

令和元年6月10日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05559

研究課題名(和文)統計的雲構造の解析から構築する積雲対流モデル

研究課題名(英文)Cumulus parameterization based on statistical cloud structure analysis

研究代表者

馬場 雄也 (BABA, Yuya)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・アプリケーションラボ・研究員

研究者番号：60512861

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：統計的雲構造の解析に基づいて大気大循環モデルの心臓部である積雲対流モデルの構築を行った。従来の積雲対流モデルは経験的な方法でモデル化が行われていたが、本研究では計算格子では解像できない雲構造をうまく表現することに着眼点を置き、詳細な雲構造の解析に基づくモデリングを行った点で従来のモデリングとは異なる。新しいモデルを用いた過去再現実験を実施し、従来のモデルに比べて、大気モデルで再現される気候場と大気の変動が、より良く再現できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大気モデルは将来気候を予測する気候モデルにとって重要なモデル要素であり、その中でも積雲対流モデルは全地球規模で大気大循環を支配する、大気モデルの心臓部とも呼ぶべき最重要モデルである。従来は経験的なモデリング手法に基づいていたため、モデルが内包する不確実性を把握することは困難で、物理性能を向上させることも困難であったが、本研究では解像できない雲構造をより正確に表現することに着眼点を置いて、性能向上に成功した。性能向上を実現したモデルは将来予測に役立つだけでなく、モデリングの手法も今後のモデル開発の方法として役立つことが期待される。

研究成果の概要(英文)：A new cumulus parameterization which is regarded as a heart of atmospheric general circulation model has been developed based on statistical cloud structure analysis. Past parameterizations have been developed by empirical methods, however, the present parameterization was developed aiming at representing unresolved cloud structure more precisely based on detailed analysis on statistical cloud structures. Using atmospheric general circulation model and atmosphere only climate simulation, the present parameterization could simulate better climatological features and better atmospheric variability than the existing parameterization.

研究分野：気象・気候

キーワード：積雲対流 大気大循環モデル 気候値 季節内変動

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

気候モデルが持つ不確実性の多くは、対流を伴う積雲を表現する積雲対流モデルに由来することが知られている。この不確実性を解消するために、これまで観測データや再現実験などを用いて改良や不確実性の低減が試みられてきたが、未だに不確実性によるバイアスを持たない万能な積雲対流モデルは確立されていない。これは大気大循環モデルにおいては積雲が計算格子では解像できない時空間スケールを持ち、同時に大気大循環中で多様な役割を果たすことに原因がある。気候モデルでは長期的・巨視的な時空間スケールの雲の挙動を再現することに着眼点を置いているため、個々の積雲を解像することはできず、モデルの中にはどうしても不確実性が介在してしまう。一方で、雲に由来する不確実性を低減するために、雲解像モデルと呼ばれる高解像度・高計算負荷のモデルが研究や現象予測のために利用されている。しかしながら、雲解像モデルで用いられる雲物理は短期的な予測・予報に着眼点を置いているため、計算負荷が非常に高いにも関わらず、微視的なモデルが内包する不確実性に由来して、長期的・巨視的な時空間スケールの雲の挙動を再現することが必ずしも得意ではないことが近年の研究から明らかにされている。積雲対流モデルと雲解像モデルは以上の背景から、それぞれが得意とする雲の時空間スケールは逆転した関係にあった。そのためか、これまでのモデリング研究では、短期的・微視的な視点に基づいて、雲解像モデルを用いて経験的に積雲対流モデルを改良する試みが行われてきた。しかし、前述したようにそれぞれのモデルが得意とする時空間スケールが異なることは無視されており、改良された積雲対流モデルには適用限界や、モデルパラメータの不整合が見られることが指摘されていた。

2. 研究の目的

本研究では以上の背景から、従来のモデリング手法に存在する時空間スケールの不整合に着目し、積雲対流モデルの雲構造の表現方法を、統計的な雲構造の解析結果をもとに改善し、不確実性を取り除くことに着眼点を置いた。積雲対流の雲構造の統計的な特徴を捉え、モデル化することができれば、様々な時空間スケールの積雲対流の雲構造も表現できるはずである。この統計的な雲構造の特徴を抽出するために、周囲環境場と積雲内の質量交換量、雲構造形成過程の関係を明らかにし、詳細な雲構造を反映した積雲対流モデルを構築する。観測（再解析）データと雲解像モデルを使ったどうか実験とを用いて統計的な雲構造の抽出とモデル化を行い、積雲対流モデル内部で考慮する雲構造の改善を試みる。また、構築した積雲対流モデルを用いて、気候再現実験における不確実性低減プロセスを明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では以下のステップに従い、目的とする積雲対流モデルの構築を試みた。

(1) 雲解像モデルを用いた同化実験の実施 雲解像モデルには雲微物理に由来する不確実性が存在するため、積分時間が長いほど結果に不確実性が蓄積する。そのため、同化なしのシミュレーションでは積雲の巨視的、長期的特性を再現することは難しい。本研究では観測データが充実した再現実験を選択し、雲解像モデルを用いて気象データを同化させることで不確実性を除外しながら数ヶ月～半年程度の時間積分が必要な同化実験を実施する。同化方法にはナッジングを用いて、実験は外部強制力を加えながら行う。

(2) 統計的雲構造の解析 得られた雲解像モデルのシミュレーション結果を解析し、観測データとの整合性をチェックし、統計的な雲構造を抽出する。雲構造の抽出には非対流性の層雲を取り除き、対流性の雲を抽出する手法を用いる。雲内部の運動量保存式を用いて、雲内部の上昇流の分布、周囲環境場との質量交換量、雲内部の水・エネルギー収支を決定するために重要なパラメータとなるエントレインメントを見積もる。必要に応じて他物理量も整理しておく。統計的に雲構造を整理するため、再現実験結果から浅い積雲と深い積雲に抽出した積雲を分け、見積もった物理量のコンポジット解析を行う。このコンポジット解析から雲内部構造の統計的な分布を抽出する。

(3) 積雲対流モデルの構築 周囲環境場と雲の質量交換は雲の仕事量に応じて行われる。質量交換量と雲の仕事量は雲内部の運動量収支に影響を持つので、運動量保存式を用いて質量交換量と雲の仕事量の関係式を導くことができる。また、質量交換量と雲内部の水・熱は雲内部の収支式で関係づけられているので、結果として雲の仕事量と質量交換量との関係式を与えることで、雲内部の構造を与えることができる。コンポジット解析から、雲の仕事量と質量交換量との関係式を導き出し、雲構造の表現に用いる。既存のスペクトル型積雲対流モデルの雲構造の表現を本研究の結果に基づき修正し、一次元カラムモデルを構築、その特性を把握する。

(4) 気候モデルを用いた積雲対流モデルの特性解析 構築した積雲対流モデルを気候モデルに組み込み、低解像度の気候モデルを用いた気候再現実験を実施することで、積雲対流モデルにおける雲構造の表現が気候場の再現に及ぼす影響を解析し理解する。積雲対流モデルの影響を明確にするために、比較対象として従来型の積雲対流モデルを併用し、積雲対流モデルのみを変更した気候再現実験を実施する。再解析データを比較対象として、シミュレーションによるバイアスの改善傾向を解析する。

4. 研究成果

(1) 雲解像モデルを用いた実験の実施と雲内部パラメタリゼーションの導出 雲解像モデル

を用いて長期積分が必要な実験を実施した。解析結果により追加実験が必要であることが分かり、結果として①全球エネルギー収支を模擬した放射対流平衡実験、②TOGA-COARE 実験、③高解像度放射対流平衡実験の3つの実験を実施した。

①放射対流平衡実験 全球エネルギー収支を模擬した放射対流平衡実験は Grabowski (2006) で提案されている実験である。この実験は Grabowski (2011) や Baba (2015) でも使用され、全球エネルギー収支に及ぼす雲微物理の影響が調べられており、適切な雲微物理を用いればエネルギー収支が妥当に再現できることが分かっている。実験では代表的な大気初期条件、短波入射、地表面(海面)の特性を境界条件として3~4ヶ月程度の時間積分を行う。ここで水平解像度は2km程度である。計算結果は3時間ごとに出し、得られた各種物理量を用いて代表的な積雲の構造を抽出した。図1(上図)に得られた深い対流と浅い対流のエントレインメント、デトレインメントの鉛直分布を示す。図より積雲の質量交換料は対流の深さによって異なり、浅い対流では下層で強いエントレインメントが現れ、深い対流では下層から中層にかけて強いエントレインメントが現れることが分かる。この傾向は既往研究で示されている分布と整合的である。さらに雲内部の各種物理量がどのような関係になっているかを調べた。雲内部の対流をもたらす仕事は浮力によって担われており、浮力は周囲大気との質量交換によって増減することが知られている。そこで浮力とエントレインメント、デトレインメントの関係をコンポジット解析から得られた鉛直分布から調べた(図1下図)。各物理量は雲内部の運動量保存式で現れる項の形で評価した。結果、浮力項はエントレインメント項とデトレインメント項の線形的な組み合わせで表現されることが明らかになった。この事実は浮力がエントレインメントとデトレインメントで増減することと整合的で、エントレインメント項が浮力項と部分的に比例関係にあるとする既往研究と整合している(Gregory 2001)。しかし、既往研究と異なり、この解析では雲頂付近の浮力はデトレインメントによって失われる事実が解析に反映され、その結果導出された関係式も異なるものとなった。

②TOGA-COARE 実験 雲解像モデルを用いた TOGA-COARE 実験(Wu et al. 1998)は熱帯の観測キャンペーンに基づく実験で、観測データや実験設定に関する論文が多数出版されており、本研究の目的に適した実験である。積分時間は90日程度とし、規定の実験設定に従って実験を実施した。ただし、1000km程度の水平計算領域を確保しなければならないため、水平解像度は2km程度としている。図2に実験から再現された外向き長波放射、降水のホフメラー図の比較を示す。長波放射、降水の傾向ともに観測とよく一致しており、モデルは観測から得られた雲の挙動をよく再現していることが分かる。この TOGA-COARE 実験から得られた雲を先の放射対流平衡実験と同様に解析し、得られた浮力項、エントレインメント項、デトレインメント項の鉛直分布を図3に示す。図より各項の鉛直分布には放射対流平衡実験と比べて違いが見られる。しかし、各項の相互関係や相互の影響は実験が異なっても同様であり、浮力項をエントレインメント項とデトレインメント項で表すためのパラメータには多少の違いのみが見られることが分かった。従って、実験が異なると現れる雲の特性が異なるために、パラメータに変動はあるが、先に示した関係式は定性的に変わらないことが示唆された。そのため、以下の積雲対流モデルの構築にあたっては放射対流平衡実験から得られたパラメータを使用することとし

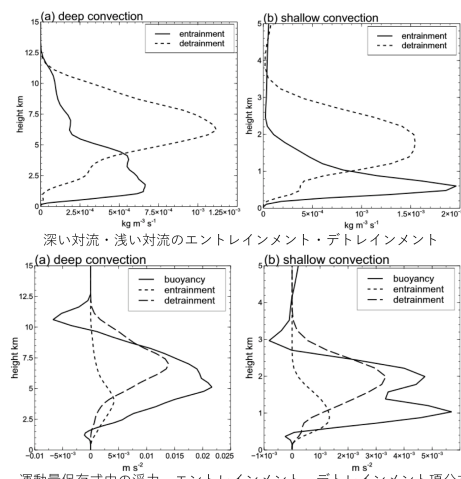


図1：深さの違う対流のエントレインメント・デトレインメントの比較(上図)、浮力項、エントレインメント項、デトレインメント項の比較(下図)

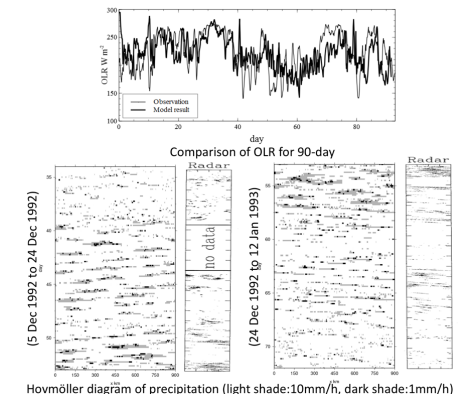


図2：TOGA-COARE 実験から得られた領域平均長波放射(上図)及び降水のホフメラー図の比較(下図)

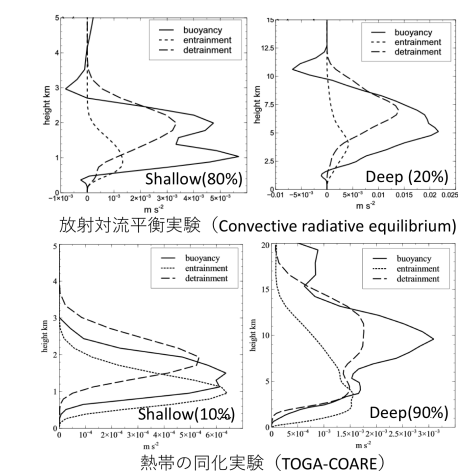


図3：浮力項、エントレインメント項、デトレインメント項の鉛直分布の比較。%は全積雲対流における浅い・深い対流の割合を示す

た。

③高解像度放射対流平衡実験 雲解像モデルでは個々の積雲を解像するために、通常1~2km程度の水平解像が必要である。上記の実験では既往研究から得られているこの知見に基づいて2km程度の解像度で実験を行ってきた。しかしながら、雲内部構造やエントレインメント率の計測に着目した研究では2km程度の解像度では構造を捉えるのに解像度が不十分であることが指摘されており、本研究においても論文レビューにおいて解像度を上げる必要性が指摘された。そこで、先の放射対流平衡実験の設定を見直し、解像度を600m程度まで引き上げた。さらに、採用していたエントレインメントの計測手法(Romps 2010)には問題があり、エントレインメント量を過剰に見積もる傾向があることから、補正計算手法を導入して過剰な見積もりを補正することとした(Dawe and Austin 2011; de Rooy et al. 2013)。これらの修正を反映して再度実験を実施し、雲構造を解析して得られた雲内部の物理量分布を図4に示す。図より、低解像度の実験結果に比べて分布は変化するものの、定性的な分布は変わらないことが分かる。さらに浮力項をエントレインメント、デトレインメント項で表すために必要なパラメータもほぼ変わらないことが分かった。この結果をもとにして、積雲対流モデルで重要なモデルであるエントレインメント率のモデルを考案した(Baba 2018)。実際に計測したエントレインメント項とモデル化したエントレインメント項を比較したところ、従来モデルよりもよく計測したエントレインメント項を再現することが比較から明らかになった(図5左)。さらに、このモデルを運動量保存式へと戻し、考案したモデルが運動量の保存をどれぐらい満たすかを保存式中の右辺・左辺の分布を比べることで調べたところ、深い対流では雲頂付近で多少のエラーが現れるものの、概ね運動量の保存をよく満たすことが分かった(図5右)。

(2) 積雲対流モデルの構築 通常気候モデルとして利用される大気モデルは、100km程度の低解像度のモデルであり、個々の雲を解像しないので、一つの水平計算格子には複数の積雲対流が含まれることになる。そのため、積雲対流モデルにおいても、一つの計算格子に複数の積雲が存在すると仮定してモデル化することが合理的である。積雲対流モデルには大きく分けてバルクモデル(Tiedtke 1989)とスペクトルモデル(Arakawa and Schubert 1974)があり、後者は複数の雲タイプが一つの計算格子に存在することを許しているため、本研究においてもスペクトルモデルの定式化を採用した。スペクトルモデルではスペクトル的に分布した個々の雲タイプを表現するために、パラメータを振らなければならないが、これにはChikira and Sugiyama (2010)で採用されている雲底雲内部速度をスペクトル的に分布させる方法を採用した。ただし、雲底雲内部速度は上記の解析の結果、スペクトル分布に偏りがあることが分かっていたため、雲解像モデルを用いた実験結果に基づく値を利用した。さらに水・熱・運動量収支式はArakawa and Schubert (1974)より精緻な表現を採用しているTiedtke (1989)やECMWF (2014)などと共通の収支式を採用した。収支式は上昇流と下降流に大きく分けることができ、下降流はバルク的に取り扱うECMWF (2014)のモデル化に従った。

上記のように構築した積雲対流モデルを用いて1次元のカラムモデルを構築し、1次元実験(Zhang and McFarlane 1995)を実施して、モデルの基本的な違いを検証した。比較対象としたのは浮力項をエントレインメント率の見積もりを使用している、類似のモデルであるGregory (2001)のモデルである。ここでは最も違いが明瞭に現れた雲フラックスの鉛直分布についてのみ示す(図6)。図より新しいモデルでは雲底雲内部速度が上昇するに従って雲タイプが深い対流から浅い対流に遷移している様子が分かる。この傾向は雲解像モデルから得られた統計値と整合的で、浅い対流ほど雲底雲内部速度は大きな値を示した。さらに、Gregory (2001)のモデルでは新しいモデルに比べて浅い対流が卓越する傾向が確認された。

(3) 気候モデルを用いた積雲対流モデルの特性解析 過去の気候を大気モデルで再現し、モデル間のバイアスを評価する実験として大気モデル間相互比較プロジェクト(Atmospheric Model Intercomparison Project: AMIP)実験が既往研究により提案されており、本研究でも積雲対流モデルによるバイアスを評価するため、この実験の設定に従って実験を行った。比較した積雲対流モデルは、Gregory (2001)を採用した積雲対流モデルである。実験では、オゾン分布、海面水温分布、海水分布などを再解析データから与えて、外部強制力をかけないフリーランとし

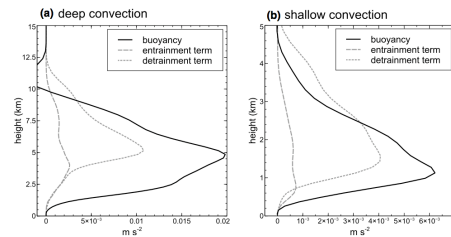


図4：高解像度放射対流平衡実験から得られた浮力、エントレインメント、デトレインメント項の鉛直分布

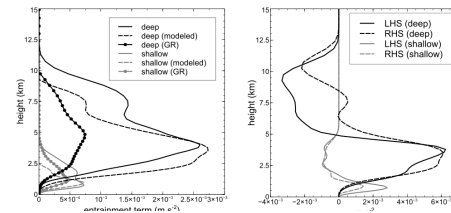


図5：モデル化したエントレインメント項の検証(左図)、運動量保存式を用いた検証(右図)

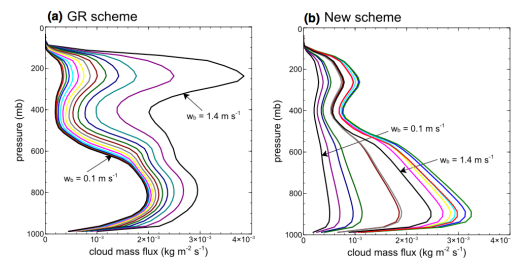


図6：1次元実験から得られた雲底雲内部速度別の雲フラックスの鉛直分布(左：Gregory 2001, 右：新しいモデル)

Gregory (2001)のモデルに従った。

て数値積分を行う。時間積分期間は 1979 年 1 月から 7 年程度とした。図 7 に最も大きな違いが現れた気候値分布として、年平均の降水分布を示す。どちらのモデルでも熱帯収束帯が南太平洋で重複するよく知られたバイアス (double-ITCZ) は改善しているが、新しいモデルではさらに西太平洋で正の降水バイアスの改善が見られている。また、この傾向は対流性の雲によるものであり、積雲対流モデルを改良したことによるものであることが分かる。この他、気候値に関しては長波・短波放射分布に大きな違いが見られた。Gregory (2001) では深い対流と浅い対流でパラメータを本来分けないとはいけませんが、Chikira and Sugiyama (2010) に従って浅い対流のパラメータを統一して設定しており、その結果浅い対流を過剰に見積もる傾向があり、特に短波放射分布のバイアスが大きいことが分かった。

積雲対流スキームは個々の雲を解像しないため、熱帯大気の支配的な内部変動である Madden-Julian 振動 (Madden-Julian oscillation, MJO) をうまく再現できないことが知られている。これは MJO が様々な雲で構成される大気の変動であることに由来すると推定されている。本研究では積雲対流中の個々の雲の再現性を向上させることを目的として改良を加えたため、MJO の再現性について解析を行った。図 8 に対流結合赤道波のスペクトル分布を示す。図よりモデルによって再現される対称成分と反対称成分は、新しいモデルの方がより観測データに近いことが分かる。どちらのモデルでも MJO に対応するシグナルは確認できるが、対称成分では東進ケルビン波が新しいモデルの方がよく再現されており、西進ロスビー波も Gregory (2001) に見られる過剰な波の発生が抑えられている。反対称成分でも新しいモデルは混合重力・ロスビー波の再現性が向上している。最後に MJO のライフサイクル・コンポジットを解析した結果を図 9 に示す。新しいモデルでは MJO のライフサイクルが観測データと比較して妥当に再現されていることが分かる。Gregory (2001) では雲量が過剰に発生してしまい、長波放射の変動値が結果として過剰に再現される傾向となっている。

(4) まとめ 雲内部構造をより正確に表現することを目的として、雲解像モデルを用いて統計的雲構造の解析を行い、得られた解析結果から新しい雲内部モデル (エントレインメントモデル) を構築した。一次元カラムモデルの実験結果からは、積雲対流モデルは雲解像モデルで得られた統計量と近い雲タイプの分布を示すことができることが示唆された。このモデルをスペクトル型積雲対流モデルに組み込み、過去再現実験として AMIP 実験を実施した。この実験結果からは、構築した積雲対流モデルが従来のモデルと比べて大気循環の気候場をより良好に再現し、再現が難しいとされている MJO の再現にも成功することが分かった。本研究では単一の気候モデルに組み込んで積雲対流モデルの評価を行ったが、大気モデルには積雲対流モデル以外にも非対流性の雲モデルや、境界層スキームなど、水蒸気に関係する多数の物理過程が含まれており、これら他物理過程との組み合わせでもモデルの物理性能は左右されることが予想された。そこで、積雲対流モデル構築後に別の大気モデルでもモデルの物理性能評価を行っている。結果、他大気モデルへ本積雲対流モデルを組み込んだ場合でも、エントレインメントモデル以外の内部

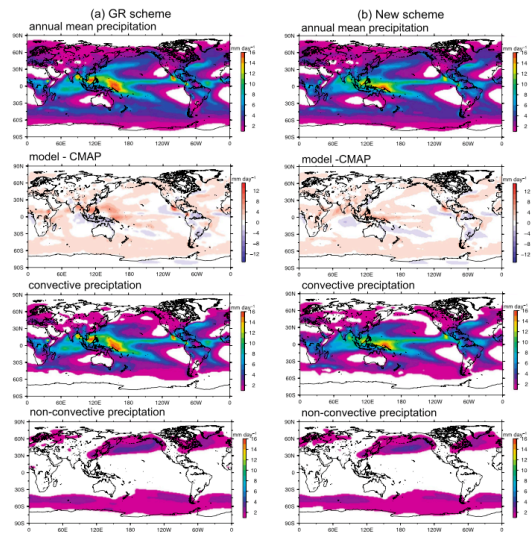


図 7: 年平均の降水分布の比較。1 段目: 総降水量、2 段目: 総降水量のバイアス、3 段目: 対流性雲による降水、4 段目: 非対流性雲による降水

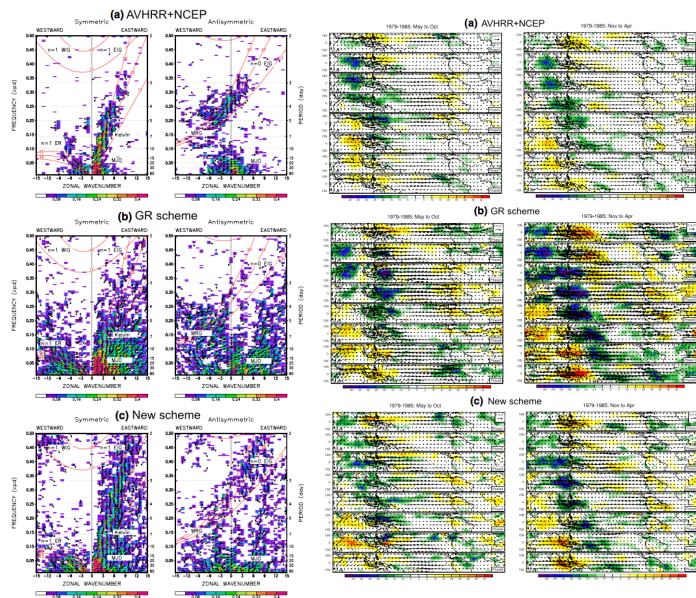


図 8: 対流結合赤道波スペクトルの比較、1 段目: 観測データ、2 段目: Gregory (2001)、3 段目: 新しいモデル、左図: 対称成分、右図: 反対称成分

図 9: MJO のライフサイクル・コンポジットの比較、1 段目: 観測データ、2 段目: Gregory (2001)、3 段目: 新しいモデル

パラメタリゼーションに修正が必要であるものの、より良好な結果を示すことが確認できている(Baba and Giorgetta 2019, submitted; Baba 2019, submitted)。従って、本研究で構築した積雲対流モデルは普遍的なモデルバイアス改善傾向を持ち、他大気モデルにおいても有効であると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 1 件)

1. Baba, Y., “Spectral cumulus parameterization based on cloud-resolving model”, *Climate Dynamics*, Vol. 52 (2019), pp. 309–334. (査読有り)

〔学会発表〕 (計 13 件)

1. 馬場雄也, “AFES へのスペクトル型積雲対流スキームの実装”, 第 3 回全国 AFES ミーティング, 2019 年 3 月 14 日, 三重大学 (三重県津市)
2. Baba, Y., “Diurnal cycle of precipitation over maritime continent using different in-cloud parameterization”, JpGU2018 (国際学会), 2018 年 5 月 22 日, 幕張メッセ (千葉県千葉市)
3. 馬場雄也, “異なる雲内部パラメタリゼーションを用いた降水の日変化応答の解析”, 日本気象学会 2018 年度春季大会, 2018 年 5 月 17 日, つくば国際会議場 (茨城県つくば市)
4. Baba, Y., “Spectral cumulus parameterization employing in-cloud parameterization based on cloud-resolving model simulation”, European Geosciences Union General Assembly 2018 (国際学会), 2018 年 4 月 9 日, Austria Center Vienna (Vienna, Austria)
5. Baba, Y., “In-cloud parameterization and its application to spectral cumulus parameterization”, 2017 AGU fall meeting (国際学会), 2017 年 12 月 12 日, New Orleans Morial Convention Center (New Orleans, USA)
6. Baba, Y., “Spectral cumulus parameterization based on cloud-resolving model”, AES seminar, 2017 年 10 月 23 日, Max-Planck Institute for Meteorology (Hamburg, Germany)
7. Baba, Y., “Spectral cumulus parameterization using cloud-resolving model”, ICON developer meeting (2017), 2017 年 9 月 27 日, Evangelische Tangungsstätte Löwenstein (Löwenstein, Germany)
8. 馬場雄也, “大気・海洋結合モデルのための雲解像モデルに基づく積雲対流スキームの開発”, 平成 28 年度名古屋大学 HPC 計算科学連携研究プロジェクト成果報告シンポジウム, 2017 年 6 月 28 日, 名古屋大学 (愛知県名古屋市)
9. Baba, Y., “Impacts of entrainment model in cumulus parameterization on atmospheric general circulation”, JpGU-AGU joint meeting 2017 (国際学会), 2017 年 5 月 24 日, 幕張メッセ (千葉県千葉市)
10. Baba, Y., “Spectral cumulus parameterization based on cloud-resolving model”, Meeting on Perspectives in Computational Atmosphere and Ocean Science and 8th OFES International Workshop (国際学会), 2017 年 03 月 13 日, 名古屋大学 (愛知県名古屋市)
11. Baba, Y., “Macrophysical cloud properties simulated by two-moment microphysics”, 2016 AGU fall meeting (国際学会), 2016 年 12 月 14 日, Moscone Convention Center (San Francisco, USA)
12. 馬場雄也, “TOGA-COARE 実験から得られる統計的雲構造”, 日本気象学会 2016 年度秋季大会, 2016 年 10 月 26 日, 名古屋大学 (愛知県名古屋市)
13. 馬場雄也, “雲解像モデルに基づく積雲対流スキームの開発”, JpGU2016, 2016 年 05 月 24 日, 幕張メッセ (千葉県千葉市)

〔その他〕

開発した積雲対流モデルのソースコードを所属機関からの承認を得て、MIT ライセンスにて以下の URL で公開している。 <https://gitlab.com/babay/cumulus>

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。