

北極海水減少に伴う極域温暖化増幅と成層圏過程の役割

*中村 哲¹、山崎孝治¹、岩本勉之²、本田明治³、浮田甚郎³、三好勉信⁴、
小川泰信^{5,6}、富川 喜弘^{5,6}

1. 北海道大学、2. 紋別市役所、3. 新潟大、4. 九大、5. 極地研、6. 総研大

1. はじめに

近年の地球温暖化に伴い、北極域では他地域よりも大きな昇温傾向を示しており(極域増幅、Polar amplification)、それに伴い特に北極海の海氷は急速に減少している事が報告されている。北極海の海氷減少は北極近辺のローカルな大気応答のみならず、大気の波動活動などによる遠隔応答をもたらし、中高緯度の気候へ影響することが示唆される(Honda et al., 2008; Deser et al., 2010; Screen et al., 2013)。特に 2000 年代以降の急速な海氷域後退に伴う冬季北半球気候の変化は、ユーラシア大陸上での寒気の到来や北極を取り巻くジェット気流の蛇行やブロッキング高気圧の発達と関連する(Overland et al., 2011; Hopsch et al., 2012; Orsolini et al., 2012; Mori et al., 2014)。

これらの冬季気候状態の変化は北極振動(Arctic Oscillation, AO)の負位相として捉えられる。観測データ解析・数値モデル実験に基づく研究により、北極海の海氷域後退に伴って北極振動の負位相が現れやすくなることが示される(Jaiser et al., 2012; Liu et al., 2012; King et al., 2015; Nakamura et al., 2015)。負の北極振動は成層圏突然昇温(Stratospheric sudden warming, SSW)時に起こり易い事が知られており、さらに 2000 年代に入り、1990 年代に比べて SSW の発生頻度が増えている。SSW のような冬季成層圏極渦弱体化が起こりやすくなる要因として、夏から秋にかけての北極海水後退(Orsolini et al., 2012; Kim et al., 2014; Nakamura et al., 2015)・秋のシベリア域の積雪被覆増加(Fletcher et al., 2007; Peings et al., 2012)・およびそれらの複合作用(Cohen et al., 2014; Wegmann et al., 2015)による惑星波変調が指摘される。成層圏極渦弱体化シグナルが下方伝搬することで鉛直結合する時、対流圏での負の北極振動シグナルとして観測される(Baldwin and Dunkerton, 2001)。このような成層圏経路(Stratospheric pathway)での海氷減少-負 AO のリンクは、観測された 2000 年以前以降の変化と海氷のみを変化させた数値実験とで非常によく一致して見られる(Jaiser et al., 2016)。CMIP6 結合モデル群の現在気候再現実験においても、Stratospheric pathway が成層圏と結合しないプロセス(Tropospheric pathway; Nakamura et al., 2016b)と同程度に再現される(García-Serrano et al., 2016)。一方、CMIP5 の将来予測実験から得られた海氷分布を用いた数値実験では、海氷減少域の違いにより

成層圏応答の仕方が大きく変わる(Sun et al., 2015)。

Nakamura et al. (2016a)は海氷減少-負 AO リンクにおける成層圏過程の役割を明らかにするため、成層圏の波動平均流相互作用を段階的に減衰させた実験を行い、海氷減少に伴う成層圏循環の変化が対流圏気候、ひいては極域増幅へもたらす影響について調べた。本稿はその内容にいくつかの最新の知見を加えて紹介するものである。

2. モデルと実験設定

モデル上端高度を上部成層圏(60km)まで延伸した AFES4.1(解像度:T79L56)を用いたタイムスライス実験を行った。境界条件として Merged Hadley/OISST(Hurrell et al., 2008)の月平均 SST および海氷密接度データを与えた。海氷密接度は最大 50cm の海氷厚に線形変換したのち、モデルの境界条件として使った。SST を 1979-1983 の 5 年平均値、海氷を表 1 に示す境界条件を設定した 6 タイプの実験の 60 年積分を行った。High (1979-1983)と Low (2005-2009)はそれぞれ現在気候状態における多氷年と少氷年を代表する。両者の差は、夏から初秋は東シベリア海付近、晩秋から冬はバレンツ・カラ海での著しい減少傾向を表わす。

減衰なしの FREE に対し、R10、R30 ではそれぞれ 10、30hPa より上空で東西平均東西風を FREE の HICE の日平均気候値に最大時間スケール 1d で緩和する。東西平均場のみを緩和し eddy 成分は緩和しないため、成層圏を伝搬する波の振幅そのものは変わらないが、wave drag による東西風加速が抑制されることにより、波動平均流相互作用を減衰させている。緩和高度の違うそれぞれの実験における HICE と LICE の差を T 検定により評価した。R10、R30 実験は CMIP5 世代の気候モデルに代表されるような Low-top モデルを模擬している。FREE 実験との比較により、

表 1. 各 AFES 実験に用いた海氷の境界条件

	ICE	
FREE	HICE	High (1979-1983)
	LICE	Low (2005-2009)
R10	HICE	High
	LICE	Low
R30	HICE	High
	LICE	Low

High(Low): 各月 1979-1983(2005-2009)5 年平均値

海氷減少への大気応答に対する成層圏過程の役割を評価した。

3. 結果

3.1. 負AO的な環状パターンと中緯度寒冷応答

はじめに冬期(12、1、2月)平均気候場の応答を評価する。*FREE* 実験では、負のAO的な環状パターン的高度場偏差が見られ(図1a)、地表付近ではバレンツ・カラ海およびオホーツク海の高温偏差に加えて低温偏差域がユーラシア大陸で広がる(図1b)。前者は海氷後退域の拡大による大気加熱に対応するが、後者は海氷減少に対するリモートな応答であると考えられる。一方 *RS10*, *RS30* 実験では環状パターンのような高度場偏差は見られず、AOの位相としては中立かむしろ正である。地表付近気温場は海氷後退域での高温偏差は *FREE* と同様に見られるものの中緯度域の低温偏差は *RS10* のアラスカ付近を除けば弱く、統計的有意性も低い。

FREE 実験の応答偏差は、海氷減少に伴い負AOの発現頻度が増えるという先行研究と整合する。しかし *RS10*, *RS30* 実験では成層圏過程の一部を減衰させただけでもかわらず、対流圏の応答偏差は大きく変わり、負AO的なパターンおよび中緯度の寒冷化は現れないことは興味深い。

3.2. 惑星波強化による成層圏極渦弱化

北緯60度の東西平均東西風偏差の時間発展から

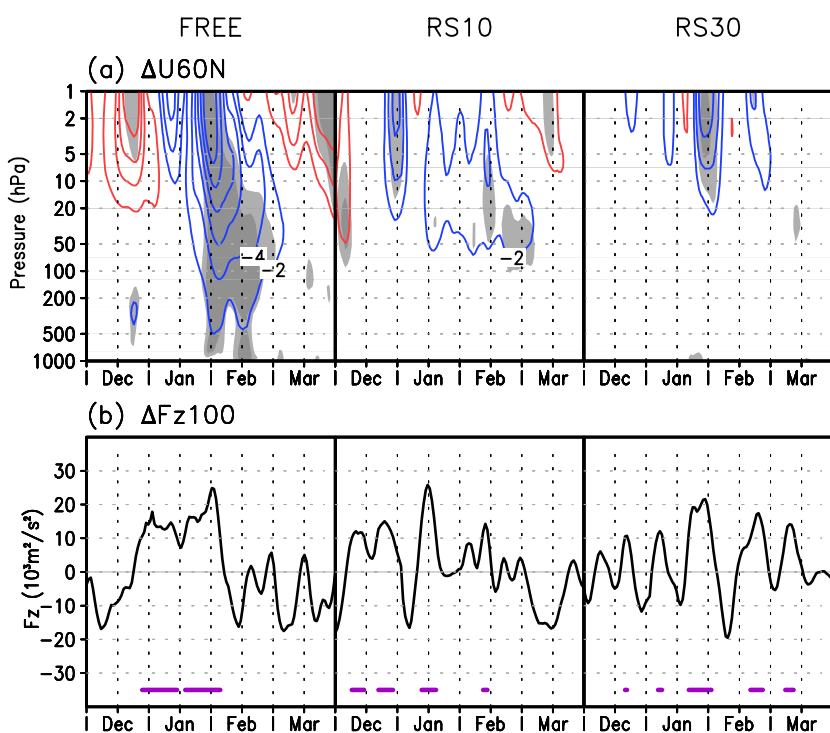


図2. (a)北緯60°の日平均東西平均東西風偏差(単位 m/s)の時間高度断面図。等値線は *HICE* に対する *LICE* の60年平均偏差を示し、陰影はT検定による統計的有意水準95.99%を示す。左から *FREE*, *RS10*, *RS30* 実験の結果。(b)北緯50-80°平均の100hPaにおける日平均EP-flux鉛直成分偏差。各パネル下部の紫線は上向き偏差が $10^4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ を超える期間を示す。

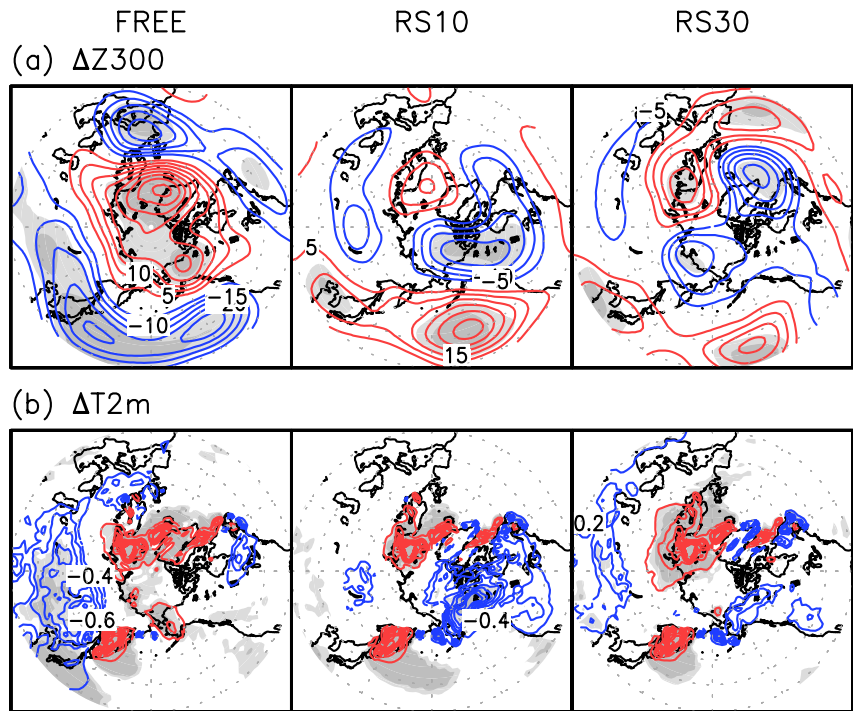


図1. 冬季(12、1、2月)平均の(a)300Pa 高度場偏差(単位 m)および(b)地上2m気温の偏差(単位 K)。等値線は *HICE* に対する *LICE* の60年平均偏差を示し、陰影はT検定による統計的有意水準95.99%を示す。左から *FREE*, *RS10*, *RS30* 実験の結果。

それぞれの実験における成層圏からの下方影響を検証する。*FREE* 実験では成層圏上部の極渦弱化およびそれが下方伝搬し対流圏と結合する偏差が卓越する(図2a)。有意な偏差は地表付近まで繋がっている。その前駆期間には成層圏下部で波活動度の鉛直上向き伝播が強まっており(図2b)、成層圏上部で増幅した惑星波によるwave dragにより極渦弱化が引き起こされた事を示唆する。*RS10* および *RS30* においては間欠的な波活動度増幅とそれに応じた成層圏上部の極渦弱化偏差が見られる。しかしその振幅は小さく、下方伝播は成層圏下部までしか到達しない(*RS10*)、もしくは見られない(*RS30*)。

極渦弱化の前駆としての波活動度強化を考える。冬季バレンツ・カラ海では顕著な海氷後退に伴い大きな上向き乱流熱フラックス偏差が生じる。この時の下層大気加熱をwave sourceとする定常ロスビー波応答は、対流圏上層でバレンツ・カラ海上に高気圧偏差、下流の東シベリア域に低気圧偏差の

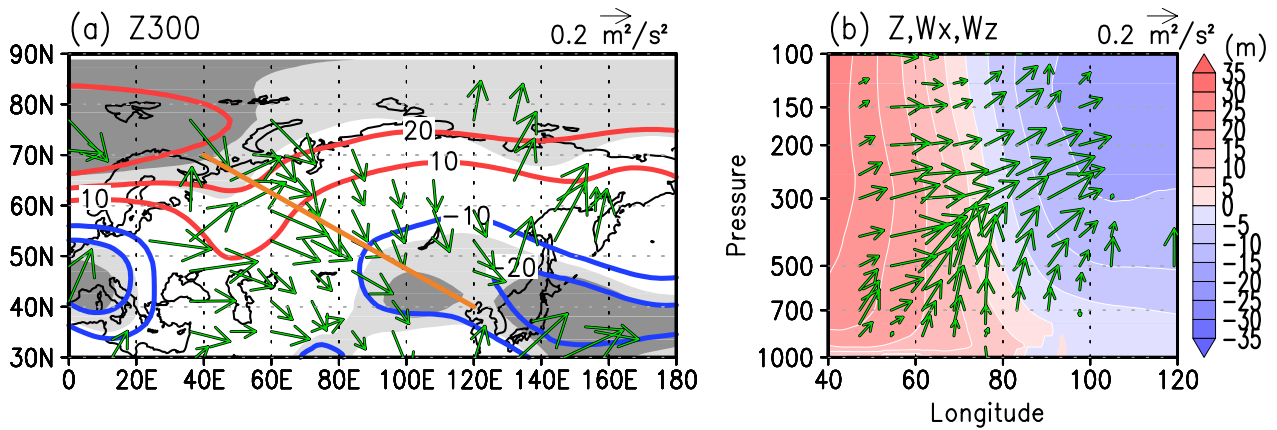


図3. (a) *FREE* 実験の冬季 300hPa 高度場偏差(単位 m)。等値線は *HICE* に対する *LICE* の 60 年平均偏差を示し、陰影は T 検定による統計的有意水準 95.99%を示す。高度場偏差に応じた水平波活動フラックス偏差(Takaya and Nakamura, 2001)を緑矢印で表し、ベクトルの長さ $0.2 \text{ m}^2/\text{s}^2$ に対応する矢印をパネル右上に示す。(b) 図 3a の橙色線上の高度場偏差および波活動度フラックス偏差の断面図。パネルの縦横比から波活動度フラックス偏差の鉛直成分は 300 倍したものを示す。

ような波列パターンとなる(図 3a) (Honda et al., 2009; Nakamura et al., 2015)。この定常ロスビー応答に伴う波列パターンは対流圏上部から下部成層圏まで順圧的な構造をしている(図 3b)。冬季の気圧配置を考えると、下部成層圏ではシベリアは気候学的にトラフとなっており、また対流圏から成層圏への惑星波伝播の主要な経路である。海氷後退によって生じた偏差場の波列パターンはシベリア域の気候学的トラフを強化することにより(図 4a)、同領域での波活動度の上向き伝播を強化する(図 4b)。この特徴は、振幅や有意性の違いがあるものの、*RS10* および *RS30* でも同様に見られる。つまり、海氷後退に応じた気候学的惑星波の上向き伝播の強化はモデルの成層圏の表現に左右されることなく起こることを意味する。

3. 3. 成層圏対流圏結合強度と下方影響

惑星波伝播の強化は上部成層圏の極渦弱体化の driving force となるが、前述したように成層圏応答の下方伝播の様子および対流圏のシグナルは、成層圏過程の減衰により大きく違っていた(図 2a および図 1)。ここでは成層圏と対流圏の AO シグナルの鉛直結合強度を調べ、成層圏過程の違いによる下方伝播特性の変化を考察する。

FREE 実験では冬季極冠高度(Polar cap height, PCH=AOシグナルの指標)の自己相関から2系統の伝播特性が見られる。一つは上部成層圏から下部成層圏へゆっくり伝播する遅い結合、もう一つは下部成層圏と対流圏ではほぼ同期するような速い結合である(図 5a)。速い結合は3つの実験でほぼ変わらない一方、前者の遅い結合は *FREE* から *RS30* まで成層圏

の減衰強度(減衰開始高度)が強まるにつれ結合が顕著に弱まる。波活動度の鉛直伝播は対流圏から成層圏へ数日で伝わる速い伝播特性を持ち(図 5b)、3つの実験で同様である。このような成層圏からの下方影響は Baldwin and Dunkerton (2001)で示されるものとよく整合する。AO シグナルの遅い鉛直結合について

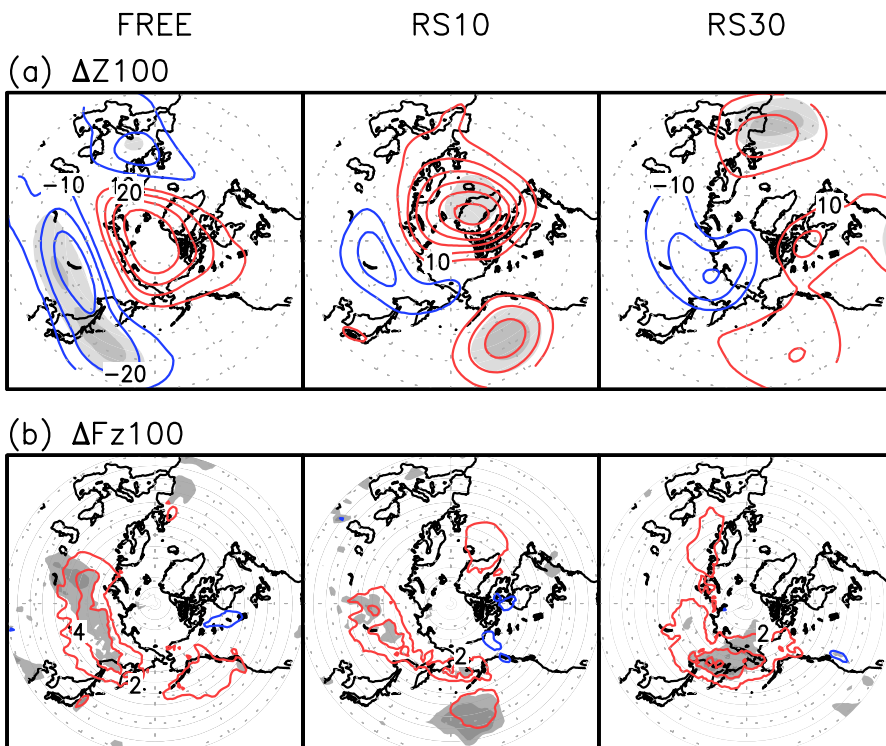


図4. 冬季平均の(a) 100Pa 高度場偏差(単位 m)および(b) 定常場(=月平均場)から求めた波活動度フラックス(Plumb, 1985)の鉛直成分偏差(単位 $10^3 \text{ m}^2/\text{s}^2$)。等値線は *HICE* に対する *LICE* の 60 年平均偏差を示し、陰影は T 検定による統計的有意水準 95.99%を示す。左から *FREE*, *RS10*, *RS30* 実験の結果。

は Matsuno (1971)、Kidston et al. (2015) により、力学的メカニズムの説明がなされる。一方、速い鉛直結合についてはその正確なメカニズムについては結論がでていないが、波活動によって駆動された子午面循環偏差に伴う質量再配分 (Haynes and Shepherd, 1989; Ambaum and Hoskins, 2002) や対流圏上層の eddy feedback メカニズム (Kimoto et al., 2001; Perlwitz and Harnik, 2004) により結合するものと考えられる。

以上の実験結果を統合すると、海氷後退による惑星波強化が成層圏極渦を弱める driving force となり、そのシグナルが遅い鉛直結合により下部成層圏へ影響し、速い鉛直結合により対流圏まで作用すると考えられる (*FREE* 実験)。波平均流相互作用を減衰した場合には、遅い鉛直結合がうまく表現されず、シグナルが下部成層圏まで届かないために対流圏で負 AO 的なパターンとならない (*RS10*, *RS30*)。このことから海氷後退への応答として成層圏が主要な経路となっており、対流圏の AO 的なパターンは海氷への直接的な応答ではなく成層圏が変化したことの footprint であると推察できる。

3. 4. 極向き熱輸送と極域増幅

海氷後退に伴う負 AO 的な応答パターンはそれ自体が極域での高温傾向、中緯度域での低温傾向の指標であり、また波活動度の上向き伝播は極向き熱輸送と同義である。ここでは海氷後退に伴う直接的な大気加熱に加えて、循環場の変化による間接的な大気加熱を見積もり極域増幅への影響を評価する。表 2 にそれぞれの実験の北極域の乱流熱フラックス偏差および中・高緯度でカラム積算した TEM 系の残差子午面平均循環の鉛直成分 w^* に伴う大気加熱偏差 (詳細は Nakamura et al., 2015) を示す。*FREE* 実験では循環場による熱輸送が極向き熱輸送を強め、極域大気を加熱、中緯度大気を冷却する。極域加熱偏差は乱流熱フラックスと同程度の大きさで、海氷後退に伴う直接的な加熱に加えて、それに伴う循環場の変化もさらに極域を加熱するという正のフィードバック構造となり、極域増幅をさらに強める効果をもつ。中緯度の冷却は近年の厳冬傾向と整合する。このフィ

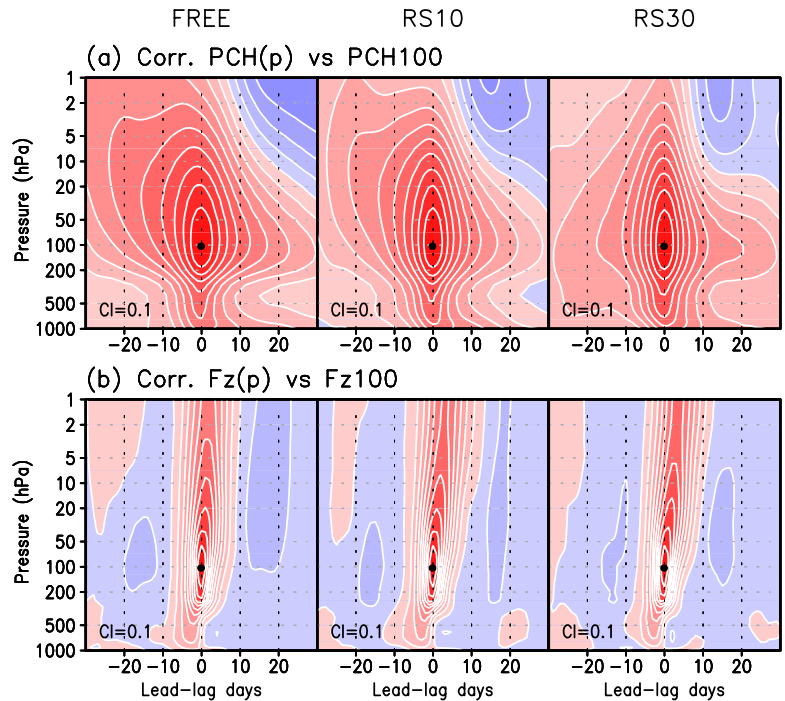


図5. それぞれの実験における *HICE* の 60 年積分の冬季 90 日間から求めた (a) 日平均極冠高度 (polar cap height, PCH, 70N 以北平均) と (b) 波活動度フラックス鉛直成分 (Fz) の相関係数。100hPa を基準 (黒丸) とした自己相関係数のラグ (横軸) - 高度 (縦軸) 分布を示す。等値線間隔は 0.1。

ードバック構造は *RS10*, *RS30* 実験では見られない。成層圏過程が極域増幅の強さにも重要であることが示唆される。

4. まとめ

本研究では、特に近年顕著に見られる極域増幅および中緯度の寒冷傾向を説明可能なプロセスとして、北極海の海氷後退とそれに付随して起きる成層圏の極渦弱体化が、対流圏の負 AO 的な環状パターンを引き起こすための主要な経路 (stratospheric pathway) であることがわかった。本稿では詳述しなかったが、海氷後退に伴う波活動度強化はその持続性において成層圏過程の影響を受ける (図 2b)。これは成層圏過程が波活動を通した鉛直結合に対してより active に働き、力学的にさらに複雑なフィードバック機構があることを示唆する。CMIP6 モデル群の現在気候再現実験 (García-Serrano et al., 2016) や、北極の温暖化を一層強めた理想化実験 (Nakamura et al., 2016b) では成層圏を経由しないプロセスが支配的となるケースもある。鉛直結合過程におけるフィードバック機構の力学的な複雑さは、そのような海氷後退に

表 2. 冬季 (12、1、2 月) 平均極域乱流熱フラックス偏差と熱輸送偏差 (単位 W/m^2)

	ΔTHF	ΔQ_{High}	ΔQ_{Low}
<i>FREE</i>	3.61	3.00	-1.86
<i>R10</i>	4.14	0.13	0.30
<i>R30</i>	3.85	0.00	0.38

ΔTHF : 60N 以北平均の海氷後退に伴う乱流熱フラックス偏差

ΔQ_{High} : 60N 以北平均の w^* に伴う大気加熱偏差のカラム (850hPa-model top) 積算値

ΔQ_{Low} : 30N-60N 平均の w^* に伴う大気加熱偏差のカラム (850hPa-model top) 積算値

に対する応答の不確実性 (Screen and Simmonds, 2013; Screen et al., 2013) の一因であるかもしれない、さらなる調査が必要である。

参考文献

- Ambaum, M. H. P., and B. J. Hoskins (2002), The NAO troposphere-stratosphere connection. *J. Clim.*, 15, 1969–1978.
- Baldwin, M. P., and T. J. Dunkerton (2001), Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes, *Science*, 294, 581–584.
- Cohen, J., et al. (2014), Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather, *Nat. Geosci.*, 7, 627–637.
- Deser, C., R. Tomas, M. Alexander, and D. Lawrence (2010), The seasonal atmospheric response to projected Arctic sea ice loss in the late 21st century, *J. Clim.*, 23, 333–351.
- García-Serrano, J., C. Frankignoul, M. P. King et al. (2016), Multi-model assessment of linkages between eastern Arctic sea-ice variability and the Euro-Atlantic atmospheric circulation in current climate, *Clim. Dyn.*, doi:10.1007/s00382-016-3454-3.
- Fletcher, C. G., P. J. Kushner, and J. Cohen (2007), Stratospheric control of the extratropical circulation response to surface forcing, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L21802, doi:10.1029/2007GL031626.
- Haynes, P. H., and T. G. Shepherd (1989), The importance of surface pressure changes in the response of the atmosphere to zonally-symmetric thermal and mechanical forcing. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 115, 1181–1208.
- 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.
- Hopsch, S., J. Cohen, and K. Dethloff (2012), Analysis of a link between fall Arctic sea ice concentration and atmospheric patterns in the following winter, *Tellus A*, 64, 18,624.
- Hurrell, J. W., J. J. Hack, D. Shea, J. M. Caron, and J. A. Rosinski (2008), A new sea surface temperature and sea ice boundary dataset for the Community Atmosphere Model, *J. Clim.*, 21, 5145–5153.
- Jaiser, R., K. Dethloff, D. Handorf, A. Rinke, and J. Cohen (2012), Impact of sea ice cover changes on the Northern Hemisphere atmospheric winter circulation, *Tellus A*, 64, 11,595.
- Jaiser, R., T. Nakamura, D. Handorf, K. Dethloff, J. Ukita, and K. Yamazaki (2016), Atmospheric autumn and winter response to Arctic sea ice changes in reanalysis data and model simulations, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, 7564–7577, doi:10.1002/2015JD024679.
- Kidston, J., A. A. Scaife, C. Hardiman, D. M. Mitchell, N. Butchart, M. P. Baldwin, and L. J. Gray (2015), Stratospheric influence on tropospheric jet streams, storm tracks and surface weather, *Nat. Geosci.*, 8, 433–440.
- 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, *Nat. Commun.*, 5, 4646.
- Kimoto, M., F.-F. Jin, M. Watanabe, and N. Yasutomi (2001), Zonal-eddy coupling and a neutral mode theory for the Arctic Oscillation, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 737–740, doi:10.1029/2000GL012377.
- 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.*, doi:10.1007/s00382-015-2639-5.
- Liu, J. P., J. A. Curry, H. Wang, M. Song, and R. M. Horton (2012), Impact of declining Arctic sea ice on winter snowfall, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 109, 4074–4079.
- Matsuno, T. (1971), A Dynamical Model of the Stratospheric Sudden Warming, *J. Atmos. Sci.*, 28, 1479–1494.
- Mori, M., M. Watanabe, H. Shioyama, J. Inoue, and M. Kimoto (2014), Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades, *Nat. Geosci.*, 7, 869–873.
- 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, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 3209–3227, doi:10.1002/2014JD022848.
- Nakamura, T., K. Yamazaki, K. Iwamoto, M. Honda, Y. Miyoshi, Y. Ogawa, Y. Tomikawa, and J. Ukita (2016a), The stratospheric pathway for Arctic impacts on midlatitude climate, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 3494–3501, doi:10.1002/2016GL068330.
- Nakamura, T., K. Yamazaki, M. Honda, J. Ukita, R. Jaiser, D. Handorf, and K. Dethloff (2016b), On the atmospheric response experiment to a Blue Arctic Ocean, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 10394–10402, doi:10.1002/2016GL070526.
- Orsolini, Y. J., R. Senan, R. E. Benestad, and A. Melsom (2012), Autumn atmospheric response to the 2007 low Arctic sea ice extent in coupled

- ocean–atmosphere hindcasts, *Clim. Dyn.*, 38, 2437–2448, doi:10.1007/s00382-011-1169-z.
- Overland, J., K. Wood, and M. Wang (2011), Warm Arctic-cold continents: Climate impacts of the newly open Arctic Sea, *Polar Res.*, 30, 15,787.
- Peings, Y., D. Saint-Martin, and H. Douville (2012), A numerical sensitivity study of the influence of Siberian snow on the Northern Annular Mode, *J. Clim.*, 25, 592–607.
- Perlwitz, J., and N. Harnik (2004), Downward coupling between the stratosphere and troposphere: The relative roles of wave and zonal mean processes. *J. Clim.* 17, 4902–4909.
- Plumb, R. A. (1985), On the three-dimensional propagation of stationary waves, *J. Clim.*, 42, 217–229.
- Screen, J. A., and I. Simmonds (2013), Exploring links between Arctic amplification and mid-latitude weather, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 959–964, doi:10.1002/grl.50174.
- Screen, J. A., I. Simmonds, C. Deser, and R. Tomas (2013), The atmospheric response to three decades of observed Arctic Sea ice loss, *J. Clim.*, 26, 1230–1248, doi:10.1175/JCLI-D-12-00063.1.
- Sun, L., C. Deser, and R. A. Tomas (2015), Mechanisms of stratospheric and tropospheric circulation response to projected Arctic sea ice loss, *J. Clim.*, 28, 7824–7845.
- Wegmann, M., Y. Orsolini, M. Vázquez, L. Gimeno, R. Nieto, O. Bulygina, R. Jaiser, D. Handorf, A. Rinke, and K. Dethloff (2015), Arctic moisture source for Eurasian snow cover variations in autumn, *Environ. Res. Lett.*, 10, 054015.