

## 北極域海氷域変動の成層圏対流圏結合系への影響

星一平<sup>1</sup>、浮田甚郎<sup>1</sup>、本田明治<sup>1</sup>、岩本勉之<sup>1,2,3</sup>、中村哲<sup>2,4</sup>、山崎孝治<sup>2,4</sup><sup>1</sup>新潟大学<sup>2</sup>国立極地研究所<sup>3</sup>紋別市役所<sup>4</sup>北海道大学

1979年に衛星での定常観測が始まって以降、北極域では海氷域減少が顕著である。この結果、Arctic Oscillation (AO) と North Atlantic Oscillation (NAO) が負の傾向となり、北半球中緯度の低温化に寄与していることが知られている (Nakamura et al., 2015)。この形成要因の一つには、対流圏からの惑星波上方伝播の強化、成層圏での波砕 (収束) による極渦の弱化、そのシグナルの下方伝播という、成層圏を介した応答が挙げられる。さらに、特に Barents-Kara (BK) 海の水氷域減少がこのプロセスには重要であることも指摘されている (Kim et al., 2014)。しかし、この惑星波の上方伝播がどのような力学メカニズムで強化されたのかは明らかになっていない。そこで本研究では数値実験と再解析データから、惑星波の上方伝播強化における力学過程と、その時空間構造を調べた。

本研究に使用した数値実験結果は、GRENE 北極気候変動プロジェクトによって実施されたものである (実験設定の詳細は Nakamura et al., 2015)。大気大循環モデル AGCM for the Earth Simulator (AFES, Ohfuchi et al., 2004) を用い、成層圏全層を再現するためにモデル上端を約 60km としている。北半球海氷域の境界条件のみが一年を通して異なる 2 つのラン (CNTL : 1979-83 平均、NICE : 2005-09 平均) をスピナップの後に 60 年間走らせ、近年の水氷域変動に伴う大気循環場の応答に着目するために偏差をとって解析を行った (NICE-CNTL)。

冬季における応答の季節内進行として、1月の成層圏中・上層で現れた北極域の高気圧性偏差 (図 1a) が時間と共に下方伝播することで、2月対流圏の負 AO/NAO パターン形成に寄与していた (図は省略)。また 1月においては、BK 海上の高気圧性偏差からシベリア上の低気圧性偏差への定常ロスビー波の伝播が対流圏において見られ (図 1b)、さらに成層圏北極域の高気圧性偏差へ上向き・北東方向への伝播が見られた (図 1ac)。この特徴的な定常ロスビー波の伝播に伴い発生した成層圏上層での高気圧性偏差 (周辺の東風偏差と対応) について、その形成された要因を調べるために極向き擾乱熱輸送  $V^*T^*$  ( $V$ : 南北風速、 $T$ : 気温、 $*$ : 各緯度での東西平均差) を 100hPa 面で見積もった。その  $40^\circ\text{N}$  以北での領域平均値において、1月に顕著な正偏差が見られ、成層圏中・上層での東西一様な東風偏差の形成と力学的に整合的であった。また、その水平分布としては BK 海域と北太平洋域であり (図 2a)、気候平均場の強化と対応していた。

そこで、両領域での正偏差形成要因を明らかにするために、Nishii et al. (2009) による手法を用いて  $V^*T^*$  偏差を以下のように線形的に分解した。

$$[V^*T^*]_{\text{NICE-CNTL}} = [V_a^*T_c^*] + [V_c^*T_a^*] + [V_a^*T_a^*]_a$$

ここで、c は基本場 (CNTL)、a は海氷域減少に伴う偏差 (NICE-CNTL)、 $[\ ]$  は 60 年平均とした。また、右辺第 3 項 (非線形項) は偏差場による熱輸送を、第 1、2 項 (線形項) は偏差場と気候平均場による熱輸送を意味する。正の  $V^*T^*$  偏差が顕著である BK 海域を  $50\text{-}90^\circ\text{E}$ ,  $50\text{-}80^\circ\text{N}$ 、北太平洋域を  $140^\circ\text{E}\text{-}160^\circ\text{W}$ ,  $50\text{-}80^\circ\text{N}$  と定義し、

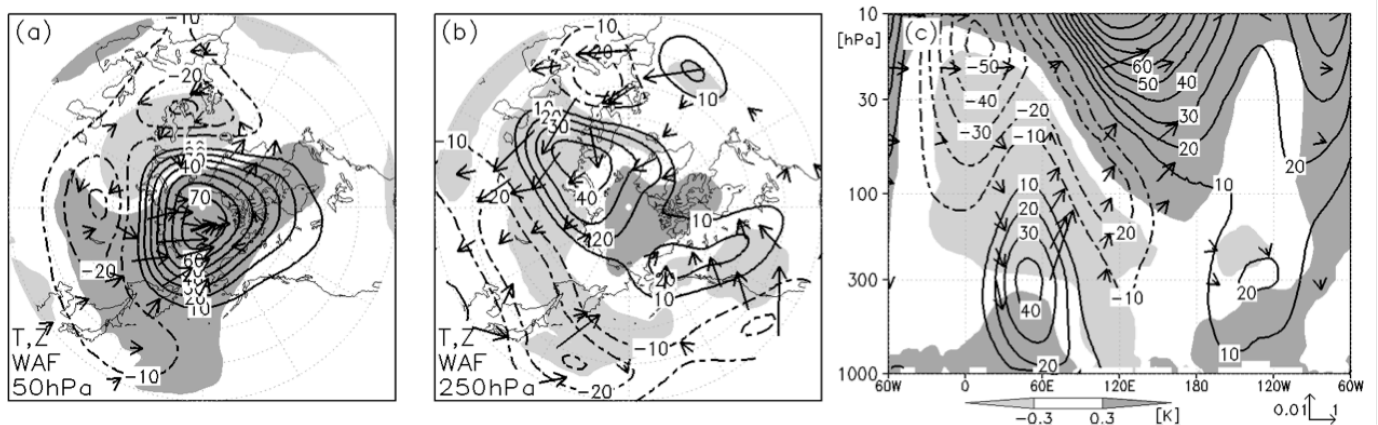


図 1 数値実験における 1 月の気温偏差 (色, K) とジオポテンシャル高度偏差 (線, m) の (a) 50hPa、(b) 250hPa の水平面図と、(c)  $60^\circ\text{N}$  における高度-経度断面図。矢印は Takaya and Nakamura (2001) による定常ロスビー波の活動度フラックス (矢,  $\text{m}^2\text{s}^{-2}$ ) を示し、(a-b) においてはその水平成分を、(c) においては鉛直-東西成分を示す。

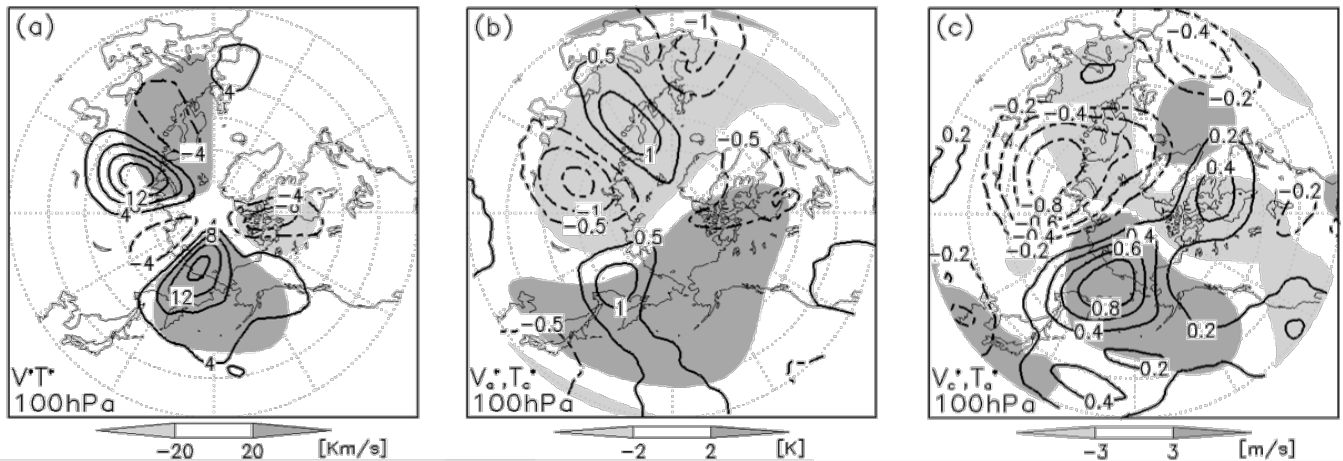


図2 数値実験における1月100hPa面での(a)極向き擾乱熱輸送 $V^*T^*$  ( $\text{Kms}^{-1}$ )の偏差(線)と気候値(色)、(b)南北風偏差 $V_a^*$ (線、m/s)と気候平均場の気温 $T_c^*$ (色、K)、(c)気温偏差 $T_a^*$ (線)と気候平均場の南北風 $V_c^*$ (色)。\*は東西平均差を示す。

線形的に分解した各項の寄与率を見積もった。BK海域に置いては、右辺第一項、第二項、第三項の寄与がそれぞれ59、8、33%であり、北太平洋域ではそれぞれ23、58、19%であった。つまり、BK海域では $[V_a^*T_c^*]$ 項、北太平洋域では $[V_c^*T_a^*]$ 項が約6割を占め、非線形項である $[V_a^*T_a^*]$ 項の寄与は副次的であった。

$V^*T^*$ 正偏差形成に強く寄与していたそれぞれ線形項について、次にその形成メカニズムを調べた。BK海域において $[V_a^*T_c^*]$ 項は、気候平均場の低温域に北風偏差が分布することで形成されていることがわかる(図2b)。風偏差は高度偏差に対応して形成されるが、この北風偏差とスカンジナビア半島上の南風偏差(図2b)はその間に分布する高気圧性循環、つまり、BK海での海氷域減少により形成される高気圧性偏差が成層圏中層まで卓越することに対応している(図1c)。対して北太平洋域の $[V_c^*T_a^*]$ 項形成については、気候平均場の南風領域に高温偏差が分布することで形成されていることがわかる(図2c)。この高温偏差は高気圧性偏差を伴って北太平洋域の成層圏全層で卓越しており(図1c)、BK海上の高気圧性偏差からシベリア上の低気圧性偏差を介して成層圏へ伝播する定常ロスビー波応答により形成・強化されていた。これは偏差場の傾圧的構造とも整合的である。つまり、この定常ロスビー波列の成層圏への伝播によって偏差場が形成され、その結果、BK海域・北太平洋域において偏差場と気候平均場の相互作用により $V^*T^*$ が増加した事で極渦の弱化をもたらした事が分かった。

以上の結果について観測データとの比較も行った。大気へのインパクトの大きい初冬におけるBK海域の海氷域変動に着目し、11、12月平均したBK海( $15\text{-}90^\circ\text{E}$ ,  $70\text{-}85^\circ\text{N}$ )で領域平均した海氷密接度の時系列に、続く冬の大気場を線形回帰した(両者のトレンド除去後)。解析期間は1979年から2015年とした。その結果、応答の一連の季節内進行だけでなく、 $V^*T^*$ 偏差を線形的に分解した各項の分布と形成要因についても非常に整合的な結果を得た。よって本研究により、海氷域の減少に伴う惑星波上方伝播の強化プロセスが強く示唆された。

## References

- Kim, B.-M., S.-W. Son, S.-K. Min, J.-H. Jeong, S.-J. Kim, X. Zhang, T. Shim, and H.-J. Yoon (2014), Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea-ice loss. *Nat Commun*, doi:10.1038/ncomms5646.
- Nishii, K., H. Nakamura, and T. Miyasaka (2009), Modulations in the planetary wave field induced by upward-propagating Rossby wave packets prior to stratospheric sudden warming events: A case study, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 135, 39–52.
- 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.*, 120, 3209–3227.
- Ohfuchi, W., H. Nakamura, M. K. Yoshioka, T. Enomoto, K. Takaya, X. Peng, S. Yamane, T. Nishimura, Y. Kurihara, and K. Ninomiya (2004), 10-km mesh meso-scale resolving simulations of the global atmosphere on the Earth Simulator—Preliminary outcomes of AFES (AGCM for the Earth Simulator), *J. Earth Simulator*, 1, 8–34.