

令和 4 年 5 月 29 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01966

研究課題名(和文) 熱帯亜熱帯「境界」の大気熱力学：水蒸気場の動態から迫る熱帯気候の新描像

研究課題名(英文) A thermodynamic mechanism for the maintenance of the moist-tropical margins

研究代表者

増永 浩彦 (Masunaga, Hirohiko)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・准教授

研究者番号：00444422

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：赤道付近では活発な積雲を伴う湿潤な大規模上昇流が卓越する一方、上層で極側に吹き出した気流が下降に転じる緯度帯では乾燥した沈降流が対流活動を抑制する。このよく知られたハドレー循環の描像は、多雨で湿潤な熱帯と晴天で乾燥した亜熱帯という低緯度固有の気候場を、大気力学の立場から一通り矛盾なく説明する。一方、熱帯と亜熱帯を隔てる「境界」の動態が近年の研究で注目されてきた。本研究では、衛星観測データおよび再解析データを用いたエネルギー収支解析を実施し、水蒸気量と雲対流活動が支配する熱帯・亜熱帯境界の仕組みに物理的な説明を与えることに成功した。同時に、雲対流の自己凝集化や熱帯収束帯など関連現象を精査した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

熱帯における気象の成り立ちは地球水循環・エネルギー循環の要をなし、その動態を深く理解することは地球温暖化を含む気候変化やエルニーニョ現象などの年々変動の理解にも関連する幅広い影響力がある。本研究課題の成果は、気候モデルや気象予報数値モデルなどの性能評価に有用な観測的知見を与えるものであり、中長期的に気候予測・気象予報の精度向上に資するデータの礎を築く意味で重要である。

研究成果の概要(英文)：A moist large-scale ascent with active cumulus clouds prevails near the equator, while dry subsidence suppresses convective activity in the latitudes where the upper-tropospheric flow turns downward. This well-known picture of the Hadley circulation explains, from the perspectives of atmospheric dynamics, the unique low-latitude climate of the wet and rainy tropics and the dry and sunny subtropics in a consistent manner. On the other hand, the dynamics of the "margin" separating the tropics and subtropics has been a focus of recent research. In this study, we conducted an energy budget analysis using satellite observation data and reanalysis data, offering a physical explanation for the mechanism of the margin between the tropics and subtropics dominated by the variability in water vapor and convective activity. At the same time, related phenomena such as convective self-aggregation and tropical convergence zones were studied.

研究分野：気象学・気候学

キーワード：熱帯気象 衛星観測

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

赤道付近では活発な積雲を伴う湿潤な大規模上昇流が卓越する一方、上層で極側に吹き出した気流が下降に転じる緯度帯では乾燥した沈降流が対流活動を抑制する。このよく知られたハドレー循環の描像は、多雨で湿潤な熱帯と晴天で乾燥した亜熱帯という低緯度固有の気候場を、大気力学の立場から一通り矛盾なく説明する。一方、熱帯と亜熱帯を隔てる「境界」の動態が近年の研究で注目されてきた。古典的なハドレー循環像はこの「境界」に固有な物理的作用を説明する機能を内在しておらず、したがって日々の気象場によって複雑に変化する動的な熱帯・亜熱帯の循環場を説明するには不十分である。この新たな視点に基づく熱帯大気循環のメカニズムに迫ることが本課題の開始当初の動機である。

2. 研究の目的

(1) 低緯度大気における鉛直積算水蒸気量の頻度分布は、熱帯湿潤域と亜熱帯乾燥域のはざまに当たる約 48 mm の極小値を挟んで二極構造を持つことが知られる。熱帯と亜熱帯を分かつこの「48 mm境界」付近で水蒸気量がしばしば特異な変動を示すことが、近年の観測研究からわかってきた。熱帯亜熱帯境界における水蒸気の動態解明を通じ、熱帯気候場の形成機構の理解に新たな進展をもたらすことが、本研究課題の主目的である。

(2) 水蒸気場の動的進化と対流発達過程が密接に協働する熱帯大気現象の一つとして、雲対流の自己凝集化 (Convective Self-aggregation) が知られている。自己凝集化は主に数値モデルによる理想化実験を通じて研究が進んできた一方、現実大気で観測される対流擾乱との関連性についてはまだ議論が続いている。衛星観測をもとに自己凝集化の実態解明の糸口をつかむことが第二の目的である。

(3) 「48 mm境界」の顕著な例として、東太平洋の熱帯収束帯 (ITCZ) が挙げられる。ITCZ はその縁部において湿潤な熱帯大気と乾燥した亜熱帯大気が近接しており、実際に「48 mm境界」でみられる特異な対流発達に似た現象がしばしば観測される。ITCZ 縁部における対流強化の物理メカニズムを探ることが第三の目的である。

3. 研究の方法

(1) 「48 mm境界」の物理的特質を明らかにするため、A-Train 衛星観測によるコンポジット解析を実施した。48 mm の特殊性を精査するため、Aqua 衛星搭載マイクロ波放射計 AMSR-E から得られた鉛直積算水蒸気量 (CIV) の閾値を 35 mm から 60 mm の範囲で複数の値で設定し、A-Train 衛星軌道に沿って最も極側に位置する閾値の緯度をそのスナップショットにおける「境界」と定義した。各閾値ごとに境界の南北の水平構造をコンポジット平均で再構築し、これをもとに熱帯と亜熱帯大気にまたがる熱力学的構造を解析した。

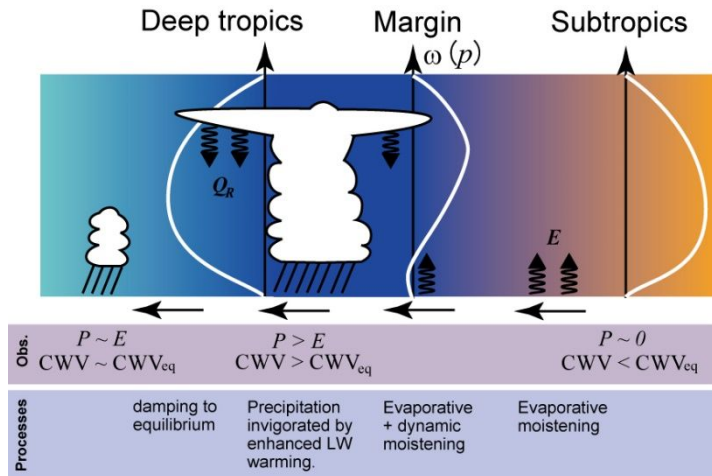
(2) 雲対流の自己凝集化を検出する指標として一般的に用いられる SCAI (Simple Convective Aggregation Index) を用いて、雲クラスターのライフサイクルに内在する対流自己凝集化の兆候を衛星観測および再解析データをもとに調査する。研究手法としては、降水量の時系列に極大値をまず同定し、その前後にわたる大気場変動の平均的描像をコンポジット時系列を用いて解析した。解析したパラメータはすべて緯度経度 10 度四方の領域にわたる大規模平均である。

(3) ITCZ 縁部の雲対流発達過程を統計的に抽出するために、まず ITCZ を A-Train 衛星軌道に沿って鉛直積算水蒸気量が 50 mm を超える領域として定義した。これは上記「48 mm境界」の知見に基づくものである。ITCZ の南縁・北縁・中央それぞれで降水がピークとなるケース毎にコンポジット平均を取り、そのメカニズムを精査するためエネルギー収支解析を行った。降水量と水蒸気量は AMSR-E から、放射加熱率は CloudSat・CALIPSO・CERES・MODIS の観測値を包括的に活用した CCCM データセットから、気温・湿度・風系の鉛直分布は ERA5 再解析データを使用した。解析対象は ITCZ が顕著に発達する熱帯東太平洋域とし、西経 180 度～90 度、南緯 20 度～北緯 20 度の領域を対象とした。

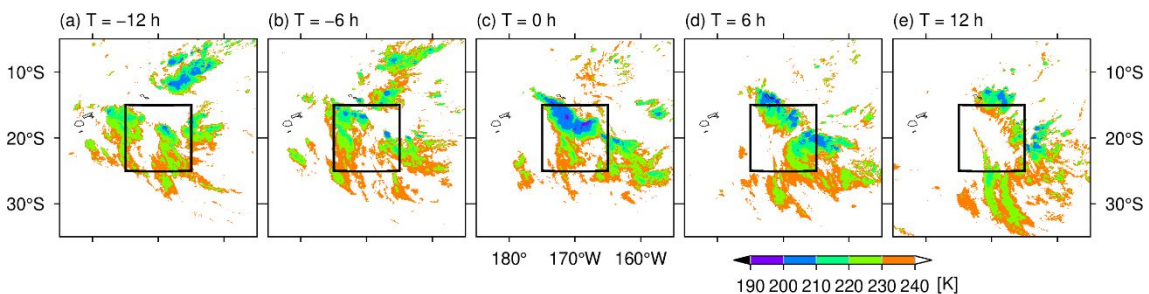
4. 研究成果

(1) 熱帯亜熱帯境界コンポジット解析から、48 mm境界を挟んで大気熱力学的状態が定性的に変化することを突き止めた。境界から湿潤側では大気への熱エネルギー注入が、乾燥側では熱エネルギー損失が見られ、その不均衡を補うように大気循環が維持されるハドレー循環的な構造が認められた。しかし既存知見と異なり、熱帯の最深部ではなく境界に近い領域で降水ピークが見られた。これは、亜熱帯から熱帯へ移動する下層大気塊が境界を通過後、鉛直流に伴う降水

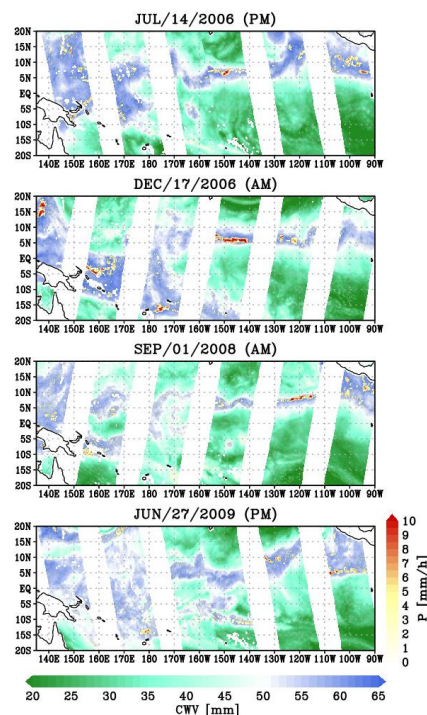
をもたらして水蒸気を失う動的プロセスを経て、最終的に熱帯深部で熱的平衡に達するラグランジュの描像で理解される。一方、熱帯・亜熱帯大気の熱力学場を簡略化し表現する概念数理モデルを構築し、観測から示唆される 48 mm 境界付近の水蒸気動態を理論的に説明する道筋を示した。この成果は、既存の静的な気候区分に代わり、日々ゆらぐ気象場と密接に連動する動的な熱帯・亜熱帯という新たな描像を提示するものである（右図）。



(2) 降水量の多いケースでのコンポジット進化を見ると、降水量が増加するにつれて前後 12 時間の間に雲クラスターの数が減少することがわかった（下図はその様子を示す一例）。クラスター数が減少するにつれてクラスターあたりの高層雲量が拡大することから、対流凝集化が一時的に発生していると推察された。降水量が少ないケースでは、そのような凝集の兆候は認められなかった。さらにエネルギー収支解析を行い、一時的な対流凝集化にかかわる物理過程を調べた。鉛直積算湿潤静的エネルギー(MSE)は降水ピーク前に蓄積されるが、これは主に水平方向の MSE 移流によって説明された。凝集の顕著なコンポジットでは凝集化の見られないコンポジットよりも放射冷却が卓越するものの、放射対流フィードバックが機能しているのかについては明確な結論には至らなかった。



(3) ITCZ 周縁部で対流活動が強まった事象（右図はその具体例）に着目したコンポジット解析を行い、ITCZ 中心付近で強まった対照ケースと対比した。結果は以下のとおりまとめられる。ITCZ 中心で対流がピークに達した場合は、放射冷却が高層雲の温室効果により抑制され、大気への非断熱強制力（放射加熱と海面熱フラックスの和）の正のピークが顕著になる。一方、ITCZ 中心部では鉛直移流が深く同時に水平移流が顕著であるため、湿潤静的エネルギー (MSE) の力学的な持ち出し効果が卓越する。対照的に ITCZ の周縁部では、対流ピークに対応する非断熱強制力の効果は弱い、浅い対流に伴う MSE の持ち込み効果が顕著であり、その結果として非断熱強制力が弱いにもかかわらず降水強化が可能になると考えられる。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Masunaga Hirohiko, Mapes Brian E.	4. 巻 77
2. 論文標題 A Mechanism for the Maintenance of Sharp Tropical Margins	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Atmospheric Sciences	6. 最初と最後の頁 1181 ~ 1197
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/JAS-D-19-0154.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Sumi Yukari, Masunaga Hirohiko	4. 巻 76
2. 論文標題 Vertical Modes and Effective Stability of Quasi-2-Day Waves	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Atmospheric Sciences	6. 最初と最後の頁 2005 ~ 2022
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/JAS-D-19-0092.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Masunaga Hirohiko, Holloway Christopher E., Kanamori Hironari, Bony Sandrine, Stein Thorwald H. M.	4. 巻 34
2. 論文標題 Transient Aggregation of Convection: Observed Behavior and Underlying Processes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Climate	6. 最初と最後の頁 1685 ~ 1700
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/JCLI-D-19-0933.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Takahashi Hanii, Lebsack Matthew, Luo Zhengzhao Johnny, Masunaga Hirohiko, Wang Cindy	4. 巻 60
2. 論文標題 Detection and Tracking of Tropical Convective Storms Based on Globally Gridded Precipitation Measurements: Algorithm and Survey over the Tropics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Applied Meteorology and Climatology	6. 最初と最後の頁 403 ~ 421
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/JAMC-D-20-0171.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Jeyaratnam Jeyavinoth、Luo Zhengzhao Johnny、Giangrande Scott E.、Wang Di?、Masunaga Hirohiko	4. 巻 48
2. 論文標題 A Satellite Based Estimate of Convective Vertical Velocity and Convective Mass Flux: Global Survey and Comparison With Radar Wind Profiler Observations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020GL090675	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 MASUNAGA, H. AND B. E. MAPES
2. 発表標題 A Mechanism for the Maintenance of Sharp Tropical Margins
3. 学会等名 8th International EarthCARE Science Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 MASUNAGA, H. AND B. E. MAPES
2. 発表標題 A Mechanism for the Maintenance of Sharp Tropical Margins
3. 学会等名 22nd Conference on Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Masunaga
2. 発表標題 The fundamental time scales intrinsic of convectively coupled equatorial waves
3. 学会等名 CLICCS Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masunaga, H. and B. Mapes
2. 発表標題 A Mechanism for the Maintenance of Sharp Tropical Margins
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2019年大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 MASUNAGA, H., C. HOLLWAY, H. KANAMORI, S. BONY, T. H. M. STEIN
2. 発表標題 Transient aggregation of convection: Observed behavior and underlying processes
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masunaga, H.
2. 発表標題 The edge intensification of ITCZ convection
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (Online) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 増永浩彦
2. 発表標題 The edge intensification of ITCZ convection
3. 学会等名 熱帯気象研究会 (Online)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masunaga, H.
2. 発表標題 The edge intensification of Eastern Pacific ITCZ convection
3. 学会等名 AOS Colloquium Series, University of Wisconsin Madison (Online) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masunaga, H.
2. 発表標題 Cloud-radiation interactions in the real atmosphere: A-Train, EarthCARE, and beyond
3. 学会等名 EarthCARE Modeling Workshop (Online) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	鈴木 健太郎 (Suzuki Kentaroh) (00396946)	東京大学・大気海洋研究所・准教授 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
米国	University of Miami		
フランス	Laboratoire de Meteorologie Dynamique	Sorbonne University	
英国	University of Reading		