

平成 30 年 5 月 21 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05280

研究課題名(和文) 将来の気候変動における熱帯外から熱帯へのテレコネクションメカニズムの解明

研究課題名(英文) Elucidation of the teleconnection mechanism from the extra-tropics to the tropics in the future climate change

研究代表者

吉森 正和 (YOSHIMORI, Masakazu)

北海道大学・地球環境科学研究所・准教授

研究者番号：20466874

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：将来、さまざまな要因によって、熱帯の降雨分布が変化することが考えられる。その中の一つに、中高緯度の温暖化における南北半球の非対称性がある。これまでの研究では、温暖化の大きな半球の方へ、熱帯の降雨量がシフトすることが報告されてきたが、海洋循環の変化の効果はほとんど考慮されてこなかった。本研究では、現実的な将来シナリオにおいて、大気だけでなく海洋循環の変化も考慮した予測における、熱帯外から熱帯への遠隔影響のしくみを調べた。特に、エネルギー論的考察と力学的考察を融合した解釈を提供した点に新奇性が高く、また海洋力学効果の重要性も検証し、熱帯降雨分布を変化させるしくみについて、基礎的な知見を得た。

研究成果の概要(英文)：It is expected that the distribution of tropical rain in the future would change for various factors. One of those factors is the teleconnection due to the asymmetric warming between Northern and Southern Hemisphere mid-high latitudes. Previous studies have reported that the tropical rain tends to increase in the hemisphere of greater warming. The effect of ocean circulation change has not been taken into account in most studies, however. In this study, the mechanism of the teleconnection considering the ocean circulation change under the realistic future scenario was investigated. A novel point is the integration of energetic and dynamical perspectives in the interpretation of the result. Pointing the importance of ocean dynamical effect, a fundamental insight regarding the mechanism for the change in tropical rain was acquired.

研究分野：気候変動

キーワード：気候変動 将来予測 ハドレー循環 熱帯降雨 気候モデル

1. 研究開始当初の背景

(1) 熱帯外から熱帯への遠隔的影響

ENSO (エルニーニョ・南方振動) と PNA (太平洋・北米) パターンに代表されるように、熱帯から中高緯度へのテレコネクションはよく知られているが、最近では、中高緯度から熱帯へのテレコネクションも注目されている。特に、熱帯外の気候変動によって熱帯の降雨分布が南北に変化することが知られている。たとえば、気候モデルにおいて北半球の中高緯度を冷やした場合には、南半球低緯度の上昇流偏差を伴う赤道を跨ぐハドレー循環の応答偏差が見られ、それに伴って降雨分布が南に移動する。

20 世紀後半には、エアロゾルの濃度変化が中高緯度で集中して起き、南北に非一様な分布が熱帯収束帯の位置や降雨強度に影響を与えた可能性が指摘されている (Chiang and Friedman, 2012)。また、将来の地球温暖化においては、北極域や北半球陸上が他地域に比べて顕著に温暖化することがほぼ全ての気候モデルによって予測されている。多くのモデルを調べると、これに伴う北半球と南半球の温度差とハドレー循環や熱帯降雨量の変化に強い関係があることが報告されている (Friedman et al., 2013)。しかし、この多数モデルを用いた研究では、二酸化炭素濃度を 2 倍にしたときの平衡応答という理想的な状態のみを解析しており、現実的なシナリオかつ過渡的な状態の変化については対象としていない。したがって、現実的な将来予測という枠組みの中で、検証する必要がある。

(2) 大気の力学的メカニズム

Yoshimori and Broccoli (2008) は、エアロゾルや対流圏オゾンなど様々な放射強制因子に対して、北半球に相対的により多くの放射強制力が加えられた場合には、南半球の熱帯の降雨量が減少し、北半球の熱帯の降雨量が増加することを示した。また、それに伴う赤道上のハドレー循環の変化は、加えられた半球間の放射強制力の差によってほぼ決まることを例示した。さらに Yoshimori and Broccoli (2009) は、ハドレー循環の応答は、循環自体の変化による水蒸気、温度減率、雲の変化を通じた放射フィードバックとエネルギーの過不足を補うために必要とされるハドレー循環による南北熱輸送の変化とが釣り合うように決まることを見出した。

これらの論文に続き、多くの関連論文が出版されてきたが、エネルギー論に基づく理論展開では、いずれもハドレー循環の変動に関しては、南北半球間のエネルギーの過不足を解消するためにより昇温する半球に向かって降雨分布が移動する、という程度の理解に留まっている。

一方で、エネルギーに基づく議論は、結果に対して整合する一つの解説を与えるに過ぎず、より因果に迫る必要がある。ハドレー循環はエネルギーだけでなく、角運動量の輸

送も担い、中緯度付近の波動による角運動量輸送によっても影響を受けると考えられる。したがって、熱帯とそれ以外の地域とのテレコネクションの理解を進めるためには、エネルギー輸送と角運動量輸送の両方を融合させて理解することが不可欠であると考えられる。

(3) 海洋の役割

熱帯外から熱帯への遠隔影響に関するこれまでの多くの数値的研究では、大気部分には大循環モデルが用いられてきたものの、海洋については、循環の変化を考慮しない簡易的なモデル、いわゆる海洋混合層モデルが用いられてきた。いうまでもなく、海洋循環は低緯度の南北エネルギー輸送において大きな役割を担っており、この変化を無視して大気応答をエネルギー論で議論することには問題がある。

また、大気循環は海面水温の変化に応答するため、熱力学的に規定される海面水温応答だけでなく、海洋の力学的効果によって規定される海面水温の変化も考慮する必要がある。

引用文献

- Chiang and Friedman (2012): *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 40, 383-412.
Friedman et al. (2013): *J. Climate*, 26, 5419-5433.
Yoshimori, M. and A. J. Broccoli (2009): *Geophys. Res. Lett.*, 48, L20703, doi:10.1029/2009GL040488.
Yoshimori, M. and A. J. Broccoli (2008): *J. Climate*, 21(17), 4399-4423.

2. 研究の目的

(1) 熱帯外から熱帯への遠隔的影響

本研究では、主に、現実的な将来予測シナリオの下で、大気海洋結合系における熱帯外から熱帯への遠隔影響を、数値気候モデルを用いて調べる。将来予測シナリオでは、多くの放射強制因子が同時に変化しているため、個々の強制因子に対する応答を調べることによって、主要因の特定を行う。また、遠隔影響については、応答の季節性についても明らかにする。なお、多数の気候モデルの応答比較はせず、単一の気候モデルの応答を詳細に調べる。

(2) 大気の力学的メカニズム

大気のエネルギー輸送変化だけでなく、角運動量輸送も考慮して、熱帯の降雨分布の将来変化に対して、大気の力学的解釈を試みる。従来エネルギー論的解釈と力学的解釈を融合させた新しい視点を提供することによって、熱帯外から熱帯へのテレコネクション・メカニズムの解明に迫る。こうした理論展開への挑戦は、新奇性があるだけでなく、気候変動応答理解において基礎的知見を提

供する。さらに、プロセスやメカニズムの理解を通して、将来予測の不確実性低減へ向けた知見を得る。

(3) 海洋の役割

熱帯外から熱帯への遠隔影響において、これまであまり注目されてこなかった、海洋の果たす役割について明らかにする。特に、熱帯域での海洋応答の重要性に注目し、大気のみで考えられる応答を海洋力学がどのように変えるのかについて、支配するプロセスを含めて明らかにする。ここでも、プロセスやメカニズム理解を通して、将来予測の不確実性低減へ向けた知見を得る。

3. 研究の方法

(1) 熱帯外から熱帯への遠隔的影響

まず、予備的実験として、数値気候モデル（大気海洋大循環モデル）MIROC4mの大気大循環モデルと海洋混合層モデルを用いて、平衡応答に関する感度実験を行った。二酸化炭素濃度を産業革命前の2倍、4倍にした平衡実験における北半球中高緯度（北緯40度以北）の海面水温と海水分布の変化を増幅・抑制した感度実験を行い、熱帯の降雨分布の変化を調べた。応答の季節性、水蒸気輸送におけるハドレー循環変化の役割、降雨量ピークの緯度、南北エネルギー輸送が収束する熱赤道の緯度、ハドレー循環の収束緯度の変化などを詳細に調べた。さらに、南北熱輸送変化、放射収支解析などを行った。

次に、コア実験として、数値気候モデルMIROC4mを用いて、標準実験として産業革命前（1850年頃）実験を行った。続いて、気候が外部境界条件に対して十分に落ち着いた状態（平衡状態）から、外部境界条件を時間変化させて20世紀再現実験（1851-2005年）を行った。継続して、21世紀予測実験（2006-2100年）を行った。予測実験は、IPCC-AR5で中心的役割を果たしたCMIP5の実験設定に従い、代表的濃度経路シナリオのうちRCP2.6、RCP4.5、RCP8.5シナリオについて実施した。各20世紀再現実験、21世紀予測実験ともに、初期条件を変えて3本ずつ行うことによって、外部強制による効果と内部変動の影響を区別した。

20世紀再現実験や21世紀予測実験では、多くの放射強制因子が外部強制として同時に影響しているため、各放射強制因子を別々に与えた数値実験も行った。具体的には、温室効果ガス、硫酸エアロゾル、黒色炭素エアロゾル、オゾンである。（有効放射強制力の計算には、太陽活動、火山活動についても行った。）

これらのMIROC4mシミュレーションに対して、中高緯度のみが温暖化した効果を抽出するため、RCP4.5の中高緯度（南緯40度以南、北緯40度以北）の海水温と塩分に緩和させながら1851-2100年まで積分した実験を行った。このとき、外部強制は標準実験のままと

した。この数値実験により、現実的なシナリオの下で、大気海洋大循環モデルにおいて中高緯度の温暖化が熱帯の降雨分布に与える遠隔影響を調べた。解析では、20世紀末の20年平均と21世紀末の20年平均を比較した。

(2) 大気の力学的メカニズム

まず、大気循環の役割を明らかにするために、熱帯の降雨分布応答において、大気循環の変化の寄与を診断し、定量化した。次に、緯度40度より高緯度側、60度より高緯度側のみ温暖化状態に緩和した数値実験を比較することにより、温度上昇の効果と緯度帯の関係性について調べた。さらに、診断式ではあるが、角運動量の式と熱力学の式を含むクオ・エリアッセン（Kuo-Eliassen）方程式を適用することにより、ハドレー循環応答に寄与するプロセスを調べた。

(3) 海洋の役割

全体の応答の中で、大気と海洋の役割を明らかにするために、MIROC4mシミュレーションに対して、海洋大循環モデルを海洋混合層モデルに差し替えた実験を行った。さらに、海洋の熱力学的効果の役割を確認するために、海面水温を産業革命前に固定した同様の実験も行った。

次に、熱帯外から熱帯への遠隔影響における大気と海洋の相対的役割を明らかにするために、領域緩和実験において、中高緯度と低緯度をつなぐ経路を遮断する実験を行った。具体的には、途中の海水温と塩分を標準実験の値に緩和する実験を行った。

さらに、熱帯における海洋の力学的効果を検証するために、単体の海洋大循環モデルを用いて、風応力の変化に対する熱帯海洋と海面水温の応答を調べ、中高緯度の温暖化に対する熱帯の降雨分布の応答における、海洋循環の変化の果たす役割を調べた。

4. 研究成果

(1) 熱帯外から熱帯への遠隔的影響

予備的実験から、先行研究と同様に、MIROC4mでも、海洋によるエネルギー輸送の変化が無視できる場合には、大気のエネルギー輸送を通して、中高緯度の温暖化が熱帯の降雨分布に比較的大きな影響を与えることが確認された。このとき、北半球中高緯度は冬に平均約-5から+7変化し、東西平均した熱帯の降雨量は北半球側と南半球側の差で約-160%から+160%の変化が見られ、降雨量の最大緯度は-1.5度から+2.5度北へ変化した。基本的な応答パターンは、Yoshimori and Broccoli (2008, 2009)と整合的であったが、大気上端、地表でのエネルギー収支には異なる点も見られた。また、風-蒸発-海面水温（WES）フィードバックが、赤道をまたぐハドレー循環の偏差に正のフィードバックとして寄与することが示唆された。これらの結果は、平成27年（2015）度の修士論文「中

高緯度の温暖化が熱帯の降雨分布に与える影響」(濱野勇臣)としてまとめられ、教育的効果ももたらし、学会等でも発表した(学会発表 3-4)。

大気海洋大循環モデル MIROC4m を用いたメインの実験では、南北両半球(特に北半球)の緯度 40 度より高緯度側の温暖化によって、10 月~1 月にかけて、熱帯の降雨量が南側で減少し、北側で増加した。南緯 10 度を境に、RCP4.5 シナリオの下で見られた南北差の約半分が緯度 40 度より高緯度側の温暖化の効果による寄与であることが示された。降雨分布の変化は太平洋上で顕著に見られた。南半球中高緯度の温暖化は小さいため、温暖化における南北半球間の非対称性が原因であると考えられる。これらの結果は、論文として出版した(雑誌論文 1、学会発表 1-2)。

また、産業革命前を基準にした 20 世紀末の熱帯降雨分布の変化については、硫酸エアロゾルの寄与が無視できないが、20 世紀末から 21 世紀末、すなわち将来変化予測については、温室効果ガスの寄与が支配的であることが示された。時代によって支配因子が明確に分かれていたため、共存する放射強制因子の相対的寄与や違いを区別することよりも、温度変化の生じる緯度帯による違いに注目して解析を進めた。このアプローチは、熱帯における強制を排除し、中緯度帯と高緯度帯における温度変化としての強制の比較や海洋の力学的フィードバックの果たす役割を明らかにする点で有効であった。

(2) 大気の力学的メカニズム

熱帯の降雨分布応答の南北差への寄与は、大気中の水蒸気量の変化よりも、大気循環の変化の寄与が支配的であることが示された。同様の結果が東西平均場でも見られたため、比較的診断のしやすいハドレー循環の応答として解析を進めた。

熱帯の降雨分布の変化に対して、緯度 40 度より高緯度側の温暖化の効果に比べて、緯度 60 度より高緯度側の温暖化の効果は小さく限定的であった。面積の違いがあることから単純には比較できないが、このことは中緯度の温暖化が熱帯の降雨分布への遠隔影響に重要な役割を果たすことを示唆している。

クオ・エリアッセン方程式による診断では、大気の定在波と非定常擾乱による、中緯度帯におけるエネルギーと角運動量の北向き輸送の減少が、ハドレー循環の北半球側の応答において重要な役割を果たすことが示唆された。詳細については、Yoshimori et al. (2018, 雑誌論文 1)を参照されたいが、中緯度の渦活動が重要であることは、北極温暖化増幅により北半球の南北温度勾配に最も大きな変化が現れた冬に応答が集中していることとも矛盾しない。

(3) 海洋の役割

海洋の力学過程を含む場合と含まない場

合について、20 世紀末と 21 世紀末の熱帯の降雨分布の差を比較すると、海洋の力学過程を含む場合には、降雨量の北半球側へのシフトが抑制されることが示された(図)。熱帯降雨量のピーク緯度の移動距離としては、0.4 度が 0.2 度と小さい抑制ではあるが、割合としては半分である。

赤道においては、海洋の力学過程が含まれていない場合にはすべての南北エネルギー輸送変化が大気によって担われるのに対して、海洋の力学過程を含む場合には、南北エネルギー輸送変化の大部分が海洋によって担われるために大気応答が抑制される。このことは、本研究の実施と同時期に出版された先行研究と整合している。

本研究では、さらに、ハドレー循環の変化による風応力偏差が赤道湧昇を弱め、赤道付近の海面水温を上昇させることを単体の海洋大循環モデル実験により確認した。さらに、この海面水温変化が、南北両側にそれぞれ大気ハドレー循環変化を生じることを、前述のクオ・エリアッセン方程式による診断から考察した。このハドレー循環変化は、赤道の南側では水蒸気を北に運ぶ方向に、北側では水蒸気を南に運ぶ方向に働き、このことが赤道の北側で熱帯降雨帯が北へシフトするのを緩和するという解釈に至った。

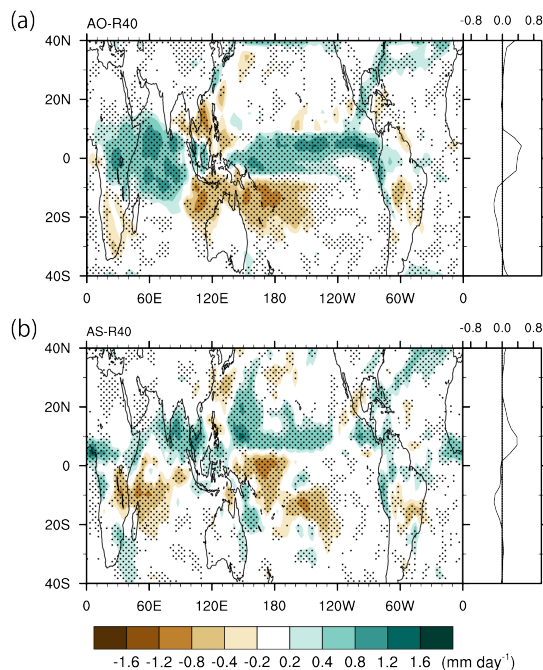


図 20 世紀末と 21 世紀末の 10 月-1 月平均の降雨分布の差 (mm day^{-1}): (a) 大気大循環-海洋大循環モデル、(b) 大気大循環-海洋混合層モデル。いずれも中高緯度の温暖化の影響のみを取り出す数値実験の結果。東西平均値を右に表示。点は差の有意性の高い格子点を示す。Yoshimori et al. (2018) Fig. 3b と 3d より転載 (© Copyright 2018 AMS)。

(4) その他

全球気温変化の解説が主な対象ではあつ

たものの、過渡的応答における南大洋温暖化の遅れ、すなわち本研究テーマの中心的要素である南北極域の温暖化コントラストの要因と重要性を議論する総説論文を出版した(雑誌論文3)。

また、理想化実験を通して温暖化時の熱帯降雨分布の応答を議論する論文を出版した(雑誌論文2)。この論文では、熱帯外から熱帯への遠隔影響とその他の影響を分離する実験は実施していないものの、一連の実験における階層的モデリングの基礎となり、国際比較プロジェクトの下でのマルチモデル研究という点で意義深い。今後、本研究テーマにより密接に関連する成果が期待できる。

(5) 総括

現実的な将来予測シナリオの下で、大気海洋結合系において、領域緩和実験を実施することにより、中高緯度の温暖化が熱帯の降雨分布に及ぼす影響を数値実験の枠組みの中で明確に示すことができた。また、単体での海洋大循環モデル実験も行うなど、階層的モデリングを実施することにより、海洋力学フィードバックが熱帯の降雨分布の南北シフトを抑制する働きがあることを明確に示すことができた。海盆間相互作用、古気候における同様の熱帯降雨分布変化との関連性、中高緯度の温暖化によって引き起こされた海洋の基本場の変化がさらなる ENSO などの熱帯気候変動へどのような影響を与えるかなど、関連する課題は多く残されており、本研究を新たな出発点とする学問的波及効果は大きいと考えられる。当初計画していた熱帯外から熱帯へのテレコネクション・メカニズムの解明、特に角運動量を考慮してエネルギー論的解釈と力学的解釈を整合する形で統合し、統一的理解を構築するという主目的は達成できたと思う。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

*すべて査読あり

1. Yoshimori, M., A. Abe-Ouchi, H. Tatebe, T. Nozawa, and A. Oka (2018): The importance of ocean dynamical feedback for understanding the impact of mid-high-latitude warming on tropical precipitation change. *J. Climate*, 31, 2417-2434. doi:10.1175/JCLI-D-17-0402.1
2. Voigt, A., M. Biasutti, J. Scheff, J. Bader, S. Bordoni, F. Codron, R. D. Dixon, J. Jonas, S. Kang, N. P. Klingaman, R. Leung, J. Lu, B. Mapes, E. A. Maroon, S. McDermid, J. Park, R.

Roehrig, B. E. J. Rose, G. L. Russell, J. Seo, T. Toniazzo, H.-H. Wei, M. Yoshimori, and L. R. V. Zepetello (2016): The Tropical Rain belts with an Annual cycle and a Continent Model Intercomparison Project: TRACMIP. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 8(4): 1868-1891. doi:10.1002/2016MS000748

3. Yoshimori, M., M. Watanabe, H. Shiogama, A. Oka, A. Abe-Ouchi, R. Ohgaito, and Y. Kamae (2016): A review of progress towards understanding the transient global mean surface temperature response to radiative perturbation. *Progress in Earth and Planetary Science*, 3(21): 1-14. doi:10.1186/s40645-016-0096-3

[学会発表](計4件)

1. 吉森正和, 阿部彩子, 建部洋晶, 野沢徹, 岡頭 (2018): 中高緯度の温暖化が熱帯の降雨分布に与える影響. 2. 気象学会 2018 年度春季大会(国内学会), つくば国際会議場(つくば), 2018 年 5 月 16 日
2. Yoshimori, M., A. Abe-Ouchi, H. Tatebe, and T. Nozawa (2017): The impact of extratropical warming on the tropical precipitation. EGU (European Geosciences Union) General Assembly 2017(国際学会), Austria Center Vienna (ウィーン), 2017 年 4 月 25 日
3. Yoshimori, M., Y. Hamano, and A. Abe-Ouchi (2016): The effect of extratropical warming amplification on the future tropical precipitation. The Seventh Symposium on Polar Science (国際シンポジウム), 国立極地研究所(立川), 2016 年 12 月 2 日
4. 吉森正和, 濱野勇臣, 阿部彩子 (2016): 中高緯度の温暖化が熱帯の降雨分布に与える影響. 気象学会 2016 年度秋季大会(国内学会), 名古屋大学(名古屋), 2016 年 10 月 27 日

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

[その他]
ホームページ等

- #### 6. 研究組織
- (1) 研究代表者

吉森 正和 (YOSHIMORI, Masakazu)
北海道大学・地球環境科学研究所・准教授
研究者番号：20466874

(2)研究分担者

塩竈 秀夫 (SHIOGAMA, Hideo)
国立研究開発法人国立環境研究所・地球環境
研究センター・主任研究員
研究者番号：30391113

(3)連携研究者

渡部 雅浩 (WATANABE, Masahiro)
東京大学・大気海洋研究所・教授
研究者番号：70344497