

令和 2 年 9 月 9 日現在

機関番号：13201

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2017～2019

課題番号：16KK0095

研究課題名（和文）赤道波と雲・降水の結合メカニズムの解明（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Similarities and Differences in Convectively Coupled Equatorial Waves and MJO
(Fostering Joint International Research)

研究代表者

安永 数明 (Yasunaga, Kazuaki)

富山大学・学術研究部都市デザイン学系・教授

研究者番号：50421889

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,000,000円

渡航期間： 9ヶ月

研究成果の概要（和文）：鉛直積算した水蒸気収支式の各項と、降水の関係をスペクトル空間で評価した。具体的には、それぞれの物理量と降水とのクロススペクトルを計算し、実部と虚部に着目することで、MJO、TD-Type 擾乱、赤道波擾乱の維持・発達メカニズムや伝搬メカニズムの特徴の違いを明らかにした。また鉛直流を直交関数展開して主要な2つのモードを同定し、その間の位相関係を波数・周波数空間で調べることで、MJOやTD-Type 擾乱、赤道波の鉛直構造の違いを明らかにした。更に、水蒸気収支式の各項の確率密度分布を比較することで、熱帯東インド洋の赤道付近の水蒸気の蓄積過程の違いに関する新たな仮説を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

赤道域では、日本の位置する中緯度と違って温帯の低気圧は存在せず、雲・降水の発達は赤道波やMJOとよばれる擾乱によって大きく影響を受けている。しかし、「どのように影響を受けているか」については分かっていない。大枠での理論体系がほぼ確立している中緯度に比べて、熱帯気象学の未成熟さを表しており、本研究成果は熱帯気象学の確立のための大きな意義を持つ。また天気予報のベースとなる数値予報で用いられる数値モデルにおいて、熱帯の降水活動の再現性が低く、1週間以上という中・長期の天気予報の精度向上の足かせとなっている。このことから本研究成果は、社会的にも重要な役割を果たしている天気予報の精度向上にも貢献し得る。

研究成果の概要（英文）：The present investigation examined the budget of column-integrated moist static energy in wavenumber-frequency transforms of longitude-time sections over the tropical belt, making use of cross-spectra with satellite-derived precipitation, and clarified similarities and differences in the moisture evolution and propagation mechanisms associated with convectively-coupled equatorial waves (CCEWs), Madden-Julian oscillation (MJO), and tropical depression-type disturbances (TDs). 2 leading modes of the vertical wind profiles were identified, and phase relationships between the 2 modes were also examined to elucidate the different vertical (tilting) structures among the CCEWs, MJO and TDs. In addition, new mechanisms of the moisture accumulation over the eastern Indian Ocean were proposed, comparing probability functions of each term in the moisture budget equation.

研究分野：熱帯気象

キーワード：赤道波 MJO 対流

1. 研究開始当初の背景

赤道域では、コリオリの効果は非常に小さい(赤道上で0)。一方で、コリオリ因子の緯度変化は赤道上で最大となる。このような特徴により、赤道付近に捕捉された波が存在し、それを赤道波と総称する。赤道波の水平構造や分散関係については、Matsuno (1966)によって理論的に導き出されており、その後の観測データの解析からも、理論的に得られたものに良く対応した波が、実際の熱帯大気中に存在していることが示されている。日本の位置する中緯度では雲・降水の発達には、いわゆる「温帯低気圧」によって大きく影響を受ける。熱帯では、そのような低気圧は存在しない。一方で雲・降水の発達は、赤道波の特定の位相に集中して見られ、熱帯の雲・降水の発達は、赤道波によって大きく影響を受けている。しかし、「赤道波による風や水蒸気・温度の変動が、雲・降水の発達をどうコントロールしているか」については、あまり理解が進んでいない。

赤道域において最も卓越する擾乱として、マッデン・ジュリアン振動(以下MJO)とよばれる現象が、赤道波とともに存在する。これは、米国の研究者のRoland MaddenとPaul Julianが1971年に発見した、数千キロメートルにわたる大規模な雲・降水活動を伴う現象であり、このMJOの特徴として

- 雲群は主にインド洋で発生する
- 雲群はゆっくりと東向きに進む
- 同じ場所では30-60日程度の周期で現れる

等が挙げられる。MJOは、低緯度域の日々の天気と大きく影響を与えているが、それだけでなく低緯度域における季節(卓越風:モンスーン)の入れ替わりにも関係していたり、エルニーニョ現象の発生・終息や、熱帯低気圧発生にも関係していたりしている。これまでMJOに関して数多くの研究が行われてきた。しかし、大規模な雲群がどのようにインド洋上で出来上がるのか? 出来上がった雲群がどうしてゆっくりと東向きに進むのか? 等の基本的な性質が発見から約50年たった今でも解明されていない。

以上のように、対流と結合した赤道波やMJOに関する理解不足は、大枠での理論体系が、ほぼ確立している中緯度とは対照的で、熱帯気象学の未成熟さを表している。またそうした理解不足を反映して、天気予報のベースとなる数値予報で用いられる数値モデルにおいて、赤道波やMJOに関わる雲・降水活動の再現性が低く、1週間以上という中・長期の天気予報の精度向上の足かせとなっている。

これらのことから、赤道波やMJOをより深く理解するための理論体系作りは、熱帯気象学の確立のための大きな課題の1つであるとともに、社会的にも重要な役割を果たしている天気予報の精度向上のための大きな課題の1つであるといえる。

2. 研究の目的

降水は、一般的に大気中の水蒸気量と密接な関係があるが、特に熱帯では、降水量が大気中の水蒸気量に比例的な関係があることが知られている(例えば、Bretherton et al. 2004)。水蒸気は、降水に比べて時間的、空間的な局所性が低く、降水よりも変動を調べるのがずっと容易である。このことから、対流と結合した赤道波やMJOにおける擾乱の維持・発達メカニズムや伝搬メカニズムを考えるうえで、水蒸気の変動に着目するのは、最も自然で理にかなっている。本研究では、対流と結合した赤道波やMJOに伴う大気中の水蒸気の変動の特徴と、その変動メカニズムの違いを明らかにすることを通じて、赤道波やMJOにおける擾乱の維持・発達メカニズムや伝搬メカニズムを理解することを目的とした。

大気中の水蒸気量の収支は、

$$\left\langle \frac{\partial q_v}{\partial t} \right\rangle = -\langle \mathbf{u} \cdot \nabla q_v \rangle + E - P$$

で与えられる。ここで、 q_v は比湿($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、 \mathbf{u} は3次元の風($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、 E は地表面の蒸発量($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)、 P は降水量($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)、 $\langle \cdot \rangle = \int_{z_{\text{sfc}}}^{z_{\text{top}}} \rho(\cdot) dz$ という鉛直積算を表す。しかし、上式では右辺に最終的な目的となる物理量である降水量 P が陽に表れる。そこで、鉛直積算した乾燥静的エネルギー(Dry Static Energy; DSE)の収支式

$$\left\langle \frac{\partial s}{\partial t} \right\rangle = -\langle \mathbf{u} \cdot \nabla s \rangle + \langle Q_R \rangle + H + LP$$

と組み合わせることで、鉛直積算した湿潤静的エネルギー(Moist Static Energy; MSE)の収支式

$$\left\langle \frac{\partial h}{\partial t} \right\rangle = -\langle \mathbf{u} \cdot \nabla h \rangle + \langle Q_R \rangle + LE + H$$

に着目する。ここで、 s はDSE($s = C_p T + gz$)、 h はMSE($h = s + Lq_v$)、 $\langle Q_R \rangle$ は正味の放射加熱率($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)、 H は地表面顕熱フラックス($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)、 L_v は凝結熱($L_v = 2.5 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)、 $C_p = 1004 \text{ (J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ は乾燥空気の定圧比熱、 $g = 9.8 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-2}]$ は重力加速度、 z はジオポテンシャル高度(m)を表す。

熱帯では、ロスビーの変形半径が大きいいため水平温度勾配が小さく(Charney 1963)、日周期以上の時間スケールでは温度の時間変化も無視できる。この組み合わせは、Weak Temperature

Gradient (WTG; Sobel et al. 2001) 近似とよばれ、この近似の下で、

$$\left\langle \frac{\partial h}{\partial t} \right\rangle \approx L_v \left\langle \frac{\partial q_v}{\partial t} \right\rangle$$

とみなすことができる。したがって、日周期以上の時間スケールの擾乱において、水蒸気収支は、

$$L_v \left\langle \frac{\partial q_v}{\partial t} \right\rangle \approx -\langle \mathbf{u} \cdot \nabla h \rangle + \langle Q_R \rangle + LE + H$$

として評価できる。

上式を基に、本研究では鉛直積算した MSE の収支に着目しながら、赤道波や MJO に伴う大気中の水蒸気の変動の特徴と、その変動メカニズムの違いを明らかにすることを目的とした。この研究の一部は、本国際共同研究の提案の基礎となった基盤研究 C「赤道波と雲・降水の結合メカニズムの解明」で行ったものであるが、本国際共同研究において、先行研究との関連を整理しながら定式化を含めて、より汎用性の高い形にまとめたことから、ここでは(重複する部分があるが)基盤研究 C の成果の一部も含めて記載する。

また本国際共同研究の、基盤研究 C「赤道波と雲・降水の結合メカニズムの解明」からの大きな進捗の 1 つとして、擾乱の鉛直構造に関する研究がある。現在提唱されている MJO の発達理論における、有力な仮説の 1 つである「水蒸気モード」とよばれる考えでは、「対流圏の中層と上層に極大を持つ 2 種類の加熱プロファイルの形が、可降水量の増加・減少において本質的に重要である」と指摘している。特に、対流圏の中層に極大を持つ加熱プロファイルが、対流圏の上層に極大を持つ加熱プロファイルに比べて優位になることが、MJO に関わる擾乱の発達に本質的に重要と考えられている。このことから、本国際共同研究と基盤研究 C で開発した解析手法を応用することで、鉛直積算した水蒸気量だけでなく、MJO や赤道波における鉛直プロファイルの特徴の違いを評価することを試みた。

更に、本国際共同研究の提案の基礎となった基盤研究 C「赤道波と雲・降水の結合メカニズムの解明」における研究成果として、「MJO 活発期において、可降水量の平均値は赤道付近で幅広い極大を示す一方で、極端に大きな値の観測頻度は、赤道で極小、南北に数度程離れた緯度で極大となる」という発見があるが、本国際共同研究では、これを発展させる形で、MJO のインド洋における発生過程を明らかにすることを目的に、MSE の収支式に着目しながら、大気中の水蒸気の蓄積過程の緯度や経度による違いについても調べた。特に、熱帯域のインド洋から西太平洋にまたがる warm pool とよばれる海面水温の高い海域において、MJO が発達するような大量の水蒸気が貯まるメカニズムの場所(特に緯度)による違いに着目した。

3. 研究の方法

本研究では、フーリエ変換が線型操作であることを利用して、MSE の収支式における各項の寄与をスペクトル空間において評価した。より具体的には、波数・周波数空間において MSE の時間変化に対する各項の寄与を、

$$\frac{P_{k,\omega}^* \left\langle \frac{\partial h}{\partial t} \right\rangle_{k,\omega}}{L |P_{k,\omega}^* P_{k,\omega}|} = \frac{-P_{k,\omega}^* \langle \mathbf{u} \cdot \nabla h \rangle_{k,\omega}}{L |P_{k,\omega}^* P_{k,\omega}|} + \frac{P_{k,\omega}^* \langle Q_R \rangle_{k,\omega}}{L |P_{k,\omega}^* P_{k,\omega}|} + \frac{P_{k,\omega}^* (H + LE)_{k,\omega}}{L |P_{k,\omega}^* P_{k,\omega}|}$$

から計算した。ここで k は東西方向の波数、 ω は周波数である。降水に関係した変動成分に着目するために降水も波数・周波数空間へと変換して、その複素共役 ($P_{k,\omega}^*$) を各項に掛けて(即ちクロススペクトルを計算し)、その実部(コスペクトル)と虚部(クオドラチャスペクトル)を取り出している。また大気は低周波数・低波数で大きな変動成分を持つ性質があるので、降水のパワースペクトルで正規化している(この操作により、単位は $(W \cdot m^{-2}) \cdot (W \cdot m^{-2})^{-1}$ の無次元となる)。

熱帯では、降水量が大気中の水蒸気量に比例的な関係があることから、上式の実部から、降水と同位相で変動する MSE (近似的に大気中の水蒸気量) が、どの項によって維持されているか、どの項によって減衰させられているかが分かる。同様に上式の虚部から、降水と 90° 離れた位相で変動する MSE (近似的に大気中の水蒸気量) が、どの項によって駆動されているかが分かる。こうした解析手法は、本研究とその提案の基礎となった基盤研究 C「赤道波と雲・降水の結合メカニズムの解明」において開発したものである。

また鉛直構造の違いを明らかにするために、鉛直を直角関数展開して主要な 2 つのモードの間の位相関係を、MSE 収支式と同様に波数・周波数空間で調べた。より具体的には、対流性降水に対応する深い構造の鉛直と、層状性降水に対応する浅い構造の鉛直の間のクロススペクトルを計算して、その実部(コスペクトル)と虚部(クオドラチャスペクトル)の比から、鉛直構造の傾きの擾乱による違いを定量的に調べた。

更に、熱帯域のインド洋から西太平洋にまたがる warm pool とよばれる海面水温の高い海域において、大量の水蒸気貯まるメカニズムの場所(緯度、経度)による違いを明らかにするために、可降水量の値ごとに、水蒸気(MSE)収支式の各項の値の確率密度分布を作り、その場所による違いを統計的に比較した。

4. 研究成果

熱帯擾乱の発達メカニズムに関して、MJO と TD (Tropical Depression) -Type では、水平移

流はそれぞれ減衰・発達に寄与していることが分かった。一方で赤道波擾乱では、水平移流の影響は殆どないことが分かった。また放射加熱に関しては、どの擾乱に関しても維持・発達に働いており、特に低波数・低周波数の擾乱において重要であることが明らかになった。地表面熱フラックスに関しては、どの擾乱においても、維持・発達過程に殆ど影響がないことが分かった。鉛直移流項は、全ての擾乱で振幅を減少させる働きを持っていたが、いくつかの時間スケールに分解して調べると、短い時間スケールの鉛直移流の非線形効果は、逆に振幅を増加させる働きを持っており、定量的にも放射加熱と同程度の寄与を持っていることが分かった。

伝搬メカニズムに関しては、MJO と TD-Type, 赤道ロスビー波擾乱では、水平移流が伝搬に最も大きな影響を持っていることが分かった。特に TD-Type では水蒸気の変動の 40% 近くが水平移流で説明されていた。一方で、Kelvin 波を含む重力波では鉛直移流が最も重要であった。また放射加熱や地表面フラックスに関しては、いずれの擾乱においても伝搬過程において 2 次的な貢献しかしていなかった。

鉛直構造に関しては、先行研究によって強調されてきた MJO の上方にいくほど西方に Top-heavy (対流圏上層で上昇流が卓越する) となる傾いた構造は、赤道波擾乱 (Kelvin 波や慣性重力波) などと比べると非常にわずかであることが分かった。これは前述の、放射過程が低波数・低周波数の擾乱において発達・維持に重要な働きを持つ、という結果と矛盾がない。しかしこれは、先行研究から一般的に信じられてきた認識とは完全に対立する結果であるので、これが真実であれば、MJO の理論体系に与える影響は非常に大きい。今後、こうした鉛直構造に関する研究を更に進める必要がある。

また熱帯東インド洋における水蒸気の時間変化について、赤道上ではその南北と比較して、高可降水量であるときに、可降水量を大きく減らす傾向が強くなっていた。このことは、赤道上で高可降水量を維持 (もしくは更なる加湿) し難い傾向があることを意味する。この可降水量の時間変化量に対する MSE 収支式の各項の寄与を調べると、乾燥静的エネルギーの時間変化量、MSE の水平・鉛直移流量、非断熱加熱 (放射加熱と地表面フラックス) のなかで、MSE の水平移流が最も効果的に可降水量を減らす効果を持っていることが分かった。可降水量と鉛直流の関係を調べると、赤道上ではその南北と比較して、高可降水量であるほど top-heavy (対流圏上層で上昇流が卓越する) な鉛直プロファイルが卓越しやすくなっていた。このことから、赤道上では対流圏上・下層での発散、及び中層での収束に伴う水平移流が、可降水量を減少させる傾向が強いことの主な原因であることが示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Inoue, K., A.F. Adames, and K Yasunaga	4. 巻 77
2. 論文標題 Vertical Velocity Profiles in Convectively Coupled Equatorial Waves and MJO: New Diagnoses of Vertical Velocity Profiles in the Wavenumber-Frequency Domain	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Atmospheric Sciences	6. 最初と最後の頁 N/A
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1175/JAS-D-19-0209.1	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 Yasunaga, K., A. Hamada, and K. Nishii	4. 巻 15
2. 論文標題 An increasing trend in the early-winter precipitation around Japan and its relationship with enhanced heating over the tropical eastern Indian Ocean	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Online Letters in the Atmosphere (SOLA)	6. 最初と最後の頁 238-243.
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.2151/sola.2019-043	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 Yasunaga, K., S. Yokoi, K. Inoue, and B. E. Mapes	4. 巻 32
2. 論文標題 Space-Time Spectral Analysis of Moist Static Energy Budget Equation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Climate	6. 最初と最後の頁 501-529
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0334.1	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 安永数明	4. 巻 43
2. 論文標題 インド洋の雨が北陸の雪となる？ 地球スケールの天気つながり	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 とやまと自然	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 -

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Yasunaga, K. and R. Okugawa
2. 発表標題 Numerical simulations of the precipitation along the coastal areas of Sumatera Island
3. 学会等名 100th American Meteorological Society Annual Meeting (Boston, Massachusetts, USA) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yasunaga, K.
2. 発表標題 An increasing trend in the early-winter precipitation around Japan and its linkage with the enhanced heating over the tropical eastern Indian Ocean
3. 学会等名 100th American Meteorological Society Annual Meeting (Boston, Massachusetts, USA) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kuniaki Inoue, A. F. Adames and K. Yasunaga
2. 発表標題 Vertical Velocity Profiles in Convectively Coupled Equatorial Waves and the MJO: New Diagnoses of Vertical Velocity Profiles in the Wavenumber-Frequency Domain
3. 学会等名 100th American Meteorological Society Annual Meeting (Boston, Massachusetts, USA) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 安永数明・西井和晃
2. 発表標題 北陸における初冬季の降水量の増加と熱帯インド洋の降水
3. 学会等名 日本気象学会秋期大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安永数明・西井和晃
2. 発表標題 北陸における初冬季の降水量の増加と熱帯インド洋の降水
3. 学会等名 日本海洋学会秋季大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安永数明
2. 発表標題 赤道波擾乱における湿潤静的エネルギーの維持・減衰メカニズム
3. 学会等名 日本海洋学会秋季大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥川椋介，安永数明，濱田篤
2. 発表標題 スマトラ島西岸における沿岸降水帯に関する数値実験
3. 学会等名 日本気象学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥川椋介，安永数明，濱田篤
2. 発表標題 スマトラ島西岸における沿岸降水帯に関する数値実験
3. 学会等名 第21回非静力学モデルに関するワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥川 棕介, 安永数明, 濱田 篤
2. 発表標題 スマトラ島西岸における沿岸降水帯に関する数値実験
3. 学会等名 第11回熱帯気象研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安永数明
2. 発表標題 The relationship between the ITCZ and moisture accumulation over the eastern Indian Ocean
3. 学会等名 第11回熱帯気象研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasunaga, K. and R. Okugawa
2. 発表標題 Numerical simulations of the diurnal cycle of precipitation during Pre-YMC field campaign
3. 学会等名 33rd Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 飯田大晴, 安永数明
2. 発表標題 熱帯域東インド洋における地域による水蒸気変動特性の違い
3. 学会等名 日本気象学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 奥川 隼介, 安永 数明
2. 発表標題 SCALE-RMを用いたスマトラ島西岸の沿岸降水帯に関する数値実験
3. 学会等名 日本気象学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 飯田 大晴, 安永 数明
2. 発表標題 熱帯域東インド洋における地域による水蒸気変動特性の違い
3. 学会等名 熱帯気象研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 SCALE-RMを用いたスマトラ島西岸の沿岸降水帯に関する数値実験
2. 発表標題 奥川 隼介, 安永 数明
3. 学会等名 熱帯気象研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安永 数明, Brian Mapes
2. 発表標題 赤道波擾乱における湿潤静的エネルギーの維持・減衰メカニズムの違い
3. 学会等名 日本気象学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安永数明、Brian Mapes
2. 発表標題 赤道波擾乱における湿潤静的エネルギーに着目した伝搬メカニズムの違い
3. 学会等名 日本気象学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasunaga, K. and M. Tomochika
2. 発表標題 An increasing trend in the early-winter precipitation during recent decades along the coastal areas of the Sea of Japan
3. 学会等名 AMS 98th Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018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
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	メイブス ブライアン (Mapes Brian)	マイアミ大学・Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Sciences・教授	