian cooling. Nat. Clim. Change 9, 123-129.
- Mori, M., Kosaka, Y., Watanabe, M., Taguchi, B., Nakamura, H. & Kimoto, M., 2019b: Reply to: Is sea-ice-driven Eurasian cooling too weak in models? Nat. Clim. Change 9, 937-939.
- Mori, M., Kosaka, Y., Watanabe, M., Taguchi, B., Nakamura, H. & Kimoto, M., 2021: Reply to: Eurasian cooling in response to Arctic sea-ice loss is not proved by maximum covariance analysis. Nat. Clim. Change, 11, 109– 111.
- 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 Geosci., 9, 838-842.
- Nakamura, T., K. Yamazaki, K. Iwamoto, M. Honda, Y. Miyoshi, Y. Ogawa, J. Ukita, 2015: A negative phase shift of the winter AO/NAO due to the recent Arctic sea-ice reduction in late autumn. J. Geophys. Res. 120, 3209-3227.

- Ogawa, F. et al., 2018: Evaluating impacts of recent Arctic sea ice loss on the Northern Hemisphere winter climate change. Geophys. Res. Lett., 45, 3255-3263.
- Park, D.-S. R., Lee, S. & Feldstein, S. B., 2015: Attribution of the recent winter sea ice decline over the Atlantic sector of the Arctic Ocean. J. Clim. 28, 4027-4033.
- Scaife, A. A. & Smith, D., 2018: A signalto-noise paradox in climate science. npj Climate and Atmospheric Science 1, 28.
- Screen, J. A. 2017: Far-flung effects of Arctic warming. Nat. Geosci. 10, 253-254.
- Screen, J. A. et al., 2018: Consistency and discrepancy in the atmospheric response to Arctic sea-ice loss across climate models. Nat. Geosci. 11, 155-163.
- 21. Shepherd, T. G., 2016: Effects of a warming Arctic. Science 353, 989-990.
- Smith, D. M. et al., 2019: The Polar Amplification Model Intercomparison Project (PAMIP) contribution to CMIP6: investigating the causes and consequences of polar amplification. Geosci. Model Dev. Discuss., 12, 1139– 1164.
- Sun, L., J. Perlwitz and M. Hoerling, 2016: What caused the recent "Warm Arctic, Cold Continents" trend pattern in winter temperatures? Geophys. Res. Lett., 43, 5345-5352.
- 24. Zhang, P. et al., 2018: A stratospheric pathway linking a colder Siberia to Barents-Kara Sea sea ice loss. Science advances 4, eaat6025.