

九州地方の大雨に先行する自由対流圏水蒸気フラックス収束の存在

辻宏樹、高藪縁、澁谷亮輔、釜堀弘隆、横山千恵
(東京大学大気海洋研究所)

1. はじめに

日本の梅雨末期は豪雨が頻発する時期である。この数年だけでも 2017 年九州北部豪雨、2018 年 7 月豪雨、2020 年 7 月豪雨と、多数の犠牲者を出す豪雨災害が発生している。このような豪雨災害をもたらす降水システムの発生予測のための現象の理解は、科学的意義だけでなく、社会的な必要性も大きい。

近年の数値予報技術の発達により、降水現象の予報精度は向上しているが、依然として大雨をもたらすような降水システムを直接予測することは難しい。一方、環境場の予報精度は比較的高いので、大雨を引き起こす降水システムにとって好ましい環境場を理解することができれば、豪雨をもたらす降水システムを直接予測できなくても、大雨の発生の可能性を捉えることができる。

日本の梅雨前線の南側の降水システムは、熱帯に見られるような組織化したメソスケール対流システム(MCS)と類似した特徴を持つことが Yokoyama et al. (2014)で指摘されている。Hamada and Takayabu (2018)では、日本の夏季に大雨をもたらす降水システムは、面積が広く層状性降水比が高いといった特徴を持ち、よく組織化していることを指摘している。これらの研究は、日本の夏季や梅雨期に大雨をもたらす降水システムは、夏の熱雷のような孤立対流的な特徴ではなく、MCS のような組織化したシステムの特徴を示すことを示唆している。

降水システムの組織化に関する多くの研究では、自由対流圏からの水蒸気流入の重要性を指摘している(e.g., Bryan and Fritsch 2000; Mechum et al. 2002)。日本の梅雨期や夏季に大雨をもたらす降水システムも組織

化しているものが多いことを踏まえると、自由対流圏の水蒸気流入の重要性は無視できない。実際に、いくつかの日本域の大雨事例の研究では、自由対流圏の水蒸気的重要性が指摘されている(e.g., Hirota et al. 2016)。

一方、日本域に大雨をもたらす降水システムの解析では境界層の水蒸気流入の重要性が強調されることが多い(e.g., 気象庁 2020)。上で述べた背景を踏まえると、境界層だけでなく、自由対流圏まで考慮した水蒸気の状態の把握が重要である可能性が高い。しかしながら、過去の研究では大雨時の境界層と自由対流圏の水蒸気の寄与やその時間変化を定量的に調べられていない。

このような背景から、本研究では大雨の多い九州域を対象として、大雨に対する自由対流圏と境界層の水蒸気の寄与の時間変化を 21 年間分の再解析データを用いた統計解析で明らかにする。

2. 使用データと解析手法

解析には JRA55 再解析データ(水平解像度 $1.25^\circ \times 1.25^\circ$ 、6 時間間隔)を用いた。結果の解像度依存性を確認するために、気象庁メソスケールモデル(MSM)初期値データ(水平解像度 $0.125^\circ \times 0.1^\circ$ 、3 時間間隔)でも同様の解析を行った。解析に対する台風の影響を除外するために、気象庁のベストトラックデータを用いた。解析対象期間は JRA55 に対しては 2000 年から 2020 年、MSM に対しては 2006 年から 2020 年の 6 月から 8 月とした。

大雨時は鉛直積算水蒸気フラックス収束の時系列を用いて検出した。鉛直積算水蒸気フラックス収束は水蒸気収支の式

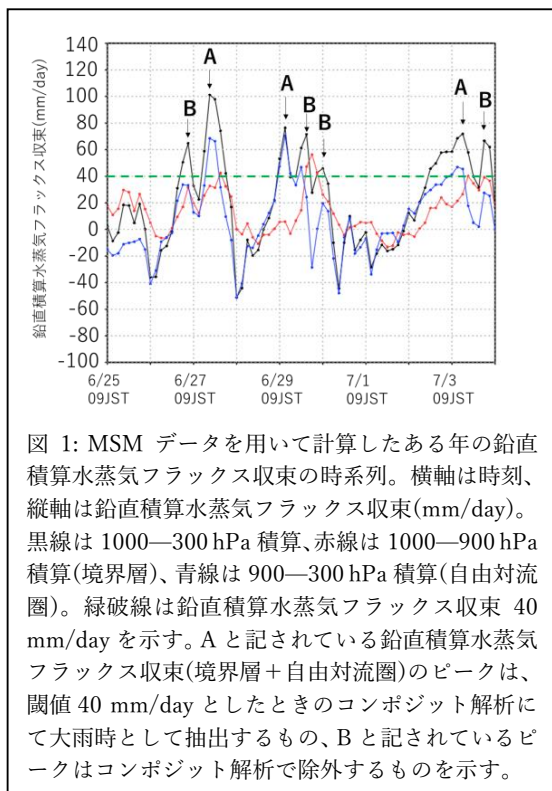


図 1: MSM データを用いて計算したある年の鉛直積算水蒸気フラックス収束の時系列。横軸は時刻、縦軸は鉛直積算水蒸気フラックス収束(mm/day)。黒線は 1000—300 hPa 積算、赤線は 1000—900 hPa 積算(境界層)、青線は 900—300 hPa 積算(自由対流圏)。緑破線は鉛直積算水蒸気フラックス収束 40 mm/day を示す。A と記されている鉛直積算水蒸気フラックス収束(境界層+自由対流圏)のピークは、閾値 40 mm/day としたときのコンポジット解析にて大雨時として抽出するもの、B と記されているピークはコンポジット解析で除外するものを示す。

$$\frac{\partial PW}{\partial t} = \frac{1}{g} \int (-\nabla \cdot q\vec{v}) dp - P + E$$

において、可降水量の時間変化と蒸発量が小さい場合に降水量と等価になる。ここで、PW は可降水量、t は時間、g は重力加速度、q は混合比、 \vec{v} は水平風ベクトル、P は降水量、E は蒸発量を示す。本研究では、梅雨前線近傍は大気が非常に湿っていると考えられるために蒸発量は他と比べて小さい、として E は無視する。また、左辺は鉛直積算水蒸気フラックス収束と比較して平均的には小さいので、大雨の検出の際には考慮しない。

鉛直積算水蒸気フラックス収束は、九州域(128.75E—132.5E, 30N—35N)に西または南から流入する水蒸気フラックスから、北または東に流出する水蒸気フラックスを引いたものを鉛直積算することで計算した。計算されたフラックス収束の時系列の一例を図 1 に示す。計算されたフラックス収束が閾値(20 mm/day または 40 mm/day)以上のピークを持つ時刻を大雨時として定義した。この

時刻を中心として大雨時のコンポジット解析を行う。水蒸気フラックス収束のピーク時刻前後 24 時間以内にピーク値よりも大きな別のピークが存在する場合(図 1 中で B と記されたピーク)や、ピーク時刻に 123.75E—137.5E, 25N—40N の範囲内に台風中心が存在する場合は、コンポジット解析から除外する。JRA55 では 21 年間で 40 mm/day 閾値で 175 事例、20 mm/day 閾値で 334 事例が抽出された。MSM 初期値では 15 年間で 40 mm/day で 174 事例、20 mm/day 閾値 318 事例が抽出された。

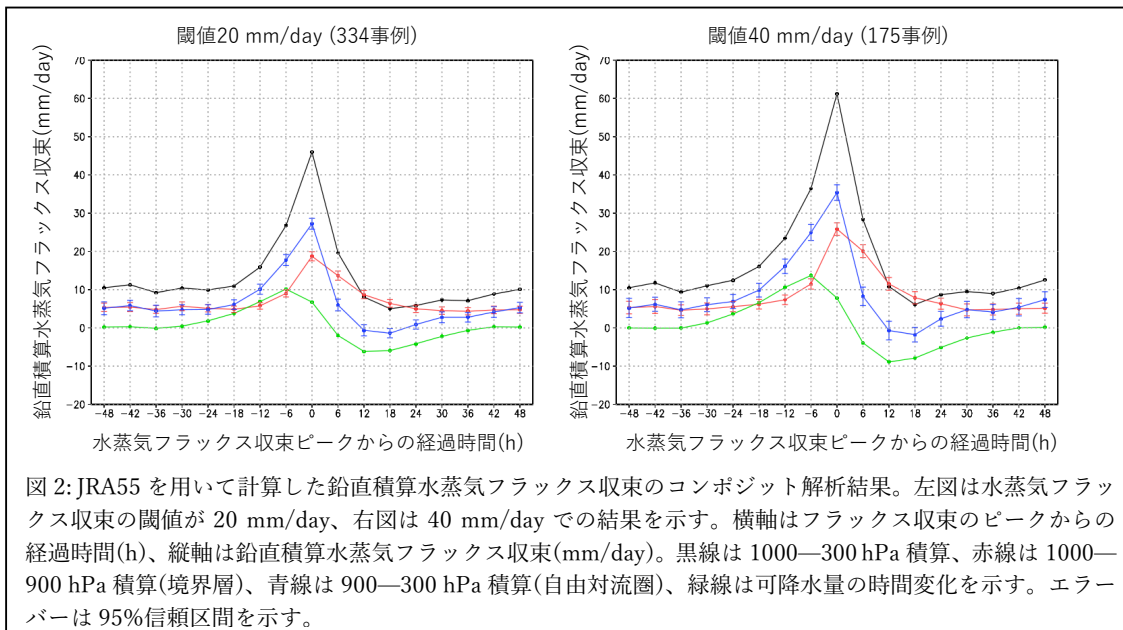
3. 結果

図 2 に JRA55 を用いたコンポジット解析の結果を示す。大雨時(水蒸気フラックス収束ピーク時)では、どちらの閾値でも自由対流圏(900—300 hPa)の水蒸気収束のほうが境界層(1000—900 hPa)の水蒸気収束よりも有意に大きい。これは、大雨時の水蒸気の多くが自由対流圏から供給されていることを示唆する。

大雨時よりも前では、どちらの閾値でも、自由対流圏の水蒸気フラックス収束が先に増加し始め、その後に境界層の水蒸気フラックス収束が増加している。自由対流圏の水蒸気フラックス収束は、大雨をもたらす降水システムによる降水の結果と解釈されることもあるが、図 2 では明らかに大雨時よりも前に増加している。そのため、この結果は自由対流圏の水蒸気収束が大雨をもたらす環境場を整える役割を持っていると解釈できる。

水蒸気フラックス収束の増加は、境界層ではどちらの閾値でも -12 h 付近から始まる。一方、自由対流圏の水蒸気フラックス収束は 20 mm/day 閾値では -18 h 付近、40 mm/day 閾値では -24 h 付近から始まる。すなわち、より多量の降水をもたらす事例で自由対流圏の水蒸気フラックス収束がより速い段階で始まっている。

水蒸気フラックス収束のピーク後では、



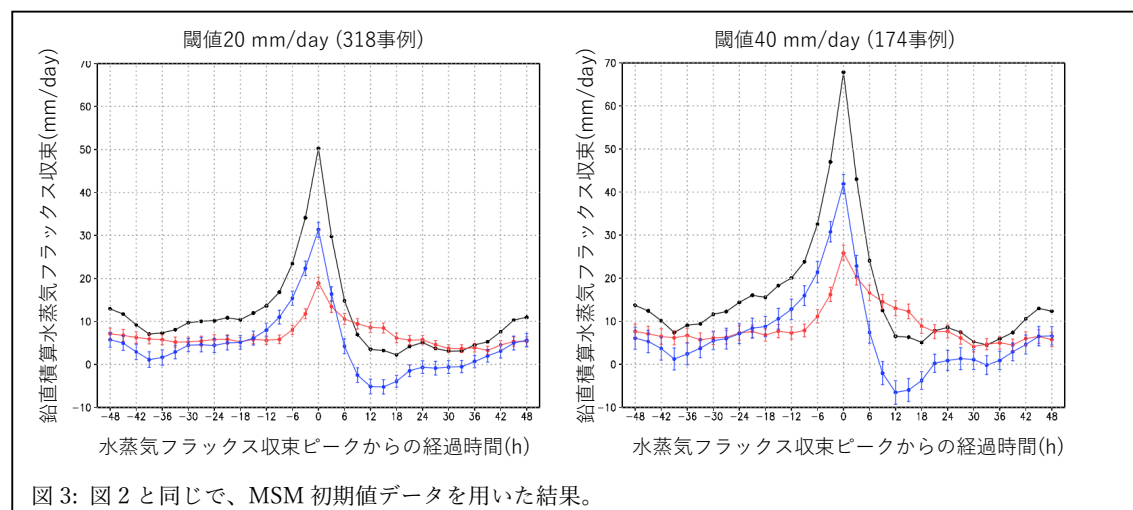
自由対流圏の水蒸気フラックス収束は急減し、ピークの 12 時間後にはどちらの閾値でも発散となっている。境界層水蒸気フラックス収束が支配的になり、全水蒸気フラックス収束の大部分を担う。

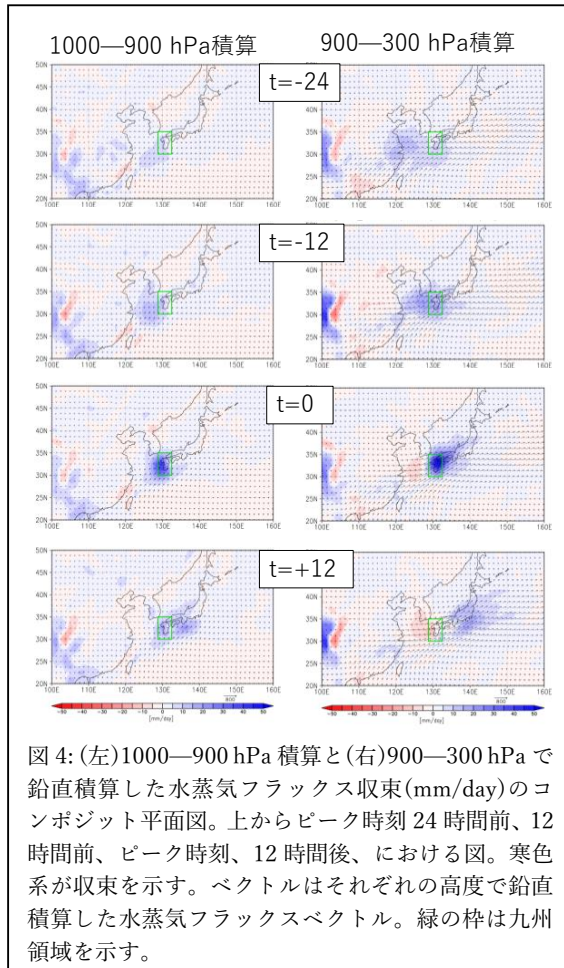
これらの結果は、MSM 初期値を用いたコンポジットでも同様の結果が得られており(図 3)、結果に解像度依存性がないことを示唆している。加えて、図 1 で例示した事例においても、同様の傾向が確認できる。

図 2 には九州領域内で平均した可降水量の時間変化の時系列も示している。可降水量は水蒸気フラックス収束のピーク時刻の直

前(-6 h)に増加の最大を示している。これは、大雨時の直前まで大気が加湿化されていることを示唆する。可降水量の時間変化の発展は、自由対流圏の水蒸気フラックス収束の発展と対応しているので、大雨よりも前の自由対流圏の水蒸気フラックス収束の一部は、大気の加湿化に寄与していると考えられる。

上記の結果は、水蒸気フラックス収束の平面図でも確認できる(図 4)。自由対流圏の水蒸気フラックス収束は、ピーク時刻の 24 時間前には上海付近に中心があり、時間とともに西進する。ピーク時刻では九州領域から西日本にかけてフラックス収束が分布する。ピ





ーク時刻の 12 時間後には収束域は東日本に位置し、九州領域のフラックスは発散している。境界層の水蒸気フラックス収束は、24 時間前から 12 時間前にかけて九州西方の東シナ海上に分布する。ピーク時には九州領域から九州西方に位置しており、自由対流圏の収束よりも西側に分布している。ピーク時刻の 12 時間後でも九州領域付近に収束域が分布している。

4. まとめ

九州域の大雨と関係する水蒸気フラックス収束のピークを合わせたコンポジット解析を行った。大雨時の水蒸気収束は、自由対流圏のほうが境界層よりも有意に多く、自由対流圏の水蒸気が大雨に大きく寄与していることが明らかになった。また、大雨に先行

して自由対流圏の水蒸気フラックス収束がまず増加し、その後、境界層の水蒸気フラックス収束が増加することが明らかになった。これは、自由対流圏の水蒸気フラックス収束が、大雨の結果ではないことを示唆している。大雨に先立って自由対流圏で水蒸気が増えることは、先行研究が指摘している大雨をもたらす組織化した降水システムの形成に自由対流圏の水蒸気が重要であることと整合的である。これらの結果は、自由対流圏の水蒸気の状態を把握することが、豪雨の生じやすい環境場を把握することにつながり、豪雨の予測に貢献できる可能性を示唆する。

謝辞

本研究は、JAXA 降水ミッション、水と気候の大規模データ解析研究拠点、(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費 (JPMEERF20192004) の支援を受けて実施された。

参考文献

- 気象庁, 2020: 「令和 2 年 7 月豪雨」の特徴と関連する大気の流れについて. 15pp, <http://www.jma.go.jp/jma/press/2007/31a/r02gou.pdf>
- Bryan, G. H. and J. M. Fritsch, 2000: Moist absolute instability: The sixth static stability state. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 81, 1207–1230.
- Hamada, A., and Y. N. Takayabu, 2018: Large-scale environmental conditions related to midsummer extreme rainfall events around Japan in the TRMM region. *J. Climate*, 31, 6933–6945.
- Hirota, N., Y. N. Takayabu, M. Kato, and S. Arakane, 2016: Roles of an atmospheric river and a cutoff low in the extreme precipitation event in Hiroshima on 19 August 2014. *Mon. Wea. Rev.*, 144, 1145–1160.
- Mechem, D. B., R. A. Houze Jr., and S. S. Chen, 2002: Layer inflow into precipitating convection over the western tropical Pacific. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 128, 1997–2030.
- Yokoyama, C., Y. N. Takayabu, and S. Kanada, 2014: A contrast in precipitation characteristics across the Baiu front near Japan: Part I. TRMM PR observation. *J. Climate*, 27, 5872–5890.