

極端な北極海の海水減少に対する大気応答

Atmospheric response to extreme sea ice decrease in the Arctic

山崎孝治 (北海道大学), 中村哲 (北海道大学), 本田明治 (新潟大学),
浮田甚郎 (新潟大学)

Koji Yamazaki, Tetsu Nakamura, Meiji Honda, and Jinro Ukita

1. はじめに

地球温暖化に伴い、近年、北極域の気温は全球平均の2倍のスピードで昇温し、北極域の海水面積は急激に減少している。この海水の変化は気候システムにおいて重要な役割を果たしている。近年の北極振動の負傾向とそれに伴う中緯度の寒波は自然変動もあるが北極海水の減少によりもたらされたことが、近年の研究から明らかになってきた^{1),2)}。また、観測の解析やモデル実験によって、海水減少が負の北極振動をもたらす過程では、特に真冬から晩冬にかけては、成層圏を通じたプロセスが重要であることが認識されつつある^{3),4),5)}。海水減少が対流圏のプラネタリー波を増幅させ、それが成層圏の極渦を弱め、さらに成層圏から対流圏へ影響して対流圏の北極振動を負へシフトさせるという筋書きである。一方で海水-北極振動の関係は非線形であり、さらに北極の海水が減少すると北極振動は正になるという研究もある⁶⁾。

ここでは北極の海水をこれまで観測された程度から海水がすべて融解する極端なケースまで段階的に海水を変化させて大気への影響を見る。海水だけを変化させるので温暖化の未来予測ではないが、海水から大気への影響のプロセスを理解するための思考実験として行う。なお本研究の図は文献⁷⁾から一部引用している。

2. モデルと実験方法

本研究で使用した大気大循環モデルは AFES version 4.1 (T79L56, モデル最上層 60 km) であり、著者らの以前の研究で使用したもの^{2),5)}と同じである。

本モデルでの海水は各格子点で「あり」か「なし」のどちらかである。ただし、海水の厚さは最大 50 cm で観測される海水密接度に比例するように与える。そのため、密接度に応じた乱流熱フラックスが大気に与えられることになる。

CNTL run では海水密接度や海面水温を昔の海水が多かった時期 (1979-1983 年の5年平均) の月平均値を与える。AICE run は北極海水のみ最近の少ない値 (2005-2009 年の5年平均) を与える。さらに Im30 (Im40) run では北極の海水の厚さを 30(40) cm 減少させる。Im50 run では 50 cm 減少させるので真冬でも北極海には海水が全くない。積分は各々のランを 150 年行い、結果を解析した。

3. 実験結果

図 1 はそれぞれのランにおける冬平均 (12-2 月) 乱流熱フラックス偏差 (CNTL との差: 上) と 500 hPa 高度 (下) である。

AICE~Im40 では北大西洋および北極海沿岸で熱フラックスによる大気加熱が大きい。Im50 では北極海全域で大気加熱が大きい。500 hPa の大気場は CNTL から Im50 へ順に北極域が暖まるので北極域での高度が高くなる。

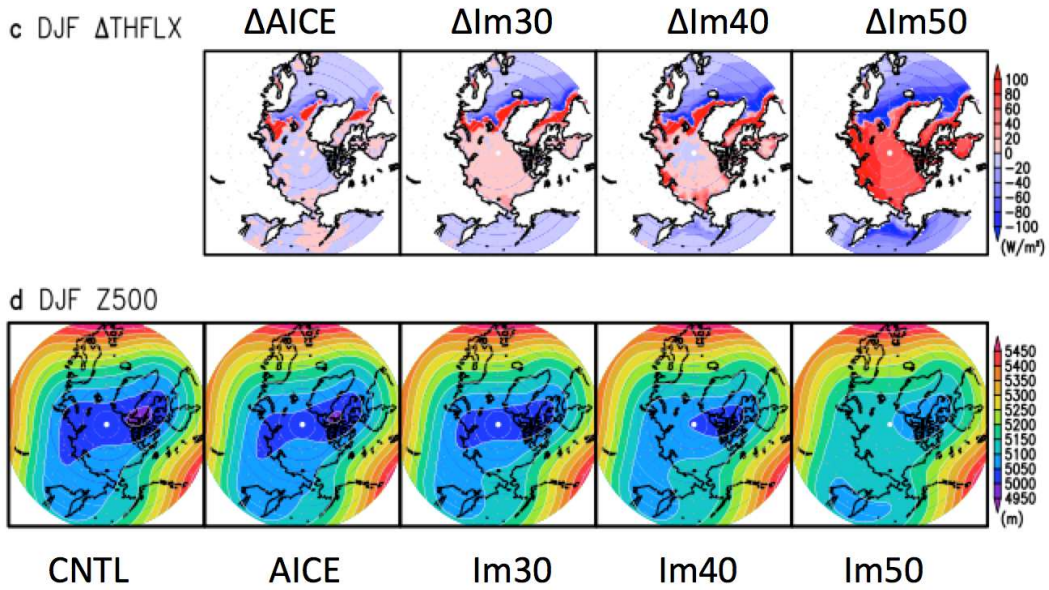


図 1 上：冬平均（12-2 月）のそれぞれのランの乱流熱フラックス偏差（CNTL との差）．正の値（大気を暖める方向）は赤で示す．下：冬平均のそれぞれのランの 500 hPa 高度．文献 7) の Figure S1 を一部改変．

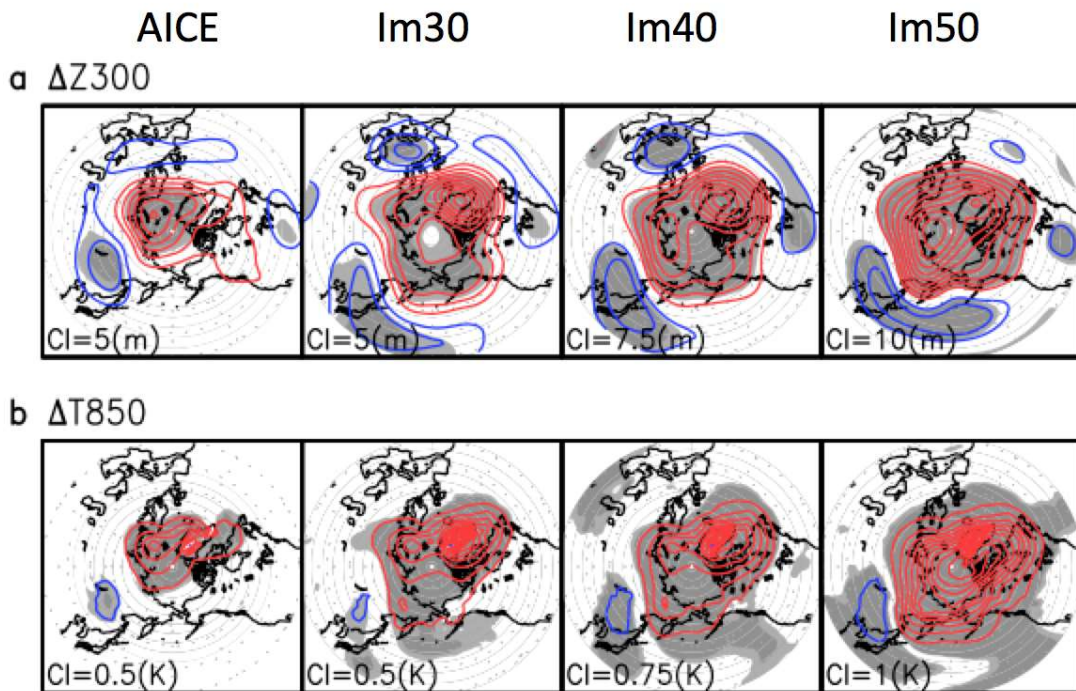


図 2 それぞれのランの 150 年平均の冬（12-2 月）の CNTL run との差．上）300 hPa 高度，等値線間隔は左から右へ（AICE, Im30, Im40, Im50）5 m, 5 m, 7.5m, 10 m. 下）850 hPa 気温．等値線は左から右へ 0.5 K, 0.5K, 0.75K, 1 K. いずれも正の値は赤い，負の値は青い線で示す．影は有意水準 95%, 99%で有意な所を示す．文献 7) の Figure 1 を引用．

CNTL からの偏差として 300 hPa 高度偏差と 850 hPa の気温偏差を図 2 に示す. 北極域の下層気温偏差および高度偏差は AICE から Im50 へゆくに従って (海氷が減少するに従って), 北極域の昇温は大きく広くなり, 北極域の正の高度場偏差も大きく広くなる. 一方, 中緯度, 特に極東で, 高度偏差が負になり, 北極振動は海氷が減少するとどんどん負になってゆく. 極東の気温は海氷減少が進むほど負偏差になる.

成層圏との関係を見るために, 60°N における東西平均西風偏差の時間・高度断面図を図 3 に示す. AICE では 1 月にプラネタリー波が成層圏へ伝播し (図略), 上部成層圏の西風を減速させ, それが徐々に下降し, 1 月下旬から 2 月にかけて対流圏で西風減速 (すなわち負の北極振動) を引き起こす. Im30 や Im40 でも時期は異なるが成層圏への伝播が見られるが, 対流圏は成層圏とは独立に負の北極振動になっているようである. Im50 になると対流圏では負の北極振動, 成層圏では正の北極振動となり, 成層圏は対流圏の負の北極振動の要因になっていない. 成層圏・対流圏リンクは見られない.

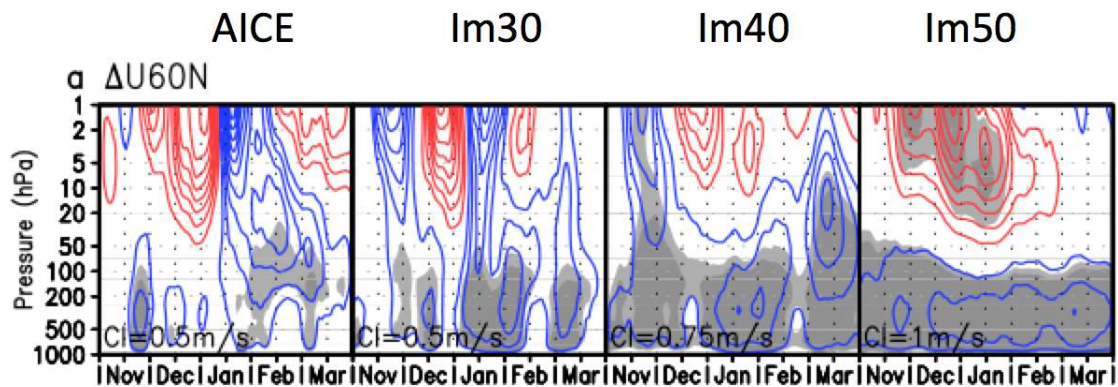


図 3 60° N における東西平均西風偏差 (北極振動のプロキシ) の時間・高度断面図. 11 月から 3 月までを示す. 赤い線は正偏差, 青は負偏差を示す. 影は 95%, 99% で偏差が有意な所. 文献 7) の一部を改変.

Im50 の結果は, 北極海氷減少が対流圏の北極振動を負にして極東で寒波をもたらすプロセスとして成層圏経由だけではなく, 対流圏のみの過程があり, その過程が北極の海氷が減少すればするほど強まることを示唆している.

次に対流圏での波の活動度と残差平均子午面循環を調べた (図略). AICE から Im50 へと 40-70°N の対流圏で波の鉛直伝播が強まり (物理的には極向きの渦熱輸送が強まることと同等), 高緯度対流圏中上層の西風を減速している. このため, 中緯度で上昇し高緯度で下降する残差平均子午面循環が強化され, 海氷が海面が変わることによる直接的な北極域の乱流加熱に加えて, 循環による力学的加熱 (= 極向き熱輸送の収束) が北極温暖化を増幅させていることがわかった. 逆に中緯度では循環偏差は上昇流であり力学的加熱は弱いながらも寒冷化に働いている. なお, このプロセスに参与する波はどの実験でも主にプラネタリー波 (波数 1 と 2) であり, 総観規模擾乱の役割は小さかった.

4. まとめ

近年の北極域の海氷減少により北極域は昇温しているが成層圏結合を介して冬の北極振動が負位相になり東アジアなどでは寒冬になることが著者らの研究等で示された。ここでは AFES 大気大循環モデルを用いて、海氷減少が現実的なものから北極海の海氷がすべてなくなるような極端な仮想条件に対する大気応答を、海氷のみを段階的に減少させた実験により調べた。海氷を減少してゆくと対流圏の北極振動は負になり北極域の昇温も大きく広がる一方、東アジアの寒冷化も強まり極向きの熱輸送も増大する。ただし海氷が全くなると成層圏では正の北極振動となり、対流圏とは独立して成層圏-対流圏結合は見られなくなる。海氷-中緯度気候リンクには対流圏に閉じたプロセスと成層圏経由のプロセスの2つがあることがわかった。

謝辞

数値シミュレーションは JAMSTEC の Earth Simulator 3 で行った。当研究は Green Network of Excellence (GRENE) Program Arctic Climate Change Project と the Arctic Challenge for Sustainability (ArCS) の助成を受けた。

【参考・引用文献】

- 1) Honda, M., J. Inoue, S. Yamane, 2009: Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters, *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L08707.
- 2) 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.
- 3) King, M. P., M. Hell, and N. Keenlyside, 2015: Investigation of the atmospheric mechanisms related to the autumn sea ice and winter circulation link in the Northern Hemisphere. *Clim. Dyn.*, **46**, 1185-1195.
- 4) Kim, B. M., S. W. Son, S. K. Min, J. H. Jeong, S. J. Kim, Z. Zhang, T. Shim, and J. H. Yoon, 2014: Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea-ice loss, *Nature Communications*, **5**, 4646.
- 5) 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 mid-latitude climate, *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 3494-3501.
- 6) Petoukhov, V., and V. A. Semenov, 2010: A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents, *J. Geophys. Res.*, **115**, D21111.
- 7) Nakamura, T., K. Yamazaki, M. Honda, J. Ukita, R. Jaiser, D. Handorf, and K. Dethloff, 2016: On the atmospheric response experiment to a Blue Arctic Ocean. (submitted to *Geophys. Res. Lett.*)