

線状降水帯の将来変化と2023年のイベントアトリビューション

渡邊俊一・川瀬宏明・廣川康隆(気象研究所)・今田由紀子(東京大学大気海洋研究所)

1. はじめに

近年の研究で、温暖化の影響により線状降水帯の総降水量や発生確率が増加していることが示されている(Kawase et al. 2022)。2023年の梅雨期(6-7月)には、Hirockawa et al. (2020)の基準に基づくと、23事例の線状降水帯が発生した。これは、2006年以降では3番目に多い発生数であった。気象庁の異常気象分析検討会は、2023年の梅雨期の特徴として日本南方での太平洋高気圧の強まりで、日本に水蒸気が流入しやすかったことを指摘している。また、長期的な温暖化に伴う水蒸気量の増加傾向の影響で雨量が増大した可能性も指摘した。本研究では、確率的イベントアトリビューション(EA)により、2023年梅雨期の線状降水帯発生数に対する、これまでの人為的な地球温暖化の影響を評価した。

2. データ・線状降水帯の検出手法

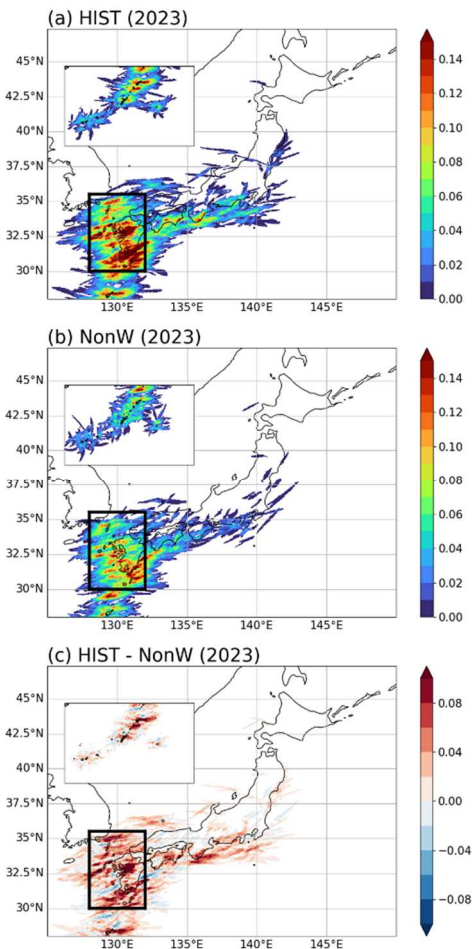
地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース(d4PDF)の過去実験(HIST)及び非温暖化実験(NonW)の全球60km実験を2023年まで拡張した。過去実験は観測された海面水温(COBE-SST2)、非温暖化実験はCOBE-SST2から過去の温暖化による昇温分を引いた海面で駆動される。いずれの実験も100メンバーの計算を実施している。日本域については20km及び5kmの地域気候モデルNHRCMを用いて2023年梅雨期を対象にダウンスケーリングを実施した。5kmNHRCMは2023年5月28日から計算を行った。また、気候値(HISTclim)としてKawase et al. (2023)のd4PDFダウンスケーリング実験の1992-2021年の期間を用いた。

線状降水帯の検出には、Hirockawa et al. (2020)の手法を用いた。今回は、日本の陸上にかかった線状降水帯のみを対象とし、観測で

はほとんど見られない15時間以上継続したものは除外した。対象期間は2023年の6-7月とした。

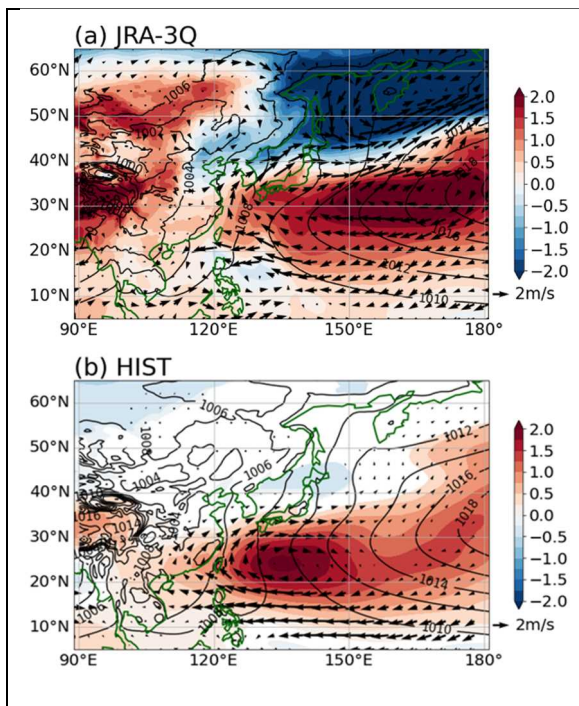
3. 解析結果

HIST実験では南西諸島、九州、四国、東海の太平洋側で線状降水帯が発生し、特に九州での発生が多かった(図1a)。NonWとHISTの差を見ると、HISTの方が全国的に線状降水帯の発生が多く、九州地方での発生数に差が多かった(図1b, c)。100メンバーの平均発生数はHISTとNonWでそれぞれ12.9、9.5回、HISTclimでは10.9回であった。これらのことか



第1図 検出した線状降水帯事例の分布(1メンバーあたりの回数)。

(a) HIST、(b) NonW、(c) HIST - NonW



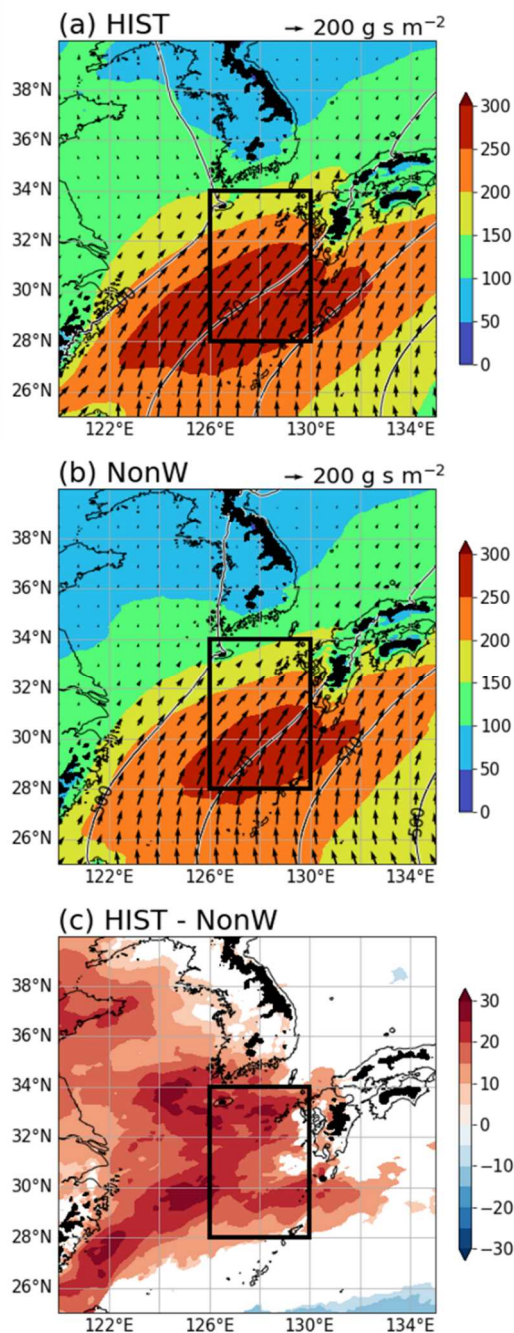
第2図 2023年6-7月の偏差場。
海面校正気圧（シェード；hPa）と925hPaの風（ベクトル）の気候値（1992-2021）からの偏差。（a）JRA-3Q、（b）HIST。

ら、2023年の梅雨期は平年に比べ、線状降水帯が発生しやすく、また地球温暖化により、発生確率が増加していたことが分かる。

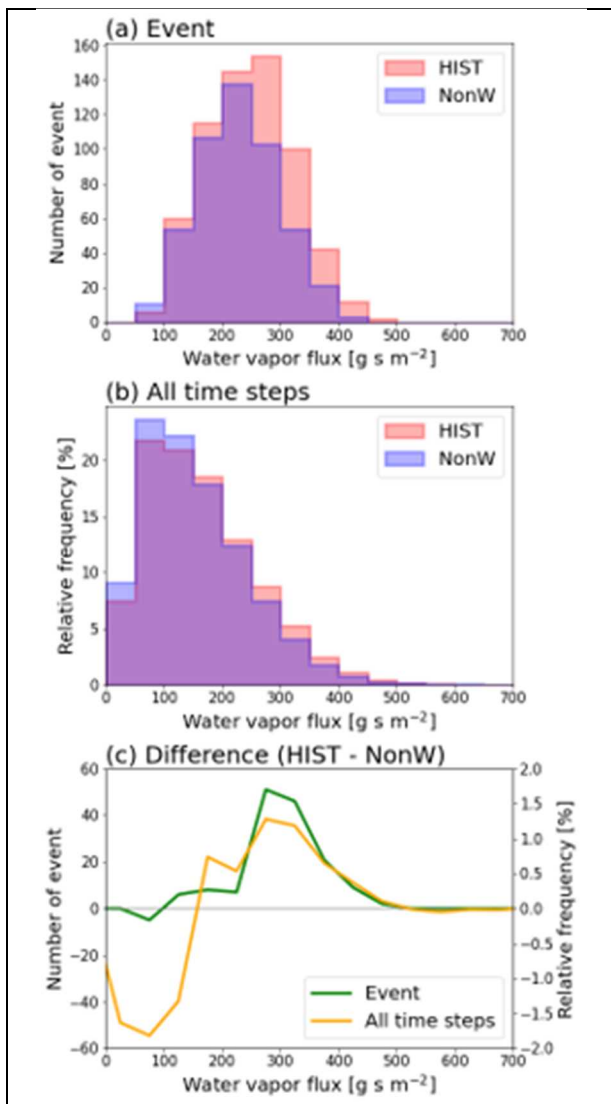
2023年梅雨期の循環場をJRA-3Qで見ると、気候値に比べて、太平洋高気圧の西への張り出しが強い（図2a）。これにより、特に九州地方に南西から水蒸気が流入しやすい場になっていた。HISTでも同様なパターンが見られた（図2b）。d4PDFでは観測された海面水温を用いているため、太平洋高気圧の西への張り出しは海面水温パターンによる強制の影響が大きかったと考えられる。このような太平洋高気圧の西への張り出しは、九州の西側で大雨が発生するパターンに一致する（Iamada et al. 2020）。

線状降水帯の発生環境場について調べるため、HISTとNonWにおいて、九州（図1の黒枠）の線状降水帯発生時の合成解析を行った。950hPa水蒸気フラックス流入量を見ると、いずれの実験においても、東シナ海から $200 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を超える水蒸気フラックスが流入している（図

3a, b）。これは、Kato (2020)の線状降水帯発生6条件のうち、水蒸気フラックスの条件を満たしている。両者の平均値の差を見ると、HISTの方が大きく、両者の差はおおむねクラウドジュス・クラペイロンの関係に対応している（図3c）。



第3図 九州で線状降水帯が発生したときの、950hPa水蒸気フラックスの合成図。
（a）HIST、（b）NonW、（c）HIST- NonW。黒線は F_{ECS} の平均を行った領域。



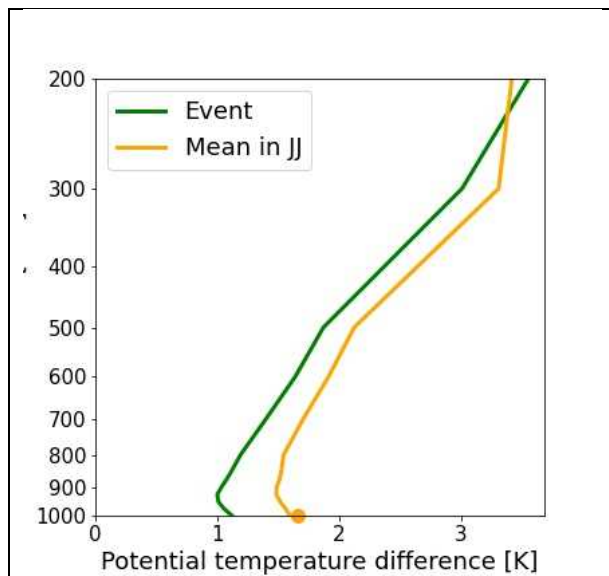
第4図 F_{ECS} の頻度分布

(a) 線状降水帯発生時、(b) 6-7月のすべてのタイムステップ、(c) HISTとNonWの差。

HISTとNonWの差をより定量的に評価するため、東シナ海上(図3の黒枠内)で平均したフラックス量(F_{ECS})を比較した(図4)。 F_{ECS} のヒストグラムを見ると、 F_{ECS} が $250 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 以下で発生する線状降水帯の数はHISTとNonWであまり差がない。一方、 F_{ECS} が $250 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 以上で発生する線状降水帯の数はHISTの方がNonWより大きい(図4c)。6-7月のすべての期間で見ても、 F_{ECS} が $250 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 以上となる頻度の差が大きい。これらのことから、HISTにおいては、温暖化により水蒸気量が増加したことで、線状降水帯の発生に有利な大量の水蒸気フラックスが

流入する頻度が増加したことで、線状降水帯の発生確率が増加したと考えられる。なお、このような大量の水蒸気が入る頻度の増加率は、平均の水蒸気フラックスの増加率に比べて、大幅に大きい。

大気安定度も線状降水帯の発生に重要な要素である(Kato 2020)。図5に九州周辺で平均した、温位のHISTとNonWの差を示す。線状降水帯発生時でも、6・7月の平均でも900hPa以上の高度では、上層に行くほどHISTとNonWの差が大きくなっており、温暖化により、大気が安定化している。一方、900hPa以下では、上層ほどHISTとNonWの差が小さく、HISTのほうが安定度が小さくなっている。Kato(2020)では、線状降水帯の発生のしやすさを500m高度の空気を持ち上げた時の自由対流高度までの距離(dLFC)で評価している。900hPa以下の安定度の減少はdLFCの低下に対応して、線状降水帯の発生に有利な環境場への変化となっている。6・7月の平均の大気最下層のHISTとNonWの差はおおむねSSTの差に一致しており、下層の不安定化はSSTの差によるものと考えられる。



第5図 九州付近で平均した温位のHISTとNonWの差。

緑：線状降水帯発生時、黄：6-7月の平均。点は海面水温の差。平均は図1の黒枠内で行った。

4. まとめ

2023年の梅雨期(6-7月)には、23事例の線状降水帯が発生した。これは、2006年以降では3番目に多い発生数であった。2023年の線状降水帯の発生数に対して、確率的イベントアトリビューション(EA)により、これまでの人為的な地球温暖化の影響を評価した。

線状降水帯の解析のため、d4PDFの100メンバーのアンサンブル実験を5kmNHRCMを用いてダウンスケールした。この実験においても、2023年の梅雨期は、平年よりも線状降水帯の発生確率が高く、九州地方で特に高かった。温暖化影響を見るために、人為的な温暖化影響を取り除いた実験では、線状降水帯の発生確率が現在気候実験よりも低く、過去の温暖化によって、線状降水帯の発生確率が増加していたことが分かった。

2023年の梅雨期の特徴として、太平洋高気圧が平年より西側に張り出しており、九州地方に水蒸気フラックスが流入しやすい環境場であったことが分かった。d4PDFのアンサンブル平均においても、太平洋高気圧の西への張り出しが見られた。アンサンブル実験では観測のSSTを用いているため、太平洋高気圧の張り出しは、SSTによる強制であると考えられる。

温暖化による影響として、気温が増加して大気中の水蒸気量が増加することで、線状降水帯の発生に有利な大量の水蒸気が流入する頻度が増加していた。また、温暖化によるSSTの増加による、大気下層の安定度の減少も線状降水帯の発生確率の増加に寄与していたと考えられる。

参考文献

Kawase, H., S. Watanabe, Y. Hirockawa, and Y. Imada, 2022: Timely Event Attribution Strategy in Japan: An Example of Heavy Rainfall in July 2020, In “Explaining extreme events of 2020 from a climate

perspective”. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **103**, S118–S123.

Kawase, H., M. Nosaka, S. I. Watanabe, K. Yamamoto, T. Shimura, Y. Naka, Y.-H. Wu, H. Okachi, T. Hoshino, R. Ito, S. Sugimoto, C. Suzuki, S. Fukui, T. Takemi, Y. Ishikawa, N. Mori, E. Nakakita, T. J. Yamada, A. Murata, T. Nakaegawa, and I. Takayabu, 2023: Identifying robust changes of extreme precipitation in Japan from large ensemble 5-km-grid regional experiments for 4K warming scenario. *J. Geophys. Res.*, **128**, e2023JD038513.

Hirockawa, Y., T. Kato, H. Tsuguti, and N. Seino, 2020: Identification and classification of heavy rainfall areas and their characteristic features in Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, **98**, 835–857.

Imada, Y., H. Kawase, M. Watanabe, M. Arai, H. Shiogama, and I. Takayabu, 2020: Advanced risk-based event attribution for heavy regional rainfall events. *NPJ Climate Atmos. Sci.*, **3**, 37.

Kato, T., 2020: Quasi-stationary band-shaped precipitation systems, named “Senjo-Kousuitai,” causing localized heavy rainfall in Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, **98**, 485–509.