

近年頻発しているユーラシアの寒冬に対する北極海の海水減少の影響

森正人¹・渡部雅浩¹・塩竈秀夫²・猪上淳³・木本昌秀¹
(1:東大大気海洋研究所、2:国立環境研究所、3:国立極地研究所)

1. はじめに

地球温暖化が進行中であるにも関わらず、ユーラシア大陸の中緯度域で寒冬になる頻度が近年増加しており、ユーラシア大陸の中央部（60～120E、40～60N、図1bの黒枠）における2004年以降の10年間の冬（12～2月）の平均地表気温は、その前の10年の平均に比べ約1.5℃低下している。同時に、北極海で海水が急速に減少しており、観測データを使った統計解析から、北極のバレンツ・カラ海で海水が減少すると、ユーラシア大陸の中緯度域で気温が下がる傾向にあることが報告されている（Liu et al., 2012; Tang et al., 2013; Inoue et al., 2012）。このことは、海水の減少が低温偏差を強制していることを示唆しているが、数値モデルを使ったシミュレーションによってその関係が十分に再現されておらず（Honda et al., 2009; Petoukhov and Semenov, 2010; Screen et al., 2013a; Peings and Magnusdottir, 2014）、寒冬傾向が温室効果気体の増加などに伴う北極海の海水の減少によってもたらされたものか、あるいは単に気候システム内部で自然に生じる内部変動の現れなのかは明らかになっていなかった。

この原因として、非常に活発な冬の大気の内変動（ノイズ）が海水の減少に対する大気応答（シグナル）の検出を難しくしている可能性が指摘されている（Screen et al., 2013b）。そこで、海水の変動に対する大気応答を検出可能にするために大量のメンバー数でアンサンブル実験を行い、近年の海水の減少がユーラシア大陸中緯度域の地表気温に与える影響を調べた。また、その後さらに主成分分析の手法を用いることで、低温偏差に対する内部変動の寄与と、海水の変動に対す

る大気応答の寄与とを分離・定量化することを試みた。

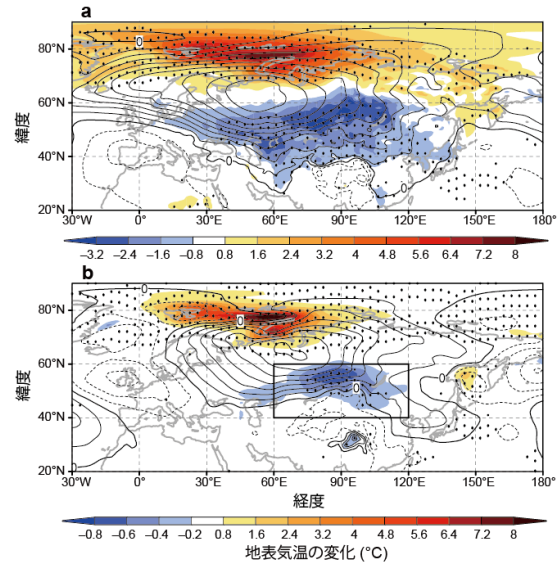


図1: バレンツ・カラ海の海水の減少に伴う、冬の地表気温（色）と地表気圧（等値線）の変化。(a) ERA-Interim および、(b) モデルによるアンサンブル平均。(a)は少氷年と多氷年の差（等値線の間隔は0.8hPa）、(b)は少氷実験と多氷実験の差（0.2hPa）。点線は負値を、点描は気温変化が95%水準で統計的に有意な領域を示す。

2. 実験の概要

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）を用いた。9月のバレンツ・カラ海における海水密接度（1979–2012年）から海水が多かった年（多氷年）と少なかった年（少氷年）を10年ずつ選び、それぞれで合成した場を9月から3月まで月毎に作成した。

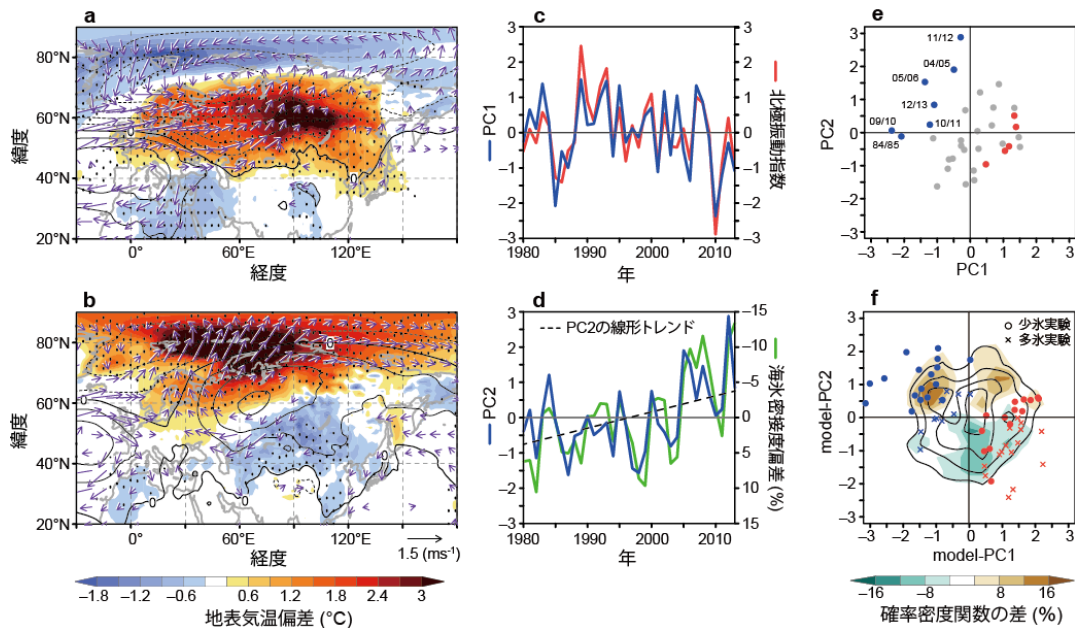


図 2: ERA-Interim の冬の地表気温偏差の EOF(a) 第 1 モード、(b) 第 2 モード(色)、ならびにそれらに伴う地表気圧偏差(等値線: 1hPa 間隔)、地表風偏差(矢印)。点描は気温偏差が 95%水準で統計的に有意な領域を表す。青線は(c) PC1、(d) PC2 を表す。赤線は北半球 20N 以北の地表気圧偏差の EOF 第 1 モードで定義した北極振動指数を、緑線はバレンツ・カラ海で平均した海水密度偏差(軸反転)の年々変動を表す。(e) PC1 と PC2 の散布図。ユーラシア大陸中央部で地表気温偏差が 1 標準偏差を上回る(下回る)年を赤(青)色で示す。(f) (e) に同じ。ただしモデルアンサンブルシミュレーション。PC1 と PC2 の 2 次元の PDF を等値線(3% 間隔)で、PDF の差(少氷-多氷)を色で表す。

MIROC4h-AGCM にそれらを与えて、バレンツ・カラ海で海氷が多い場合(多氷実験)と少ない場合(少氷実験)のアンサンブル実験を、それぞれ 100 メンバー、9 月から 3 月まで異なる初期値から計算した。この時、モデルに与える温室効果気体の濃度などの外部強制(2011-2012 年)と海面水温(1979-2000 年平均値)は両実験で同じ値を用いたため、少氷実験と多氷実験の比較から、海氷の変化のみが大気に与える影響を特定することができる。

3. 結果

バレンツ・カラ海で海氷が減少した時の冬の大気の合成図(少氷年マイナス多氷年)を見ると、再解析データでは北極域で気温が上

昇するのに対し、ユーラシア大陸の中緯度域では逆に気温が低下する傾向にある(図 1a)。モデルのアンサンブル平均(少氷実験マイナス多氷実験)は、これらの特徴を定性的によく再現しており(図 1b)、海氷の減少がユーラシア大陸の中緯度域に低温偏差を強制し得ることが分かった。

次に、低温偏差に対する大気の内変動の寄与と、海氷の変動に対する大気応答の寄与とを分離するために、観測された冬の地表気温偏差に対して EOF 解析を適用し、ユーラシア大陸上で卓越する 2 つの変動パターンを同定した。第 1 モード(寄与率 31%)は大陸全体で気温が上下するパターンで(図 2a)、時係数(PC1、図 2c 青線)が北極振動指数(赤

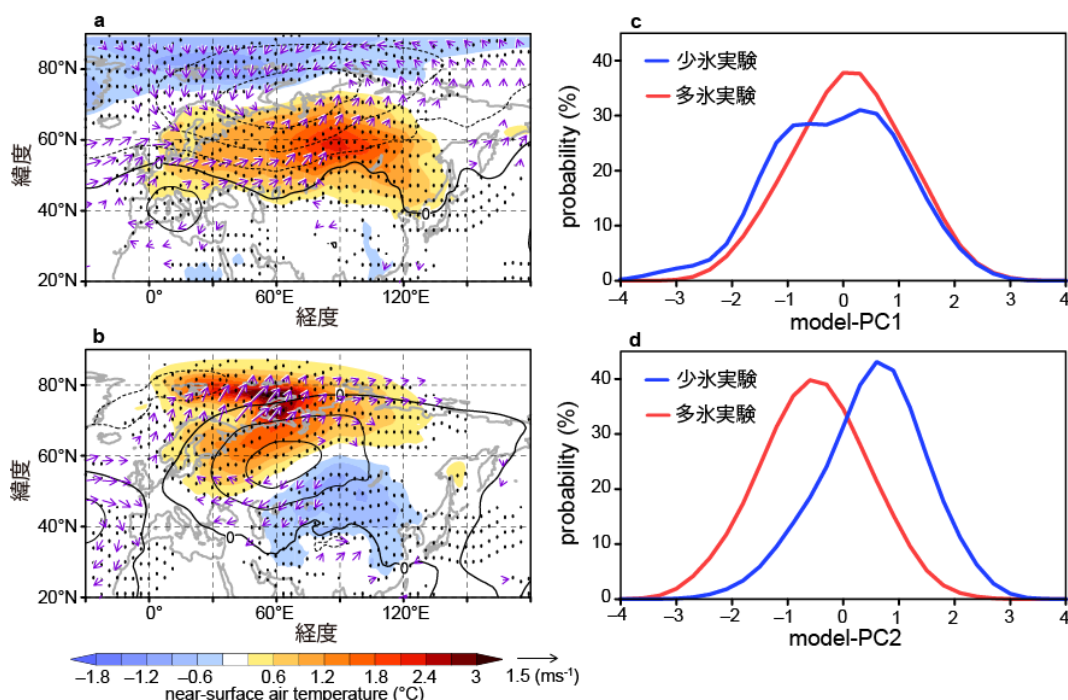


図 3: (a-b) 図 2a-b に同じ。ただしモデルアンサンブルシミュレーション(少氷ならびに多氷実験)。少氷実験と多氷実験それぞれで求めた(c) PC1 の PDF、ならびに(d) PC2 の PDF。

線) と高い相関 ($r=0.85$) を持つことから、これは北極振動に伴う地表気温の変動を表していると考えられる。一方、第 2 モード (23%) は、北極域で気温が上がる時にはユーラシア大陸の中緯度域から東アジアで気温が下がるパターンで (図 2b)、その時係数 (PC2、図 2d 青線) はバレンツ・カラ海の海水氷密接度偏差 (緑線) と連動しながら ($r=-0.81$) 年々強くなっている。従って、このパターンがバレンツ・カラ海の海水氷の減少に対する大気応答 (シグナル) を表している と解釈され、北極振動とは独立な個別の現象である。以降、このモードを“Warm Arctic and Cold Eurasia” (WACE) と呼ぶ。また、北極振動と WACE はモデルのアンサンブルシミュレーションにおいても卓越変動である (図 3ab)。PC2 の確率密度関数 (PDF) は、海水氷の多寡で大きく異なっており、少氷 (多氷) 実験で正 (負) の WACE の出現頻度が大きく増える (図 3d)。一方、PC1 の PDF は少氷実験

と多氷実験とで WACE ほど大きく変化しないことから (図 3c)、北極振動は海水氷の状態とはほぼ無関係な大気の内変動 (ノイズ) と解釈される。これらの結果は、WACE がバレンツ・カラ海の海水氷変動に対する応答を表現することのさらなる証拠となる。WACE の PDF のシフトで表現される強制応答シグナルは、非線形大気力学の考え方とも合致しており、外部強制が特定のレジームの出現をより好むように働いていることを示唆している (Palmer, 1999)。

図 2a から明らかなように、負の北極振動もユーラシア大陸の中緯度域に低温偏差をもたらすことができ、再解析データの PC1 と PC2 の散布図 (図 2e) は、ユーラシア大陸の中央部で観測された寒冬のほぼ全てが、北極振動が負位相かつ/あるいは WACE が正位相の場合に発生していることを示す。つまり、ユーラシア大陸中央部の近年の寒冬は、大気の内変動と海水氷の減少による大気応答の組

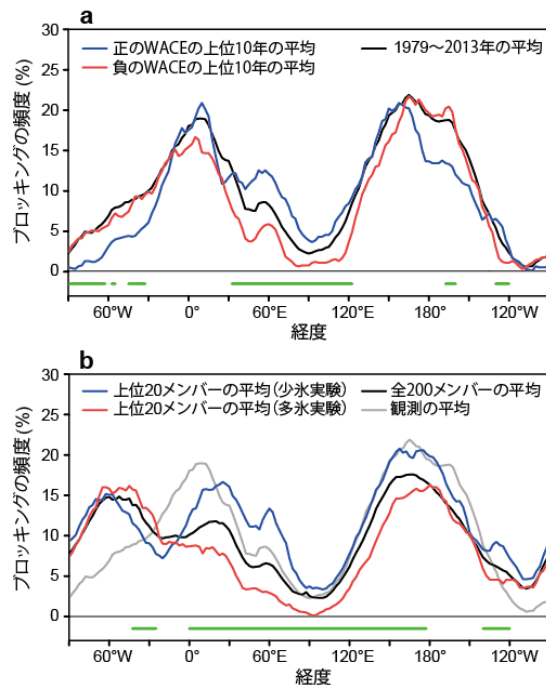


図 4: (a)ERA-Interim から得られた冬のブロッキングの頻度。黒線は 1979～2013 年の平均を、青線は正の WACE の強かった上位 10 年の平均を、赤線は負の WACE の強かった上位 10 年の平均を示す。(b)AGCM から得られた冬のブロッキングの頻度。黒線は全 200 メンバーの平均を、青線は少氷実験で正の WACE の強かった上位 20 メンバーの平均を、赤線は多氷実験で負の WACE が強かった上位 20 メンバーの平均を示す。緑線は、赤線と青線の差が 95%水準で統計的に有意な経度を表す。

み合わせで説明される。しかしながら、WACE は有意な正のトレンドを持つものに対し (0.45/10 年)、北極振動には明瞭なトレンドが見られないことから、近年の寒冬の増加には海氷の減少による影響が大きいことが示唆される。また、モデルのアンサンブルシミュレーションは上記の再解析データから得られた示唆をサポートする結果になっている。すなわち、寒冬の頻度は少氷実験の方が多氷実験よりも多くなり (図 2f)、図 1a に示した程度の寒冬が起こる確率が、多氷実験の

6.2%に対して少氷実験では 14.4%と、2 倍以上高くなっている。

正の WACE パターン (図 2b) は、60E、60N 付近を中心とする高気圧性の地表気圧偏差を伴っており、この偏差に伴う極から中緯度域への寒気移流によりユーラシア大陸中央部は低温偏差となる。また再解析データより、WACE パターンが正位相の時ほど、この領域でブロッキングの出現頻度が増えていることが分かった (図 4a)。この特徴はモデルでもよく再現されており (図 4b)、バレンツ・カラ海の海氷の減少に伴い、上空で偏西風が蛇行しやすくなっていることを示唆しているが、まだ詳しいメカニズムは分かっていない。

もしバレンツ・カラ海の海氷の減少が地球温暖化の影響を強く反映しており、温暖化の進行と共に今後さらに海氷が減り続けるとすると、上記のメカニズムから、寒冬の頻度が今後さらに増加することも想像され得る。しかしながら、CMIP5 の 22 の気候モデルによる将来予測実験によると、海氷は今後ますます減少するものの、ユーラシアの中緯度域で寒い冬の頻度は減少していくと予測されている。したがって、最近の寒冬の増加は地球温暖化が進行する過程で一時的に起きる過渡現象だと考えられる。しかしながら、気候モデルの予測にはさまざまな不確実性があり、より確かな結論を得るためには今後さらなる研究が必要である。

引用文献

1. Honda, M., Inoue, J. & Yamane, S., 2009: Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters. *Geophys. Res. Lett.* **36**, L08707.
2. 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.

3. 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.
4. 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.
5. Palmer, T. N., 1999: A nonlinear dynamical perspective on climate prediction. *J. Clim.* **12**, 575-591.
6. Peings, Y. & Magnusdottir, G., 2014: Response of the wintertime Northern Hemisphere atmospheric circulation to current and projected Arctic sea ice decline: A numerical study with CAM5. *J. Clim.* **27**, 244-264.
7. Petoukhov, V. & Semenov, V. A., 2010: A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents. *J. Geophys. Res.* **115**, D21111.
8. Screen, J. A., Simmonds, I., Deser, C. & Tomas, R., 2013a: The atmospheric response to three decades of observed Arctic sea ice loss. *J. Clim.* **26**, 1230-1248.
9. Screen, J. A., Deser, C., Simmonds, I. & Tomas, R., 2013b: Atmospheric impacts of Arctic sea-ice loss, 1979–2009: Separating forced change from atmospheric internal variability. *Clim. Dynam.* **43**, 333-344.
10. Tang, Q., Zhang, X., Yang, X. & Francis, J. A., 2013: Cold winter extremes in northern continents linked to Arctic sea ice loss. *Environ. Res. Lett.* **8**, 014036.