

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 23 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22540444

研究課題名（和文） 熱帯の気候システムにおける時空間変動，多層構造，水・物質輸送

研究課題名（英文） Spatiotemporal variability, multi-level structures, and water transport in the tropical climate system

研究代表者

堀之内 武 (HORINOUCHI TAKESHI)

北海道大学・大学院地球環境科学研究院・准教授

研究者番号：50314266

研究成果の概要（和文）：全球モデルによる水惑星型の数値実験と理論的検討によりハドレー循環の基礎理論を見直し，放射対流平衡下での子午面循環強度における自由度の存在と，実際の循環強度決定において赤道波擾乱が果たし得る役割を明らかにした．南半球東部熱帯太平洋の下層雲量に数日周期の変動が存在し，それが混合ロスビー重力波等により引き起こされることを明らかにした．年々変動における同波と降水量等の関係性を明らかにした．

研究成果の概要（英文）：The theory of the Hadley circulation was revisited by using aqua-planet numerical modeling and theoretical examination. It was revealed that a degree of freedom, which is overlooked by the conventional theory, exists in its strength, and that equatorial wave disturbances can act to constrain it. It is shown that fluctuation on synoptic time scales induced by waves including the mixed Rossby-gravity waves exists in the low cloud amount over the equatorial south eastern Pacific. It is also shown that the waves have a relationship with mean precipitation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学，気象・海洋物理・陸水学

キーワード：気候

1. 研究開始当初の背景

地球大気においてハドレー循環の支配する領域を熱帯域ととらえると，地球上の面積の約半分を占める．熱帯の気候システムの理解は，全地球的な気候変動を理解し予測するうえで欠かせないが，中高緯度と比較して，低緯度ではコリオリ効果が小さいことと，積雲対流が重要でスケール間相互作用が本質的に重要であるという難しさがあり，その理

解は遅れている．以下に述べるように，熱帯対流圏の気候については，その基本的な理解にから見直しが必要と考えられる．

熱帯対流圏の基本的な循環であるハドレー循環，ウォーカー循環は，Held and Hou (1980) のハドレー循環理論に代表されるように，内部に時間変動を含まない静的なバランスに基づき説明されてきた．彼らは軸対称な循環を考え，循環上部での角運動量保存と，

循環内で放射による熱収支が閉じるという2条件から、ハドレー循環の幅と強度が決められることを示した。その後、3次元性、特に中緯度の傾圧波の重要性（傾圧波により循環強度が増すなど）が指摘されるようになった（Sato et al, 1995 など）。Walker and Schneider (2006) は、多数の数値実験により、幅広いパラメタ空間で、ハドレー循環上部でも角運動量が非保存的でコリオリ効果と運動量収束がほぼつりあっており、循環強度は基本場の南北の温度傾度のみにはよらないことを示した。

近年さらに、大気中で時空間に変動する擾乱が、基本循環も左右すると示唆されるケーススタディが増えてきた。例えば、Nasuno (2008) は、全球高解像度雲分解モデル NICAM を用いた水惑星実験（全球を海面とする実験）において、積雲対流と結合した Kelvin 波による運動量の南北輸送が、モデル中の帯状平均風（上部対流圏で西風）を維持していることを見出した。

このような背景のもと、研究代表者は大気大循環モデルを用いた数値実験を開始した。その結果、海面水温 (SST) に南北温度差がないという、従来のハドレー循環論では原理的に循環発生が不可能な場合でも、設定によっては現実のハドレー循環と同様な直接循環が可能であることがわかった。この結果は、静的なバランスについても、従来の理論において行われてきた単純化の中に、本質的に不適切なものがあることを示唆する。これをさらに調べることは熱帯対流圏の循環のメカニズムの基礎的な理解の刷新につながるため、本研究を申請するに至った。

熱帯東部太平洋などウォーカー循環の下降域では層積雲が発達し、地球の放射収支に大きな影響を与えていることが知られている。熱帯の子午面循環は平均的には対流圏全層にわたる1セル型だが、この領域では多層化しており、下層の浅い循環が水循環を通して雲形成に大きな影響を与えていることが示唆されている。しかし、そのメカニズムについては、近年主流である熱帯海面水温の影響を考えるもののほかに、慣性不安定の重要性を指摘する研究もあり、再検討が求められている。

気候を考えるうえで、熱帯東部太平洋における下層雲変動の動態把握も重要であるが、そのような研究は非常に限られている。

2. 研究の目的

ハドレー循環等の、熱帯対流圏の基本的な循環の理解を刷新する。積雲対流の効果について従来の理論における扱いでは不備があると考えられる点を見直す。また、数値実験を援用して、時間変動成分（積雲対流や波動等）の作用を陽に考慮するようにする。これ

をもって、熱帯大気の新しい循環論を打ち立てる。東部太平洋など、気候学的に重要な層積雲域での循環や大気擾乱を調べる。過去数10年の熱帯の循環の変動とそのメカニズムを調べ、それに伴う水循環と雲の変動を明らかにする。また、熱帯と中緯度の間の相互作用のうち季節内変動が東アジアの降雨に及ぼす影響を明らかにする。

3. 研究の方法

大気大循環モデルを理想化した条件で様々な設定で走らす数値実験や、衛星等の観測データや客観解析を用いたデータ解析、理論的検討などにより研究を進める。個々の研究の手法の紹介は、下記の研究成果紹介に含める。

4. 研究成果

(1) ハドレー循環論の見直し

①基本的な制約条件の再考

ハドレー循環の上昇域と下降域からなる2ボックスモデルによる理論的な検討を行った。その結果、Held-Hou 以来広く想定されてきた「ニュートン冷却」（平衡への緩和）に基づく熱力学的な制約は、凝結過熱分布が適応的に決まる放射対流平衡には適用できないこと、従って Held-Hou 的な理論では循環強度を決められないこと（放射対流平衡では実現する循環強度の自由度が増えること）を示した。

②数値実験による研究

全球を海面とした「水惑星」設定の大気大循環モデルを用いた数値実験を多数行った。

海面温度 (SST) および短波入射を全球一律にしても、ハドレー循環に相当する熱的な直接循環が低緯度に生じることがある。モデル中の積雲パラメタリゼーションの設定を変えると、循環はほぼゼロから、現実大気春秋分期に近い強度まで変化することを見出した。このような循環形成は従来の理論では説明できず、上記の理論再考により初めて説明できる。

一連の実験において、積雲パラメタリゼーションの設定の変化が循環に及ぼす影響は、大気中の擾乱強度の変調を通して間接的に行われることを示した（図1）。

このような関係性は、SST に南北構造が存在する場合も（振れ幅は減るが）残ることが示された。よって、擾乱は現実大気の大気循環強度も左右しうる。

本研究ではさらに、赤道付近の平均降水量の緯度分布と、モデル中でどの対流結合赤道波モードが卓越するかに関連があることも示された。以上の成果は Horinouchi (2012) にまとめられた。

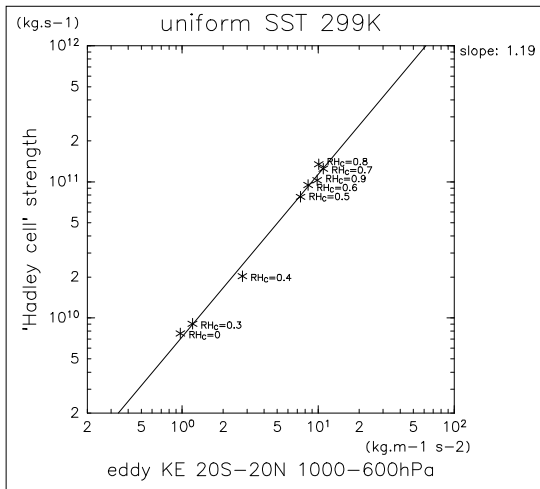


図1 SST 一様実験シリーズにおける、擾乱の運動エネルギーと「ハドレー循環」強度の対応関係(Horinouchi, 2012 より)

(2) 熱帯東部太平洋の下層雲の時空間変動の研究

本研究では、東部熱帯太平洋上の下層雲の数日周期の変動と波動擾乱との関係を調べた。当領域は下層雲の多い領域であるが、数日スケールの変動がどのようにになっているかはこれまで明らかにされていなかった。本研究で特に下層雲量が多く、上層雲が比較的少ない南半球低緯度に注目した。

主に用いたデータは、人工衛星観測による ISCCP の高分解能(D1)データである。力学場の解析には ERA Interim データを用いた。

スペクトル解析により下層雲量には数日から1か月程度の幅広い周期帯で変動が大きいことが示された。700 hPa の南北風とのクロススペクトル解析からは、3~7 日の周期帯に有意な相関が示された。

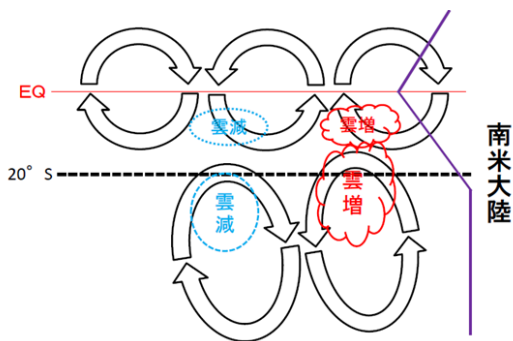


図2 南半球東部熱帯太平洋の下層雲の数日スケールの変動要因

下層雲の変動に影響を与える力学場の構造を明らかにするため、コンポジット解析を行った。その結果、赤道を中心に存在する混合ロスビー重力波と中緯度のロスビー波がそれぞれ独立に熱帯下層雲へ影響を及ぼし、さらに両者の雲量増加域どうしが重なる時に、特に雲量が増大することが明らかになった(図2)。

本研究の成果は Terao and Horinouchi (2012)として発表され(筆頭著者の寺尾は本研究の協力者の大学院生(当時)), Journal of the Meteorological Society of Japan 誌の2012年度の優秀論文賞(JMSJ賞)を授与された。

(3) 対流結合混合ロスビー波(MRG)の活動性と降雨, SSTの年々変動の研究

(1)の成果をうけ、現実大気における関係性を、諸量間の年々変動の関係性から調べた。用いたデータは、衛星観測 OLR (外向き長波放射), GPCP 全球月平均降雨データが主で、客観解析データとして JRA25-JCDAS, ERA40 も用いた。解析では、SSTの勾配が小さく年々変動も小さい北半球夏季の西・中部太平洋に着目した。

その結果、北半球夏季には対流結合 MRG 振幅と赤道付近の平均降水の間に高い負の相関があること、その場の SST との相関は低いことが明らかになった。この関係性は(1)からの示唆と部分的には整合的である(Horinouchi 2013)。対流結合 MRG 自体の年々変動がどのように生ずるかは現在研究中である。

(4) その他の研究

東部熱帯太平洋の子午面循環の多層構造形成において慣性安定性が重要な役割を果たしているか調べるため、従来の研究とは異なるアプローチで力学的により妥当な診断を行った。その結果、同効果の重要性をはっきり示す結果は得られなかった。従って、近年主流となっている同効果を見逃した説明で問題ないというのが暫定的な結論である。

(ただし、当該領域の解析データの信頼性から、確定のためには今後登場する新しいデータを使う必要があると考えられる)。

熱帯対流圏の季節内変動を引き起こす Madden-Julian 振動が東アジアの降水に及ぼす影響を、過去25年の降雨データおよび客観解析を用いて調べた。その結果、これまで知られていなかった夏季の影響を明らかにしたほか、先行研究(Kim et al 2008)で示された2つの影響メカニズムの相対的な重要性を定量的に明らかにした。また日本付近の秋雨期における熱帯からの水輸送と台風の効果を明らかにした(大学院生(研究協力者))

修士論文).

CMIP3 データベースを用い気候モデル間の熱帯循環と降水のバリエーションに関する研究を行った (大学院生(研究協力者)修士論文).

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)

- ① Horinouchi, T., Modulation of seasonal precipitation over the tropical western/central Pacific by convectively coupled mixed Rossby-gravity waves. *J. Atmos. Sci.*, 2013, 70(2), 600-606. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JAS-D-12-0283.1> (査読有)
- ② Terao, T., and T. Horinouchi, Low cloud modulation by synoptic waves over the eastern tropical Pacific, *J. Meteor. Soc. Japan*, 2012, 90(5), 947-958. doi: <http://dx.doi.org/10.2151/jmsj.2012-606>. (査読有)
- ③ Horinouchi, T., Moist Hadley circulation: possible role of wave-convection coupling in aqua-planet experiments. *J. Atmos. Sci.*, 69(3), 891-907, 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JAS-D-11-0149.1> (査読有)

[学会発表] (計 7 件)

- ① 堀之内 武, 赤道付近の季節平均降水量への混合Rossby重力波の影響, 日本気象学会 2013 年春季大会, 5 月 15 日 (土) ~ 18 日 (火), 2013, 国立オリンピック記念青少年総合センター (東京都)
- ② 谷澤 隼人, 堀之内 武, 秋雨期の降水と水輸送に対する台風の影響, 日本気象学会 2013 年春季大会, 5 月 15 日 (土) ~ 18 日 (火), 2013, 国立オリンピック記念青少年総合センター (東京都)
- ③ 堀之内 武, 水惑星実験によるハドレー循環における対流と結合した波動の役割, 日本気象学会 2011 年秋季大会, 11 月 16-18 日, 2011, 名古屋大学 (名古屋市)
- ④ 寺尾 建哉、本間 有慈、堀之内武, 東部熱帯太平洋における数日周期の下層雲変動について/MJOに伴う夏季の東アジアの

降水変動, 熱帯気象研究会 2011, 9 月 6 日~7 日, 2011, 京都大学 (京都市)

- ⑤ 寺尾 建哉、堀之内武, 東部熱帯太平洋における下層雲変動の力学的要因, 日本気象学会 2011 年春季大会, 5 月 18 日~21 日, 2011, 国立オリンピック記念青少年総合センター (東京都)
- ⑥ 本間 有慈、堀之内武, 熱帯の季節内振動に伴う東アジア域の降水変動の解析, 日本気象学会 2011 年春季大会, 5 月 18 日~21 日, 2011, 国立オリンピック記念青少年総合センター (東京都)
- ⑦ Horinouchi, T., Analysis of spatial structure of gravity waves using GPS occultation data. AGU Chapman Conference on Atmospheric Gravity Waves and Their Effects on General Circulation and Climate. Mar 3, 2011. Univ. Hawaii, Honolulu, USA. (招待講演)

[その他]

ホームページ等

<http://wwwo.ees.hokudai.ac.jp/people/horinouchi-lab/index.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀之内 武 (HORINOUCI TAKESHI)

北海道大学・大学院地球環境科学研究院・准教授

研究者番号 : 50314266