

温暖化による日本付近の詳細な気候変化予測

○行本誠史(気候研究部)、栗原和夫(環境・応用気象研究部)

1. はじめに

わが国における地球温暖化対策を推進するため、水資源、河川管理、治山・治水、防災、農業、水産業や、保健・衛生などの、特に気候の変化に敏感で脆弱な分野に対する対策に資する、今まで以上にきめ細かな情報が求められている。このため、日本付近の地域気候変化予測を総合的に行うことが出来る数値モデルを開発する必要がある。

そこで、気象研究所ではエアロゾル、オゾン、炭素などの各種物質循環を大気海洋結合気候モデルに取り込んだ「温暖化予測地球システムモデル」を開発し、各種効果を考慮した高精度の全球的な気候変化予測を行う。その後、これらの情報を利用してわが国特有の局地的な現象を表現可能な分解能を持った精緻なモデル(雲解像地域気候モデル)を開発して地域気候予測の不確実性を低減し、上記の各種施策の検討に必要な空間的にきめ細かな予測を行うことを目的とする。

2. 温暖化予測地球システムモデルの開発

2. 1. MRI-CGCM3の開発

地球システムモデルの中でも、気候場の再現性を左右する重要なコンポーネントが大気大循環モデル(AGCM)と、海洋大循環モデル(OGCM)を結合した気候モデル(CGCM)である。この研究では、精緻な物理過程にもとづく高精度な再現性を目指した新しい気候モデルMRI-CGCM3を開発した。

a. 大気大循環モデル(AGCM)

AGCMの開発では、気象庁/気象研究所統一全球大気モデル(GSMUV)を基礎として様々な開発・改良を行った。力学過程には、気候モデルを高速に長期間積分を可能にする、保存性の良いセミラグランジュ法を用いている。また、積雲対流

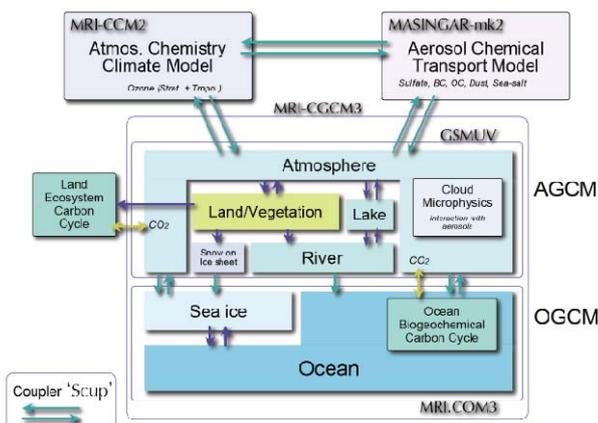
過程のパラメタリゼーションに、これまでのArakawa-Schubert型に加えて、様々な高さの積雲と環境場との相互作用を精緻に扱う新しい積雲対流パラメタリゼーションを開発・導入した。また、エアロゾルの間接効果を精緻に表現するため、雲過程に雲粒・氷晶の混合比と数密度を陽に扱う2モーメント雲スキームを開発・導入した。これにより、エアロゾルモデルから得られる各種エアロゾルの濃度が雲粒・氷晶の数濃度(有効半径)に影響する第1種間接効果、および雲粒・氷晶の降水への変換に影響する第2種間接効果を(経験的でなく)物理的に表現することが可能となった。また、積雪や土壌を任意の層数に設定でき、格子内の不均一な状態を表現可能とする新しい陸面モデル(HAL)を開発・導入した。その他、放射過程には高精度な晴天放射スキームを使用、大気境界層の乱流過程にLES¹⁾の結果をもとにした改良型Mellor-Yamadaスキーム(MYNN)の導入、日周期以下の短時間で変化するスキン海面水温の効果の導入など多くの改良を行った。

b. 海洋大循環モデル(OGCM)

OGCMは、新しい気象研究所共用海洋モデルMRI.COM3を採用した。このモデルは一般直交曲線座標系が使用可能となっているため、MRI-CGCM3においては、北極点が特異点となることが避けられるよう、ユーラシア、北米および南極の各大陸に極を持つ3極座標格子を採用した。温暖化予測をする気候モデルにとって非常に重要性を持つ海水の表現の向上のため、新しく精緻な海水モデルを導入した。この海水モデルは、熱力学的過程のほか、海水の内部応力なども考慮した力学過程、格子内での不均一な厚さの海水分布を厚さカテゴリーにより表現し、海水の衝突による乗り上げの効果なども表現できるものである。海水面における各種フラックスはAGCM側でカテゴリー毎に計算される。

c. カップラー(SCUP)

MRI-OGCM3では、AGCMとOGCMは気象研究所で開発したカップラーSCUP(Yoshimura and Yukimoto, 2008)で結合され、海面および海水面における熱・淡水フラックス、風応力など各種物理量が交換される。SCUPでは、それぞれ並列化されたAGCMとOGCMで必要な部分だけのデータ通信が行われ、またAGCMとOGCMを並列に実行が可能となっている。このため、多数ノードのコンピュータで効率的な計算が可能となってい



第1図: 地球システムモデルMRI-ESM1の構成

¹ Large Eddy Simulation の略

る。

2. 2. MRI-ESM1の開発

気候モデルMRI-CGCM3を中核として、エアロゾルモデル(MASINGAR-mk2)、オゾンモデル(MRI-CCM2)を結合、陸域生態系炭素循環過程および海洋生物地球化学過程を組み込むことにより地球システムモデルMRI-ESM1(Yukimoto et al. 2010)を開発した(第1図)。これにより、エアロゾルの間接効果の精緻なモデル化などによる温暖化予測の高精度化、気候変化と炭素循環や物質輸送の変化の相互作用の表現が可能となり、温室効果気体の排出シナリオから直接温暖化予測を行うことが可能になる。各コンポーネントモデル間の結合にSCUPを用いることにより、開発の効率化と柔軟な実験設定(たとえばコンポーネントモデル単体での実験や異なる解像度の組み合わせ)が可能である。以下では各コンポーネントモデルおよび炭素循環過程についての概要を述べる。

a. エアロゾルモデル(MASINGAR-mk2)

MASINGAR-mk2では、硫酸エアロゾル、黒色炭素(煤)、有機炭素、鉱物ダスト、および海塩の5種類のエアロゾルの生成・反応、輸送、乾性・湿性沈着などを扱う。鉱物ダスト、および海塩については粒径によっていくつかに区分して扱っている。モデルは観測されるエアロゾルの光学的厚さの分布をかなりよく再現できることが示された。

b. オゾンモデル(MRI-CCM2)

MRI-CCM2では、成層圏オゾンに加え、対流圏オゾンも扱うように化学種および反応式が拡張された。モデルで再現されたオゾン全量の南北分布は観測とよく一致し、またオゾンホールも現実的に再現されている。また窒素酸化物(NO_x)等の地表からの汚染物質から光化学反応によって生じる光化学オキシダントなども表現される。さらに、MRI-ESM1においては、SCUPを通じてエアロゾルモデルと結合することにより、ピナツボ火山など大規模な火山噴火による成層圏エアロゾルのオゾンへの影響も表現が可能となっている。

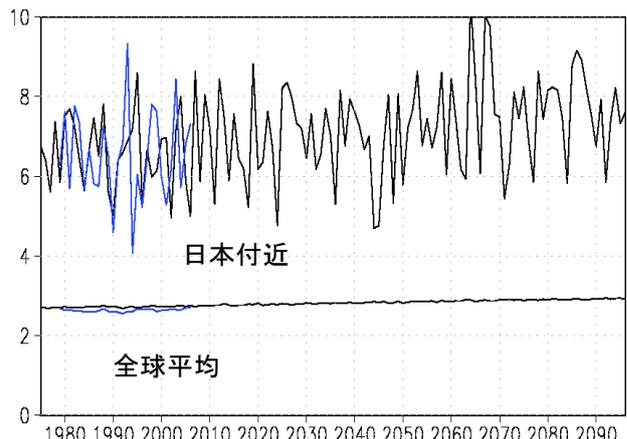
c. 炭素循環

陸域の炭素循環過程について、MRI-ESM1においては、これまでの経験式によるものに変えて、植物の呼吸・光合成等を陽に取り扱う新しいスキームを導入した。また、これに伴い、気候変化に伴う植生の変化(動的植生)を扱うことが可能となる。海洋の炭素循環過程についても高度化が図られ、栄養塩、動物プランクトン、植物プランクトン、及びそれらの屍骸を陽に取り扱うスキームが導入された。これら陸域および海洋の炭素循環過程から得られる地表面でのCO₂フラックスおよび人間活動によるCO₂排出シナリオをもとに将来の大気中CO₂濃度が予測可能となった。

2. 3. 地球システムモデルによる気候変化予測

開発した地球システムモデルMRI-ESM1を用いて、1970年から21世紀末までの気候変化予測実験を行った。モデルの水平解像度は、AGCMが約110km、OGCMは1°×0.5°、エアロゾルモデルが約180km、オゾンモデルが約280kmである。ただし、ここでは予備の実験として大気中CO₂濃度を観測値およびIPCC-A1Bシナリオにリストアして行った。

実験の結果、モデルは全球的な気候を現実的に表現し、21世紀における全球平均気温の上昇が約3°Cと、IPCC第4次報告書で示された平均的な値を示した。さらに日本付近の気候についても、比較的良好な性能を示すことがわかった。日本付近(130E-142.5E, 30N-37.5N)領域平均した夏季(6-8月平均)降水量の経年変化を見ると、平均値、年々変動幅ともに観測とよく一致している(第2図)。ただし、モデルは8月に亜熱帯ジェットが十分北上せず、太平洋高気圧の日本付近への張り出しが弱いといった、地域気候モデルの境界条件として使用するにあたって改善すべき問題点もみられた。



第2図: 日本付近および全球の夏季(6-8月平均)領域平均降水量(単位: mm/day)の経年変化。モデル(黒線)及びGPCP観測(青線)。

3. 精緻な地域気候モデルによる日本の地域の温暖化予測

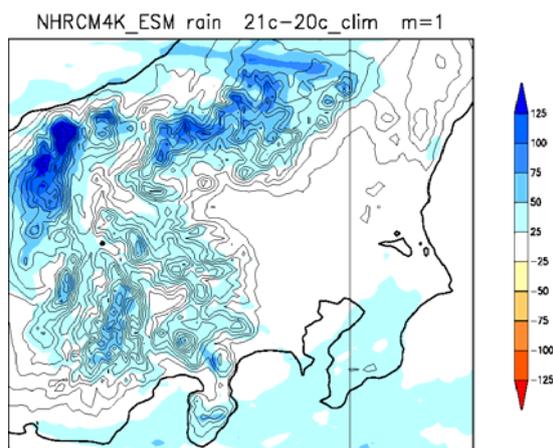
地球温暖化の対策などに予測結果を生かすには、強い降雨などの顕著な現象や詳細な地形効果を含んだ予測データが必要である。このために、解像度4kmの雲解像地域気候モデル(MRI-NHRCM)を開発し、地球システムモデルにネスティングして温暖化予測を試みた。

強い降雨などの顕著現象は、組織化された対流システムにより引き起こされることが多い。このような対流システムは水平スケールが小さく、発生・維持には対流内の構造が大きく影響するために、高解像度で、雲物理過程が組み込まれたNHRCMを、気象庁/気象研究所が開発した非静力学モデル

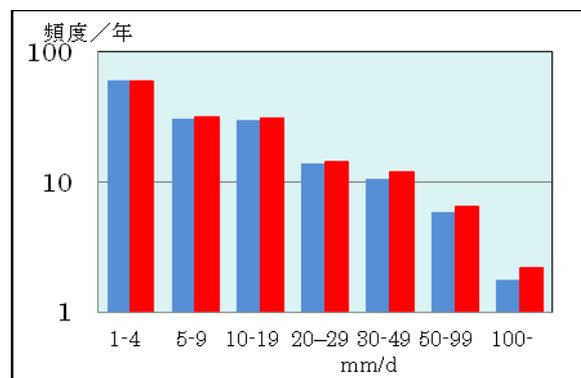
をベースに開発した。客観解析を境界条件とした完全境界実験では、NHRCMによる高い精度での気候再現性能が確認された。またその境界条件を与えるための大気海洋結合地域気候モデルの改良も行った。

関東甲信越地方を領域としたNHRCMを、地球システムモデルにネスティングして計算された約40年後の1月の月降水量変化予測を第3図に示す。1月には北西からの季節風が吹き、日本海側を中心に降水が多く、太平洋側では少雨になるが、温暖化による将来の降水量変化は、山岳の詳細な地形効果により、複雑な地域的な特徴を表す。その顕著な特徴は、標高の高い領域での増加と、特に日本海に近い、風上側の北アルプスや越後山脈での大きな増加である。それに対して、日本海側でも平野部や谷筋、甲府盆地などでは、関東地方などと比べても、増加率は大きくない。

第4図に年間における日降水量毎の現在と将来の頻度を示した。将来においては弱い降水量の頻度は減少する一方で、強い降水の頻度が増加する傾向が見られる。



第3図：NHRCMにより計算された約40年後の将来における1月の月降水量変化予測(単位: mm/月)。



第4図：NHRCMにより計算された関東甲信越地方の日降水量ごとの頻度分布(青・現在気候再現結果、赤・約40年後の予測結果)。

4. まとめ

各種物理過程などを高度化した気候モデルを開発した。これに最新のエーロゾルモデル及びオゾンモデルをカップラーSCUPで結合し、陸域および海洋の炭素循環過程を組込むことにより、地球システムモデルMRI-ESM1を開発した。MRI-ESM1を用いて1970年から21世紀末までの気候変化予測実験を行った。モデルは全球規模だけでなく、日本付近の降水分布など比較的よく再現できたが、地域気候モデルの境界条件とするには改善すべき点も見られた。

地球システムモデルの予測結果を境界条件にして、開発された地域気候モデルによるダウンスケーリングをすることにより、解像度の粗い地球システムモデルでは困難な、日本の地域的な温暖化予測を行った。その結果、モデルは与えられた大規模場の情報に従い、それに対応した顕著現象や詳細な地形効果などの再現が可能であることを明らかにすることができた。同時に全球モデルのバイアスをそのまま引き継いでしまうなど、いくつかの問題点も明らかになってきた。今後はさらにモデル等の改良を進めるとともに、日本全域の詳細な温暖化予測を目指して研究を進めていきたい。

参考文献

- (1) Yoshimura, H. and S. Yukimoto, 2008: Development of a Simple Coupler (Scup) for Earth System Modeling. *Pap. Meteor. Geophys.*, 59, 19-29.
- (2) Yukimoto, S., H. Yoshimura, M. Hosaka, T. Sakami, H. Tsujino, M. Hirabara, T. Y. Tanaka, M. Deushi, A. Obata, H. Nakano, Y. Adachi, E. Shindo, S. Yabu, and A. Kitoh, 2010: Meteorological Research Institute-Earth System Model v1 (MRI-ESM1) – Model Description –. *Technical Reports of the Meteorological Research Institute*, in press.

※本研究は、気候変動予測研究費「温暖化による日本付近の詳細な気候変化予測に関する研究(平成17年度～平成21年度)」として行われた。研究代表者：鬼頭昭雄、研究分担者：楠昌司、小畑淳、吉村純、遠藤洋和、尾瀬智昭、坂見智法、行本誠史、保坂征宏、石井正好、足立恭将、新藤永樹、(気候研究部)、吉村裕正(予報研究部)、柴田清孝、直江寛明、田中泰宙、出牛真、栗原和夫、佐々木秀孝、高藪 出、村崎万代(環境・応用気象研究部)、石崎廣、本井達夫、平原幹俊、辻野博之、中野英之(海洋研究部)、諸岡浩子、齋藤仁美、吉松和義、大野浩史(気象庁地球環境・海洋部気候情報課)