

## 梅雨期における九州南部の降水の増加傾向について

安永 数明（富山大学）

### 1. はじめに

梅雨は、春季から夏季への移行期に東アジア域でみられる雨季を指し、九州から西日本にかけて停滞する前線で特徴づけられる。梅雨期には、前線活動の活発化によって集中豪雨が生じ、大規模な水・土砂災害を引き起こす場合がある。近年、地球温暖化に伴う気候変動が世界的に大きな問題となっている。日本においても例外でなく、梅雨期の豪雨等の気象災害に対する危機感が社会的に高まりつつある。

梅雨期の降水量に関して、今世紀初頭から4年前後の周期変動が顕在化していることが指摘されている（Fujiwara and Kawamura 2022）。また、より長期的な傾向として、1979年–2019年の41年間で九州南部の降水量が有意に増加していることも、幾つかの報告から明らかになってきた（例えば図1）。本研究では、その増加の原因について明らかにすることを目的とする。

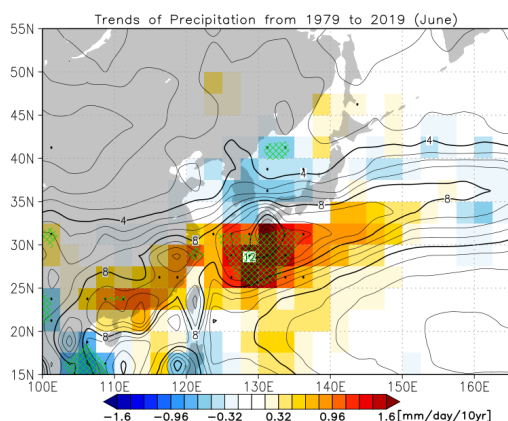


図1：6月の平均降水強度（コンター）と長期傾向（色塗り）。5%以下の有意水準の領域が黒色のドットで、2%以下の有意水準の領域が緑色のハッチで表されている。

### 2. 使用データと解析手法

気象変数に関しては、ヨーロッパ中期予報センター（European Center for Medium-Range Weather Forecasts: ECMWF）が提供する再解析データ ERA-Interim とその12時間予報値を使用した。水平分解能は経度・緯度方向共に  $0.75^\circ$  で、時間分解能は6時間である。降水に関しては、Global Precipitation Climatology Project (GPCP)で提供されている衛星観測から見積もられた月平均降水量を用いた。このデータの水平解像度は  $1^\circ$  である。

本研究では、梅雨期の前半にあたる6月の降水量の1979年から2019年までの41年間の降水量の変化を調べる。ここでは単純な線型的な傾向を最小二乗法から計算している。統計的有意性については、両側のt検定を行い、その際の自由度は41年分のデータから39としている。

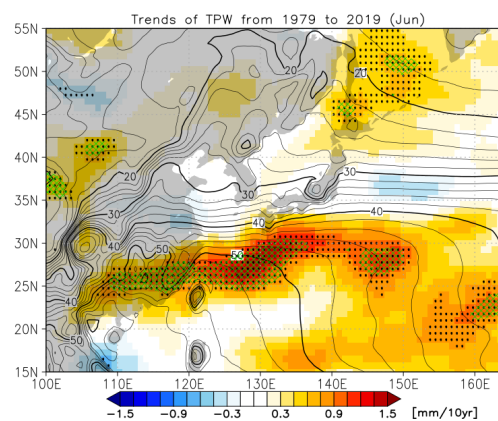


図2：図1と同じ。ただし鉛直積算した水蒸気量（可降水量）。

### 3. 結果

図2は、同じ期間の鉛直積算した水蒸気量の長期傾向である。中国の南方から九州南部にかけて増加傾向を示しており、降水量の変化とよく一致している。この水蒸気量の増加は、水平移流というよりは、鉛直移流と地表面からの潜熱 Flux で説明される（図3，図4，図5）。ここで鉛直移流の変化に関しては、下層の水蒸気増加というよりは、上昇流の強化に関連していることが分かる（例えば図6）。しかし、この鉛直流の変化は降水量の増加の原因と結果を共に含んだものになっており、因果関係は明らかでない。このことから、“力学的な鉛直流”の長期変化を調べたものが、図7である。ここで“力学的な鉛直流”と称するものは、次式で表される $\omega$ 方程式を解析的に解いたものである。

$$\begin{aligned} \frac{R\bar{\Gamma}}{p^2} \nabla^2 \omega + f^2 \frac{\partial^2 \omega}{\partial p^2} \\ = \frac{\partial}{\partial p} \{ f \mathbf{v}_\psi \cdot \nabla (\zeta + f) \} \\ - \nabla^2 \left\{ f \mathbf{v}_\psi \cdot \nabla \left( \frac{\partial \psi}{\partial p} \right) \right\} \end{aligned}$$

ここでは速度場を回転成分 ( $\mathbf{v}_\psi$ ) と発散成分 ( $\mathbf{v}_\chi$ ) に分けて、 $\mathbf{v} \approx \mathbf{v}_\psi$  と仮定している。また  $\psi$  は流線関数を表し、 $\zeta = \nabla^2 \psi$  である。この方程式の導出とその解析的な解法は、Dostalek et al. (2017) に詳述されている。古典的には、 $\mathbf{Q}$  ベクトルを用いた下記の方程式が用いられることが多いが、Dostalek et al. (2017) の手法の利点は、基準緯度を仮定する必要がなく、全球にわたって解くことになるので、南北の境界条件の設定やその影響を考える必要がないことである。

$$\sigma \nabla_h^2 \omega + f_0^2 \frac{\partial^2 \omega}{\partial p^2} = -2\mathbf{V} \cdot \mathbf{Q} + f_0 \beta \frac{\partial v_g}{\partial p}$$

ここで、 $\mathbf{Q} = \left( -\frac{R}{p} \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{V}_g \cdot \nabla_h T, -\frac{R}{p} \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{V}_g \cdot \nabla_h T \right)$  である。

図7は、解析的に求めた力学的上昇流の長期変動である。降水量の増加傾向に良く対応した領域で上昇流の強化がみられることが分かる。このことから、6月の九州南部の降水量の増加傾向は、力学的な上昇流の強化に影響を受けたものであることが示唆される。しかし、力学的な鉛直流の大きさは、鉛直流全体の3分の1程度である。これがどのように降水の強化につながっているかについては良く分かっていないが、最近の研究では中層への水蒸気輸送において重要な役割を果たしていることが指摘されている（例えば、Yokoyama et al. 2017 など）。

また潜熱 Flux に関しては、海面温度が上昇傾向を示す領域と良く一致する（図略）ことから、風速というよりは海面温度の変化で説明できる。図8は、鉛直流の変化を、降水量が増加している緯度付近で東西—鉛直断面で示したものである。東経130度付近の中上層における上昇流の強化傾向は、力学的に見積もられたものと良く一致している（図9）。しかし、注意深く比較すると東西方向に若干のずれが確認できる。特に東経120度から130度の下層の上昇流に関しては、力学的なものでは説明できない。この経度は、海面温度の上昇傾向と共に水蒸気供給も顕著に増加している場所に相当することから、潜熱 Flux の増加も九州南部の降水量増加に寄与している可能性が強く示唆される。

### 4. 考察

ここでは、力学的上昇流の強化傾向の原因について考察する。 $\omega$ 方程式からは、渦度移流と温度移流が力学的な上昇流の形成に寄与することが分かる。一方で、それらは一般にお互いに相殺し合う性質を持つ。このことから上記の $\omega$ 方程式において、実際にはそ

それぞれの寄与を統合したものを数値的に解いており、これを再度分解し直すことは簡単ではない。このことから先行研究の Sampe and Xie (2010)に従い温度移流に着目する。具体的には、乾燥静的エネルギーの式

$$\frac{\partial \bar{s}}{\partial t} = -\overline{v_h \cdot \nabla_h s} - \overline{\omega \frac{\partial s}{\partial p}} + \overline{Q_d}$$

において、 $\frac{\partial \bar{s}}{\partial t} \sim 0$ とし、 $\overline{Q_d}$ を無視した

$$\overline{\omega_d \frac{\partial s}{\partial p}} = -\overline{u \frac{\partial s}{\partial x}} - \overline{v \frac{\partial s}{\partial y}}$$

を用いて、力学的な鉛直流の変化について議論を行う。 $\langle \bar{s} \rangle$ を月平均した乾燥静的エネルギーの気候値とすると、一般的に

$$\overline{\omega_d \frac{\partial s}{\partial p}} \approx \overline{\omega_d} \left( \frac{\partial \langle \bar{s} \rangle}{\partial p} \right)$$

であるので

$$\overline{\omega_d} = \frac{\left\{ -\overline{u \frac{\partial s}{\partial x}} - \overline{v \frac{\partial s}{\partial y}} \right\}}{\left( \frac{\partial \langle \bar{s} \rangle}{\partial p} \right)}$$

と上昇流が簡略的に求められる。図 10 は、こうして求めた鉛直流の長期変動を示しているが、図 7 の力学的上昇流の変化をおおよそ再現できることが分かる。また、上式の右辺に関して、

$$-\overline{u \frac{\partial s}{\partial x}} - \overline{v \frac{\partial s}{\partial y}} = \overline{u} \frac{\partial \bar{s}}{\partial x} + \overline{v} \frac{\partial \bar{s}}{\partial y} + \left( \overline{u' \frac{\partial s'}{\partial x}} + \overline{v' \frac{\partial s'}{\partial y}} \right)$$

と分解し、この右辺第 1 項をさらに

$$\left[ \frac{\partial \langle \bar{s} \rangle}{\partial x} + \overline{v} \frac{\partial \langle \bar{s} \rangle}{\partial y} \right] + \left[ \overline{u} \frac{\partial (\bar{s} - \langle \bar{s} \rangle)}{\partial x} + \overline{v} \frac{\partial (\bar{s} - \langle \bar{s} \rangle)}{\partial y} \right]$$

と分解すると、図 7 の力学的上昇流の変化は、第 1 項でおおよそ説明できる (図 11)。即ち、太平洋高気圧の強化による地衡風の強化が、九州南部の降水量の増加に寄与していると考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、九州南部における梅雨期の前半 (6 月) の降水量増加傾向について調べた。鉛直積算した水蒸気の収支式から、降水量の増加は鉛直移流と潜熱 Flux の強化に関連し

ていることが分かった。また鉛直移流は、力学的な上昇流の強化と関連しており、更に力学的な上昇流の強化は、太平洋高気圧の強化に起因したものであることが示唆された。

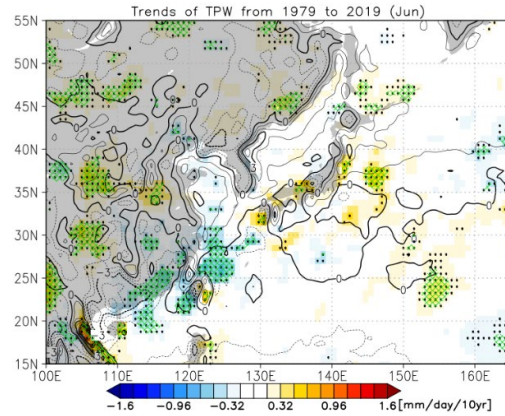


図 3: 図 1 と同じ。ただし鉛直積算した水蒸気の水平移流。

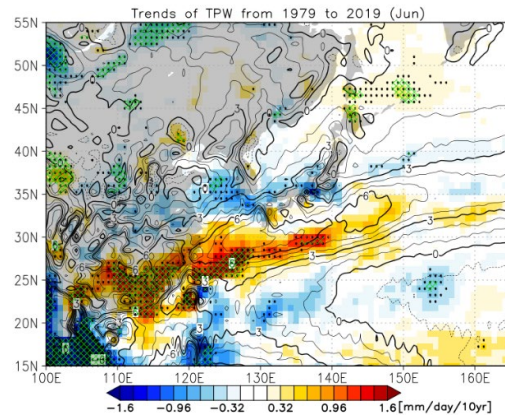


図 4: 図 1 と同じ。ただし鉛直積算した水蒸気の鉛直移流。

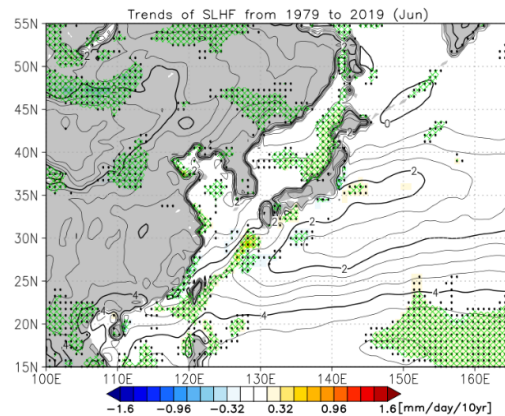


図 5: 図 1 と同じ。ただし潜熱 Flux。



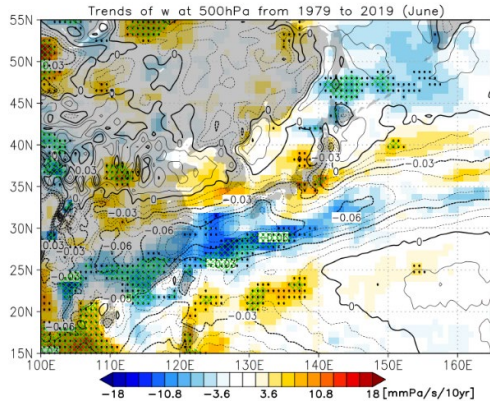


図 6: 図 1 と同じ。ただし 500hPa 高度の鉛直流。

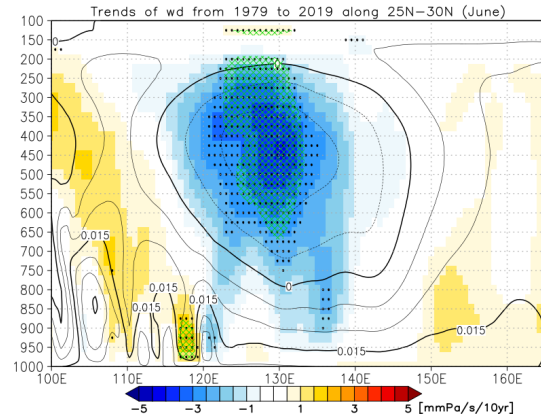


図 9: 図 8 と同じ。ただし力学的な上昇流。

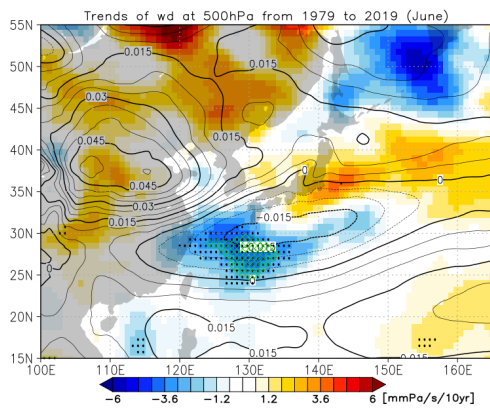


図 7: 図 1 と同じ。ただし 500hPa 高度の力学的な鉛直流。

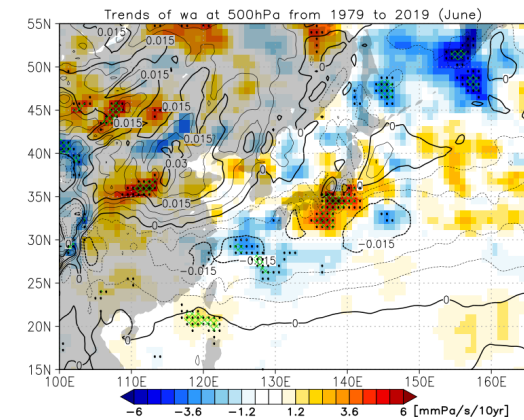


図 10: 図 1 と同じ。ただし乾燥静的エネルギーから求めた鉛直流 (本文参照)。

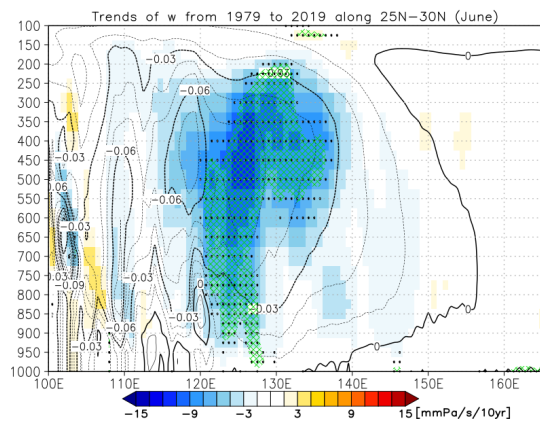


図 8: 緯度 25N~30N で平均した鉛直流の月平均値 (コンター) とその長期変化 (色塗り)。統計的に有意な領域に関しては図 1 に準じている。

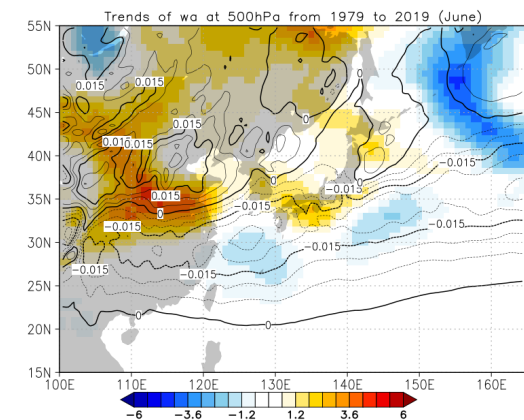


図 11: 図 1 と同じ。ただし乾燥静的エネルギーの気候値から求めた鉛直流 (本文参照)。