

夏季インド モンスーン域における 降水予測可能性

PREDICTABILITY OF PRECIPITATION IN THE INDIAN SUMMER MONSOON REGION

山田 朋人¹・鼎 信次郎²・沖 大幹³

Tomohito YAMADA, Shinjiro KANAE, and Taikan OKI

¹学生会員 東京大学生産技術研究所 大学院博士課程

日本学術振興会特別研究員 (DC2) (〒 153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

²正会員 博士 (工学) 総合地球環境学研究所 助教授 (〒 602-0878 京都市上京区丸太町通河原町西入高島町 335)

³正会員 博士 (工学) 東京大学生産技術研究所 教授 (〒 153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

The predictability of the Indian summer monsoon is examined from an ensemble of 16 atmospheric general circulation model simulations with prescribed sea surface temperatures (SST). The predictability is estimated with a statistical index (Ω) to quantify similarity among the ensemble members. The model simulations show that the predictability of precipitation and the low-level moisture flux during May and June are much larger than that in July and August. The role of land-atmosphere interaction is also focused. During May and June the predictability of soil moisture and near surface temperature are increased by large predictability of precipitation. At the same time, the predictability of cumulus type precipitation could be improved or maintained by positive feedback of large predictability of soil moisture and near surface temperature through atmospheric instability in atmospheric boundary layer. Finally, we suggest two new statistical methods to estimate the phase and shape predictability, and discuss the monthly change of the predictability of the Indian summer monsoon using 3 types of predictability including Ω .

Key Words : *predictability, precipitation, similarity index, AGCM, Indian summer monsoon*

1. はじめに

世界の人口密集地域であるインド モンスーン域の季節は文字通りモンスーンと呼ばれる南西からの季節風により雨季・乾季に二分され, 雨季である 6~9 月の 4 ヶ月間に年降水量の約 8 割がもたらされる. そのため雨季における降水の予測精度向上は同地域の水資源に起因する人間生活を考慮する上で極めて重要である.

季節スケールの天気は海洋・陸面といった境界値問題として取り扱われ¹⁾, 大気大循環モデル (Atmospheric General Circulation Model, 以降 AGCM) を使用した潜在予測可能性の研究が行われてきた. この潜在予測可能性 (以降, 予測可能性) とは用いた気候モデルの物理過程もしくは海面水温 (以降, SST) や土壌水分量といった境界値が完全に正しいという仮定においてどの程度降水や大気諸量の変動が規定されるか, もしくは予測精度が向上し得るか評価する概念である.

これまで AGCM を用いたインド モンスーン域における季節スケールの予測可能性に着目した研究は数多く

成されてきた. Yang and Lau(1998)²⁾は夏季インド モンスーンに与える SST と土壌水分量の影響を比較したところ, 同地域では SST の影響がより卓越しているという結果が得られた. Schubert and Wu(2001)³⁾は 1997,98 年のインド モンスーンの季節変化をもたらす対流圏下層ジェットに与える SST の影響について, その季節性に着目し評価を行い, 98 年の 5,6 月の下層ジェットはインド洋の平年より高い SST 偏差によるローカルな影響を強く受けることを示した. 一方世界 12 の AGCM を用いて北半球の夏にあたる 6~8 月 (JJA) における降水変動に与える土壌水分量の影響評価を行った GLACE(Global Land-Atmosphere Coupling Experiment) では, 夏季インド モンスーン域やアメリカ中央部といった半乾燥域は他の地域と比較して季節スケールの降水変動は土壌水分量によって強く規定され⁴⁾, その影響はローカルであることが示された⁵⁾.

この様に既存の多くの研究は SST と陸面に起因する予測可能性の評価を別々に行ったものが多い. しかし本来の水循環システムを考えると海洋-大気-陸面の 3 過

程の相互作用を考慮した上での議論もよりされるべきであろう。そこで本研究では夏季インドモンスーン域における SST に起因する降水予測可能性と季節進行との関わり、またその中で陸面が果たす役割について着目する。2 章において実験設定の説明を行い、得られた結果を 5~8 月について月ごとに 3 章で示す。4 章では SST に起因する降水予測可能性の月変化に関し大気陸面相互作用の視点から議論を行う。また 5 章では新しい予測可能性評価手法の提案を行い、まとめを 6 章に記す。

2. 実験概要

(1) モデルとデータ

本研究で使用した気候モデルは東京大学気候システム研究センターと国立環境研究所によって製作された CCSR/NIES AGCM5.6(水平方向: 128.64 グリッド, 鉛直方向: σ 面座標 20 層)⁶⁾である。陸面過程には植生の効果が考慮されている MATSIRO (Minimal Advanced Treatments of Surface Interaction and RunOff)⁷⁾を用いた。また海面境界値である SST には 1994 年 3~8 月の AMIP2(Atmospheric Model Inter-comparison Project 2)SST 月平均値を用いた。本研究では 16 個の初期値からなるアンサンブル実験を行った。16 アンサンブルメンバーの実験に必要な初期値は 1994 年の SST を用いて 16 年間分の計算を行って得られた毎年 3 月 1 日の値とした。

(2) 予測可能性の評価方法

16 個の初期値を用いて計算された大気出力値の時系列データを用い相似性指標 Ω をグリッドごとに計算する。この Ω とは複数のメンバー間の位相 (相関), 平均値, 振幅の 3 種類の相似性を複合的に評価する数学的特性を有する統計指標⁸⁾である。 Ω の計算方法について降水量時系列を例に説明を行う。 Ω は 16 メンバーの降水量時系列から求まる 2 種類の分散とメンバー数により計算される。まず同じ時間ステップ数 (n 個) をもつ m 個のメンバー (本実験では $m = 16$) を用い, 各メンバーの同じ時間ステップごとの平均値からなる時系列を式 (1) により算出し, その分散 (σ_P^2) を求める (P は降水量を示す)。式中の i はメンバーの番号を示す。次に m 個のメンバーをひとつながりの時系列 (時間ステップ数 mn 個) とし, その分散 (σ_P^2) を求める。これら 2 種類の分散とメンバー数 m を式 (2) に代入し, Ω_P を得る。全てのメンバーの降水量時系列が同一であれば $\sigma_P^2 = \sigma_P^2$ となり Ω_P は 1 を示す。一方, 全く異なる時系列であれば Ω_P は $\frac{1}{m-1}$ となり, メンバー数が多いほど 0 に漸近する。

上記の計算方法に従ってグリッドごとに Ω_P を算出する。本実験では SST のみ大きな月変化を伴う境界値として 16 アンサンブルメンバーに与えられるため, Ω_P

は SST の影響を示し, 以下これを SST に起因する降水予測可能性とする。

$$\hat{P}_n = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m P_{ni} \quad (1)$$

$$\Omega_P = \frac{m\sigma_P^2 - \sigma_P^2}{(m-1)\sigma_P^2} \quad (2)$$

3. Ω を用いた予測可能性

(1) 降水

図 1 はインドモンスーン域の乾季から雨季への遷移時期にあたる 5 月から雨季の最盛期 8 月における月平均日降水量と大気最下層の風速ベクトルを示す。図からどの月においてもソマリジェットと呼ばれる強い南西風が西インド洋上からインドモンスーン域に向けて流入していることがわかる。また 6~8 月は 5 月よりも南西風が強く, かつ降水量が多い。従って用いた気候モデルがある程度現実的な雨季の開始・進行を再現していると言えよう。

図 2 は降水変動に与える SST の影響度 (Ω_P) を示す。 Ω_P の算定にはひと月ごとに 3 日合計値の降水量時系列を用いたため, 以降文中の '変動' は 3 日単位の変動を意味し, '予測可能性' はひと月ごとの 3 日変動について評価した結果となる。図 2(a) に示す季節の遷移時期にあたる 5 月では西インド洋上からデカン高原を中心とするインド, さらにはインドシナ半島の北部にかけて降水変動に与える SST の影響が大きい。同地域では図 1(a) に示す通り降水量が多く, かつ西インド洋上からの南西風が強い地域と一致することがわかる。6 月では SST の影響度の大きい地域は西インド洋上からアラビア海を隔てたデカン高原にかけて分布しており, その地域分布は図 1(b) に示す強い南西風帯のそれと類似している。以上の結果から 5,6 月はソマリジェットと呼ばれる強い南西風の到来により雨季と同時に SST に起因する高い降水予測可能性をインドモンスーン域にもたらすものと推測できる。

一方図 2(c)(d) に示す雨季の最盛期にあたる 7,8 月では降水変動に与える SST の影響は統計的に有意な値を満たさない地域がほとんどである。図 1(c)(d) の大気最下層の風速ベクトルを見ると, 7,8 月とも南西風が卓越しており 5 月と比較するとより強いことがわかる。つまりこの結果から 7,8 月における 3 日を単位とする降水変動は仮に SST の詳細な観測値が得られ, かつ用いた気候モデルの振る舞いが完全に正しいと仮定した場合, その予測可能性は雨季の開始時期から初期にあたる 5,6 月と比較して小さいことになる。

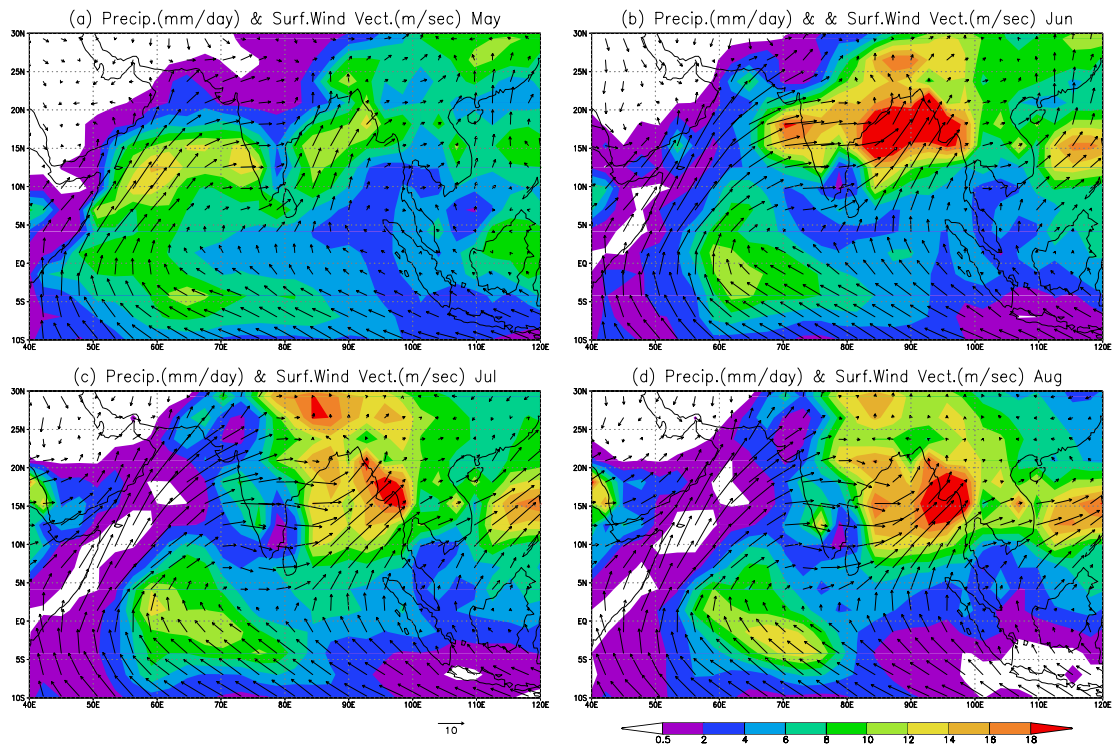


図-1 インド モンスーン域における月平均日降水量と大気最下層の月平均風速ベクトル

(2) 水蒸気フラックス

前節において夏季インド モンスーン域における SST に起因する降水予測可能性には大きな季節性が存在し、7,8 月は 5,6 月と比較して予測可能性が大きく減少するという結果が得られた。Yoshimura et al(2004) による再解析値の水蒸気フラックスにタグをつけて行われたいわゆる色水実験において、インドでは雨季の開始と同時にアラビア海やベンガル湾を含むインド 洋からの水蒸気量が急激に増加することが示されている⁹⁾。そこで本節では多くの水蒸気量を有し、かつ強い南西風が卓越する対流圏下層の 850hPa 面における水蒸気フラックスに与える SST の影響度の評価を行うことにより、5,6 月と 7,8 月にみられた降水予測可能性の相違をもたらした要因を探ることとする。図 3 は 5~8 月の 850hPa 面の東西風速に与える SST の影響度 (Ω_{850uq}) を、ベクトルは同等圧面の水蒸気フラックスを示す。図から 5 月はアラビア海からインドデカン高原、さらにはインドシナ半島にかけて带状に Ω_{850uq} は高い値であり、ベクトルで示す水蒸気フラックスや図 2 の Ω_P とも類似した地域分布である。この地域分布は 6 月においてもほぼ同様に存在する。 Ω_{uq850} に関する 6 月の特徴としては 5 月よりデカン高原を中心に大きな値を示すことであろう。以上 5,6 月のインド モンスーン域における対流圏下層ジェットに与える SST の影響が大きいという結果は Schubert and Wu(2001) の結果³⁾と同様の傾向を示すものである。

次に図 3(c)(d) に示す 7,8 月に着目する。水蒸気フラックスは両月とも 6 月と同様かそれ以上に大きな値

であり、850hPa 面に限れば 6~8 月にかけて気象場の大きな違いはみられない。一方 Ω_{uq850} に関しては 7 月ではアラビア海からインド中南部に、8 月においてはアラビア海からインド北部にかけて分布しているが、いずれも 5,6 月と比較して小さな値である。本章をまとめると、夏季インド モンスーン域において季節進行に伴いインド 洋からの水蒸気フラックスが増加するため、一見 SST の影響を強く受けた水蒸気が同地域に多く流入し、SST に起因する降水予測可能性は雨季の最盛期である 7,8 月ほど上昇するとも考えられるが、本実験では逆の結果が得られた。雨季の季節進行に伴い降水予測可能性が減少する理由として、降水の生成に極めて重要と考えられる対流圏下層の南西風の予測可能性が大きく減少したことが大きな一因であると示唆され、大気中層まで暖湿な南西風が卓越する 7,8 月では大気中の水蒸気量の変動が海面からの蒸発量に左右されにくい状態になっていることが考えられる。

4. 予測可能性と大気陸面相互作用との関係

SST に起因する降水予測可能性には 2 通りのシナリオが考えられる。ひとつは土壤水分量をはじめとする陸面状態に関係なく SST が直接陸上の降水予測可能性に影響を与えるケース。もう一方は SST の影響度を強く受けた降水が土壤を湿らし、その土壤を含む陸面と大気との相互作用により次の降水の予測可能性が向上もしくは維持されるケースである。本章ではインド モンスーン域における SST に起因する降水予測可能性に対する大気-陸面相互作用の役割について議論を行う。

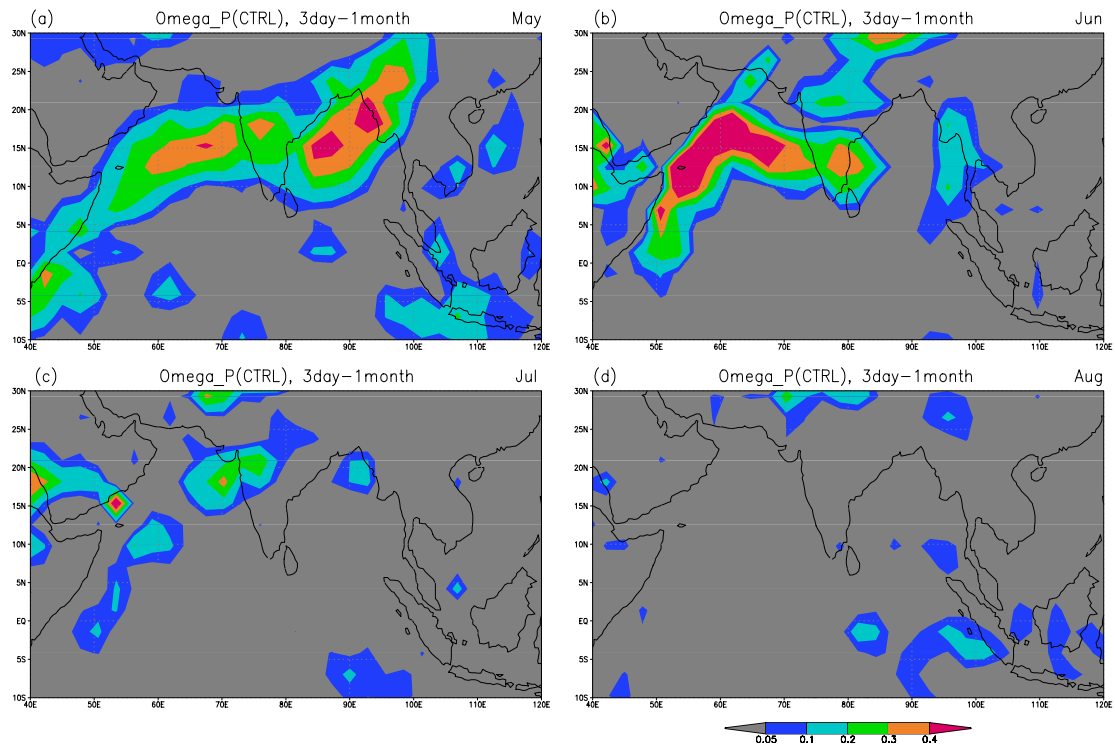


図-2 相似性指標 Ω を用いた降水変動に与える SST の影響度. 図中の 0.05 はモンテカルロ法により得られた 90%の統計的有意値を示す.

(1) 地表付近の気温の予測可能性

図 4(a) は 5~8 月における地表面表層に位置する土壌水分量の月平均値 (図中の破線) と, SST に起因する土壌水分量の予測可能性 Ω_{sm} (図中の□) を示す. また農業をはじめとする人間活動を考える上で降水と同じく季節スケールの予報精度の向上が叫ばれる地表付近の気温として高さ 2m の気温の予測可能性 Ω_{t2m} (図中の○) も同時に示す. 図中の結果はいずれもインドとスリランカを含むインド モンスーン域での領域平均値である. 一方図 4(b) は同領域の全降水量に対する対流性降水量の割合 (Convection Fraction) と大気境界層内での大気安定度の指標であるリチャードソン数の月平均値を示す. 図 4(a) から 5,6 月の土壌水分量の予測可能性は統計的に有意な値であることがわかる. これは図 2 で示された同期間の SST に起因する降水予測可能性が高いことが直接的な原因と言えよう. また高い予測可能性を有した土壌水分量により気温の予測可能性も高い値が得られたものと考えられる. この結果は詳細な SST の観測値が得られればインド モンスーン域における乾季から雨季への遷移時期の気温の予測精度が向上し得ることを示すものである.

(2) 降水予測可能性に与える大気陸面相互作用の影響

SST に起因する降水予測可能性と大気陸面相互作用の関係について議論を行う. まず図 4(a) に破線で記す土壌水分量に着目する. 図からこの時期の土壌水分量

は約 0.2 と乾燥から半乾燥状態にあることがわかる. そのため地表面からの潜熱の放出は少なく, 地表面付近の気温は上昇しやすい状態であり, これは図 4(b) に赤線で記す大気境界内の大気不安定度を上昇させる要因となる. さらに大気不安定度の上昇は気候モデルの中で対流性降水と大規模凝結降水という 2 種類存在する降水形態のうち鉛直 1 次元的に決定される対流性降水量の比率を増加させることが考えられ, 本実験においても図 4(b) の青色の実線で記された Convection Fraction は 0.7 程度に達している. AGCM を用いた大気陸面相互作用に関する著者らを含めた研究成果として, 大規模凝結降水より対流性降水に対し土壌水分量の影響は大きく, 半乾燥域ではその影響はローカルであることが示唆されている⁵⁾. つまり乾季から雨季への遷移時期である 5 月では SST に起因する高い降水予測可能性が土壌水分量→地表付近の気温→大気境界層という順序で次の降水の予測可能性の向上もしくは維持に貢献し得ると推察できる. 一方 7,8 月では Ω_{sm} , Ω_{t2m} ともに統計的に有意な値を満たさない. この直接的な原因は図 2 に示すとおりインド モンスーン域の多くの地域で降水だけでなく対流圏下層の水蒸気フラックスにも SST に起因する予測可能性が極めて小さいことが考えられる. さらに雨季の季節進行に伴い土壌水分量は増加傾向を示し, 8 月には約 0.31 に達する. この地表面状態の湿潤化は大気境界層内の大気不安定化を解消させる役割を有し, 図 4(b) によりリチャードソン数は 0 に向かって増

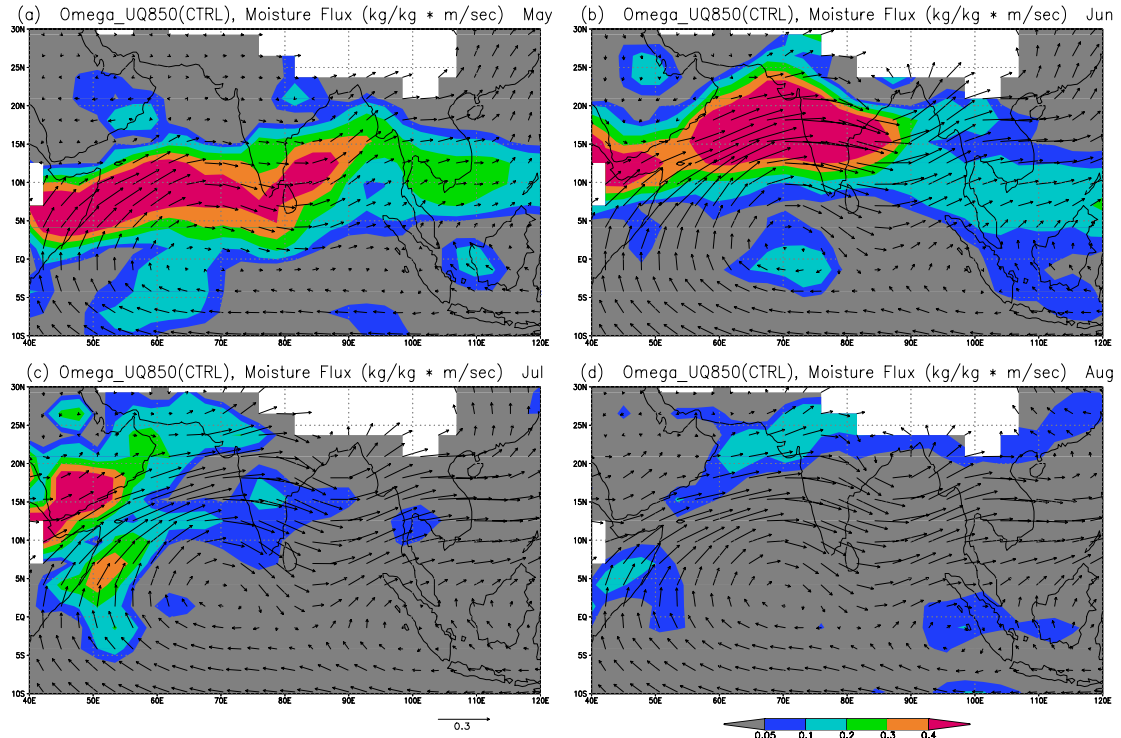


図-3 相似性指標 Ω を用いた 850hPa 面における東西方向の水蒸気フラックスに与える SST の影響度と、同等圧面における月平均水蒸気フラックス (ベクトル)

加していることから明らかである。さらに大気不安程度度の解消は土壌水分量の影響を受けにくい大規模凝結タイプの降水量の比率を増加させ、本実験においても Convection Fraction は 5 月の約 0.7 から 8 月には 0.3 程度にまで低下している。従って仮にインドモンスーン域の 7, 8 月において SST に起因する高い予測可能性を有した降水量が多く地表面に与えられたとしても大気境界層の不安定度は小さいため、高い予測可能性を有した土壌水分量は次の降水の予測可能性の向上に大きな寄与は期待できないと言えるであろう。

5. 新しい予測可能性の評価手法の提案

4 章までアンサンブルメンバー間の位相、平均値、振幅の 3 種類の相似度を複合的に評価できる統計指標 Ω を用いた降水予測可能性の議論を行ってきた。この Ω は位相のみの相似度を示す $ACCC$ (Anomaly Cross Correlation Coefficient) と平均値ならびに振幅の相似度を示す AVR (Average value of Variance Ratio) に分類が可能であり、著者らにより上記 2 つの統計指標をそれぞれ用いた新しい予測可能性評価手法が提案された^{?)}。一つは $ACCC$ を用いた位相に関する予測可能性 (Phase Predictability)、 AVR はかたち (平均値・振幅) の予測可能性 (Shape Predictability) であり、位相とかたちの双方を考慮したのが Ω を用いた相似度に関する予測可能性 (Similarity Predictability) である。

South Asia (Lon: 73.1–84.4E, Lat: 4.2–20.9N)

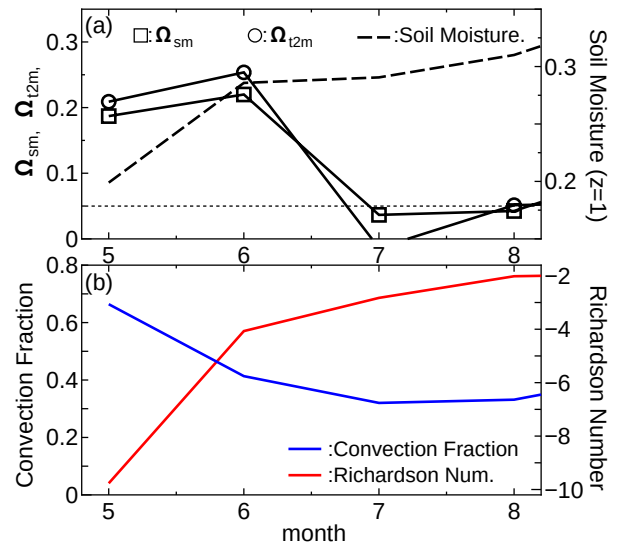


図-4 夏季インドモンスーン域における地表付近の予測可能性と大気陸面諸量の月平均値。図中の点線は 90% の統計的有意水準を示す。

(1) 新しい予測可能性評価手法の計算方法

次に $ACCC$ と AVR の計算方法を降水量時系列 P を用いて説明する。式 (2) で記す Ω_P から両者の詳細な導出過程は Yamada et al(2006) を参照されたい。以下数式の表記は Yamada et al(2006) に準拠するものである。 Ω_P はメンバー間の平均値ならびに振幅が等しいと仮定すると式 (3) が得られ、これはメンバー間の位相 (相関) のみの相似度を示す指標である。式中の k, l は任意の

South Asia (Lon: 73.1–84.4E, Lat: 4.2–20.9N)

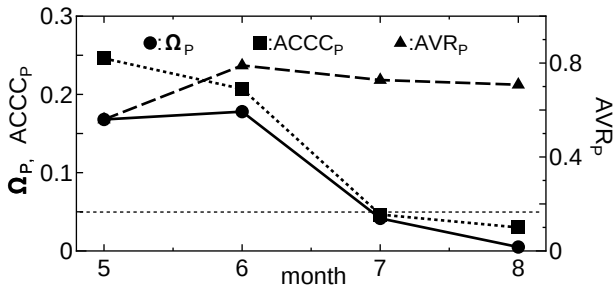


図-5 相似度を示す3種類の統計指標を用いた夏季インドモンスーン域における降水予測可能性

メンバーの番号を、 R'_{kl} はメンバー k と l の相関係数を示す。一方メンバー間に位相差はないと仮定したとき、つまり平均値・の相似度を示す Ω は(4)と記述される。式中の σ_{Pk} 、 σ_{Pl} はメンバーごとに求まる標準偏差である。

$$ACCC_P = \frac{2}{m(m-1)} \sum_{k=1}^{m-1} \sum_{l=k+1}^m R'_{kl} \quad (3)$$

$$AVR_P = \frac{2}{m(m-1)} \sum_{k=1}^{m-1} \sum_{l=k+1}^m \frac{\sigma_{Pk}}{\sigma_P} \frac{\sigma_{Pl}}{\sigma_P} \quad (4)$$

(2) 相似度を示す3種類の統計指標を用いた降水予測可能性

図5は相似度を示す3種類の統計指標を用いた夏季インドモンスーン域におけるSSTに起因する降水予測可能性の月変化を示す。●で記す Ω_P はこれまでの議論の通り5,6月ではある程度降水に起因する降水予測可能性がみられるが、7,8月ではその値は極めて小さく統計的に有意な値を下回るものである。この傾向は位相の予測可能性を示す $ACCC_P$ でも同様にみられる。 $ACCC_P$ は平均値・振幅の相似度を考慮せず3日を一単位とした降水変動の増減のみの予測可能性を議論するものである。一方 AVR_P はメンバー間の位相差を考慮せず平均値・振幅のみに関するかたちの予測可能性を評価するものである。図に示されるように AVR_P は Ω_P や $ACCC_P$ とは異なり5~8月のいずれの月も約0.6~0.8の高い値である。つまり夏季インドモンスーンの季節進行に伴いSSTに起因する位相に関する降水予測可能性の大きな減少は降水変動ではなく、かたちもしくは量に関する予測可能性を示す AVR_P とは必ずしも結びつかないことを示すものである。

6. まとめ

本研究では大気大循環モデルを用いて夏季インドモンスーン域におけるSSTに起因する降水変動の予測可能性の月変化に着目し、その評価を行った。その結果乾季から雨季の遷移時期である5月から雨季の初期にあたる6月において降水変動はSSTの影響を強く受けることが示された。つまり同地域の雨季の開始時期における降水予測可能性は、人工衛星や定点観測等によるSSTの観測網をより充実させることにより、本研究で対象と

した季節内スケールの3日変動において向上し得るものかもしれない。

SSTに起因する降水予測可能性と大気陸面相互作用との関係についても議論を行った結果、5,6月では予測可能性の高い降水により土壌水分や地表面付近の気温、さらには予測可能性の向上した陸面と大気をもたらす大気不安定度により、陸面の影響を受けやすい対流性降水への予測可能性の向上もしくは維持されるという正のフィードバックが存在することが示唆された。

5章ではアンサンブルメンバー間の相似度を評価する統計指標 Ω に加え、著者らが提案した位相、平均値・振幅の予測可能性を独立に評価を行う統計指標を用い、夏季インドモンスーン域における降水予測可能性を評価し、その季節性について議論を行った。

謝辞： 第一著者は特別研究員(DC2)として日本学術振興会から研究費を頂いている。本研究は国立環境研究所ならびに東京大学気候システム研究センターにより製作された大気大循環モデルCCSR/NIES AGCM5.6を用いて行ったものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Lorenz, E. N. Atmospheric predictability experiments with a large numerical models. *Tellus*, Vol. 34, pp. 505–513, 1982.
- 2) Yang, S., and K.-M. Lau. Influences of sea surface temperature and ground wetness on asian summer monsoon. *J. Climate*, Vol. 11, pp. 3230–3246, 1998.
- 3) Schubert S. D. and Man Li Wu. Predictability of the 1997 and 1998 south asian summer monsoon low-level winds. *J. Climate*, Vol. 14, pp. 3173–3191, 2001.
- 4) Koster, R. D. and GLACE team. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. *Science*, Vol. 305, pp. 1138–1140, 2004.
- 5) Guo, Z. and GLACE team. Glace: The global land-atmosphere coupling experiment. 2. analysis. *J. Hydrometeorol.*, Vol. 7, pp. 611–625, 2006.
- 6) Numaguti, A., M. Takahashi, T. Nakajima, and A. Sumi. Study on the climate system and mass transport by a climate model. *CGER's supercomputer monograph report, National Institute for Environmental Research, Environment Agency of Japan (Eds.)*, Vol. 3, , 1997.
- 7) Takata, K., S. Emori, and T. Watanabe. Development of the minimal advanced treatments of surface interaction and runoff (matsiro). *Global Planetary Change*, Vol. 38, pp. 209–222, 2003.
- 8) 山田朋人, 鼎信次郎, 沖大幹. 相似性を示す統計指標の数学的構造. *水工学論文集*, Vol. 49, pp. 1–6, 2005.
- 9) Yoshimura, K., T. Oki, N. Ohte, and S. Kanae. Colored moisture analysis estimates of variations in 1998 asian monsoon water sources. *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 82, pp. 1315–1329, 2004.
- 10) Yamada, T. J., S. Kanae, and T. Oki. Estimation of predictability with a newly derived index to quantify similarity among ensemble members. submitted to *Mon. Wea. Rev.*, 2006 (in print.).

(2006. 9. 30 受付)