

3. 地域気候モデルシステムによる日本周辺での 降水の様相の将来の変化予測

高 藪 出*

1. 地域気候モデルシステムとは何か

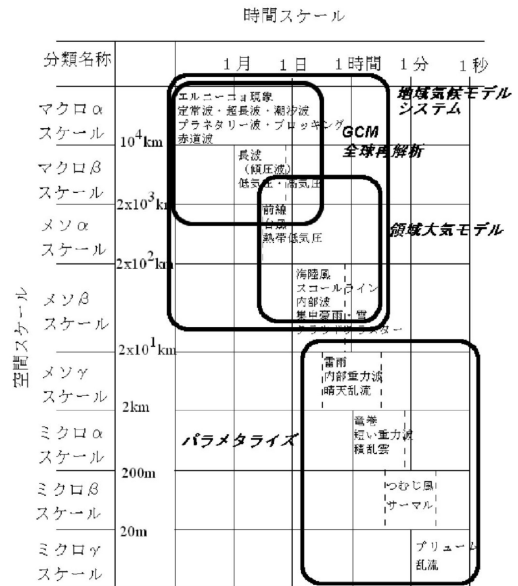
日本の一地方といった地域スケールの気候変動の予測を行うには全球気候モデル (GCM) では解像度が足りないことが多いため、日々の天気予報に通常用いられている高い解像度を持った領域モデルを GCM に埋め込んで計算することが行われている。このモデルシステムをここでは「地域気候モデル-システム」(RCM-S) と呼ぶことにする。

第1図にあるように、気象現象はその空間スケール (大きさ) と時間スケール (寿命) の間に強い相関があることが知られている (Orlanski, 1975)。このことは気象学において現象の理解、あるいは数値モデルの構築などに利用され成果をあげている。この図をみるとスケールの大きい現象ほど寿命が長く、逆にスケールの小さな現象ほど寿命が短く、図で対角線上に様々な気象現象が並んでいることがわかる。

この図に示した諸現象は決して互いに無関係で並んでいるわけではなく相互に関係を持っていることがわかっている。この関連の持ち方の解釈として次の2通りが考えられる。① 第1に、時空間スケールの大きな現象が時空間スケールの小さな現象に場を提供しているという見方である。これは例えば気団の境界としての梅雨前線帯上にメソβスケールの擾乱 (梅雨低気圧) が発生・発達するというイメージである。② 今1つは、時空間スケールの小さな現象が総体として時空間スケールの大きな現象をコントロールするという見方である。これは例えば梅雨前線帯上に次々と発達したメソβスケールの擾乱が前線帯の大きな構造を変質させてゆくというイメージである。

これら2種類のスケール間相互作用のうち①だけ

を考慮しているのが RCM-S である。RCM-S は Orlanski の図中に示したように、エルニーニョから総観規模の温帯低気圧スケールまでを守備範囲とする GCM に境界値をもらいながら、メソβスケールまでの現象の振る舞いを長時間積分により示すシステムである。GCM で設定された場の中で RCM 内での小スケールの擾乱の発生・発達が見逃されることになる。GCM はあらかじめ全期間で計算がおわっていることからわかるように、RCM 内でおきた現象の影響を



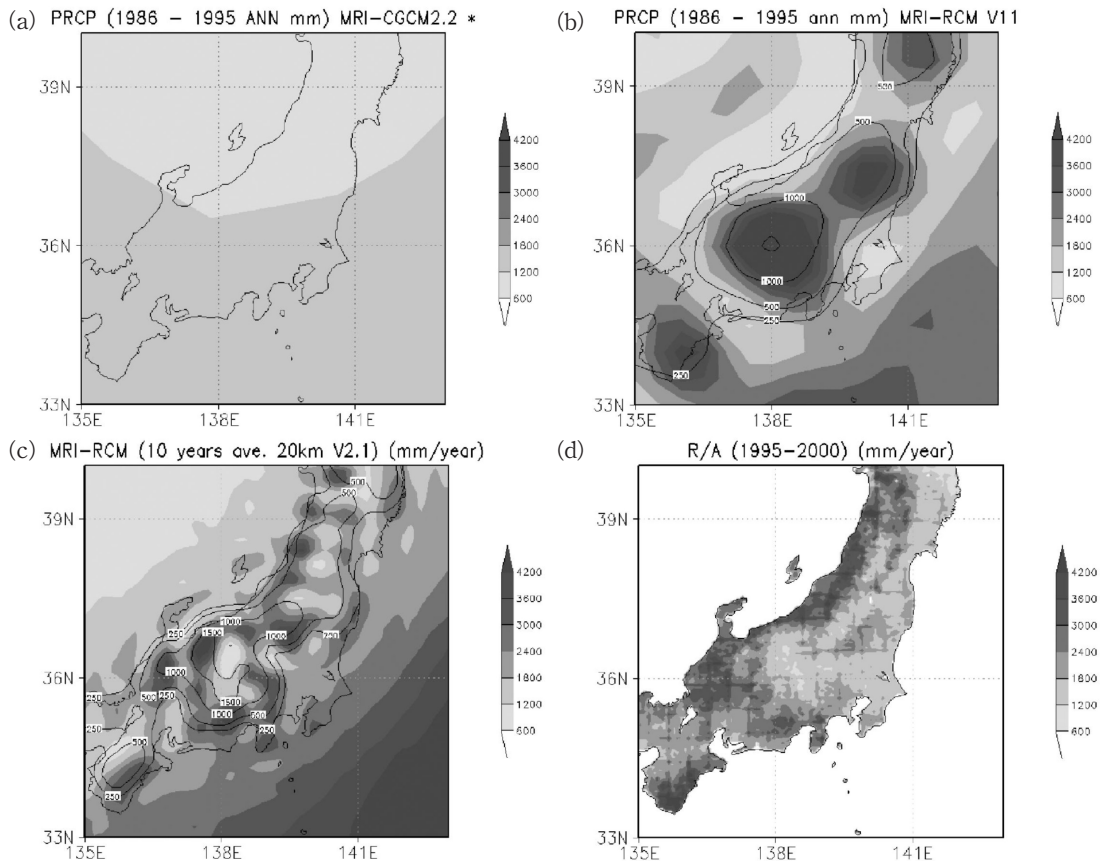
第1図 Orlanski (1975) に基づく気象現象の空間スケール・時間スケールの分類 (二宮, 2002を基に作成)。全球モデル (GCM) ・領域気候モデル・地域気候モデルシステム (RCM-S) と、モデルでパラメタライズされている領域がそれぞれ□で囲んである。

* 気象研究所環境・応用気象研究部。

受けることはない。相互作用が一方向的に大きなスケールから小さなスケールに向かうこのようなネスティング方式を、我々は one way nesting と呼んでいる。

これに対して、②の効果まで入れる (two way nesting と呼ぶ) ためには CSIRO (オーストラリア連邦科学産業研究機構) のモデルグループのように全球ヴァリアブル格子モデルを作る方法がある。もちろん計算機資源が潤沢にあれば、地球シミュレータのように RCM なみの高解像度の全球モデルを動かす (例えば Kusunoki *et al.*, 2006) という解決方法もある。メソ β スケールの現象がマクロスケールにそれほど影響を及ぼさないという仮定の下に RCM-S は使われている。このモデルシステムをうまく用いれば、将来気候変動に伴う地域スケールの気候変動を明らかに出来ることが期待される。

RCM による性能の一例は以下に示すとおりである (高藪, 2005)。第 2 図は日本中部付近の年間降水量を T42 (280 km 格子相当) CGCM (大気海洋結合 GCM), RCM 60 km 版, RCM 20 km 版それにレーダーアメダス (格子間隔 5 km) について示したものである。ここで紹介する RCM は RSM (領域スペクトルモデル) を基に気象研で開発された地域気候モデルで、格子間隔が 60 km と 20 km 相当の 2 種類が有る。T42 版 CGCM では、日本列島が降水分布に影響を与えているようには見えない。RCM 60 km 版になると、日本列島の脊梁山脈に降水の集中が見られるようになる。さらに陸地に注目すると RCM 20 km 版では降水の多い地域は山裾に降りてきており、中部山岳の中心部は降水量が減少するようになる。これらのモデルの結果をレーダーアメダス解析雨量と比べると、



第 2 図 日本列島中部の年平均降水量の再現性の比較。(a) T42 MRI-CGCM2.2.2。(b) MRI-RCM の 60 km 版。(c) MRI-RCM の 20 km 版。それぞれ 10 年平均値。(d) レーダーアメダスの 6 年間 (1995-2000) 平均値 (高藪, 2005 を拡大)。(d) は陸上のみを表示している。

その再現性の差は一目瞭然である。降水パターンはモデルの解像度が上がるにつれて改善してゆく。これは主に地形性降水の改善によっている。地形性降水は、これまでの種々の研究から RCM で最も効果があがることがわかっている。

RCM にはそれでは限界点は無いのであろうか？ RCM を用いた研究は80年代に米国で始まった (Dickinson *et al.*, 1989)。これまで約20年の間に RCM の問題点として以下の3つが明らかになってきている。

- ① 精度はモデルを埋め込む親の GCM 次第である。
- ② モデルの解像度に見合った高解像度の検証用データが入手困難である。
- ③ モデルの物理過程の改良がモデルの高解像度化に追いついていない。

①は「親亀がこけると子亀もこける」問題で、実際、初期の RCM による将来予測の試みは親の GCM の精度不足により失敗しており、ヨーロッパ域で複数の GCM に埋め込んだ実験で、同じ RCM を用いながら全く異なった将来予測をしている例も報告されている (Räisänen and Joelsson, 2001)。②は日本付近では先ほど示したように高解像度のレーダーアメダス・アメダスデータがそろっており検証も容易であったが、チベット山中などまだまだ観測点の少ない地域は地球上に多くある。そのような地域でのモデルの再現性の検証をどのようにして行うのか、この問題の解決には衛星データの積極的利用が望まれている。最後に、③についてである。Orlanski diagram を見てもわかるように、高い解像度の領域モデルでも表現することの出来ない小さなスケールの現象がある。これらの効果をモデルに取り込むために、我々はパラメタリゼーションという手法をとっている。これは、対流・陸面過程・放射などのローカルなスケールで決まっている現象を格子平均量の関数として表す方法である。この方法は元来 GCM 研究で使用されるようになったものである。モデルの高解像度化の過程で、そのまま RCM に適用するとパラメタライズ的前提が崩れてしまうものの中にはある。そこで高解像度モデルに組み込む際にはそれに合わせてチューニングが行われてはいるが、残念ながらまだ完全に成されているとは言えないのが現状である (Wang *et al.*, 2004)。ここで紹介する RCM の結果についてもこのような点を念頭に置いて見ていただきたいと思う。

2. MRI-CGCM2による将来予測

このような RCM-S を用いて行われた将来予測の結果を、SRES A2シナリオ (IPCC, 2000) に従った気候統一シナリオ V2 (気象庁, 2005) によって示す。この結果は MRI-RCM 20 km 版を MRI-CGCM2.2 に埋め込んで (正確にはダブルネスティングで) 実行した結果である (Sasaki *et al.*, 2005; Kurihara *et al.*, 2005)。

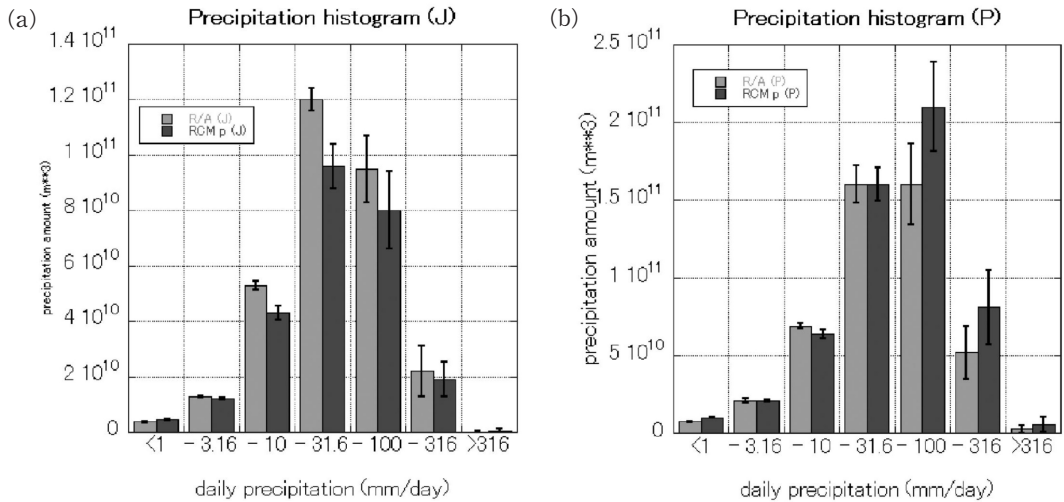
そこで、まず将来に向けて大きな場はどのように変化していたのかを、MRI-CGCM2の結果で説明する。Kitoh *et al.* (2005) によると、MRI-CGCM2では、中国南部と日本域では降水頻度が減るが降水強度は増え、総雨量は増えるという傾向を示している。中国南部や日本付近に水蒸気を供給しているのは太平洋亜熱帯高気圧の周囲を巡る風である。温暖化によってこの亜熱帯高気圧が強まることでこの循環が強まり、水蒸気が南海上から西日本に活発に供給されることになる。この結果として、将来は梅雨明けが遅れることも予想されている (内山ほか, 2003; Kurihara *et al.*, 2005)。

3. MRI-RCMによる地域気候の再現性と将来予測

気候統一シナリオでは、MRI-RCM は現在気候と IPCC SRES A2シナリオに従った100年後のそれぞれについて20年ずつ計算しており、その結果が日別値で提供されている (気象庁, 2005)。モデルの基本的な振る舞いを見るためにはまず現在気候の再現性を調べておく必要がある。

地上気温の季節変動はおおむね正しく再現されている。しかしながら、地域によらず春に (−) 他の季節に (+) の明瞭なバイアスが見えている。これは、このシナリオを用いて例えば熱帯夜のような情報を取り出す際には補正をかける必要があることを示している。これに対して月降水量のバイアスは夏季に北日本と東日本のいずれも太平洋側で (+) バイアスである他はほとんどの地域・期間でウェルチのt検定の95%信頼区間内であり、再現性はおおむね良好と言える。

また、将来変動は月平均気温についてはどの地域・季節とも大きな温度上昇のシグナルが出ている (全国で2~3度: 気象庁, 2005参照)。これに対して降水量については、特に夏季に目立った増加を示していることがわかった。



第3図 (a) 日本海側と (b) 太平洋側の降水頻度分布のレーダーアメダス解析雨量 (左) とモデル値 (右) の比較。横軸は日降水量で縦軸は“総降水量”。エラーバーはレーダーアメダスの6年間、モデルの20年間の標準偏差。

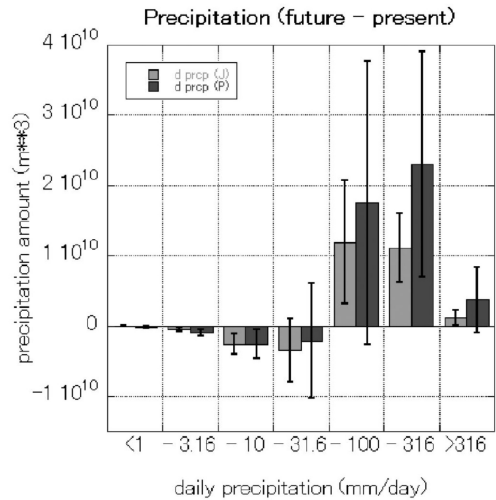
4. 降水頻度分布の再現性と将来予測

ここまで、気候統一シナリオでの月降水量の変動をみてきた。それでは、降水頻度分布はなることが予想されているのであろうか？ ここでは、もう少し細かい日降水量の振る舞いを見てみることにする。比較は降水パターンの異なる日本海側と太平洋側に分けて行った。

まず第3図は降水頻度の再現性である。これにはレーダーアメダス解析雨量の水平解像度をモデルに合わせた上で比較を行った。また、全体の降水に対する寄与を見るために、“降水頻度×降水強度＝降水総量”で表している。図を見ると、降水頻度の分布はおおむね良く再現されているといえる。

次に第4図は将来変動を、95%のウェルチのt検定を使って表したものである。10 mm/day以下の弱い降水が減少し、30 mm/day以上の強い降水が増加していることが統計的にも示されている。この傾向は日本の各地域で同様に見られる。この減少から増加に転じる降水量の値は、既に Kimoto *et al.* (2005) が SRES A1B シナリオに基づいて彼らの T106 (110 km 格子相当) CGCM (MIROC) で行った日本周辺の降水頻度の変化予測の結果とも矛盾しない。

5. 気候統一シナリオによる将来の降水量変動予測
以上のことから、日本付近の将来の降水量変動について次のようにまとめることが出来る。気候統一シナ



第4図 (J) 日本海側と (P) 太平洋側の降水頻度分布の将来変化予測。将来-現在。エラーバーはウェルチのt検定による95%信頼区間を示している。

リオ V2に提供した地域気候モデルシステムの結果によると、SRES A2シナリオにより温暖化したモデル地球上では太平洋の亜熱帯高気圧が強まり、日本列島上への水蒸気の供給が増加し日本付近の降水量も増加することが予測された。RCM 20 km 版では、日降水量の頻度分布を見ると強雨の比率が増すことが統計的に予測された。

なお、より細かい地域気候の予測・再現精度の向上にむけて今後いっそうの努力が必要なのは言うまでもない。

謝 辞

気象研究所気候研究部の鬼頭室長、環境・応用気象研究部の栗原室長には初稿にコメントを頂きました。この場を借りて感謝いたします。

参 考 文 献

- Dickinson, R. E., R. M. Errico, F. Giorgi and G. T. Bates, 1989 : A regional climate model for the western U. S., *Clim. Change*, **15**, 383-422.
- IPCC, 2000 : Special report on emission scenarios. A special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Nakicenovic, N., J. Aleamo, G. Davis, B. de Vries, J. Fenhann, S. Gaffin, K. Gregory, A. Grüber, T. Yong Jung, T. Kram, E. L. La Rovere, L. Michaelis, S. Mori, T. Morita, W. Pepper, H. Pitcher, L. Price, K. Riahi, A. Roehrl, H.-H. Rogner, A. Sankovski, M. Schlesinger, P. Shukla, S. Smith, R. Swart, S. van Rooijen, N. Victor and Z. Dadi (eds.)]. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK.
- Kimoto, M., N. Yasutomi, C. Yokoyama and S. Emori, 2005 : Projected changes in precipitation characteristics around Japan under the global warming, *SOLA*, **1**, 085-088, doi : 10.2151/sola.2005-023.
- 気象庁, 2005 : 地球温暖化予測情報第6巻—IPCCのSRES A2シナリオを用いた地域気候モデルおよび都市気候モデルによる気候予測—, 57pp.
- Kitoh, A., M. Hosaka, Y. Adachi and K. Kamiguchi, 2005 : Future projections of precipitation characteristics in East Asia simulated by the MRI CGCM2. *Advances in Atmospheric Sciences*, **22**, 467-478.
- Kurihara, K., K. Ishihara, H. Sasaki, Y. Fukuyama, H. Saitou, I. Takayabu, K. Murazaki, Y. Sato, S. Yukimoto and A. Noda, 2005 : Projection of climatic change over Japan due to global warming by high-resolution regional climate model in MRI, *SOLA*, **1**, 97-100, doi : 10.2151/sola.2005-026.
- Kusunoki, S., J. Yoshimura, H. Yoshimura, A. Noda, K. Oouchi and R. Mizuta, 2006 : Change of Baiu rain band in global warming projection by an atmospheric general circulation model with a 20-km grid size, *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, 581-611.
- 二宮 洸三, 2002 : 気象の基礎知識, オーム社, 226pp.
- Orlanski, I., 1975 : A rational subdivision of scales for atmospheric processes, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **56**, 527-530.
- Räisänen, J. and R. Joëlsson, 2001 : Changes in average and extreme precipitation in two regional climate and model experiments, *Tellus*, **53A**, 547-566.
- Sasaki, H., K. Kurihara and I. Takayabu, 2005 : Comparison of climatic reproducibility between a super-high-resolution atmosphere general circulation model and a Meteorological Research Institute regional climate model, *SOLA*, **1**, 081-084, doi : 10.2151/sola.2005-022.
- 高藪 出, 2005 : 地域気候モデル研究の特性と課題について, *水文・水資源学会誌*, **18**, 547-556.
- 内山貴雄, 鬼頭昭雄, 野田 彰, 地球温暖化時の梅雨の変化について, 気象学会2003年秋季大会, B161.
- Wang, Y., L. R. Leung, J. L. McGregor, D.-K. Lee, W.-C. Wang, Y. Ding and F. Kimura, 2004 : Regional climate modeling : Progress, challenges, and prospects, *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 1599-1628.