

熱帯拡大 (Tropical Widening)

林 未知也*

1. はじめに

気候学的な熱帯の南北幅は、回帰線 (Tropic) の緯度ではなく大気循環などの環境場で定められ、地球温暖化に伴い極向きへ拡大する傾向にある (Staten *et al.* 2018). この変化は Tropical Widening 等と呼ばれ、以後、熱帯拡大と訳す。

熱帯拡大は、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第 4 次評価報告書 (AR4) では明示的に記述されていなかったが、同じ頃に複数の観測的メトリック (指標) から示唆され (Seidel *et al.* 2008), IPCC 第 5 次評価報告書 (AR5) で議論された。しかし、1979~2005 年頃に観測された熱帯拡大率は 10 年間あたり緯度幅 $0.25^{\circ} \sim 3.0^{\circ}$ 程度と不確実性が大きく、また第 5 期結合モデル相互比較計画 (CMIP5) の気候モデルの示す拡大率が 10 年間あたり $0.1^{\circ} \sim 0.3^{\circ}$ と小さい理由は明らかでなかった (Johanson and Fu 2009; Birner *et al.* 2014). 近年、観測と気候モデルの拡大率の違いの要因が理解されてきた (Staten *et al.* 2018, 2020). IPCC 第 6 次評価報告書 (AR6) 第 2 章では 1980 年代以降の熱帯拡大は可能性が高いとされ、その程度は中程度の確信度であるものの 10 年間あたり約 $0.1^{\circ} \sim 0.5^{\circ}$ と記述された。

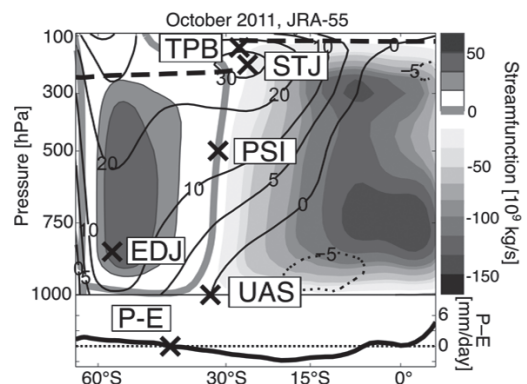
以下では、まず熱帯の幅の定義を解説し、熱帯拡大の最新の理解をまとめる。

2. 熱帯の幅

熱帯の南北限は一般に、ハドレー循環とフェレル循環の境界、つまり下降流を伴う高気圧性の乾燥帯の緯度で定められる。熱帯の対流活動が駆動するハドレー

循環は、その下降流域の対流圏上層で角運動量保存のために亜熱帯ジェットを伴う。亜熱帯ジェットは対流圏の強い南北温度勾配と温度風平衡の関係にあり、下層風の弱い傾圧的な鉛直構造を示す。そのジェット付近を伝播する傾圧不安定波の碎波により運動量と熱が再配置されることで、順圧的な eddy-driven ジェットとフェレル循環が中緯度に形成され、ハドレー循環の下降流が強化される (eddy-pump 効果)。このような環境場に基づく代表的な熱帯の幅のメトリックを第 1 図に示す (Davis and Birner 2017; Staten *et al.* 2018). 図中の各メトリックの簡単な説明を以下に記す。なお、ここでの物理量は全て東西平均値とする。

PSI: 子午面流線関数が 500hPa 高度でゼロとなる緯度。最も慣例的なメトリック。鉛直平均子午面流線関数とその南北勾配 (鉛直流に相当) もしばしば用



第 1 図 熱帯の幅のメトリック (×マーク; 第 2 節参照). 東西平均した子午面流線関数 (陰影) と東西風 (m/s, コントア), 対流圏界面高度 (破線), および降水と蒸発の差 (下図). 南半球のみ描画. Davis and Birner (2017) の Figure 1 を改変して引用.

* Michiya HAYASHI, 国立環境研究所.

hayashi.michiya@nies.go.jp

© 2022 日本気象学会

いられる。

EDJ: Eddy-driven ジェットの最大緯度。本来は総観規模擾乱による渦運動量フラックス収束で定められるが、亜熱帯ジェットと異なり順圧的な構造を持つため、対流圏下層 (第1図では850hPa 高度) の西風の最大緯度で代用されることが多い。

UAS: 地表東西風が低緯度の東風から中緯度の西風へ変わる緯度。東西平均準地衡系では地表東西風に働く地表摩擦が渦運動量フラックス収束の鉛直積算とつり合うため、UAS は渦運動量フラックスの収束と発散の境界を近似する。

P-E: 降水 (P) と蒸発 (E) の差が亜熱帯の負から中高緯度の正に変わる緯度。ハドレー循環の下降流域が伴う乾燥・半乾燥域の広がりを評価する。

STJ: 亜熱帯ジェットの最大緯度。順圧的な eddy-driven ジェットから分離するために、対流圏下層風 (第1図では1000hPa 高度) を減算した東西風が上部対流圏で最大となる緯度とされることが多い。対流圏や下部成層圏の南北温度勾配で定義されることもある。

TPB: 熱帯から亜熱帯にかけて対流圏界面が急降下 (tropopause break) する緯度。第1図では対流圏バルク乾燥安定度 (対流圏界面と地表の温位差) の最大緯度で定義され、対流圏界面高度の南北勾配と符合する。

他に、成層圏オゾンや外向き長波放射、海面気圧に関するメトリックも用いられる。計算パッケージとして TropD (doi:10.5281/zenodo.1157044) が提供されている。次節でも述べるように、信頼性の低いメトリックがあることに留意されたい (Staten *et al.* 2018)。

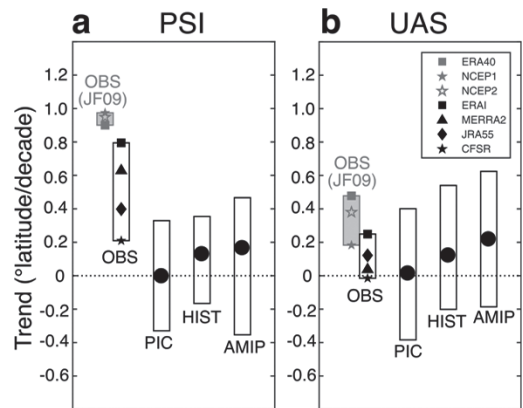
3. 熱帯拡大

慣例的メトリックである PSI が示す1979~2005年の27年間の変化率は正、つまり熱帯の南北幅は拡大傾向にある (第2図 a)。ただし、熱帯拡大率は再解析データ間で10年間あたり約 0.2° ~ 1° と値に大きな幅がある。比較的古い再解析データの値は特に大きく、気候モデルの結果と整合しないと指摘されたが (Johanson and Fu 2009), より新しい再解析データは小さい値を示す (Grise *et al.* 2019; IPCC AR6の Figure 2.17)。一方、PSI と比べて、UAS が示す拡大率は10年間あたり約 0° ~ 0.5° と小さく、再解析データ間のばらつきも小さい (第2図 b)。再解析誤差の空間的な積算によって PSI の信頼性は低くなり、一方、表層風から得

られる UAS の方が気候モデルとよく整合すると指摘されている (Grise *et al.* 2019)。

対流圏下層のメトリックである UAS と EDJ, P-E はいずれも eddy-pump 効果 (第2節) を考慮しており PSI との対応がよく、気候モデルから得られる拡大率はメトリック同士で相関する。一方、対流圏上層のメトリックには注意が必要だ (Staten *et al.* 2018; Grise *et al.* 2019)。主に温度風平衡で決まる STJ や TPB の拡大率は互いにやや相関するものの、対流圏下層のメトリックとは相関せず、また有意な拡大傾向も観測されない。対流圏上層の南北温度勾配に寄与する成層圏オゾンの観測から見積もられる拡大率は、10年間あたり 3° と非常に大きい。対流圏上層のメトリックは、観測的な拡大率の不確か性が高いだけでなく、メトリックごとの年々変動の相関が小さいこと、温室効果ガス濃度の増加に対する強制応答が互いに整合しないことも指摘されている。

CMIP5の大気海洋結合モデルの過去 (HIST) 実験および大気モデルの相互比較 (AMIP) 実験から得られる熱帯拡大率のアンサンブル平均は、PSI と UAS のどちらも10年間あたりおよそ 0.2° を示す (第2図)。観測された海面水温に強制される AMIP 実験の方がやや拡大率が大きく、UAS の再解析平均と同程度で



第2図 1979~2005年での PSI と UAS でみた熱帯拡大率。単位は10年間あたりの緯度幅。OBS (JF09) は Johanson and Fu (2009) が用いた再解析、OBS は比較的新しい再解析で (凡例参照)、ボックスは最大・最小値を示す。PIC と HIST、AMIP は CMIP5 の気候モデルによる実験結果 (第3節参照) で、ボックスと黒点はそれぞれ 2.5th-97.5th パーセンタイル幅とアンサンブル平均を示す。Grise *et al.* (2019) の Figure 1 を改変して引用。

あるため、太平洋十年規模変動 (PDV) のような内部変動の寄与が示唆される。なお、第6期結合モデル相互比較計画 (CMIP6) の結果はCMIP5と概ね同様である (Grise and Davis 2020 ; IPCC AR6第3章)。

以上を踏まえると、1979年以降の熱帯拡大率は観測や再解析データと気候モデルとで量的に整合しており、10年間あたり約 0.2° ~ 0.4° がもっともらしいとされる (Staten *et al.* 2018 ; Grise *et al.* 2019)。ただし、気候モデルの産業革命前 (PIC) 実験から見積もられた内部変動幅と比べて小さく、人為起源の熱帯拡大はまだ顕在化していないと考えられる。

熱帯拡大率が一般に北半球よりも南半球で大きいことは、観測と気候モデルから確認される。CMIP5とCMIP6の気候モデルによると、南半球での拡大率は季節によらず大きいものに対して、北半球では北半球秋を除いて小さく、特に北半球夏については負、つまり熱帯縮小傾向を示す。この熱帯縮小は高い気候感度のモデルでより大きく、北太平洋で特に顕著だ (Grise and Davis 2020)。季節だけでなく領域で分けたさらなる調査が望まれている (Staten *et al.* 2020)。

温室効果ガスなどの外部放射強制を変えた一連の気候モデル実験により、観測された熱帯拡大の原因の切り分けが試みられてきた (Grise *et al.* 2019 ; Grise and Davis 2020 ; IPCC AR6第3章)。熱帯拡大に最も効果的な強制は人為的な温室効果ガス排出であり、特に南半球で有意な拡大をもたらす。地球温暖化に伴い亜熱帯および中緯度帯の対流圏安定度が増加するため、傾圧不安定波の発生域と eddy-driven ジェットが極側へずれる。一方、人為的なエアロゾル排出は熱帯拡大を妨げる傾向にあるが、気候モデル間の不確実性が非常に高い。成層圏オゾン消失に対する大循環応答の不確実性も高いが、南極成層圏が冷却することで特に南半球で夏 (12月~2月) に熱帯を有意に拡大させる。温室効果ガス増加と成層圏オゾン消失の両方が南半球のより大きな熱帯拡大をもたらしており、将来的に成層圏オゾン濃度が回復すれば、温室効果ガス増加による拡大を相殺する可能性がある。

他に、PDV のような自然変動も、特に北半球で近年の熱帯拡大に寄与したと考えられている (IPCC AR6

第3章)。また、火山噴火による熱帯の上部対流圏の冷却・下部成層圏の加熱効果や、ブラックカーボンおよび対流圏オゾンによる加熱効果と硫酸性エアロゾルによる冷却効果、あるいは海洋循環の変化も熱帯拡大に影響を及ぼす可能性がある。様々な要因が熱帯拡大をもたらすメカニズムだけでなく、それが地表付近の気候・生態系へ及ぼす影響も不明な点が多く、今後さらなる調査が必要とされる (Staten *et al.* 2018, 2020)。

略語一覧

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change
AR4/AR5/AR6 : Fourth/Fifth/Sixth Assessment Report
CMIP5/CMIP6 : Coupled Model Intercomparison Project Phase5/Phase6
PDV : Pacific Decadal Variability

参考文献

- Birner, T., S. M. Davis and D. J. Seidel, 2014: The changing width of Earth's tropical belt. *Phys. Today*, **67**, 38-44, doi:10.1063/PT.3.2620.
- Davis, N. and T. Birner, 2017: On the discrepancies in tropical belt expansion between reanalyses and climate models and among tropical belt width metrics. *J. Climate*, **30**, 1211-1231, doi:10.1175/JCLI-D-16-0371.1.
- Grise, K. M. and S. M. Davis, 2020: Hadley cell expansion in CMIP6 models. *Atmos. Chem. Phys.*, **20**, 5249-5268, doi:10.5194/acp-20-5249-2020.
- Grise, K. M. *et al.*, 2019: Recent tropical expansion: Natural variability or forced response? *J. Climate*, **32**, 1551-1571, doi:10.1175/JCLI-D-18-0444.1.
- Johanson, C. M. and Q. Fu, 2009: Hadley cell widening: Model simulations versus observations. *J. Climate*, **22**, 2713-2725, doi:10.1175/2008JCLI2620.1.
- Seidel, D. J., Q. Fu, W. J. Randel and T. J. Reichler, 2008: Widening of the tropical belt in a changing climate. *Nat. Geosci.*, **1**, 21-24, doi:10.1038/ngeo.2007.38.
- Staten, P. W., J. Lu, K. M. Grise, S. M. Davis and T. Birner, 2018: Re-examining tropical expansion. *Nat. Clim. Change*, **8**, 768-775, doi:10.1038/s41558-018-0246-2.
- Staten, P. W. *et al.*, 2020: Tropical widening: From global variations to regional impacts. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, **101**, E897-E904, doi:10.1175/BAMS-D-19-0047.1.