

104:306 (アジア; 降水分布; ダウンスケーリング)

3. アジアにおける降水帯の再現とメカニズムの考察

木村 富士男*

1. はじめに

将来の温室効果ガスの増大に伴う気候変動の将来予測はモデリング研究に課せられた大きな課題である。社会からは人々が実感できるような気候の将来予測や災害防止などの具体的な施策に反映できるような詳細な気候変化予測が強く求められている。これらの予測はCGCMにより精力的に実施されているが、高解像度化が大きく進んできたとはいえ、未だに地域規模の予測には限界がある。GCMの空間解像度を高めることと並行して、部分的に解像度をあげる手法として領域モデルによるダウンスケールの研究も推進されている。

領域モデルによるダウンスケールにはいくつかの問題点も指摘されている。まずGCMにバイアスがあると、領域モデルはそのまま引き継いでしまう。GCMの水平規模ではわずかな空間的なずれであっても、領域規模でみると大きな食い違いなることも多い

(Wang *et al.* 2004)。現状の再現が観測とあまりかけ離れていては、それによる将来予測は信頼できない。また領域気候モデルは地形に依存する詳細な気候特性は再現できるが、それ以外の水平規模の細かい気象の再現には必ずしも向いていないとの議論もある。Castro *et al.* (2005)によればnestingされた領域気候モデルの内部では中規模の擾乱のエネルギーが過少評価されるとしている。すなわちnestingによるダウンスケールでは領域モデルの解像できるスケールであっても、自由大気の擾乱などの再現には疑問があることになる。この問題の解決にはGCMで再現される中程度の水平規模の擾乱を、半ば強制的に領域モデルに伝えることのできるspectrum nudgingが有用とされている。この考えでは、領域モデルの持つ自由度はGCMの解像度以下に厳しく制限され、その機能は「GCMの出力を地形を勘案して内挿すること」になる。

領域気候モデルを扱う研究者は、特定の地域の気候についてはGCMの研究者よりは詳しく研究しており、観測データとの比較・検討の経験も深いはずである。これらの知識を利用して地域の将来予測に関する不確実性の評価やその改善に貢献すべき立場にあると

* 筑波大学生命環境科学研究所 (現所属: 海洋研究開発機構). fkimura@jamstec.go.jp

© 2010 日本気象学会

信じたい。しかしながら領域気候モデルでは「内挿」以外に貢献できないのであれば少し残念な気もする。はたして領域気候モデルは「内挿」を超えて「将来予測の不確実性の評価」やその低減には寄与できないのだろうか？ この発表では「地形を勘案した GCM の内挿」以上の機能を領域気候モデルから引き出すことができないものかどうか、その可能性を考察する。

2. GCM のバイアス補正 (疑似温暖化)

GCM の性能が向上しているとはいえ地域規模の目で見ると、観測事実と GCM による再現気候の乖離はまだまだ大きい。たとえば梅雨前線は、GCM の高解像度化で再現が可能となってきたが、大多数の GCM で満足すべき観測との一致が得られているというにはほど遠い。いまのところ、ダウンスケールを実施するにはあらかじめ観測との照合をして、現状の再現精度のよい GCM を選択する必要がある。

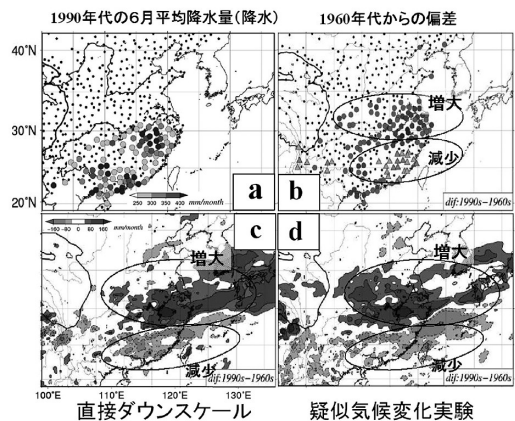
筆者らは最善の GCM を選択することから更に進めて、GCM による将来予測を現在気候の客観解析値を使って積極的に補正する試みに挑んでいる。Kimura and Kitoh (2007) によれば、トルコを対象とした領域気候モデルによる直接ダウンスケールでは、現状再現実験で乾期にほとんど雨が降らず、将来予測の変化予測が困難であった。しかし下記に述べる疑似温暖化手法によるダウンスケールを適用すると、現状の再現は改善され、この地域の将来の降水量予測を実施することができた。

疑似温暖化実験では、GCM による現状と将来の変化成分を月単位に作成し、現在の客観解析値 (6 時間ごと) に加えることにより、6 時間ごとの疑似温暖化境界値を作成する。この境界値と同様に作成した海面温度を領域気候モデルに与えダウンスケールを実施する。疑似温暖化手法では現在気候のダウンスケールは客観解析値を境界にした再現計算そのものであり、通常は高い再現性を与える。将来気候の境界値は日々の変動は現在気候とよく似ているが、境界値における現在気候と将来気候の差は GCM の予測した気候変化と同じになる。気候の変化成分は領域気候モデルの働きにより地形の影響等を反映するので元の GCM によるものより詳細な分布を与える。しかし、この手法で将来の気候の意味のある予測ができるかどうかは理論的には不明確であり、様々な面からの検証が必要である。

Kawase *et al.* (2008) は中国大陸における梅雨前

線の降水に1960年代と1990年代とで明確な違いがあることを利用し、過去の気候変動について疑似温暖化手法と同様の再現実験を実施した。この場合には月平均の温暖化差分は客観解析データの平均値の両期間の差から作成されるので、GCM のデータは使われない。また変化の原因は温室効果気体の排出による気候変化ではないかも知れないので、名称を疑似気候変化実験としている。

第1図の上の a, b 図はそれぞれ地上観測による1990年代の降水量を示し、右の b 図は1960年代からの増分を示す。全体に降水量は増大しており、揚子江の南に降水の減少域が見られる。下の c 図は客観解析からのダウンスケールによる両年代の変化の再現で、南シナ海沿いの降水の増大はあまり再現されていないものの全体的な一致は良い。これに対し右下の d 図は疑似気候変化実験による偏差の再現であり、直接ダウンスケールとよく似た結果を与えている。これは、境界条件に偏差成分を上乗せするだけで、降水量変化の地域分布の変化をほぼ再現できることを示している。疑似気候変化実験 (あるいは疑似温暖化手法) では、再現される現在気候と将来気候で年々変動の成分が似ているので、評価期間が比較的短くても、年々変



第1図 a: 雨量計で観測された1990年代の6月の降水量 (濃い色ほど多い), b: 1960年代と1990年代の降水量の差, 下の楕円では降水量は減少 (カラーバーはaと同じ), c: 客観解析からダウンスケールされた60年代と90年代の降水量の差 (下の楕円は減少), d: 疑似気候変化実験で得られた60年代と90年代の6月の降水量の差 (カラーバーはcと同じ). Kawase *et al.* (2008) より。

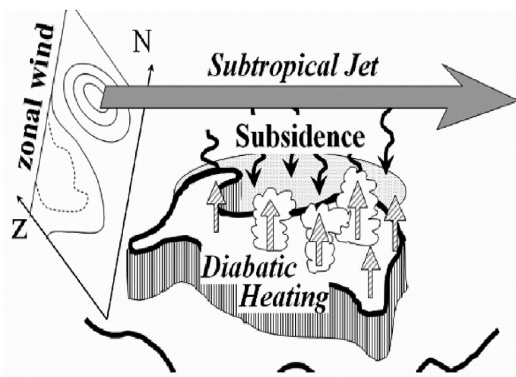
動による評価の不確実性が生じにくい利点もある。

3. メカニズムの解明を通じた不確実性の検討

ダウンスケールへの応用とは別に、領域気候モデルは、地形による気候特性の再現とそのプロセス研究は得意であると言える。たとえば古典的なものには山岳波やおろし風の研究がある。また海陸風や山谷風さらには降水の日変化などの研究に活用されてきた。

第2図はSato and Kimura (2005)により領域気候モデルを主体にしたプロセス研究で示されたタクラマカンやゴビの夏季における乾燥化とチベット高原による非断熱加熱の関係を表す模式図である。これによると、チベット高原の地表から大気に伝わる非断熱加熱の影響の伝搬は、亜熱帯ジェット的位置により大きく異なり、亜熱帯ジェットが高原の北にある夏には、その影響は北向きに伝搬し、強い沈降流をもたらす。このため、この地域は乾燥し、降水は強く抑制される。このメカニズムは、タクラマカンやゴビ砂漠が、他の主要な砂漠に比べて、かなり高緯度に存在していることをうまく説明する。この研究では客観解析値に加工を加え単純化した境界値を領域気候モデルに与えていたため、チベット高原の熱源から伝搬するシグナルに焦点を絞った分析を可能としている。

同様に、インドモンスーンがオンセットする以前の5月ごろまでは、亜熱帯ジェットが相対的に南よりに位置するため、チベット高原からの非断熱加熱の影響が高原の南に伝搬し、インド北部の降水を強く抑制する。ジェットの北上とともに、この抑制効果は弱ま

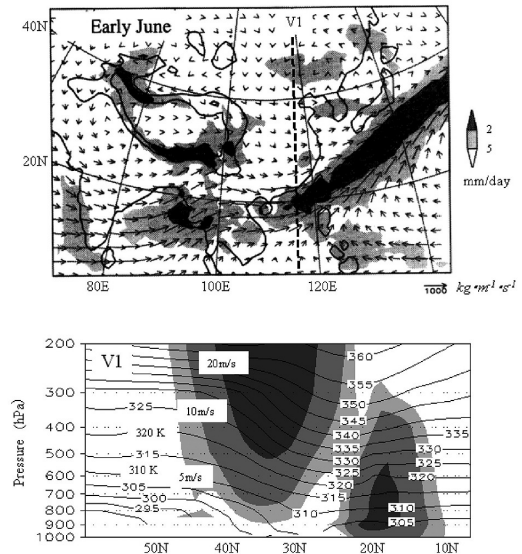


第2図 チベット高原の非断熱加熱が亜熱帯ジェット的位置によってはタクラマカンやゴビの降水を抑制しているメカニズムの模式図 (Sato and Kimura 2005)。

り、インドモンスーンオンセットに寄与しているとしている (Sato and Kimura 2007)。

第3図はYoshikane *et al.* (2001) によって再現された梅雨前線による降水である。領域モデルには、初期値境界値とも全球帯状平均場が与えられており、アジアモンスーンに関する大気循環の情報は一切与えられていない。このモデルで再現されているのは、大気と陸面および海洋 (SSTの分布は気候値) の相互作用によって、領域気候モデル内で生じたものである。このような研究から梅雨前線やモンスーンの形成機構の一端を調べることができる。

さらにこれを温暖化による降水変化に発展させたのが第4図である (吉兼 2008)。第4図の上は第3図と同様な実験であるが、下は帯状平均気温とSSTとともに2.5度上昇させた実験である。モンスーンや梅雨前線におよぼす温度の上昇効果だけを取り出したことに相当する。Clausius-Clapeyron効果により降水量が増大するとともに、我が国周辺の梅雨前線が南下している様子が見られる。梅雨前線の南下はYoshizaki *et al.* (2005) などでも指摘されているが、単純な

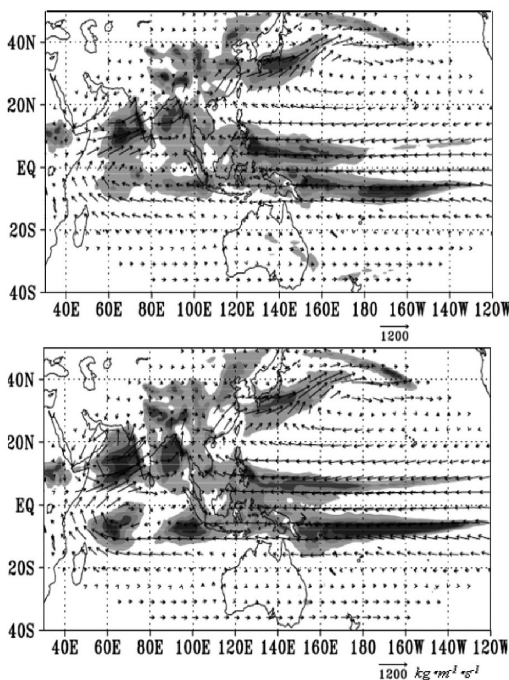


第3図 全球帯状平均場を境界値とした領域気候モデルによる梅雨前線の再現。上：水蒸気輸送量 (矢印) と降水 (影)，下：東経115度近辺の南北断面の温位分布 (コンター) と風速 (影)。亜熱帯ジェットと下層ジェットの対が見える。Yoshikane *et al.* (2001) より。

Clausius-Clapeyron 効果で説明できるのであれば興味深い。

4. 今後の発展

計算機性能がますます向上する中で、GCMと領域モデルの役割分担は変化していくであろう。その中で領域モデルが気候予測の手法として今後も発展していくかどうか予断はできない。はじめに述べた「社会からは人々が実感できるような気候の将来予測や災害防止などの具体的な施策に反映できるような影響予測が強く求められている」にどのように応えるかにかかっている。領域規模気候の研究者は、その地域の気候に精通するとともに、その地域社会の脆弱性についても把握しておく必要がある。そのためには気候だけの専門性では限界があり、異分野との交流が不可欠なのかもしれない。



第4図 領域気候モデルによる全球帯状平均からのダウンスケールにおけるClausius-Clapeyron効果の実験(矢印と影は第3図に同じ)。上:1998年6月の全球平均場のダウンスケール,下:気温海面温度とも2.5度上昇させた実験(吉兼2008より)。

謝辞

本稿をまとめるにあたり、独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境フロンティア研究センターの吉兼隆生氏、原政之氏および川瀬宏明氏(現:国立環境研究所・大気圏環境研究領域)、また東京大学気候システム研究センター(現:東京大学大気海洋研究所)の佐藤友徳氏には資料を提供して頂きました。また執筆にあたり環境省の地球環境研究推進費(S-5)の支援を受けました。これらの方々には深く感謝いたします。

参考文献

- Castro, C. L., R. A. Pielke Sr. and G. Leoncini, 2005: Dynamical downscaling: Assessment of value retained and added using the Regional Atmospheric Modeling System (RAMS). *J. Geophys. Res.*, **110**, D05108, doi: 10.1029/2004JD004721.
- Kawase, H., T. Yoshikane, M. Hara, B. Ailikun, F. Kimura and T. Yasunari, 2008: Downscaling of the climatic change in the rainband in East Asia by a pseudo climate simulation method. *SOLA*, **4**, 73-76.
- Kimura, F. and A. Kitoh, 2007: Downscaling by pseudo global warming method. The final report of ICCAP, Research Institute for Humanity and Nature, 43-46, March 2007.
- Sato, T. and F. Kimura, 2005: Impact of diabatic heating over the Tibetan Plateau on subsidence over northeast Asian arid region. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L05809, doi: 10.1029/2004GL022089.
- Sato, T. and F. Kimura, 2007: How does the Tibetan Plateau affect the transition of Indian monsoon rainfall? *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 2006-2015.
- 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.
- 吉兼隆生, 2008: 疑似温暖化手法を用いた地球温暖化による冬季河川流量の影響評価. 日本気象学会2008年度春季大会講演予稿集, A109.
- Yoshikane, T., F. Kimura and S. Emori, 2001: Numerical study on the Baiu front genesis by heating contrast between Land and ocean. *J. Meteor. Soc. Japan*, **79**, 671-686.
- Yoshizaki, M. et al., 2005: Changes of Baiu (Mei-yu) frontal activity in the global warming climate simulated by a non-hydrostatic regional model. *SOLA*, **1**, 25-28.