

2000年代における梅雨降水変動の特性変化と ロスビー波束の東方伝播

松村 伸治(防災科研)
堀之内 武(北大院地球環境)

1. はじめに

これまで PJ パターンは夏季東アジアモンスーンの年々変動にとって最大の強制力であった。しかし、1990 年代後半～2000 年代以降、PJ パターンが弱化的であることを複数の研究が明らかにしている(Huang et al. 2018; Xu et al. 2019; Li and Lu 2020; Sun et al. 2021)。それにもかかわらず近年、西日本では豪雨が頻発しており、これまでにない大規模な災害に見舞われている。個々の豪雨イベント研究は精力的に行われて理解が進んでいる一方、最近の豪雨頻発化の理解は未だ乏しいのが現状となっている。

本研究では東アジアの長期間に渡る降水量変動を対象とし、年々変動の変調の観点から梅雨降水変動を解析した。その結果、2000 年代中頃以降、南西諸島周辺で降水変動の特性が前線構造から積雲対流へと移行が進んでいることが分かった。尚、本研究の詳細は Matsumura and Horinouchi (2023)を参照されたい。

2. データと解析手法

陸上(CPC; Chen et al. 2008)と衛星(GPCP; Adler et al. 2003)の2種類の降水量データと大気はJRA55(Kobayashi et al. 2015)の再解析データ、海面水温はHadISST(Rayner et al. 2003)を使用した。解析期間は夏季(JJA または JJ)の1979～2020年を対象とした。EOF解析(東アジア領域20°–50°N, 100°E–160°E)にはGPCP降水量を使用した。また、EOF-2の最大降水変動域である南西諸島(25°–30°N, 125°–135°E)を降水変動の指標として、期間の前半(1979～1999)と後半(2000～2020)に対してそれぞれ解析を行った。

3. 結果

3.1 降水と大気循環の変化

1979～2020年までの42年間で西日本の夏季降水量は東アジアで最も増加しており、南西諸

島周辺でも著しい増加となった(図略)。図1のEOF-2はこの長期変化を反映しており、EOF-1はPJパターンを表している(寄与率はそれぞれ14.5%, 16.4%)。CPC降水量に基づいた西日本の降水量とPCとの11年移動相関から、2000年代中頃まではEOF-1のPJパターンが支配的であったが、2010年以降ではEOF-2が西日本の降水変動の主要因となっている(図略)。

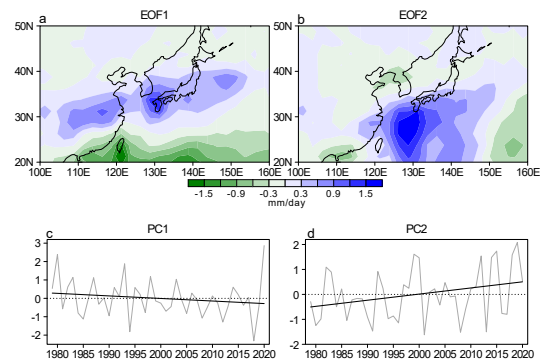


図1: 夏季降水量の(a) EOF-1, (b) EOF-2 と(c, d)時系列。

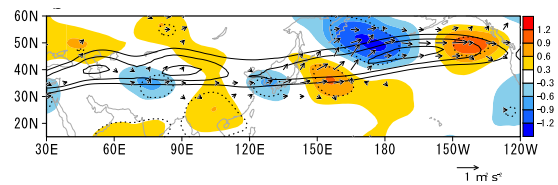


図2: 降水量PC-2に対する300 hPa 流線関数の eddy 成分への回帰 ($10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$)。実線は東西風速の気候値 (15, 18, 21 m s^{-1})、点線は95%の有意水準、ベクトルは波活動度フラックスを表す。

EOF-1のPJパターンは熱帯に起因しているのに対し、EOF-2は亜熱帯ジェットの弱体化を引き起こすとされる北極温暖化(Coumou et al. 2018)と関係があることが分かった(図略)。この降水変動を理解するために図2に対流圏上

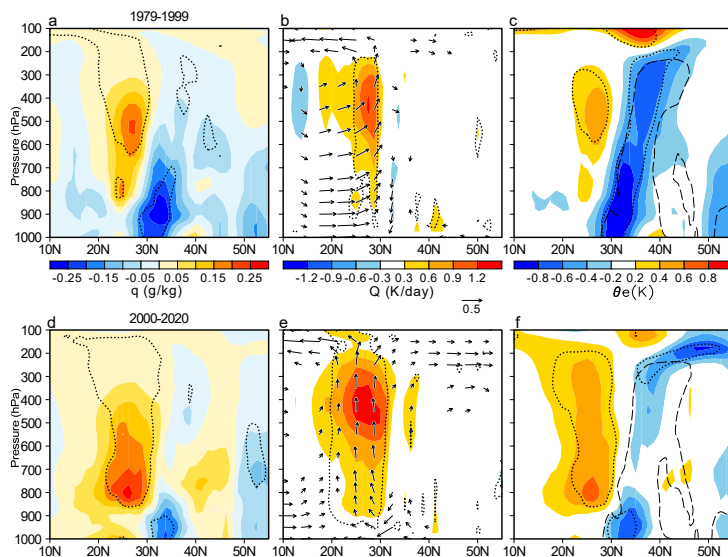


図3：1979～1999年の南西諸島降水量に対する(a)比湿，(b)非断熱加熱と南北および鉛直流（ベクトル），(c)相当温位の緯度-鉛直断面（130°E）における回帰．(d-f) 2000～2020年の場合．点線は95%の有意水準，(c)と(f)の破線は極向き θ_e 勾配の氣候値（-0.8 K/緯度）を表す．

層の循環場の回帰を示す．シルクロードパターンが東アジアまで達しており，20007年までを対象とした特異値分解の第2モードと良く対応している(Kosaka et al. 2011)．しかし，EOF-2ではさらに東アジアから東方にロスビー波が伝播しており，北アメリカ西岸にまで達している．解析期間の前半と後半に分けた降水変動に関する解析では，この東アジアから北アメリカへの波列パターンは後半のみ現れた（図略）．

3.2 降水変動の特性変化

東アジアからの波列パターン形成と降水変動との関係を理解するために，降水増加域である南西諸島の降水変動に関する大気鉛直断面の回帰解析を行った（図3）．2000年以前では下層で水蒸気の南北傾度が大きく，南北に狭い加熱帯に向かって南風が収束し，相当温位の南北勾配が強化されているため，典型的な梅雨前線構造となっている．それに対して2000年以降では下層湿潤が進み，南北に広い加熱帯で上昇流が強まり，相当温位の南北勾配が弱体化しており，下層から上層へ水蒸気が供給される積雲対流構造となっている．従って，下層湿潤化が始まった2000年代中頃以降（図略），南西諸島周辺の降水変動が梅雨前線構造から積雲対流へ移行が進んでいることを示している．

降水変動の特性変化は対流不安定による解析でも確認できる．図4a,bは南西諸島周辺海域の海面水温(SST)と対流不安定 $d\theta_e/dp$ (850と500hPa)の散布図を示す．2000年以前ではSSTが高いと不安定性も増すといった強い線形関係にあったが($r=0.58$, 有意水準99%以上), 2000年以降は無相関($r=0.1$)となっている．両期間における $d\theta_e/dp$ の平均値はそれぞれ0.8と0.83 K/100hPaでありほぼ不変であるが，ばらつきに大きな相違があり，2000年以降では平均値付近に集中している．これは2000年以降で大半のSSTがdeep convectionの閾値である28°C以上となることから，積雲対流によって不安定成層が解消され湿潤中立成層化したと解釈することができる．SSTと対流不安定の関係は2000年代中頃に急激に崩壊し，その後下げ止まっている（図4c）．また， $d\theta_e/dp$ の11年移動標準偏差でも同様の变化傾向となっている（図4d）．従って対流不安定の解析からも，南西諸島周辺では2000年代中頃に積雲対流化が進行していることを支持する結果が得られた．

最後に，期間の前半と後半における2000年代を境とした $d\theta_e/dp$ のばらつきの相違を利用して，梅雨降水帯の積雲対流化の評価を行った（図5a）．南西諸島周辺の標準偏差がほぼ半減しているのに加えて，東シナ海南部から日本の太

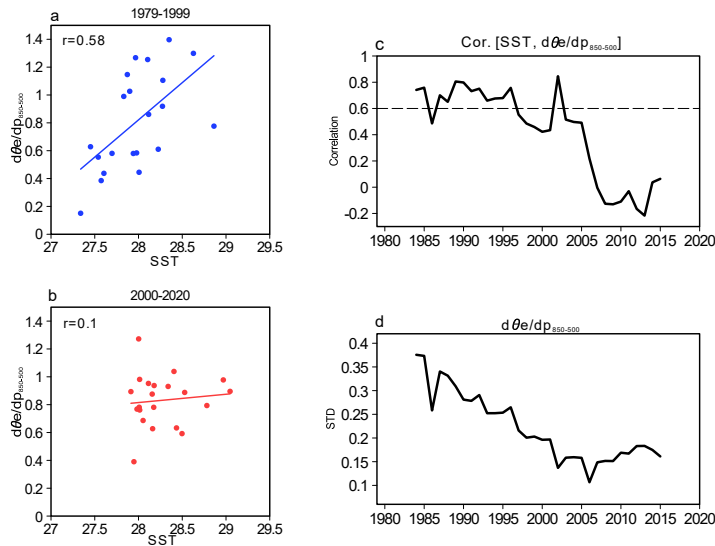


図4: (a) 1979~1999年と(b) 2000~2020年の南西諸島周辺海域のSST(°C)と対流不安定 $d\theta_e/dp$ (K/100hPa)の散布図. (c) 11年移動相関(破線は95%の有意水準), (d) $d\theta_e/dp$ の11年移動標準偏差.

平洋沿岸沖に沿って減少率が大きくなっており, この海域で積雲対流化が進んでいるとみられる. 梅雨期の6,7月では西日本でも減少傾向となっている(図5b). 特に, 黒潮上に沿うように大きく減少していることから, deep convectionの閾値である28°C線の北上に伴って積雲対流化が進行している可能性がある.

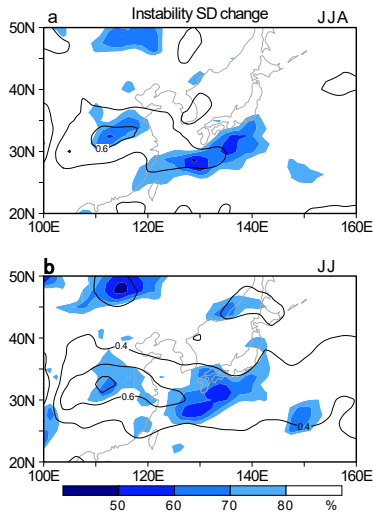


図5: (a) 1979~1999年に対する2000~2020年の対流不安定の変化率. (b) 6,7月の結果. 実線は1979~1999年の標準偏差を示す.

4. 結論と議論

1979~2020年を対象とした夏季東アジア降水変動の解析から主に以下の結果が得られた.

- 南西諸島周辺では降水の年々変動特性が2000年代中頃以降, 梅雨前線構造よりも積雲対流が支配的となり降水が増加した.
- 梅雨降水帯の東シナ海南部から日本の太平洋沿岸沖の黒潮に沿うように積雲対流化が進んでいるとみられる.
- この積雲対流化が北アメリカ西岸までのロスビー波列の生成, 又はシルクロードパターンの東方伝播を可能としている.

図1のGPCPに基づいたEOF-2は南西諸島で最大となる降水分布であり, 西日本では陸上観測よりも過少評価の傾向にあるが, これは空間解像度の違いが原因であろうと考えられる. それよりも重要な点として, 線形トレンドの解析では西日本でほとんど降水増加が見られず, EOF-2の分布と大きな乖離が生じた. 両者の違いは年々変動成分の有無であり, 本研究の結果からも年々変動の変調が降水変動にとっても重要であることを示しており, 梅雨降水の将来予測においても年々変動の変調を考慮する必要があると考える.

ここで本研究の結果を踏まえて最近の西日本の豪雨頻発化の要因を考察してみたい。結論から言うと、最近の豪雨頻発化は Sampe and Xie (2010) の LBM 実験結果を反映している可能性がある。実験では南西諸島近辺の熱源に対する応答として、6月の基本場では上昇流域が太平洋沖を東向きに強まるのに対して、8月の基本場では日本列島に向かって北向きの上昇流域が強まっている。この違いは基本場であるジェット北上（又は弱化）のためと解釈されている。この実験に相当する南西諸島の降水変動に対する上昇流の回帰解析を行うと、2000年以前では東向きに上昇流域が強まるが、2000年以降は北向きに強まり特に西日本は上昇流の強化域となっていることが分かった（図略）。EOF-2 は北極温暖化に伴ったジェットの弱化とも関係しており、南西諸島の積雲対流化とジェットの弱化が近年西日本へ豪雨を誘発している背景となっているかもしれない。

但し、今後も積雲対流化と関連した EOF-2 が西日本の降水変動の主因であり続けるかは確実ではない。冒頭で述べたように、2000年以降というのは PJ パターンが弱化した時期でもある。これまでの PJ パターンは太平洋高気圧を強化し南西諸島海域を含む亜熱帯 SST の上昇に寄与するため（正位相の場合）、大気強制力が主となっている。このため、もし南西諸島海域の SST が積雲対流化を介してロスビー波列を駆動しているとする、PJ パターン弱化によって大気に対する SST 強制力が相対的に向上した結果であるという見方もできる。前述のように、長期変化だけではなく年々変動の変調を含めた降水変動とその背景となる大気循環場の更なる理解が求められる。

謝辞

本研究は（独）環境再生保全機構の環境研究総合推進費（JPMEERF20192004, JPMEERF20222002）および JSPS 科研費（19H05697）の支援を受けた。

参考文献

- Adler, R. F., and Coauthors, 2003: The version-2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979–present). *J. Hydrometeorol.*, 4, 1147–1167.
- Chen, M. et al. 2008: Assessing objective techniques for gauge-based analyses of global daily precipitation. *J. Geophys. Res.*, 113, D04110, doi:10.1029/2007JD009132.
- Coumou, D. et al. 2018: The influence of Arctic amplification on mid-latitude summer circulation. *Nat Commun* 9, 2959.
- Huang, Y. et al. 2018: Changes in the influence of the western Pacific subtropical high on Asian summer monsoon rainfall in the late 1990s. *Climate Dyn.*, 51, 443–455.
- Kobayashi, S. et al. 2015: The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan* 93, 5–48.
- Kosaka, Y., S.-P. Xie, and H. Nakamura, 2011: Dynamics of interannual variability in summer precipitation over East Asia. *J. Climate*, 24, 5435–5453.
- Li, X., and R. Lu, 2020: Breakdown of the summertime meridional teleconnection pattern over the western North Pacific and East Asia since the early 2000s. *J. Climate*, 33, 8487–8505.
- Matsumura, S., and T. Horinouchi, 2023: Decadal shift in summer precipitation variability over East Asia in the mid-2000s and wave propagation toward North America. *J. Climate*, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0292.1>, in press.
- Rayner, N. A. et al. 2003: Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J. Geophys. Res.* 108, D144407.
- Sampe, T. and S.-P. Xie, 2010: Large-scale dynamics of the meiyu-baiu rainband: environmental forcing by the westerly jet. *J. Climate*, 23, 113–134.
- Sun, L. et al. 2021: Changing Impact of ENSO Events on the Following Summer Rainfall in Eastern China since the 1950s. *J. Climate*, 34, 8105–8123.
- Xu, P. et al. 2019: Structural changes in the Pacific–Japan pattern in the late 1990s. *J. Climate*, 32, 607–621.