

高解像度全球気候モデルによる 地球温暖化時の夏季アジアモンスーン

ASIAN SUMMER MONSOON UNDER THE GLOBAL WARMING USING A
HIGH-RESOLUTION ATMOSPHERIC GENERAL CIRCULATION MODEL

大楽浩司¹・江守正多²
Koji DAIRAKU and Seita EMORI

¹防災科学技術研究所 総合防災研究部門 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)

²国立環境研究所 大気圏環境研究領域 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

Results from time-slice ensemble experiments using a T106 AGCM revealed changes in the South Asian summer monsoon resulting from climate change. Model results under global warming conditions, which are consistent with previous studies, suggested more warming over land than over the ocean, a northward shift of lower tropospheric monsoon circulation, and an increase in mean precipitation during the Asian summer monsoon. The number of extreme daily precipitation events increased significantly. Increases in mean and extreme precipitation were attributed to greater atmospheric moisture content (a thermodynamic change). In contrast, dynamic changes limited the intensification of mean precipitation. Enhanced extreme precipitation over land in South Asia arose from dynamic changes rather than thermodynamic changes.

Key Words: South Asian Monsoon, Extreme Events, Global Warming, Hi-resolution climate model

1. はじめに

これまで地球温暖化の影響については、主に気温や降水量などの平均値の変化について論じられてきた。それは、気候モデルによる地球温暖化実験の出力データが月平均程度でしか提供されてこなかったことや、気候モデルの出力を時間・日単位で検証可能な観測データが非常に限られていること、気候モデルの空間解像度が粗く、台風や豪雨のようなメソスケールの現象が重要となってくる極端な現象の再現性、その温暖化時の変化について、十分な精度を持ち得なかったということがあった。しかし、健康や、防災、水資源管理、農業生産、生態系において特に重要であるのは、熱波によってもたらされる極端な高温日、台風や集中豪雨、長い乾燥期間といった極値現象の頻度や強度の変化であるという認識が強まってきている。実際、世界各地における観測から降水量、気温の極値分布の変化が示唆されている¹⁾。

非常に活発な大気・陸域間の熱・水循環に特徴づけられるアジアモンスーン地域には、世界の60%を越す人口が集中している。アジアモンスーンの変動は洪水・渇水を引き起こし、地域経済や人々の生活に大きな影響を

及ぼす。気候変動は発展途上国の極端現象に対する脆弱性を悪化させる可能性が強い²⁾。それゆえ、人為起源の排出ガスによって引き起こされる地球温暖化がアジアモンスーンへどのような影響を及ぼすのかということは、非常に重大な関心事であり、近い将来の適応策・緩和策の指針を得るために、解析・予測を行うことが緊急に求められている。

これまで温暖化時のアジアモンスーンに関して数多くの研究が行われてきた。例えば、海陸の熱的コントラストの強まり³⁾や、海面水温が温まり水蒸気が増加することによって、南アジア夏季モンスーンによる降水の増加と、年々変動が強まることを示したものもあれば、対流圏下層のモンスーン循環が北へシフトし、温暖化した大気中水蒸気量の増加によって夏季の降水が増加することを示したものもある^{5), 6), 7), 8)}。Douville ら⁹⁾と May¹⁰⁾は、モンスーン循環の弱まりと降水の増加を示した。Mitchell と Johns¹¹⁾は、エアロゾルによってモンスーン循環が弱まる可能性を示している。

地球温暖化に対するアジアモンスーンの応答は、アジアの多くの人々の重大な関心事であるが、数多くの研究にもかかわらず、その応答は未だ明らかではない。ま

た、低解像度（空間解像度 300km 程度）の気候モデルには前述した制限があり、特に夏季アジアモンスーンの日降水量の変動や極値の変化に関してごく少数の研究しか行われていない^{5), 12)}。多くの研究者は、平均的な南アジア夏季モンスーンの増加は、主に大気中水蒸気量の増加によって生じると論じている。しかしながら、水蒸気の増加によって説明できるのは変化の一部でしかない。また、近年、世界最高速・最大規模のスーパーコンピュータである地球シミュレータが 2002 年に稼動し、高解像度地球温暖化シミュレーションが可能となった。本研究は、高解像度全球気候モデルを用いて、温暖化時の南アジア夏季モンスーンの変化、特に力学的変化と熱力学的変化がその日降水の変化に対してどのように影響を及ぼすかについての検討を行う。

2. 数値モデルと数値実験

数値モデルは、水平解像度T106（約1.1度グリッド）、鉛直 56 層の高解像度全球大気モデル（CCSR/NIES/FRSGC AGCM）¹³⁾を用い、標準実験5本、CO₂倍増実験7本のタイムスライスアンサンブル実験を行った。それぞれのアンサンブルメンバーの積分期間は20年である。アンサンブル実験によって、例えば降水のような内部変動が大きい現象、特に頻度の少ない極値現象の変化に関する統計的信頼性が増すことが期待される。

標準実験は二酸化炭素濃度を345ppmvに固定し、下部境界条件には、1979年から1998年のハドレーセンターの海水密接度と海面水温のデータセット¹⁴⁾を用いた。また、エアロゾルの排出データは、1979年から1996年の平均を用いた。それぞれのアンサンブルメンバーは、数年間のスピニングランから取った年初めの異なる初期条件を用いた。

二酸化炭素を倍増（690ppmv）させた温暖化実験では下部境界条件として、大気海洋結合モデル（CCSR/NIES/FRSGC GCM）によるIPCC IS92aシナリオ実験、また、他機関の結合モデル（NCAR-CSM, NCAR-PCM, MPI, GFDL, CSIRO, CCC）によるSRES A2シナリオ実験における温暖化時の海面水温のアノマリを上記ハドレーセンターの海面水温データに足し合わせたものを用いた。エアロゾルは、標準実験と同じデータを用いた。

標準実験のアンサンブル間のばらつきは、大気の内部分動による不確実性を示し、CO₂倍増実験のアンサンブルは、大気の内部分動と、予測された海面水温による外部強制力の違いから生じる不確実性を示すものである。

3. 解析手法

本研究では、アジアモンスーンの日降水の変化が気候

変動による力学的な場の変化によって生じるのか、それとも同様の力学場が与えられた場合に生じることが期待される降水特性が変化するか、という観点で解析を行う。

温暖化時の日降水の変化に対する力学的、熱力学的な影響を解析するために、500hPa高度における日単位の鉛直速度（ ω ）を、あるそれぞれのグリッドにおける“力学的擾乱”を代表するものとして用いる^{15), 16)}。上昇流はほとんどの場合積雲の中で起こるため、グリッドにおける上昇流は積雲パラメタリゼーションによるサブグリッドの雲中の鉛直流の強さを反映したものである。ある地域における500hPa鉛直速度の確率密度関数を Pr_ω とする。本研究においては、 ω の間隔を20hPa/dayとした。また通常の鉛直速度の定義とは異なり、 ω の正の値を上昇流とし、負の値を下降流とする。ある力学場が与えられた時の日降水強度（ R_ω ）を、それぞれの“ ω ビン”毎にコンポジットする。ある地域の平均降水量 $\bar{R}$ は、次のように計算される。

$$\bar{R} = \int_{-\infty}^{+\infty} \text{Pr}_\omega R_\omega d\omega$$

ここで、温室効果ガスの増加に関係した気候変化による平均降水量の変化（ $\delta\bar{R}$ ）は、

$$\delta\bar{R} = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta\text{Pr}_\omega R_\omega d\omega + \int_{-\infty}^{+\infty} \text{Pr}_\omega \delta R_\omega d\omega + \int_{-\infty}^{+\infty} \delta\text{Pr}_\omega \delta R_\omega d\omega \quad (1)$$

と表すことが出来る。

式（1）の右辺第1項は、鉛直運動の頻度や強さ（正負の反転も含む）の変化によって生じる Pr_ω の統計的重みの変化による寄与を表す。すなわち、ある鉛直流（ ω ）の時に期待される降水強度（ R_ω ）は変化しないが、力学的な場（ Pr_ω ）が変化することによって生じる降水の変化である。この項を、力学的変化（*dynamic change*）とする。第2項は、力学的な場（ Pr_ω ）が変化しなかった場合でも、ある鉛直流（ ω ）の時に生じる降水強度（ R_ω ）の変化（降水特性の変化）によって生じる寄与を表す。この項を非力学的変化（*non-dynamic change*）または熱力学的変化（*thermodynamic change*）とする。これは、主に大気中の水蒸気の変化による降水特性の変化に相当する。最後の第3項は、その両方の効果による相関項（*co-variation*）である。

ここでは、大気中水蒸気の増加による水蒸気収束の強まりは熱力学的効果として考慮され、収束の強まりによる水蒸気収束の強まりは力学的効果となる。

4. 南アジア夏季モンスーンの平均場の変化

図-1(a)は、標準実験のアンサンブル平均の6月から9月の降水分布と、850hPa高度の水平風を示す。アンサンブル実験の結果は、観測で見られる夏季モンスーンの特

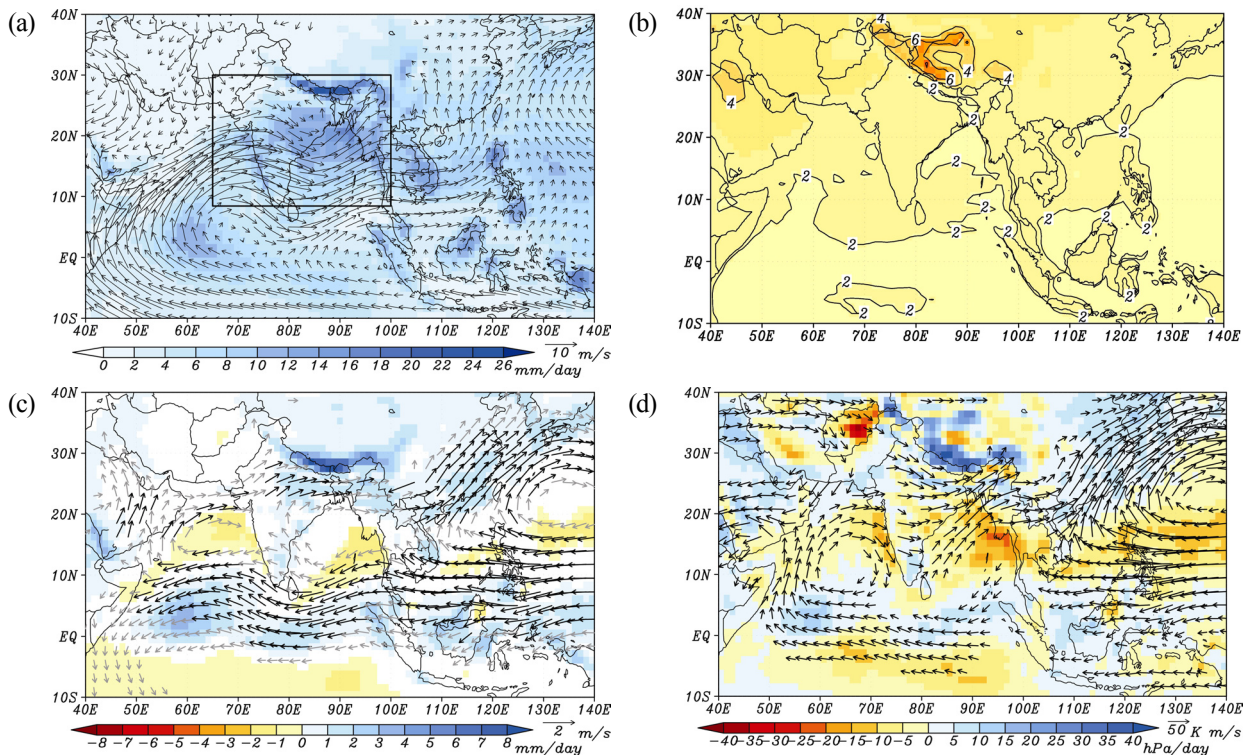


図-1 (a) 6月から9月における標準実験のアンサンブル平均の降水と850hPa高度の水平風。予測された平均場の変化: (b) 2m気温, (c) 降水と850hPa高度の水平風, (d) 鉛直積算水蒸気フラックスと500hPaの鉛直流。(a) に示される四角は、図-2, 3, 4, 5 で用いられた解析領域 (8.5–30°N, 65–100°E) 。(b) の2m気温の変化は、信頼水準99%を超えた変化である。(c) の着色部分は、信頼水準95%を超える降水の変化を示し、灰色と黒のベクトルは、それぞれ0.5と1.0m/s を越える風速の変化を示す。(d) のベクトルは、 $2.0 \times 10^4 \text{ m/s}$ 以上の水蒸気フラックスの変化を示す。

表-1 観測とアンサンブル実験のモンスーンインデックス

	Precipitation (mm/day)		U-shear (m/s)	V-shear (m/s)	
	IR-rain	IB-rain (land)			
Observation	6.54	6.27	23.27	5.27	
Control	7.74	8.00	22.31	4.25	
2xCO ₂	8.16	8.97	20.65	3.85	
Change	0.42 (3.36%)*	0.97 (9.93%)*	-1.66 (-7.46%)*	-0.40 (-9.31%)*	* 99%信頼水準

注：観測の降水は1997-2003年のGPCP 1DDを用いた。観測のU, Vシアーは、1989-2001年の水平解像度T106のERA40から計算。

微的な循環場（対流圏上層の強い東風、下層の強い西風）や降水分布を比較的良く再現出来ている（図省略）。2m気温は、CO₂倍増時に2度から6度の昇温が予測される。海洋上よりも、チベット高原のような陸域においてより高い昇温が見られる（図-1(b)）。図-1(c)は、対流圏下層のモンスーン循環の北への移動と、南アジア陸上における降水の顕著な増加を示している。これらの変化は、過去の研究において示されたものと定性的な一致が見られる^{5), 6), 7), 8)}。

この領域における蒸発の増加（図省略）は、地域的な水蒸気供給を増加させる。温暖化した大気中における水蒸気量の増加によって、水蒸気フラックスは増加し、南アジア夏季モンスーンによる陸上の降水を増加させる（図-1(c), 図-1(d)）。

表-1にモンスーンのインデックスを示す。IR-rainはイ

ンド付近（8.5–30°N, 65–100°E）における領域平均降水量であり、IB-rainは同じ領域の陸上だけで計算した値である¹⁷⁾。観測データには、1997-2003年のGPCP 1DD（Global Precipitation Climatology Project One-Degree Daily）¹⁸⁾を用いた。数値実験のモンスーンインデックスは、標準実験と温暖化実験それぞれでアンサンブル平均値を計算した。標準実験の降水は、観測に比べ過大評価となっている。温暖化時のIR-rainとIB-rainの変化は、それぞれ3.36, 9.93%であった。

表-1右側に風のシアーに関する2つの力学的インデックスを示す。ウォーカー循環に関係したインド洋上（Equator–20°N, 40–110°E）における6月から9月の850と200hPaの東西風の鉛直シアー（U-shear）¹⁹⁾と、インドと東南アジア地域（10–30°N, 70–110°E）におけるハドレー循環に関係した南北風の鉛直シアー（V-shear）²⁰⁾である。

標準実験のインデックスは、観測と良い対応を示している。温暖化時の東西風シアーと南北風シアーの変化は、それぞれ-7.46と-9.31%である。2つの力学的インデックスの変化から、温暖化時の夏季モンスーンに関連した大規模な循環の弱まりが示唆される。これらのインデックスの変化は、主にインドや熱帯インド洋における平均的収束場の移動によって生じている。温暖化などの気候変動の影響によって循環場の位置が変化する場合には、現在の地理的に不動のモンスーンインデックスは、適切な尺度ではないかもしれない⁶⁾。

5. 日降水の変化に対する力学的、熱力学的効果

ここでは、6月から9月の夏季南アジア陸上（8.5–30°N, 65–100°E）における日降水の変化について解析を行う。

図-2は日降水の頻度分布を示す。標準実験で計算された日降水頻度は、20-30mm/dayのやや強い降水と極端に強い降水（60mm/day以上）の頻度がGPCP 1DDに比べて過大であるが、概ね良く一致している。西太平洋域や中国を含む東アジア地域など極端な降水イベントもよく再現できている地域もある¹⁵⁾。極端な降水イベントについての限られた再現性の原因の一端は観測の不足にある。なぜならば、日降水の地上雨量観測は人口が多い限られた陸上に集中しているからである。例えば、山岳地域における観測は非常に限られているため、地形による降水の変動（地形性降雨）は大きなバイアスやランダム誤差の原因の一つである^{21), 22)}。図-2に示されるように、CO₂倍増時においてアンサンブルの1標準偏差の範囲を超える非常に強い降水（50mm/day以上）の顕著な強まりが見られる。モデルは、定量的な妥当性について、パラメタリゼーションの改良や観測の充実・高度化によって今後さらに洗練されなければならないが、予測された系統的变化についての定性的議論は十分意味がある。

図-3(a), 3(b)は500hPa高度における鉛直流の相対頻度 (Pr_{ω}) と、その2つのアンサンブル実験間の差を示したものである。比較強い上昇流（300hPa/day前後）は減少し、弱い上昇流（0から150hPa/day）は増加することが予測される。比較弱い下降流（-300から0 hPa/day）は減少する。このように、鉛直流の平均値は上昇側へシフトし、その分散は減少する。極端に強い上昇流（500hPa/day以上）については僅かながらではあるが、増加することが示唆される。

図-4は、ある力学場において期待される日降水強度 (R_{ω}) を示す。極端に強い上昇流の相対頻度 (Pr_{ω}) は非常に小さいけれども、豪雨は通常強い上昇流を伴う。温暖化時には、ある上昇流が与えられた際に期待される降水強度に、アンサンブル実験間の1標準偏差の不確実性を超える顕著な強まりがみられる。

温暖化時において、非常に強い上昇流が生じるときに期待される降水強度の変化（500-1000hPa/dayの平均で

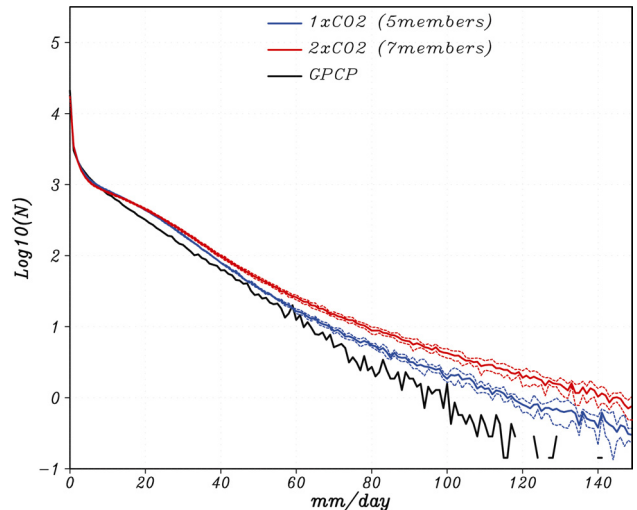


図-2 6月から9月における南アジア陸上（8.5–30°N, 65–100°E）の日降水頻度分布。黒の実線がGPCP 1DD (1997-2003) による観測。青と赤の実線はそれぞれ標準実験と温暖化実験のアンサンブル平均。破線は、それぞれのアンサンブル実験の標準偏差。

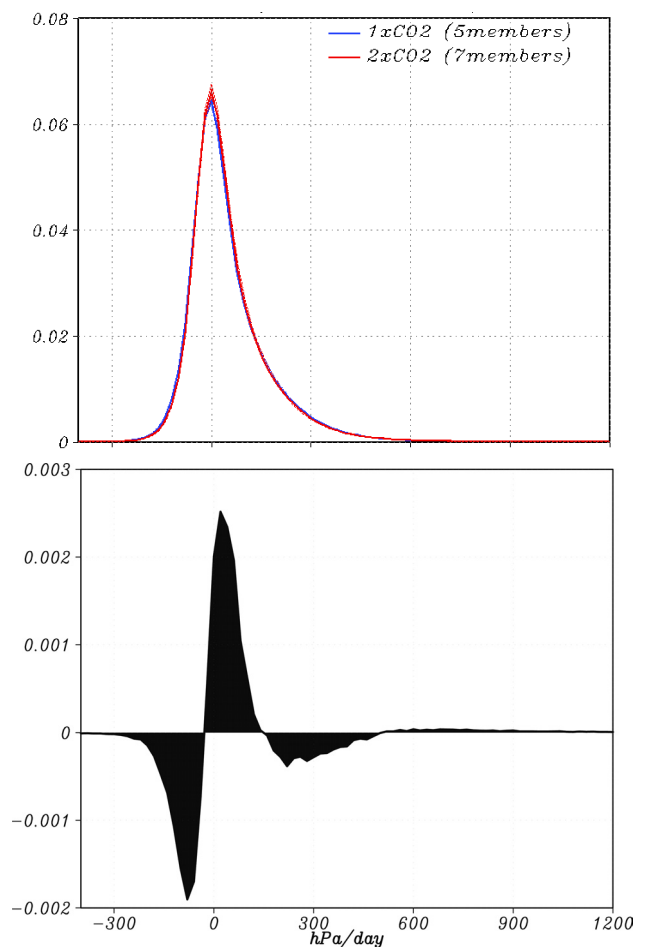


図-3 (a) 500hPa高度の鉛直流（上向き）の相対頻度分布。解析領域と青と赤の線は図-2と同じ。(b) タイムスライスアンサンブル実験の相対頻度分布の差。

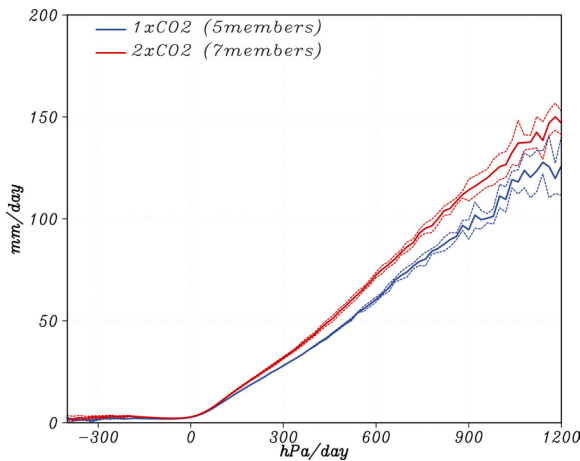


図-4 500hPa高度の鉛直流（上向き）に対して期待される日降水強度．解析領域，実線・破線は図-2と同様．

17.4%) は，この解析領域における可降水量の増加（18.9%）とほぼ一致している．したがってこの降水強度の変化は，大気中水蒸気の増加が主たる要因であると考えられる（熱力学的変化）．

図-5は，解析領域における温暖化時の日降水の変化に対する力学的変化，熱力学的変化，相関項の寄与について示したものである．それぞれの項は，式（1）で定義されている．解析領域陸上における平均降水量の変化（9.93%）に対する力学的変化，熱力学的変化，相関項は，それぞれ0.3, 9.64, -0.01%であった．南アジア夏季モンスーンの陸上における平均降水量の変化は，主に熱力学的な変化によって生じており，力学的な影響は小さかった．相関項の影響はほとんど無視できる．

鉛直流の強さ別に見ると，力学的変化は図-3(b)に示される力学場の変化により，比較的強い（弱い）上昇流によってモンスーンの日降水を減少（増加）させている．対照的に，熱力学的変化はほとんどすべての場合において日降水の増加をもたらしている．極端な上昇流（600hPa/day以上）の場合には，力学的変化の方が熱力学的変化よりも降水の変化に対して大きく寄与している．この力学的変化は，図-3(b)に示される極端な上昇流の若干の増加と関係している．

解析領域で，陸上だけでなく海上も含んだ場合は，平均降水量の変化に対する力学的変化，熱力学的変化，相関項の寄与は，それぞれ-1.87, 5.55, -0.32%であった．力学的変化が平均降水量の増加と日降水の強まりを抑制するのに比較的大きな役割を果たしている．この力学的変化は鉛直流の分散の減少と関係しており，その一部は循環場の北へのシフトと関係したアラビア海とベンガル湾上における高気圧性のアノマリによるものである．しかし，依然として夏季モンスーンの日降水の強まりの主要因は熱力学的変化であった．

6. まとめ

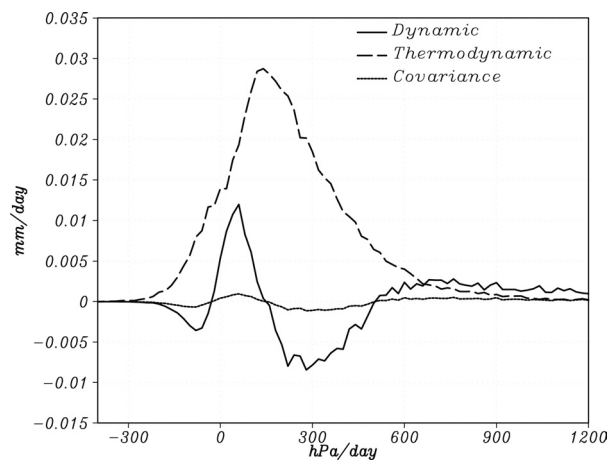


図-5 温暖化時の日降水の変化に対する力学的変化，熱力学的変化，相関項．解析領域は図-2と同じ．実線は力学的変化，破線は熱力学的変化，点線は相関項．

南アジア地域における循環場の北へのシフトが大規模スケールのモンスーンインデックスを弱めていた．この循環場の移動は，温暖化時における海陸の熱的コントラストの強化と，熱帯太平洋におけるエルニーニョに似た温暖化パターンによってハドレー・ウォーカー循環が変調していることに起因すると考えられる．ただし，エルニーニョに似た海面水温パターンは，全てのモデルに見られたわけではない（図省略）．

非常に強い上昇流の時の日降水強度の変化は，可降水量の増加とほぼ一致していた（熱力学的変化）．しかしながら，南アジア陸上において，極端な降水現象に対する力学的変化の寄与は熱力学的効果を上回っていた．

湿潤対流が卓越する熱帯地域においては，CO₂の増加に応答して対流圏上層における正味の放射冷却の増加，地表における正味の放射加熱の増加，大気中水蒸気の増加，上向き潜熱輸送の強まりなどの変化が起き，対流圏上層の温暖化によって乾燥大気の静的安定度が強まる（図省略）．安定度の強まりは解析領域の多くの地域において鉛直流の分散を抑制する．このような乾燥大気の静的安定度の変化にもかかわらず，チベット高原の南斜面のような山岳地域近くにおいては，モンスーン循環の北へのシフトに関係していると考えられる非常に強い上昇流の強化が見られる．これがこの地域における極端な降水現象の強まりを引き起こしている（力学的効果）．

高解像度気候モデルによるアンサンブル実験結果から顕著な降水の変化が示唆された．しかしながら，大気－海洋の結合が夏季アジアモンスーンにとって非常に重要な特徴であり，海面水温を与えた大気モデルによる実験と大気－海洋結合実験の間には，大きな相違が見られることが指摘されている^{23), 24)}．本研究の結果の信頼性については，高解像度大気・海洋結合モデル，もしくは海洋混合層モデルと結合した大気大循環モデルによるアンサンブル実験，複数のモデルによるマルチモデルアンサン

ブルによってさらなる評価を行う必要があると考える。

謝辞：本研究は、環境省地球環境研究総合推進費「極端な気象現象を含む高解像度気候変化シナリオを用いた温暖化影響評価研究（B-12）」（代表：江守正多 国立環境研究所）の一部として行われました。数値シミュレーションは、文部科学省の人・自然・地球共生プロジェクト「高分解能大気海洋モデルを用いた地球温暖化予測に関する研究」において、地球シミュレータを利用して行われました。東京大学気候システムセンターの木本昌秀教授には、大変有益なコメントを頂きました。

参考文献

- 1) Easterling, D. R., Meehl, G. A., Parmesan, C., Changnon, S. A., Karl, T. R. and Mearns, L. O.: Climate Extremes: Observations, Modeling, and Impacts, *Science*, Vol.289, pp.2068-2074, 2000.
- 2) IPCC: *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation & Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, McCarthy, J. J., Canziani, O. F., Leary, N. A., Dokken, D. J., and White, K. S. eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK., pp.1000, 2001.
- 3) Meehl, G. A., and Washington, W. M.: South Asian summer monsoon variability in a model with doubled atmospheric carbon dioxide concentration, *Science*, Vol.260, pp.1101-1104, 1993.
- 4) Meehl, G. A., and Arblaster, J. M.: Mechanisms for projected future changes in south Asian monsoon precipitation, *Clim. Dyn.*, Vol.21, pp. 659-675, doi:10.1007/s00382-003-0343-3, 2003.
- 5) Bhaskaran, B., Mitchell, J. F. B., Lavery, J. R., and Lal, M.: Climatic response of the Indian subcontinent to doubled CO₂ concentrations, *Int. J. Climatol.*, Vol.15, pp.873-892, 1995.
- 6) Kitoh, A., Yukimoto, S., Noda, A., and Motoi, T.: Simulated changes in the Asian summer monsoon at times of increased atmospheric CO₂, *J. Met. Soc. Japan*, Vol.75, pp.1019-1031, 1997.
- 7) Hu, Z. -Z., Latif, M., Roeckner, E., and Bengtsson, L.: Intensified Asian summer monsoon and its variability in a coupled model forced by increasing greenhouse gas concentrations, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.27, pp.2681-2684, 2000GL01155, 2000.
- 8) Ashrit, R. G., Douville, H., and Rupa Kumar, K.: Response of the Indian monsoon and ENSO-monsoon teleconnection to enhanced greenhouse effect in the CNRM coupled model, *J. Met. Soc. Japan*, Vol.81, pp.779-803, 2003.
- 9) Douville, H., Royer, J. -F., Polcher, J., Cox, P. M., Gedeney, N., Stephenson, D. B., and Valdes, P. J.: Impact of CO₂ doubling on the Asian summer monsoon: Robust versus model-dependent responses, *J. Meteorol. Soc. Japan*, Vol.78, pp.421-439, 2000.
- 10) May, W.: Potential future changes in the Indian summer monsoon due to greenhouse warming: analysis of mechanisms in a global time-slice experiment, *Clim. Dyn.*, Vol.22, pp.389-414, doi:10.1007/s00382-003-0389-2, 2004.
- 11) Mitchell, J. F. B., and Johns, T. C.: On modification of global warming by sulfate aerosols, *J. Clim.*, Vol.10, pp.245-267, 1997.
- 12) May, W.: Simulation of the variability and extremes of daily rainfall during the Indian summer monsoon for present and future times in a global time-slice experiment, *Clim. Dyn.*, Vol.22, pp.183-204, doi:10.1007/s00382-003-0373-x, 2004.
- 13) Emori, S., Hasegawa, A., Suzuki, T., and Dairaku, K.: Validation, parameterization dependence and future projection of daily precipitation simulated with a high-resolution atmospheric GCM, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.32, L06708, doi:10.1029/2004GL022306, 2005.
- 14) Rayner, N. A., Parker, D. E., Horton, E. B., Folland, C. K., Alexander, L. V., Rowell, D. P., Kent, E. C., and Kaplan, A.: Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century, *J. Geophys. Res.*, Vol.108, No.D14, 4407, doi:10.1029/2002JD002670, 2003.
- 15) 大柴浩司, 江守正多: 温暖化時の降水の極値現象の変化とそのメカニズムの考察, 平成16年度「異常気象と長期変動」研究集会報告, pp.85-94, 2004.
- 16) Emori, S., and Brown, S. J.: Dynamic and thermodynamic changes in mean and extreme precipitation under changed climate, *Geophys. Res. Lett.*, in press.
- 17) Sontakke, N. A., Plant, G. B., and Singh, N.: Construction of all India rainfall series for the period 1844-1991, *J. Clim.*, Vol.6, pp.1807-1811, 1993.
- 18) Huffman, G. J., Adler, R. F., Morrissey, M. M., Bolvin, D. T., Curtis, S., Joyce, R., McGavock, B., and Susskind, J.: Global precipitation at one-degree daily resolution from multisatellite observations, *J. Hydrometeorol.*, Vol.2, pp.36-50, 2001.
- 19) Webster, P. J., and Yang, S.: Monsoon and ENSO: Selectively interactive systems, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol.118, pp.877-926, 1992.
- 20) Goswami, B. N., Krishnamurthy, V., and Annamalai, H.: A broad scale circulation index for interannual variability of the Indian summer monsoon, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol.125, pp.611-633, 1999.
- 21) Xie, P., and Arkin, P. A.: Global Precipitation: A 17-Year Monthly Analysis Based on Gauge Observations, Satellite Estimates, and Numerical Model Outputs, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol.78, pp.2539-2558, 1997.
- 22) Dairaku, K., Emori, S., and Oki, T.: Rainfall amount, intensity, duration, and frequency relationships in the Mae Chaem watershed in Southeast Asia, *J. Hydrometeorol.*, Vol.5, No.3, pp.458-470, 2004.
- 23) Douville, H.: Limitations of time-slice experiments for predicting regional climate change over South Asia, *Clim. Dyn.*, Vol.24, pp.373-391, 2005.
- 24) Inatsu, M., and Kimoto, M.: Difference of boreal summer climate between coupled and atmosphere-only GCMs, *SOLA*, in press.

(2005. 9. 30受付)