

南半球ストームトラック活動の卓越変動 ～中緯度海洋前線帯の潜在的な重要性～

*中山 盛雄, 中村 尚 (東大先端研), 小川 史明 (ベルゲン大)

1. はじめに

南半球の中高緯度対流圏における大スケール変動として、極前線ジェット (Polar-Frontal Jet; PFJ) のほぼ東西一様な南北変位を表す Southern Annular Mode (SAM) がよく知られている (Thompson and Wallace 2000)。一方、近年新たな変動として、Baroclinic Annular Mode (BAM) が見出された (Thompson and Woodworth 2014, 以下TW14と表記)。BAMは中緯度擾乱活動のほぼ東西一様な強弱を表す。BAMは中高緯度のエネルギー循環においてSAMと異なる役割を持ち、両者は互いにほぼ独立であるとされている。しかし、BAMは発見から日が浅く、その力学については未解明な点が多い。

BAMの力学の理解に向けて、本研究では中緯度海洋前線帯に着目した。これは、暖流と寒流の合流域であり、強い海面水温 (SST) 勾配を伴う。Nakamura et al. (2004)では、中緯度のストームトラック (移動性擾乱) 活動及び渦駆動のPFJが海洋前線帯近傍に形成されることが観測に基づいて示された。その後、海洋前線帯がストームトラック活動を強化し、その緯度を固定することが、AGCMに東西一様なSST分布を与えた「水惑星実験」から明らかとなった (Nakamura et al. 2008)。これは、海洋前線帯に伴う強いSST勾配が擾乱の頻繁な発達に必要な傾圧性を維持するためである。加えて、PFJの変動を表すSAMの構造や振幅も海洋前線帯に大きく影響されることが分かっている (Sampe et al. 2013; Ogawa et al. 2016)。

本研究では、BAMの力学を詳しく調査するとともに、中緯度海洋前線帯から受ける影響を初めて評価する。具体的には、Nakamura et al. (2008) 等に倣って、AGCMの下端境界条件として、「前線あり」、「前線なし」に対応する2種類の東西一様なSST分布を与えた水惑星実験を解析した。陸面、海氷のない水惑星実験の解析は、停滞性惑星波の影響を受けないため、BAMの

力学や海洋前線帯の影響の本質部分の評価に有用である。また、現実的なSST分布を用いれば、陸面の少ない現実の南半球の本質的な様相も再現すると期待される。

2. データと解析手法

水惑星実験はOgawa et al. (2016)で行われたものである。用いられたAGCMはAFEST79L56 (水平 150km 格子相当) 版で、海洋前線帯の効果を表現可能な解像度を持つ。「前線あり」の実験 (CTL実験) では、衛星観測データ (NOAA-OISST) に基づく南インド洋のSST気候値が東西一様に与えられた (図1黒線)。モデル南半球には冬季分布を、モデル北半球には夏季分布を南北反転させた上で与えた。海洋前線帯は季節を問わず緯度45°に位置する。一方、「前線なし」の実験 (NF実験) では、前線の冷水側のSSTのみ人為的に高めて海洋前線帯を除去した (図1青線)。両実験とも日射は南半球冬至の条件に固定した。解析期間は3600日である。

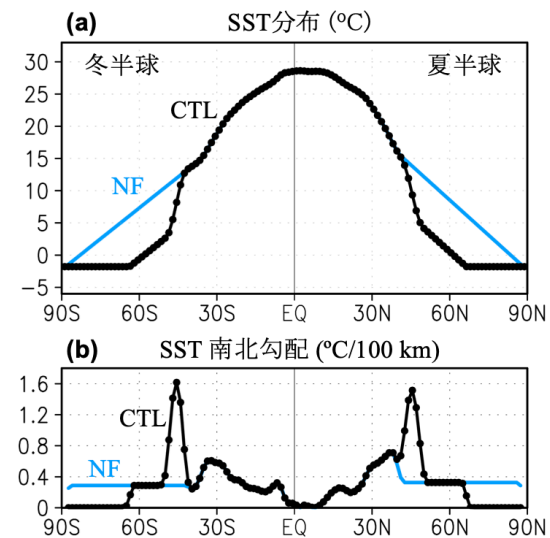


図 1 AGCM の下端境界条件として与えられた (a) SST と (b) SST 南北勾配の大きさの緯度分布。CTL 実験用(黒線)と NF 実験用(青線)。

また、現実大気の解析には、大気再解析JRA-55を用いた。解析期間は1979年~2017年の39年間である。6~8月を冬季、12~2月を夏季とした。

TW14を参考に、BAMは東西平均した擾乱運動エネルギー (Eddy Kinetic Energy; EKE) の中高緯度対流圏 [925~200 hPa、緯度20°~70°] における第1EOFとして同定した。ただし、彼らとは異なり、移動性擾乱に伴う周期8日以下の変動のみに着目した。BAMの時系列は標準偏差で規格化したものを用いた。

3. 結果

3.1 BAMの力学と中緯度海洋前線帯の重要性

図2 上段に水惑星実験夏半球及び現実の南半球夏季における東西平均した移動性擾乱に伴う EKE 及び極向き熱輸送の気候平均場を示す。これら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 BAM の時系列に対する回帰偏差である。以下、夏半球の結果を主に扱うが、冬半球においても結果は定性的に同様

である (図略)。SST 条件が現実的である CTL 実験は現実大気の状態をよく再現している。ストームトラック活動のピークは、中緯度海洋前線帯によく対応する。BAM はストームトラック活動の強弱を表しており、TW14 と整合する。

NF 実験でも BAM はストームトラック活動の強弱を表す。しかし、CTL 実験と比較してストームトラック活動の気候平均、BAM への回帰偏差共に、ピークの緯度が赤道寄りに~5° 程度変位し、大きく弱化した。弱化は対流圏上層で~30%、下層の極向き擾乱熱輸送では~60%に及ぶ。これらの結果は、中緯度海洋前線帯が気候平均のストームトラック活動だけでなく BAM をも強化し、その緯度を固定するという重要な示唆を与える。

BAM の力学はその時間発展を調べることで、より理解できる。図3 中央に CTL 実験夏半球における極向き擾乱熱輸送、EKE、極向き擾乱西風運動量輸送、西風の BAM の時系列に対するラグ回帰偏差を示す。各量がピークを迎える順

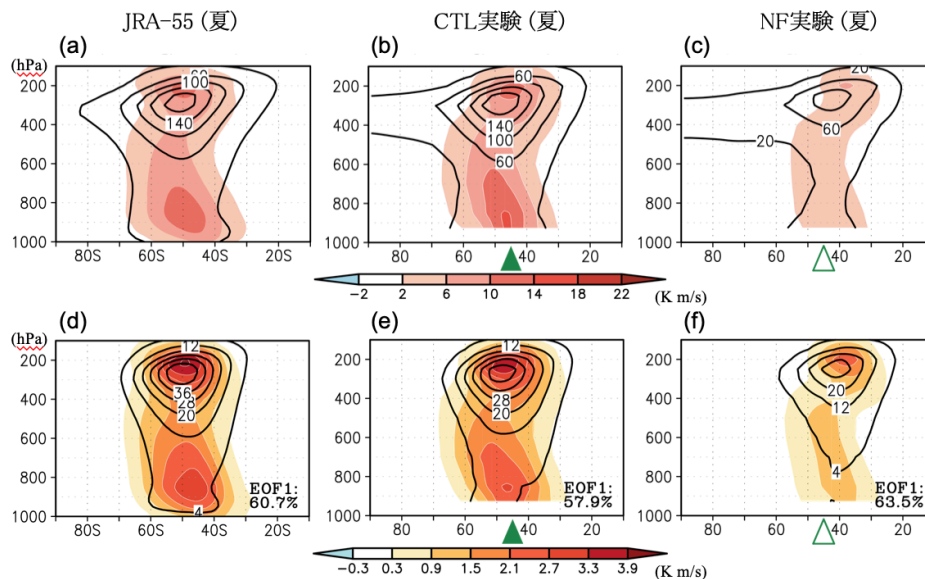


図2 上段:東西平均した移動性擾乱に伴う運動エネルギー(等値線、 m^2/s^2)と極向き熱輸送(色、 $K m/s$)の夏季気候平均場。(a) JRA-55、(b) CTL 実験、(c) NF 実験。下段:夏季 BAM の時系列に回帰した移動性擾乱に伴う運動エネルギー偏差(等値線、 m^2/s^2)と極向き熱輸送偏差(色、 $K m/s$)。(d) JRA-55、(e) CTL 実験、(f) NF 実験。横軸は緯度 (°) で左側が極、縦軸は気圧 (hPa)。▲は中緯度海洋前線帯 (45°)。

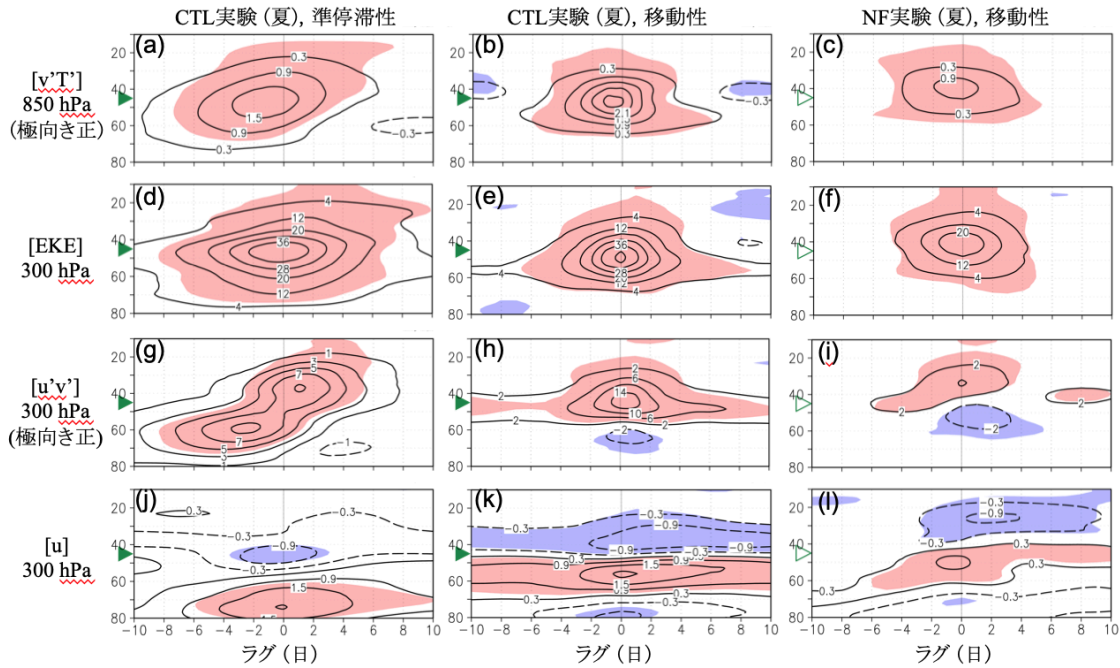


図 3 BAM の時系列に対するラグ回帰係数。縦軸は緯度 (°) で下側が極。横軸はラグ (日) で正のラグに向かって BAM が時間発展する。(a)~(c): 850 hPa 極向き擾乱熱輸送 (K m/s)、(d)~(f): 300 hPa 擾乱運動エネルギー (m^2/s^2)、(g)~(i): 300 hPa 極向き擾乱西風運動量輸送 (m^2/s^2)、(j)~(l): 300 hPa 西風 (m/s)の各偏差について示した。左側:CTL 実験、準停滞性擾乱の寄与、中央:CTL 実験、移動性擾乱の寄与、右側:NF 実験、移動性擾乱の寄与。色は相関が 95%有意な領域。▲は中緯度海洋前線帯 (45°)。

番は、極向き擾乱熱輸送 (ラグ-1 日)、EKE (ラグ 0 日)、極向き擾乱西風運動量輸送 (ラグ 0~1 日)、西風 (ラグ 0~2 日)である。これより、BAM の時間発展が傾圧性擾乱のライフサイクルに対応することが分かる。また、同様の傾向は NF 実験でも見られる。これは、BAM が中高緯度大気の内力学として元々備わっている現象であることを意味する。

次に、海洋前線帯からの熱力学的影響を調べる。図 4 に水惑星実験夏半球における極向き擾乱熱輸送、地表気温、海洋から大気への顕熱フラックスの BAM の時系列に対するラグ回帰偏差を示す。CTL 実験、NF 実験の双方において、BAM の正位相では、極向き擾乱熱輸送の増大に整合して、南北気温勾配が減少する (図 4a,b)。この時、顕熱フラックス偏差は表面気温偏差を緩

和し、南北気温勾配を回復する働きをしている (図 4c)。現実の南半球でもこの性質は見られる (図略)。しかし、NF 実験では CTL 実験に比べ、顕熱フラックス偏差が 50%以上弱化している。以上より、中緯度海洋前線帯による BAM の強化及び緯度固定は、顕熱フラックス偏差を通じた南北気温勾配の回復作用を海洋前線帯が強化した結果であると解釈できる。

3.2 BAM と SAM の関係について

BAM に伴う西風偏差は PFJ の南北変位、すなわち SAM に伴う西風偏差に大きく射影を持つ (図 3k,l)。これは、BAM と SAM との関連性を意味しており、TW14 と異なる。TW14 は、東西平均からのずれで定義される全擾乱成分を解析した一方、本研究では周期 8 日以下の移動性擾乱

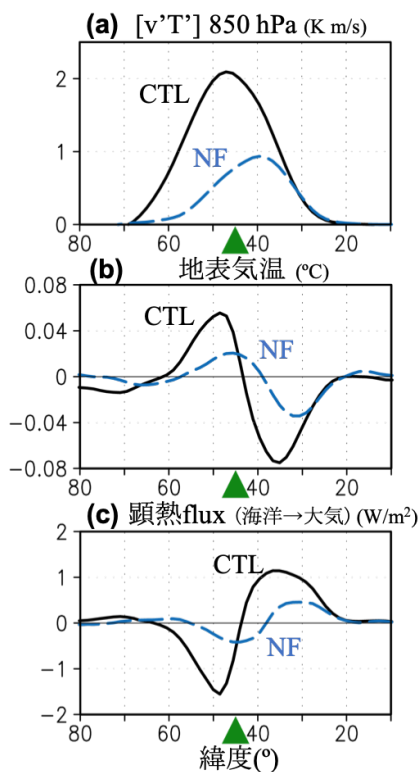


図 4 水惑星実験夏半球における BAM の時系列に対するラグ回帰係数。ラグ-2 日~+2 日で平均したもの。横軸は緯度 (°) が左が極。▲は中緯度海洋前線帯 (45°)。(a): 極向き擾乱熱輸送偏差 (K m/s)、(b): 地表気温 (°C)、(c): 海洋から大気への顕熱フラックス偏差 (W/m²)。CTL 実験 (黒線) と NF 実験 (青線)。

成分に注目した解析を行った。このことは、周期 8 日以上の変動 (準停滞性擾乱) 成分が BAM に対し、重要な寄与を持つことを示唆する。

そこで本研究では、3.1 の移動性擾乱の解析に加え、準停滞性擾乱を切離周期 8 日のローパスフィルタをとったのち東西平均からのずれをとることで定義し解析した。また、TW14 と同様の全擾乱成分の解析も行った。BAM は各擾乱成分に伴う EKE の EOF1 として擾乱成分ごとに同定した。

図 3 左側に、CTL 実験夏半球における準停滞性擾乱に伴う BAM の時間発展を示した。EKE

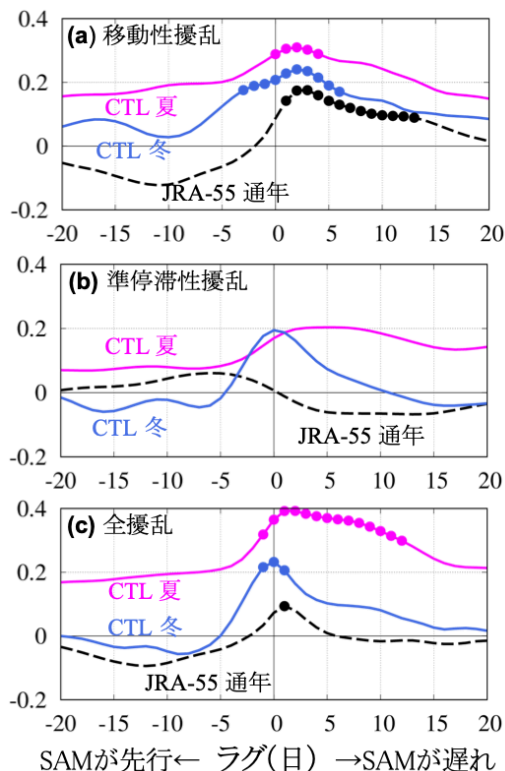


図 5 SAM の時系列と BAM の時系列のラグ相関係数。(a) 移動性擾乱に伴う BAM、(b) 準停滞性擾乱に伴う BAM、(c) 全擾乱に伴う BAM について示した。CTL 実験夏半球 (赤実線)、CTL 実験冬半球 (青実線)、JRA-55 通年 (黒破線)。正のラグは SAM が BAM に対して遅れることを表す。点は相関が 95% で有意であることを表す。

等の計算には準停滞性擾乱に伴う成分を用い、回帰先である BAM の時系列には準停滞性擾乱に伴う EKE の PC1 時系列を用いている。上述した移動性擾乱に伴う BAM だけでなく、準停滞性擾乱に伴う BAM も擾乱活動の強弱を表す (図 3a,d)。しかし、準停滞性擾乱の BAM に伴う西風偏差は SAM に伴うそれに対してほぼ直交している (図 3j)。移動性擾乱の BAM の寄与と対照的な結果である。

SAM と BAM の関係をより直接調べるため、両者の間のラグ相関を計算した (図 5)。ここで、SAM は東西平均した西風偏差の BAM と同じ領

域における第 1 EOF として同定した。CTL 実験では図 3j,k に整合して、移動性擾乱に伴う BAM は SAM が 2~3 日遅れるラグで相関が最大かつ有意である一方、準停滞性擾乱に伴う BAM は SAM と有意な相関を持たない。また、TW14 で SAM と独立とされた全擾乱に伴う BAM だが、CTL 実験では SAM とやや強い相関を持っている。現実気気では、TW14 に整合して全擾乱に伴う BAM は SAM と弱い相関しか持たない。一方で、移動性擾乱に伴う BAM は CTL 実験と同じ傾向を示しており、BAM による SAM の強化の存在を強く示唆する。準停滞性擾乱に伴う BAM は SAM と有意な相関を持たない。しかし、現実気気では、移動性擾乱に伴う BAM と SAM の相関と同符号となっている。このことから、先行研究で示された SAM と全擾乱に伴う BAM との独立性は、移動性擾乱の寄与と準停滞性擾乱の寄与を合わせたものとして解釈できる。同様の解釈で CTL 実験におけるやや強い相関も説明できる。

4. まとめ

水惑星実験の解析により、中緯度海洋前線帯が BAM を強化しその緯度を自身の直上に固定する働きをすることを初めて明らかにした。これは、気候平均のストームトラック活動だけでなく、その変動の理解にも中緯度海洋前線帯の影響を考慮する必要があることを示す。また、擾乱を周期によって分けた解析により、BAM が移動性擾乱の寄与を通して SAM を強化することが見出された。これは、SAM と BAM が独立であるという先行研究の結果と異なる。南半球対流圏の大気循環とその変動全体について、新たな描像を提示する結果である。

今後は、中緯度海洋前線帯の影響を考慮しつつ、移動性擾乱、準停滞性擾乱それぞれが BAM の顕著な時期にどのような振る舞いをするのか調査することで、BAM の力学のさらなる理解を目指す。

参考文献

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.

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.

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.

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 aqua-planet experiments. *J. Meteor. Soc. Japan*, **91A**, 243-267.

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