

## 2. 地域気候モデルによる温暖化予測

高 藪 出\*

### 1. はじめに

温暖化は地球規模のスケールで生じるので当然、その予測はグローバルモデルの対象である。ところがグローバルモデルでは水平解像度に限界があり、現状では「アジア域」といった広域の情報しか得る事が出来ない。ところで、具体的な温暖化対策を講じようとする、ハード対策等については自治体レベルの行政対応が中核となり、特に地域特性をふまえた検討が求められる。しかし自治体レベルでの影響評価となると、グローバルモデルの予測結果では分解能の点からまだ無理がある。ここで両者のスケールギャップを埋めるのがダウンスケーリング研究である。ここではその一手法として地域気候モデル (RCM) を使ったダイナミックダウンスケーリングについて紹介したい。

### 2. 地域気候モデルの開発

ダイナミックダウンスケーリングとは領域モデルをグローバルモデルにネスティングして長時間走らせる手法である。ネスティングは日々の天気予報でも利用されているが、これを温暖化予測に用いようすると長期積分と言うことから独特の問題が発生する。すなわち、

- (1) 短期予報の際には48時間程度しか予報しないため、陸面状態や海面水温は初期値固定で計算することが多い。放射コードも簡単に済ますことがある。これに対し RCM として使用する際には、陸面状態は予報してゆく必要があり、海面水温 (SST) も値を更新して行かねばならない。また、放射の取扱もドリフト (領域全体の気温などが一方向に変化してしまう現象) をおさえるために精密にしていく必要がある。このような作業は主にグローバル気候モデルの手法の移植となるが、その際解像度の差から

生じる種々の問題が発生する。

- (2) これも長期積分により生じる特有の問題であるが、側面境界の読み込み方法が温暖化研究に用いようとする際に大事な課題となる。一般にネスティングには、10格子程度の遷移域を周辺に設けこの間で予報変数を外部の粗い情報になじませるナッジング手法が用いられる。この手法のポイントは境界で不要な波の反射を防ぐと言うことである (Davies 1983)。ところが、この手法では地域気候モデルの場合、外側境界のグローバルモデルとの間の情報交換が側面境界でしか行われないうために特に一般風の弱まる夏季に太平洋高気圧の表現などで両者の齟齬が大きくなる傾向がある。このような問題を解決するために、Kida *et al.* (1991) はスペクトル結合法 (SBC) を導入した。これは波数の小さい大きなスケールのシグナルを全て外部のモデルの値で取り換えてしまう方法である。こうすることによって大規模場の位相をそろえることが可能になる。この手法はデータ同化の考え方と類似であり、現在欧米でも連続データ同化の応用として一般化しつつある (Kanamaru and Kanamitsu 2007等)。

### 3. 地域気候モデルによる予測の現状

以上により、ネスティングされた RCM による地域レベルの温暖化の影響評価という課題が可能となった。その実態を東北地方の気候に大きな影響を及ぼしているヤマセを例に見てみたい。ここでは気象研で開発された RCM20 (Sasaki *et al.* 2000) という20km格子の静力学モデルで行った例を示す。ヤマセは、(1) 大規模な場の中で非常にローカルな気象現象として生じるものであること、またその予測は(2) 米の収量等とから行政的にも非常に重要な情報であることを注意しておきたい。

ヤマセは「晩春から夏にかけて東北地方の太平洋岸を中心に吹く、低温の東よりの風あるいはそれに伴う

\* 気象研究所。

© 2010 日本気象学会

一連の現象」(新野 1998)である。この低温の、すなわちしばしば北成分をもつ東風が惹起される大規模場は、正の南北気圧勾配が導かれるようなもの、すなわち、南に梅雨前線あるいは北にオホーツク海高気圧の配置である。この時期、三陸沖の海面水温は低いため、もしも海からの風が上陸すれば気温の降下は著しいものとなる。ただし、寒気の層は通常1000m内外と薄く、東北の脊梁山脈であってもせき止められてしまう程度のものである。このようなローカルな現象の表現能力がRCMにあるかどうかをまずチェックのポイントである。

### 3.1 再現性のチェック

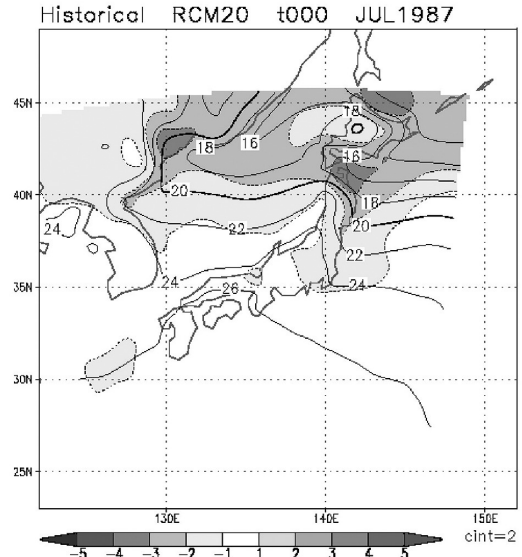
今回の実験で側面境界条件をもらう親モデルとして用いた気象研のMRI-CGCM2.2 (Yukimoto *et al.* 2001) の予測では、6-7月にかけて梅雨前線の日本南岸での停滞、それに伴う東風成分の強化が表現されていた(内山ほか 2003)。

第1図はこの現在再現データをネस्टィングしたRCM20 (20km 格子) 地域気候モデルのとある1年の7月の1000hPa 平均気温である。1000m 程度の脊梁山脈の東側と西側で下層気温のコントラストが付いていることが分かるであろう。20km 格子のRCMでヤマセは再現されていると考える。

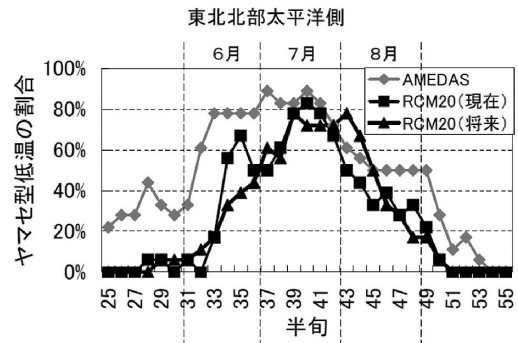
ヤマセの場合、その持続性が問題となる。この点についても見てみたい。第2図は、モデルで再現されたヤマセ的な低温事象の総低温事象に対する比率(■)の季節変化を示している。この結果を見ると6-7月期にヤマセ型が高比率で出現しており、これは観測(◇:アメダス)に見られる遷移とも良い対応を示している。

この図は遠藤ほか(2007)によるものである。遠藤等はヤマセによる著しい低温が東北地方太平洋側に限られる事を利用して、東北北部太平洋側と東北北部日本海側の地上気温差に着目し温度差の大きな「ヤマセ型低温」とそうではない「上層寒気型低温」の2種類に客観的に分離し解析した。なおこの解析では東北太平洋側での低温事例を下位30%拾い出しており、以下は全てその中での議論である。この低温事例は相対的なものであり、現在気候と将来気候で閾値の絶対値が異なっていることには注意していただきたい。

以上の事は、この地域気候モデルによるダイナミックダウンスケールはヤマセというローカルな気候の再現ポテンシャルをもっているということを示している。



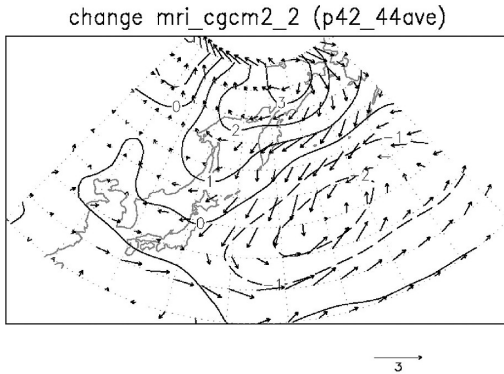
第1図 RCM20による、現在再現実験のとある7月の1000hPaの気温(°C)。図中1987とあるのはモデルのカウントであり現実とは何の関係もないことに注意(遠藤2008a)。



第2図 ヤマセ型低温の生起率。◇:アメダス, ■:RCM20による現在(1981~2000年)再現実験, ▲:RCM20による将来(2081年~2100年)予測実験。(遠藤ほか2007)

### 3.2 将来予測

次に、このモデルを用いて将来(SRES-A2シナリオの100年後)の気候のダウンスケールを行った結果を示す。まず、グローバルモデルで予測された大規模場は、内山ほか(2003)によるとMRI-CGCM2.2では将来梅雨明けが遅れることが示されている。



第3図 第42半句から第44半句の期間のMRI-CGCM2.2の将来変化(2081~2100年と1981~2000年の差)。ベクトルが10m風速(m/s)で等値線は海面気圧(hPa)(遠藤2008b)。

第3図(遠藤2008b)に示すように、100年後(2081~2100年)と現在(1981~2000年)の差分をとると8月上旬にヤマセをもたらすような東風成分が強化されていることが示されている。これを側面境界に用いた領域モデルの結果を見たい。この場合、ヤマセの発現時期は8月にまでずれ込むか否かが注目される。再現性のチェックの時と同様の定義を用いてヤマセ的な低温事象の比率(▲)を現在再現実験(■)と比較してみると(第2図)、確かにヤマセのシーズンが8月上旬にまで伸びていることが示される。この将来予測の結果は仙台管区気象台が気象研究所との地方共同研究として取りまとめ(気象研究所技術報告第52号, 2008)、東北各県の地方気象台と東北各県別にパンフレットを作成し一般の方々に配布・報告している。

#### 4. 地域気候モデルによるダウンスケーリングの特性

ネスティングによるRCMは当然、①地形の関係するローカルな気象現象で再現性の向上が大きく、②側面境界条件のグローバルモデルに大きく依存する。前節の結果を眺めると、ヤマセでは冷気層は高々1000mと言われており、その振る舞いを正しく出すには脊梁山脈が表現できる程度のモデル解像度は必須である。第1図に20km格子RCMによる月平均場を描いたが、太平洋側にトラップされた冷気層がきれいに見える。この冷気層のたまりは、T42のMRI-

CGCM2.2ではもちろん再現不可能であった。

また、側面境界のグローバルモデルの再現性に、モデル計算の結果がよってしまう以上、MRI-CGCM2.2がもしも梅雨を的確に表現していなかったら、このヤマセの再現実験もうまく行かなかったであろう。今回の例では大規模場がそれなりに予測されていたが極東域は梅雨前線・台風など、特に雨がからんでくると欧米等の高緯度地域と比較グローバルモデルでのその予測が大変難しい地域とされている。現時点ではまだ残念ながら定量的な予測を一般的に出来る段階には来ていない。

#### 5. 信頼性評価

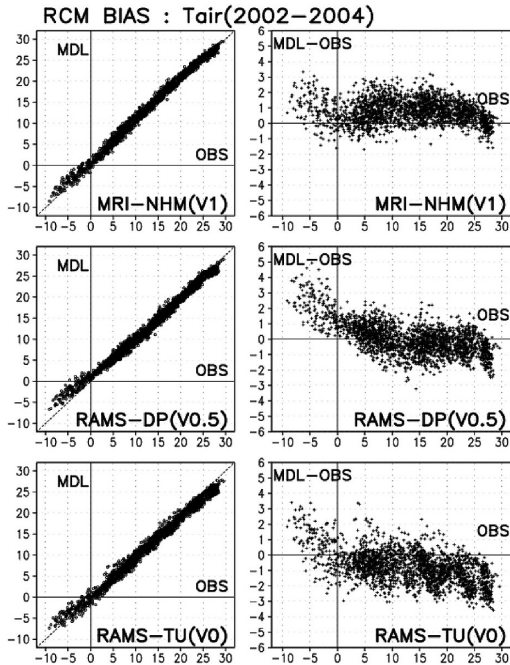
「定量的な情報」を出すために、モデルの側に求められるのはまず「精度」である。そのためにはモデルの各過程の精度向上が重要な研究となる。ところがこれは一朝一夕にいかない。しかし精度が十分にとれない場合でも、信頼性(エラーバー)の評価があれば例えばリスク評価の分野で有効な情報となり得る。

モデルによる信頼性には様々な条件が絡んでいることが、従来の研究から明らかになっている。EUで行われたPRUDENCEというプロジェクトでは、Ferro(2004)が地域気候モデルの信頼度を、

- ①気候シナリオの信頼度(S)
- ②RCMを埋め込んでいるGCMの信頼度(G)
- ③RCMの予測の信頼度(R)

の3つに分離して議論している。これらの内で最も寄与が大きいのはSであるが、地域気候モデル単独で評価できるのはRのみである。

国内で、グローバルモデルによる気候予測結果と詳細化しつつある影響評価研究を繋ぐ事を目指したそのようなプロジェクトの一つとして環境省推進費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」がある。第4図はこのプロジェクトで計算された、都道府県別に見た地上気温の月平均値の複数の20km格子非静力学RCMでの再現性の一例である(ここでは共通の再解析データを側面境界に積分を実施している)。この図に現れている程度のモデル間誤差の広がりがある現在の所RCMのもつ信頼度を表していると考えられる。Ferro(2004)によると幸いにもS、G、Rのクロス項は相対的に小さいようである。Sは社会科学者の面々の考察が基になるため気象学者が入り込む余地は少ないと考えられるが、Gについての考察は可能である。現在世界で動



第4図 左側：モデル計算値（縦軸）とアメダス観測値（横軸）の3つの地域気候モデル（上から気象研 NHRCM\_V1, 防災科研 RAMS V0.5, 筑波大 RAMS V0）の地上気温（ $^{\circ}\text{C}$ ）の比較。右側は縦軸がモデル値－アメダス値。JRA-25再解析データを側面境界に2002-2004年について実施した結果の都道府県別・支庁別の月平均値。田中ほか（2008）のシステムにより計算した（環境省推進費 S-5-3より）。

いているダイナミックダウンスケールを含む国際プロジェクト（EU：ENSEMBLES, 北米：NARC-CAP）ではマルチ GCM×マルチ RCM 実験が行われ、GとRの相対的な寄与が見積もられはじめている。

## 6. まとめ

以上、地域気候モデルを用いた温暖化将来予測結果のダウンスケールの可能性とその限界について簡単にレビューした。モデルの精度は研究者の不断の努力により向上しているが、まだなかなか定量的評価にまで進められていない。しかしそうした中で地域気候モデルの研究者は有用な情報を出すよう努力している。

また、本講演では、地域気候モデルを用いたダイナミックダウンスケールに焦点が絞られているが、

ダウンスケール手法にはこのほかに統計的手法を取るスタティスティカルダウンスケール手法がある。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。こちらの立場から見ると、ダウンスケールの全体像はまた異なったものになる。それぞれの利点を活かしたダウンスケールが最も望まれるところであり、しかも大変面白い話題であるが、ここでは紙数も足りないので地域気候モデルによるダイナミックダウンスケールに絞った話題にさせていただいた。

## 謝辞

本報告の作成に当たり、気象研の遠藤洋和氏には地域気候モデルを用いたヤマセ研究についていろいろと教えていただいた。また、本報告の一部には環境省の地球環境総合推進費（S-5-3）の成果を使わせていただいている。関係諸氏にこの場を借りて感謝いたします。

## 参考文献

- Davies, H. C., 1983: Limitations of some common lateral boundary schemes used in regional NWP models. *Mon. Wea. Rev.*, 111, 1002-1012.
- 遠藤洋和, 2008a: ヤマセ. 気象研究所技術報告, (52), 27-48.
- 遠藤洋和, 2008b: ヤマセに関連した大規模循環場の将来変化について. 日本気象学会2008年度春季大会予稿集, P330.
- 遠藤洋和, 蒔 苗仁, 森 浩俊, 倉橋 永, 栗原和夫, 2007: 20km 格子地域気候モデルによるヤマセ型低温の再現性と将来予測. 東北支部創立50周年記念文集, 53-58.
- Ferro, C. A. T., 2004: Attributing variation in a regional climate change modelling experiment. PRUDENCE working note, 21pp.
- Kanamaru, H. and M. Kanamitsu, 2007: Scale-selective bias correction in a downscaling of global analysis using a regional model. *Mon. Wea. Rev.*, 135, 334-350.
- 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.
- 新野 宏, 1998: ヤマセ. 気象科学事典, 日本気象学会編, 東京書籍, 510.
- Sasaki, H., Y. Sato, K. Adachi and H. Kida, 2000: Performance and evaluation of the MRI regional

- climate model with the spectral boundary coupling method. *J. Meteor. Soc. Japan*, **78**, 477-489.
- 田中賢治, 萩澤佑樹, 小尻利治, 2008: RCM出力の頻度分布を考慮したバイアス補正. 水文・水資源学会2008年大会要旨集, 43.
- 内山貴雄, 鬼頭昭雄, 野田 彰, 2003: 地球温暖化時の梅雨の変化について. 日本気象学会2003年度秋季大会予稿集, B161.
- Yukimoto, S., A. Noda, A. Kitoh, M. Sugi, Y. Kitamura, M. Hosaka, K. Shibata, S. Maeda and T. Uchiyama, 2001: The new Meteorological Research Institute coupled GCM (MRI-CGCM2) -Model climate and variability-. *Pap. Meteor. Geophys.*, **51**, 47-88.
- ENSEMBLES  
<http://ensembles-eu.metoffice.com/index.html>
- NARCCAP  
<http://narccap.ucar.edu/>
- PRUDENCE  
<http://prudence.dmi.dk/>
-