

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20740269

研究課題名(和文)

さまざまな大規模赤道波に伴う対流雲発達過程の観測研究：統一的理解に向けて

研究課題名(英文)

An observational study on convective development associated with a variety of large-scale equatorial waves: Toward the unified understanding

研究代表者：

増永 浩彦 (HIROHIKO MASUNAGA)

名古屋大学・地球水循環研究センター・准教授

研究者番号：00444422

研究成果の概要(和文)：熱帯海洋上に発達する対流雲は、熱帯地方の気象のみならず、大規模大気循環を通じて日本の気候形成にも大きな影響を及ぼす。対流雲発達過程を支配するメカニズムの理解を深めるため、熱帯大気の代表的な擾乱として知られるマデンジュリアン振動(MJO)、ケルビン波、および赤道ロスビー波に着目し、これらの相互関係に着目した衛星データ解析を行った。また、風や海流を通じた海洋と対流活動間の相互作用についての観測的知見を得るため、熱帯東太平洋の収束帯(ITCZ)の維持機構に着目した研究を行った。

研究成果の概要(英文)：Convective clouds developed over tropical oceans affect not only tropical meteorology but climate in Japan through large-scale atmospheric circulation. In order to better understand the mechanism controlling convective development, a satellite data analysis was carried out with focus on the interrelationship among the Madden-Julian Oscillation (MJO), Kelvin wave, and equatorial Rossby wave. Also explored is the mechanism that maintains the east Pacific inter-tropical convergence zone (ITCZ) so that air-sea interaction through wind and ocean currents is clarified.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：気象学・気候学

科研費の分科・細目：分科；地球惑星科学 細目；気象・海洋物理・陸水学

キーワード：熱帯気象学・大気海洋相互作用・衛星リモートセンシング

1. 研究開始当初の背景

熱帯と亜熱帯に広く分布する浅い積雲と深い対流雲は、気候場としてはハドレー循環の上昇域から下降域にかけて領域的な住み分け傾向が認められる。一方、より短い時間スケールの変動に着目すると、両者はしばしば同一降水システム内に共存し、組織的な構造を形成する。浅い積雲から深い対流コアに至る一連

の対流性降水とその背後に広がる層状性降水から構成される組織化構造は、時間的・空間的にスケールの異なるさまざまな大規模赤道波(ケルビン波、マデン・ジュリアン振動(MJO)など)に伴う形で観測されている。数時間から数十日、また数十キロから数千キロにおよぶスケールにわたり自己相似的な対流の深化

が見られる理由は何か、その解明を試みた本格的な研究は非常に限られている。しかし、熱帯対流システムと大規模力学・熱力学場の相互作用機構をより深く理解する鍵として、対流雲発達過程の自己相似性の解明は重要な手がかりを握ると考えられる。

2. 研究の目的

時空間スケールの大きい大規模赤道波を系統的に研究するには、衛星観測等に基づく広域データ解析が有効である。本研究代表者が過去の研究の中で確立した手法に基づき、熱帯降雨観測衛星 (TRMM) 搭載降水レーダ (PR) エコー頂高度及び可視赤外観測装置 (VIRS) 赤外輝度温度を用いて、熱帯降水雲を浅い積雲・雄大積雲・深い対流雲・深い層状雲に分類し、赤道波に伴う熱帯対流システム発達過程について包括的な理解を得ることを目的とする。ケルビン波と赤道ロスビー波の相互作用に伴う対流活性化の仕組みを理解する上で、先に触れた対流雲発達過程の自己相似性の物理的根拠を明らかにすることは不可欠であると考えられる。さらに、各赤道波モード固有の対流雲発達過程を個別に理解した上で、ケルビン波・赤道ロスビー波間相互作用の機構を明らかにし、MJO伝搬メカニズムの理解を深めることも主要な目的である。

3. 研究の方法

(1) 赤道波の同定手法

赤道波に付随する対流過程および力学・熱力学場の解析にあたり、本研究提案ではまずコンポジット解析を行う。まず、TRMM衛星降水データ (ここでは深い層状雲の面積被覆率の時間経度断面を用いる) に時空間帯域フィルタを適用し、MJOほか赤道波モードを個別に抽出する。次に、個々の赤道波について、降水活動度が最大となる経度を各時間断面において同定する。その経度を基点とし全データ期間にわたり平均場を求めることにより、コン

ポジット場を計算する。同様に降水活動度が最小となる経度を用いてMJO乾燥フェーズに対するコンポジットも計算し、降水フェーズ・コンポジットから乾燥フェーズ・コンポジットを差し引いてコンポジット偏差場を定義する。コンポジット偏差場は、赤道波に伴う大気場の変動を特徴的に表わしている。

(2) 海洋混合層の熱収支解析手法

大気海洋相互作用を観測的に明らかにするための一つのアプローチとして、様々な衛星データを組み合わせて海面熱フラックスを評価し、海洋混合層の熱収支解析を実行する。TRMM衛星マイクロ波放射計 (TMI) とQuikSCAT衛星散乱計 (SeaWinds) から潜熱フラックスと湧昇フラックスを、散乱計データをもとに海流を算出するOSCARプロダクトから水平移流フラックスを、さらにTRMMデータなどから地表面放射収支を構築したHERBプロダクトから海面放射 (短波および長波) フラックスを求め、熱帯東太平洋全域にわたる海面水温の支配要因を定量的に解析した。

4. 研究成果

(1) 赤道波に伴う対流雲の組織化

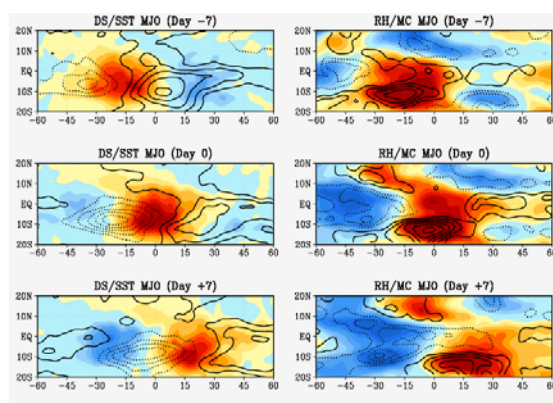


図 1 MJO についてのラグ・コンポジット図。上から下へ順に-7日目から+7日目。左列) 深い層状雲 (階調) 及び SST (コントア)。右列) 鉛直積算相対湿度 (階調) および湿度収束 (コントア)。

MJOについてのラグ・コンポジット図（図1）では、MJO対流ピークを引き起こす要因の一部と考えられる海面水温（SST）の先行的な上昇および湿度収束がもたらす湿潤化のようすが捉えられている。このようなラグ相関（時間差を伴う相関）は、図2においてより定量的に評価することができる。

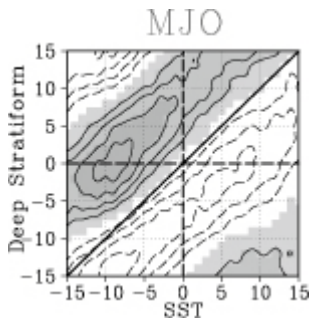
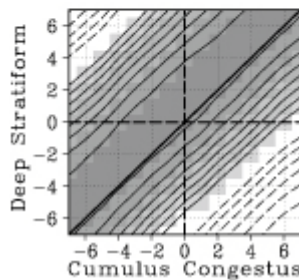
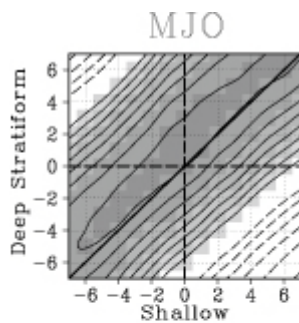


図2 深い層状雲とSSTについてのラグ相関図。グレー部は相関係数が正となる領域をあらわす。

図2では、SSTと深い層状雲の相関係数がMJO対流ピークの10日前に最も高くなっていることが分かる。同様のラグ相関図を、浅い積雲および雄大積雲を深い層状雲との比較において示したものが図3である。

図3 SSTの代わりに浅い積雲（上図）および雄大積雲（下図）を用いた場合は図2と同様



浅い積雲と雄大積雲は、MJO対流ピークに1ないし2日先立ち増大している。一方、（ここでは図を示さない

が）非降水性高層雲は対流ピークよりやや遅れて広がりを見せることが分かった。これらの結果を総合すると、MJOに伴う雲システムは対流ピークに向け次第に深さを増し、対流ピーク後は深い対流雲から放出された巻雲の

広がりが顕著に見られることが推察される。ここで示唆された結論は、図4にまとめられる。

Austral summer MJO schematic

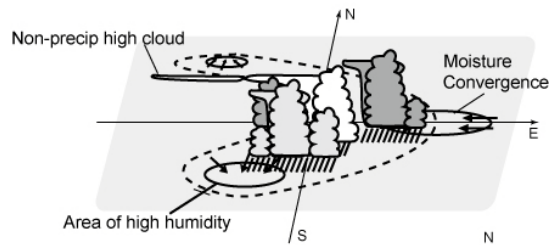


図4 本研究の結果から推察されるMJOの概略図を示す。

(2) 熱帯東太平洋収束帯（ITCZ）の維持機構

東太平洋の熱帯収束帯（ITCZ）は赤道から緯度方向に 5° - 10° ほど離れており、また一年の大半は北半球側にだけ存在することが知られている。一方、3月から4月にかけては南半球側にもITCZが現れ、北側をふくめ2本の対を形成することから二重ITCZと呼ばれる。しかしながら、二重ITCZが南半球秋季にだけ現れ、北半球秋季にはまったく生じないこと理由は、必ずしも明らかにされていない。南半球秋季における東太平洋二重ITCZの成長メカニズムを解明するため、熱帯降雨観測衛星（TRMM）およびマイクロ波散乱計QuikSCATを用いて、海面水温（SST）、下層収束場、可降水量、浅い積雲や深い対流雲、海面熱フラックスの8年（2000年から2007年）にわたる気候値を解析した。解析結果によると、南半球ITCZの最初の兆候は1月にはすでにSSTに現れていた。これを南東太平洋温水帯と呼ぶことにする。温水帯はその顕著な特徴として 90° WにSST最大値を取るが、これは正負も地理的パターンもまちまちな複数の海面熱フラックスが競合する結果として説明できることが示された。下層収束と可降水量は、南東

太平洋温水帯上でじわじわと発達する。2月になると浅い積雲が南半球 ITCZ に沿って増殖し、その一ヵ月後の3月になってようやく活発な深い対流雲が組織的に南半球 ITCZ のパターンを形成するようになる。すなわち、二重 ITCZ は南半球秋季に突然出現するわけではなく、先行する夏季に始まる SST の上昇が引き金となって段階的な進化の末に形成される事実が明らかにされた。

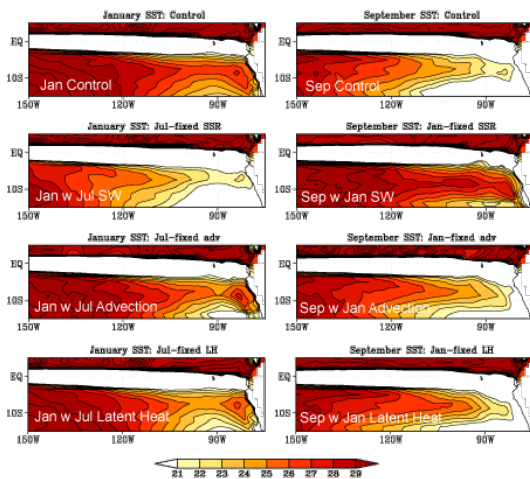


図5 実験結果の抜粋。左列が北半球秋季実験・右列が南半球秋季実験。上から対照実験、短波固定実験、移流固定実験、潜熱固定実験。

次に、南東太平洋温水帯をもたらし主要な原因を探るため、簡単な仮想実験を行った。実験では、海洋混合層の熱収支を衛星データから推定される海面熱フラックス（長波・短波・潜熱・移流・湧昇）をもとに計算した。ここでは、以下に述べる2組の実験を行う。一つ目は「北半球秋季実験」であり、11月1日の観測値を初期条件として SST を熱収支方程式の時間積分により算出する。対照実験では、すべての熱フラックスの日々の変化を考慮するが、追加実験ではいずれかの熱フラックスを「偽の」季節の値（今の場合は7月気候値）で固定し、そのほかのフラックスについては対照実験と同じく日々の変動を許す。もうひ

と組の実験は「南半球秋季実験」であり、初期条件を7月1日とし「偽の季節」を1月気候値と定義するほかは北半球秋季実験と同じである。図5に示す実験結果の抜粋から読み取れるように、短波放射（上から2番目）を切り替えた時に、温水帯が最も顕著に消えたり現れたりすることがわかる。すなわち、南東太平洋温水帯を駆動する主要因は混合層が吸収する短波フラックスであり、寄与は小さいが2次的な原因として湧昇の効果も見られた。南半球 ITCZ が存在する緯度では、南半球夏季から2月下旬にいたるまで日射量が年間最大値を維持し、結果として南東太平洋における SST の極大値を生み出し、ひいては3月の南半球 ITCZ をもたらし。北半球秋季に二重 ITCZ が存在しない理由はもはや明らかである：北半球の秋は南半球側では先行する季節が冬季にあたるため日射量は少なく、南半球側で温水域を維持することができないからである。実際、海洋混合層の熱収支計算の結果によると、7月には短波フラックスより潜熱や長波フラックスといった負のフラックスが勝り、混合層は冷却傾向にあることがわかった。残された謎は、南半球 ITCZ がなぜ一過性ですぐに消えてしまうかという疑問より、むしろ北東太平洋で ITCZ が一年中持続できる理由のほうだと言える。

ITCZ の南北非対称性を説明する理論は幾つか存在するが、それらの仮説を定量的に検証する観測研究は必ずしも十分になされていない。この問題意識に立ち、多様な衛星データを駆使して海洋表層の熱収支解析を行うことにより、東太平洋 ITCZ の赤道非対称性のメカニズムを調査する研究を続けて行った。解析の結果、海洋が吸収する短波放射フラックス (Q_{sw}) の年平均気候値は、北半球 ITCZ 内の高層雲による太陽放射遮蔽効果により顕著な南北非対称を示すことが分かった (図6)。

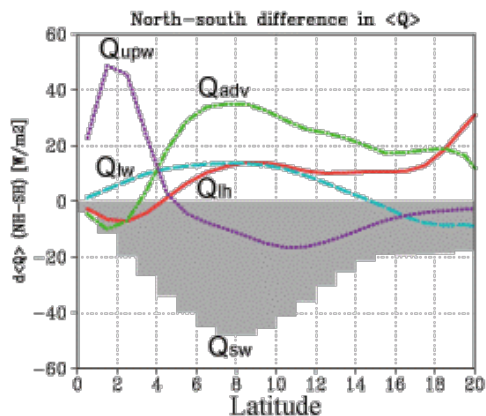


図 6 熱フラックスの南北非対称性。短波放射 (灰色ヒストグラム)、潜熱 (赤)、湧昇 (紫)、移流 (緑)、長波放射 (淡青)。

短波放射が引き起こす非対称に釣り合う要因として、海洋混合層の移流による熱輸送 (Q_{adv}) が (唯一の要因ではないにせよ) 最も重要であった。他の熱フラックスとくに潜熱フラックス (Q_{lh}) は絶対値としては移流熱フラックスの効果に大きく勝るが、赤道非対称性を説明する上では 2 次的な効果しか持たない。移流熱フラックスの非対称性をもたらす原因は、中米沿岸の温水域および (程度は小さいものの) 北赤道反流から温水が輸送されること、そしてこのいずれの効果も南半球には存在しないことで説明できる。中米沖に温水域が形成される一方南米沖の海水が冷たい原因は、おそらく大陸沿岸線が南北非対称に分布する地勢的条件に端を発していると考えられる。年平均気候場のみならず、季節変化の振幅に見られる南北非対称も、北半球側だけで ITCZ が維持される要因として重要である。地球公転軌道のわずかなゆがみや海洋混合層の短波吸収率の南北勾配など複数の原因が組み合わさる結果、北東太平洋で経験する季節変化は南東太平洋に比べて顕著に振幅が小さい。海面温度 (SST) を熱収支式を

もとに算出する簡単な数値実験を行ったところ、振幅の小さな北半球熱フラックスの季節進行は SST の季節変動を抑制し、その結果 ITCZ が一年中にわたり定在することが示された。

本研究で得られた結果に照らし、ITCZ 非対称性に関する既存の理論を検証した。1) 風・蒸発・SST (WES) フィードバックはプロセス自体は機能はしているものの、それ単独で赤道非対称を説明するには弱すぎる。2) 下層雲-SST フィードバックは南米沿岸の局所的な効果に留まる。3) 湧昇-SST フィードバックは赤道冷舌域に限られ、ITCZ を維持する役目を果たすとは考えにくい。

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 Masunaga, H. and T. S. L'Ecuyer, 2011: Equatorial asymmetry of the east Pacific ITCZ: Observational constraints on the underlying processes, *J. Climate*, **24**, 1784-1800 査読有
- ② Masunaga, H. and T. S. L'Ecuyer, 2010: The southeast Pacific warm band and double ITCZ, *J. Climate*, **23**, 1189-1208 査読有
- ③ Masunaga, H., 2009: A 9-season TRMM observation of the Austral Summer MJO and Low-frequency Equatorial Waves, *J. Meteor. Soc. Japan*, **87A** (Special issue on Precipitation Measurements from Space), 295-315. 査読有

[学会発表] (計 7 件)

- ① 増永浩彦: 熱帯メソ擾乱: 衛星観測の限界に挑む、第 34 回メソ気象研究会、京都府宇治市 (2010 年 10 月)
- ② 増永浩彦: 東太平洋 ITCZ の赤道非対称性: 衛星観測に基づく再検討、日本気象学会 2010 年度春季年会、#D159、東京都渋谷区 (2010 年 5 月)
- ③ Masunaga, H.: The southeast Pacific warm band and double ITCZ, *The 29th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology*, 米国アリゾナ州ツーソン (2010 年 5 月)
- ④ 増永浩彦: The southeastern Pacific

warm band and double ITCZ、熱帯気象研究会、北海道札幌市 (2009年9月)

- ⑤ Masunaga, H.: Origins of moisture development leading MJO convective burst, *MOCA-09 (the IAMAS/IAPSO/IACS 2009 joint assembly)*, カナダ ケベック州モントリオール (2009年7月)
- ⑥ Masunaga, H.: On the development of the eastern Pacific double ITCZ. "Satellite Observations of Air-sea Interaction", 89th American Meteorological Society Annual Meeting, 米国アリゾナ州フェニックス (2009年1月)
- ⑦ 増永浩彦: 東太平洋 double ITCZ の発達過程について、日本気象学会 2008 年度秋季年会, #C206, 宮城県仙台市 (2008年11月)

[その他]

ホームページ等

<http://precip.hyarc.nagoya-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

増永 浩彦 (HIROHIKO MASUNAGA)

名古屋大学・地球水循環研究センター・准教授

研究者番号: 00444422

(2) 研究分担者

該当なし

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

該当なし

()

研究者番号: