

3. 北極-中緯度気候結合における成層圏過程

中 村 哲*

1. はじめに

北極域の急速な温暖化(極域増幅, Polar amplification)およびそれが中緯度気候へ及ぼす影響は近年の気候研究におけるホットトピックとなっている。特に北極海の海水後退は北極温暖化による持続的な環境変化の象徴の一つであるとともに、後退域からの熱放出による大気循環の変化が気候システムにおいて果たす役割が注目されている。

観測・再解析データに基づく分析では、夏から秋にかけての北極海の海水後退に引き続き、冬季中緯度帯での寒波の到来が増えているとの指摘がある(Francis *et al.* 2009; Overland *et al.* 2011)。一方で冬季北極域は大気力学的な内部変動が支配的であり、北極海からのローカルな熱放出がその上を流れる大気循環をどの程度変え得るのかについては、観測ベース・モデルベースの様々な研究により活発な議論が続いている(Barnes and Screen 2015; McCusker *et al.* 2016)。

さらに上空へ目を向けると、冬季北極の成層圏に存在する極渦は対流圏から上方伝播する惑星波により大きく蛇行することで成層圏突然昇温と呼ばれる現象を起こす。そのようなダイナミックな成層圏の変動は時に対流圏と鉛直結合することで冬季の対流圏循環を大きく変えることが知られている(Baldwin and Dunkerton 2001)。

我々を含むいくつかのグループの研究成果により、北極海の海水後退による影響が成層圏を経由することで冬季対流圏の気候場に影響するという新たなプロセスが提唱された。本稿では、背景となるこれまでの海水-気候研究、および成層圏の役割についての研究成

果を紹介し、それを踏まえた上で考えられる今後の北極気候変動研究の方向性について考察したい。

2. 北極の温暖化と中緯度の寒冷な冬

近年の気候変動において北極と中緯度を結びつける最も特徴的なものは、海水後退に伴う北極海域での昇温傾向と、冬季シベリアの寒冷傾向である(Warm Arctic Cold Siberia, WACS)。このようなテレコネクションが生じる理由については以下に述べるようないくつかの説明が試みられ、現実にはそれらの複合的な効果であると考えられる。

- 1) 低気圧経路の変調(Inoue *et al.* 2012)。海水後退に伴う北極海側での昇温により、低気圧経路がシベリア側から北極海側へ遷移することで、シベリア高気圧が強まる。
- 2) 定常ロスビー応答による惑星波変調(Honda *et al.* 2009)。バレンツ/カラ海の海水後退を熱源とする定常ロスビー波応答により、対流圏上部の気候学的なシベリアトラフを強め、それに伴う下層循環偏差が東シベリア付近への寒気流入を強める。
- 3) 大気内部変動が持つ固有な変動パターン(Mori *et al.* 2014)。バレンツ/カラ海域と東シベリア/東アジア域の地表面気温のシーソーパターンは大気の内部変動の固有モードであり、海水後退による熱放出はそれを効率的に駆動することができる。

また、海水後退に付随する冬季中緯度での寒冷傾向は東アジア域に限らず北欧、北米域にも見られる(第1図)。このような半球規模のスケールでの北極と中緯度の温度偏差コントラストは北極振動の負位相に対応している(Liu *et al.* 2012)。

海水後退に伴うローカルな加熱と北極振動のような

* 北海道大学大学院地球環境科学研究院。
nakamura.tetsu@ees.hokudai.ac.jp

© 2019 日本気象学会

半球スケールの変動を結びつけるものとして、成層圏対流圏結合の重要性が指摘されている。その中でキーとなる成層圏突然昇温現象とその下方影響について次節に紹介する。

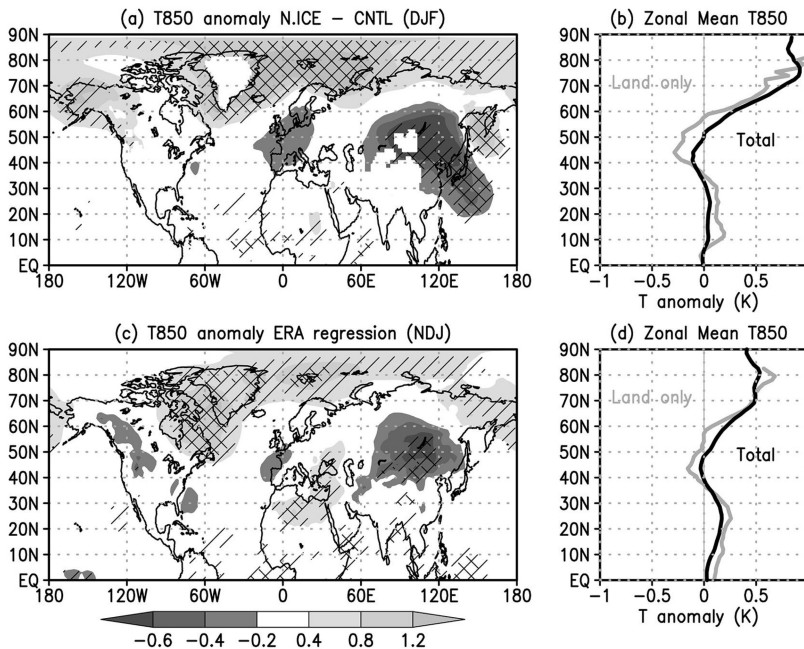
3. 成層圏突然昇温

冬季北極の成層圏で起こる突然昇温現象は、対流圏から上方伝播する惑星波と成層圏の極渦を取り巻くジェット気流の相互作用により生じ、比較的長い時間スケール（数週間から2ヶ月程度）の下方影響により、しばしば対流圏の北極振動の負位相の先行指標となることがよく知られる

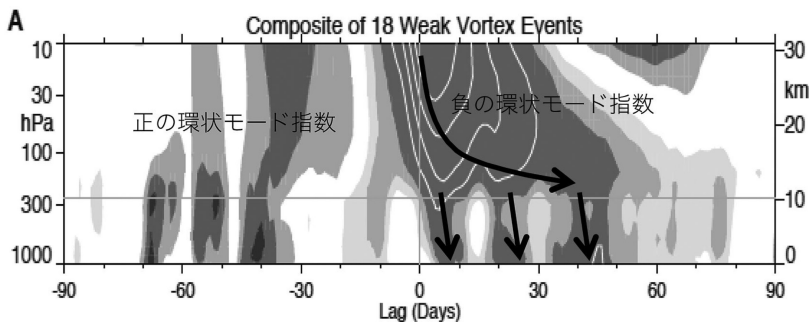
(Baldwin and Dunkerton 2001) (第2図)。成層圏内のゆっくりとした下方伝播(遅い鉛直結合)は波動平均流相互作用により説明されている(Matsuno 1971)。一方、下部成層圏と対流圏間の速い鉛直結合についてはその正確なメカニズムについては結論がでていないが、波活動によって駆動された子午面循環偏差に伴う質量再配分(Ambaum and Hoskins 2002)や対流圏上層の渦フィードバックメカニズム(Perlwitz and Harnik 2004)により結合するものと考えられる。

突然昇温の頻度には、定義による依存性があるものの、ここ30年で10年規模の変調があるとされ(Mannev *et al.* 2003; Butler *et al.* 2015)、特に90年代は頻度が少なかったのに対し、2000年以降はほぼ毎年のように突然昇温が観測されている。

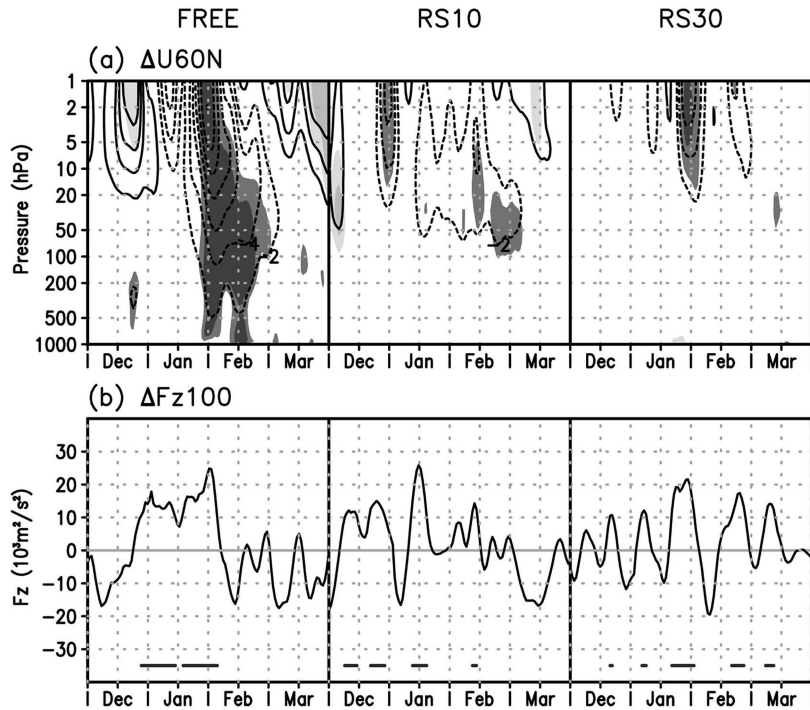
また突然昇温に伴い発生する強い子午面循環(ブリューワー・ドブソン循環の強化)は、成層圏の物質循環への影響のみならず、熱帯域の対流活動や南半球へも影響することが近年指摘されている(Kodera *et*



第1図 気候モデル (AFES4.1) でシミュレートされた海水減少少時の (a) 冬季 (12, 1, 2月) 平均の850 hPa 気温偏差 (単位 K) および (b) その帯状平均 (黒: 全球, 灰: 陸上のみ)。斜線/二重斜線は95/99%の統計的有意水準を示す。(c, d) 11月の北極海水面積に回帰した ERA interim の850 hPa 気温偏差とその帯状平均, ただし符号反転。Nakamura *et al.* (2015) より。



第2図 突然昇温時の環状モード指数合成図 (From Baldwin and Dunkerton (2001)). Reprinted with permission from AAAS). 負の偏差は極側が高気圧偏差となることを示す。成層圏を伝わる遅い鉛直結合と、下部成層圏と対流圏間の速い鉛直結合を示す矢印を追加。



第3図 気候モデルでシミュレートされた海水減少時の (a) 北緯60°の日平均東西平均東西風偏差 (単位 m/s) および (b) 北緯50–80°平均の100 hPa 鉛直波活動度フラックス偏差. 薄/濃い陰影は95/99%有意水準を示す. 成層圏をフルに表現する FREE 実験に対して, RS10実験, RS30実験はそれぞれ10, 30 hPa より上空で波動平均流相互作用の働きを人為的に弱めたもの. Nakamura *et al.* (2016) より.

al. 2011).

4. 海水後退と成層圏対流圏結合

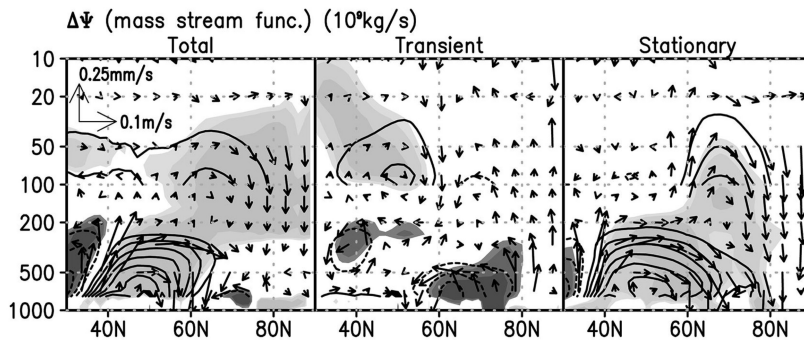
海水後退に伴う WACS パターン・負の北極振動的傾向および近年の成層圏突然昇温の頻度増加といった観測・再解析データ分析の結果や, それをサポートする気候モデルを用いた数値実験の両面から, 成層圏を経由した海水-北極振動のつながり (Stratospheric pathway) が, 提唱されている (Kim *et al.* 2014; King *et al.* 2015; Nakamura *et al.* 2015).

WACS によるシベリア域の寒冷化は気候学的な惑星波変調をもたらす. 冬季の気候学的地表面温度は北大西洋で相対的に暖かく, 東シベリアで最も寒い. WACS に伴う温度偏差はこれを強化するとともに, バレンツ/カラ海を熱源とする定常ロスビー波応答は対流圏上部のジェット気流の蛇行により, シベリア上空の気候学的なトラフを強める. 気候学的な惑星波と海水後退に伴う偏差場の干渉により特にシベリア域で

極向き渦熱輸送が強くなり, 惑星波の上方伝播が強化される. 惑星波の強化は成層圏突然昇温を引き起こし, その下方影響はしばしば対流圏の偏差と結合することで北極振動の負位相を生じる.

海水変動が気候に与える影響について成層圏の役割を直接的に評価した研究では, 観測に基づく海水偏差を境界条件に与えた気候モデルの成層圏の力学過程を人為的に弱めると, 成層圏対流圏結合が弱まり対流圏の北極振動的偏差が見られなくなる (第3図 a, Nakamura *et al.* 2016). これは海水と北極振動の連動において成層圏過程が重要な役割を果たすことを意味する. 一方で, 海水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様子が見られ (第3図 b), 成層圏過程が波活動を通した鉛直結合に対してより active に働く (Harnik 2009; Kidston *et al.* 2015) 可能性を示唆していることは興味深い.

また, 海水後退に伴う子午面循環偏差は負の北極振動卓越時や突然昇温時のそれと良く対応している (第



第4図 気候モデルでシミュレートされた海水減少時の冬季(12, 1, 2月)平均の変形オ일러平均(TEM)系残子午面循環偏差のベクトル(矢印)と質量流線関数偏差(等値線). 薄/濃い陰影は95/99%有意水準を示す. 日平均場から求めた偏差(Total)に対して, 月平均場から求めた偏差をStationary, TotalからStationaryを差し引いたものをTransientとした.

4図). これは海水後退に伴う直接的な加熱に対して, それに付随する循環場偏差は北極域の熱を中緯度へ逃す(第4図 Transient)よりはむしろ, 北極域にさらに熱を溜め込み, 極域増幅をさらに強める(第4図 Stationary)というフィードバック効果を持つことを意味する(Nakamura *et al.* 2015).

5. おわりに

以上, 紹介したように最近の北極-中緯度気候結合において成層圏過程の役割の重要性が示唆されるようになってきた. このようなプロセスは, 一部のモデル研究では非常にクリアにかつ観測事実とよく整合する形で再現される(Jaiser *et al.* 2016). 一方で近年のユーラシア大陸の寒冷な冬は海水変動よりもむしろ大気の内変動により説明されるとする研究もあり(McCusker *et al.* 2016), 外部強制としての北極温暖化の役割について活発な議論が続いている(Barnes and Screen 2015).

このような不確実性の一因として, 気候システムに内在する様々な外部強制の影響とそれらの相互作用(多圏間相互作用)を考慮する必要がある. これまでも赤道準二年振動(QBO), 熱帯海面水温(SST)変動, SST十年規模振動の極域成層圏への影響, 北大西洋SST変動や秋季ユーラシア大陸積雪偏差と北極海の海水変動との関係などが報告されている(例えばSato *et al.* 2014, Cohen *et al.* 2014). さらに本稿で言及したような海水後退に伴う大気熱輸送のフィードバック効果や成層圏対流圏結合自体に存在する複雑

なフィードバック過程, 成層圏循環を通じた南北結合なども考慮する必要がある.

現在欧米を中心に, これらの問題に対するコンセンサスを確立するため, Belmont forum/The potential of seasonal-to-decadal-scale inter-regional linkages to advance climate predictions (“InterDec” project) や Polar Amplification Model Intercomparison Project (PA-MIP)

などのマルチモデル相互比較研究プロジェクトが始動しつつあり, 日本の研究コミュニティからの貢献も大きく期待される. これまでの大気海洋, 雪氷, そして成層圏研究における日本の貢献を継続・発展させるとともに, 分野間の連携による多圏間相互作用の解明がひとつの有効な手立てになると考えられる.

参考文献

- Ambaum, M. H. P. and B. J. Hoskins, 2002: The NAO troposphere-stratosphere connection. *J. Climate*, **15**, 1969-1978.
- Baldwin, M. P. and T. J. Dunkerton, 2001: Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes. *Science*, **294**, 581-584.
- Barnes, E. A. and J. A. Screen, 2015: The impact of Arctic warming on the midlatitude jet-stream: Can it? Has it? Will it? *WIREs Clim. Change*, **6**, 277-286.
- Butler, A. H. *et al.*, 2015: Defining sudden stratospheric warmings. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **96**, 1913-1928.
- Cohen, J. *et al.*, 2014: Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. *Nature Geosci.*, **7**, 627-637.
- Francis, J. A. *et al.*, 2009: Winter Northern Hemisphere weather patterns remember summer Arctic sea-ice extent. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L07503, doi:10.1029/2009GL037274.
- Harnik, N., 2009: Observed stratospheric downward reflection and its relation to upward pulses of wave activity. *J. Geophys. Res.*, **114**, D08120, doi:10.1029/2008JD010493.

- 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.
- Inoue, J., M. Hori and K. Takaya, 2012: The role of Barents Sea ice in the wintertime cyclone track and emergence of a warm-Arctic cold-Siberian anomaly. *J. Climate*, **25**, 2561-2568.
- Jaiser, R. *et al.*, 2016: Atmospheric winter response to Arctic sea ice changes in reanalysis data and model simulations. *J. Geophys. Res.*, **121**, 7564-7577.
- Kidston, J. *et al.*, 2015: Stratospheric influence on tropospheric jet streams, storm tracks and surface weather. *Nature Geosci.*, **8**, 433-440.
- Kim, B. M. *et al.*, 2014: Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea-ice loss. *Nature Commun.*, **5**, doi:10.1038/ncomms5646.
- 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.
- Kodera, K. *et al.*, 2011: Sudden changes in the tropical stratospheric and tropospheric circulation during January 2009. *J. Meteor. Soc. Japan*, **89**, 283-90.
- Liu, J. P. *et al.*, 2012: Impact of declining Arctic sea ice on winter snowfall. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **109**, 4074-4079.
- Manney, G. L. *et al.*, 2003: Lower stratospheric temperature differences between meteorological analyses in two cold Arctic winters and their impact on polar processing studies. *J. Geophys. Res.*, **108**, 8328, doi: 10.1029/2001JD001149.
- Matsuno, T., 1971: A dynamical model of the stratospheric sudden warming. *J. Atmos. Sci.*, **28**, 1479-1494.
- 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.
- Mori, M. *et al.*, 2014 : Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades. *Nature Geosci.*, **7**, 869-873.
- Nakamura, T. *et al.*, 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.
- Nakamura, T. *et al.*, 2016: The stratospheric pathway for Arctic impacts on midlatitude climate. *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 3494-3501.
- Overland, J. E., K. R. Wood and M. Wang, 2011: Warm Arctic-cold continents: climate impacts of the newly open Arctic sea. *Polar Res.*, **30**, 15787, doi: 10.3402/polar.v30i0.15787.
- Perlwitz, J. and N. Harnik, 2004: Downward coupling between the stratosphere and troposphere: The relative roles of wave and zonal mean processes. *J. Climate*, **17**, 4902-4909.
- Sato, K., J. Inoue and M. Watanabe, 2014 : Influence of the Gulf Stream on the Barents Sea ice retreat and Eurasian coldness during early winter, *Environ. Res. Lett.*, **9**, 084009, doi:10.1088/1748-9326/9/8/084009.