地域気候マルチモデルアンサンブルを用いた日本域における降水の再現性

ABILITY OF AN ENSEMBLE OF REGIONAL CLIMATE MODELS TO REPRODUCE SEASONAL PRECIPITATION OVER JAPAN

石崎安洋¹・仲江川敏之²・高藪出³

Yasuhiro ISHIZAKI, Toshiyuki NAKAEGAWA, Izuru TAKAYABU

¹正会員 工博 国立環境研究所 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 1-6-2)

²正会員 工博 気象庁気象研究所 主任研究官 (〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1)

³非会員 理博 気象庁気象研究所 室長 (〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1)

We analyzed results of three Regional Climate Models (RCMs) for 1984 to 2004 performed at 20-km horizontal grid spacing over Japan and the results of Japanese reanalysis data (JRA), and compared them with ground observations. Although JRA underestimated precipitation in Kochi Prefecture in the summer and in Niigata Prefecture in the winter, all the RCMs improved the underestimated precipitation in both prefectures. In addition, the skills of interannual variations in the three RCMs are superior to those in JRA. Furthermore, the skills of multi-model ensemble means, in particular, weighted multi-model ensemble means are distinctly superior to those of JRA on an interannual timescale. Thus, RCMs and their multi-model ensemble means are powerful tools for investigating interannual variations of future projections and seasonal predictions over Japan.

Key Words : *Regional Climate model, Bayesian approach, Multi-model Ensembles, Precipitation, Japan*

1. はじめに

地球温暖化に関する地域規模での確率的な情報が、将来の気候変動による影響評価や適応策を作成する際に求められている。しかし、温暖化予測に用いられる大気・海洋結合モデルの水平解像度は最も細かいものでもおよそ100kmくらいであり、影響評価や適応策を作成する際にはより細かい情報が必要とされている¹⁾。このため、大気・海洋結合モデルの結果を境界条件として地域気候モデルを用いるダウンスケーリング研究が活発に行われている。また、地域規模の地球温暖化予測に加えて、季節予測においても地域気候モデルを用いる力学的ダウンスケーリングの重要性が指摘されている²⁾。

日本領域においても、地域気候モデルを用いて力学的ダウンスケーリングを行った研究が数多く行われている。例えば、Sasakiら(2008)は、非静力の地域気候モデルを用いて、日本の中央部で降水と高度の関係を調べ、観測に見られる高度と降水量の関係をモデルが再現できることを示している³⁾。一方、一般に気候モデルはそれぞれのモデルに固有のバイアスが存在する。このため、複数の気

候モデルの平均値は個々の気候モデルのバイアスが打ち消し合い、単一の気候モデルよりも再現性が良いことが多い。そこで、温暖化予測研究や季節予測には、複数の大気大循環モデルを用いたマルチモデルアンサンブルが適用されている。近年では、複数の地域気候モデルを用いたマルチモデルアンサンブルの研究も行われている。マルチモデルアンサンブルの初期の研究では、算術平均を用いる手法(Arithmetic ensemble mean, 以後AEM)が用いられてきたが、近年では、現在気候の再現性に基づいた重みを作成する手法、特にベイズ的アプローチにより重み付ける手法 (Bayesian model averaging, 以後BMA) が用いられている⁴⁾⁵⁾。

このように、地域気候モデルを用いた力学的ダウンスケーリングは、再解析データや大気大循環モデルの結果に時空間的に詳細な情報を与えることができるため、地球温暖化予測や季節予測において強力なツールとして用いられている。加えて、大気大循環モデルにおける研究と同様に、複数の地域気候モデルを用いた地域気候マルチモデルアンサンブルにも期待と関心が高まっている。しかし、これまで、再解析データを境界条件とした複数の地域気候モデルを用いたマルチアンサンブルの手法は、

ヨーロッパでは適用されているが⁶⁾、日本領域では適用されていない。そこで、本研究では、JRAを境界条件とした3つの地域気候モデルを日本領域に適用し、夏季（6月～8月の平均）と冬季（12月～2月の平均）について気候値と経年変動に焦点を当て各地域気候モデルとAEM、現在気候の再現性に基づく重み付ける手法の再現性について検証した。

2. 使用したモデルとデータ

本研究では、NHRCM⁷⁾、RAMS⁸⁾、WRF⁹⁾の3つの地域気候モデルを用いる。領域は日本全域を含む領域である。水平解像度はいずれも20kmであり、鉛直層数はそれぞれ、40層、27層、31層である。各地域気候モデルには、積雲対流モデルと雲微物理モデルを併用しており、積雲パラメタリゼーションにはいずれも、Kain-Frisch スキーム¹⁰⁾を用いている。陸面モデルにはそれぞれ、SiB¹¹⁾、GEMTM¹²⁾、Noah land surface model¹³⁾を用いている。いずれのモデルにも、スペクトルナッジングのような境界条件の大規模な情報をナッジングして地域気候モデルの領域内に適用する手法は用いていない。解析期間は1985年から2004年の20年間である。各地域気候モデルの境界条件には、日本再解析データ（水平解像度1.125° x 1.125°、鉛直層数40層）を用いた。観測値にはモデルと同じ期間のAMeDASを用いている。解析した地域は46都府県と北海道については14の支庁別の領域、計60地域である。

3. 重みを作成するための統計的手法

本研究では、気候値と経年変動の標準偏差については、ベイズ因子を用いて重みを作成する。気候値、経年変動の標準偏差については、それぞれ、気候値と経年変動の標準偏差のバイアスをモデルの重みを作成する際の指標としている。また、経年変動の相関係数に関しては、各モデルの相関係数から重みを作成している。重みは各季節、60地域別で求めた。重みを作成する際の指標の評価期間は1985年から2004年の20年間である。

ベイズ因子はもともと統計モデルを比較するために利用されてきたが、Kass and Raftery¹⁴⁾が提案するように、各モデルの不確実性を考慮したマルチモデルアンサンブル平均を作成するための重みと解釈することもできる。今、観測値データ d が与えられたとき、参照モデル m_r に対するモデル m_k のベイズ因子 B_{kr} は、参照モデルとモデルの事後確率 $P(m_r|d)$ と $P(m_k|d)$ を事前確率を $P(m_r)$ と $P(m_k)$ としたとき以下のように表される。

$$B_{kr} = \frac{P(m_k|d)/P(m_r|d)}{P(m_k)/P(m_r)} \quad (1)$$

本研究では、事前確率を各モデル、参照モデルに対し同一であると仮定する。従って、本研究ではベイズ因子は

尤度比に等しく、以下のように表される。

$$B_{kr} = \frac{l(d|m_k)}{l(d|m_r)} \quad (2)$$

事後確率を求める際の尤度は以下のように正規分布を仮定している。

$$l(d|m_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_o + \sigma_m)}} \exp(-\alpha_k/2) \quad (3)$$

ここで、 α_k は一般化された距離（マハラノビス距離）であり、

$$\alpha_k = \frac{(d-m_k)^2}{\sigma_o + \sigma_m} \quad (4)$$

と表わされる。

また、尤度を計算する際の観測の分散 σ_o には、Min et al. (2006)同様、モデルの分散 σ_m を使用している¹⁵⁾。参照モデルにおける観測とモデルの一般化された距離 α_k （マハラノビス距離）も、Min et al. (2006)同様、0としている。既に述べたように、本研究では、事前確率を各モデルに対し同一であると仮定しているため、各モデルの重み w_k は以下の式から求められる¹⁵⁾。

$$w_k = l(d|m_k) / \sum_{i=1}^3 l(d|m_i) \quad (5)$$

一方、経年変動の相関係数の各モデルの重み w_i に関しては以下の式から求めた。

$$w_i = \text{Cor}_i / \sum_{k=1}^3 \text{Cor}_k \quad (6)$$

ここで、 Cor_i は各モデルの相関係数である。重みはそれぞれ60地域別で求めた。

4. 結果

図-1は新潟県と高知県のNHRCM、RAMS、JRA、WRF、AEM、BMA、観測の各月の降水量の気候値である。新潟県では、JRAは、特に冬季の降水量を大きく過小評価している。一方、3地域気候モデルが再現した冬季の降水量は、WRFが若干過大評価であるが、JRAよりも増加し観測に近付き改善されている。Ishizakiら(2010)¹⁶⁾は本研究と同じ計算結果を用い、日本海側全域で冬季におけるJRAの過小評価が地域モデルの結果では改善されていることを示している。また、彼らは、観測とJRA、3つの地域気候モデルの降水量と高度の関係を日本の中央部において調べ、3つの地域気候モデルがJRAよりも降水量と高度の関係を現実的に再現できることを示している。本研究における地域気候モデルによる新潟県の冬季の降水量が改善した理由も、現実的な地形を与えることにより、地形性の降水がJRAと比べ現実的に再現できるようになったためであると推測される。

高知県では、JRAは夏季に降水量が多く、冬季に少ないという特徴を大まかに再現しているが、全体的に過小評価で特に夏季に過小評価である。一方、3つの地域気候モデルは過小評価だった夏季の降水量を改善している。この改善も、四国山地の地形の改善と大きく関係していると推測される。加えて、AEMとBMAも両県の降水量の月

図-1 新潟県(a)と高知県(b)の各月の降水量(mm/day)。

NHRCM:水色, RAMS:青色, WRF:緑色, JRA:ピンク, AEM:黒色, BMA:黄色, 観測:赤色 エラーバーは経年変動の標準偏差。

変化を良く再現している。特にBMAは全体的に最も再現性が良く、モデルの再現性に基づいた重みを作成する手法の有効性を示している。

次に、新潟県と高知県の夏季と冬季の経年変動を調べる。図-2は新潟県と高知県の夏季の経年変動である。夏季の新潟県のJRA, NHRCM, RAMS, WRF, AEM, 各モデルの相関係数の再現性に基づいた重み付きアンサンブル平均(WEM)の相関係数は、それぞれ、0.47, 0.90, 0.64, 0.88, 0.91, 0.91であった。また、夏季の高知県のJRA, NHRCM, RAMS, WRF, AEM, WEMの相関係数は、それぞれ、0.41,

図-2 新潟県(a)と高知県(b)の夏季の経年変動。

NHRCM:水色, RAMS:青色, WRF:緑色, JRA:ピンク, AEM:黒色, WEM:黄色。

0.72, 0.40, 0.63, 0.68, 0.71であった。この結果からわかるように、地域気候モデルは、RAMSの成績は若干悪いものの、夏季の新潟県と高知県の降水量の経年変動の再現性を大きく向上させている。また、AEMとWEMの成績もかなり良い。

図-3は新潟県と高知県の冬季の経年変動である。冬季の新潟県のJRA, NHRCM, RAMS, WRF, AEM, WEMの相関係数は、それぞれ、0.48, 0.54, 0.58, 0.71, 0.71, 0.72であった。また、夏季の高知県のJRA, NHRCM, RAMS, WRF, AEM, WEMの相関係数は、それぞれ、0.74, 0.82,

図-3 新潟県(a)と高知県(b)の冬季の経年変動。
NHRCM:水色, RAMS:青色, WRF:緑色, JRA:ピンク,
AEM:黒色, WEM:黄色。

0.71, 0.88, 0.85, 0.85であった。新潟県ではJRAと比べ地域気候モデルとAEM, WEMは大きく改善しているが、高知県では、それほど大きく改善はしていない。

次に、日本を北日本(北海道, 東北地方)と東日本(関東地方, 中部地方), 西日本(近畿地方, 中国地方, 四国地方, 九州地方)の3つの地域に分け、気候値と経年変動を調べた。それぞれの地域の値には、60地域のうち3つの地域に含まれる地域の平均値を用いた。表-1に各モデルの冬季と夏季における平均二乗誤差(RMSE)を示す。北日本では、夏季・冬季ともに、全体的に地域気候モデルはJRAよりも再現性が良い。ただし、冬季については、WRFは大きく過剰である。一方、AEMとBMAについては、夏季については非常に再現性が良いものの、冬季については、NHRCMやRAMSよりも再現性が劣っている。

これは、大きく過剰であったWRFの結果を反映している。東日本と西日本の夏季については、RAMSの再現性は良いものの、NHRCMとWRFの再現性はJRAよりも劣っている。このため、AEMとBMAの再現性もそれほど良くない。他方、東日本と西日本の冬季については、WRFが夏季ほどではないが、再現性が良くない。しかし、NHRCMとRAMSの再現性は非常に良く、このため、AEMとBMAの再現性も非常に優れている。

表-1 各モデルの夏季と冬季におけるRMSE (mm/day)。

	JRA	NHRCM	RAMS	WRF	AEM	BMA
北日本(夏)	1.4	1.0	0.7	1.2	0.6	0.5
北日本(冬)	1.0	0.7	0.7	3.6	1.3	1.0
東日本(夏)	2.0	3.5	1.2	2.8	2.0	1.6
東日本(冬)	2.2	1.2	1.3	2.8	1.2	1.0
西日本(夏)	1.7	3.1	1.4	2.7	1.9	1.5
西日本(冬)	1.9	1.1	1.2	2.4	1.1	0.9

表-2に各モデルの冬季と夏季における空間相関係数を示す。北日本の夏季では、JRAは良く空間パターンを再現している。一方、地域気候モデルは、JRAよりも空間パターンの再現性が良くない。また、AEMの再現性もJRAより劣っている。ただし、モデルの再現性に基づいて重み付けたBMAは最も再現性が良い。これは、各地域でバイアスによって重み付けをしたため、各県の再現性が向上し、その結果、空間相関係数が向上したと考えられる。一方、北日本の冬季については、地域気候モデルはJRAよりも再現性が優れており、AEMとBMAの再現性も良い。夏季における東日本と西日本ではJRAの空間相関係数の再現性は悪い。しかし、NHRCMやWRFは良く再現しており、

表-2 各モデルの夏季と冬季における空間相関係数。

	JRA	NHRCM	RAMS	WRF	AEM	BMA
北日本(夏)	0.90	0.48	0.82	0.84	0.84	0.92
北日本(冬)	0.77	0.87	0.86	0.86	0.90	0.94
東日本(夏)	0.3	0.78	0.44	0.72	0.81	0.85
東日本(冬)	0.95	0.95	0.95	0.91	0.95	0.97
西日本(夏)	0.27	0.68	0.35	0.59	0.68	0.76
西日本(冬)	0.93	0.91	0.93	0.90	0.93	0.96

AEMやBMAの再現性も良い。東日本と西日本の冬季では、JRAは非常に良く空間相関係数を再現している。一方、地域気候モデルとAEMの再現性はJRAと比べ、ほとんど変わらない。ただし、BMAの再現性については、JRAと比べ若干の向上が見られる。

表-3に各モデルの夏季と冬季における経年変動の相関係数を示す。北日本では、JRAは夏季と冬季の経年変動の大まかに再現している。一方、NHRCMは若干JRAよりも再現性が良いが、他の二つのモデルはJRAと同程度の再現性である。AEMやWEMの成績もJRAよりも良い。東日本と西日本では、JRAは夏季の経年変動の再現性がそれほど良くなかった。しかし、地域気候モデルは、特に東日本で大幅に経年変動を改善している。AEMとWEMの再現性も良く、特に東日本の夏季にはAEMとWEMはJRAと比べ0.3近く向上している。このように、地域気候モデルやマルチモデルアンサンブル平均は、東日本や西日本における降水量の経年変動を調べる際に非常に有益なツールであることがわかる。一方、東日本と西日本の冬季では、地域気候モデルの再現性はJRAとそれほど変わらない。Rauscherら(2009)⁶⁾は複数の地域気候モデルを用いて、ヨーロッパの8地域の冬季と夏季の結果を示している。彼らの結果においても、夏季よりも冬季の再現性が良い。これは、彼らの指摘するように、冬季は再解析データによる大規模な場の影響が大きい、夏季は積雲のような内部プロセスが重要であるためであろう。また、地域気候モデルで、現実的な地形を与えたことによる改善もあると考えられる。

表-3 各モデルの夏季と冬季における経年変動の相関係数。

	JRA	NHRCM	RAMS	WRF	AEM	WEM
北日本 (夏)	0.59	0.61	0.50	0.54	0.65	0.66
北日本 (冬)	0.63	0.71	0.64	0.64	0.71	0.73
東日本 (夏)	0.48	0.70	0.61	0.70	0.76	0.77
東日本 (冬)	0.78	0.77	0.83	0.84	0.86	0.87
西日本 (夏)	0.56	0.64	0.66	0.65	0.72	0.73
西日本 (冬)	0.83	0.83	0.78	0.80	0.86	0.87

表-4に各モデルの夏季と冬季における経年変動の標準偏差の観測との比を示す。JRAは北日本、東日本、西日本すべての地域において夏季・冬季ともに過小評価である。一方、地域気候モデルは全般的にJRAよりも観測に近い。特に、NHRCMは夏季・冬季ともにいずれの地域でも経年変動の標準偏差を良く再現している。WRFとRAMSもJRAよりは良く再現しているが、NHRCMと比べると再現

性は良くない。AEMは、全般的にJRAより再現しており、地域気候モデルと比べても成績は良い。ただし、地域気候モデルのベストモデルと比べると成績が勝っているのは、北日本の冬季だけである。BMAは、AEMよりもさらに再現性が向上している。ただし、BMAの場合も地域気候モデルのベストモデルと比較した場合、北日本の冬季と東日本の夏季だけであり、その他では、ベストモデルの再現性が優れている。

表-4 各モデルの冬季と夏季における経年変動の標準偏差の観測との比。

	JRA	NHRCM	RAMS	WRF	AEM	BMA
北日本 (夏)	0.61	0.88	0.65	0.69	0.66	0.80
北日本 (冬)	0.69	0.84	0.66	1.44	0.93	0.97
東日本 (夏)	0.68	1.26	0.66	0.84	0.83	0.93
東日本 (冬)	0.59	0.77	0.75	1.02	0.80	0.87
西日本 (夏)	0.51	0.76	0.61	0.62	0.65	0.71
西日本 (冬)	0.57	0.75	0.66	0.80	0.68	0.75

5. まとめ

本研究において、JRA、3つの地域気候モデル、アンサンブル平均とモデルの再現性に基づいた重み付きアンサンブル平均の日本域における降水量の気候値と経年変動の再現性について検証した。

はじめに、新潟県と高知県の月変化と夏季と冬季の経年変動に注目した。JRAは新潟県の冬季の降水量と高知県の夏季の降水量を大きく過小評価していたが、地域気候モデルはいずれもこの過小評価していた降水量を改善することができた。また、AEMとBMAは地域気候モデルと比べさらに再現性が向上した。一方、地域気候モデルは、両県の冬季と夏季の経年変動についても再現性を大きく改善していた。気候値と同様にAEMと重み付きアンサンブル平均についても、JRAと比べ再現性が向上しており、特に重み付きアンサンブル平均は多くの場合、最も再現性が良かった。

次に、北日本と東日本、西日本の気候値におけるRMSEと空間相関係数について調べた。全般的にRAMSの再現性は優れていた。しかし、NHRCMが夏季にWRFが両季節でRMSEが大きかった。このため、AEMとBMAの再現性は全般的にJRAよりも優れていたが、RAMSよりは再現性が劣っていた。一方、空間相関係数については、冬季にはJRAの再現性が良く、地域気候モデルの再現性はJRAと同程度であった。ただし、AEMとBMAに関しては、若干の改

善が見られた。夏季については、JRAは北日本で再現性が良かったものの、東日本や西日本では再現性が悪かった。一方、地域気候モデルについては、東日本と西日本の夏季の空間相関係数を良く再現していた。また、AEMやBMAはさらに良く再現していた。

最後に、北日本と東日本、西日本の気候値における経年変動の相関係数と標準偏差について調べた。JRAは冬季の相関係数については比較的良く再現していたが、東日本と西日本の夏季の相関係数を良く再現していなかった。一方、地域気候モデルは夏季のこれらの地域における経年変動の再現性を大きく向上させた。AEMや重み付きアンサンブルは地域気候モデルよりさらに再現性が向上していた。経年変動の標準偏差についても、JRAは、全般的に過小評価で再現性が良くなかったが、地域気候モデルは再現性を向上させていた。経年変動の相関係数と同様にAEMや重み付きアンサンブルは地域気候モデルよりさらに再現性が向上していた。これらの結果から季節予測や将来予測の経年変動の研究において地域気候モデルとAEMや重み付きアンサンブル平均が非常に有効であることが示された。

本研究で用いた地域気候モデルの数は3つとマルチモデルアンサンブルを行うためには少なく、今後は地域気候モデルの数を増やしていく必要がある。また、将来予測を行う際に、モデルの再現性に基づく重みづけの手法を用いる際には、モデルの再現性を評価する指標の影響が大きいことが指摘されている⁴⁾。このため、今後はどのような指標が将来予測に適しているのかをしっかりと調べてから重み付きアンサンブルを作成する必要がある。

謝辞：本研究の一部は環境省の地球環境研究総合推進費（S-5-3）および文部科学省21世紀気候変動予測革新プログラムの支援により実施された。また、観測値と各モデルの60地域における降水量の作成には京都大学防災研田中賢治准教授が作成したバイアス検出ソフトを用いた。

参考文献

- 1) 高藪出・金光太郎 力学的ダウンスケーリングのレビュー 天気 Vol.57, No.7, pp435-447
- 2) Tourigny E, Jones CG (2009) An analysis of regional climate model performance over the tropical Americas. Part I: simulating seasonal variability of precipitation associated with ENSO forcing. *Tellus* 61A:323-342
- 3) Sasaki H, Kurihara K (2008) Relationship between Precipitation and Elevation in the Present Climate Reproduced by the Non-hydrostatic Regional Climate Model SOLA, 4:109-112, doi:10.2151/sola.2008-028
- 4) Ishizaki, Y., Nakaegawa, T., Takayabu, I. 2009: Projections of surface air temperature change over Japan due to global warming: Bayesian approach to the analysis of multimodel ensembles. *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, **53**, 229-234

- 5) 石崎安洋, 仲江川敏之, 高藪出 ベイズ的アプローチによる日本域における地球温暖化に伴う地表気温上昇量の予測 水工学論文集, 第53巻, pp.229-234, 2009年
- 6) Rauscher SA, Coppola E, Piani C, Girogi F (2009) Resolution effects on regional climate model simulations of seasonal precipitation over Europe. *Clim Dyn* doi 10. 1007/s00382-009-0607-7
- 7) Saito K., Fujita T, Yamada Y, Ishida J, Kumagai Y, Aranami K, Ohmori A, Nagasawa R, Kumagai S, Muroi C, Kato T, Eito H, Yamazaki Y (2006) The operational JMA nonhydrostatic mesoscale model. *Mon. Wea. Rev.* 134:1266-1298.
- 8) Pielke RA, Cotton WR, Walko RL, Tremback CJ, Lyons WA, Grasso LD, Nicholls ME, Moran MD, Wesley DA, Lee TJ, Copeland JH(1992) A comprehensive meteorological modeling system - RAMS. *Meteorol. Atmos. Phys.* 49:69-91.
- 9) Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M.G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, 2008: A description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Tech. Notes-475+STR
- 10) Kain J, Fritsch J (1993) Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme. *The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models*, Meteor. Mongor., Amer. Meteor. Soc., 46:165-170.
- 11) Hirai M, Sakashita T, Kitagawa H, Tsuyuki T, Hosaka M, OH'IZUMI M (2007) Development and validation of a new land surface model for JMA's operational global model using the CEOP observation Dataset. *J.Meteor.Soc.Japan* 85:1-24
- 12) Chen DX, Coughenour MB (1994) GEMTM: A general model for energy and mass transfer of land surfaces and its application at the FIFE sites. *Agric. For. Meteor.* 68:145-171.
- 13) Chen F, Dudhia J (2001) Coupling an advanced land-surface/hydrology model with the Penn State/ NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation. *Mon. Wea. Rev.* 129:569-585.
- 14) Kass RE, Raftery AE (1995) Bayes factors. *J Am Stat Assoc* 90:773-795
- 15) Min S-K, Hense A (2006) A Bayesian approach to climate model evaluation and multi-model averaging with an application to global mean surface temperatures from IPCC AR4 coupled climate models. *Geophys Res Lett* 33: L08708.
- 16) Ishizaki, Y., Nakaegawa, T., Takayabu, I. 2010: Precipitation amounts over Japan reproduced by three regional climate models and multi-model ensembles means during the period of 1985-2004. *Climate Dynamics*, submitted

(2010 . 9. 30受付)