

研究開発助成 研究概要

原因となる気象システムによる降水の分類アルゴリズムの開発とそれを用いた将来の日本域における極端降水の要因特定に関する研究

東京大学生産技術研究所 特任助教 内海信幸

概要：

最新の将来気候シミュレーション出力から降水の原因となる気象システムを客観的に検出し、降水をその原因別に分類するアルゴリズムを開発した。このアルゴリズムを将来気候シミュレーション実験 HAPPI の出力群（5 アンサンブル）に適用し、日本域において降水（年総量および極端降水）の変化がどのような気象システムによってもたらされるかを定量的に評価した。解析対象としたのは将来気候シミュレーションプロジェクトである HAPPI が提供する現在気候および将来気候（産業革命前から 1.5°C および 2.0°C 上昇時）である。将来気候はそれぞれパリ協定で努力目標および目標とされている気温上昇量である。

特に日本域に着目すると、日本全域の平均では総降水量の明確な増加がみられるが、日本域内の地域別にみると総降水量の変化には不確実性が大きかった。極端降水については日本全域平均、南西諸島、北西日本、北海道などでは極端降水の増加が比較的確確であった。南西諸島では熱帯低気圧および温帯低気圧、北西日本では温帯低気圧および夏季モンスーン、北海道では温帯低気圧による極端降水の増加が主な要因であった。

総降水量および極端降水のどちらについても 1.5°C 上昇時と 2.0°C 上昇時で大きな差が確認できなかった。これはパリ協定における両気温目標は、少なくとも日本域の降水の観点においては大きな差が無い可能性を示唆している。ただしこうした結果は比較的少数の予測アンサンブルを用いたものであり、今後はより多数のアンサンブルを用いた解析が求められる。

キーワード： 降水、気象システム、気候変動

1. 研究の背景と目的

降水は熱帯低気圧や前線など様々な気象システムによってもたらされる。原因となる気象システムが異なれば、その予測手法や予測リードタイムも異なる（例えば熱帯低気圧と局地的な熱雷など）。気候変動下における将来の極端降水をもたらす主要な気象システムを特定することができれば、気候変動による水害リスクへの適応策立案においてどのような気象システムに着目した降水予測手法に優先的に投資すべきか、その判断材料を提供できる。本研究では原因となる気象システムによって降水を分類するアルゴリズムを用いて日本域における降水（総量および極端降水）の変化を原因となる気象システム別に調べ、各気象システムの相対的な重要性を明らかにすることを目的とする。

2. 手法

(1) 対象領域

本研究は日本域を対象とした。日本域は

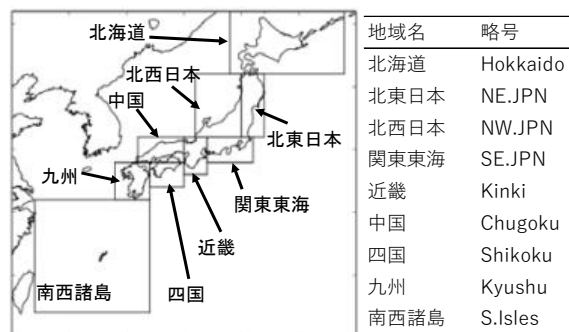


図1に示す9領域に分けた。

(2) 将来気候シミュレーションデータ (HAPPI データ)

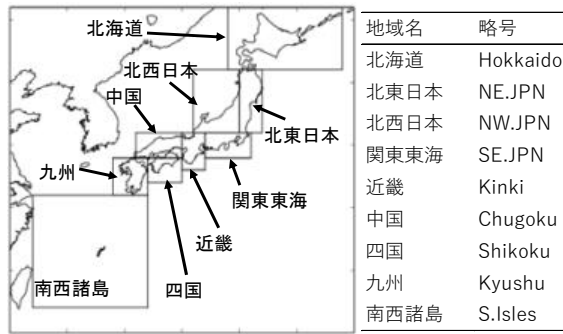


図1 対象領域

パリ合意において世界の平均気温上昇量を産業革命前と比較して 2.0℃未満に抑えることが合意され、また 1.5℃未満の上昇とすることが努力目標とされた。世界の複数の研究機関が共同で気候予測実験を行う Half a degree Additional warming, Prognosis and Projected Impacts (HAPPI) プロジェクト (<http://www.happimip.org/>) は、1.5℃および2.0℃上昇時の気候状態の大規模アンサンブル予測情報を提供するものである。本研究ではこのうち、国立環境研究所が実験を行い、解析開始時点で唯一利用可能であった全球気候モデル MIROC5 による予測情報を用いた。空間解像度は緯度経度約 1.4 度であり、気象システムの検出および降水の分類は 6 時間毎に行った。本研究では現在気候および将来気候それぞれ 5 アンサンブルを用いた。1 アンサンブルあたりの予測情報は現在気候、1.5℃上昇時、2.0℃上昇時それぞれ 10 年である。

(3) 気象システム分類カテゴリー

まず、気象システムの分類カテゴリーの検討を行った。候補は熱帯低気圧、温帯低気圧（中心+前線）、梅雨前線、地形性降雨、Atmospheric river とした。

梅雨前線は東アジア夏季モンスーンの一部と解釈される場合が多い¹⁾。本研究では全球モデルによるシミュレーション結果を用いることから、全球解析への拡張性を考慮し、梅雨は「夏季モンスーン」（以下、単にモンスーンと呼ぶ）の降水として検出することとした。

Atmospheric River は水蒸気量が大きい領域（高水蒸気領域）が熱帯域から中緯度まで細く長く「川」のようにのびて見える現象としてとらえられ、特に米国西海岸や西ヨーロッパで極端降水の原因として注目されている。Atmospheric river は熱帯域から水蒸気が輸送される特異な現象と見えるが、近年では温帯低気圧に伴う寒冷前線前方の暖域における高水蒸気量大気が Atmospheric river の高水蒸気量を生み出しているとされ、温帯低気圧の移動によってこの高水蒸気域の軌跡が「川」のように長く伸びて見えるとの研究が報告されている²⁾。温帯低気圧と Atmospheric river

を分けてそれぞれの降水量を分類する場合、両者のあいだで降水量の「取り合い」が生じる可能性が高い。そこで本研究では Atmospheric river に伴う降水は温帯低気圧に伴う降水に含まれるとして分類を行うこととした。

地形性降水は山がちな日本においては極端降水の要因の一つである。本研究では全球気候モデルによる気候予測情報を活用するが、全球気候モデルの解像度（緯度経度 1.4 度程度）は地形性降雨の表現には不十分である。より高い解像度の予測情報の活用も考えられるが、本研究ではパリ協定の目標とされた 1.5℃および 2.0℃気温上昇時の全球気候モデルによる予測情

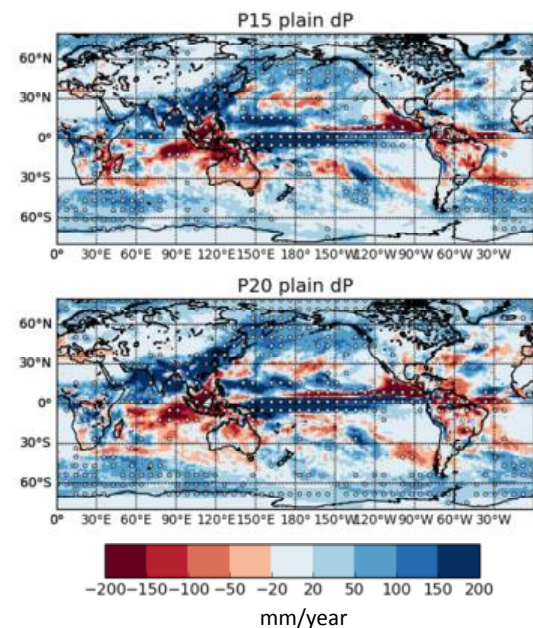


図2 全球降水量の将来変化。(上) 1.5℃上昇時 (下) 2.0℃上昇時。ハッチは有意 (5%有意) な変化が見られた地点を示す。

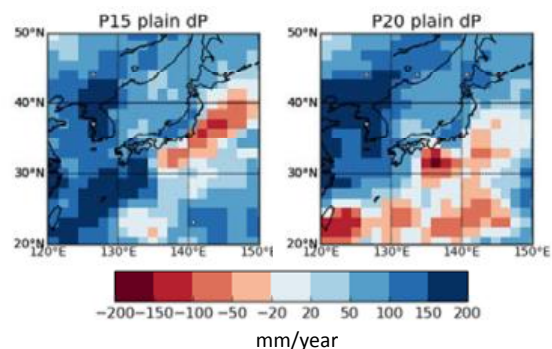


図3 日本域の総降水量の将来変化。(左) 1.5℃上昇時 (右) 2.0℃上昇時。ハッチは有意 (5%有意) な変化が見られた地点を示す。

報を利用することを重視し、地形性降雨は明示的に検出しないこととした。

以上の検討により、本研究では熱帯低気圧、温帯低気圧（中心+前線）、モンスーンの検出を行い、それらに含まれない降水は「その他」に分類する。

(4) 気象システム別の降水分類

気象システムのうち、熱帯低気圧中心、温帯低気圧中心、前線は Utsumi et al. (2016)³⁾の手法を改良し、解析対象とした気候シミュレーション出力 (HAPPI データ) に適用可能なアルゴリズムを開発した。

モンスーンについては Zeng and Lu [2004]⁴⁾および Zhang and Wang [2008]⁵⁾の手法をもとに検出手法を開発した。これは降水量の季節変化を元に全球の夏季モンスーン域を決定し、さらにモンスーン域内の各地点で可降水量の変化を元にモンスーンのオンセットとリトリートを決定

するものであり、本研究では大量の気候データへの適用可能性を考慮し、可降水量に代えて3高度における水蒸気量（比湿）を用いて日毎にモンスーン期間内であるかどうかを判断するアルゴリズムを開発した。なお、3高度の比湿の変動が可降水量の変動をよくとらえていることは確認済みである。

開発したアルゴリズムは再解析データ JRA-55 に適用し、各気象システムの全球分布を良くとらえていることを確認した。

検出した気象システムから一定範囲内（熱帯低気圧中心および温帯低気圧中心：1000km、前線：500km、モンスーン：同一グリッド）の降水を各気象システムに伴う降水とした。これらに含まれないものは「その他」の降水とした。また、温帯低気圧中心と前線に伴う降水はまとめて「温帯低気圧」の降水として解析を行った。

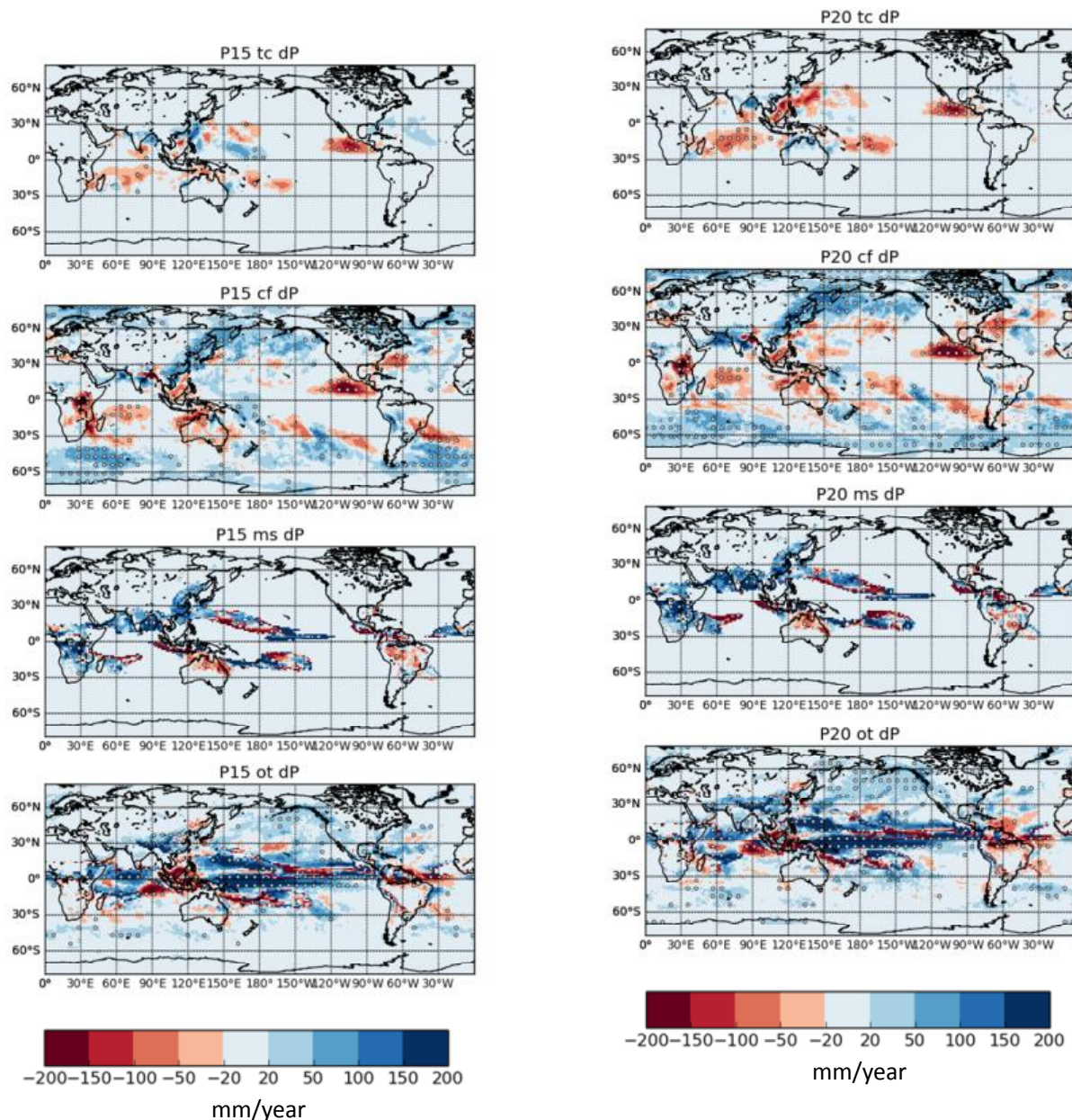


図4 1.5℃上昇時の気象システム別降水量の将来変化。

(1 段目) 熱帯低気圧、(2 段目) 温帯低気圧、(3 段目) モンスーン、(4 段目) その他の降水。ハッチは有意 (5%有意) な変化がみられた地点を示す。

図5 2.0℃上昇時の気象システム別降水量の将来変化。

(1 段目) 熱帯低気圧、(2 段目) 温帯低気圧、(3 段目) モンスーン、(4 段目) その他の降水。ハッチは有意 (5%有意) な変化がみられた地点を示す。

3. 結果

以下、図で示す降水量およびその変化はすべて5アンサンブル平均である。

(1) 総降水量の変化

全球の総降水量変化(図2)を1.5℃上昇時と2.0℃上昇時と比較すると両者でおおむね同様のパターンを示している。地点ごとの変化量は必ずしも2.0℃上昇時が大きいわけではない。有意な変化が確認された地域をハッチで示しているが、日本周辺域は有意検定の観点からみると明確な降水量変化が確認されにくい地域であることがわかる。

日本域を拡大すると(図3)、日本の陸域はおおむね総降水量が増加し、太平洋側の一部沿岸および海上において総降水量の減少が予測されている。ただし有意検定の観点から見ると有意な変化を示す地点は少ない。これは1.5℃および2.0度上昇時点での日本周辺の降水量変化の予測の不確実性が大きいことを示している。

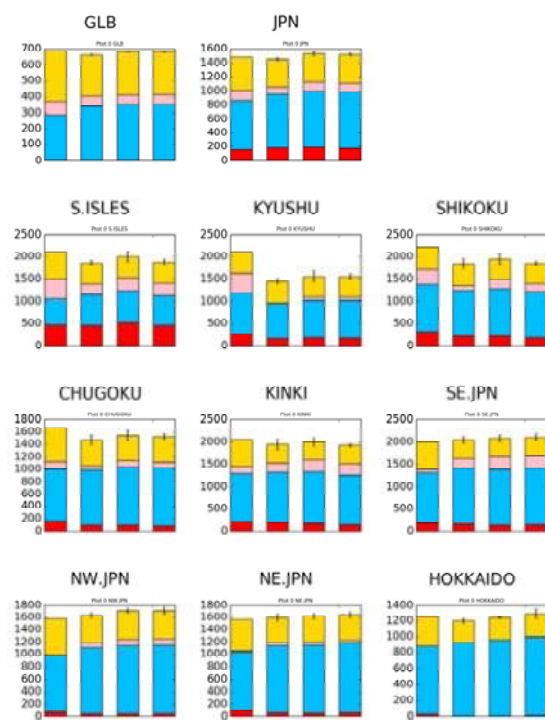


図6 日本域における総降水量(mm/year)。

各パネルのグラフは左から再解析データ、現在気候、1.5℃上昇時、2.0℃上昇時。赤色：熱帯低気圧、水色：温帯低気圧、桃色：モンスーン、黄色：その他。エラーバーは5アンサンブルの標準偏差。GLBは全球、JPNは日本全域。その他の地域は図1参照。

(2) 気象システム別の総降水量変化

気象システム別の総降水量変化を図4(1.5℃上昇時)および図5(2.0℃上昇時)に示す。

熱帯低気圧に伴う降水量は南インド洋、インド亜大陸南部、北東太平洋で減少し、ベンガル湾、南シナ海沿岸部、東シナ海沿岸部で増加傾向を示している。ただし変化が明確(5%有意)であるのは南インド洋や北東太平洋など一部である。

温帯低気圧に伴う降水量は現在気候におけるストームトラックの極側で増加、赤道側で減少の傾向が見られる。中～高緯度における温帯低気圧の降水量の増加は、特に2.0℃上昇時は明確である。

夏季モンスーンに伴う降水量は海大陸(Maritime Continent)の南部からオーストラリア北部や南米の一部を除き、増加傾向であるが、有意な変化が確認できる地域は少なく、不確実性が大きい。

「その他」の降水は海大陸(Maritime Continent)の南部や南米の熱帯域の一部で減少、それ以外では増加傾向である。

図6は現在および将来の日本域の総降水量を示したも

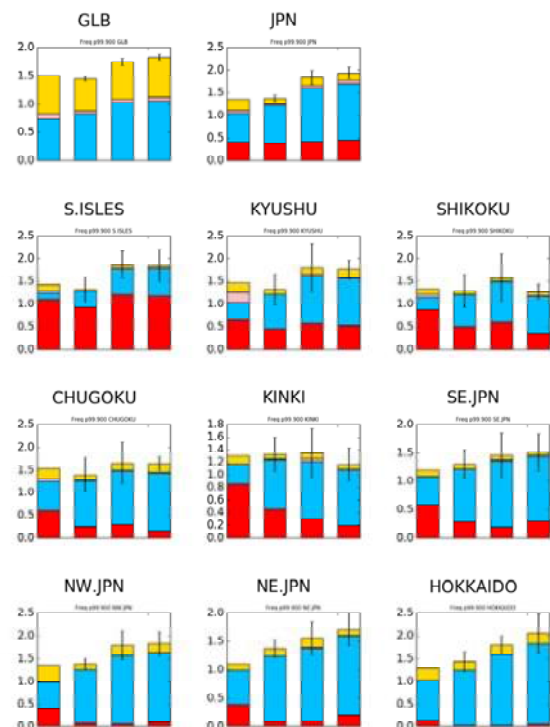


図7 日本域における極端降水(現在気候 99.9 パーセントイル6時間降水量以上の降水)の頻度(times/year)。

各パネルのグラフは左から再解析データ、現在気候、1.5℃上昇時、2.0℃上昇時。赤色：熱帯低気圧、水色：温帯低気圧、桃色：モンスーン、黄色：その他。エラーバーは5アンサンブルの標準偏差。GLBは全球、JPNは日本全域。その他の地域は図1参照。

のである。日本全体で平均すると総降水量は増加するが、1.5℃および2.0℃上昇時で大きな差は確認できない。国内の地域別にみても、1.5℃および2.0℃上昇時での降水量で明確な差は確認されない。北海道などでは温帯低気圧の降水が増加する傾向があるが、他の地域では各気象システムの相対的な寄与率に大きな変化はない。

(3) 極端降水の変化

現在気候における99.9パーセンタイル6時間降水量を計算し、それ以上の強度の6時間降水量を極端降水と定義した。

図7は現在および将来の日本域の極端降水の頻度を示したものである。南西諸島の極端降水の増加は主に熱帯低気圧と温帯低気圧の極端降水の増加による。北西日本と北海道では温帯低気圧が極端降水の増加の主な原因である。

他の地域では近畿地方を除き増加傾向であるが、その変化分は現在気候におけるアンサンブル間の標準偏差の幅を超えるものではない。

1.5℃上昇時と2.0℃上昇時で比較すると、両者で極端降水の頻度に明確な差は確認されない。

4. 考察とまとめ

全球および日本域を対象に、産業革命前から1.5℃上昇時と2.0℃上昇時で原因となる気象システム別に降水量の将来変化を調べた。

特に日本域に着目すると、日本全域の平均では総降水量の明確な増加がみられるが、日本域内の各地域別にみると総降水量の変化には不確実性が大きかった。極端降水については日本全域平均、南西諸島、北西日本、北海道などでは極端降水の増加が比較的明確であった。南西諸島では熱帯低気圧および温帯低気圧、北西日本と北海道では温帯低気圧による極端降水の増加が主な要因であった。

総降水量および極端降水のどちらについても1.5℃上昇時と2.0℃上昇時で大きな差が確認できなかった。これはパリ協定における両気温目標は、少なくとも日本域の降水の観点においては大きな差が無い可能性を示唆している。

本研究では解析開始時に入手可能であった単一モデルの結果を対象としており、また計算機資源の観点から5アンサンブルのみを用いた。このため、降水量変化の有意性や不確実性に関しては限定的な評価にとどまっている。今後はモデル数およびアンサンブル数を増やし将来変化のより堅牢な不確実性評価を行う予定である。

5. 参考文献

- 1) Wang, B., Z. Wu, J. Li, J. Liu, C. Chang, Y. Ding, and G. Wu, 2008: How to Measure the Strength of the East Asian Summer Monsoon. *J. Climate*, 21, 4449-4463, doi: 10.1175/2008JCLI2183.1.
- 2) Dacre, H.F., P.A. Clark, O.O. Martinez-Alvarado, M.A. Stringer, and D.A. Lavers, 2015: How Do Atmospheric Rivers Form?. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 96, 1243-1255, doi: 10.1175/BAMS-D-14-00031.1.
- 3) Utsumi, N., H. Kim, S. Kanae, and T. Oki (2016), Which weather systems are projected to cause future changes in mean and extreme precipitation in CMIP5 simulations?, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, 10, 522-10, 537, doi:10.1002/2016JD024939.
- 4) Zeng, X. and E. Lu, 2004: Globally Unified Monsoon Onset and Retreat Indexes. *J. Climate*, 17, 2241-2248, doi: 10.1175/1520-0442(2004)017<2241:GUMOAR>2.0.CO;2.
- 5) Zhang, S. and Wang, B. (2008), Global summer monsoon rainy seasons. *Int. J. Climatol.*, 28: 1563-1578. doi:10.1002/joc.1659