

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

河谷芳雄^{*1}, 齋藤冬樹^{*1}, 河宮未知生^{*1}

^{*1} 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

地球シミュレータ資源を用いて実験した MIROC モデルを含む、QBO 気候モデル比較国際プロジェクト(QBOi)に参加したマルチモデルを解析し、QBO の季節予報可能性を検証した。高度 30hPa での QBO 予測精度は高く、7 か月後程度まで良いスキルスコアを示す。一方で上部成層圏と下部成層圏では精度が下がり、特に高度 70hPa の QBO は多くのモデルで QBO 振幅が小さく東風偏差になる傾向がある。マルチモデルアンサンブルを用いることで、1 年程度先までの正確で信頼性の高い QBO 予測を行えることを示した。

氷床モデルで用いる移流輸送方程式の解法を全面的に見直し、再設計を行っている。一次元の年代計算で RCIP 法が有効であることが示された。現在これを踏襲し三次元の年代計算および熱力学計算に同様の手法を導入し、精度向上のための開発を行っている。

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、本年度は高速 Fourier 変換部分の設計を見直した。

キーワード : 赤道準 2 年振動, 氷床モデル開発, 球面調和関数ライブラリ

1. 気候モデルによる赤道準 2 年振動の季節予報

赤道準 2 年振動(QBO)とは赤道域成層圏の東風と西風が 2 年強の周期で交代している現象で、対流圏-成層圏結合を引き起こし、広範囲の力学・化学過程に影響を及ぼしている。QBO は成層圏極渦を変え、中高緯度の地表面気圧配置に影響を与えることでストームトラックの分布を変化させる為、季節予報にとっても重要な気象現象である。

近年、季節予報における QBO の重要性が認識され始め、中期気象予報で世界 No. 1 の精度を誇るヨーロッパ中期予報センター(ECMWF)で、QBO の再予報テストも行われている。QBO 再現性を上げるためのモデル改良を行ったところ、予報成績が格段に上がった。一方で計算開始後 1-2 ヶ月を過ぎたあたりから観測結果との誤差が顕著になる。

これらの現状を踏まえ、赤道準 2 年振動(QBO)気候モデル比較国際プロジェクト(QBOi, Butchart et al. 2018)の活動を通して、QBO の季節予報可能性についてマルチモデルを用いて調べた(Stockdale et al. 2020)。

モデルの初期値は、再解析データから作成し、すべてのモデルで共通のものを用いた。QBO の予報精度を精査する為には、異なる QBO 位相・季節の状態から実験を行う必要がある。本実験では、1993 年から 2007 年までの 30 年間で、5 月 1 日と 11 月 1 日を初期値とする、計 30 メンバーの実験を行った。

なお、本課題の地球シミュレータのリソースを用いて実行された MIROC-AGCM は、非地形性重力波パラメタリゼーション(理論・経験則に基づいて重力波を数

式化。多くの不現実性を含む)を用いずとも QBO が再現できる唯一のモデルである。QBO は小規模な重力波によって駆動されており、他の研究機関では、重力波パラメタリゼーションをモデルに組み込むことで QBO を再現している。

図 1 は、各モデルの 30hPa と 70hPa における予測値の相関スキルを示したものである。30hPa の QBO コア領域では、すべてのモデルで相関が高く、実験開始後から 7 か月までは 0.9 以上である。

また成層圏下層に相当する高度 70hPa では、QBO 振幅が観測に比べて過小評価されるという共通の欠点が見られた。QBO 予測スキルも 30hPa に比べて悪くなっている(図 1b)。

図 2 は初期値から積分開始後 1, 2, 3, 5, 7, 9 カ月後の、QBO 西風及び東風の鉛直プロファイルを示す。横軸は負が東風、正が西風を示す。時間とともに再解析データ(黒線)から、各モデル(色線)が離れていき、モデル間ばらつきも大きくなる。西風に比べて東風でずれが大きくなり、また振幅も弱くなっている。

以上のように、高度 20-30hPa では、高い QBO 予測可能性を示すものの、それより高い・低い高度では結果が異なる。QBO の東風位相は、20-50hPa ではすべてのモデルで過小評価されるのに対して、西風位相はモデルによって強すぎたり弱すぎたりするばらつきを持つ。その結果、QBO の振幅が小さくなり、特に 30hPa の帯状平均風は西風バイアスを持つ。

一方で、全体的に見て、マルチモデルアンサンブルを用いることで、少なくとも 1 年先までの正確で信頼性の高い QBO 予測を行うことができるとも言える。し

かしながら、モデルの予測可能性の推定値がどの程度信頼できるかはまだ確証が持てる段階ではない。今回の研究の15年間（1993年–2007年）には、2016年に観測史上初めて見られたQBO崩壊の時期は含まれていない。QBOの西風・東風は大気上層で形成され、時間とともに下降する特徴を持つ。しかし2016年1月、西風位相が下降している最中の高度22km付近に突如東風が形成され、西風が上方伝播し始めた。この稀な現象を正確に予測できるかどうかは、まだ議論の最中である。

次にQBO駆動を詳細に調べるため、運動量収支解析を行った。モデルは大気波動による強制力と鉛直移流を正しく表現しているものの、再解析データと比較すると、重力波パラメタリゼーションのプロセスには系統的な誤差があることが分かった。予測の失敗のいくつかは、同パラメタリゼーションの明らかな誤差に関連していると考えられる。加えて、モデルで使用されている鉛直拡散も運動量収支の誤差に関与している可能性が考えられる。すべてのモデルが運動量収支分析に必要なデータを提供しているわけではないものの、今回の結果は、モデルと観測された風のプロファイルがよく一致する予測の最初の1ヶ月間の運動量収支を注意深く調べることで、モデルプロセスのエラーを診断できることを示唆した。

QBOの季節予報スキルをあげるには、重力波に関するプロセスの改良が必要である。今回のQBOiプロジェクトに参加した多くのモデルは、重力波ソースを固定した重力波のパラメタリゼーションを使用している。これは、重力波の主な起源である熱帯対流活動が時空間方向に変化しても、いつも同じ強さの重力波しか考慮されないことを意味する。例えばエルニーニョ南方振動に伴って赤道上の降水量が時間的・空間的に変化しても、成層圏へ伝わる重力波は一定になり、波によるQBOの時空間変動が考慮されないことになる。QBOのより高い予測能力を得るためには、重力波ソースの時空間変動を考慮するパラメタリゼーションの発展と、より高解像度モデルを用いたQBO実験を行う必要がある。

2. 氷床モデル開発

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。

氷床モデルIcIES-2ではモデル内の各方程式の高精度移流/輸送方程式の実装を進めている。一昨年の本研究課題において鉛直次元年代計算にRational function based Constrained Interpolation Profile method (RCIP, Xiao et al., 1996)を導入し、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結果を紹介した。RCIPはSemi-Lagrangian手法の一種であり、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、かつその係数の制約条件として、独立変数の空間微分値を用いることが特徴である。これにより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示されている。

一昨年は非常に限定的でごく単純な実験設定下でのRCIPの効果を示すにとどまったが、本年度は様々な

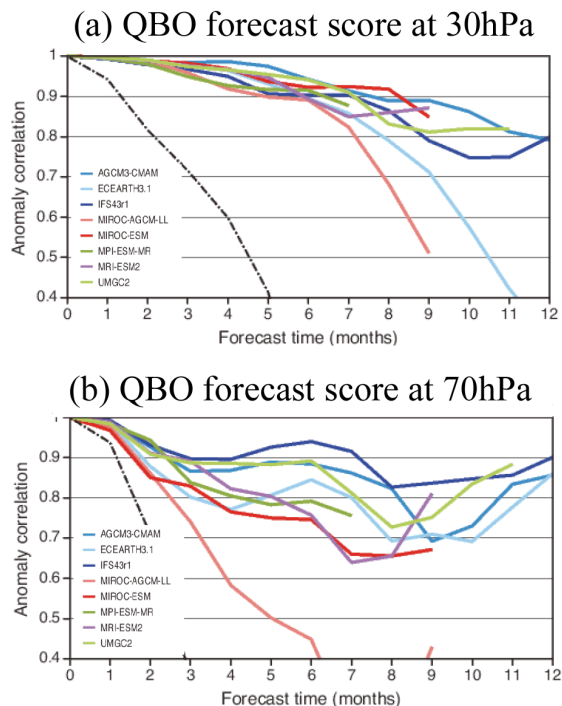


図1. 高度30hPa及び70hPaにおけるQBOの予報スキルスコア。高度30hPaでは7か月程度までスキルスコアが高いが、高度70hPaでは数か月でスキルスコアが悪くなっている。

設定下、たとえば氷厚変化がある場合や降雪に加えて表面融解がある場合、さらに底面融解がある場合など多くの実用的な設定下で系統的な実験を行いその効果を明らかにした(Saito et al. 2020)。従来のいくつかの研究で指摘されているが、古典的な一次の上流差分を用いても高精度移流計算よりかえって精度よく計算される実験設定もある。Saito et al. (2020)では、RCIPで使用する上流の出発点を計算する方法に改良を加え、そのような特殊な状況下でもRCIPによる年代計算精度の飛躍的な向上を実現した。

また、年代や年層厚（一年に相当する層の厚さ、年代の鉛直微分の逆数に相当）の再現に必要な深さまで精度よく計算するための鉛直離散化の最適化手法を実装した。表面の降雪変動の範囲、および要求する年代

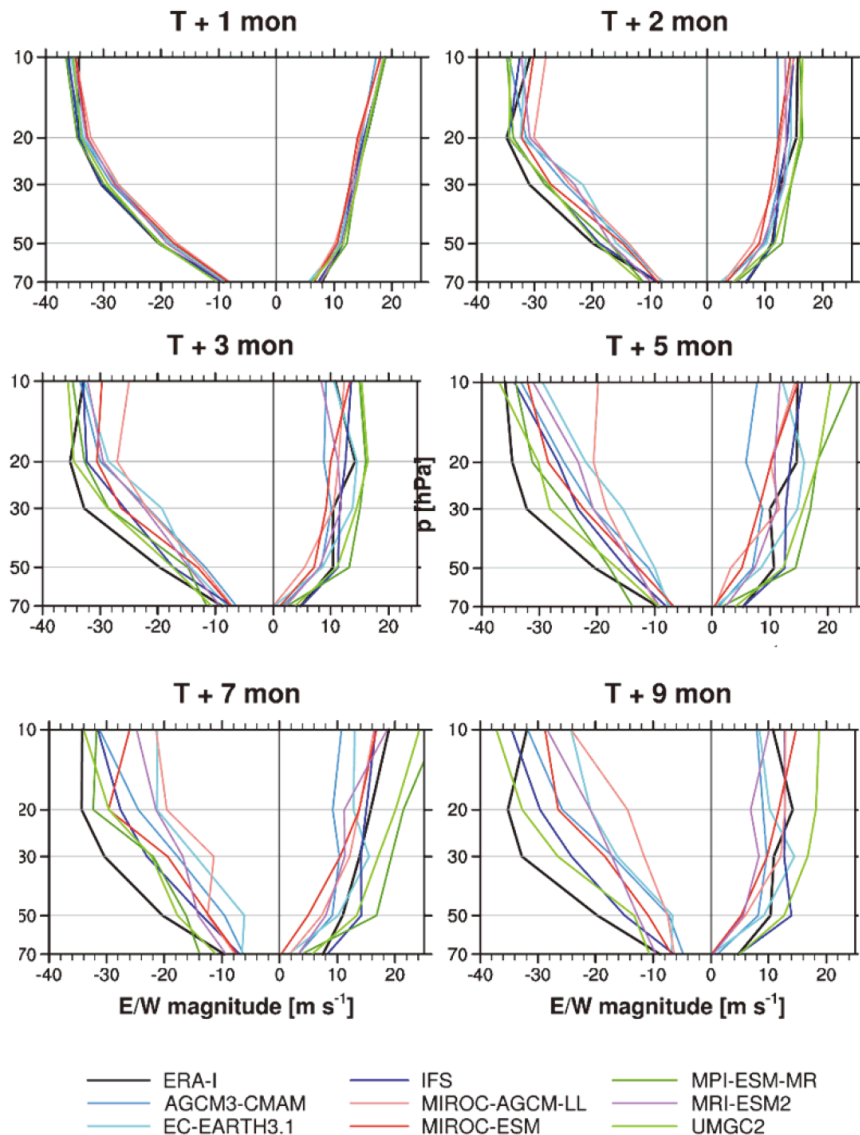


図2. 初期値から積分開始後1, 2, 3, 5, 7, 9か月後の、QBO西風及び東風の鉛直プロファイル。横軸は負が東風、正が西風。黒線が再解析データ、色線が各モデル。時間とともに再解析データからのずれが大きくなるが、特に東風でずれが大きくなることを示している。

と年層の限界を与えることにより、その年代での年層を解像するために必要な鉛直離散化を求めるこの手法の導入により同じ計算量でも効率的に年代計算が行うことが可能になった (図3)

現在の IcIES 開発では以上の結果を踏まえ、RCIP 方の実装を年代および熱力学の三次元計算に拡張している。氷床の熱力学計算は、単純な移流計算である年代計算と異なり、拡散項や相変化による消散を含む複雑な計算である。鉛直一次元熱力学計算に RCIP を実装した試験では、鉛直方向で卓越する拡散項の効果のために RCIP 導入の効果が大きくなかったことを確認した。ただし、現実的には水平方向の移流の効果が大き

きことが分かっているため、三次元への適用で大きく精度が改善することが期待される。

本研究課題で開発した氷床モデル IcIES-2 は 2020 年からオープンソースとして公開された。

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ャンドル陪関数変換) の特性とその実装の容易

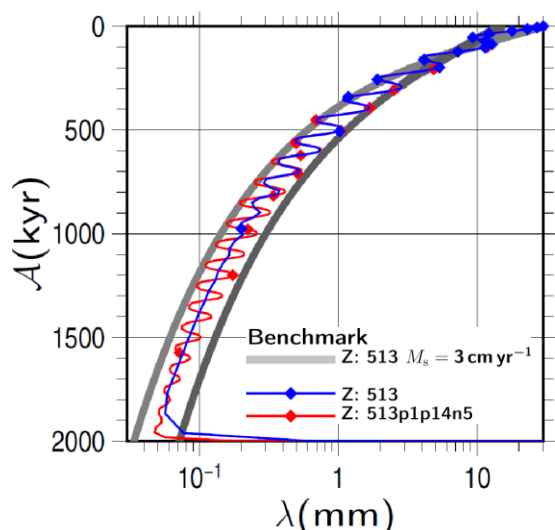


図3: RCIP法を用いた氷床鉛直年代計算例。鉛直流動速度は表面の降雪量に依存する分布(Parrenin 2007)とし、氷が出来てからの経過時間と年層の厚さ(一年辺りの厚さ)を計算したもの。実験は降雪の時間変動周期を10万年、降雪量の最大・最小を3cm/yr, 1.5cm/yr, 氷厚を3000mと設定した。縦軸に年代、横軸に年層の厚さを示した。灰色の線は降雪一定として求められる解析的な分布を示す。青線(Z513)は等間隔513層で離散化した場合、赤線(Z513p1p14n5)はSaito et al (2020)で紹介する最適化した不等間隔513層の場合の計算結果である。最適化した鉛直離散化により、新しい年代の再現を保持したまま古い年代の年層の変動がよりよく保存されていることがわかる。

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。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の開発を継続して行っている。

本年度は次年度から運用される地球シミュレータ第4世代の新アーキテクチャ対応を見据えて、特にフーリエ変換部分の設計の見直しを行った。現行の設計は主にベクトル機を念頭に実装されており、スカラー機で必ずしも最適な設計となっていない可能性がある。フーリエ変換での通信や演算、配列の配置方法などを複数方法実装し、現世代で試験運用を行った。従来のFLAGEOLET設計と計算速度を比較したところ、少なくとも地球シミュレータ第三世代での典型的な運用では現行の設計が最適であることが確認された。一方小規模な計算機では試した範囲でいずれの方法でも遜色ない計算速度が得られた。

次年度以降運用される地球シミュレータ第四世代、とくにスカラー機での運用で、それぞれで最適な設計を明らかにする予定である。

文献

- [1] Butchart, N., Anstey, J., Hamilton, K., Osprey, S., McLandress, C., Bushell, A., Kawatani, Y., Kim Y-H, Lott, F., Scinocca, J., Stockdale, T., Bellprat, O., Braesicke, P., Cangazzo, B., Chen, C-C., Chun, H-Y., Dobrynin, M., Garcia, R., Garcia-Serrano, J., Gray, L., Holt, L., Kerzenmacher, T., Naoe, H., Pohlmann, H., Ritcher, J., Scaife, A., Schenzinger, V., Serva, F., Versick S., Watanabe, S. Yoshida, K. and Yukimoto, S., "Overview of experiment design and comparison of models participating in the SPARC Quasi-Biennial Oscillation initiative (QBOi)", *Geosci. Model. Dev.*, 11, 1009-1032, <https://doi.org/10.5194/gmd-11-1009-2018>, 2018
- [2] Stockdale, T. N., Y. -H. Kim, J. A. Anstey, F. M. Palmeiro, N. Butchart, A. A. Scaife, M. Andrews, A. C. Bushell, M. Dobrynin, J. Garcia - Serrano, K. Hamilton, Y. Kawatani, F. Lott, C. McLandress, H. Naoe, S. M. Osprey, H. Pohlmann, J. Scinocca, S. Watanabe, K. Yoshida, S. Yukimoto, "Prediction of the quasi - biennial oscillation with a multi - model ensemble of QBO - resolving models", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, <https://doi.org/10.1002/qj.3919>, 2020.
- [3] Xiao, F., Yabe, T., and Ito, T., "Constructing oscillation preventing scheme for advection equation by rational function," *Comp. Phys. Comm.*, 93, 1-12, [https://doi.org/10.1016/0010-4655\(95\)00124-7](https://doi.org/10.1016/0010-4655(95)00124-7), 1996.
- [4] Saito, F., Obase, T., and Abe-Ouchi, A., "Implementation of the RCIP scheme and its performance for 1-D age computations in ice-sheet models", *Geosci. Model Dev.*, 13, 5875-5896, <https://doi.org/10.5194/gmd-13-5875-2020>, 2020.
- [5] Parrenin, F., Dreyfus, G., Durand, G., Fujita, S., Gagliardini, O., Gillet, F., Jouzel, J., Kawamura, K., Lhomme, N., Masson-Delmotte, V., Ritz, C., Schwander, J., Shoji, H., Uemura, R., Watanabe, O., and Yoshida, N., "1-D-ice flow modelling at EPICA Dome C and Dome Fuji, East Antarctica", *Clim. Past*, 3, 243-259, <https://doi.org/10.5194/cp-3-243-2007>, 2007.

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

Project Representative

Michio Kawamiya Research Center for Environmental Modeling and Application,
Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Authors

Yoshio Kawatani ^{*1}, Fuyuki Saito ^{*1}, Michio Kawamiya ^{*1}

^{*1}Research Center for Environmental Modeling and Application, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

The ability of models to predict the evolution of the quasi-biennial oscillation (QBO) is investigated through international QBO model intercomparison project. All models have high skill in predicting the phase evolution of the QBO at 30 hPa, with slightly more variable results at higher and lower levels. A multi-model ensemble can be used to give accurate and reliable QBO forecasts up to at least a year ahead.

A higher-order semi-Lagrangian scheme RCIP is introduced into an ice-sheet model IcIES-2. It is shown that the scheme is efficient on ice-sheet dating issue, and will be expected to improve on 3d age/temperature computation.

A spherical harmonics transform library FLAGEOLET has been developed. The Fourier Transform is partly redesigned in order to prepare for the coming next generation of the Earth simulator, particular for a scalar architecture.

Keywords : Quasi-Biennial Oscillation, Ice-sheet Modeling, Spherical Harmonics Transform Library

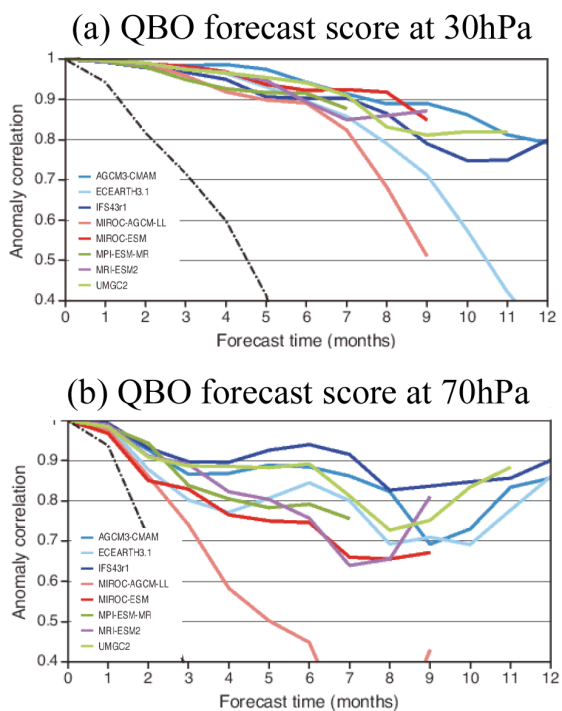
1. Prediction of the quasi-biennial oscillation (QBO)

The ability of models to predict the evolution of the quasi-biennial oscillation (QBO) is investigated through international QBO model intercomparison project (Butchart et al. 2018, Stockdale et al. 2020). The MIROC-AGCM-LL, which was run using the ES resources, is the only model that could simulate the QBO without non-orographic gravity wave parameterization. Other models simulated the QBO by using the parameterization, which differ among models.

In this study, we have investigated how well the models predict the QBO in seasonal time scales. Figure 1 shows the anomaly correlation skill of the bias-corrected forecasts at 30 and 70 hPa for each model. Anomaly correlation is high in all models in the core QBO region at 30 hPa, being above 0.9 out to seven months. However, anomaly correlation drops off faster during the first 3 months at 70 hPa. The MIROC-AGCM shows worst scores, as the QBO could not be not “well-tuned” by the parameterization and the amplitude of the QBO at this level is underestimated.

In general, all models have high skill in predicting the phase evolution of the QBO at 30 hPa, with slightly more variable results at higher and lower levels. Simulated QBO easterlies are too weak in all models at 20-50hPa, while westerlies can be either too strong or too weak (not shown). This results in both a reduced amplitude of the QBO and a westerly bias in zonal-mean winds, notably at 30 hPa. At 70 hPa models tend to have reduced QBO amplitude and an easterly bias. Despite these failings, a multi-model ensemble can be used to give accurate and reliable QBO forecasts up to at least a year ahead.

Most models used gravity wave parameterization with fixed



wave sources. It means that even equatorial precipitation varies in time and spaces associated with, for example, El-Nino Southern Oscillation, same amount of gravity waves is considered. In order to get higher predict skills of the QBO, variable sources in parameterization should be considered, as well as investigating the QBO by models with much higher resolution.

Fig. 1. Anomaly correlation of zonal-mean zonal wind forecasts for pressure levels at 30 and 70 hPa. Colours show individual models.

2. Development of an Ice-sheet model

A numerical ice-sheet model describes the evolution of thickness, temperature, and age using advection and/or transport equations. Usually ice-sheet has discontinuity characteristics in particular in thickness and internal temperature, therefore accurate representation of those features is strongly expected in order to solve the equations effectively.

A numerical ice-sheet model called IcIES-2 has been improved to use higher-order schemes on these equations to replace the traditional numerical scheme. Saito et al. (2020) successfully demonstrates the efficiency of RCIP scheme (Rational function based Constrained Interpolation Profile method, Xiao et al., 1996) on idealized 1-d vertical dating situations.

RCIP is a variation of Semi-Lagrangian scheme, which possesses attractive properties, such as convexity and monotone preservation, as well as phase speed.

Saito et al. (2020) present an effective method to optimize the discretization under prescribed (expected) resolution of simulated age, which significantly improves the numerical solution using the same number of levels.

After this pilot study of RCIP scheme on ice-dating issue, implementation of RCIP or similar schemes on other equations, such as 3-d age and temperature has already been set as the next target of the development.

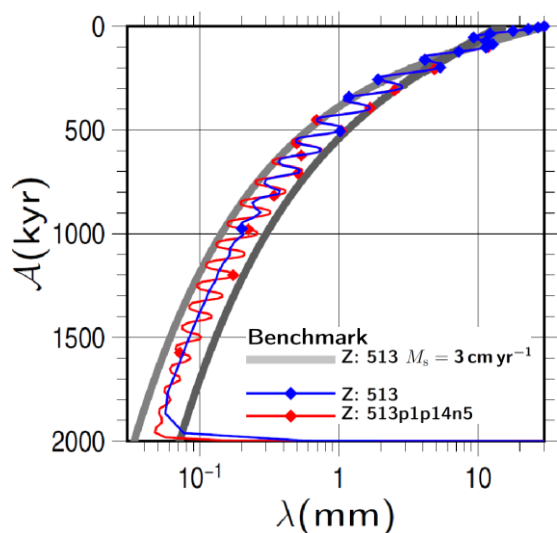


Figure 2. Computed annual layer thickness vs age using RCIP scheme with two different discretization, under a typical configuration of an ice-sheet dating issue. The same total number of levels are adopted, where the blue line shows the result with a uniform discretization, while red line shows that with non-uniform discretization computed using an optimization method in Saito et al. (2020).

3. Development of a Spherical Harmonics Transform Library (FLAGEOLET)

A spherical harmonic 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. In order to prepare for coming the Earth Simulator 4 application, the design of Flageolet is reinvestigated, in particular for a scalar architecture. The legacy Fourier Transform part in the Flageolet is upgraded to apply three slightly different array storages. Actually, the legacy design is fastest on the Earth simulator 3 than the other designs, however, it may be expected to improve the computation on scalar architectures.

References

- [1] Butchart, N., Anstey, J., Hamilton, K. Osprey, S., McLandress, C., Bushell, A., Kawatani, Y., Kim Y-H, Lott, F., Scinocca, J., Stokdale, T., Bellprat, O., Braesicke, P., Cangazzo, B., Chen, C-C., Chun, H-Y., Dobrynin, M., Garcia, R., Garcia-Serrano, J., Gray, L., Holt, L., Kerzenmacher, T., Naoe, H., Pohlmann, H., Ritcher, J., Scaife, A., Schenzinger, V., Serva, F., Versick S., Watanabe, S. Yoshida, K. and Yukimoto, S., "Overview of experiment design and comparison of models participating in the SPARC Quasi-Biennial Oscillation initiative (QBOi)", *Geosci. Model. Dev.*, 11, 1009-1032, <https://doi.org/10.5194/gmd-11-1009-2018>, 2018.
- [2] Stockdale, T. N., Y.-H. Kim, J. A. Anstey, F. M. Palmeiro, N. Butchart, A. A. Scaife, M. Andrews, A. C. Bushell, M. Dobrynin, J. Garcia-Serrano, K. Hamilton, Y. Kawatani, F. Lott, C. McLandress, H. Naoe, S. M. Osprey, H. Pohlmann, J. Scinocca, S. Watanabe, K. Yoshida, S. Yukimoto, "Prediction of the quasi-biennial oscillation with a multi-model ensemble of QBO-resolving models", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, <https://doi.org/10.1002/qj.3919>, 2020.
- [3] Xiao, F., Yabe, T., and Ito, T., "Constructing oscillation preventing scheme for advection equation by rational function," *Comp. Phys. Comm.*, 93, 1–12, [https://doi.org/10.1016/0010-4655\(95\)00124-7](https://doi.org/10.1016/0010-4655(95)00124-7), 1996.
- [4] Saito, F., Obase, T., and Abe-Ouchi, A., "Implementation of the RCIP scheme and its performance for 1-D age computations in ice-sheet models", *Geosci. Model Dev.*, 13, 5875–5896, <https://doi.org/10.5194/gmd-13-5875-2020>, 2020.