

南半球傾圧環状モード変動に対する中緯度海洋前線の影響

課題責任者

中村 尚 東京大学 先端科学技術研究センター

中村 尚*¹, 中山 盛雄*¹, 小川 史明*², 西井 和晃*³, 田口 文明*⁴

*¹ 東京大学 先端科学技術研究センター, *² 北海道大学 大学院理学研究院, *³ 三重大学 大学院生物資源学研究所, *⁴ 富山大学 都市デザイン学部

近年、中緯度での顕著な海面水温 (SST) 勾配を伴う中緯度海洋前線が、中高緯度大気に能動的な影響を与えることが明らかになってきている。本研究では、中高緯度の擾乱活動に卓越し、その半球規模での強弱を表す長周期変動である傾圧環状モード変動 (BAM) に対して、中緯度海洋前線が与え得る影響を、大気大循環モデルに東西一様な SST 分布を与えた「水惑星実験」を通して評価した。海洋前線を含む現実的な SST 分布を与えた実験は、理想化実験ではあるものの、南半球で観測される BAM の構造や振幅、及び傾圧性擾乱の典型的なライフサイクルによって解釈される時間発展を良く捉えていた。一方、海洋前線を人為的に除去した SST 分布を与えた実験では、典型的な時間発展等の BAM の特徴は定性的に再現されたものの、BAM に伴う変動の振幅が大幅に弱まり、またその活動中心緯度が赤道向きに変位した。これらの結果から、BAM が本質的には大気内部の力学によって駆動される変動であることが示唆された一方で、中緯度海洋前線は、近傍で移動性擾乱活動を活発化させることを通じて、BAM を大幅に増幅し、その活動中心緯度を前線近傍に固定することが初めて明らかとなった。実際、BAM の擾乱活動が強まる位相において、海洋からの顕熱 flux の変動が地表付近の南北気温勾配を維持して移動性擾乱活動を活発化させるように働くことで BAM を増幅させることが見出され、この効果が海洋前線近傍で最も強力に働くことが確認された。

キーワード : Storm-track, ocean front, annular mode, air-sea interaction

1. はじめに

中緯度で頻繁に発達・東進する移動性高低気圧擾乱は、日々の天気変化をもたらすだけでなく、熱や運動量、水蒸気の南北への輸送を通じて気候系の形成・維持において重要な役割を持つ。その活動は中緯度海洋上で最も活発で「ストームトラック」を形成している。近年、中緯度海洋前線に伴う顕著な海面水温 (SST) 勾配が、移動性擾乱の繰り返し発達を促すことでストームトラックや、その活動によって維持される極前線ジェット気流の形成・維持に寄与することが明らかとなった (e.g., Nakamura et al. 2004, 2008)。さらに最近では、海洋前線が、これら中緯度大気への影響を通じて、極前線ジェット気流の南北変位を表す長周期変動である南半球環状モード変動 (southern annular mode; SAM, Thompson and Wallace 2000) の構造や振幅にも大きく影響することが指摘された (Sampe et al. 2013; Ogawa et al. 2016)。

本研究では、近年発見された別の長周期変動である「傾圧環状モード変動」(baroclinic annular mode; BAM) に着目する。BAM は中緯度ストームトラック活動の卓越変動として抽出され、その半球規模での強弱を表す (Thompson and Woodworth 2014; 以下 TW14 と表記)。海がちな南半球において特に明瞭に見られ (Thompson and Li 2014)、広域での降水量偏差を伴う (Thompson and Barnes 2014) 等、地表天候への影響も指摘されている。興味深いことに、BAM は約 25 日の準周期性を示す、東西風速の変動に対する寄与が相対的に小さいなどの特徴を持ち、それらは同じく中緯度域で卓越する SAM のそれと明確に区別される

(TW14)。実際、BAM と SAM は時間的に殆ど相関を持たないことが指摘されている (TW14)。しかし、研究の歴史が浅く、その力学は解明途上である。それでも、その力学の本質は中緯度域を伝播する移動性擾乱活動にあるとする研究が複数存在しており (e.g., Thompson et al. 2017)、それらに影響する中緯度海洋前線の存在が無視できないと考えられる。そこで本研究では、中緯度海洋前線が BAM に与える影響を評価することを目的とする。これまで見過ごされてきた海洋前線からの影響を考慮することで、観測される BAM の性質をより包括的に理解することを目指す。本研究の更なる詳細については、Nakayama et al. (2021) を参照されたい。

2. モデル実験と解析手法

大気大循環モデル AFES (Kuwano-Yoshida et al. 2010) の下方境界にて陸を排し、東西一様な SST 分布を与えた「水惑星実験」の出力データを解析した。T79L56 版 (水平 150 km 格子相当) を用いた実験であり、海洋前線の影響を十分解像可能である。水惑星実験では、海がちな南半球を模した状況が再現される上、境界条件の東西非一様性に起因する停滞性感星波の影響が抑制される為、BAM の力学の本質部分の解析に適している。

実験は、Ogawa et al. (2012, 2016) と同じである。「標準 (CTL) 実験」では、衛星観測データ NOAA-OISST (Reynolds et al. 2007) に基づく南インド洋の SST 気候値 (図 1 黒線) が与えられた。モデル南半球には冬季分布が、モデル北半球には夏季分布が南北反転させた上で与えら

れている。海洋前線は季節問わず緯度 45° に位置する。太陽放射はモデル南半球の冬至の条件で固定である。一方、「前線なし (NF) 実験」では、亜寒帯域の SST のみを人為的に高めることで海洋前線が除去されている (図 1 青線)。この際、海洋前線より低緯度側の SST を不変とすることで、亜熱帯地方の大気循環の変調が BAM に影響することを防いでいる。解析期間は 3600 日で、これは夏季・冬季それぞれ 40 年分に相当する。以下では紙面の都合上、夏半球での結果を扱うが、冬半球においても結果は定性的に同様であった。以下、気候平均値は全期間での平均値、偏差は気候平均値からのずれとして定義する。

BAM は東西平均した移動性擾乱に伴う運動エネルギー (eddy kinetic energy; EKE) 偏差の中高緯度対流圏 [925~200 hPa, 緯度 20~70°] における第 1 EOF として半球ごとにそれぞれ同定した。以下、標準偏差を 1 に規格化した主成分時系列を「BAM 指数」と定義する。なお、東西平均からのずれで定義される擾乱成分を解析した BAM に関する先行研究 (e.g., TW14) と異なり、本研究では、周期 8 日以下の移動性擾乱成分に着目することで、典型的な傾圧性擾乱の活動が BAM に与える寄与を明確にする。

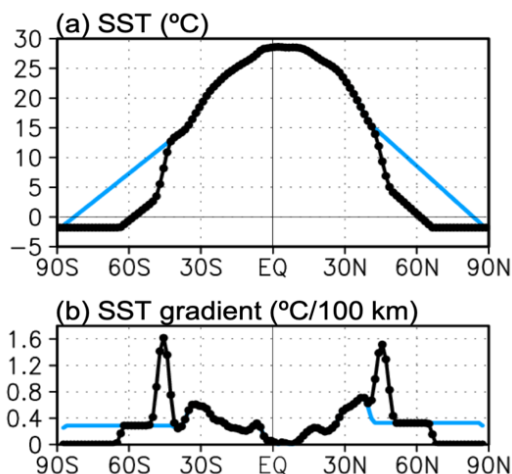


図 1 : AFES の下部境界に東西一様に与えられた (a) SST 分布 (°C) と (b) その南北勾配 (°C/100 km)。CTL 実験用 (黒) と NF 実験用 (青)。

3. 結果

水惑星実験における BAM に伴う変動を、BAM 指数に線形回帰した偏差 (以下、BAM 偏差と表記) として評価した。図 2 上段に、両実験の夏半球における BAM 偏差を、東西平均した EKE (線)、及び極向き擾乱熱 flux (色) について示す。これらの量はストームトラック活動の指標となる。また、図 2 下段は同じ量の気候平均場を示す。

理想化条件下にも関わらず、現実的な海洋前線を与えた CTL 実験 (図 2a,c) は、南半球での観測結果の特徴 (図略) をよく捉えていた。BAM 偏差の分布は、対応する気候平均場の分布とよく一致していることから、ストームトラック活動の強弱を表す (TW14 等と整合)。BAM 指数

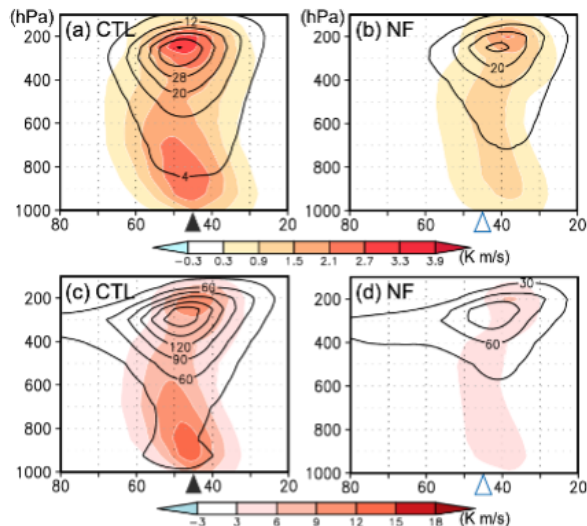


図 2 : (上段) BAM 指数に回帰した移動性擾乱に伴う EKE (線, m^2/s^2) と極向き熱 flux (色, $K \cdot m/s$)。 (下段) 同じ変数の気候平均場。左 (右) 列は CTL (NF) 実験の夏半球で得られた結果を示す。東西平均した場を子午面に描いている。▲は中緯度海洋前線の緯度。

の 1 標準偏差あたり、気候平均値の約 25% の強弱である。ストームトラック活動、及びその BAM 偏差のピークは、海洋前線 (緯度 45°) 近傍に存在する。

NF 実験でも BAM はストームトラック活動の強弱を表す (図 2b,d)。しかし、CTL 実験と比べ、ストームトラック活動の気候平均値・BAM 偏差のピークの緯度が、7° 程度赤道寄りに変位した。さらに、対流圏上層の EKE 偏差で約 30%、下層の極向き擾乱熱 flux 偏差では約 60% に及ぶ大幅な弱化が見られた。これらの結果は、中緯度海洋前線が近傍でストームトラック活動を増幅する (Nakamura et al. 2004, 2008) ことを通じて、BAM をも増幅し、その活動緯度を前線近傍に固定することを示唆する。

両実験における BAM の力学をより理解するために、BAM 偏差の時間発展を BAM 指数に対するラグ回帰偏差を通じて解析した。図 3 左列に CTL 実験夏半球における結果を示す。定義より、対流圏上層の EKE 偏差は、BAM 指数と同時に最大となる (図 3c)。一方、対流圏下層の極向き擾乱熱 flux 偏差は BAM 指数に約 1 日先行 (図 3a)、対流圏上層の極向き擾乱西風運動量 flux 偏差は約 1 日遅れており (図 3e)、その後西風風速偏差の最大が現れる (図 3g,i)。このような時間発展は、傾圧性擾乱の典型的なライフサイクルから解釈可能である。なお、同様の時間発展は、現実の南半球においても確認される (図略)。また、各偏差が大幅に弱化しているものの、NF 実験でも定性的に同様な時間発展が見られた (図 3 右列)。これは、BAM が中高緯度大気の内力学に元々備わった現象であることを示唆する。実際、先行研究で指摘された BAM の準周期的な振る舞い等、観測される BAM の主要な特徴は NF 実験でも確認された (図略)。なお、西風風速の BAM 偏差 (図 3g, h) は極前線ジェット気流の南北変位に対応するも

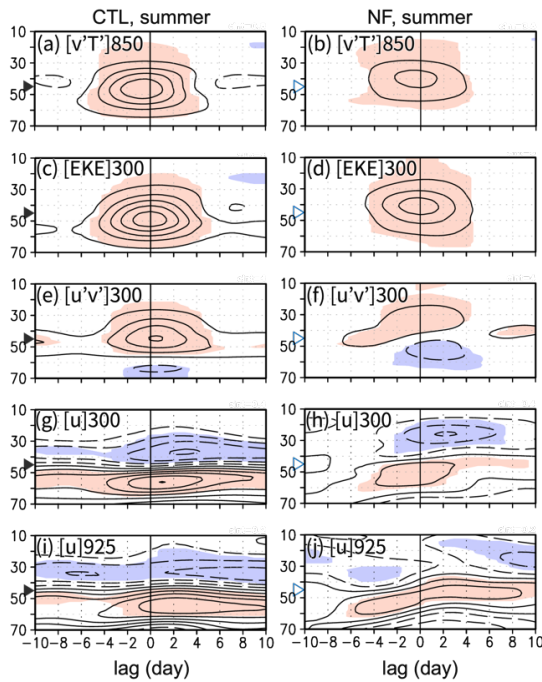


図3 : BAM 指数に対するラグ回帰偏差。縦軸は緯度 (°) で下側が高緯度。横軸は BAM 指数に対するラグ (日) で、正のラグに向かって BAM が時間発展する。(a,b): 850 hPa 極向き擾乱熱 flux ($K \cdot m/s$), (c,d): 300 hPa EKE (m^2/s^2), (e,f): 300 hPa 極向き擾乱西風運動量 flux (m^2/s^2), (g,h): 300 hPa 西風風速 (m/s), (i,j) 925 hPa 西風風速 (m/s) の各偏差について示した。左 (右) 列に CTL (NF) 実験夏半球の結果を示す。赤 (青) 色は正 (負) 相関が 95% 有意な領域。▶は中緯度海洋前線の緯度。

のであり、SAM に伴う西風風速偏差と大きな射影を持つ。これは、BAM が SAM の維持を助ける働きをしていることを示唆する。実際、BAM と SAM の時系列の間には、弱いながら統計的に有意な相関が確認された (図略)。このような西風風速偏差は、短周期の移動性擾乱活動の寄与を抽出することで、本研究が初めて指摘したものである。

では、海洋前線はどのように BAM に影響を与えるのだろうか。図 4a, c に CTL 実験夏半球における地表付近の気温偏差、及び海洋から大気への顕熱 flux 偏差の時間発展をそれぞれ示す。CTL 実験において、BAM の正位相では、極向き擾乱熱 flux の増大 (図 3a) に整合して、南北気温勾配が減少する (図 4a)。この時、顕熱 flux 偏差は気温偏差を緩和し、南北気温勾配を回復することを通じて、活発な擾乱活動を維持する働きをしている (図 4c)。この回復作用は、海洋前線付近で最も強く現れている。さらに、NF 実験では CTL 実験に比べ、顕熱 flux 偏差を含む各偏差が 50% 以上の大幅な弱화를示した (図 4 右列)。以上より、中緯度海洋前線による BAM の増幅、及び活動中心緯度の固定は、顕熱 flux 偏差を通した南北気温勾配の回復作用が海洋前線近傍で強化されることと関連づけられる。

一方、水蒸気過程に関連する BAM 偏差も、BAM の力

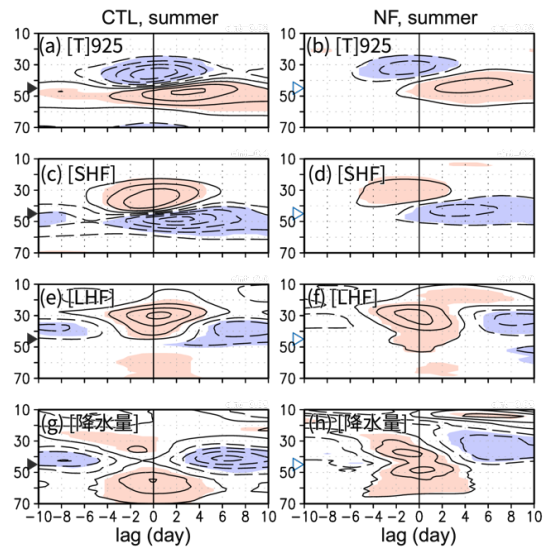


図4 : 図3 と同様。但し (a,b) 925 hPa 気温 ($^{\circ}C$), (c,d) 海洋から大気への顕熱 flux (W/m^2), (e,f) 海洋から大気への潜熱 flux (W/m^2), (g,h) 降水量 (mm/day) の各偏差について示した。

学に関わると考えられる。図 4e, g には、CTL 実験夏半球における海洋から大気への潜熱 flux (=海面からの蒸発) 偏差、及び降水量偏差の時間発展をそれぞれ示す。BAM の正位相では、海洋からの潜熱 flux が海洋前線の低緯度側の亜熱帯域において増大する (図 4e)。これは、ストームトラック活動の強化に伴い、地表風速が強まること、また、高緯度側からの乾燥した空気の流入が活発化することが要因と考えられる。この潜熱 flux 偏差は、中緯度での降水量 (→凝結加熱) の増大 (図 4g) を通じて、ストームトラック活動の更なる活発化に寄与する可能性がある。実際、BAM 正位相時に亜熱帯から中緯度への擾乱水蒸気 flux の増大が見られる (図略)。

定性的に同様な潜熱 flux、及び降水量の BAM 偏差は NF 実験でも見られる (図 4f, h)。そして、ストームトラック活動における偏差が大幅に弱化したにも関わらず、それらの振幅は CTL 実験とほぼ同等である。これは、NF 実験では海洋前線より高緯度側の SST が CTL 実験より大幅に高い (図 1) ことが要因と考えられる。このような NF 実験での高い SST は、水蒸気量や降水量を増加させるため、BAM を増幅させる方向の強制であると考えられるが、それでも CTL 実験に比べ BAM が大幅に弱化している。これらの結果から、上で述べた顕熱 flux による南北気温勾配の回復作用の海洋前線近傍での強化が、海洋前線による BAM の増幅に寄与することが強く示唆される。

4. まとめ

本研究は、海洋前線あり・なしの水惑星実験における BAM を比較することで、海洋前線が BAM の構造や振幅に重大な影響を与えることを初めて見出した。海洋前線は、近傍で南北気温勾配を効果的に維持し、移動性擾乱活動を活発化させることを通じて、BAM をも増幅させ、そ

の活動中心緯度を固定する働きを持つことが分かった。

これらは、海洋からの影響を考慮した BAM の力学に関するより深い包括的な理解に繋がる結果である。また、本研究は、先行研究に引き続いて (e.g. Ogawa et al. 2016), 海洋前線が中高緯度大気に内在する変動現象にも多大な影響を与えることを示唆する。大気循環モデルを用いた気候研究や気候予測において、海洋前線からの影響を考慮することは極めて重要である。

謝辞

本研究は、文部科学省 (MEXT) の ArCS Program, 及び科学技術振興機構 (JST) の Belmont Forum 国際共同研究事業 InterDec, 日本学術振興会科学研究費助成事業 新学術領域 19H05701, JP19H05702 の援助を受けた。

文献

- [1] Kuwano-Yoshida, A., T. Enomoto, and W. Ohfuchi, 2010: An improved PDF cloud scheme for climate simulations. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **136**, 1583–1597.
- [2] Nakamura, H., T. Sampe, Y. Tanimoto, and A. Shimpo, 2004: Observed associations among storm tracks, jet streams and midlatitude oceanic fronts. Earth's Climate. *The Ocean–Atmosphere Interaction, Geophys. Monogr.*, Vol. 147, Amer. Geophys. Union, 329–345.
- [3] Nakamura, H., T. Sampe, A. Goto, W. Ohfuchi, and S.-P. Xie, 2008: On the importance of midlatitude oceanic frontal zones for the mean state and dominant variability in the tropospheric circulation. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L15709.
- [4] Nakayama, M., H. Nakamura, and F. Ogawa 2021: Impacts of a Midlatitude Oceanic Frontal Zone for the Baroclinic Annular Mode in the Southern Hemisphere, *J. Climate*, **34**, 7389–7408.
- [5] Ogawa, F., H. Nakamura, K. Nishii, T. Miyasaka, and A. Kuwano-Yoshida, 2012: Dependence of the climatological axial latitudes of the tropospheric westerlies and storm tracks on the latitude of an extratropical oceanic front. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L05804, doi:10.1029/2011GL049922.
- [6] Ogawa, F., H. Nakamura, K. Nishii, T. Miyasaka and A. Kuwano-Yoshida, 2016: Importance of midlatitude oceanic frontal zones for the annular mode variability: Interbasin differences in the southern annular mode signature. *J. Climate*, **29**, 6179–6199.
- [7] Reynolds, R. W., T. M. Smith, C. Liu, D. B. Chelton, K. S. Casey, and M. G. Schlax, 2007: Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. *J. Climate*, **20**, 5473–5496.
- [8] Sampe, T., H. Nakamura, and A. Goto, 2013: Potential influence of a midlatitude oceanic frontal zone on the annular variability in the extratropical atmosphere as revealed by aquaplanet experiments. *J. Meteor. Soc. Japan*, **91A**, 243–267.
- [9] Thompson, D. W. J., and E. A. Barnes, 2014: Periodic variability in the large-scale Southern Hemisphere atmospheric circulation. *Science*, **343**, 641–645,
- [10] Thompson, D. W. J., B. R. Crow, and E. A. Barnes, 2017: Intraseasonal periodicity in the Southern Hemisphere circulation on regional spatial scales. *J. Atmos. Sci.*, **74**, 865–877.
- [11] Thompson, D. W. J. and Y. Li, 2015: Baroclinic and barotropic annular variability in the Northern Hemisphere. *J. Atmos. Sci.*, **72(3)**, 1117–1136.
- [12] Thompson, D. W. J., and J. M. Wallace, 2000: Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. *J. Climate*, **13**, 1000–1016.
- [13] Thompson, D. W. J., and J. D. Woodworth, 2014: Barotropic and baroclinic annular variability in the Southern Hemisphere. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 1480–1493.

Impacts of a Midlatitude Oceanic Frontal Zone for the Baroclinic Annular Mode in the Southern Hemisphere

Project Representative

Hisashi Nakamura Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo

Authors

Morio Nakayama *¹, Fumiaki Ogawa *², Kazuaki Nishii *³, Bunmei Taguchi *⁴

*¹Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo, *²Graduate School of Science, Hokkaido University, *³Graduate School of Bioresources, Mie University, *⁴Faculty of Sustainable Design, University of Toyama

As a major mode of annular variability in the Southern Hemisphere, the baroclinic annular mode (BAM) represents the hemispheric-scale pulsing of extratropical eddy activity. Focusing mainly on sub-weekly disturbances, this study assesses the impacts of a midlatitude oceanic frontal zone on the BAM and its dynamics through a set of “aqua-planet” atmospheric general circulation model experiments with zonally-uniform sea-surface temperature (SST) profiles prescribed. Though idealized, one experiment with realistic frontal SST gradient reasonably well reproduces observed BAM-associated anomalies as a manifestation of a typical lifecycle of migratory baroclinic disturbances. Qualitatively, these BAM features are also simulated in the other experiment where the frontal SST gradient is artificially removed. However, the BAM-associated variability weakens markedly and shifts equatorward, in association with the corresponding modifications in the climatological-mean storm-track activity. The midlatitude oceanic frontal zone thus amplifies and anchors the BAM variability by restoring near-surface baroclinicity through anomalous sensible heat supply from the ocean and moisture supply to cyclones, although the BAM is essentially a manifestation of atmospheric internal dynamics.

Keywords : Storm-track, ocean front, annular mode, air-sea interaction

1. Introduction

Eastward-moving synoptic cyclones and anticyclones yield day-to-day weather variations in midlatitudes. In addition, these transient disturbances are an important component for the climate system as they systematically transport heat, momentum and moisture meridionally. Recently, a midlatitude oceanic frontal zone, characterized by tight gradients of sea-surface temperature (SST) as the confluence of warm and cold ocean currents, is found important for recurrent development of transient disturbances. An oceanic frontal zone thus not only contributes to the formation and maintenance of a midlatitude storm-track and eddy-driven polar-front jet (PFJ)^[1,2] but also influences the structure and amplitude of the Southern Annular Mode (SAM)^[3,4], which represents meridional wobbling of the PFJ.

A recent study^[5] postulated that the leading mode of variability in extratropical eddy activity represents its hemispheric-scale pulsing. This “baroclinic annular mode (BAM)” is particularly evident in the Southern Hemisphere and characterized by quasi-periodicity at 20–25 days^[5]. Although many aspects of the dynamics of the BAM have not been fully understood, several studies pointed out that its essence seems to lie in the dynamics of migratory transient disturbances^[e.g., 6], which suggests non-negligible impacts from an underlying oceanic frontal zone. To verify this, the present study assesses the impacts of an oceanic frontal zone on the BAM. More details of this study are presented in Nakayama et al. (2021)^[7].

2. Methods

As in Ogawa et al. (2016)^[4], we analyze the output of “aqua-planet” experiments conducted with the atmospheric general circulation model (AGCM) for Earth Simulator (AFES). The model has horizontal resolution of T79 (~150 km grid intervals) and 56 vertical levels up to 0.09 hPa. As a model lower-boundary condition for the experiments, zonally-uniform SST profiles are prescribed perpetually with no landmass and sea ice. The meridional SST profile prescribed in the control (CTL) experiment is based on the climatological-mean SST over the South Indian Ocean, which is characterized by oceanic frontal zones at 45° latitude. In the non-front (NF) experiment, by contrast, the frontal SST gradient is artificially relaxed by raising the SST poleward of 45°. The model was integrated for 120 months after 6 months for spin-up.

In this study, fluctuations of a given variable associated with sub-weekly transient eddies are extracted with a high-pass filter with a cut-off period of 8 days. The BAM is defined as the first empirical orthogonal function (EOF) of low-frequency variability in zonally-averaged transient eddy kinetic energy (EKE). The normalized principal component (PC) time series corresponding to the first EOF is defined as a “BAM index”.

3. Results

In the CTL experiment, the BAM represents the pulsing of the storm-track activity. Specifically, BAM-associated anomalies of

zonal-mean EKE and poleward eddy heat flux exhibit meridionally monopole structure which overall corresponds to those of their climatological means. These anomalies peak at the latitude of the oceanic frontal zone or slightly poleward, corresponding to the peak latitude of the climatological-mean storm-track activity.

The NF experiment also simulates the BAM, representing the pulsing of storm-track activity. However, both the BAM-associated anomalies of EKE and poleward eddy heat flux are reduced by 30–60% from their counterpart in the CTL experiment. In addition, the peaks of these BAM-associated anomalies are shifted equatorward by $\sim 7^\circ$.

The lag-regression analyses onto the BAM index indicate that the entire evolution of the BAM signature corresponds to a typical lifecycle of baroclinic disturbances. Specifically, BAM-associated anomalies of poleward eddy heat and westerly momentum flux maximize ~ 1 day before and after the peak of the EKE anomaly, respectively. Virtually the same lead-lag relationship is found in the NF experiment, although the corresponding anomalies are substantially weaker and displaced equatorward. These results suggest that the BAM is essentially a manifestation of atmospheric internal dynamics, while the oceanic frontal zone significantly amplifies and thereby anchors the BAM variability.

The influence of the oceanic frontal zones on the BAM can be highlighted in the associated heat exchanges with the underlying ocean. In the positive phase of the BAM, the anomaly of zonal-mean near-surface temperature is negative in the subtropics and positive in midlatitudes, which reflects the enhanced poleward eddy heat flux associated with the positive BAM. Meanwhile, the anomalous sensible heat flux (SHF) from the ocean is downward and of the warmer and cooler sides, respectively, of the oceanic front, acting to restore the meridional gradient of near-surface temperature (i.e., baroclinicity). In the CTL experiment, this restoration effect (i.e., meridional gradient of SHF anomaly) is the strongest along the oceanic frontal zone. In the NF experiment, however, this restoration effect maximizes at $\sim 38^\circ$ and weakens by $\sim 65\%$ relative to the CTL experiment. This suggests that the enhanced anomalous SHF in the presence of the oceanic frontal zone allows the effective restoration of near-surface baroclinicity for recurrent development of baroclinic disturbances and thereby maintains enhanced storm-track activity during the positive phase of the BAM.

4. Conclusions

This study firstly suggests the significant impacts of a midlatitude oceanic frontal zone on the structure and amplitude of the BAM. The oceanic frontal zone acts to maintain the near-surface baroclinicity efficiently and thereby energizes transient disturbances, through which the BAM variability is amplified and anchored. This study leads to a deeper and more comprehensive understanding of the BAM dynamics, including

the influence of the ocean. In addition, following Ogawa et al. (2016)^[4], this study suggests that the oceanic frontal zone largely influences major variability in the extratropical atmosphere, suggesting the importance of the influence of an oceanic frontal zone in discussing not only the climatological-mean atmospheric circulation and storm-track activity but also their variability.

Acknowledgement

This study is supported in part by the Japanese Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) through the Arctic Challenge for Sustainability II (ArCS-II) Program, by the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) through Grants-in-Aid for Scientific Research JP19H05702 (on Innovative Areas 6102), JP18H01278 and 20H01970, by the Japanese Ministry of Environment through the Environment Research and Technology Development Fund JPMEERF20192004 and by the Japan Science and Technology Agency through Belmont Forum CRA “InterDec” and COI-NEXT JPMJPF2013.

References

- [1] Nakamura, H., T. Sampe, Y. Tanimoto, and A. Shimpo, “Observed associations among storm tracks, jet streams and midlatitude oceanic fronts”, *Earth’s Climate. The Ocean–Atmosphere Interaction, Geophys. Monogr.*, Vol. 147, Amer. Geophys. Union, 329–345, 2004.
- [2] Nakamura, H., T. Sampe, A. Goto, W. Ohfuchi, and S.-P. Xie, “On the importance of midlatitude oceanic frontal zones for the mean state and dominant variability in the tropospheric circulation”, *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L15709, 2008.
- [3] Sampe, T., H. Nakamura, and A. Goto, “Potential influence of a midlatitude oceanic frontal zone on the annular variability in the extratropical atmosphere as revealed by aqua-planet experiments”, *J. Meteor. Soc. Japan*, **91A**, 243–267, 2013.
- [4] Ogawa, F., H. Nakamura, K. Nishii, T. Miyasaka and A. Kuwano-Yoshida, “Importance of midlatitude oceanic frontal zones for the annular mode variability: Interbasin differences in the southern annular mode signature”, *J. Climate*, **29**, 6179–6199, 2016.
- [5] Thompson, D. W. J., and J. D. Woodworth, “Barotropic and baroclinic annular variability in the Southern Hemisphere”, *J. Atmos. Sci.*, **71**, 1480–1493, 2014.
- [6] Thompson, D. W. J., B. R. Crow, and E. A. Barnes, “Intraseasonal periodicity in the Southern Hemisphere circulation on regional spatial scales”, *J. Atmos. Sci.*, **74**, 865–877, 2017.
- [7] Nakayama, M., H. Nakamura, and F. Ogawa, “Impacts of a Midlatitude Oceanic Frontal Zone for the Baroclinic Annular Mode in the Southern Hemisphere”, *J. Climate*, **34**, 7389–7408, 2021.