

地球温暖化に伴うアジアにおける 降水量の年々変動の変化

CHANGES IN INTERANNUAL VARIABILITY OF PRECIPITATION OVER ASIA IN GLOBAL WARMING CONDITION

山田 朋人¹・鼎 信次郎²・沖 大幹³・虫明 功臣⁴

Tomohito YAMADA, Shinjiro KANAE, Taikan OKI, and Katumi MUSIAKE

¹学生会員 東京大学生産技術研究所 大学院修士課程 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

²正会員 博士(工学) 東京大学生産技術研究所 助手 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

³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)

⁴フェロー会員 工学博士 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)

To evaluate the effect of the global warming on precipitation is essential for future global water resource management. Previous studies have indicated the precipitation increase in Asian monsoon region. Few previous studies; however, have mentioned the interannual variability as the coefficient variation of precipitation (CVP) in sub continental scale. This paper has analyzed the dataset of the global warming experiments by general circulation models(GCMs) in JJA summer. The result has confirmed the increase in precipitation and the standard deviation of precipitation in East Asia region but revealed no increase in the interannual precipitation variability as CVP.

Key Words : global warming, interannual variability, SD, CVP, precipitation, GCM

1. はじめに

地球温暖化における将来の降水量変化を全球に渡って予測することは、将来の水資源量の把握、並びに渇水、洪水対策といった安定した人間生活を考慮する上で欠かすことの出来ないものである。また日本では、農作物輸入量に投入される水量、つまり仮想水の輸入量は日本国内の取水量とほぼ等しい¹⁾ことから、将来の降水量変化を全球に渡って予測することが不可欠である。温暖化に対する気候予測は大気・海洋大循環モデル(GCM)と呼ばれる、大気、陸面、海洋に関し出来る限り物理的に表現された数値モデルの出力からもたらされている。本研究では、それらのモデルの出力を利用して、世界で最も人口の多く、且つ今後の経済発展が強く見込まれているアジアモンスーン域に着目し、研究を行うこととした。

これまでに行われてきたアジアモンスーン域における温暖化が及ぼす降水変化に関する研究を紹介すると、中国では将来降水量の変化は小さいのに対して、一方インドでは増加すると予測されている²⁾。また、インドに関して詳細に研究されたものでは、高解像度温暖化シミュレーション結果から、夏のインドモンスーンの降水量は10%程度増加すると予測されているものがある³⁾。他には、地球の全陸域を21地域に、アジアにおいては6地域に分割し、それぞれの地域における降水量変化率に関する研究が行われている⁴⁾。

このように温暖化に伴うアジアモンスーン域における将来の降水量の変化についての研究は幾つか進んできた。これに対して年々変動に関しては、同域において温暖化に伴い降水量の年々変動は強まる⁵⁾という研究がなされており、また日本においても年々変動の大きさは増加している⁶⁾と述べられている。しかしながら、このように降水量の年々変動は果たしてどうなるのかという観点から進められた研究は少ない。また、その年々変動の数学的表現としては平均降水量からのばらつきである標準偏差 (standard deviation, 以降 SD) と、そのばらつきが平均降水量に占める割合である変動係数 (coefficient variation of precipitation, 以降 CVP) の2つが考えられ、SD、CVPの双方に関し将来の温暖化に伴う降水量の年々変動の予測をした研究は極めて少なく、とりわけ地域ごとに詳細に論ぜられたものはない。

そこで本研究では、降水量が増加を示すとき、年々変動もはたして大きくなるのかという疑問に対し分析を行うため、地球の陸域を21地域に分け⁴⁾、その中の6つのアジアモンスーン域における降水量変化、並びに年々変動の変化について、同地域の夏であり、東南アジ

そこで本研究では、降水量が増加を示すとき、年々変動もはたして大きくなるのかという疑問に対し分析を行うため、地球の陸域を21地域に分け⁴⁾、その中の6つのアジアモンスーン域における降水量変化、並びに年々変動の変化について、同地域の夏であり、東南アジ

表-1 使用したモデル

Model	Centre	Resolution
CCCma	Canadian Center for Climate Modeling and Analysis(CAN)	96 × 48 (T32)
CSIRO-Mk2	Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (AUS)	64×56(R21)
ECHAM4	Max Planck Institute für Meteorologie (GER)	128× 64 (T42)
HADCM3	Hadley Centre for Climate Prediction and Research (UK)	96 × 73
NCAR-CSM	National Center for Atmospheric Research (USA)	128× 64
NCAR-PCM	National Center for Atmospheric Research (USA)	128× 64

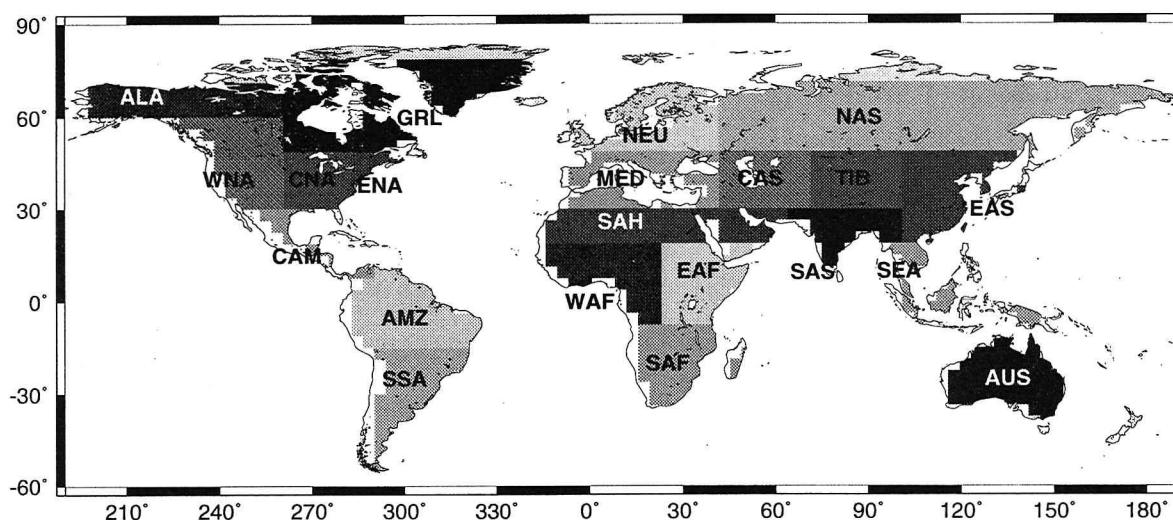


図-1 地域区分と地域名

ア、南アジアにおける雨季、また日本においても梅雨を含む6～8月(JJA)に着目して解析を行った。また過去の論文において、降水量はモデル間の差が大きい⁷⁾ことから、解析を行うに際し、モデル間の降水量自体の変化、並びに年々変動の変化に関する不確実性にも着目するために本研究では複数のモデルの出力を用いた。

2. 使用したデータ及びモデル

(1) データ

使用したデータはIPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)のDDC(Data Distribution Centre)からSRES A2シナリオに関し、6つのモデル全てについてデータが完全に存在する西暦2000～2100年における降水量の月平均データ(mm/day)を取得した。本来は現在と将来のデータを比較したいところではあったが、1900年代におけるデータは6つ全てのモデルに関して存在しなかったために、2000年代のデータ、つまり将来同士を比較することとなった。また利用するデータの期間については、温暖化に関する気候シミュレーションではしばしば30年間を一期間として用いられている⁸⁾ことから、2000年代の最初の30年間(期間1とする)と最後の30年間(期間2とする)の平均値を比較することとした。ただし、温暖化によるアジアモンスーン域における降水量の年々変動は2030年以降に

表-2 各地域の名称と境界設定

Region	Regional name	Latitude	Longitude
AUS	Australia	45S-11S	110E-155E
AMZ	Amazon Basin	20S-12N	82W-34W
SSA	Southern South America	56S-20S	76W-40W
CAM	Central America	10N-30N	116W-83W
WNA	Western North America	30N-60N	130W-103W
CNA	Central North America	30N-50N	103W-85W
ENA	Eastern North America	25N-50N	85W-60W
ALA	Alaska	60N-72N	170W-103W
GRL	Greenland	50N-85N	103W-10W
MED	Mediterranean Basin	30N-48N	10W-40E
NEU	Northern Europe	48N-75N	10W-40E
WAF	Western Africa	12S-18N	20W-22E
EAF	Eastern Africa	12S-18N	22E-52E
SAF	Southern Africa	35S-12S	10W-52E
SAH	Sahara	18N-30N	20W-65E
SEA	South East Asia	11S-20N	95E-155E
EAS	East Asia	20N-50N	100E-145E
SAS	South Asia	5N-30N	65E-100E
CAS	Central Asia	30N-50N	40E-75E
TIB	Tibet	30N-50N	75E-100E
NAS	North Asia	50N-70N	40E-180E

生じる⁵⁾ことから、2030年までを現状に準ずるとして扱った本研究の解析は温暖化による変化を捉えるという目的に対して充分妥当であると考えられる。

(2) モデル

本研究において出力を使用したモデルは表1に記載している通り6つであり、それぞれ左からモデル名、モデルを製作した研究機関と国名、そして経度と緯度のグリッド数(モデルの解像度)を示している。

(3) シナリオ

本研究ではIPCCにおける最新の温暖化ガス排出シナリオであるSRESシナリオからA2シナリオの結果を用いた。A2シナリオとは将来における人口増加が大きく、エネルギー需要も高く、また温暖化排出ガスが多く設定されてシナリオであり、大別して4つあるSRESシナリオにおいて温暖化傾向の強いものである。A2シナリオを選択した理由は、6つのモデルに共通して存在するシナリオの中で一番温暖化傾向の強いものであり、温暖化に伴う降水量変化を捉えやすいと考えたためである。

(4) 地域区分

対象とする地域は図1のように全球の陸域をsub continental scale⁴⁾に21分割した。それぞれの地域の名称並びに分割区分に関しては、表2に記載している通りである。

3. 降水量と年々変動

(1) 降水量とその変化率

図2は6~8月(JJA)における期間1を6つのモデルそれぞれに関し、アジア6地域ごとに示したものである。この図からは地域ごととモデル間の降水量予測値のばらつきをみることができる。東南アジア(SEA)と南アジア(SAS)とを比較すると、両地域は同じような降水量を示しているが、一方でモデル間の予測値の差は南アジアの方が大きいことがわかる。また、図3はアジア6地域における期間1に対する期間2の降水量変化率(%)を示したものである。この図により、各6地域におけるモデルごとの降水量変化率(%)をそれぞれ比較することができる。この図から本研究の対象としているアジアモンスーン域に関してわかることを以下に挙げる。

(i) 南アジア(SAS)では降水量は全てのモデルにおいて増加を示しており、その増加率は約10%である。図2からこの時期における降水量は約160(mm/month)であるとする、約16(mm/month)の増加ということになる。

(ii) 東アジア(EAS)においても南アジアと同様に降水量増加率は約10%である。これは東アジアでは6~8月(JJA)において降水量は変化しない⁸⁾というIPCCの92年におけるIS92aシ

ナリオを用いた結果と異なるものとなった。図2によると、この時期における平均降水量が約130(mm/month)であるので、温暖化に伴う降水量増加は約13(mm/month)ということになり、結果として温暖化シナリオの違いは将来の降水量に大きな差を与えることを明白に示していると言える。

(iii) 東南アジア(SEA)では約-6~6%の変化率を示しているが、減少を予測しているモデルは2つだけであり、6つのモデルの平均では約2%の増加率である。また降水量の増加率を南アジア(SAS)、東アジア(EAS)と比較すると、5分の1ほどと極めて小さく、増加量は約2(mm/month)である。

(2) 降水量の年々変動に関するばらつき(SD)としての変化

次に、温暖化に伴う年々変動の変化に着目する。図4は期間1における降水量のばらつき、つまり標準偏差(SD)を示したものである。ここで言うSDとは、まず各年の降水量からその年を前後する9年間の移動平均の差をとる。そしてその2乗した30年分の和のルートを取り、最後に30年で割り、年平均としたものである。図5は図4で得られた結果から、期間2から期間1を引いた、温暖化に伴うSDの変化量(mm/month)、また図6は期間1に対する期間2の変化率((EAS)または南アジア(SAS)のように降水量のばらつきが大きい地域では温暖化に伴うばらつきの変化量も大きく、一方中央アジア(CAS)、チベット(TIB)、アジア北方(NAS)の降水量のようにばらつきが小さい地域では、変化量も小さいことがわかる。またモデルによる不確実性に関しても、地域ごとの降水量のばらつき、またそのばらつきの変化量において、多雨地域の方が大きいことが見てとれる。一方図6からは、ばらつきの変化率(%)の範囲に地域性が見られないことから、ばらつきの変化率(%)は降水量の大きさに強い関連性が無いようである。

(3) 変動係数の解析手法

本節では降水量の年々変動の尺度である平均降水量からのばらつきの量であるSDと並び、もう一つの尺度となるSDの平均降水量に対する割合、つまりCVPについて、期間2から期間1におけるCVPの差を年々変動の変化(%)として考えることとする。式(1)はCVPを求める式であり、SD、Pはそれぞれ標準偏差、平均降水量を示している。

$$CVP = SD/P \quad (1)$$

SDとCVPの違いを端的に言うと、SDが絶対量であるのに対して、CVPは平均降水量とSDの関係を示すパラメータというところにある。ここでSDが+10%の

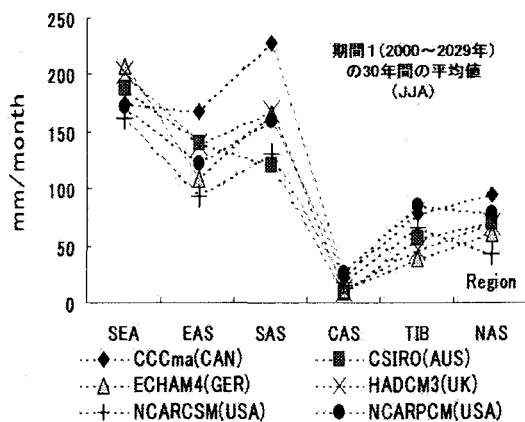


図-2 アジア 6 地域におけるモデルごとの降水量,(JJA)

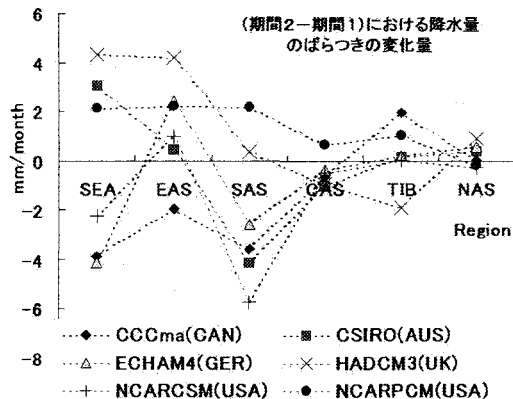


図-5 アジア 6 地域におけるモデルごとの降水量のばらつき (年々変動の大きさ) の変化量,(JJA)

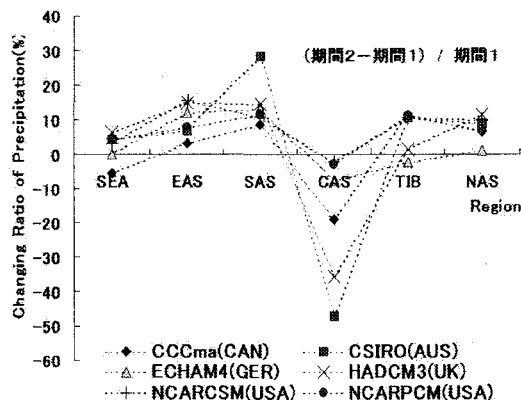


図-3 アジア 6 地域におけるモデルごとの降水量変化率,(JJA)

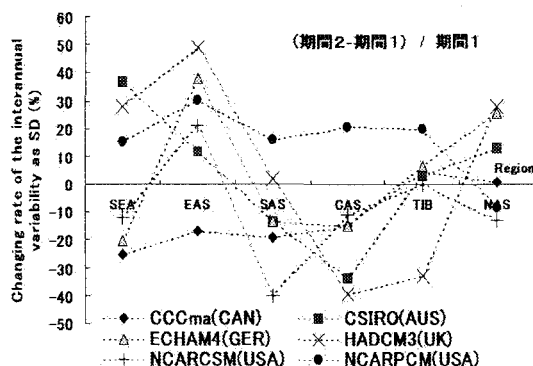


図-6 アジア 6 地域におけるモデルごとにみた降水量のばらつきの変化率(%) (年々変動の大きさ) の変化率,(JJA)

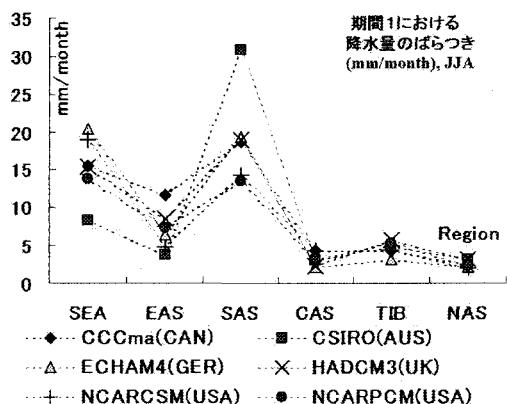


図-4 アジア 6 地域におけるモデルごとの降水量のばらつき (SD としての年々変動の大きさ),(JJA)

変化で CVP は-5%の変化の場合を考える。この CVP の示す減少は平均降水量が SD の増加率より大きく増加を示すためである。この場合、一般には SD が増加しているため年々変動は大きくなり、渇水や洪水の危険性は高まると考えられる。しかしながら降水量自体が大きく増加したために、そのばらつきが水資源アセスメントに与える影響は大きくなるとは言いがたい。このような年々変動のもつ 2 面性を考慮するために SD と CVP の双方を用いることが重要なのである。

(4) 降水量の年々変動に関する変動係数 (CVP) の変化

降水量に対する SD が全陸域の地域ごとにどれだけ変化するか、つまりそれぞれの地域における多雨、少雨の幅の変化を地域ごとに知りたいという意図から図 7 を作成した。図中の CVP の差は期間 2 から期間 1 における差 (%) である。

この図から本研究の対象としているアジアモンスーン域に関してわかることを以下に述べる。

- (i) 東南アジア (SEA) では全てのモデルの予測範囲は約 $\pm 2\%$ である。図 3 より降水量の増加率の $\pm 5\%$ と比較すると年々変動の大きさの変化は降水量増加率の 4 割程度であることがわかった。
- (ii) 東アジア (EAS) では全てのモデルの予測範囲は約 $-4\sim 2\%$ である。これに対して、降水量変化率は約 $5\sim 15\%$ の増加であるから、年々変動の変化は降水量の変化率と比較して小さく、また降水量変化率に関しては、全てのモデルが増加を示しているのに対して、年々変動はモデルにより増減を示す不確実性があることがみとめられた。
- (iii) 南アジア (SAS) では 3 つのモデルの予測範囲は約 $-7\sim -5\%$ の変化である。これに対して、降水量

変化率は約 10 % であることから、CVP の変化は降水量変化率の 5~7 割であった。また、南アジア (SAS) においても東アジア (EAS) と同様に、全てのモデルにおいて降水量は増加を示しているものの、CVP ではモデルにより増減を示す不確実性があることがみとめられた。

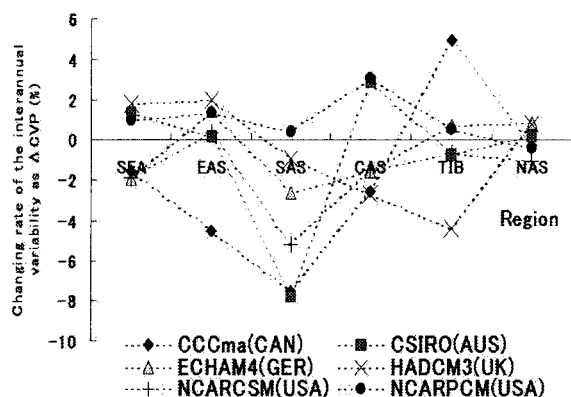


図-7 アジア 6 地域におけるモデルごとの降水量の CVP の差 (%), (JJA)

4. 降水量変化率と年々変動の変化

(1) 降水量変化の指標化

前章までにおいて、複数の GCM による最新の温暖化シナリオの結果を用いて将来の降水量と SD 並びに CVP でみる年々変動の変化という降水量に関する 3 点について地域ごとに分析してきた。この温暖化と降水量変化に関する代表的な研究として、CMIP2 というプロジェクトとして 19 個の GCM の結果を平均し、全球経度平均における降水量やその SD、CVP としての年々変動について検討されたものがある⁹⁾。この研究において降水量変化と SD の変化には正の相関があり、またこれに対し CVP の変化とは負の相関があると述べられている。

このことに対し、最新の温暖化シナリオを用いた本研究では、6 つの GCM の出力を一つの結果として統合し、降水量とその年々変動を示す SD と CVP の 3 つの変化に関し、その地域性に注目することで検討することとした。とりわけ、研究結果や一般でよく言われている温暖化による降水量の増加に伴い、年々変動は大きくなると言われている⁹⁾ことに対して、はたして本当にそうなるのだろうかという疑問に関して再整理する。

そこで表 3 に降水量変化率、降水量のばらつきを示す SD の変化率、並びに SD の平均降水量に対する大きさの変化を示す CVP の 3 つの変化における関係を集約した。表の内訳についてはアジア 6 地域を基準に大きさを分別し、表中に記した。表 3 からわかることを以下に挙げる。

(2) 東アジア (EAS)

東アジアでは降水量、並びに降水量のばらつき (SD) は増加となった。一方、CVP は降水量変化率、SD に比べ変化が小さく、またモデルごとの予測値の不確実性が高いため一概に判断できなかった。

(3) 南アジア (SAS)

南アジアでは降水量は増加と示された。これは第 1 章で紹介した、インドでは降水量は増加する²⁾という結果と同様となった。一方、彼らの研究で年々変動は数十年規模で増加となっている。これに対し、約 100 年のデータを用いた本研究では、SD の変化率、並びに CVP の差としてみる年々変動の大きさは共に減少となった。約 100 年のデータからでは、数十年規模の年々変動に関して比較することはできないものの、本研究により今後 100 年間では年々変動は減少すると言えるであろう。また、全球を経度平均でみた降水量変化率と SD の変化率には正の相関があり、CVP の差は負の相関がある⁹⁾のに対して sub continental scale である南アジア (SAS) ではその様な傾向は見られなかった。

(4) 東南アジア (SEA)

東南アジアでは降水量は IS92a シナリオを用いた研究⁸⁾と同様に殆んど変化しないという結果となった。SD の変化率、並びに CVP の差は、モデルごとの予測値の不確実性が高いと判断した。

5. まとめ

本研究では地球温暖化に伴うアジアモンスーン域において雨季の降水量変化に関し、6 つの GCM 出力を用いて期間 1 と期間 2 における降水量変化率、並びに平均降水量からのばらつきである SD と SD の平均降水量に対する割合である CVP としてみた年々変動の変化を分析した。そして以上に関し予測する手段となる GCM 出力の不確実性に着目して研究を行った結果を以下にまとめる。

- (i) 降水量変化率に対する CVP の差でみる年々変動の大きさはアジア 6 地域において無視し得るほどではないが小さい。
- (ii) SD の変化率 (%) は概ね降水量変化率 (%) に比べて大きい。つまりこのことは、温暖化に伴う降水量自体の変化よりも、むしろ多雨、少雨などの毎年訪れる降水イベントの方が重要となりうることを示唆している。
- (iii) 東アジアでは降水量、並びにそのばらつきは増加する一方、CVP の差としてみる年々変動の大きさの変化は小さく、またモデル予測に不確実性が

表-3 降水量変化に関する6つのモデルを統合した指標

Precipitation Change	SEA	EAS	SAS	CAS	TIB	NAS
1 降水量変化率	0	+	+	-	+	+
2 SD	×	+	-	-	0	×
3 CVP	×	×	-	-	0	0

上表における場合分けの条件:

+	1 and 2 3	more than 4 models $\geq 10\%$ or, 3 models $\geq 10\%$ and 1 model $\geq 5\%$ more than 4 models $\geq 4\%$ or, 3 models $\geq 4\%$ and 2 models $\geq 2\%$
+	1 and 2 3	$5\% \leq$ more than 4 models $< 10\%$ or $5\% \leq$ 3 models $< 10\%$ and 2 models $\geq 10\%$ more than 4 models $\geq 1\%$
-	1 and 2 3	$-10\% < 4$ models $\leq -5\%$ or, $-10\% < 3$ models $\leq -5\%$ and 2 models $< -10\%$ more than 4 models $\leq -1\%$
-	1 and 2 3	more than 4 models $\leq -10\%$ or, 3 models $\leq -10\%$ and 1 model $\leq -5\%$ more than 4 models $\leq -4\%$ or, 3 models $\leq -4\%$ and 2 models $\leq -2\%$
0	1 and 2 3	$-5\% < \text{more than 4 models} < 5\%$, × others $-1\% < \text{more than 4 models} < 1\%$, × others

強くみられる。これは、降水量とSDが概ね同じ割合の増加率を示したために、CVPの変化が小さくなったのである。

- (iv) 南アジアでは降水量は増加する一方、SD、並びにCVPの差としてみる年々変動の大きさは減少する。これはSDの減少率(%)の方が降水量の増加率(%)に比べ大きいために、CVPは減少を示したのである。
- (v) 東南アジアでは降水量変化は殆んどみられない、一方でSD、並びにCVPの差でみる年々変動の大きさの変化はモデル間の不確実性が高い。これはSDにおけるモデル間の不確実性の高さが降水量変化率(%)に対し卓越したためCVPも同じくモデル間の不確実性が高くなったと考えられる。

以上より、降水量の増加に伴う年々変動の増加がみられたのはアジア6地域の中で東アジア(EAS)のみであり、それは降水量のばらつきの量を示すSDであった。

前述したCMIP2では、全球を経度平均でみると、降水量変化とSDの変化には正の相関があるのに対して、CVPは負の相関があるとしている⁹⁾。これに対し本研究では、現存する6つのGCMの最新の温暖化シナリオによる出力を併せ、sub continental scaleで考えた結果、降水量増加と年々変動の増加には必ずしも正の相関がないと結論づける。また今後の研究としては風速、気圧、または海面水温について詳細に調べることにより、温暖化に伴うアジアモンスーン域の気候変動に関し研究を進めて行く予定である。

謝辞： 本研究は総合地球環境学研究所平成14年度プロジェクト『地球環境情報ライブラリと世界モデルを統合した水危機管理システムの構築』(代表:沖 大幹)ならびに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)の成果の一部である。ここに記して深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 三宅基文, 沖大幹, 虫明功臣. 日本を中心とした仮想水の輸出入. 水資源シンポジウム委員会, 2002. 第6回 水資源に関するシンポジウム論文集.
- 2) A. Kitoh, S. Yukimoto, A. Noda, and T. Motoi. Simulated changes in the Asian summer monsoon at times of increased atmospheric CO_2 . *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 75, pp. 1019-1031, 1997.
- 3) M. Way. Simulated changes of the Indian summer monsoon. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 29, p. 2001GL013808, 2002.
- 4) F. Giorgi and R. Francisco. Uncertainties in regional climate change prediction: a regional analysis of ensemble simulations with the HADCM2 coupled aogcm. *Climate Dyn.*, Vol. 16, pp. 169-182, 2002.
- 5) Hu ZZ, 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, 2000.
- 6) 山元龍三郎, 奥田昌弘, 金近治, 鬼頭昭雄, 石原幸司. 年降水量の年々変動の長期的増加傾向. 水資源シンポジウム委員会, Vol. 6, pp. 555-560, 2002.
- 7) H. Douville, J.F. Royer, J. Polcher, P. Cox, N. Gedney, D.B. Stephenson, and P.J. Valdes. Impact of CO_2 doubling on the asian summer monsoon. *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 78, pp. 421-439, 2000.
- 8) J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson. *Climate Change 2001, The Scientific Basis*. Cambridge University Press, 2001.
- 9) J. Raisanen. CO_2 -induced changes in interannual temperature and precipitation variability in 19 CMIP2 experiments. *J. Climate*, Vol. 15, pp. 2395-2411, 2002.

(2002. 9. 30受付)