

傾圧環状モード変動 (Baroclinic Annular Mode)

中山 盛雄^{*1}・中村 尚^{*2}

1. はじめに

傾圧環状モード変動 (BAM: baroclinic annular mode) は, 中高緯度域にて日々の天気変化をもたらす対流圏波動擾乱の活動が, 半球規模で強弱を繰り返す変動現象である. 近年見出されたこの変動は, 中高緯度域における熱や西風運動量, 水蒸気の南北輸送の多くを担う擾乱活動の変調で, 半球規模の気候系の変動にも関わると考えられる. 本稿では, BAM の概要とこれまでの諸研究で得られた知見について概説する.

2. BAM の特徴

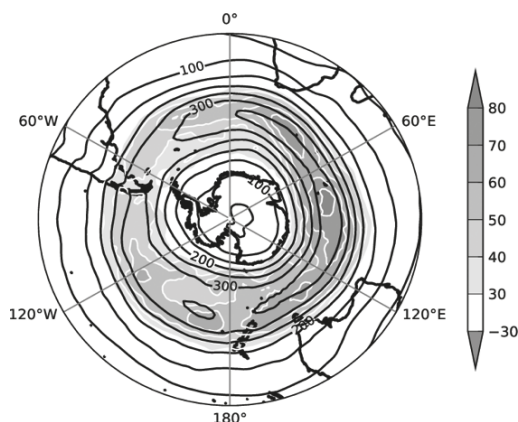
中高緯度大気循環において, 極域と中緯度域の海面気圧の南北シーソーで特徴付けられる大規模変動が各半球で卓越することが知られている. 極域を取り囲むようなその形状から, 環状モード変動 (annular mode) と呼ばれ (例: Thompson and Wallace 2000; 中村 2002), 東西風や気圧 (高度) 場に対する経験直交関数 (EOF: Empirical Orthogonal Function) 解析から同定される. 近年, Thompson and Woodworth (2014; 以下 TW14) は, 南半球中高緯度域における擾乱運動エネルギー (EKE: eddy kinetic energy) の卓越変動を表す EOF 第 1 モードが, 中高緯度全域での EKE の強弱を表す「環状」な構造を有し (第 1 図), 既知の環状モード変動と大きく異なる以下の特徴を有することを見出した.

- ・EKE 及び擾乱による極向き熱輸送の半球規模の強

弱を示すものの, 東西風偏差や擾乱による西風運動量の南北輸送の変動を殆ど伴わない.

- ・周期 20~30 日に相当する準周期性を示す.
- ・既知の環状モード変動との時間相関が殆ど無い.

擾乱の傾圧的な発達の際標となる極向き擾乱熱輸送の変調を表すこの新たな変動を, TW14 は BAM, 即ち「傾圧」環状モード変動と名付けた. 南半球 BAM の準周期性は夏季に最も明瞭で (Wang and Nakamura 2016), 南半球中高緯度全域で平均した降水量や雲放射効果の変動にも現れる (Thompson and Barnes 2014; Li and Thompson 2016). BAM はやや不明瞭ながら北半球においても見られ (Thompson and Li 2015), 南北両半球の BAM に対する力学的共通性が示唆される.



第 1 図 夏季南半球 BAM に伴う典型的な 300hPa 面の EKE 偏差 (陰影, m^2/s^2). TW14 によって定義された規格化「BAM 指数」に EKE 偏差を局所的に線形回帰したもの. 等値線は 300hPa 面 EKE の気候値 (m^2/s^2). JRA-55 大気再解析に基づく.

^{*1} (連絡責任著者) Morio NAKAYAMA, 東京大学先端科学技術研究センター.

nakayama@atmos.rcast.u-tokyo.ac.jp

^{*2} Hisashi NAKAMURA, 東京大学先端科学技術研究センター.

© 2023 日本気象学会

3. BAM のメカニズム

BAM においては、中高緯度域にて頻繁に発達し東進する傾圧性擾乱が重要な役割を担う。TW14は、擾乱の傾圧の発達と整合的に EKE の増大より 1~2 日先行して極向き擾乱熱輸送が増大する傾向を見出した。Nakayama *et al.*(2023) は、周期約 1 週間以下の移動性高低気圧に着目した解析から同様の傾向を確認した上で、擾乱活動活発期には擾乱の傾圧的構造がより明瞭化してその傾圧の発達がより効率的となるのに加え、南北により伸長した擾乱がより効率的な下流発達を促して広域で擾乱活動を高める傾向を見出した。

また、Nakayama *et al.*(2021) は、顕著な海面水温勾配を伴う中緯度海洋前線帯が近傍の下層傾圧性を効果的に維持することで、擾乱活動を平均的に強める(Nakamura *et al.* 2008) だけでなく、BAM をも増幅させることを示した。実際、南半球の気候平均的な擾乱活動、BAM の振幅ともに、中緯度南インド洋にある最も顕著な海洋前線帯付近で最大となる(第 1 図)。

BAM の準周期性のメカニズムとして、Thompson and Barnes (2014) は帯状平均場における対流圏下層の傾圧性と極向き擾乱熱輸送の相互作用から生ずる変動を提案し、Moon *et al.*(2021) は理論的にこれを支持している。Thompson *et al.*(2017) や Boljka *et al.*(2021) は、対流圏上層を大きな群速度で東進する擾乱波束と低速で東進する下層傾圧性偏差の相互作用が上記変動の本質と指摘した。また、Xue *et al.*(2021) は、中緯度対流圏を東進する擾乱波束が南インド洋の顕著な下層傾圧帯を通過する度に繰り返し増幅することで準周期性が生ずるという仮説を提唱した。一方、上記の下層傾圧性と極向き擾乱熱輸送の共変動を支持せず、別の仮説を示した研究もある。Wang and Nakamura (2016) は、中緯度南半球にて卓越する周期 9.1 日と 6.7 日の擾乱成分間の相互作用が極向き擾乱熱輸送に準周期性をもたらし得ると論じた。さらに、Zurita-Gotor (2017) は、異なる波数を持つ擾乱成分に伴う極向き熱輸送が 25 日超の周期帯で相殺し合い、BAM のスペクトルに極大を作り出すと論じた。このように、準周期性をもたらすメカニズムに関する統一的理解は未だなく、再解析データに基づく実証が必要とされる。

4. おわりに

BAM は大規模な大気循環変動であるものの、その存在は近年まで見過ごされてきた。現在、BAM の実

態やその準周期性も含めたメカニズム、予測可能性、各地の天候への影響について未解明の点が多々残されている。それらの解明は延長予報の精度向上にも貢献し得る。また、温暖化が進行する将来気候において BAM が如何なる変調を被るかにも興味が持たれる。Wang *et al.*(2018) は、BAM の準周期性を表すスペクトルピークが将来気候にてより強調され得ることを示した。今後、変動振幅や空間構造の変調、同じく変調を被る他の主要な変動モードとの関連等の探究が必要である。

参考文献

- Boljka, L., D. W. J. Thompson and Y. Li, 2021: Downstream suppression of baroclinic waves. *J. Climate*, **34**, 919-930.
- Li, Y. and D. W. J. Thompson, 2016: Observed signatures of the barotropic and baroclinic annular modes in cloud vertical structure and cloud radiative effects. *J. Climate*, **29**, 4723-4740.
- Moon, W., G. E. Manucharyan and H. A. Dijkstra, 2021: Eddy memory as an explanation of intraseasonal periodic behaviour in baroclinic eddies. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **147**, 2395-2408.
- 中村 尚, 2002: 北極振動. *天気*, **49**, 687-689.
- 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.
- 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.
- Nakayama, M., H. Nakamura and F. Ogawa, 2023: Modulations of storm-track activity associated with the baroclinic annular mode. *J. Climate*, **36**, 4219-4234.
- Thompson, D. W. J. and E. A. Barnes, 2014: Periodic variability in the large-scale Southern Hemisphere atmospheric circulation. *Science*, **343**, 641-645.
- Thompson, D. W. J. and Y. Li, 2015: Baroclinic and barotropic annular variability in the Northern Hemisphere. *J. Atmos. Sci.*, **72**, 1117-1136.
- 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.
- Thompson, D. W. J. and J. D. Woodworth, 2014: Barotropic and baroclinic annular variability in the Southern

- Hemisphere. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 1480–1493.
- 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.
- Wang, L. and N. Nakamura, 2016: Covariation of finite-amplitude wave activity and the zonal-mean flow in the midlatitude troposphere. Part II: Eddy forcing spectra and the periodic behavior in the Southern Hemisphere summer. *J. Atmos. Sci.*, **73**, 4731–4752.
- Wang, L., J. Lu and Z. Kuang, 2018: A robust increase of the intraseasonal periodic behavior of the precipitation and eddy kinetic energy in a warming climate. *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 7790–7799.
- Xue, D., J. Lu, Y. Qian and Y. Zhang, 2021: Evidence for coupling between the subseasonal oscillations in the Southern Hemisphere midlatitude ocean and atmosphere. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **126**, e2020JD033872.
- Zurita-Gotor, P., 2017: Low-frequency suppression of Southern Hemisphere tropospheric eddy heat flux. *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 2007–2015.
-