

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

河宮 未知生^{*1}, 河谷 芳雄^{*1}, 齋藤 冬樹^{*1}

^{*1} 海洋研究開発機構 統合的気候変動予測研究分野

気候モデル赤道準2年振動（QBO）比較国際プロジェクト（QBOi）に、MIROC-AGCM モデルを用いて参加している。本モデルは非定常重力波パラメタリゼーションを組み込まずとも QBO を再現しており、重力波パラメタリゼーションによる不確実性を低減できる独創的なモデルである。実験プロトコルに従い、現在気候実験及び2種類の将来気候実験を完了させた。

氷床モデル実験にとって特に重要である縁辺部の再現の不確実性を輸送方程式に関する数値スキームに対する感度実験を行って評価した。

キーワード：赤道準2年振動, 氷床モデリング

1. はじめに

気候変動予測の不確実性低減と信頼性向上の為に、様々な要素を統合的に再現可能なモデルを用いた研究が必要不可欠である。本プロジェクトでは、数年から数千年スケールまでの気候変動を対象とした広範な研究に適用可能な大気・海洋・陸面結合大循環モデルの開発、およびその為の要素モデルの開発・改良を目的とする。今後とも CMIP など国際的なモデル相互比較プログラムや、IPCC 第6次評価報告書にむけて、世界のトップクラスの気候モデルの位置を確保出来るようモデルの開発・改良を継続することが必要不可欠である。本プロジェクトはこれらの活動を通して、長期的な地球温暖化の適応策・緩和策に資する情報提供を行う事にも繋がる。

2. 気候モデル QBO 国際比較プロジェクト実験

赤道準2年振動（QBO）とは、赤道域成層圏で見られる周期2年強の東西風の振動である。QBO の影響は全球に及び、中高緯度の地表面気圧を変えていることが知られている。QBO は気候モデルで再現するのが最も難しい現象の一つであり、多くの気候モデルでは非定常重力波パラメタリゼーションを組み込むことで QBO を再現している。地球温暖化に伴って QBO がどのように変化するかは、我々のグループが世界に先駆けて行ってきたが（Kawatani et al. 2011, 2012; Kawatani and Hamilton 2013, [1,2,3]）、QBO を再現しているモデルの数が少ない為、定量的な QBO の変調については不明確である。

気候モデルにおける QBO の再現性及び将来変化を詳細に調べるため、2015年に気候モデルによる QBO 比較国際プロジェクト（QBOi）が立ち上がった。我々のグループは、非定常重力波パラメタリゼーションを用いなくとも QBO を再現可能な MIROC-AGCM を用いてこのプロジェクトに参加している。今年度は QBOi の実験プロトコル

に沿って、現在気候実験、CO₂ 濃度2倍且つ海面水温を全球一様に2K上げた実験、同様にCO₂濃度4倍且つ海面水温を4K上げた実験を行った。モデル積分期間はそれぞれ30年間で、アンサンブルメンバーは3である。

図1に帯状平均した赤道域東西風の時間-高度断面図を示す。現在気候実験では、QBO をよく再現している。一方でCO₂濃度2倍且つ海面水温2K上昇実験では、QBO の周期は長くなり、特に下部成層圏で振幅が弱くなる様子が見られ、我々のグループの先行研究（Kawatani et al. 2011, 2012）と整合的な結果である。一方でCO₂濃度4倍且つ海面水温4K上昇実験では、QBO の構造が不安定になり、成層圏でのQBO 振幅が弱くなりすぎて、QBO が消滅しかける期間もある。地球温暖化が極端に進むと、QBO が非常に変わり得ることを示唆している。

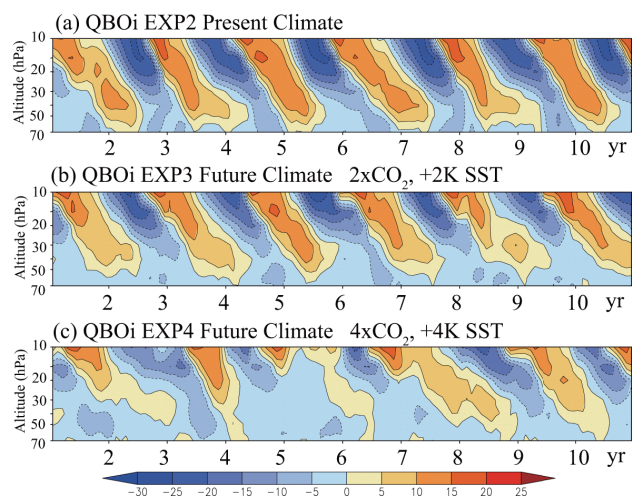


図1 帯状平均した赤道域東西風の時間-高度断面図。(a) 現在気候実験、(b) CO₂濃度2倍且つ海面水温2K上げた実験、(c) CO₂濃度4倍且つ海面水温を4K上げた実験。赤が西風、青が東風を示し、コンター間隔は5ms⁻¹。

3. 氷床モデル開発

過去および将来の気候変動下での氷床の長期的な変動の再現と高精度化に向けて本課題では氷床モデル IcIES を開発・改良している。本年は、幾つかある開発課題の内、特に氷床モデルで実装されている輸送スキームとその不確定性について考察した。

一般的に氷床モデリングでは、入力を降雪過程、出力を融解過程や流出過程、その間の水輸送を氷床流動過程として氷床変動の計算を行う。輸送方程式を数値モデル化するにあたり現行のモデルで使われている方法は複数ある。多くの輸送方程式の数値スキームではその拡散的な性質上、氷床の縁辺部の輸送についての誤差が大きいと考えられる。実は氷床の縁辺部は氷床変動の再現にとって鍵となる領域であり、その再現の不確定性が結果の解釈に重大な影響を及ぼす。そこで、氷床時間変動の計算に用いられている輸送方程式について、複数の手法を導入し、特に氷床の縁辺部の再現への影響について感度実験を行い、氷床モデルの数値手法による不確定性を評価した。

現状の多くの氷床モデルで用いられている、上流差分や拡散形式の中央差分による基本的な手法に加え、氷流動フラックスの発散項を移流・非移流項に分解する手法などを今回は導入した。また、上記に加え、今後の開発の試験とするため、Constrained Interpolation Profile スキーム (CIP) と呼ばれる数値拡散の少ない手法 (Xiao et al., 1996 [4] など) を単純化して導入した。

EISMINT phase ii 実験 A (Payne et al., 2000 [5]) に提示される、氷床モデルの比較プロジェクト EISMINT に使用された理想的な実験の設定を用い (ただし水平解像度は 10km と細かくした)、輸送方程式のスキームを変更して感度実験を行った。図 2 が実験結果である。その結果、特に氷床縁辺部で再現の差が 200m 程度に達することが明らかになった。今後は数値拡散や数値振動の少ない数値スキームを導入し、より詳細に不確定性を評価する予定である。

文献

- [1] Kawatani, Y., K. Hamilton and S. Watanabe, The Quasi-biennial oscillation in a double CO₂ climate, *J. Atmos. Sci.*, 68, 265-283 (2011).
- [2] Kawatani, Y., K. Hamilton and A. Noda, The effects of changes in sea surface temperature and CO₂ concentration on the quasi-biennial oscillation, *J. Atmos. Sci.*, 69, 1734-1749 (2012).
- [3] Kawatani, Y. and K. Hamilton, Weakened stratospheric Quasi-biennial Oscillation driven by increased tropical mean upwelling, *Nature*, 497, 478-481, doi:10.1038/nature12140 (2013).
- [4] Xiao, F. et al., Constructing oscillation preventing scheme for advection equation by rational function. *Comp. Phys. Comm.*, 93, 1, 1-12 (1996).
- [5] Payne, A. J. et al., Results from the EISMINT model intercomparison: the effects of thermomechanical coupling, *J. Glaciol.*, 46, 153, 227-238 (2000).

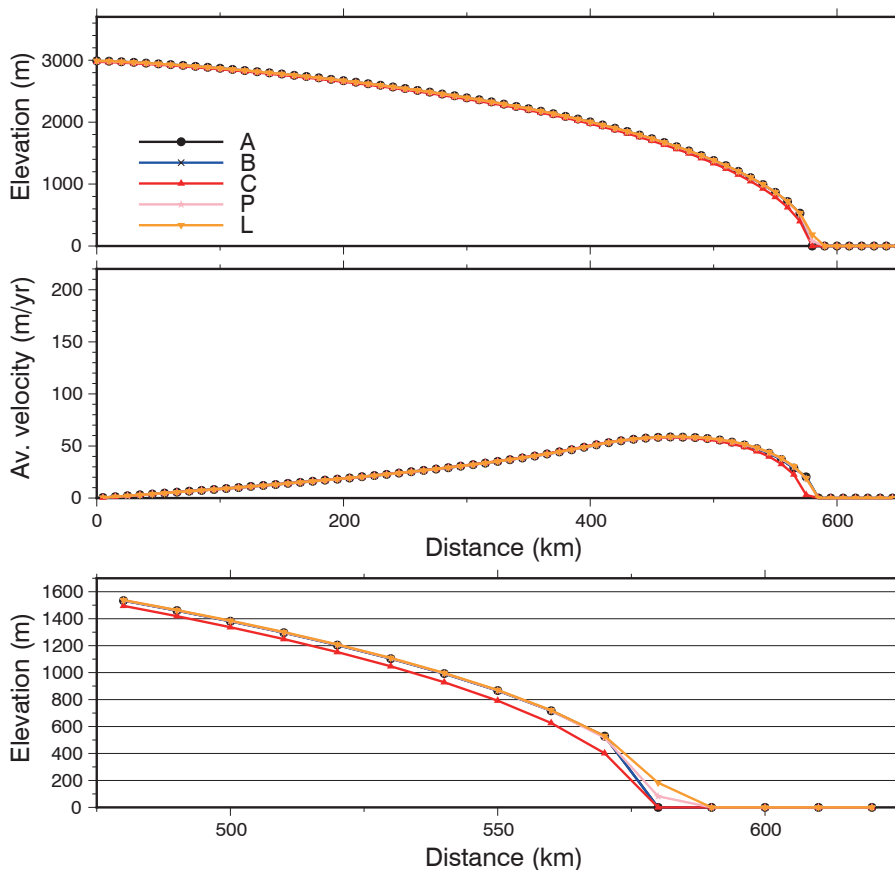


図 2 EISMINT phase ii (Payne et al., 2000[5]) の実験設定による氷床モデル実験の結果。横軸は対称の中心からの距離で、上から氷厚 (m)、鉛直平均速度 (m/yr)、氷厚の縁辺付近の拡大図を表す。輸送方程式に関して五種類のスキームの感度実験であり、それぞれ、A (拡散形式)、B (フラックス形式中央差分)、C (フラックス形式上流差分)、L (CIP スキームの実装 1)、P (CIP スキームの実装 2) を表す。

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

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

^{*1} Department of Integrated Climate Change Projection Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

We participate in the international project of the QBO initiative (QBOi) by using the MIROC-AGCM. The MIROC-AGCM successfully simulates the QBO without non-stationary gravity wave parameterization, and uncertainty resulting from this parameterization could be reduced. Following the experiment protocols, we have conducted present and future climate simulations. The modulation of the QBO is apparent when the CO₂ concentration is quadruple under +4K SST.

Using an ice-sheet model IceS, a series of sensitivity experiments to numerical schemes for ice transport equation are performed, which show in particular the thickness near ice-margin is significantly affected.

Keywords: Equatorial Quasi-Biennial Oscillation, Ice-sheet modeling

The quasi-biennial oscillation (QBO) is persistent, quasi-periodic, large-amplitude oscillation of the low latitude stratospheric circulation. The QBO has significant remote dynamical effects on the globe, including modification of mid-to-high latitude surface pressure distributions etc. The QBO is one of the most difficult phenomena to simulate in climate models, and how the QBO changes in the future climate remains uncertain. The new international project, the QBO initiative (QBOi), was launched in 2015, whose objectives are to evaluate the simulated QBO and to investigate future QBO changes by multi-model analyses. We participate in this project by using the MIROC-AGCM. The MIROC-AGCM successfully simulates the QBO without non-stationary gravity wave parameterization, and uncertainty resulting from this parameterization could be reduced.

Following the experiment protocols, we have conducted the present climate simulation and future climate simulations under double CO₂ and +2K SST and quadruple CO₂ and +4K SST. Time-height cross sections of equatorial zonal mean zonal wind

in these experiments are shown in Fig.1. In the present climate simulation, the QBO is well reproduced. In the double CO₂ and +2K SST simulation, the amplitude of the QBO becomes weaker, especially in the lower stratosphere, as indicated by our previous studies (Kawatani et al. 2011, 2012; Kawatani and Hamilton 2013[1, 2, 3]). In the quadrature CO₂ and +4K SST simulation, the QBO become more unstable with significantly weak amplitude. These experiments suggest the QBO would be modulated dramatically under significant global climate changes.

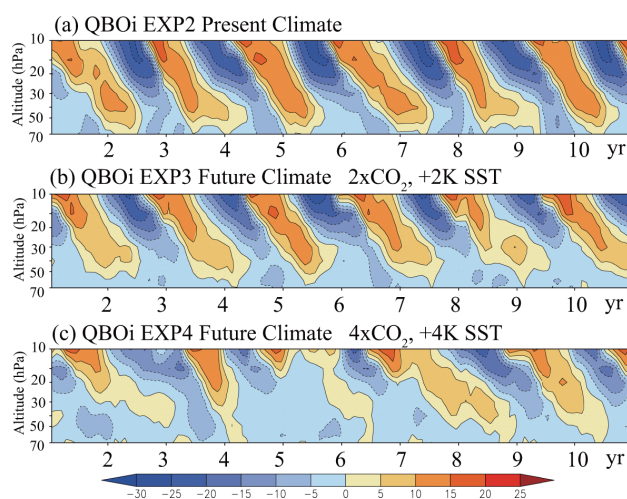


Fig. 1 Time-height cross section of equatorial zonal mean zonal wind in (a) present climate, (b) future climate with double CO₂ and +2K SST, and (c) that with quadrature CO₂ and +4K SST. Red and blue colors show westerly and easterly, respectively. The contour intervals are 5 m s⁻¹.

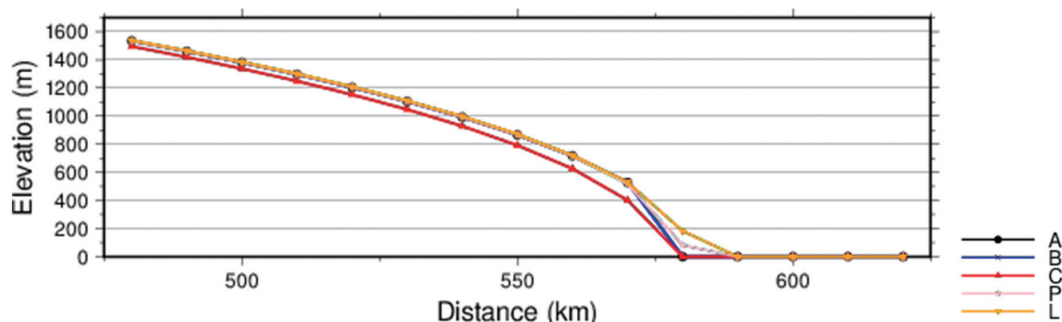


Fig. 2 Results of sensitivity experiment under configuration of Payne et al. (2000) [4]. Simulated ice-sheet elevation around the ice-sheet margin is shown for five numerical schemes to represent the ice transport equation.

An idealized ice-sheet experiment based on Payne et al (2000)[4] is performed using an ice-sheet model IcIES with five different numerical schemes to represent the ice transport equation (Fig. 2). Standard schemes such as the diffusion-form (A), the central difference scheme of flux-form (B) and the upwind scheme of flux-form (C), as well as two variants of Constrained Interpolated Profile scheme (Xiao et al. 1996 [5]) (L and P) are included in the sensitivity experiments. The results show more than 200m difference in the simulated ice thickness near ice-sheet margin. It implies that we need to be careful to interpret the results of ice-sheet simulation for those which uncertainties in the ice-sheet margin are critical such as global warming experiments.

References

- [1] Kawatani, Y., K. Hamilton and S. Watanabe, The Quasi-biennial oscillation in a double CO₂ climate, *J. Atmos. Sci.*, 68, 265-283 (2011).
- [2] Kawatani, Y., K. Hamilton and A. Noda, The effects of changes in sea surface temperature and CO₂ concentration on the quasi-biennial oscillation, *J. Atmos. Sci.*, 69, 1734-1749 (2012).
- [3] Kawatani, Y. and K. Hamilton, Weakened stratospheric Quasi-biennial Oscillation driven by increased tropical mean upwelling, *Nature*, 497, 478-481, doi:10.1038/nature12140 (2013).
- [4] Payne, A. J. et al., Results from the EISMINT model intercomparison: the effects of thermomechanical coupling, *J. Glaciol.*, 46, 153, 227-238 (2000).
- [5] Xiao, F. et al., Constructing oscillation preventing scheme for advection equation by rational function. *Comp. Phys. Comm.*, 93, 1, 1-12 (1996).