

力学的ダウンスケーリングのレビュー^{†1}

高 藪 出*・金光 正 郎**

1. はじめに

大気大循環モデルは地球温暖化の研究において根本的な役割を果たしてきている。しかも近年、モデルの性能が増すにつれてモデルの結果をより身近な現象に関連づけて使おうとする傾向が出てきた。例えば、温暖化による河川の流量、農作物、風力発電や太陽発電、健康や自然環境などへの影響に応用する可能性が試され始めている。しかしながら、このような応用をするには色々な問題が残っている。その主なものとして、モデルの信頼性と、モデルの空間分解能の問題がある。前者はモデルの開発史そのものであり世界中の研究機関が精力的に研究を続けている。一方、以下に詳述するダウンスケーリングに関連するのは後者の問題である。これは、温暖化予測のためにモデルを時間積分する際には長時間の積分を大気と海洋のモデルを結合して行わなければならない、現在の高性能の計算機をもってしても多大な計算時間が必要となり、結果としてモデルの分解能を落とさなければならないことによる。最近公表された IPCC^{†2}第4次報告書 (IPCC 2007) の気候予測の基となった CMIP3 においても、大気モデルの最高分解能は日本で開発されたモデルの1つである MIROC の約100km であり、他のモデルは200~300km の分解能しかない。このような分解能は、上記の身近な応用に非常に困難をもたらす。たとえば、200~300km の分解能では、日本海側と太平洋側の気候の差が全く表現されないで、このようなデータを地域気候の予測に使うのは難しい。

* 気象研究所。

** カリフォルニア州立大学サンディエゴ校スクリプス海洋研究所。

—2009年3月3日受領—
—2010年5月1日受理—

© 2010 日本気象学会

2010年7月

そこで、この問題を解決しようとして考えられたのがダウンスケーリング手法である。これは低分解能のモデルの出力データから高分解能の出力データを求める方法の総称で、力学的ダウンスケーリングと統計的ダウンスケーリングの2種類がある。両者のメリット・デメリットを第1表にまとめてみた。

この解説では、このうち力学的ダウンスケーリングについて述べる。一言で言えば、力学的ダウンスケーリングは領域モデル (Limited area model) をその側面境界に低解像度のモデルのデータで強制するものである。この方法は局地気象モデルによる予報に酷似しており、その違いを明らかにする必要がある。

本解説の構成は以下のとおりである。第2・3節では、力学的ダウンスケーリングの歴史とその基本的問題点について簡単にまとめた。第4節では大きな技術的問題であるネスティングについて紹介する。第5節では、力学的ダウンスケーリングの成果について金光らの研究成果を中心に紹介する。第6節では、今後問題となってくるであろう諸点について論ずる。最後の第7節は金光の講演で触れられなかったその他の問題点についての補足である。

2. 力学的ダウンスケーリングの歴史

第1図は、力学的ダウンスケーリングの効果を示す一例である。カリフォルニア沖のカタリーナ渦というメソスケールの渦 (第1図 a) が、全球再解析データ

^{†1} Review of dynamical downscaling : このレビューは金光が2008年2月に気象研究所で行った講演とその時使われた英語のプレゼンテーションのスライドを基に高藪が書き下したものである。高藪の不手際から、投稿がプレゼンから大変遅れてしまったことをここにおわびします。

^{†2} 略語については末尾に一覧としてまとめた。

第1表 統計的ダウンスケーリング (SD) と力学的ダウンスケーリング (DD) それぞれのメリット・デメリット.

	メリット	デメリット
統計的ダウンスケーリング (SD)	<ul style="list-style-type: none"> ・簡単. ・過去のデータさえあればできる. 	<ul style="list-style-type: none"> ・手法自体の物理的意味があいまいなことが多い. ・データがそろっていないければ (統計がとれなければ) できない. ・背後にある力学や物理過程を理解するためには役立ちにくい: 大気のパラメータは互いになんらかの形で相互に関係しているはずであるが, それを必ずしも考慮しているわけではない. ・温暖化時の状態に, 現在のデータに基づく統計関係を適用可能かどうか, 定かでない.
力学的ダウンスケーリング (DD)	<ul style="list-style-type: none"> ・物理的な基礎がある. ・すべての物理量が一度に得られて, かつそれらが全て互いに整合的. ・小さなスケールの現象の理解にも利用可. 	<ul style="list-style-type: none"> ・SDほど正確でないことが多い. ・系統的な誤差がある. ・計算時間がかかる.

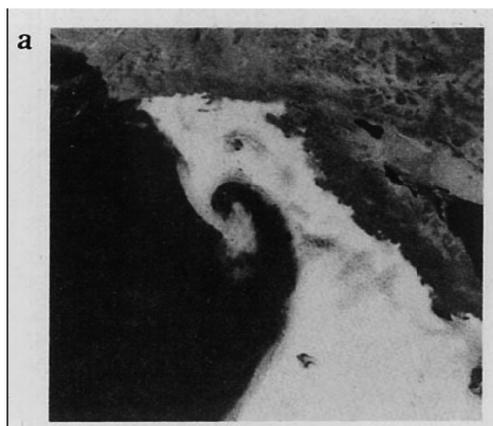
ではまったく再現されていない (第1図c) ものの, 10km メッシュの地域気候モデル (RCM) によるダウンスケーリング (第1図b) で再現されている. このようにこの方法はきわめて有望なものである. この節では, まず力学的ダウンスケーリングの歴史的な側面を見ていく.

実は, 世界で初めての数値予報である Charney (1949) のモデルは, 北米大陸を含む領域モデルであった. Charney and Phillips (1953) の論文では側面境界条件に関してかなりきちんとした取り扱いがなされているのには注目すべきであるが, 領域を切り取ることに伴う問題を解決したわけではなく, Charney は後年までどのようにして境界条件の問題を解くべきか悩んでいたと聞いている. その後, 予報精度に領域の大きさが大きく影響することが分かってきて, 予報域が領域から全球へと展開していった. すなわち, プラネタリスケールの現象の予報が中緯度の正確な天気予報にとって重要であることが知られてきたためである. 全球モデルのはじめは Phillips (1956) によるものであるが, これは周期境界条件のベータ平面チャネルによるものであった. 真の意味での最初の全球大気モデルは, Manabe *et al.* (1970) により行われた大循環のシミュレーションである. 全球モデル (GCM) による数値予報は, Miyakoda *et al.* (1971) によって始められたが, 現業予報に使われるようになったのは1979年後半から始まった ECMWF (ヨーロッパ中期予報センター) のモデルであると思われる. GCM は側面境界条件がないために, 側面境界に

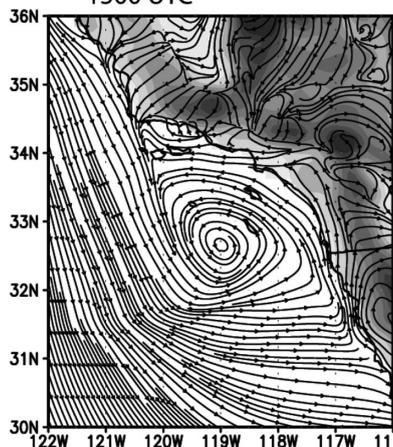
おける数学的な問題に影響されることはなかった. ただし, 差分法に関して両極の取り扱いの問題が生じたが, スペクトル法や擬似一様格子 (Quasi-homogeneous grid) の導入によって問題は解決された.

他方, 領域モデルは高解像度モデルとして独自の発展を続けた. 側面境界条件の問題がありながらも領域モデルが使われ続けてきたのは, 計算機資源の制約の下での高解像度モデリングの必要性が主な理由である. 側面境界条件の与え方に起因した問題が生ずることはよく認識されており, その影響ができるだけモデルの内部領域に及ばないようにという理由から, 短期予報に限定して使われていた.

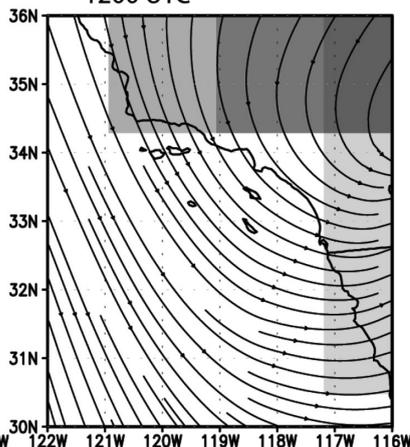
Giorgi は領域モデルを複雑な地形を持った地域の気候状態の再現に初めて適用した (Giorgi and Bates 1989; Giorgi *et al.* 1990). ただし, その方法の力学的, 数学的な妥当性にはあまり深い考察はせずに適用したようである. Giorgi and Bates (1989) では, 粗い解像度の GCM による温暖化実験の出力データを側面境界に用いて, 高解像度の領域モデルを積分した. この実験における基本的な仮定は, まず, GCM は温室効果ガスの強制による大規模な大気循環の変化を正しく表現しているということ, そして領域モデルは GCM の格子間隔では表現できない強制, 例えば大きな湖面の情報, 地表面植生の状態, 複雑な地形と海岸線といった, 地域的な気候の特徴に影響を及ぼす様々な要因の効果を表現できるということである. そのため, 初期値・境界値は GCM による温暖化実験の結果から内挿によって作成された. 強制は側面境界から



(b) CaRD10
10-km resolution
1500 UTC



(c) Global Reanalysis
200-km resolution
1200 UTC



第1図 カリフォルニア沖のカタリーナ渦(a)の、10km 地域気候モデルによる再現(b)。モデルをネストした NCEP/NCAR 再解析データ(c)ではまったく再現されていない。(a)の衛星写真において、白い部分は下層雲をしめす。

のみであった。積分は継続的に行い、降水量、地上気温、雪などの分布に焦点が絞られ、ある程度の成功を取めた。再現性の不十分な点は、境界強制に使った R15 という中緯度における解像度がおよそ 1100km である低解像度の大気海洋結合大循環モデル (AOGCM) の再現性の問題にその原因を求めた。

Giorgi and Bates (1989) の研究に対する批判としては、ダウンスケーリング手法における基本的な仮定が不明瞭である点、RCM を用いたダウンスケーリングと短期予報について混乱している点が挙げられる。この混乱は、現在に至るまで続いているように思われ

る。

3. 力学的ダウンスケーリングは初期値問題か境界値問題か？

領域モデルに使われる予報方程式は、初期値問題と境界値問題のどちらにも適用し得る。前に述べたように、初期の領域モデルやその後の領域モデルの改良・進展は側面境界の影響ができるだけ及ばないことを条件に短期予報に限定して行われており、初期値問題に重きを置いていた。一方、Giorgi and Bates (1989) は初期値の影響が残らない長期積分を行っており、この意味ではこの研究をもって境界値問題として領域モデルを使うようになったといえる。この使用法の違いがダウンスケーリングと言う用語の導入につながった。そこには領域モデルによる短期予報とダウンスケーリングを区別しようとする意図があったようである。しかしこのような違いは、領域モデルを使う人にとって必ずしも明確ではなかった。その後、ダウンス

ケーリングの手法として連続積分法と再初期値化法に区分されたことで (Qian *et al.* 2003)、初期値問題と境界値問題の区別が一層難しくなった。ちなみに、連続積分法とはいわゆる長期積分のことである。一方、再初期値化法は何日か毎に初期値をリセットして短期間の領域モデルの積分を繰り返すものであり、初期値問題に重きが置かれている。

このようにダウンスケーリングがどのように行われるかで、初期値問題と境界値問題、どちらに重きが置かれるかが決まってくる。すなわち、連続積分を長期間行くと境界値問題の重みが増すのに対し、短い時間

第2表 初期値問題・境界値問題それぞれのメリット・デメリット。

	メリット	デメリット
連続積分法 (境界値問題)	<ul style="list-style-type: none"> ・時間的に連続 ・時間変動剰余項(tendency residual) が ない 	<ul style="list-style-type: none"> ・境界値の効果が重要. ・長時間行くと誤差が累積してくる. ・領域の大きさに依存. ・予報方程式に余分な項が加わり, その物 理的解釈ができない.
再初期値化法 (初期値問題)	<ul style="list-style-type: none"> ・積分時間が短いために, 系統的な誤差が ない. ・領域の大きさや境界値によらない. 	<ul style="list-style-type: none"> ・時間的不連続. ・スピニアップ/スピンドアウンの問題. ・技術的に複雑.

間隔で初期値を与えて計算を行うと初期値問題に重きがあることとなる. それぞれのメリット・デメリットは第2表のようにまとめられる.

4. ネスティングにおける諸問題

4.1 スペクトル境界ナッジング手法

領域モデルを長期積分するにあたって, 「領域の中の大規模循環が時間と共にずれていってしまわないようにする」という立場から, Kida *et al.* (1991) はシミュレートされた大規模循環場を外部強制の大規模循環場と適当な時間間隔で置き換えるというアイデアを初めて提示した. このアイデアはいわゆる間欠的データ同化に由来するものである. 後に連続的データ同化のアイデアに基づいたナッジングの方法が Waldron *et al.* (1996), von Storch *et al.* (2000), Kanamaru and Kanamitsu (2007a) によって出され, 色々なモデルで使われてきている. Kida *et al.* (1991) と後者の様々な手法の内どちらの方法がより有効かは, 力学的にダウンスケーリングされた場の時間連続性や収支計算の妥当性, 結果の理解等にもかかわっており, 簡単には結論づけられない. いずれにせよ, これらの方法はいずれもシミュレートされた大規模循環場を経験的に補正するものであり, 領域モデル側面境界条件の根本的な数学的問題点を解決している訳ではないことに注意したい.

ナッジングの手法は境界値問題と初期値問題を融合させたものと解釈でき, 連続積分法と再初期値化法の両者の利点をもっている. すなわち, 領域の外側の大規模場は正しいと仮定して, そこからの偏差が無くなるように時間間欠的に, ないしは連続的になじませようとするものである.

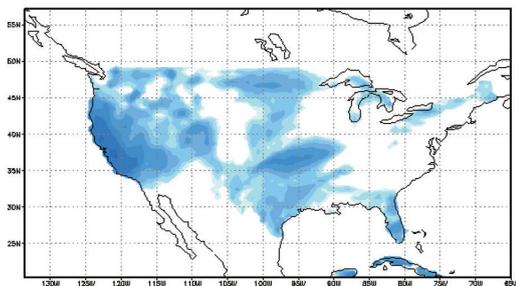
ナッジングなしの高解像度の領域モデルで全球モデルよりも正確に大規模場の予測・再現が出来ると主張

する人がいるが, これは地域気候モデルを気候の時間スケールで使う上では誤った見解である. 自然界には側面境界など無いのであり, 第4.2節で述べる様に側面境界条件を数学的に厳密に扱うことができないのであるから, 領域モデルが全球モデルより大規模場をよく予報再現することはありえない. しかしながら, もしも地域モデルが初期値に重きを置いている再初期値化法のような場合には, 領域内の初期値がより正確であれば領域モデルが大規模場の予測をより正確に行うことは可能である.

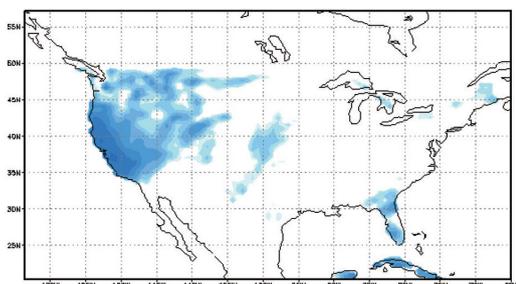
以下, スペクトル境界ナッジング手法の1つとしてのSSBC法 (Scale Selective Bias Correction) を採り上げて説明する. この手法は, 計算領域の中の大規模場の誤差を減らし, 領域モデルを強制している粗い解像度の全球解析値の大規模循環場へ地域的な場を近づけてゆくものである. そのために, (1)水平風の時間変化を減らし, (2)領域平均として評価したときに温度と湿度については外側の全球モデルからの偏差を無くし, (3)地上気圧の偏差が全球モデルと領域モデルが表現する地形の違いのみを反映するように調整する. この手法によって, (1)地域的な詳細なスケールでの観測との比較が容易になり, (2)計算領域のサイズによらず, つじつまのあった解析が可能になり, (3)側面境界のナッジング域 (いわゆる「額縁」) を狭めることが可能になる. また, (4)全球解析による年々変動成分は維持されるので, 長期トレンドの領域気候に及ぼす影響を見るのに都合がよい. 第2図及び第3表 (Kanamaru and Kanamitsu 2007a) は, 降水量の再現性がSSBCの導入により向上した例を示している.

スペクトルナッジングは, Kida *et al.* (1991) が行ったように間欠的方法でも適用可能である. これは, データ同化手法に類似的である. 領域モデルを6

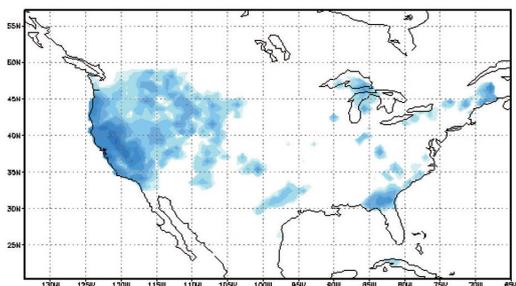
(a) no SSBC



(b) SSBC



(c) OBS.



第2図 2001年2月14日の降水量分布。(a) SSBCを入れない計算結果。(b) SSBCを入れた計算結果。(c) Higgins *et al.* (1996) の観測値。日雨量0.2mm以上をカラーリングしている。Kanamaru and Kanamitsu (2007a) による。

第3表 北アメリカ大陸の米国域での地域気候モデルによるダウンスケーリング実験のスレットスコアとバイアスコア。コントロール実験はSSBCを働かせていない実験である。スレットスコアはSchaefer (1990) による (Kanamaru and Kanamitsu 2007a)。

	夏季	夏季	冬季	冬季
	スレット (無次元量)	バイアス (mm/day)	スレット (無次元量)	バイアス (mm/day)
コントロール実験	0.40	0.95	0.44	1.47
SSBC 実験	0.42	0.97	0.46	1.14

時間積分し、予報値から大規模場を抽出し、全球解析値と置き換える。これは解析された大規模場を予報された小規模場と融合させることであり、小規模の観測値を全く使わない簡易なデータ同化手法ということが出来よう。この方法では、残念ながら間欠的なデータ同化手法と同様、時間連続性がなくなる。大規模場を置き換える方法としては変分法やアンサンブルカルマンフィルターなどのより洗練された手法を使うことも考えられる。Kanamaru and Kanamitsu (2007a) は、高解像度の領域データ再解析におけるダウンスケーリング手法のもっと重要な効果を議論している。

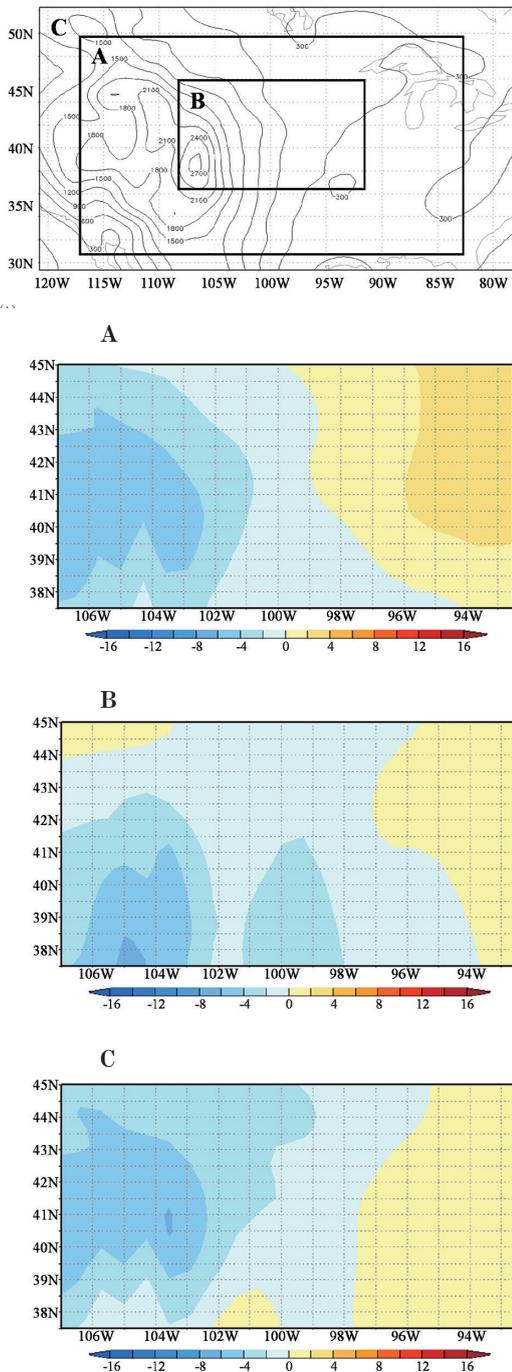
第3図は、スペクトルナッジングが領域の大きさに強く依存しないことを示している。A, B, Cの3つのスケールで地域気候モデルを動かして、外側境界の全球再解析との差(500hPa高度)を見たものだが、領域依存性があまり無いことが分かる。SSBCを併用したダウンスケーリングはこのように領域のサイズにあまり敏感ではないので、半球規模・全球規模といった非常に大きなスケールのダウンスケーリングに適用することが出来る。例えば、Kanamaru and Kanamitsu (2008) は領域スペクトルモデルを用いて領域を北半球全体に広げた。また、Yoshimura and Kanamitsu (2009) は全球スペクトルモデルを用いてナッジングを行った。

ナッジングの方法を改良する努力は続けられている。例えば、最近のテストでは風速場のうち回転成分のみをナッジングしたり、温度に関してはその面積平均値のみを補正したりする方法が試されている。また、水蒸気場にはナッジングを施さないとより良い結果が得られることが分かってきている。

4.2 側面境界ナッジング手法

領域モデルの問題点は、現実の大気にはない側面境界があることである。ここではどうしても波の反射が起こってしまい、計算領域にノイズをもたらしてしまう。

これに対処するために、1970年代に種々の試みが提案された (Davies 1976; Okamura 1975 等)。Davies (1983) はこれらをまとめた論文であり、そこで推薦された手法が現在もなお一般的に使われている。境界で波の反射を抑えようとしても、現実



第3図 上図において領域をA-Cと様々に変えた領域大気モデル実験における、500hPa高度場の解析値からのずれ(m)。分布にほとんど変化がない。上図の等値線は北米大陸の地形の標高を示す(300m毎)。Kanamaru and Kanamitsu (2007a) による。

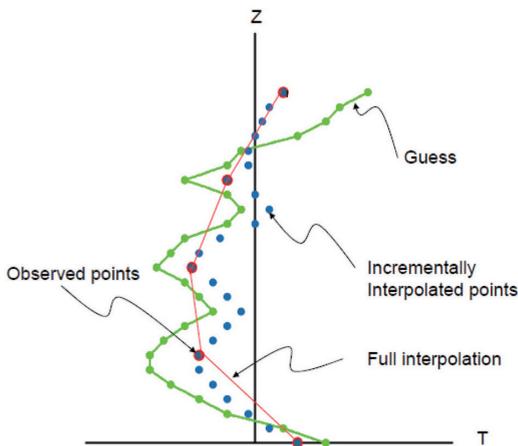
の現象は様々な特性の波動成分からなりたっているもので、これら全てに対して満される境界条件を見つけるのは難しい。Davies (1983) ではこれをかなり厳密に評価しているが、実際にナッジングを使っている研究者はこの問題をあまり意識してこなかった(正確に言うと無視してきた)。こうして、Davies (1983) 以降、この分野の研究はほとんど進展をみせなかった。最近になって、Davies (1983) の発展として Marbaix *et al.* (2003) は、波をモデル境界で反射させない、あるいは反射を抑えるために必要な境界条件を波の伝播速度と境界での反射率の関係から調べている。これらの研究とは独立に、鉛直ノーマルモード (vertical normal mode) 展開を施したり、反射波 (reflective wave) をフィルターしたり、あるいは双方向ネスティング (two-way nesting) を導入するなどして、波の反射問題に取り組む方法が考えられるがいずれもまだ未開発・未完成の手法である。

なお、1つの新しい試みとして、McDonald (2003) は、新しいアイデアとして Engquist and Majda (1977) の方法を境界条件として採用し、浅水方程式に応用して一応の成功を取めた。この方法を発展させるには、鉛直ノーマルモードで方程式を展開し、各モード毎に境界条件を設定する方法が考えられる。これは魅力的な手法であるが、まだ誰も取り組んでいない。

4.3 全球モデルへのネスティングにあたって他に問題となること

全球気候モデル (AOGCM) による将来予測結果を地域気候モデル (RCM) によってダウンスケーリングする際には、AOGCM に埋め込む (ネスティングすることになる。AOGCM の不確実性は RCM のそれよりも大きいいため、地域気候モデルの側からすると出来るだけ多くの AOGCM に埋め込みたいところではあるが、ここで問題になるのは全ての AOGCM が必ずしも RCM へのネスティングを意識してデータを保管していないということである。中には、モニターのために多くの鉛直層のうち3層のみのデータを24時間毎のデータとしてしか保持していないモデルもある。このように時空間に粗い AOGCM の出力データへ RCM を埋め込むことを可能にする技術として、Yoshimura and Kanamitsu (2009) は差異内挿法 (Incremental Interpolation) を提案している。

差異内挿は、GCM (ないしはある RCM 計算領域を含むより広いエリアを対象にする別の RCM) を数



第4図 差異内挿法による鉛直分布表現の改善の模式図. 任意の変数 T (横軸) について, 赤丸の高度におけるデータしか無いときに, 単なる内挿(赤), 差異内挿(青)での鉛直分布の表現力の差. 緑線は全球モデルの短時間予測で得られる推定値.

時間積分し直すことで保管されなかった GCM の鉛直層の推定値データを生成し, 保管しているレベルの値と推定値との差を, 鉛直・時間内に挿する手法である. 第4図に示すように, この方法によって鉛直内挿の精度を大きく上げることが可能になる. GCM を動かすためにコストがかかるようにみえるが, RCM を動かすコストに較べればさほど大きいものではない. 彼らはこの手法を SSBC と併用することで, 3層分しか保持していないデータからでも RCM を用いた予測を十分な精度で行い得ることを示した. さらに, この手法を時間方向についても適用し, 24時間毎にしかデータが無くとも6時間毎の境界値を生成し, 十分な精度を確保できることを示した. この手法を用いれば, モデルの不確実性を評価するためにデータ保管形式の異なる複数の GCM へ複数の RCM をネスティングするマルチ GCM × マルチ RCM 実験を容易に行うことが可能になる.

5. 力学的ダウンスケーリングの適用例

ここでは, 力学的ダウンスケーリングの適用例として, ①気象と気候の関係, ②降水の高度依存性, ③メソスケール気象の気候学等を示そう. まず, 年々変動は非常に小さなスケールで起こっていることが, 地上風月平均の年々変動の分布から示された. 例えば, カ

リフォルニアの例でもカタリーナ渦の様に地形に沿った細かい現象が見られる.

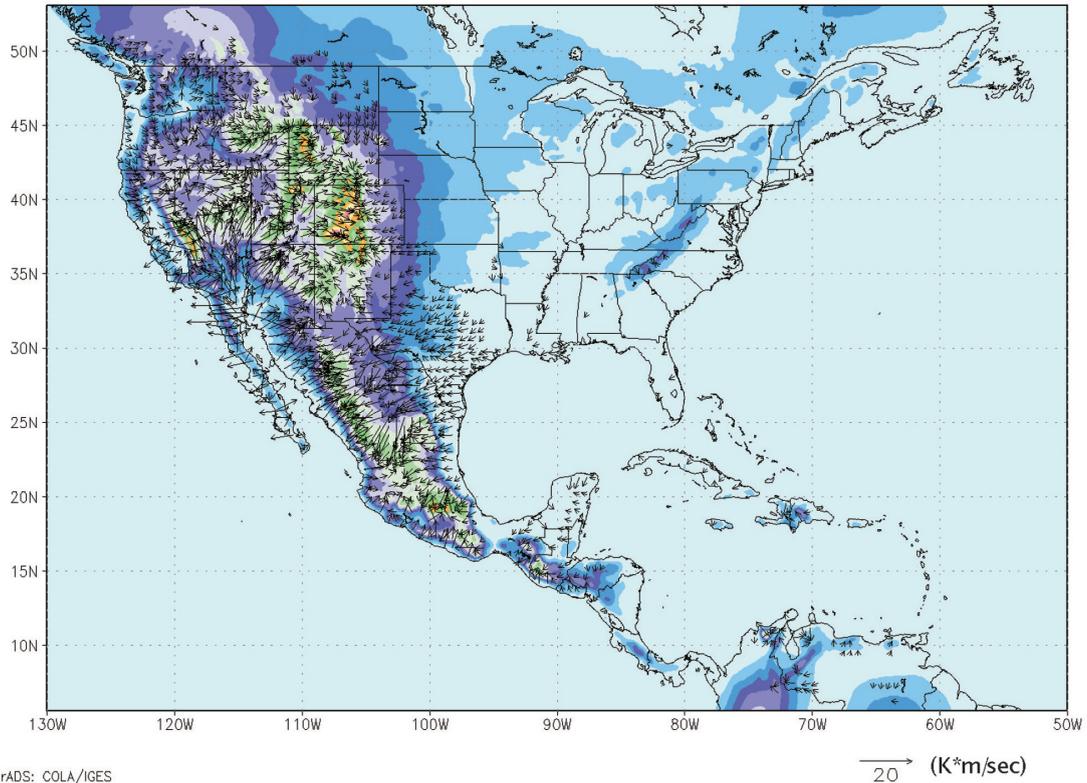
①気象と気候との関係: 日変化の影響: 日変化成分が正味で地上近くの地面に沿った面で運ぶ熱の量を計算すると, カリフォルニアの例ではそれだけで1日当たり $100\text{J}/\text{m}^2$ にも及ぶ熱量が運ばれる (他のものに相殺されるが, 地表面に沿って地上付近を1日で運ばれる熱の総量に対する寄与としては10%). 第5図は日変化による正味の月平均熱輸送の向きと大きさを矢印で描いたものだが, ロッキー山脈など, 山岳の効果が日変化を通じて (山風・谷風として) 熱を運ぶ上で大きな役割を果たしていることがわかる. こういったことは, ダウンスケーリングを通してわかるようになったことである.

②降水の高度依存性: 降水の高度に対する依存性は良く知られている. 第6図は RCM (CaRD10), 観測 (PRISM), それに領域再解析データ (NARR) の降水の高度依存性を描いたものである. CaRD10で計算される降水の高度依存性は PRISM のものと良く似ており, 高い再現性を示している. この依存の度合いが何によるのかはまだ良く知られていない. 恐らく山岳の傾斜に沿った風の成分と, 水蒸気量の分布によるのであろう. ダウンスケーリングされた大気解析データやモデル出力が, 降水の高度依存性をもたらすメカニズムの解明に有用となり得ることが, 第6図の結果によって示唆される. このカリフォルニアのケースでは, 降水の高度依存性が地域によって異なることが示されており, 上記の要因以外のプロセスが関与する可能性も示唆される.

③Santa Ana の例: Santa Ana とは, 冬季を中心に南カリフォルニアで渓谷沿いに海岸に向かい吹く乾燥した強風のことであり, シェラネバダ山脈の風上側にある大盆地 (Great Basin) にたまった寒気が峠を越えて流れ出てくるもので, 断熱昇温により加熱されるためしばしば高温になる. 第7図は, 51年間の力学的ダウンスケーリングに基づく地上10m風の12月平均場を, Santa Ana の効果を入れた場合と入れない場合とで比較したものである. Santa Ana の頻度は18%程度であるが, それを取り除くと明らかに平均場が異なる. 出現頻度として20%に満たない現象であっても, 平均場に大きな影響を与えている. 第8図に示されるように, Santa Ana は水平熱フラックスの気候値に40%もの差をもたらすことが示された.

以上の結果は, 様々な時空間スケールを持つ大気現

August Mean surface horizontal transport of potential temperature (from 10year US 10)



第5図 日変化が月平均場に及ぼす影響の例（8月）. 矢線は日変動成分による水平熱フラックス (Km/s) (全米10kmによるダウンスケーリング. この計算は地球シミュレータを使って行った). 背景の色は500m毎の地形の標高に対応する.

象の集合体として地域的な気候が形成されていることを示唆している. また, 気候の偏差値がその符号の正負について対称的になっていないことにも注目する必要がある. このことは, 例えば経験直交関数や相関解析などを使った結果の解釈にも注意を喚起するものである.

6. これからの問題

6.1 高解像度の領域データ同化とダウンスケーリングとの関係

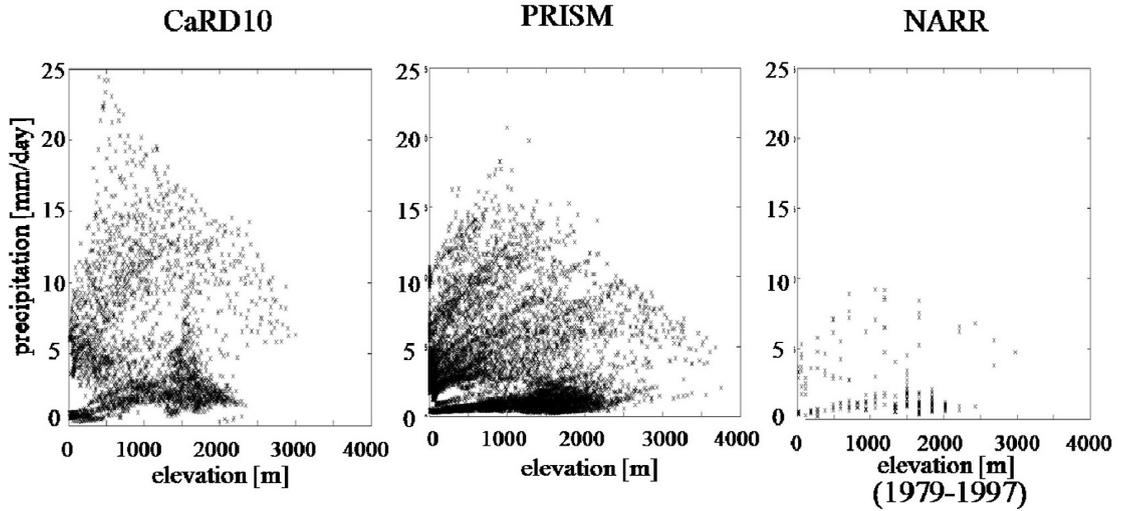
Kanamaru and Kanamitsu (2007b) は, 格子間隔32kmの北米領域再解析 (NARR) と格子間隔10kmのRCMによるダウンスケーリングの結果とを比較した. 彼らの結果によると, 10kmダウンスケーリングの方がNARRより, 特に地上風に関しては, 観測と良い一致を示していることがわかった. このことは,

例えデータ同化を行っても, モデルの空間分解能が十分でなければ, 解析の精度も充分上がらないことを示している. これは又, 解像度の高いモデルを使ったデータ同化では, いまだ地上付近の高密度の観測を有効に使い切っておらず, モデルによる推定値の方がデータを使った解析より, より正確であることを示唆しており, 現在のデータ同化の技術の限界を示しているとも言える. ヨーロッパ中期予報センターは, このことをいち早く理解し, 地上付近の解析にはデータ同化とは独立した, より原始的なクレスマンの方法を用いた解析を行っているが, これが最上の方法かは定かでない.

6.2 モデルの結果の検証の問題

RCMとその側面境界条件にデータを提供したGCM, または, 他のRCMとの間で結果の比較を行う場合に問題になるのは, 検証の対象となる現象の空

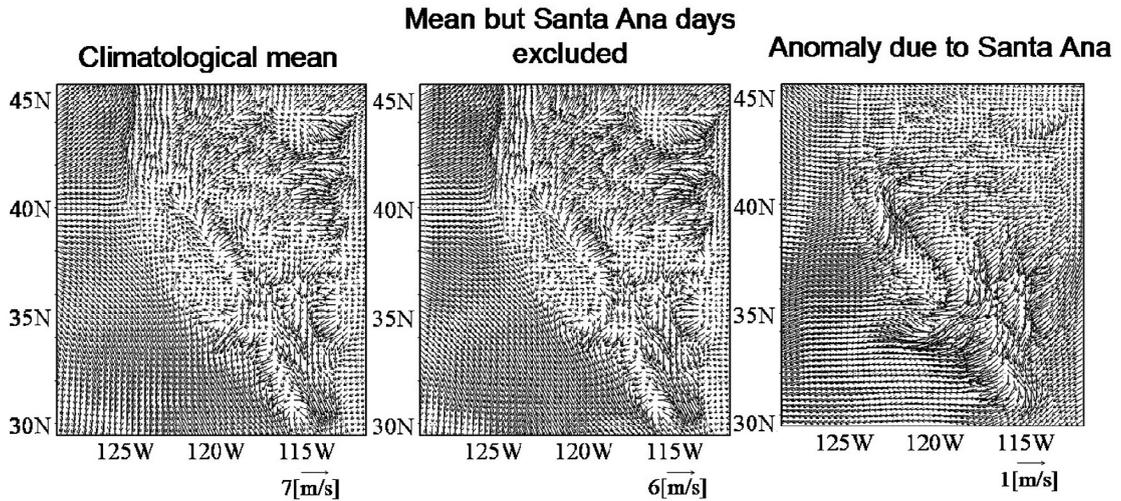
Comparison of Altitude vs. Precipitation scatter diagram



1950-1997 January SW facing slope

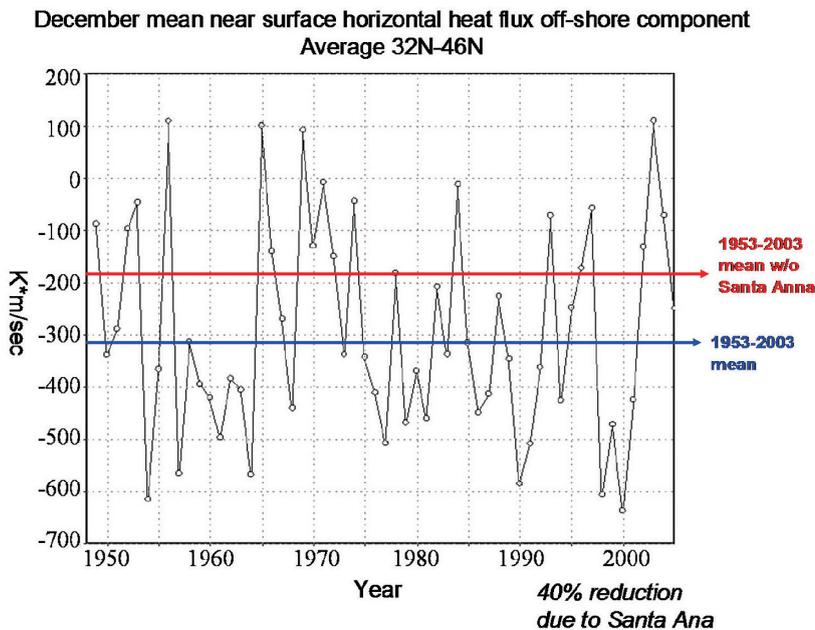
第6図 降水の高度依存性の例. 横軸は標高で、縦軸が降水量. 左から、カリフォルニア域の10km ダウンスケーリング (CaRD10), ゲージデータ起源の観測値 (PRISM), 北米領域再解析データ (NARR). CaRD10と PRISM はよく似ている (縦軸は日降水量, 数字は5mm/day 毎に0mm から25mm まで; 横軸は標高で500m 毎に0m から4000m まで).

December mean 10-meter winds (1953-2003)



291 Santa Ana Days out of 1581 December days (18%).

第7図 サンタアナの長期平均における寄与 (50年間平均の12月の10m 風速). 左から気候平均. Santa Ana 時を除いた気候平均. Santa Ana 時のみの平均. スケーリングの矢印 (各図の右下に表示) の大きさは, (左) 7ms^{-1} ; (中) 6ms^{-1} ; (右) 1ms^{-1} .



第8図 サンタアナによる陸から海への熱輸送 (K*/m/sec) の気候値への寄与。青い線が気候平均で、赤い線がサンタアナを除いた平均値（負値は、陸から海へ熱が輸送されていることを示している）。

間スケールである。高解像度のモデルの結果は高解像度の観測、低解像度のモデルは低解像度の観測データを使って検証すべきであるが、この両者を比較する際に、単に双方のモデルに共通の領域で精度の平均をとって比較するのは適当ではない。高解像度のモデルは局所的に精度の善し悪しのばらつきが大きいので、単純な空間平均量での比較は、利用者にとってあまり有用なものとは言えないからである。言い換えると、低解像度の全球モデルは、さほど高くはないものの、ある程度の精度をかなり広域で示す傾向があるのに対し、RCMは比較的狭い領域で高い精度を示す傾向にあるため、両者の精度を単に空間平均量で比較するのは適当ではないのである。ここで考えられる1つの方法は、精度がある閾値を超えるような領域の総面積で比較することである。同様の目的を持った手法として、アノマリーネスティングの手法が、Misra and Kanamitsu (2004) により提案されている。

このような指標を使うと、RCMを使うときには、常に過去の精度の空間分布を使ってダウンスケーリングの精度を推定することが必要なので、このように「精度の高い領域の総面積をモデルの再現性の指標」

として精度の評価に使うのは1つの考え方と思う。

6.3 ダウンスケーリングの将来

ここまで述べてきたのは、大気モデル単独によるダウンスケーリングであった。今後は影響評価研究への応用を考えて、①海洋や海水のモデル、波浪モデル、より洗練された水文モデルないし森林火災モデル等と大気モデルを結合させたシステムモデルのダウンスケーリング、②微量気体成分やエアロゾルを含むダウンスケーリング、③光化学物質や汚染物質の問題への適用、等が考えられるようになるだろう。

7. ダウンスケーリングに関連したその他の話題

本節では、当日の講演では触れられなかった話題について補足する。

7.1 疑似温暖化ダウンスケーリング実験

RCMによる将来気候予測の際の問題点として、その精度が親モデルであるAOGCMの予測精度に依存してしまうということが初期の研究 (Giorgi and Bates 1989) から言われ続けている。AOGCMの予測精度が十分に出ていないところでダウンスケーリングを行う方法として、疑似温暖化ダウンスケーリング (PGW-DS) 手法が提案されている (Sato *et al.* 2007)。この手法は、RCMへのダウンスケーリングの側面境界条件として、現在気候の再現実験では6時間間隔の大気再解析データを用いる一方、気候の将来予測実験においては同じ再解析データを用いつつも、その月平均値にAOGCMによる将来予測値と再現実験との差を足し込んでおくことで、平均状態の変化をRCMに与えようとするものである。こうすることで、現況再現性の低いモデルでも将来の詳細な気候変動を議論できるようになる。また、年々変動が温暖化のシグナルよりも大きい場合、通常のダウンスケーリ

ングでは温暖化の影響を取り出すために長期間の実験を繰り返す必要があるが、疑似温暖化ダウンスケーリング実験ならば特定年を比較すればよいなど、計算資源を節約できる。ただし、良いことばかりではなく、この手法では年々変動の長期トレンドは部分的にしか入らないし、1月より短い時間スケールの現象、例えば、低気圧の数・強さ・経路についての変動は議論できない。

Sato *et al.* (2007) はこの手法をモンゴルに適用した。モンゴルは最南部が乾燥域（ゴビ砂漠）、最北部が比較的湿潤な草原域で、多くの地域がちょうど遷移地帯に当たっており気候予測が難しいところである。GCM はこういうところではしばしば大きなバイアスを有することを考慮して、RCM がそのバイアスに引きずられないようにこの手法を適用している。また、この手法を用いるとマルチ GCM の結果を取り込んだ計算が可能になる。この手法を用いて、Kawase *et al.* (2008, 2009) は梅雨（Meiyu）前線に伴う降水の再現・予測実験を行い、Hara *et al.* (2008) は冬季の降雪変動の研究を行っている。

7.2 複数の GCM と RCM を組み合わせた実験と予測不確実性

地域気候モデルの結果が、その側面境界条件を提供する GCM の予報精度に大きく引きずられるというのは RCM 研究者に共通の認識である。これを避ける 1 つの方法として、近年のプロジェクトでは複数の AOGCM に複数の RCM を組み合わせてネスティングすることにより、予測不確実性を抑えることが通常行われるようになってきている。欧州連合のプロジェクト ENSEMBLES では、6 種類の AOGCM と 14 種類もの RCM が参加して計算を行っている。また、北米を舞台に行われた NARCCAP でも 4 つの AOGCM と 6 つの RCM が参加して計算が行われた。土壌水分と大気の相互作用を調べた GLACE (Koster *et al.* 2006) でも明らかのように、このように近年は複数のモデルを用いて様々なアンサンブル実験を行うことによりモデルのもつ不確実性を抑えた上で差異を議論することが通常になってきている。

7.3 側面境界条件に関するコメント

スペクトル境界ナッジング手法が現れた頃の事情を振り返ってみると、RCM になじませようと考えている「大規模循環」が 2 つの要素を含むことがわかる。その 1 つは金光も指摘しているとおり、太平洋高気圧のような準停滞性の大きなスケールの場合である。もう

1 つは総観規模・メソ- α 規模の高・低気圧の位置の再現性である。後者の再現性に関わる要素の 1 つとして、ロスビー波の位相速度が外部の GCM と内部の RCM で異なるため（格子間隔などが異なるため）、また、擾乱の発達率も異なるため、RCM の領域を横切る擾乱の移動速度が領域内外で異なってしまうことが挙げられる。こうして、擾乱が RCM の領域から出ていく際のタイミングや強度が、AOGCM や全球再解析データの場合から大きくずれてしまう (Christensen *et al.* 1997)。こうした誤差を抑えるのがスペクトル境界ナッジング手法の目的なのである (Sasaki *et al.* 1995)。

7.4 統計的ダウンスケーリングについて

本講演では、RCM を用いた力学的ダウンスケーリングに焦点が絞られていた。本稿の冒頭で示されているように、ダウンスケーリング手法にはこのほかに観測データから統計的に求まる地域的な場と大規模場との関係を用いた統計的ダウンスケーリング手法がある。影響評価研究者は従来からモデルの出力から有効な情報を引き出すためにこの手法を縦横に用いている。統計的ダウンスケーリングについて、その長所・短所を第 1 表のようにまとめると、力学的ダウンスケーリングとは随分と異なったものとなる。それぞれの利点を活かしたダウンスケーリングが最も望まれるところではあるが、この辺りは現在、環境省地球環境研究総合推進費 S-5-3「温暖化影響評価のためのマルチモデルアンサンブルとダウンスケーリングの研究」でも取り組んでいるところである。

また、第 1 表においては、統計的ダウンスケーリングのデメリットとして「データがなければ出来ない」と書かれている。実際、統計的ダウンスケーリングの研究者は、「アメダスデータの解像度（およそ 17km）までなら力学的ダウンスケーリングに負けません。でもそれ以下となると自信がもてません」と口にする。ところが、RCM を用いた力学的ダウンスケーリングにおいてもモデルの計算結果の検証とモデルのチューニングは欠かせない処理であり、その際、やはり「観測データは必要」なのである。従って、これは統計的ダウンスケーリングのみのデメリットにはならず、ダウンスケーリング全体が抱えている問題点であると考える。

謝辞

本講演の実施並びに報告に当たっては、環境省の地

球環境研究総合推進費 (S-5-3) の支援を受けた。図版の軸の文字の拡大では推進費ポストドクターの石崎紀子さんにお世話になりました。ここに謝意を表します。

略語一覧

CaRD10 : California Reanalysis Downscaling at 10km
 CMIP3 : Phase 3 of Coupled Model Intercomparison Project 結合モデル国際比較プロジェクト, フェーズ3
 ENSEMBLES : 気候変動予測・季節予報とその影響評価研究に関するEUの国際研究プロジェクト (<http://ensembles-eu.metoffice.com/index.html>)
 GLACE : The global land-atmosphere coupling experiment
 IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change 気候変動に関する政府間パネル
 MIROC : 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気候システム研究系) (CCSR), 国立環境研究所 (NIES), 地球環境フロンティア研究センター (FRGC) が共同で開発している大気海洋結合大循環モデル
 NARCCAP : North American Regional Climate Change Assessment Program 北米地域気候変動アセスメントプログラム
 NARR : North American Regional Reanalysis (www.emc.ncep.noaa.gov/nmb/rreanl)
 PRISM : Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model (www.prism.oregonstate.edu/)

参考文献

Charney, J. G., 1949 : On a physical basis for numerical prediction of large-scale motions in the atmosphere. *J. Meteor.*, **6**, 371-385.
 Charney, J. G. and N. A. Phillips, 1953 : Numerical integration of the quasi-geostrophic equations for barotropic and simple baroclinic flows. *J. Atmos. Sci.*, **10**, 71-99.
 Christensen, J. H., B. Machenhauer, R. G. Jones, C. Schaer, P. M. Ruti, M. Castro and G. Visconti, 1997 : Validation of present-day regional climate simulations over Europe : LAM simulations with observed boundary conditions. *Clim. Dyn.*, **13**, 489-506.
 Davies, H. C., 1976 : A lateral boundary formulation for multi-level prediction models. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **102**, 405-418.
 Davies, H. C., 1983 : Limitations of some common lateral boundary schemes used in regional NWP models. *Mon. Wea. Rev.*, **111**, 1002-1012.

Engquist, B. and A. Majda, 1977 : Absorbing boundary conditions for the numerical simulation of waves. *Math. Comput.*, **31**, 629-651.
 Giorgi, F. and G. T. Bates, 1989 : The climatological skill of a regional model over complex terrain. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 2325-2347.
 Giorgi, F., M. R. Marinucci and G. Visconti, 1990 : Use of a limited-area model nested in a general circulation model for regional climate simulation over Europe. *J. Geophys. Res.*, **95**, 18413-18431.
 Hara, M., T. Yoshikane, H. Kawase and F. Kimura, 2008 : Estimation of the impact of global warming on snow depth in Japan by the pseudo-global-warming method. *Hydrol. Res. Lett.*, **2**, 61-64.
 Higgins, R. W., J. E. Janowiak and Y.-P. Yao, 1996 : A gridded hourly precipitation data base for the United States (1963-1993). NCEP/Climate Prediction Center Atlas 1, National Centers for Environmental Prediction, 46pp.
 IPCC, 2007 : Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., F. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tigonor and H.L. Miller eds., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996pp.
 Kanamaru, H. and M. Kanamitsu, 2007a : Scale-selective bias correction in a downscaling of global analysis using a regional model. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 334-350.
 Kanamaru, H. and M. Kanamitsu, 2007b : Fifty-seven-year California Reanalysis Downscaling at 10 km (CaRD10). Part II : Comparison with North American Regional Reanalysis. *J. Climate*, **20**, 5572-5592.
 Kanamaru, H. and M. Kanamitsu, 2008 : Dynamical downscaling of global analysis and simulation over the Northern Hemisphere. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 2796-2803.
 Kawase, H., T. Yoshikane, M. Hara, B. Ailikun, F. Kimura and T. Yasunari, 2008 : Downscaling of the climatic change in the Mei-yu rainband in East Asia by a pseudo climate simulation method. *SOLA*, **4**, 73-76.
 Kawase, H., T. Yoshikane, M. Hara, F. Kimura, T. Yasunari, B. Ailikun, H. Ueda and T. Inoue, 2009 : Intermodel variability of future changes in the Baiu rainband estimated by the pseudo global warming downscaling method. *J. Geophys. Res.*, **114**, D24110,

- doi : 10.1029/2009JD011803.
- Kida, H., T. Koide, H. Sasaki and M. Chiba, 1991 : A new approach for coupling a limited area model to a GCM for regional climate simulations. *J. Meteor. Soc. Japan*, **69**, 723-728.
- Koster, R. D. *et al.*, 2006 : GLACE : The global land-atmosphere coupling experiment. Part I : Overview. *J. Hydrometeorol.*, **7**, 590-610.
- Manabe, S., J. Smagorinsky, J. L. Holloway Jr. and H. M. Stone, 1970 : Simulated climatology of a general circulation model with a hydrologic cycle. *Mon. Wea. Rev.*, **98**, 175-212.
- Marbaix, P., H. Gallée, O. Brasseur and J.-P. van Ypersele, 2003 : Lateral boundary conditions in regional climate models : A detailed study of the relaxation procedure. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 461-479.
- McDonald, A., 2003 : Transparent boundary conditions for the shallow-water equations : Testing in a nested environment. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 698-705.
- Misra, V. and M. Kanamitsu, 2004 : Anomaly nesting : A methodology to downscale seasonal climate simulations from AGCMs. *J. Climate*, **17**, 3249-3262.
- Miyakoda, K., R. F. Strickler, C. J. Nappo, P. L. Baker and G. D. Hembree, 1971 : The effect of horizontal grid resolution in an atmospheric circulation model. *J. Atmos. Sci.*, **28**, 481-499.
- Okamura, Y., 1975 : Computational design of a limited-area prediction model. *J. Meteor. Soc. Japan*, **53**, 175-185.
- Phillips, N. A., 1956 : The general circulation of the atmosphere : A numerical experiment. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **82**, 123-164.
- Qian, J.-H., A. Seth and S. Zebiak, 2003 : Reinitialized versus continuous simulations for regional climate downscaling. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 2857-2874.
- Sasaki, H., H. Kida, T. Koide and M. Chiba, 1995 : The performance of long-term integrations of a limited area model with the spectral boundary coupling method. *J. Meteor. Soc. Japan*, **73**, 165-181.
- Sato, T., F. Kimura and A. Kitoh, 2007 : Projection of global warming onto regional precipitation over Mongolia using a regional climate model. *J. Hydrol.*, **333**, 144-154.
- Schaefer, J. T., 1990 : The critical success index as an indicator of warning skill. *Wea. Forecasting*, **5**, 570-575.
- Von Storch, H., H. Langenberg and F. Feser, 2000 : A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 3664-3673.
- Waldron, K. M., J. Paegle and J. D. Horel, 1996 : Sensitivity of a spectrally filtered and nudged limited-area model to outer model options. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 529-547.
- Yoshimura, K. and M. Kanamitsu, 2009 : Specification of external forcing for regional model integrations. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 1409-1421.

Review of Dynamical Downscaling

Izuru TAKAYABU* and Masao KANAMITSU**

* *Meteorological Research Institute, 1-1 Nagamine, Tsukuba-city, Ibaraki 305-0052 Japan.*

** *Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego.*

(Received 3 May 2009 ; Accepted 1 May 2010)
