

# 長期的気候変動予測のための高精度気候モデルの開発研究

課題責任者

河宮 未知生 海洋研究開発機構 統合的気候変動予測研究分野

著者

河谷芳雄\*<sup>1</sup>, 齋藤冬樹\*<sup>1</sup>, 河宮未知生\*<sup>1</sup>

\*<sup>1</sup> 海洋研究開発機構 統合的気候変動予測研究分野

モデル上端及び鉛直解像度の異なる 4 種類の MIROC-AGCM モデル実験を行い、成層圏・中間圏が対流圏下層に与える影響について定量的に評価した。成層圏・中間圏が降水や地表面気圧にまで影響を与えることが判明した。

三次元氷床モデルの高度化のための高精度移流/輸送方程式を実装に向けた予備調査として一次元年代計算で試験運用を行い、年代計算が大きく改良されたことを確認した。

従来 MIROC で用いられている球面調和関数ライブラリの領域分割方法について改良開発を継続しているが、本年度はルジャンドル陪関数変換ルーチンを改良した。実装したルーチンはフーリエ変換と同様に高解像度あるいは層数が多い場合に有効であることがわかった。

**キーワード** : 対流圏-成層圏相互作用 氷床モデリング 球面調和関数

## 1. 気候モデルを用いた成層圏・中間圏が対流圏循環場に及ぼす影響の考察

日々の天気の変化が起こる対流圏現象を予測・再現する時に、対流圏のみフルカバーするモデル上端に設定すれば十分か、と言われると実はそうではない。対流圏の上層に位置する成層圏をフルカバーするモデルを用いると、対流圏循環の再現性が向上し、日々の天気予測スキルも改善することが経験的に知られている。

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)評価報告書で活用される、結合モデル相互比較プロジェクト(CMIP)の気候モデル群を見ると、第4次報告書時は成層圏をフルカバーするモデルが23モデル中ゼロだったのに対して、第5次報告書では47モデル中11、第6次報告書では成層圏を含むモデルが主流派になってきた。

対流圏から成層圏への影響と比べ、成層圏から対流圏へ影響を及ぼす現象の理解は格段に困難である。これを調べる手段として、世界中のCMIP気候モデル群を、ハイトップ(成層圏をフルカバーする)とロートップ(成層圏をフルカバーしない)モデルに分けて、両者の違いを見出す方法がある。しかし各モデルで物理法則を記述する過程や解像度が異なる影響の方が大きく、同手法では成層圏が対流圏へ与える影響を定量的に理解するのは難しいことが分かった。

本研究では大気大循環モデルMIROC-AGCM用いて、同一の物理過程・パラメータ、水平解像度に設定し、モデルトップの高度や成層圏解像度を変えた4種類の実験を行った。具体的には水平解像度はT106で、モデル上端と鉛直総数をそれぞれ(a)28km, L34, (b)48km, L42, (c)48km, L72, (d)95km, L168に設定したモデルを100年間積分した。対流圏の鉛直解像度は全て同じである。成層圏の鉛直解像度は(b)では1-3kmであるが、(c)と(d)で550mに設定している。(a)と(b)の比較から成層圏、

(b)と(c)の比較から成層圏解像度、(c)と(d)の比較から中間圏が対流圏循環形成に与える影響を調べることが可能である。

図1に再解析(ERA-I)データと比較した極域帯状平均温度及び東西風のTaylor diagramを示す。1000-85hPa(上段4つ)では、特に東西風で成層圏を含まないL34のみがERA-Iと外れたスコアになっており、成層圏の有無が対流圏気候値循環場の再現性を変え得ることを示している。

下段4つは70-10hPaのTaylor diagramである。L34は含まれていない。成層圏の解像度が高いL72(□)の方が低いL42(△)より、温度及び東西風のスコアが良くなっている。更にモデルトップを中間圏界面まで上げたL168(O)のスコアが特に冬~春にかけて一番良くなっている。同様に地表面気圧と降水分布を調べたところ、成層圏を含むモデル(L34, L72, L168)が含まないモデル(L34)より一般的にスコアが良くなっていた(図略)。

図2にL34とL42の比較(L34-L42)から得られた、成層圏の有無が対流圏に与える影響の模式図を示す。成層圏を十分に表現できないロートップモデルでは、①赤道から高緯度へ向かう成層圏の循環(Brewer-Dobson循環)が弱くなる。その結果、②極域での下降流が弱くなり、断熱圧縮も弱まるため温度が下がる。温度風の関係から③対流圏~成層圏の西風ジェットが強まり、付随して対流圏の傾圧波活動が極側へシフトする。その影響が地表付近まで及び、④地表付近の西風が強まり、気圧は低緯度側で高く、高緯度側で低くなる。すなわち、高緯度で低気圧偏差、中緯度で高気圧偏差になり、降水は高緯度で増え、中緯度で減る。成層圏の有無が対流圏下層にまで影響を与えることが明らかになった。更に中間圏界面までモデル上端を上げると、気象現象の再現性が改良されることも示された。

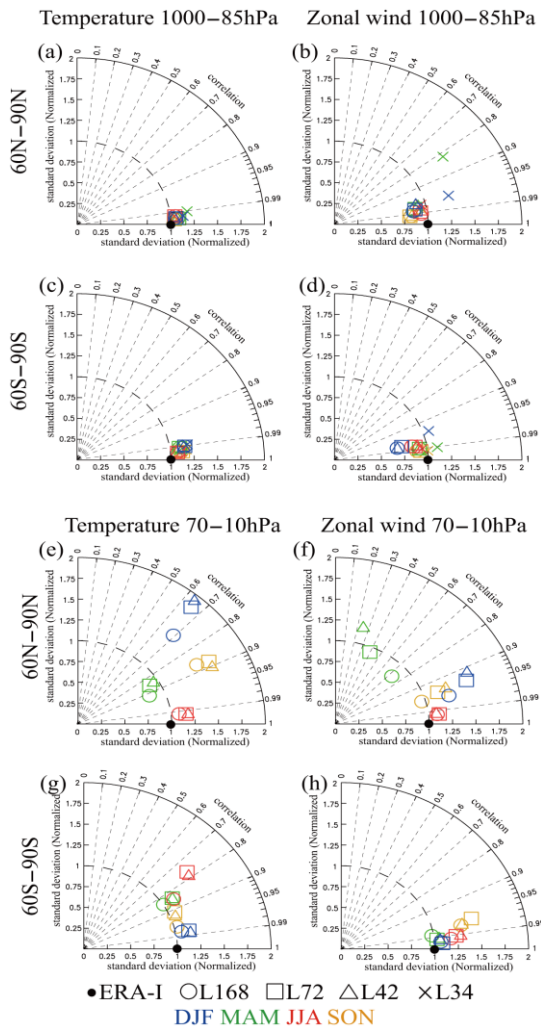


図 1. ERA-I と比較した帯状平均温度及び東西風の Taylor diagram。(a, b, e, f) が 60° N-90° N, (c, d, g, h) が 60° S-90° S, 上段 4 つが 1000-85hPa, 下段 4 つが 70-10hPa。図中の○, □, △, ×はそれぞれ L168, L72, L42, L34 を、青・緑・赤・黄色は DJF, MAM, JJA, SON を表す。

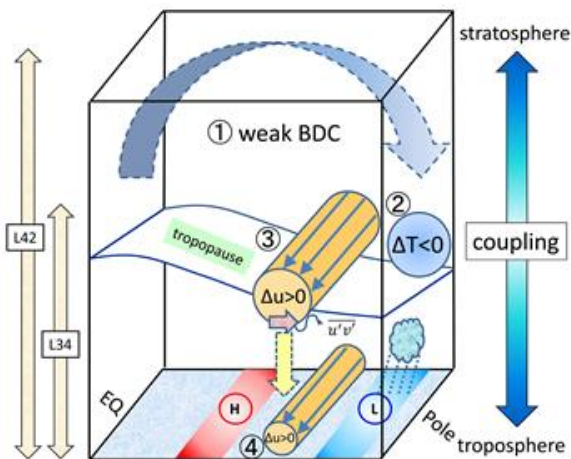


図 2. 成層圏の有無が対流圏に与える影響の模式図 (L34-L42)

## 2. 氷床モデル開発と移流計算の高度化試験

氷床モデルでは氷床形状・内部温度・氷年代などを輸送方程式や移流拡散方程式で記述し、時間発展問題としてそれぞれの時間変動を求めている。そのため方程式の数値的な表現と解法に応じてその精度が大きく異なる。特に氷床形状や温度については、局所的に不連続的な性質をもち、精度に大きな影響を及ぼす可能性がある。現在、氷床モデル IceS では高精度移流/輸送方程式を実装中である。本年度はその予備調査とし、Rational function based Constrained Interpolation Profile method (RCIP, Xiao 1996) を氷床の年代計算に導入し、基本的な手法である一次・二次の上流差分を用いた実験と比較した。

RCIP は Semi-Lagrangian に分類され、上流点の値を求めるために、係数が四つある有理関数を用いることが特徴である。また、係数の制約条件として格子の数を増やすのではなく、独立変数の空間微分の移流方程式を追加し、微分値を制約条件とすることが特徴である。一般に RCIP を用いることで、不連続付近での振動の抑制や、数値拡散の抑制、位相の保持が向上することが期待される。

氷床の年代とは降雪してからの経過時間をしめし、単純な移流方程式を用いて計算することができる。氷床流動計算で与えられる速度分布をもとに氷床の年代を計算したものが図3 である。入力降雪は時間変動があり、それに応じて速度分布が変化するモデルを想定した。RCIP および上流差分による年代計算を行い、結果を比較した。解析は主に計算された年層の厚さに対して行った。ここでいう年層の厚さは年代の空間微分の逆数として考えることができる。

この実験設定下では、年層の厚さを深さに対して図示すると降雪量一定の解析解(灰色)の間を遷移することが期待されるが、RCIP を用いることにより特に年層の厚さの計算が大きく改良されたことが明らかとなった。また、年層の厚さを年代に対して図示した場合、入力降雪変化の振動の位相が他の手法に比べてよく保持されていることが明らかとなった。これは RCIP の手法が年代の空間微分を直接移流計算することによるものと考えられる。

今後はこの手法を三次元に拡張し、また年代計算だけでなく、熱力学計算にも導入することで、氷床変動計算の高度化を図る予定である。

## 3. 並列化球面調和関数ライブラリ Flageolet の開発

気候モデル MIROC の大気モデル力学過程は球面調和関数変換を用いて波数空間で、また物理過程は格子空間で記述され、球面調和関数変換を行うことで両空間の表現を変換している。球面調和関数(=フーリエ変換 とルジ

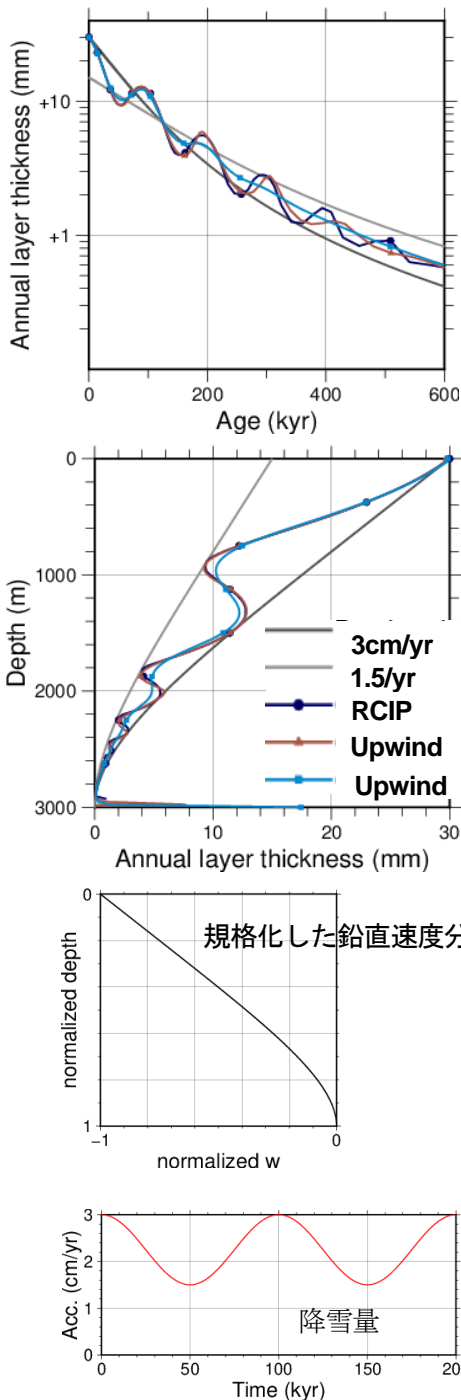


図 3. 理想的な氷床流動下での鉛直一次元年代計算結果。鉛直流動速度は表面の降雪量に依存する分布 (Parrenin 2007) とし、氷が出来てからの経過時間と年層の厚さ(一年辺りの厚さ)を計算したもの。実験は降雪の時間変動周期を 10 万年、降雪量の最大・最小を 3cm/yr, 1.5cm/yr, 氷厚を 3000m と設定した。灰色の線は降雪一定として求められる解析的な分布を示す。

ヤンドル陪関数変換) の特性とその実装の容易さのため、現行の MIROC 大気モデルの領域分割は緯度方向の

みに制限され、これが並列化における分割数の制約となっていた。一方物理過程は格子空間で記述され、一部の例外を除きほぼ格子毎に独立した計算を行っている。従って力学過程で経度方向の領域分割が可能となれば、並列数を増やすことができ、結果的に計算時間を大幅に短くすることが期待される。本課題では主に MIROC の力学過程に適用するための並列化球面調和関数ライブラリ Flageolet の開発を行っている。

実装方法は一般的な多次元高速フーリエ変換ライブラリと同様である。すなわち、波数空間への変換前後で配列の転置を挿入する方法である。具体的には東西に分割された配列を、フーリエ変換の前に東西方向にすべての情報を持ち、鉛直方向(あるいは南北方向)に分割された配列として整列する方法を採用した。ルジャンドル陪関数変換はその逆である。フーリエ変換とルジャンドル陪関数変換の間については従来通り全体全通信で整列する。

本年度は昨年度のフーリエ変換部分を実装に引き続き、ルジャンドル陪関数変換ルーチンの実装を行った。T85, T106, T213 の各水平解像度で計算効率を調べた。その結果特に高解像度の場合に大幅な計算効率の改良が得られた。ここで用いられる波数空間の表現は三角波数切断であり、格子空間で用いられる長方形を基本にした領域分割ができないため領域分割方法の検討も重要な課題である。FLAGEOLET は拡張性のため、ある程度自由に領域分割を設定できるように設計し、問題の規模によって最適なものを選択できるように実装した。表の例では 160 分割した場合に複数の領域分割方法を試しているが、同じ並列数でも計算速度に一割程度の影響があることが判明した。

今後はフーリエ変換とルジャンドル陪関数変換の間の行列転置など残りの部分を実装し、球面調和関数ライブラリの完成を目指す。

表 1. FLAGEOLET の計測結果の一例。

T213 L80, forward-inverse ALT を 10000 回繰返し計測			
Module	Decomp.	Nodes/ranks	Max real time (s)
MIROC compatible	Trad=1	40/160	15.568
FLAGEOLET	Trad=1	40/160	12.723
FLAGEOLET	2	40/160	12.296
FLAGEOLET	2, 1	40/160	<b>11.713</b>
FLAGEOLET	2	80/320	<b>6.857</b>

文献

[1] Xiao, F., Yabe, T., and Ito, T.: Constructing oscillation preventing scheme for advection equation by rational function, Comp. Phys. Comm., 93, 1-12, 1996

# Development Research of a High-quality Climate Model for Long-term Climate Change Projection Study

Project Representative

Michio Kawamiya Department of Integrated Climate Change Projection Research,  
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Authors

Yoshio Kawatani <sup>\*1</sup>, Fuyuki Saito <sup>\*1</sup>, Michio Kawamiya <sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup>Department of Integrated Climate Change Projection Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

The impact of stratospheric representation is investigated using the MIROC-AGCM with different model-lid heights and stratospheric vertical resolutions. The results show that the stratospheric vertical resolution and inclusion of the full middle atmosphere significantly affect tropospheric circulations.

**Keywords :** Troposphere-stratosphere interaction, Ice-sheet modeling, Spherical Harmonics Transform.

## 1. The effects of a well-resolved stratosphere on the simulated boreal winter circulation

This study investigated the effects of including a well-resolved stratosphere (and mesosphere) in the global atmospheric MIROC-AGCM climate model. The investigation examined the modeled climate from four different configurations with model tops at ~27 km (L34), 47 km (L42), 47 km (L72), and 100 km (L168). The four configurations had identical horizontal resolution (T106) and identical vertical level structures in the troposphere, as well as identical physical subgrid-scale parameterizations. Analysis of the results focused on the Northern Hemisphere in winter.

Overall the circulation in the L168 model is most realistic and successive degradations of the vertical grid to the L72, L42 and L34 configurations result in progressively less realistic simulations.

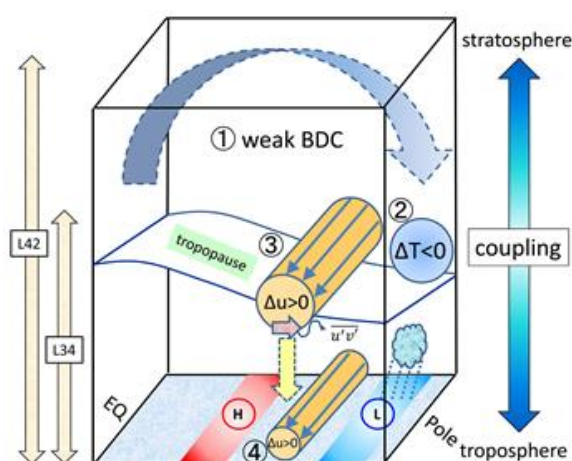
In the NH winter stratosphere even the T106L168 model displays a cold pole bias relative to observations, but successive degradations of the vertical level structure to L72, L42 and L34 led to a worsening cold pole bias. As the cold pole bias becomes more severe, the simulated polar night jet becomes stronger and less realistic. The magnitude of the winter cold pole bias is negatively correlated with the strength of the simulated mean downwelling at high latitudes. The analysis indicates that a lower model top and reduced vertical resolution in the stratosphere both lead to suppression of the BDC and so to stratospheric winter polar temperatures that are closer to radiative equilibrium.

The effects of the reduced polar downwelling in degraded vertical grid configurations extend into the troposphere and affect even the circulation at the surface. The sense of this is that the stronger mean westerlies in the lower stratosphere in simulations with a poorly-resolved stratosphere are connected with tropospheric circulations with a more positive AO phase.

Here we show the schematic illustration of differences between L34 and L42 (L34-L42) in Fig. 1. Compared with

the L42 model, the L34 model produces a poorer simulation of the stratospheric Brewer-Dobson circulation (BDC) in the lower stratosphere, with weaker polar downwelling and accompanying cold pole and westerly jet biases. The westerly bias extends into the troposphere and even to the surface. The tropospheric westerlies and zone of baroclinic wave activity shift northward; surface pressure has negative (positive) biases in the high (mid) latitudes, with concomitant precipitation shifts.

We also explicitly demonstrated that the vertical resolution in the stratosphere (L42-L72) is of greater importance than the inclusion of a mesosphere (L72-L168) when considering the impact on the troposphere. The present study shows that the stratospheric vertical resolution and inclusion of the full middle atmosphere significantly affect tropospheric circulations.



**Figure.1** Schematic illustration of some differences in the simulated circulation between the model without the stratosphere (L34) and that with the stratosphere (L42); i.e., L34-L42.

## 2. Development of a numerical ice sheet model and performance check of improvement on advection/transport equation formulation.

Age computation in ice sheet is formulated using an Eulerian advection equation. There are many schemes to solve it numerically, which differ in stability, accuracy, diffusivity and so on. Various methods have been presented for age computation in ice-sheets, however, Constrained Interpolation Profile method and its variants are not examined in this context. This study introduces one of its variants, a Rational function based Constrained Interpolation Profile to one-dimensional ice age computation, and demonstrate its performance with comparison with first- and second-order upwind schemes. The results present that the RCIP scheme preserves the pattern of input surface mass balance history in terms of internal annual layer thickness profile better than the other schemes. Extension of this scheme on 3-dimension, as well as on thermodynamics computation are expected to significantly improve the ice-sheet model, which is the next target of the development.

## 3. Development of FLAGEOLET, a parallel spherical harmonics transform library

A spherical harmonics transform library, Flageolet, has been developed. The library can perform the domain decomposition not only in latitudinal direction but longitude, which is expected to improve the computation efficiency of MIROC, in particular for higher spatial resolution experiment. Following the Fourier-transform module development last year, the Associate Legendre transform module is developed and tested. Various domain decomposition are designed to introduce, and the performance checks show significant improvement on computing speed.

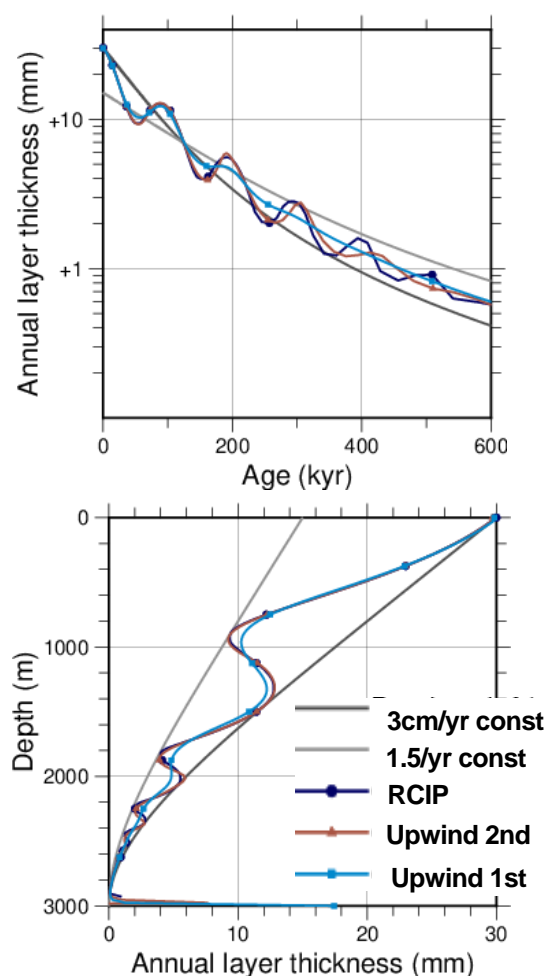


Figure 2. Demonstration of ice-dating computation using RCIP and upwind schemes.