

高解像度のラージアンサンブルシミュレーションによって見積もられる 局所的な大雨の発生確率の季節予測可能性

今田 由紀子（気象研究所）、川瀬 宏明（気象研究所）

1. はじめに

近年、連続する豪雨災害が日本国内で多大な被害をもたらしている。このような局所的な豪雨の発生確率を数カ月先まで予測することは、これまで困難であるとされてきた。その理由の一つとして、豪雨の発生に重要な循環場は中緯度域の大気ノイズに大きく影響を受けることから、S/N 比が低くなることが挙げられる。また、局所的な豪雨にはメソスケールの降水システムや地形など、一般的に季節予測で用いられている気候モデルでは再現が難しい細かいスケールの要素が重要となってくることも、予測が難しい理由の一つである。図 1 は、一般的に季節予測に用いられる気候モデルの仕様に近い条件で、8 月に 50 mm/日を超える日数の潜在的予測可能性（計算方法は後述）を見積もったものである。有意な値を示すのは熱帯域に限られており、日本を含む中高緯度域では大雨の発生確率に対する季節予測が困難であることが

分かる。

本研究では、もし、季節予測のアンサンブルサイズを増やして S/N 比を増加させ、さらにモデルを高解像度化してメソスケールの気象や細かい地形が再現できるようになった場合に、日本周辺の大雨の予測可能性がどの程度向上するかを調べた。「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）」（Mizuta et al. 2017）の地域気候モデル NHRCM（水平解像度 20 km）による 100 メンバーの過去再現実験の結果を用いて、東アジアで発生する局所的な大雨の頻度を対象に、季節予測のスキルの上限値となる潜在的予測可能性を見積もる試みを行った。さらに、親モデルである全球モデル MRI-AGCM3.2（水平解像度 60 km）の 100 メンバーの実験も合わせて解析に用いることで、予測可能性の鍵となる大循環場の要因を探った。

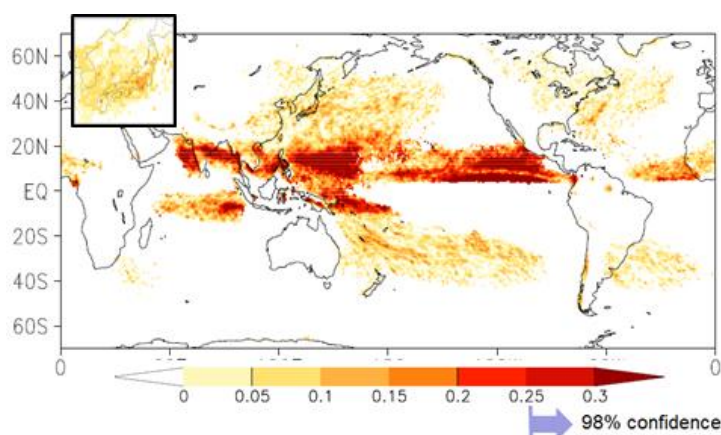


図 1 パーフェクトモデルアプローチによって見積もられた 8 月の nPr50mm の潜在的予測可能性。d4PDF の全球モデル（60 km）の過去再現実験の出力（1951-2017）を用いて、アンサンブルサイズが 10 メンバーである場合の予測可能性を見積もった。

2. 手法

(1) データ

本研究では、d4PDF の MRI-AGCM3.2 (60 km) および NHRCM (20 km) による 100 メンバーの過去再現実験 (1951~2017 年) を、理想的な条件における事後季節予測データとみなして、潜在的予測可能性の見積りに利用した。日本の局所的な大雨の解析には NHRCM (20 km) の結果を、その他の大規模循環場の変数には MRI-AGCM3.2 (60 km) の結果を用いた。

大気循環場や台風、海面水温の検証のために、気象庁の長期再解析データ JRA-55 (Kobayashi et al. 2015)、気象庁ベストトラック、海面水温の観測データ COBE-SST2 (Hirahara et al. 2014) をそれぞれ用いた。また、地域的な観測に類する降水量データとして、JRA-55 を境界値として NHRCM (20 km) によりダウンスケーリングした出力値 (JRA55DS) を用いた。空間分布が一樣で且つ解像度が等しいデータを使ってモデルの結果を検証できる点が、JRA55DS を用いる利点である。なお、日本の地域気象観測システム AMeDAS の降水量データから算出した九州の東部および西部の大雨日数の (100 mm/day を超える日数) を JRA55DS と比較したところ、年々の変動の相関係数は 0.7 を超えており、本研究の目的に利用可能であることを確認済みである。

(2) 予測可能性の指標

予測の対象となる大雨頻度は、各グリッド上で各月に 100 mm/day を超える日数 (nPr100mm) として定義した (ただし、60 km の全球モデルの出力値を用いる場合には、極端降水の過小評価があるため、50 mm/day を閾値として用いる (nPr50mm))。

本研究で用いる季節予測可能性の指標には、パーフェクトモデル相関係数を用いた。これは、アンサンブルメンバーのうち 1 本を正解 (実測値) とみなし、残りのメンバーのアンサンブル平均値を予測値とみなして、アノマリ相関係数を計算し、これをメンバー数分 (100 回) 繰り返して平均を取ることで、モデルが完璧だった場合の予測スキルの上限值 (= 潜在的予測可能性) を見積もる手法である。ここでは AGCM を用いるため、境界値として与えている海面水温及び海水データは観測値であることから、この手法で見積もられる潜在的予測可能性は、季節予測において海面水温が完璧に予測できた場合の、大気変数の予測スキルの上限值と見なすことができる。

なお本研究では、比較のため、100 メンバーの平均値と実況値 (JRA55DS) との間で実際のアノマリ相関スキル (モデルが現実を再現するスキル) を見積もることも行っている。

3. 結果

(1) 大雨頻度の予測可能性

図 2 に、20 km 領域モデルの 100 メンバーの出力を用いて算出した潜在的予測可能性 (パーフェクトモデル相関係数) の空間分布を月ごとに示す。前述の通り、大雨に対する中高緯度の予測はこれまで困難であると考えられてきたが、高解像度かつ大規模なアンサンブルを導入することで、梅雨期後半である 7 月の西日本の西側斜面、及び、台風のピーク期である 8 月と 9 月の西日本の東側斜面に、有意な潜在的予測可能性が現れることが分かる (図 2)。この予測可能性の改善に対して、アンサンブルサイズの増加と高解像度化のどちらが貢献して

Perfect-model ACC (**potential predictability**) Jun-Nov (Japan)

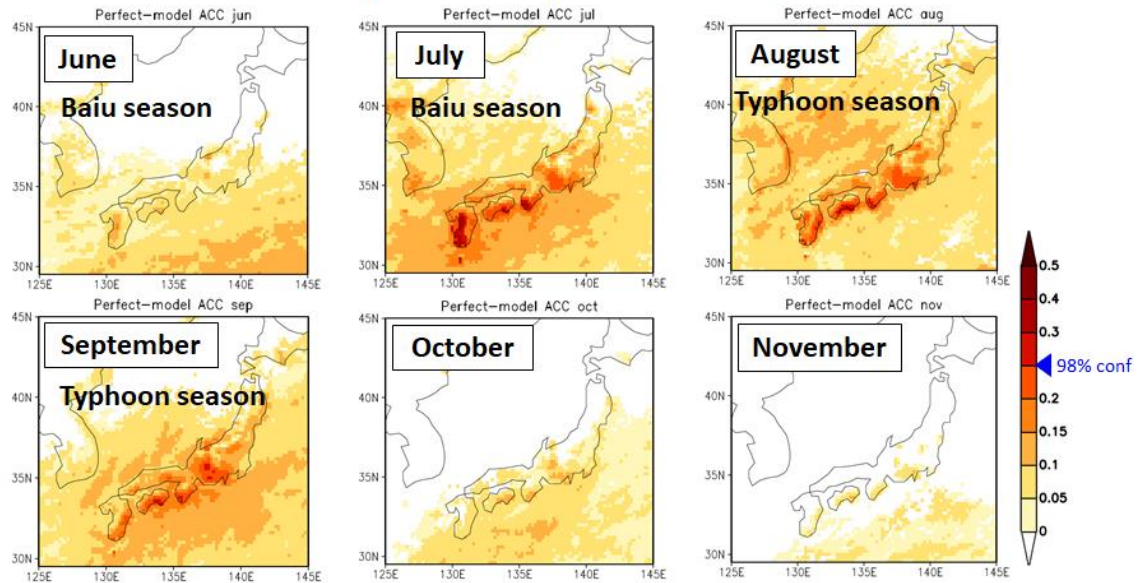


図 2 パーフェクトモデルアプローチによって見積もられた 6 月から 11 月の各月の nPr100mm の潜在的予測可能性。d4PDF の領域モデル (20 km) の 100 メンバーの過去再現実験の出力 (1951-2017) を利用。

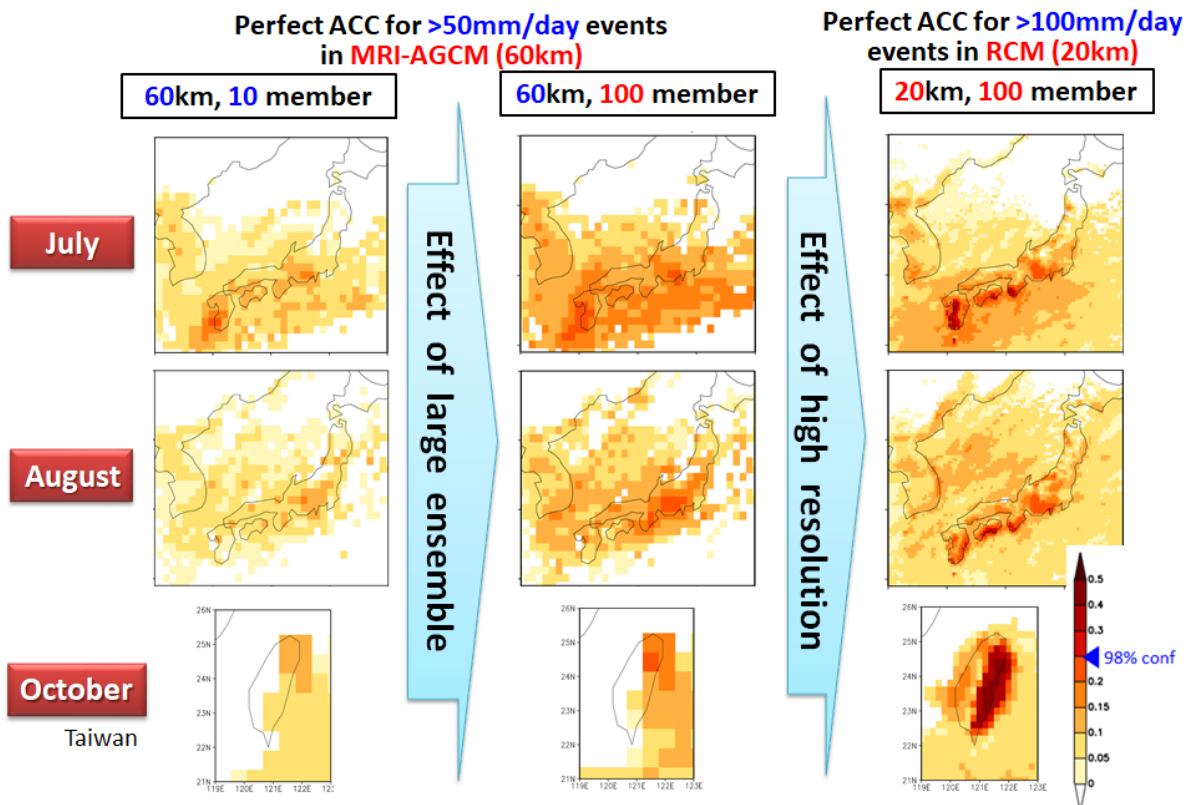


図 3 潜在的予測可能性のアンサンブルサイズおよび解像度への依存性。大規模アンサンブルかつ高解像度で特に高い潜在的予測可能性が現れた 7 月と 8 月の日本周辺と 10 月の台湾に注目した結果。

いたかを調べるため、特に高い予測可能性が見られた7月と8月の西日本および10月の台湾について、解像度を60 kmに落とした場合（親モデルMRI-AGCM3.2の出力を利用）およびアンサンブルサイズを10メンバーに減少させた場合の潜在的予測可能性を、高解像度かつ大規模アンサンブルの場合と比較した（図3）。解像度60 kmでアンサンブルサイズを10メンバーから100メンバーに増やすと、どの領域でも潜在的予測可能性は増加するものの、統計的に有意な値には達しない。一方、解像度を60 kmから20 kmに高度化した場合に、有意な潜在的予測可能性が明瞭に現れるようになることが分かる。したがって、日本の局所的な大雨の予測可能性を捉えるためには、モデルを高解像度化することが不可欠であることが分かる。

次に、現実のデータと比較した場合のモデルの再現スキルを検証する。現実のデータは1サンプルしかないため、大雨日数を各グリッド上カウントして相関スキルを計算することは難しく、ある程度地域をまとめてカウントする必要がある。ここでは、図2と図3で特に高い潜在的予測可能性が検出された4地域について、検証データとの間で実際の相関スキルを計算した（表1）。比較のため、同じ地域で見積もったパーフェクトモデル相関係数の値も示している。図2・3で確認した通り、7月および8月の九州、8月の四国、10月の台湾の4地域で見積もった潜在的予測可能性は全て統計的に有意な値を示すが、実際の再現スキルは、日本の3地域において有意なレベルに達しない。これは、モデルが高度化して現象の再現が改良されれば、将来的に予測できるが可能性が残されていることを意味する。

一方、10月の台湾では、実際の再現スキルが0.59という高い値を示しているが、スキルの上

限であるはずのパーフェクトモデル相関係数を上回るという矛盾が生じている。これは「S/Nパラドックス」と呼ばれ、中高緯度域の複数の大気変動に見られる現象である。モデルが現実存在するシグナルを過小評価（ノイズを過大評価）していることが原因であると考えられているが、現実が1サンプルしかないため検証が難しく、結論は出ていない。

予測可能性および実際の相関スキルのアンサンブルサイズへの依存性も調べた（図4）。メンバー数が増えるほど両スキルは増加するが、十分な予測可能性を得るためには50~70メンバーが必要であることが分かる。

（2）予測可能性の源

ここでは、（1）で議論した各地域の潜在的予測可能性の源がどのような大規模場の変動からもたらされているかを調査した。7月および8月の九州、および10月の台湾について、領域モデル（20km）100メンバーの出力から見積もったnPr100mmに対して、全球モデル（60 km）100メンバーが出力した850hPaジオポテンシャル高度・鉛直積算水蒸気フラックス・台風存在密度・海面水温の回帰係数を計算した結果を図5に示す。

7月の九州の場合、九州山地の西側斜面に高い予測可能性が見られる。この地域で大雨になる際には、日本の南側に高気圧循環偏差、その北側に低気圧性循環偏差が見られ、これは夏季の北西太平洋の大気内部モードであるPacific-Japanパターン（PJパターン; Nitta 1987）に相当する。これにより、日本の南側に張り出しやすくなった太平洋高気圧が南西からの夏季アジアモンスーンに伴う暖湿流を強化し、南西側斜面に大雨をもたらす要因となっていることが分かる。この時の全球スケールの海面水温のパターンは、熱帯東部太平洋ではエルニーニョ

表1 7月および8月の九州、8月の四国、10月の台湾において、パーフェクトモデル相関係数が0.3（8月については0.25）を超えるグリッド上で見積もった、パーフェクトモデル相関係数（中央列）と、実際のアノマリ相関スキル（右列）。赤字は統計的に有意な値。

Region		PACC 1951-2016	Actual ACC w/ JRA55ds 1959-2016
Kyushu July		0.383	0.212
Kyushu August		0.277	-0.161
Shikoku August		0.296	-0.110
Taiwan October		0.454	0.590

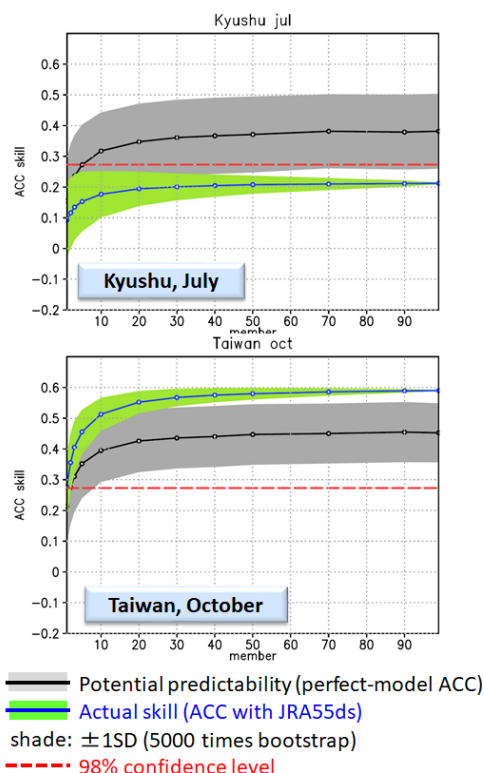


図4 アンサンブルサイズ（横軸）に対するパーフェクトモデル相関係数（黒線）および実際のアノマリ相関スキル（青線）。陰影は、5000回のブートストラップ法によって得られたサンプリング幅。7月の九州（上段）および10月の台湾（下段）。赤破線は統計的に有意な値を示す。

衰退期の特徴、インド洋では全体的に昇温しており、冬にエルニーニョが発達した翌年の夏の特徴と一致している（インド洋コンデンサ効果; Xie et al. 2009）。先行研究では、インド洋コンデンサ効果がPJパターンを誘起しやすいことが知られている。なお、日本の南側に太平洋高気圧が張り出すため、台風の接近は普段よりも減少する傾向であることが分かる。

一方、8月の九州では、九州山地の東側の高い予測可能性が現れる。この地域で大雨になる時、日本の南西部では低気圧性の循環偏差が覆っており、7月の九州の大雨とは特徴が異なることが分かる。このパターンは、台風密度の増加と関連しており、台風接近時に九州東部に風が収束することによって大雨をもたらしていることが分かる。この時のSSTパターンを見ると、中央太平洋で海面水温が高い時に、台風の発生位置や経路がシフトすることで生じていると考えられる（Song et al. 2020）。

10月の台湾東部の大雨についても、台風密度が密接に関係していることが分かるが、この時の太平洋の状況はラニーニャの特徴を示しており、ラニーニャによって暖水域が西にシフトして南シナ海の台風が増加することが、台湾東部の大雨を増加させる要因であると言える。

これら3つの地域は全球スケールの視点から見れば隣接しており、気候学的特性もひとくくりに扱われることが多いが、地形を考慮して分類して解析を行うことで、全く異なる大循環場のパターンに影響を受けていることが明らかとなった。なお、観測データや再解析データを利用して同じような回帰マップを描画すると、図5に近い傾向が見られるものの、サンプル数の不足のため、有意な因果関係を検出することはできない（図略）。これが、大規模アンサンブル実験を活用することの利点であると言える。

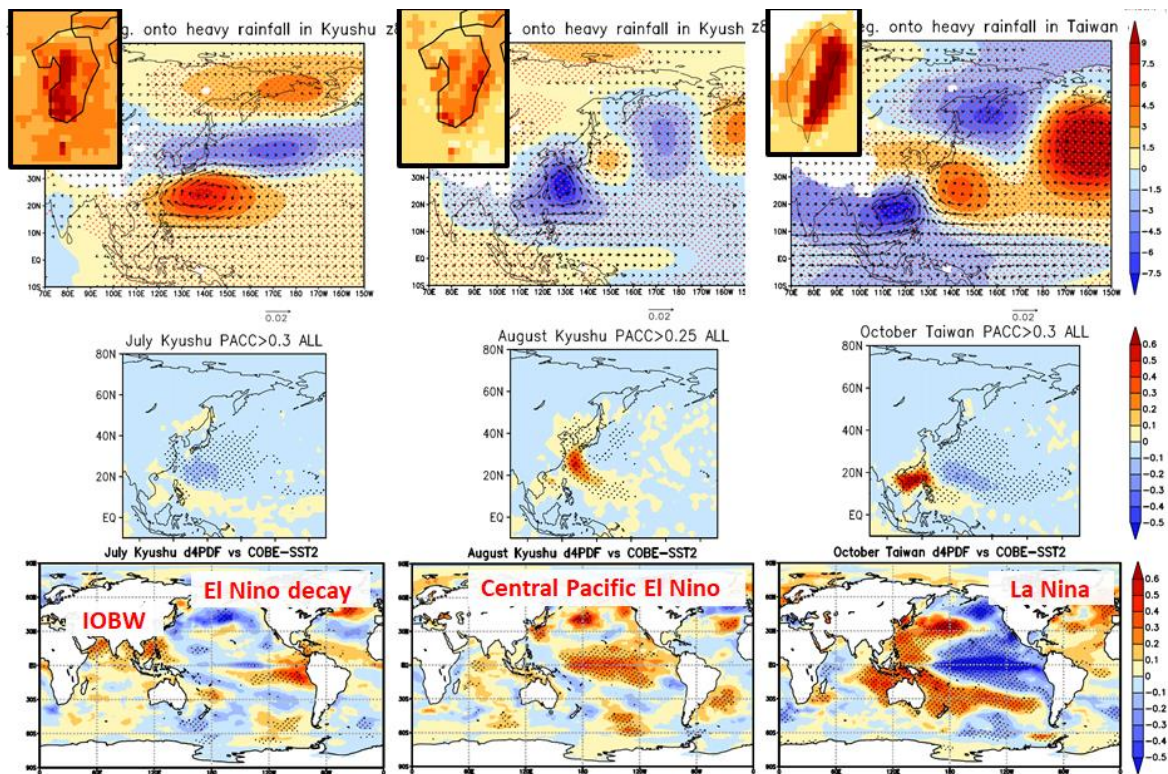


図5 特に高い潜在的予測可能性が現れた7月（左列）および8月（中央列）の九州、10月の台湾（右列）において、パーフェクトモデル相関係数が0.3を超えるグリッド上で平均したnPr100mmの時系列に対して回帰した、850hPa ジオポテンシャル高度および鉛直積算水蒸気フラックス（上段）、台風の存在密度（中段）、および海面水温（下段）。ドットは統計的に有意な場所を示す。

Kawase (2021) にまとめられている。

4. おわりに

これまで、季節予測に用いる気候モデルの解像度を上げて、必ずしも予測スキルの向上にはつながらないと考えられてきた。解像度を上げることによって表現されるようになる複雑な気象要素が、さらなるノイズを生む原因になるからである。しかし、本研究の結果は、モデルの高解像度化により地形が正確に再現されることによって、一部地域では時期によって地形がS/N比を増加させる働きをし、予測可能性を向上させることが分かった。

季節予測実験は計算負荷が高いため、解像度とアンサンブルサイズを試験的に増やすことは容易ではない。本研究は、d4PDFを季節予測の潜在的予測可能性の評価に応用する新しい活用法を提案した。以上の成果は Imada and

参考文献

- Hirahara, S., Ishii, M. & Fukuda, Y. (2014), Centennial-scale sea surface temperature analysis and its uncertainty. *J. Climate*, 27, 57-75.
- Imada, Y. & Kawase, H. (2021), Potential Seasonal Predictability of the Risk of Local Rainfall Extremes Estimated Using High-Resolution Large Ensemble Simulations. *Geophys. Res. Lett.*, 48, e2021GL096236.
- Kobayashi, S. et al. (2015), The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, 93, 5-48.
- Mizuta, R. et al. (2017), Over 5000 years of ensemble future climate simulations by 60 km

- global and 20 km regional atmospheric models.
Bull. Amer. Meteor. Soc., 98, 1383-1398.
- Nitta, T. (1987), Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation. J. Meteor. Soc. Japan, 65, 373–390.
- Song, J., Klotzbach, P. J. & Duan, Y. (2020), Differences in western north Pacific tropical cyclone activity among three El Niño phases. J. Climate, 33, 7983-8002
- Xie, S.-P., Hu, K., Hafner, J., Tokinaga, H., Du, Y., Huang, G. & Sampe T (2009), Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño. J. Climate, 22, 730–47.