

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

小長谷貴志^{*1}, 橋本恵一^{*1,2}, 南久美子^{*3}, 宮内達也^{*3}, 中根進之介^{*3}, 中川樹^{*3}, 加藤 知道^{*3}, Hung-Wei Shu^{*1}, 羽島知洋^{*1}, 建部洋晶^{*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, ^{*2} 東京大学大学院, ^{*3} 北海道大学

キーワード: 高解像度海洋モデル、地球システムモデル、氷床モデル開発

1. 氷床棚氷モデルIcIES-2の改良と南極氷床による検証

棚氷力学過程を含む氷床流動モデル IcIES-2 (Saito et al., 2020; Obase et al., 2023) を用い、氷床力学過程の改良と現在気候での検証を進めた。氷床の流動分布については、従来は接地している氷床を Shallow Ice Approximation (SIA)、浮いている氷床を Shallow Shelf Approximation (SSA) 近似を用いて求めていたが、接地している氷床でも底面滑りが大きな領域では SSA 近似を用いて求めて速度を合成する方法をとるなど、複数の変更を導入した。

ES4VE を利用し、水平解像度 32km の設定では 1 日数万年程度の積分が可能で、気候の長期計算に対して十分な速度が出ているといえる。現在の気温・降水量などを境界条件とし、現在気候における準定常状態を求めた。氷床流動のパラメータ選定未実施のため観測との違いは小さくないものの、観測と大きく矛盾しない氷床の準定常状態が得られた (図 1)。さらに、棚氷底面の融解量を大きく上げる実験を行った結果、数百～千年規模で生じる海洋性氷床の過渡的な後退が計算された。氷床の力学的応答の基本的性質が確かめられたといえる。今後は、現在の南極氷床の再現性が高いモデルパラメータを選定して将来実験用の基本設定を確立し、モデルの記述論文としてまとめ、将来予測・過去再現実験に応用する。

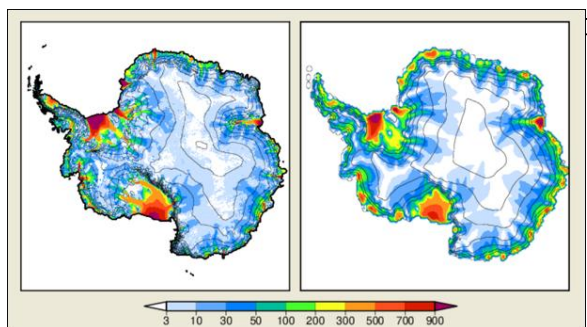


図 1: 氷床高度分布と表面流速。左が観測、右が現在気候の境界条件の下で求めた準定常状態。

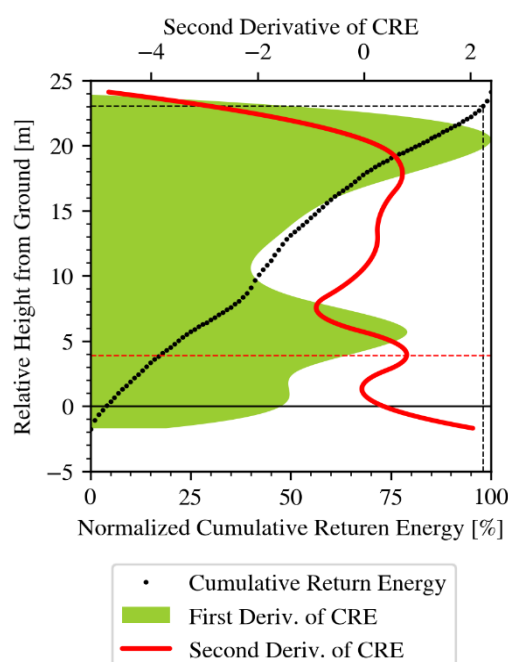


図 2: あるサンプル点における、GEDI L2A プロダクトの累積反射エネルギー (CRE: 黒点)。98%のエネルギーが反射する高度 (RH98) を CH とみなした。

2. 地球システムモデル開発

2.1. CMIP7 シミュレーションに向けた、ISS 搭載型 LiDAR による全球樹冠高・樹冠底高格子データの整備

気候シミュレーションにおいて、樹冠高 (Canopy Height: CH) および樹冠底高 (Canopy Base Height: CBH) は、地表面粗度を介して熱・水・運動量の交換に影響を及ぼす重要なパラメータである。しかしこれまで、気候モデル「MIROC」では、CH・CBH を植物機能型 (PFT) ごとの定数として扱っており、同じ PFT の地域内における不均一性を考慮していなかった。

そこで本研究では、ISS 搭載型 LiDAR「GEDI」および ICESat-2 の観測プロダクトを用いて、全陸域の CH・CBH を推定し、T85 分解能のガウス格子データセットを整備した (図 2)。CH には GEDI L2A プロダクトの RH98 を、CBH には反射強度分布の鉛直 2 階導関数のピークを採用した。さら

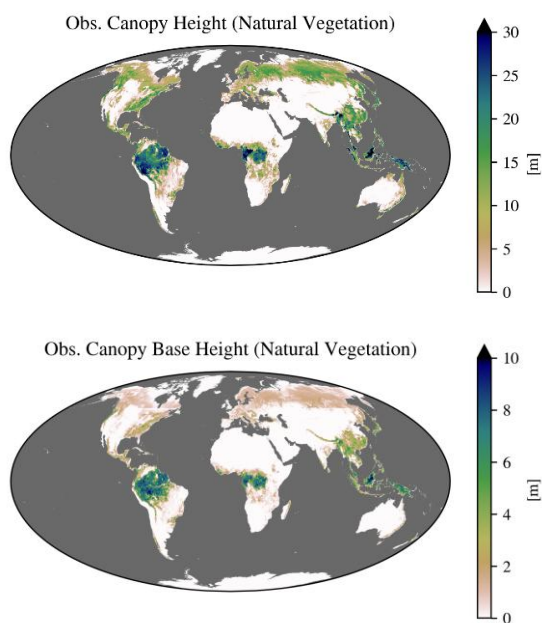


図 3: 衛星観測から推定された、自然植生の CH(上)と CBH(下)

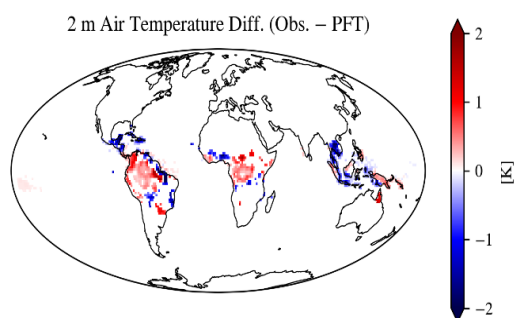


図 4: CH・CBH の差し替えに伴う、2 m 気温の変化。新しいデータセットを用いた場合の気候平均値から、従来の PFT 固定値を用いた場合の気候平均値を差し引いた。

に ESA WorldCover v200 の土地被覆データを利用し、樹木被覆域および耕作地に限定してそれぞれ格子平均を算出した (図 3)。

作成した CH・CBH 格子データを MIROC6 に導入し、従来の定数パラメタとの比較実験を行った。その結果、熱帯林では CH がやや低く、CBH がより深い位置に分布する傾向が確認された。これにより、南米やアフリカなどの常緑広葉樹林域では広範に気温上昇が見られ (図 4)、これは潜熱フラックスの減少と対応していた。一方、タイ・カンボジア周辺や中米などでは、CH の低下にもかかわらず局所的な気温低下が観察された。

CH の低下は一般に、地表風速の増加とバルク係数の減少をもたらす。前者は CH 変化に対して概ね線形に応答する一方、後者は CH の増加に対して指数関数的に増加する。

このため、CH 変化が潜熱フラックスおよび気温に与える影響は、CH 変化の大きさによって符号が反転すると考えられる。

今回作成した新しい CH・CBH データセットは、MIROC7 による CMIP7 向けシミュレーションの一部に境界条件として採用される。

2.2. 光合成順化を考慮した陸域炭素循環応答の解析

本研究では、MIROC-ES2L の陸域モデル (VISIT-e) に光合成の温度順化と CO₂ 順化を導入し、陸域生態系の環境適応が気候システムに与えるフィードバックを定量化することを目的としている。

植物は光合成特性を成長環境に順化させ、炭素獲得を最適化することが知られている。しかし、現行のモデルでは、光合成に関わる各種パラメタが将来においても不変であると仮定されており、順化を考慮していない。このことは将来の炭素循環予測における不確実性の主要因の一つとされている。

そこで本研究では、光合成の温度応答における順化・適応を表現する関数 (Kumarathunge et al., 2019) と CO₂ 順化の関数 (Poorter et al., 2022) を VISIT-e に導入した。地球シミュレータを用いて約 4000 年のスピンアップを実施した後、各順化過程の有無を切り替えた歴史実験を行った。VISIT 単体モデルによる検証では、順化を考慮しないモデルが GPP の長期増加トレンドを過大評価する傾向が確認された。現在、MIROC-ES2L の実験結果について、各順化モデルおよびそれらの組み合わせが GPP に与える影響を解析しており、炭素循環のグローバルな違いを明らかにすることを目指している。さらに今後は、CO₂ 濃度の年 1% 漸増実験および SSP シナリオに基づく将来予測実験を実施し、順化過程が気候変動予測へ及ぼす影響を評価する予定である。

2.3. 陸域生態系モデル VISIT へのリン酸循環の導入と検証

陸域生態系の炭素貯留能力は、温度、光、水などの環境要因に加えて、リンや窒素といった栄養塩によって制限されることが知られている (Wang et al., 2010)。全球炭素循環を再現可能な陸域生態系モデルでは、多くの場合、窒素循環とその光合成プロセスへの影響も考慮されている。一方で、リン酸循環プロセスを採用したモデルは少ない。本研究では、陸域生態系モデルへリン酸循環を導入し、さらに地球システムモデルとの連携を行うことでリン酸循環を介した気候フィードバックの理解を深めることを目的とする。

MIROC-ES2L の陸域過程モデル (VISIT-e) への実装に先立つ予備実験として、スタンドアローン版 (VISIT-b global) へ窒素循環プロセスの詳細化およびリン酸循環プロセスの追加を行い、全球スケールでの窒素・リン制限を考慮したシミュレーションを実施した (図 5)。その結果、低緯度帯ではリンが、高緯度帯では窒素が主要な制限要因となる空間分布が再現され、Wang et al. (2010) や Du et al. (2020) により報告されている窒素・リン制限の全球

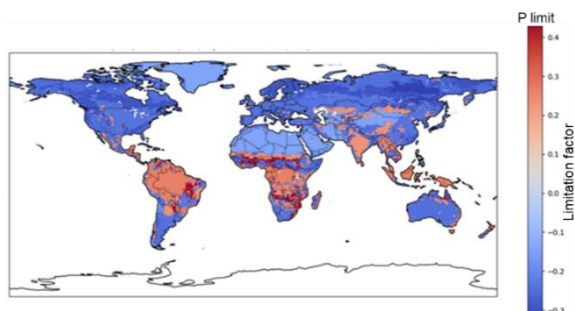


図 5. VISIT-b による窒素・リン制限シミュレーション

分布と概ね整合的な結果が得られた。本実験では、Wang et al. (2010) に基づく窒素・リン酸循環プロセスを VISIT のモデル構造へ適合させたが、今後は関連するモデルパラメータの調整および検証をより詳細に進める予定である。さらに、本モデルを MIROC-ES2L の陸域過程へ導入していく。

3. 高解像度海洋モデルを用いたベーリング海亜表層の温暖化の要因分析

本課題では、ベーリング海亜表層で観測された急激な昇温メカニズムを解明するため、数値モデルを用いた要因分析を進めている。今年度は、北太平洋からの遠隔的な影響を検証するためのアリューシャン海峡におけるナッジング実験、および詳細な塩分収支解析を実施した。ナッジング実験により北太平洋からのシグナルを排除した条件下でも、亜表層の昇温構造は依然として再現された。これにより、当該海域の昇温は北太平洋からの流入変動ではなく、ベーリング海内部のプロセスに起因することが確認された。さらに密度解析の結果、冬季混合層の浅化を引き起こす主要因は塩分であると特定された。また、塩分収支解析を行ったところ、2011 年から 2015 年にかけて塩分傾向の減少が確認され、2015 年には記録的な低塩分値に達していたことが明らかとなった。塩分収支による解析の結果、この海盆域における低塩分化は、大陸棚域から海盆域への渦輸送による淡水供給が支配的な要因であることが示された。

現在、これらの研究成果をまとめた論文を執筆中であり、来年度中盤の出版を目指している。

4. 気候モデルの基盤整備

本課題に加えて様々な課題で利用されている気候モデル 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。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。また、古いコードの維持は GPU など新しい処理系での運用に支障をきたすことも十分考えられ、今後のモデル開発にとって喫緊の課題である。本課題では特に基盤ライブラリを中心にコード整備を継続して行ってきた。今期は Fortran90/95/2003 の仕様で記述され、またいくつかの改良を施した新基盤ライブラ

リ TOUZA への完全移行を果たした。今後の MIROC は TOUZA を用いたコード構造が標準となる。次年度からはより本格的に CPU や GPU 処理系での効率化を図る予定である。

文献

- Du, E. et al., “Global patterns of terrestrial nitrogen and phosphorus limitation”, *Nat. Geosci.* 13, 221-226, <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0530-4>, 2020.
- Kumarathunge, D.P. et al., “Acclimation and adaptation components of the temperature dependence of plant photosynthesis at the global scale”, *New Phytol.*, vol.222, no.2, pp.768-784, April 2019.
- Obase, T. et al., “A one-dimensional temperature and age modeling study for selecting the drill site of the oldest ice core near Dome Fuji, Antarctica”, *The Cryosphere*, 17, 2543-2562, <https://doi.org/10.5194/tc-17-2543-2023>, 2023
- Poorter, H. et al., “A meta-analysis of responses of C_3 plants to atmospheric CO_2 : dose-response curves for 85 traits ranging from the molecular to the whole-plant level” *New Phytol.*, vol.233, no.4, pp.1560-1596, February 2022.
- 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.
- Wang, Y.P., Law, R.M., Pak, B., “A global model of carbon, nitrogen and phosphorus cycles for the terrestrial biosphere”, *Biogeosciences* 7, 2261-2282, <https://doi.org/10.5194/bg-7-2261-2010>, 2010.