

降水変動に与える陸面影響度の季節性

SEASONALITY OF LAND SURFACE IMPACT ON PRECIPITATION VARIABILITY

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 (〒 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 助教授 (〒 153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

This study investigated the seasonal variation of land surface Coupling Strength (hereafter, CS) for precipitation in an Atmospheric General Circulation Model. We found that large seasonal variation of CS over central North America, East China, and Thailand. Over central North America, CS is hardly seen in autumn and winter despite of large CS in spring and summer. Meanwhile, large CS is estimated over East China and Thailand from August to October where CS is quite small in June to July. To put it differently, the degree of improvement of accuracy on seasonal prediction is highly dependent on season even if the routine monitoring of land surface state (e.g., soil moisture) is densely performed in both spatial and temporal scales.

Key Words : coupling strength, precipitation variability, similarity index, AGCM, ensemble forecast

1. はじめに

季節スケールの天気は海洋・陸面といった境界値の影響を強く受けることが既存の研究により明らかにされてきた。例えば Shukla et al(2000) によると、北アメリカ太平洋側の冬季の天気は、熱帯の海面水温 (Sea Surface Temperature, 以降 SST) の変動に大きな影響を受けることが示されている¹⁾。

一方陸面に関しては、土壌水分変動の低周期性により季節～年スケールにおける予測可能性の向上に大きく寄与する²⁾ ことが 20 年以上前に示され、その後気候モデルを用いた多くの研究が成されてきた。その代表例のひとつは大気大循環モデル (Atmospheric General Circulation Model, 以降 AGCM) を用いた結果として、中緯度の大陸中央部における降水変動は SST よりも陸面境界値の影響を強く受ける³⁾ ことを指摘している。

また複数の気候モデルを用いた大気-陸面相互作用に関する研究も行われてきた。近年行われたものとして GLACE (Global Land-Atmosphere Coupling Experiment) がある⁴⁾。これは世界 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陸面影響度の全球分布の算定を行ったもので、著者らも CCSR/NIES (Center for Climate System Research, the University of Tokyo and National Institute for En-

vironmental Studies) AGCM5.6 を用いて GLACE に参加した。GLACE の目的は大気-陸面結合強度 (Coupling Strength, 以降陸面影響度と記す) という新しい評価手法を用い、仮に世界のすべての陸面において時間方向に密に観測値が存在すれば降水変動の予測可能性の向上はどの程度であるかという、いわゆる Potential Predictability の算定にあった。12 の気候モデルの示す陸面影響度の全球分布には各モデルによるばらつきがみられるものの、全モデルの結果を平均すると北米中部の穀倉地帯やインドを中心とする南アジア、さらにはサハラ砂漠の南に位置するサヘル地域といった半乾燥地域で特に陸面の影響度は大きな値が示された。つまり同地域では衛星や現地観測網の精緻化により、季節スケールの予測可能性の向上が特に期待されうること示唆するものである。一方、南半球の殆どどの地域や中国を含む東アジア、または東南アジアでは降水変動に対する陸面の影響は小さいものであった。

ではこれらの地域では季節に関わらず降水変動に対し陸面は重要な要素となり得ないのであろうか。また北米中部のように海洋から離れた大陸でのみ降水変動に与える陸面の影響は大きく示されるのであろうか。本研究では上記 2 項に関し、JJA で陸面影響度が大きく示された北米中部と小さく示された中国東部、タイを中

心とする東南アジアに着目し、降水変動に与える陸面影響度の季節変動を評価し、その季節性について議論を行う。まず2章において実験設定の説明を行い、各季節における陸面影響度の全球分布を3章で示す。4章では北米中部、中国東部、東南アジアにおける陸面影響度の季節変動に関して議論を行い、まとめを5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)⁵⁾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)⁶⁾を用いた。また海面境界値は、1994 年 3 月～1995 年 3 月の AMIP2(Atmospheric Model Inter-comparison Project 2)SST 月平均値とした。

(2) 実験方法

本研究では16 アンサンブルメンバーからなる CTRL と FIXD という2 種類のアンサンブル実験を3ヶ月ごとに行った。16 メンバーの実験に用いた初期値 (INIT1-16) は10 年間のスピンアップ計算後の毎年3, 6, 9, 12 月のそれぞれ1 日目の出力値16 年分とした。

a) CTRL 実験

CTRL 実験は INIT1-16 を用い、それぞれ全16 種類のアンサンブル実験を行う (CTRL1-16)。CTRL1 計算で出力される陸面過程の全予報変数は FIXD 実験において陸面境界値として用いられるため、すべての時空間方向において陸面からの出力値を保存しておく。ここで本研究で用いた陸面過程 MATSIRO の予報変数を記すと、土壌水分量、土壌温度、地表面温度、葉面温度、葉面上の水分量、積雪量、積雪温度、積雪アルベド、凍結土壌水分量の計9 つである。海洋の境界値には前述の AMIP2 SST データを与えるため、CTRL 実験で計算を行うのは大気過程と陸面過程となる。

b) FIXD 実験

FIXD 実験も CTRL 実験と同様に INIT1-16 を用い、16 メンバーの計算を行う。ここでは陸面過程の計算は行わず CTRL1 で出力された陸面境界値を与えるが、それは陸上の観測値が全球的に、かつ時間スケールにおいても高密度に存在しないためである。また本実験では観測が極めて難しい、もしくは不可能と考えられる陸面の予報変数に関してもモデルの中で陸面観測値が存在するという仮定において、それらを陸面境界値として FIXD 実験に与えている。これは降水変動に与える陸面境界値としての可能最大の影響度を算定する目

的のためである。以上より FIXD 実験で計算を行うのは大気過程のみとなる。

c) Coupling Strength の計算方法

CTRL, FIXD 両実験におけるそれぞれ16 メンバーの降水量時系列から相似性指標 Ω をグリッドごとに計算する。この Ω とは複数の時系列間の位相 (相関)、平均値、振幅の3 種類の相似性を複合的に評価する全く新しい数学的性質を有する統計指標⁷⁾である。 Ω の計算は各実験の16 個の降水量時系列から求まる2 種類の分散とアンサンブルメンバー数により行われる。まず同じ時間ステップ (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。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1 つながりの時系列とし、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 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 は1を示す一方、全く別の時系列であれば σ_P^2 は $\frac{\sigma_P^2}{m}$ に漸近し、 Ω は約0となる。

上記の計算方法に従って CTRL, FIXD 両実験双方において各グリッドごとに Ω を算出する。それぞれの実験で得られる Ω を $\Omega_P(CTRL)$, $\Omega_P(FIXD)$ と記す。CTRL 実験では SST のみ CTRL1-16 のメンバー間で同じ境界値を与えるため、 $\Omega_P(CTRL)$ は SST の影響を示す。一方、FIXD 実験では SST に加え陸面もメンバー間で同じ境界値であるため、 $\Omega_P(FIXD)$ の値は SST と陸面の影響による相似度となる。従って $\Omega_P(FIXD)$ から $\Omega_P(CTRL)$ を引いた差である Coupling Strength は陸面の影響度を示す。

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

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

3. 結果

(1) SST 影響度 ($\Omega_P(CTRL)$)

図1は3～5 月 (MAM), 6～8 月 (JJA), 9～11 月 (SON), 12～2 月 (DJF) の季節ごとの $\Omega_P(CTRL)$ を示す。CTRL 実験では CTRL1-16 のいずれも海面境界値として観測値の SST を与えている。そのため各メンバーの降水量時系列が同じグリッド上でどの程度似ているのかを示す $\Omega_P(CTRL)$ の値は SST の影響と考えることができる。 $\Omega_P(CTRL)$ の算定には6 日合計値の降水量時系列を用いたため、これ以降文中に出てくる‘降水変動’は6 日単位の変動を意味し、得られた影響度は総観規模の降水変動に与えるものを示す。

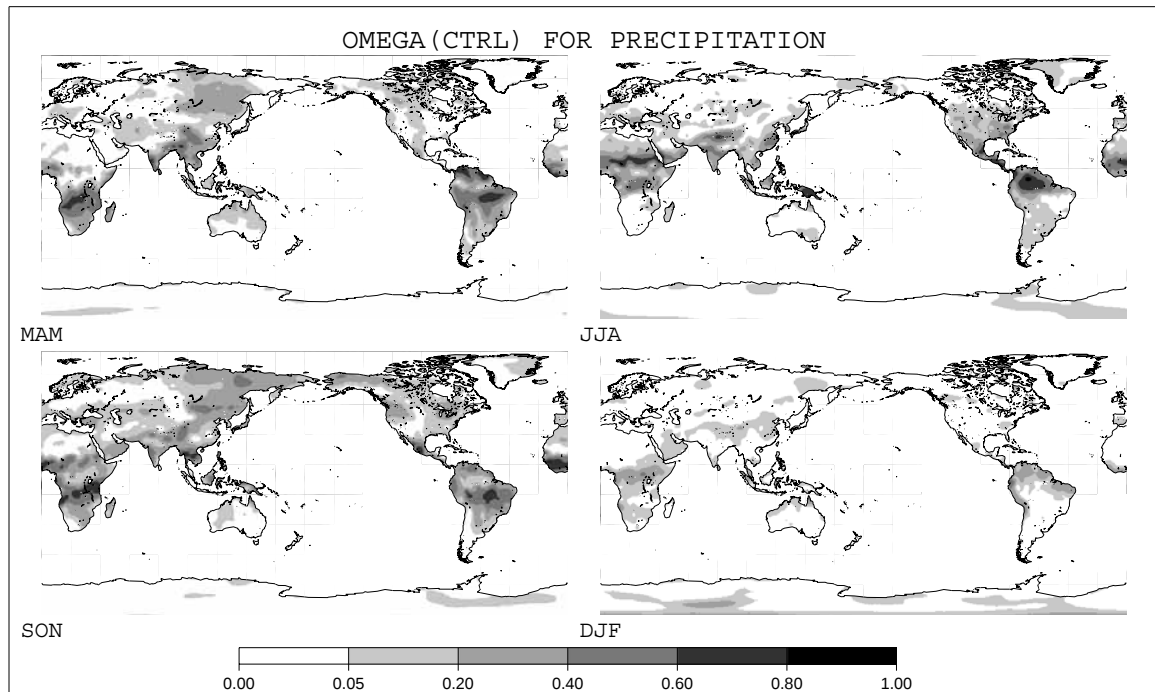


図-1 降水変動に与える SST 影響度の季節性. 左上:3~5 月 (MAM), 右上:6~8 月 (JJA), 左下:9~11 月 (SON), 右下:12~2 月 (DJF). $\Omega_P(CTRL) = 0.05$ は 92%の有意水準を示す.

まず GLACE の実験期間であった JJA に着目する. 図より $\Omega_P(CTRL)$ はアマゾン, アフリカ熱帯地域からサヘル, さらにはインドネシアを中心とする東南アジアといった低緯度において大きな値である. 一方シベリア北部やアラスカといった高緯度では $\Omega_P(CTRL)$ は小さい. また南北両半球を比較すると, 夏にあたる北半球の方が同じ緯度において $\Omega_P(CTRL)$ は大きい. 北半球中緯度の春と秋にあたる MAM と SON は全球的に似通った $\Omega_P(CTRL)$ の分布を示す. 両季節ともアマゾンやアフリカ熱帯地域, 東南アジアにおいて $\Omega_P(CTRL)$ は大きな値である. また JJA と比較すると, 両季節とも南アメリカやアフリカ等の南半球において $\Omega_P(CTRL)$ の値は大きい. DJF ではアフリカ熱帯地域から中南部にかけて $\Omega_P(CTRL)$ はある程度大きな値がみられるものの, 全球的には小さな値を示す. 特に北半球では小さな値が示されており, 他の 3 つの季節と比較して降水変動は SST の影響を強く受けないことがわかる. 3ヶ月という時間スケールの長さから大気初期値の影響は小さいと考えられ, また SST による海面境界値の影響が小さいという結果は, つまりこの時期の降水変動は大気過程に内在するカオスの挙動によって支配的であることを示していることになるのではないだろうか.

(2) 陸面影響度 (Coupling Strength)

図2は図1と同様に四季における降水変動に与える陸面影響度 (Coupling Strength) の全球分布を示す. まず

JJA で対象とされた実験期間である 6~8 月 (JJA) に着目する. 陸面影響度が大きい地域は北米中部やインド東部からバングラデシュにかけての南アジア, シベリアの広範囲にみられる. 本研究で用いられた CCSR/NIES は GLACE に参加した全 12 の気候モデルの中で平均的な大きさの陸面影響度が示された⁸⁾. Coupling Strength で示す陸面影響度は観測値と直接比較することの出来ない指標であるが, 同様の物理過程を有する複数の気候モデルとおおよそ似通った値を CCSR/NIES が示したことは JJA 以外の他の季節における結果の妥当性を指示する要因のひとつとなる.

次に図中左上の北半球中緯度の春にあたる 3~5 月 (MAM) に着目する. 陸面影響度の大きい地域は北米中部や中国黄河流域, シベリア中部においてみられる一方, アマゾン, 中国南東部の長江流域, 中央アジア, インドでは小さい.

9~11 月 (SON) においては中国東部, アマゾン, アフリカ熱帯地域からサヘルにかけて Coupling Strength が 0.3 以上と, MAM や JJA と比較して極めて大きな値を示す. 一方, JJA において特に陸面影響度が大きく示された北米中部においてもある程度影響度はみられるが, その大きさは減少している.

北半球の冬 (DJF) において顕著なのは北半球全域で陸面影響度が小さいことであり, とりわけ北アメリカ中部において特徴的である. 同地域では MAM, JJA,

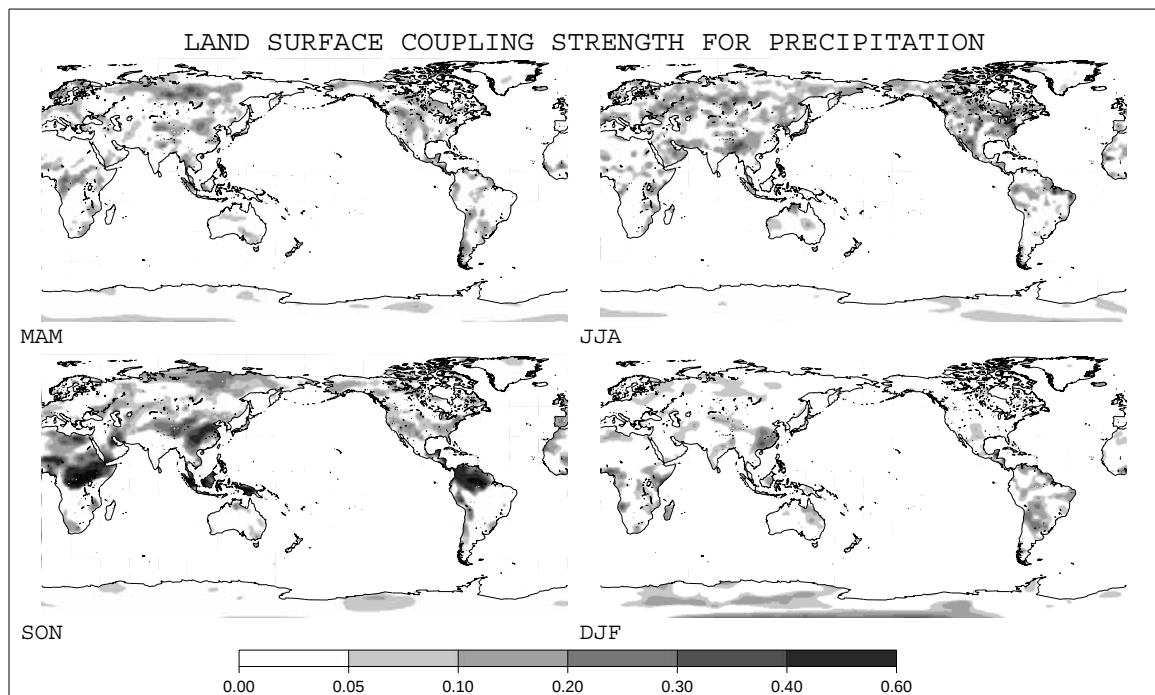


図-2 降水変動に与える陸面影響度の季節性. 左上:3~5 月 (MAM), 右上:6~8 月 (JJA), 左下:9~11 月 (SON), 右下:12~2 月 (DJF) を示す.

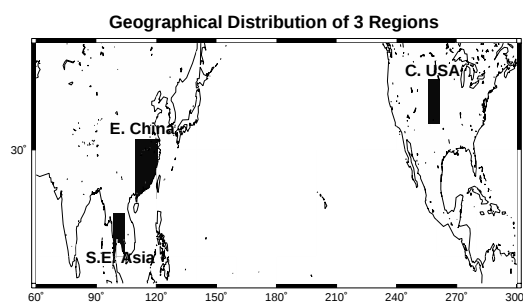


図-3 対象とする 3 地域の地域区分. アメリカ中部: 255.9E-261.6E, 34.88N-43.25N, 東南アジア (タイ): 98.44E-104.1E, 9.767N-18.14N, 中国東部: 109.7E-120.9E, 20.93N-32.9N. アメリカ中部 (中国東部, 東南アジア) は JJA において降水変動に与える陸面影響度が特に大きく (小さく) 示された地域.

SON の 3 つの季節において陸面の影響は大きな値が示されたが, DJF のみ 0.1 以下と極めて小さい. その原因として北半球の夏で同様の実験を行った既存の研究で述べられている通り, 地表面付近の土壤水分や大気が半乾燥状態である⁹⁾ ことと関係がみられるかもしれない.

4. 3 地域における季節変動の地域特性

3 章では降水変動に与える陸面影響度の季節性について議論を行った. 本章では JJA において陸面影響度が大きく示された北米中部, 小さく示された中国東部と東南アジア (タイ) の 3 地域の降水変動に与える陸面影

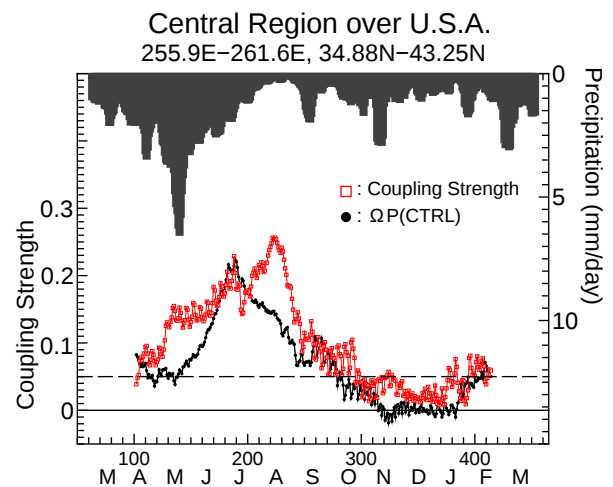


図-4 北米中部における降水変動に与える陸面・SST 影響度の季節変動. □: 陸面影響度 (Coupling Strength), ●: SST 影響度 ($\Omega_P(CTRL)$). Coupling Strength は $\Omega_P(FIXD)$ から $\Omega_P(CTRL)$ を引いた差を示す. 破線: 92% の有意水準. 棒グラフ: 6 日平均された日降水量.

響度の季節変動特性に着目する. 上記 3 地域の地域区分は図 3 に示す通りである.

(1) 北米中部

図 4 は北米中部における陸面影響度の季節変動を示す. 図中の □(●) 印は陸面 (SST) 影響度であり, ある日を含む前後 1.5 ヶ月間の 6 日合計された降水変動に与える陸面 (SST) 影響度をグリッドごとに評価し, それを

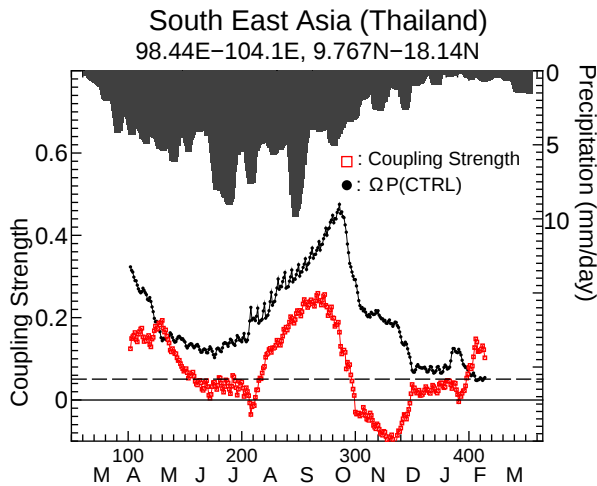


図-5 東南アジア（タイ）における降水変動に与える陸面・SST 影響度の季節変動。図中の線、グラフの詳細は図-4 に記す。

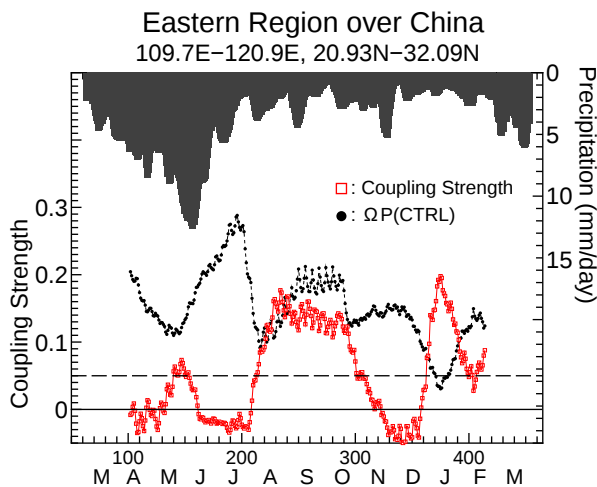


図-6 中国東部における降水変動に与える陸面・SST 影響度の季節変動。図中の線、グラフの詳細は図-4 に記す。

領域平均したものである。また図中の棒グラフは 6 日平均された日単位降水量の 16 アンサンブルメンバー平均値を日ごとに示す。GLACE では JJA においてのみ陸面影響度の算定を行ったため、北米中部では季節に関係なく陸面の影響度が大きいのか否か言及することはできなかったが、図 4 より JJA を極大値として陸面影響度の明瞭な季節変動が存在することがわかる。JJA において陸面影響度が大きいことに関しては、3 章で記した通り、著者らの用いた CCSR/NIES を含む 12 の気候モデルが参加した GLACE と同様の結果である。

降水変動に与える陸面影響度について同時期の降水量と SST 影響度と合わせた議論を季節ごとに行う。まず 3 月から 5 月にかけて降水量の増加とともに陸面影響度も増加傾向を示す。その後 5 月を境に降水量は減少傾向をたどり 8 月中旬には約 1mm/day まで減少する。一方、陸面影響度は 8 月まで増加傾向にあり、1 年で最も降水変動に与える陸面影響度が大きい時期を迎える。降水量が約 2mm/day と横ばいを示す 9 月から翌年 2 月にかけて、陸面影響度は 10 月中旬まで大きな減少を

示し、その後 2 月まで降水変動に与える陸面の影響は極めて小さい。

図中の●印で示す降水変動に与える SST の影響は 5 月上旬から上昇し始め、7 月に最も影響が大きい。その後、季節の進行とともに SST の影響は減少し、10 月中旬から翌年 2 月にかけて統計的に有意な値 (92%) ではなくなる。

以上を総括すると、北米中部穀倉地帯における春と夏の天気は陸面・SST 双方の影響が最も卓越した時期であることがわかった。つまり陸上および海上における観測網を充実させることにより、同地域の夏の降水変動の予測可能性が増大することを示唆するものである。一方、秋と冬では陸面・SST の影響は極めて小さく、同地域の降水変動は境界値問題よりも大気変動特性に強く依存するものと考えられる。

(2) 東南アジア（タイ）

タイにおける結果を図 5 に示す。タイの季節は雨季と乾季に大別され、雨季は 5 月の中旬ごろに始まり 9 月末に終息する。図に示す通り、気候モデルの示すアンサンブル平均された 6 日平均値の降水量は 3 月下旬から増加をはじめ、10 月まで減少を示す。

降水変動に与える SST の影響は 6 月下旬から 9 月下旬をピークに増加傾向を示す。タイではこの時期インド洋からの水蒸気量が卓越する¹⁰⁾ため、水蒸気量としても海の影響が大きいと言えよう。しかし本研究では量としてではなく、変動に与える影響（敏感さ）に着目しているため、両者の結果は単に同一の傾向を示すものではない。

陸面の影響度は降水量の増加に対し 5 月上旬から減少を始め、7 月中旬ではその影響は極めて小さな値を示す。GLACE では JJA における東南アジアの降水変動に与える陸面の影響は小さいという結果が得られた⁴⁾が、これは 6、7 月において特にその傾向が強く示されたからであろう。7 月下旬からは陸面の影響は大きく増大し 9 月中旬にピークを迎え、その後減少をはじめ、10 月中旬以降は無視し得るほどの大きさとなる。Kanae et al(2001) は領域モデルを用い、タイにおける森林伐採が降水量に与える影響に関し研究を行ったところ、9 月においてのみ森林伐採による陸面形態の変化が降水量の減少をもたらすことを示唆した¹¹⁾。これは上記の通り、9 月において降水変動に与える陸面影響度が大きいことと同様の傾向を示すものと考えられる。

(3) 中国東部

中国東部における結果を図 6 に示す。同地域では Meiyu と呼ばれる雨季の開始に伴い 5 月下旬から 6 月にかけて降水量の増加がみられる。本研究で用いられる気候モデルは 3 月から降水量の増加し、5 月下旬から

6月上旬をピークに示す。その後、8月上旬にかけて降水量は減少傾向にある。この時期、一旦4月から減少を示すSSTの影響が5月中旬を境に増加傾向に転じ、6月中旬をピークに降水変動に対し大きな影響を与える。一方図6に示すとおり陸面の影響は統計的に有意でない小さな値となる。これについて考えられる理由を以下に記す。ひとつには雨季に当たるこの時期の気候は湿潤となるため、土壌水分等の変動による陸面境界値の影響が卓越しない。もしくは本研究で用いる気候モデルの水平解像度の粗さ(T42, 約280km)のため前線構造を正確に表現できておらず¹²⁾、そのため陸面の影響度を過小評価しているのではないか。また陸面モデル(MATSIRO)が水田の効果を有していないため、多くの地域の水田が水で満たされるこの時期の陸面状態を十分に表現されていないことも一因であるかもしれない。

一方、7月下旬になると降水変動に与える陸面の影響は大きく増加が認められ、10月下旬までその影響は継続する。同時期SSTの影響も大きな値を示すことから、陸面・SSTの観測網を充実させることによる降水変動の予測可能性の上昇が1年のうちで最も期待され得る時期と言えよう。

5. まとめ

本研究では大気大循環モデルを用いて降水変動に与える陸面影響度の季節変動に着目し、その評価を行った。世界12の気候モデルを用いて同様の実験を行ったGLACEでは北米中部穀倉地帯やインド、サヘル地域において陸面影響度が強く示されたが、中国や東南アジアでは陸面の影響度は極めて小さい⁴⁾ものであった。これに対し、本研究ではJJAの北米中部における降水変動は陸面の影響を大きく受けることが示されたものの、それは春から夏にかけてのみの兆候であり、秋から冬にかけては陸面の影響はかなり小さなものであるという結果が得られた。この結果は降水変動に与える陸面影響度にはかなりの季節性を有することを示唆するものである。

一方、タイを中心とする東南アジアや中国東部ではJJAにおいて陸面の影響度は小さいことがGLACEでも示されたが、9~10月では大きな値が得られた。タイではこの時期が雨季の後期から終息する時期であることから、陸面が雨季と乾季の移り変わりに何らかの役割を果たしているのかもしれない。

北米中部だけでなく海洋に面した中国東部とタイの両地域において降水変動に対し陸面の影響が強い季節が存在することは、海に近い地域だからといって海の影響だけが卓越するわけではないことを示し、陸上観測網の充実化が季節によっては降水変動の予測可能性に大きく向上することを示唆するものである。

今後は本研究で得られた降水変動に与える陸面影響度に大きな季節性が有するという結果に対し、大気-陸面間の物理的なメカニズムの解明を試みる予定である。謝辞：本研究は科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業『人間活動を考慮した世界水循環水資源モデル』(代表:沖大幹)の成果の一部です。また日本学術振興会21世紀COEプログラムからも援助を受けています。大気大循環モデルCCSR/NIES AGCM5.6の使用に関して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感謝致します。最後に有益な意見を下さった査読者の方に感謝致します。

参考文献

- 1) Shukla, J. J. Anderson, D. Baumhefner, C. Brankovic, Y. Chang, E. Kalnay, L. Marx, T. Palmer, D. Paolino, J. Ploshay, S. Schubert, D. Straus, M. Suarez, and J. Tribbia. Dynamical seasonal prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 81, pp. 2593-2606, 2000.
- 2) Shukla, J. and Y. Mintz. Influence of land-surface latent heat flux on the earth's climate. *Science*, Vol. 215, pp. 1498-1501, 1982.
- 3) Koster, R. D. and J. Suarez. The relative contributions of land and ocean processes to precipitation variability. *J. Geophys. Res.*, Vol. 100, pp. 13 775-13 790, 1995.
- 4) Koster, R. D., P. Dirmeyer, Z. Guo, G. Bonan, E. Chan, P. Cox, C. T. Gordon, S. Kanae, E. Kowalczyk, D. Lawrence, P. Liu, C. H. Lu, S. Malyshev, B. McAvaney, K. Mitchell, D. Mocko, T. Oki, K. Oleson, A. Pitman, Y. C. Sud, C. M. Taylor, D. Versegly, R. Vasic, Y. Xue, and T. Yamada. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. *Science*, Vol. 305, pp. 1138-1140, 2004.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) Koster, R. D. and GLACE team. GLACE: The global land-atmosphere coupling experiment. 1. Overview. *J. Hydrometeor.*, (in press) 2005.
- 9) Guo, Z. and GLACE team. GLACE: The global land-atmosphere coupling experiment. 2. Analysis. *J. Hydrometeor.*, (in press) 2005.
- 10) 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.
- 11) Kanae, S., T. Oki, and K. Musiake. Impact of deforestation on regional precipitation over the indochina peninsula. *J. Hydrometeor.*, Vol. 2, pp. 51-70, 2001.
- 12) Ninomiya, K., T. Nishimura, W. Ohfuchi, T. Suzuki, and S. Matsumura. Features of the baiu front simulated in an AGCM (T42L52). *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 80, pp. 697-716, 2002.

(2005. 9. 30 受付)