

## 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 地球環境部門 環境変動予測研究センター

著者

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

<sup>\*1</sup>海洋研究開発機構 地球環境部門 環境変動予測研究センター

キーワード：気候モデル基盤ライブラリ、海洋前線、中層大気、氷床モデル開発

### 1. MIROC 基盤ライブラリの整備

気候モデルMIROCの開発はその前身を含めて 30 年以上続けられており、古い FORTRAN の仕様での記述に最近のFORTRANの文法を混在させた形となっている。多くの重要な手続きで、現状非推奨の仕様である common 文や entry 文を多用した設計となっており、見通しが悪くバグも発生しやすい状況である。また、コードの解説文書がない(あるいは更新がされておらず、最新のコードを反映していない)、暗黙の理解が多い、などモデルの規模とくらべて開発者が少なく、新規の開発者が参入しにくい状況である。

MIROC 利用の維持かつ将来の発展のためには、古いコードを保守しやすく整備することが必要であると考えられる。そのためモデルの物理要素の発展と並行して、現在技術的な側面からもモデルの改良を行っている。以下では今期に本課題を通じて行ったことを紹介する。

#### 1.1. 共通基盤ライブラリ TOUZA の開発

MIROC の中で特に古いコードは基盤ライブラリに集中している。ここでいう基盤ライブラリとは、モデル内にある科学に関する計算以外のもの、入出力、制御、要素モデル間の結合モジュールなどである。原理的にはそれほど複雑な機能ではないことも少なくないが、多くは間に合わせの開発の積み重ねで進んできた、という経緯により、非常に見通しの悪い記述となっている。また、例えばモデルからある要素を切り出して独立化する、という開発はよくあることだが、基盤的な機能という性質からそのライブラリに依存している実装もあり、切り出しが複雑になる、という問題もあった。

このような問題に対応すべく、昨年度から気候モデルの共通基盤ライブラリ TOUZA の開発が本格化している。TOUZA は MIROC の基盤的機能を FORTRAN-90/95/2003/2008 の文法を利用して記述した上位互換ライブラリである。昨年度までのカレンダーなど、ごく一部の機能のみを実装し、オープンソース化した。今期はさらに発展させ、入出力や並列化制

御の機能を実装した。単純な置き換えだけではなく、今後のモデルの規模の拡大に対応すべく新機能も加わった仕様となっている。例えば精度保証可逆データ圧縮などである。

また、従来から利用者に広く利用されていた共通解析ツールなども一部見直しを行い、TOUZA を元にしたツールの開発も開始した。これにより、MIROC モデル計算と解析が同じ基盤ライブラリから構築され、開発者、利用者双方にとってコードの見通しが改善されることが期待される。

#### 1.2. MIROC 本体の基盤整備

基盤ライブラリの分離独立化と並行して、MIROC 全体での古いコードの整理を行っており、一部完了した。今後も整理を続け、早くて来年度には古いコードを完全に置き換える予定である。

特に entry 文、common 文が乱用されているのは入出力や要素モデル結合機能の上位ルーチンである。下位ルーチンは上記 TOUZA に分離したが、上位ルーチンはまずは単純な整備を行った。

長期的な視野に立てば entry 間で共通する変数や、common を構成するすべての変数を module 文を使い同等のものに書き換えることが望ましいが、安全のため、ごく一部の手続きを除き段階的に換装する方針とした。また、並行して進められている各要素の開発との衝突を避けるために、なるべく変更が少ないように工夫している。例えば、module を利用した手続きを別名で用意しつつ、従来との互換手続きをその呼び出しとして保持している。

Common 文に関しては、プリプロセッサで処理しているが、固定形式、自由形式いずれでも読み込めるように形式を工夫してある。

現在気候モデル MIROC と地球システムモデル MIROC-ESM のコード上の統合が進められているが、前節にある基盤ライブラリ TOUZA(基盤の下位手続き)と本節の基盤整備(上位手続き)を導入することで、コードの見通しが著しく改良され、今後の開発に生かされるであろうことが大いに期待される。

### 2. 中緯度海洋前線と中層大気循環

中緯度の海面水温の南北勾配が大きな海洋前線付近では、海洋から対流圏へ影響を及ぼしている。先

行研究から、海洋前線は対流圏の傾圧不安定波を強める働きがあると知られている。中層大気大循環の形成に重要な役割を果たす大気重力波は、傾圧波帯からも生成されている為、海洋前線の有無が中層大気循環にまで影響を及ぼしている可能性が考えられる。今回、中間圏界面まで含むハイトップモデル仕様の MIROC-AGCM を用いて海洋前線が中層大気循環に影響を与えるかどうかを調べた。

海洋前線あり・なし実験の対流圏での差は、先行研究と定性的に一致することを確認できた。すなわち、中緯度の傾圧擾乱は海洋前線あり実験で大きく、対流圏ジェットは極側で強くなっていた。

重力波に伴う運動量フラックスを調べると、海洋前線あり実験の方が、対流圏から成層圏へ伝播する重力波が多く、成層圏・中間圏の西風をより弱めていることが分かった。海洋前線なし実験では、振幅の弱い重力波が励起され、中間圏のより高い高度(0.03hPa 付近)で重力波が砕波されていた。中間圏西風ジェットの構造は、海洋前線を入れた実験の方が現実的であることも確認された。

本実験結果から、中緯度海洋前線は従来知られていた対流圏循環へ影響を及ぼすのみならず、大気重力波の生成を変調させ、成層圏・中間圏(中層大気)循環にまで効いていることが分かった。より詳細な解析を今後続けていく。

### 3. 氷床モデル開発

#### 3.1. 氷床モデル解像度実験と最適化

昨年度から氷床モデル IcIES-1(非並列化版) および IcIES-2(MPI 並列化版)の ES4 への移植・最適化を行っている。IcIES-2 については CPU, VE ともに移植途上であるが、IcIES-1 に関してはグリーンランド氷床、南極氷床、過去の北半球氷床の各設定において、概ね期待通りの高速化が実現した。それを踏まえ従来からの懸案であった高解像度化を進めることとした。

そのうち、南極氷床および、北半球氷床については、境界条件の整備とごく簡単な試験にとどまり、本格的な高解像度モデルの開発と運用は次年度に行う予定である。特に北半球氷床については、計算の安定化が大きな課題である。

グリーンランド氷床は新しく出版されたグリーンランドの高解像度地形データ (BedMachine v4, Morlighem et al. 2021) を用いて境界条件を一から作り直した。従来のグリーンランド実験は10kmで行っていたが(Saito et al. 2016) 現在ではこの解像度は、特に将来の温暖化応答実験では低解像度の方に含まれる。解像度の効果を見るために今回は 24, 12, 9, 6, 4.5, 3km の解像度をそれぞれ試した。

3km の実験は計算不安定を生じやすく、その対応が必須であるが、4.5km より低像度では特に問題なく運用できることが分かった。ES4VE 8 スレッドの場合 4.5km の 10 万年積分も 17520 秒で達成し、実用

上十分高速であることが分かった。ただし、スレッド数によっては計算結果が同一実験でも異なる場合があり、その原因の究明が必要である。

#### 3.2. 一次元熱力学計算の高次移流計算試験実装

氷床モデルの年代計算の高精度化を昨年度行ったが、その発展として、熱力学計算の高精度化を進めている。まずは年代計算のための実装と同様に、鉛直一次元に問題を単純化し、高次移流スキームを実装してその効果を調べた。移流スキームは同様に RCIP スキームを採用した。年代計算は純粋な移流方程式であるが、熱力学計算は拡散や消散熱などが含まれ、より複雑な計算になる。

従来の伝統的な上流差分スキームと RCIP を用いて流動が外部条件として与えられる、ごく簡単な設定下で氷温度の時間発展を計算した(図)。その結果、手法による違いは 0.5K 程度であることが明らかとなった。現実的には氷の温度の違いは氷の粘性に影響し、流動速度に影響するが、今回はその効果は含まれていない。今後は熱力学結合を含んだ系で各手法により熱力学計算がどのように影響されるかをより詳細に調べる予定である。

#### 文献

- [1] Morlighem M. et al., “BedMachine v3: Complete bed topography and ocean bathymetry mapping of Greenland from multi-beam echo sounding combined with mass conservation”, *Geophys. Res. Lett.*, (44) doi:10.1002/2017GL074, (2017).
- [2] Saito, F., Abe-Ouchi, A., Takahashi, K., and Blatter, H., “SearISE experiments revisited: potential sources of spread in multi-model projections of the Greenland ice sheet”, *The Cryosphere*(10), 43-63, doi: 10.5194/tc-10-43-2016, 2016.

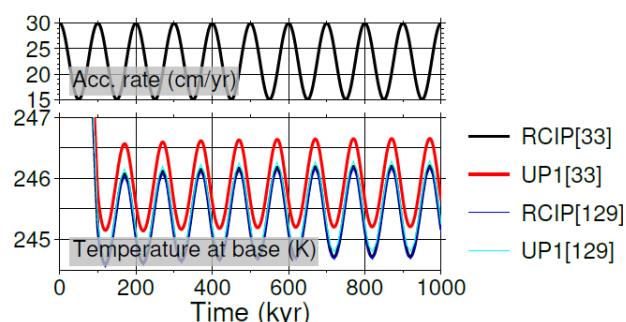


図: 一次元氷床流動モデルでの熱力学計算例。RCIP法と上流差分(UP1)について、解像度 33 層と 129 層のそれぞれで計算し、底面温度の時系列を図示した(下)。境界条件である表面温度は 223.15K に固定し、表面の速度を正弦関数で変動させた(上)。