

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^{*1}, 河谷芳雄^{*1,3}, 橋本恵一^{*1,2}, 二宮秀輝^{*,3}, 羽島知洋^{*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、気候モデル基盤ライブラリ、地球システムモデル、氷床モデル開発

1. 中緯度海洋前線が大気波動を介して中層大気循環へ与える影響

2000 年代始めのころまで、熱帯域では海洋が大気に対して能動的、中緯度では海洋は大気に対して受動的であると認識されていた。その後、人工衛星観測の発展や高解像度数値モデル実験が可能になったことにより、中緯度で海面水温の大きな水平勾配が見られる場所、すなわち海洋前線とよばれる領域で、海洋が大気に対して能動的に働き、対流圏の傾圧不安定波や降水活動を変調させることが分かってきた。

中緯度の傾圧波活動は大気波動の一種である大気重力波の主要な励起源であることが知られている。重力波は運動量を対流圏から中層大気へ運び、砕波する際に持っている運動量を背景場に渡すことで成層圏・中間圏（両者を合わせて中層大気と呼ぶ）の大循環を駆動している。とくに中間圏では大気重力波の運動量輸送が重要である。この事実から海洋前線が傾圧波を変調することで、大気重力波の生成を変調し、結果的に中層大気循環にまで影響を与える可能性が考えられる。

本研究では、中間圏界面（高度約 85km）を含む、T106L168（水平解像度 120km、鉛直解像度 550m）のハイトップ MIROC-AGCM を用いて 2 つの実験を行った。1 つは、南インド洋の観測値に基づく海面水温の南北勾配を与えた実験（コントロール実験：CTL）、もう 1 つは人工的に中緯度 SST の南北勾配を取り除いたもの（No-Front 実験：NF）である。どちらの実験にも現実的な地形を含み、オゾンや SST は、気候値の年周期を与えた。なお、モデルで陽に分解された大気波動の影響のみを調べるため、非地形性重力波パラメタリゼーションは組み込んでいない。本研究では、南半球の冬に相当する 150 年平均した 6-7-8 月（JJA）平均場に焦点を当てた。

NF 実験と比べ CTL 実験では、中緯度海洋前線付近で東西に延びた南北幅の狭い降水バンドが形成され、傾圧波活動が活発であった。その他の特徴を含め、先行研究と整合的であった。傾圧波帯で生成される重力波の振幅は NF 実験に比べ CTL 実験で大きく、重力波に伴う運動量フラックスがより多く中層大気へ運ばれていた（図 1 参照）。波動による平均流加速を評価できる Eliassen-Palm flux 解析により、NF 実験に比べ CTL 実験では高度 0.03hPa 付近まで、大気波動による西風減速効果が有意に大きかった。一方で海洋前線無の実験では、傾圧波活動が著しく弱

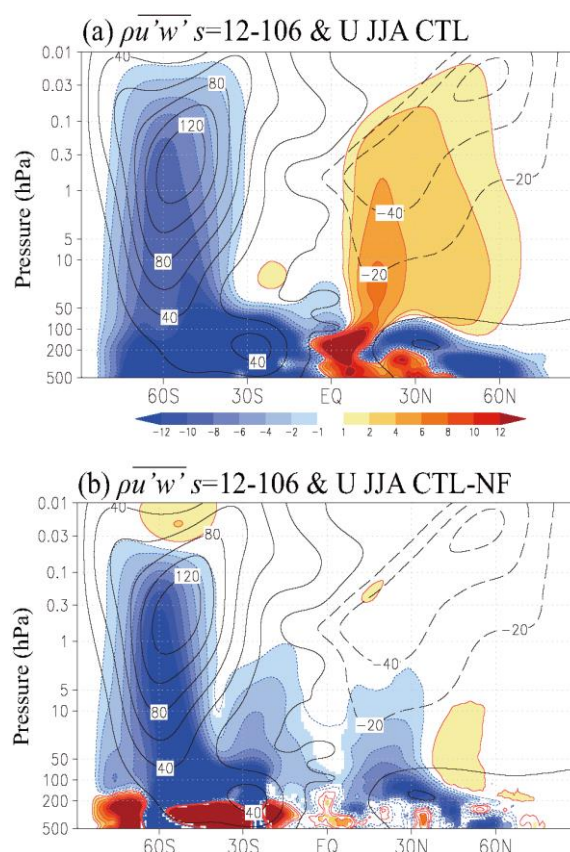


図 1. 気候値 6-7-8 月平均の重力波に伴う帯状平均運動量フラックスの緯度—高度断面図。(a)海洋前線あり実験、(b)海洋前線あり実験から、海洋前線なし実験を引いたもの。統計的に有意な領域に色。コンターは海洋前線あり実験における帯状平均東西風。実線が西風、破線が東風を表す。

まり、振幅のより小さい重力波が励起されるため、より高い高度での重力波が砕波する様子が見られた。海洋前線有の実験の方が、より現実的な中層大気循環の構造が再現されることが分かった。これらの結果は、中緯度海洋前線が中層大気循環を適切に再現するために重要であることを示すものである。

本実験は解像度 T106 で行われており、重力波の限られたスペクトル領域のみモデルの中で表現されている。実際の大気では、海洋前線周辺で生成された重力波がこれらのシミュレーションの結果よりも中層大気により顕著

な影響を与える可能性がある。これを検証するためには、海洋前線の詳細な構造、より広範な重力波スペクトル領域を表現可能な高解像度のハイトップ気候モデル実験をすることが求められる。

2. 地球システムモデルの開発と応用

地球システムモデル MIROC-ES2L は、陸上植生の繁茂度を表す葉面積指数 (LAI) をモデル内部で動的に予測した場合、従来型 AOGCM のように LAI 観測値固定とした場合に比べて El Niño-南方振動 (ENSO) の振幅を大きく表現する。ENSO に対する陸上生態系の応答を調べた研究は数多い一方で、陸上植生が ENSO に影響を及ぼす反対方向の影響の可能性を検討した研究は限られている。そこで本研究では、MIROC-ES2L を利用して LAI に関する感度実験を行い、陸上植生が ENSO 振幅にどのようなプロセスで影響を与えるかを調査した。

はじめに衛星観測に基づく LAI 月別気候値に固定した実験とモデル内で LAI を予測する実験の間で El Niño 成長に対する各フィードバック過程の寄与を比較した。その結果、後者では東西移流、Ekman、南北移流フィードバックが活発化していることがわかった。これは東部赤道太平洋の海面水温 (SST) 気候値が上昇し大気下層が収束的になったことで、対流の発達に好適な環境が形成されたためと考えられる。

引き続き地域別に LAI を差し替える感度実験を実施した。一連の実験の結果、動的 LAI 導入に伴う ENSO 振幅強化は、アンデスの LAI 過大評価に伴う地表気温の低下と熱帯対流圏の循環の変化、そして SST 気候値の変化によって引き起こされていたと結論づけられた。ただし南米以外、特にアフリカの顕著な LAI バイアスもまた全球の大気循環パターンに大きな影響を与えており、気候システムの再現性向上には世界各地の陸上植生表現の改善が求められる。

現在気候における熱帯陸上の対流パターンと植生の関係について扱った研究は少ない。今年度の研究から得られた示唆をもとにして、今後は植生と大気循環の相互作用や、気候変化に伴う共進化について ESM を用いて調査を進める。

一方、MIROC-ES2L の開発や研究の加速を見込み新規の利用者への普及も本課題での重要な項目である。

年度当初の予定には含まれなかったが、本課題の新規のサブ課題の一環として ES 利用や、MIROC-ES2L のコンパイルや実行方法など、基本的なスキルの教育と利用者の学習が達成できた。今後は、MIROC-ES2L を用いて新しい展開を計画している。一例として、陸から放出される N₂O が地球温暖化に与える影響を計算する予定である。その結果に基づき MIROC-ES2L 内の N₂O 関連のプロセスの改良や、MIROC-ES2L で計算した陸からの N₂O 放出量を既存のフラックスデータと比較することによる検証などを考えている。土壌の N₂O 生成に関わるパラメータを調整した後、MIROC-ES2L-CHEM に適用し、大気中の N₂O 濃度や濃度増加に伴う植生パラメータ (GPP、NPP、LAI など) の変

動について分析する。また、将来の気候パラメータを SSP シナリオに分けて計算し、グローバルな N₂O 放出量と気候変動の強度との依存性を分析する。詳細な研究計画については、これから具体的に詰めていき、来年度からの本課題の一環で行う。

3. 氷床モデル開発

半球規模に広がる氷床過去の氷床を除き、一般的に氷床モデルは球面上の氷床を極投影法 (polar stereographic projection) を用いて平面化した構造で記述することが多い。極投影法による表現は等角の性質をもつが、緯度により長さ・面積に歪みがあることが知られている。

一つ一つのモデル格子ごとに格子の長さの違いを考慮した氷床モデルは存在するが、これまでその氷床モデル実験に対する影響を詳細に調べた研究はなかった。

そこで本研究では開発中の氷床モデル IcIES に格子の歪み効果を導入し、これまでの氷床モデル実験の結果がどのように影響されるかを明らかにすることを目的としたモデル開発を行うことにした。

本年は歪みをどのように導入するか、および歪みをどのように計算するかの前備的な調査を行った。

歪みの導入自体は実は単純であり、有限差分の場合は各矩形格子の実際の長さとその格子が表す実際の面積を計算すればよい。前述の投影法の性質から等角が保たれるという特徴があり、そのため格子の四つの角度が直角で、なおかつ四辺の長さが異なる、という特殊な状況を考慮するのみでよい。勾配 (gradient) は二点間の長さを正しく与えるだけで歪みの効果を実現できる。発散 (divergence) については、フラックスに辺の長さを掛けたものを流入流出と考え、それを格子の面積 (これも一つ一つの格子ごとに異なる) で割る、という演算で置き換えるだけで済む。

従って長さと面積を正しく計算することが必要であるが、これは自明ではない。特に通常の氷床モデルは真の球面ではなく、回転楕円体を極投影で平面化しているため、それぞれの座標変換がさらに複雑になるためである。

そこで数値的に長さと面積を計算する手法を実装した。極投影法では任意の座標で長さがどう歪むか (scale factor) の定式が存在する。それを単純に数値積分することで長さと面積を求めた。計算の収束性を精度よく確認するために、積算のアルゴリズムを複数実装して比較をおこなったところ、辺の長さに関しては採用したどの手法でも数値精度の限界近くまで求められることが明らかとなった。面積は scale factor を自乗して積算するという性質により、長さと同程度の精度を保つことが難しいことも明らかとなった。

来年度はこれを踏まえて、歪みの精度、歪みの効果などを詳細に議論する投稿論文を執筆する予定である。この手法が確立された場合は半球規模の氷床モデル実験を精度よく計算することが期待される。