

特集

# 「地球温暖化」はアジアモンスーンをどう変えるか？

安成 哲三 (名古屋大学地球水循環研究センター、気象学・気候学)

やすなり てつぞう

ユーラシア大陸の南・東部の気候は温暖化によってどのように変化し、また将来変化することが予想されるのか。水災害の増加がいわれるが、実際のデータはどうか。中国・日本を含む東アジアの梅雨前線帯では降雨の増加が見られ、温暖化の予測実験とも整合している。しかし、モンスーンアジア全体で見た場合、必ずしも降雨の増加は認められず、モデルとの整合性も低い。人間の諸活動の影響を含めた大気・水循環の精度の高い予測を、海洋学や生態学などの他分野との連携のもとで明らかにしていくことが求められている。

## 地球人口の半数以上が住むモンスーンアジア

ユーラシア大陸の南・東部に広がる東アジア、東南アジア、南アジアは、モンスーンアジアとよばれ、夏には湿った南よりの季節風と雨季に、冬には大陸からの乾いた季節風と乾季に特徴づけられるアジアモンスーン気候が卓越している。これらの地域には、モンスーン気候に適した水田稲作農業と豊かな自然の恵みにより、地球人口の約53%にあたる33億人が集中している。雨に恵まれているということは、同時に降雨の年々変動や季節内の変動による洪水、集中豪雨あるいは旱魃などにもしばしば見舞われており、多くの被害を受けている地域でもある。

近年、この地域における水災害が頻発あるいは増加する傾向が指摘されている。このような傾向が、二酸化炭素などの温室効果ガスの増加にともなう「地球温暖化」に関連した気候変動によるものなのか、あるいは、人口の都市への集中や土地利用の急激な改変などにともなう人為的な効果によるものなのか、あるいはその両方の作用によって生じているものなのかが、大きな問題として注目されている。

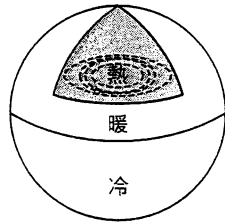
アジアモンスーン地域では、温室効果ガスの増

加が、全球的に気温を上昇させる「地球温暖化」そのものよりも、モンスーンにともなう降水現象や水循環にどのように影響するか、ということの解明のほうが、その人間活動への影響の大きさを考えると、重要かつ緊急な課題である。本稿では、このような視点で、「地球温暖化」がアジアモンスーン気候の変化にどう影響しうるか、あるいはしつつあるかを、気候モデルによる予測や過去数十年のアジアモンスーンにともなう降水量の長期的な変化傾向などをとりあげて、考察を試みる。

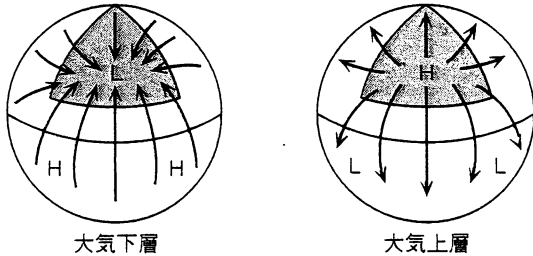
## 複雑なアジアモンスーンシステム

地球上最大のユーラシア大陸とまわりの海洋(インド洋、太平洋)のあいだでは大気の温度差が季節的に生じる。アジアモンスーンはそれによって作りだされる巨大な大気循環系である。図1に示すように、北半球の夏には、大陸が暖まり、海洋が相対的に冷たいために生じる温度差が、大陸には低気圧、海洋には高気圧を形成し、その気圧差がモンスーンの風系をつくりだす<sup>(1)</sup>。ただ、大陸と海洋の表面の直接的な加熱(冷却)だけでは、この循環系が生まれるには不十分である。モンスーンの風系により大陸周辺の海洋から運ばれ

(a) 表面の加熱



(b) 回転がない場合の大気循環



(c) 回転がある場合の大気循環

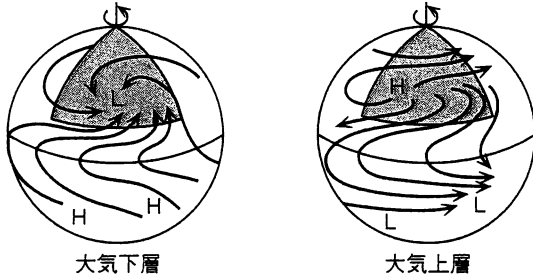


図1—アジアモンスーンの模式図。文献(1)より。(a)大陸での地表面加熱と冷たい海洋。(b)地球の回転がない場合の大気下層(左)と上層(右)の大気循環。(c)地球の回転効果を取り入れた場合の大気下層(左)と上層(右)の大気循環。

ンスーン循環系をつくりだしているという理解が、非常に重要である。図2は、このような水循環の役割を含めて、大陸と海洋のあいだに形成されるモンスーン循環を模式的に示している。なお、この図には比較のため、熱帯と中緯度(亜熱帯)の間の循環(ハドレー循環)の模式図も示している。これらの熱帯あるいは低緯度での大気循環系の維持には、水循環が潜熱エネルギー放出を通して決定的な役割をしている。

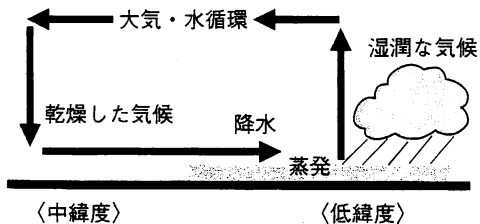
### 「地球温暖化」はモンスーンにどう作用するか

では、二酸化炭素などの温室効果ガスの世界的な増加は、図2に示したようなアジアモンスーンやハドレー循環系をどう変化させる可能性があるだろうか。

温室効果ガスが増加した場合に地球の気候がどうなるかは、いくつかの温室効果ガス増加のシナリオにもとづいて、多くの大気循環モデル(GCM)や大気海洋結合大循環モデル(AOGCM)を用いた数値実験による予測研究がなされている。気温変化に関しては、どのモデルも程度の差はあれ、とくに北半球高緯度の大陸域や北極域での顕著な気温上昇を予測しており、年平均気温で数°Cから10°Cにおよぶ大きな昇温を示している。これらの地域では、冬の積雪や海水域が気温の上昇にともなって縮小するため、表面のアルベード(反射率)がますます小さくなり、入射する放射エ

てくる水蒸気が大陸周辺で雲や降水を生じさせることにより、大気に莫大な潜熱が解放され、この潜熱による大陸付近での大気加熱が、実はモンスーン循環系の駆動力として最も大きく寄与している。モンスーンは巨大な水循環系であり、モンスーンにともなって雨が降ると同時に、その雨がモ

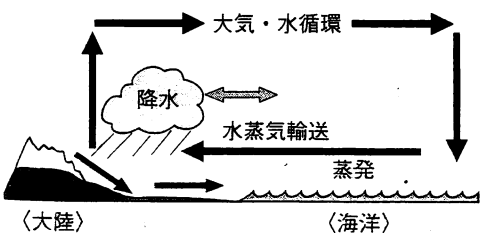
#### ハドレー循環



「地球温暖化」は南北の大気・水循環を活発化するか？

- +：蒸発-温室効果フィードバック？
- ：雲量増加によるフィードバック？

#### モンスーン循環



「地球温暖化」はモンスーンを活発化するか？

- +：海陸加熱差フィードバック？
- +：雪氷によるフィードバック？
- ：雲量増加によるフィードバック？
- ⇔：降水域の移動？

図2—水循環過程を取り入れた、ハドレー循環(上)とモンスーン循環(下)の2次元的な模式図。(上)は南北と鉛直の断面、(下)は水平(大陸・海洋間)と鉛直の断面を示す。

エネルギーがさらに増加するという正のフィードバックが有効に働くためである。

しかし降水量変化の予測については、モデルごと、あるいは地域ごとに結果が大きく異なっている。IPCC(気候変動に関する政府間パネル)による温室効果ガス増加のシナリオにもとづく降水量変化の予測でも、全球的にモデルで共通した結果は得られておらず、水循環に関わる気候予測のむずかしさを示している。とくに、熱帯地域や夏のアジアモンスーン地域の降水量変化については、モデル間でばらつきが大きく、共通に現れる有意な変化傾向は小さい。しかしながら、アジアモンスーンの降水量が増加する傾向は弱いながらも現れるモデルが多い<sup>(2)</sup>。

たとえば、図2で示したハドレー循環やモンスーン循環の模式図で、温室効果ガスの増加の効果を考えてみよう。温室効果(すなわち、地表面への放射エネルギーの実質的な増加と大気層の気温上昇)が海面をより暖め、水蒸気の蒸発量をさらに増加させたとしたら、熱帯海洋上の対流活動(と降水量)は増加し、熱帯と亜熱帯の間でハドレー循環は活発化し、亜熱帯では下降気流が強化されて、より乾燥気候化が進む可能性がある。海陸の間のモンスーン循環ではどうだろうか。大陸上の温暖化が進むことにより(冬季およびチベット高原などの山岳地域の)積雪が減少し、土壌が乾燥すれば、大陸の夏の加熱は促進され、海洋上の水蒸気の蒸発が同時に強化されれば、非常に強いモンスーン循環が期待されることになる。すなわち、この点からみれば、風が強くなり雨量も多くなると予想される。

しかし、海洋上での水蒸気輸送の強化や大陸域の乾燥化は、対流(降水)活動の中心を、より海洋側に移動させる可能性もある。また、水蒸気量の増加→海面水温上昇→対流活動の強化により、対流圏上部に達するような積乱雲群が増加すると、対流圏上部での気温上昇と乾燥化などで放射冷却効果が結果的に強化され、温室効果が弱められる可能性も指摘されている<sup>(3)(4)</sup>。いずれにせよ、蒸発、雲形成、降水、土壌水分、積雪などの水循環

過程は、放射や気温のわずかな分布の差やわずかな地形や植生の違いなどに影響を受けて大きく変化するため、モンスーン循環や降水量の変化が、温室効果ガスの増加によってどう変化するか予測には、まだ大きな不確定性がある。

### 近年のアジアモンスーンの変化傾向

1980年代後半以降、地球全体の気温は急激な上昇を示し、20年間で0.4°C以上の昇温傾向となっており、温室効果ガス増加による「地球温暖化」の懸念がますます高まっている。それでは、アジアモンスーンのこの数十年の変化に、この気温上昇の傾向に対応した「地球温暖化」の何らかのシグナルが見られるであろうか。

インドモンスーンについては、気候モデルによる温暖化予測実験(温室効果ガスを増加させた場合の気候変化を予測する数値実験)の多くの結果は、降水量の増加や年々変動度の増加を予測している<sup>(5)</sup>が、過去数十年の全インド地域降水量は、10~20年周期の変動はあるが、長期的な増加傾向は見られない。南西モンスーンの風の強さや1季節におけるモンスーンブレイク(中休み)の回数、モンスーン低気圧の頻度などは、図3に示すように、むしろ、減少傾向が顕著である<sup>(6)</sup>。東南アジアモンスーンについても、モンスーン降水量の長期的傾向は全体として見られないが、タイでは9月の降水量のみ顕著な減少傾向がみられる。これについては、過去数十年のタイにおける森林伐採による土地被覆改変の影響が、モンスーンの弱まった9月に選択的に現れているのではないかと、気候モデルによる研究から示唆されている<sup>(7)</sup>。しかし、西太平洋地域での熱帯低気圧活動の長期変動が関わっている可能性<sup>(8)</sup>も指摘されており、原因はまだよくわかっていない。中国・日本の梅雨前線活動に代表される東アジアモンスーンの降水量は、図4のように、前線付近の長江流域で、過去数十年、顕著な増加傾向が認められ、とくに積乱雲系の激しい雨の頻度増加がこの降水量増加に寄与していることも確認された<sup>(9)</sup>。

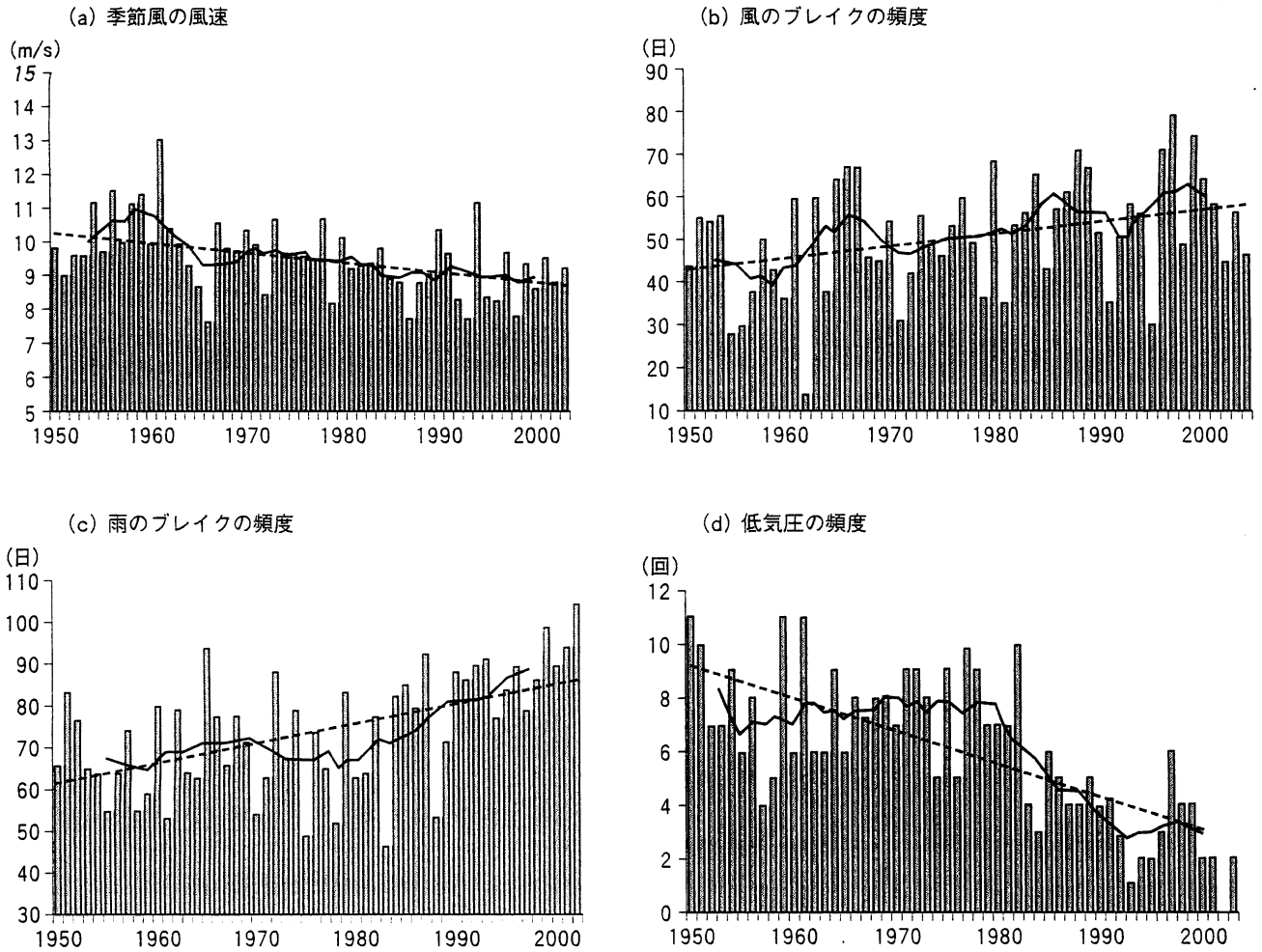


図3 — 1950~2003年にかけての、インドモンスーンに関連した気象要素の年々変動(棒グラフ)と変化傾向(破線)。(a)インド西岸におけるモンスーン季節風(850 hPa), (b)モンスーン期間中の風からみたブレイク(中休み)の頻度, (c)モンスーン期間中の雨からみたブレイク(中休み)の頻度, (d)モンスーン期間中の低気圧の頻度。文献(6)より。

この梅雨前線の活発化は、最近の高解像気候モデルによる温暖化予測実験結果<sup>(10)</sup>でも再現されており、近年の実際の変化傾向と予測による傾向が一致している。

以上のように、気候モデルによる「地球温暖化」にともなうアジアモンスーン変化の予測結果と、少なくとも過去数十年における現実のアジアモンスーンの変化傾向は、インド(南アジア)、東南アジア、東アジアという大まかな地域わけでも、一部を除き、整合しているとはとてもいえない状況である。東アジアの梅雨前線活動にしても、最近の地球シミュレータなどの巨大高速コンピュータを用いた(全球で数十キロ格子点以下の)高解像の気候モデルの出現で、前線そのものがようやく再現できた段階であり、上述のモデル結果と現実の「一致」も、すべてのモデルで同様に現れる保証は、今のところない。また、アジア

モンスーンの気候については、変化の予測の前提となる、降水量などの平均的な地域分布や季節変化なども、それ自体まだ挑戦すべき課題であり、より細かい分布や季節変化はまだ多くのモデルで満足のいく結果とはなっていない。さらに、この地域では、温室効果ガスの増加だけでなく、農耕地や都市域の拡大による地表面状態の改変、農業や工業活動に起因する大気中のダスト(エアロゾル)増加などが、地表面や大気での放射エネルギー収支の変化を通して、アジアモンスーンに影響することも指摘されている。これらの人間活動の影響をより精確に評価するには、予測の不確定性の原因となっているモデルでの水循環過程、とくに、雲・降水プロセスや地表面状態と大気・水循環の相互作用プロセスなどを、より高度の観測データで明らかにし、モデルを改良することが必要である。

「地球温暖化」はアジアモンスーンをどう変えるか？

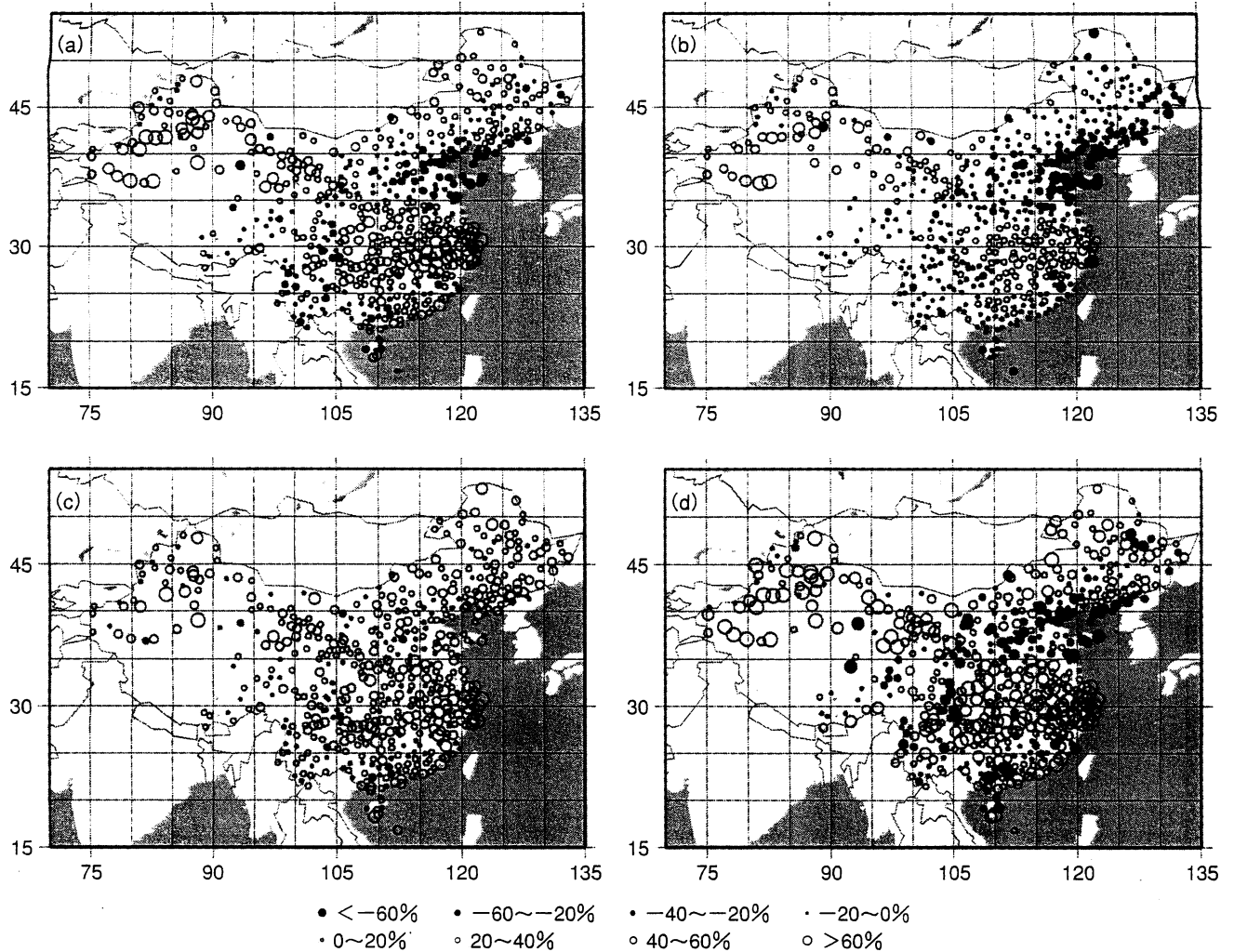


図4—中国の梅雨期(6~8月)における降水要素の1961年から2000年の長期変化傾向。(a)降水量,(b)降水日数,(c)降水強度,(d)10段階に分けた最も強い強度の降水による降水量。白丸は増加傾向,黒丸は減少傾向を示す。文献(9)より。

アジアモンスーン地域は、多様な自然条件が広大な地域に複雑に分布した気候・生態系をつくりだしている。「地球温暖化」にともなうアジアモンスーン予測は、現代の気象学や気候モデリングの中でも、最も重要でかつ最も困難な課題であるといえよう。そのような課題の解決・解明には、気候・水文・生態系などを含めたアジアモンスーンシステムの変動の解明と予測を進める、国際的な研究ネットワークづくりが必要であろう。

#### 文献

- (1) P. J. Webster: in 'Monsoons', J. Fein & P. Stephens eds., Academic Press(1987)
- (2) IPCC: Climate Change 2001, Cambridge University Press(2001)
- (3) R. S. Lindzen: Bulletin Amer. Meteor. Soc., 71, 288(1990)
- (4) R. S. Lindzen et al.: Bulletin Amer. Meteor. Soc., 82, 417(2001)
- (5) G. A. Meehl & J. M. Arblaster: Climate Dynamics, 79, 61(2003)
- (6) P. V. Joseph & A. Simon: CLIVAR Exchanges, 10, 27(2005)
- (7) S. Kanae et al.: J. Hydrometeor. 2, 51(2001)
- (8) 高橋洋・安成哲三: 日本気象学会秋季大会予稿集, 神戸(2005)
- (9) N. Endo et al.: J. Meteorol. Soc. Japan, 83, 621(2005)
- (10) M. Kimoto: Geophys. Res. Lett., 32, in press(2005)