

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^{*1,3}, 宮内達也^{*3}, 渡邊達博^{*3}, 中川樹^{*3}, 南久美子^{*3}, 橋本恵一^{*1,2}, 二宮秀輝^{*3}, 加藤 知道^{*3}, Hung-Wei Shu^{*1}, 小長谷貴志^{*1}, 建部洋晶^{*1}, 羽島知洋^{*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: 中層大気、高解像度海洋モデル、地球システムモデル、高解像度海洋モデル、氷床モデル開発

1. エルニーニョ・南方振動に伴う成層圏赤道準 2 年振動の変調

エルニーニョ・南方振動 (ENSO) が準二年振動 (QBO) にどう影響を与えるのかを調べるために、QBO 気候モデル比較国際プロジェクト (QBOi) で、共通のプロトコルで QBO-ENSO 実験が行われた。観測データに基づき再現されたエルニーニョ/ラニーニャの海面水温 (SST) パターンをモデルに与えた。本課題の地球シミュレータの資源を用いて、非定常重力波パラメタリゼーションを用いずに、唯一 QBO が再現可能な気候モデルである、MIROC-AGCM の実験を行った (Kawatani et al. 2024)。

全てのモデルにおいて、ラニーニャの年はエルニーニョの年に比べて QBO の周期が長くなり、実際の観測データとも一致していた。一方で ENSO に伴う QBO の振幅の変調はモデル間によって大きなバラつきがあった。パラメタライズされた重力波のソースが可変である気候モデルの方が、ソースを一定にしたモデルより ENSO の影響をより強く受ける傾向があった。

以前行われた温暖化実験では、QBO の振幅の変化はモデル間で比較的似通っていたのに対し、周期の変化はバラバラであった (Richter et al. 2020)。今回の結果は、それとは対照的で、QBO の周期への影響は全モデルで一致するが、振幅の変調はバラバラである。

ENSO に伴う気候の変化もモデルによって再現された。エルニーニョの年には赤道付近の降水量が増加し、ウォーカー循環が弱まる傾向がある。これらの変化は、重力波の伝播に影響を与え、QBO の変調につながると考えられる。再解析データや CMAP 降水量データとの比較を通じて、ENSO 変調を捉える各モデルの能力も評価した。

本研究は ENSO と QBO の相互作用に関する理解を深めるための重要な一歩である。しかし、モデル間の差異を完全に理解し、より正確な気候予測を行うためには、更なる解析が必要である。特に、重力波のパラメータ化方法の改善、重力波発生源の解明、高解像度シミュレーションの実施などが今後の課題として挙げられる。

2. 地球システムモデル MIROC-ES2L 開発

2.1. 現実的な樹高データが気候シミュレーションに与える影響

地球システムモデル MIROC-ES2L は、気温、土壌水分、二

酸化炭素濃度といった環境条件に応じて植生の成長を葉面積指数として動的に予測する。しかし現行のモデルでは、樹高については植生タイプごとに固定された一定値を与えている。植生が大気に与える物理的影響のうち、熱や水の交換は葉面積指数で表現される一方、運動量交換は樹高に左右される。そこで動的な樹高の予測に向けた予備調査として、本年度は衛星観測に基づく樹高データ (Simard et al., 2011) をモデルに適用し、従来の取り扱いとシミュレーションの結果を比較した。

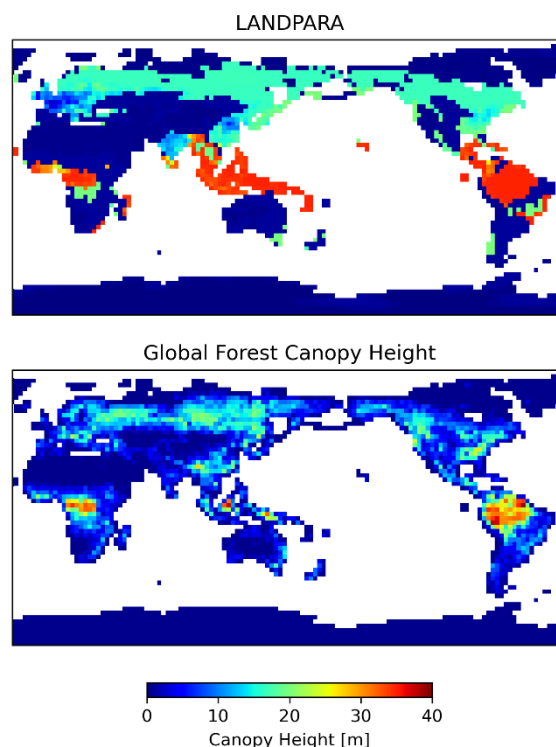


図1 上=従来 MIROC で使用している、植生タイプに基づく樹高。下=衛星観測に基づく樹高。

本調査では、従来の植生タイプで決めた樹高 (図1 上) と観測に基づく樹高 (図1 下) を MIROC-ES2L にそれぞれ与え、そのほかは産業革命以前の境界条件として 100 年間の数値積分を実施した。両実験で実現された気候場の最も顕著な違いは、海洋大陸などの沿岸部で見られる海面水温の低下 (図2) であった。これは、観測データでは従

来の方式に比べ樹高が低く設定されたため、下層の風速が強まり、海洋表層が冷却を受けたことが原因と考えられる。またこの変化に伴い、熱帯アジアから太平洋地域における降水量が変化したほか、GPPをはじめとする植生の活動にも影響が出た。

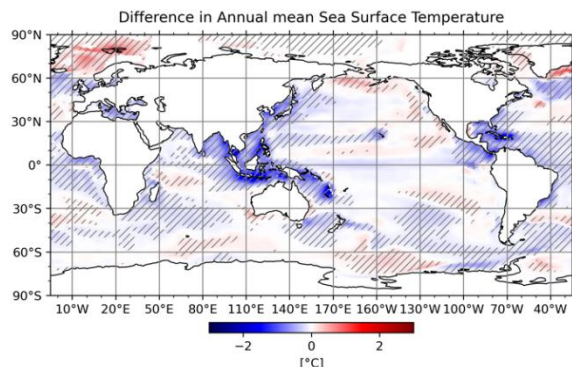


図2 観測に基づく樹高を用いた実験と植生タイプに応じた樹高を与えた実験の間の、年平均海面水温の差。

今後の課題として、海洋大陸などの細かい地形における樹高の適切な取り扱いについて検討する必要がある。またモデル内部で樹高を動的に予測する手法についても調査を進める。

2.2. MIROC-ES2L 陸域過程へのリン酸循環の導入

本研究では、MIROC-ES2Lの陸域モデル(VISIT-e)にリン酸循環プロセスを追加し、大気・海洋・陸域間の相互作用を分析することを目的としている。現在のVISIT-eにはリン酸循環プロセスが組み込まれておらず、そのため、リン酸制限が陸域生態系の光合成量に与える影響を考慮できていない。海洋へのリン酸の流入量は、現状ではVISIT-eの窒素循環プロセスを基にレッドフィールド比を用いて計算している。これをVISITで新たに計算されたリン酸流入量へと置き換えることで、陸海生態系におけるリン酸循環が気候に与えるフィードバックを解析可能にする。単体モデルのVISITでは、すでにリン酸循環プロセス(VISIT-CNP)を組み込み、葉や土壌プールにおけるリン酸現存量の検証作業を進めている。このプロセスをVISIT-eに移植する作業も現在実施中である。今年度から地球シミュレータの利用を開始し、現在、開発したモデルの地球シミュレータへの移植、シミュレーション環境の整備、最新バージョンのMIROC-ES2Lとの整合性の確認作業を行っている。本格的なシミュレーションは陸域のリン酸循環および海洋への流入を実装した後、来年度から開始する予定である。

2.3. 植物の光合成順化が地球温暖化に与える影響のMIROC-ES2Lによる解明

植物光合成が瞬間的な環境条件だけでなく、数日から数年にわたる長期的な環境変化にも依存することが広く知られている。高CO₂濃度下での光合成の促進(施肥効果)は長く続かず、数週間後には光合成能力が低下するダウンレギュレーション(CO₂順化)が生じる。植物はまた、生

育温度が上昇すると数日から数週間かけて光合成の最適温度を変化させ、より効果的に光合成を行えるようになる(温度順化)。しかしながら現行のモデルでは、光合成の各種パラメータが将来においても維持されることが仮定された固定パラメータとなっており、順化を考慮していない。このことはCO₂濃度の上昇とそれに伴う温暖化を過小評価している危険性がある。そこで本研究ではMIROC-ES2Lの陸域過程モデルVISIT-eに光合成の温度順化(Kumarathunge et al., 2019)・CO₂順化(Poorter et al., 2022)のアルゴリズムを導入し、陸域生態系の環境適応が気候へ与えたフィードバックを定量化する。順化の導入にあたり、Monsi & Saeki (1953)の光合成モデルをde Pury & Farquhar (1997)に置き換えた。現在スピンアップが進行中であり、炭素蓄積量の平衡後、歴史実験(1850-2014年)を各順化モデルのオンオフ切り替えを行い実施する。続いてSSP1-2.6、SSP3-7.0、SSP5-8.5シナリオを使用した将来予測実験(2015-2100年)を行う。順化のオンオフの差から、気温、降水量、大気中のCO₂、および炭素と水循環のグローバルなバランスの違いを解析し、長期の植物適応が地球炭素循環と水循環に与える影響を明らかにし、その気候への影響を評価する。

2.4. 陸域起源のN₂O

MIROC-ES2Lを用いた研究の一環として、MIROC-ES2Lを用いて陸域から放出されるN₂Oが地球温暖化に及ぼす影響を評価する計算を行う予定である。この結果をもとに、MIROC-ES2L内でのN₂O関連プロセスの改良や、陸域からのN₂O放出量を既存の観測データと比較し、モデルの検証を行うことを目指す。さらに、土壌のN₂O生成に関連するパラメータを調整した後、MIROC-ES2L-CHEMに適用し、大気中のN₂O濃度やその増加に伴う植生指標(GPP、NPP、LAIなど)の変化を解析することで、今後のMIROC-ES2Lのさらなる改良につなぐことが期待される。

3. ベーリング海における潮汐インパクトと亜表層の急速な温暖化

本研究では、渦解像と渦許容の海洋大循環モデルを使って、ベーリング海における潮汐インパクトと亜表層の急速な温暖化のメカニズムを調べた。渦解像の海洋大循環モデルから、潮汐インパクトにより垂直混合が強化され、塩分の均一化によって成層が緩み、塩分躍層が深くなることで、冬季混合層(WML)と海洋貯熱量が観測値と一致した。現在、アリューシャン海峡やベーリング海斜面流における垂直拡散係数が塩分や熱の分布に与える具体的な影響を明らかにするための実験を行っている。

さらに、2014年以降に起きたベーリング海で1.0 °Cの急速な中層温暖化の原因を渦許容の全球海洋大循環モデルで実験した。初期のモデル結果では、北東太平洋の熱波(「ブロブ」)などの太平洋からの影響ではなく、局所的な変化が主な原因であることが示された。現在、海水の融解や表面塩分フラックスの変化が温暖化に与える影響を評価するための実験が進められており、全球温暖化に対する海洋の応答を理解することを目指している。

5. 氷床モデル開発

本研究課題で開発を続けている棚氷力学有り版氷床モデル IcIES-2 は、理想的な条件下での計算に一定の実績があるものの、南極現実地形では氷床流速分布を安定して求めることが難しく、限定的な応用しか実現できていなかった。現在その原因の調査を進めて、引き続き現実地形での安定的な運用に向けて開発を継続している。現在の南極地形・涵養量の境界条件のもと、解像度を粗めの 40km の設定とし、氷温度を等温とした理想的設定の下で行った実験を解析している。来年度も継続して、他氷床モデルとの比較も行いながら氷床流速分布を安定に求めるためのモデル・実験設定の改良を進める。

文献

- Kawatani, Y. et al.: QBOi El Nino Southern Oscillation experiments Part I: Overview of experiment design and ENSO modulation of the QBO, EGU sphere, doi: 10.5194/egusphere-2024-3270, 2024.
- Richter, J. H. et al.: Response of the quasi-biennial oscillation to a warming climate in global climate models, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, doi:10.1002/qj.3749, 2020
- Simard, M., N. Pinto, J. B. Fisher, and A. Baccini: Mapping forest canopy height globally with spaceborne lidar, J. Geophys. Res., 116, G04021, doi:10.1029/2011JG001708, 2011
- Kumarathunge, D.P. et al.: Acclimation and adaptation components of the temperature dependence of plant photosynthesis at the global scale. New Phytol, 222: 768-784. doi: 10.1111/nph.15668, 2019
- Poorter, H. et al.: A meta-analysis of responses of C3 plants to atmospheric CO₂: dose-response curves for 85 traits ranging from the molecular to the whole-plant level. New Phytol, 233: 1560-1596. doi:10.1111/nph.17802, 2022
- Monsi, M & Saeki, T.: Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. Japanese Journal of Botany 14: 22-52, 1953
- de Pury, D.G.G. and Farquhar, G.D. : Simple scaling of photosynthesis from leaves to canopies without the errors of big-leaf models. Plant, Cell & Environment, 20: 537-557. doi: 10.1111/j.1365-3040.1997.00094.x, 1997