

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 16 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23740351

研究課題名(和文) 熱帯大気と積雲対流の相互作用：衛星複合利用による全球観測研究の新展開

研究課題名(英文) A novel strategy by a combined use of multiple satellites for studying the interactions of the tropical atmosphere with moist convection

研究代表者

増永 浩彦 (Masunaga, Hirohiko)

名古屋大学・地球水循環研究センター・准教授

研究者番号：0044422

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：熱帯の積雲対流を引き起こす大気の状態を把握し、また逆に対流活動が引き起こす大気状態の変化を調べることは、熱帯のスコールのような激しい降水をもたらす物理機構を理解する上で不可欠である。本研究では、多様な衛星観測装置を駆使して熱帯大気と積雲対流の相互作用を追跡する新しい解析手法を開発し、既存の衛星データでは困難と考えられてきた1時間刻みの短期変動を抽出することに成功した。解析の結果、対流発生とともに大気不安定度が急速に減少するが対流の収束とともに緩やかに回復することや、激しい降水の「燃料」は主として自由対流圏の水蒸気収束が担うことなど、既存の知識に立脚しつつ同時に新たな知見をもたらす成果を得た。

研究成果の概要(英文)：It is crucial for understanding the physical mechanisms of squall-like heavy precipitation to study the atmospheric states favorable for the development of tropical cumulus convection and, conversely, the effects of convective activity on the atmospheric variability. In this work the short-term (or hourly) variability has been successfully delineated by exploiting an ensemble of various satellite instruments, which was considered before to be a difficult task. It is found that the atmospheric instability rapidly decreases as convection develops while recovering gradually after the convection ceases, and that the free-tropospheric moisture convergence is the primary factor that "fuels" heavy precipitation. These findings not only confirm the existing knowledge but led to some new insights into tropical meteorology.

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：熱帯気象学 衛星リモートセンシング

1. 研究開始当初の背景

熱帯は全球降水量の半分以上を担う多雨地帯であり、地球水循環の要の一つであると同時に大気大循環の駆動メカニズムを理解する上で主要な鍵となることが知られている。しかしながら、傾圧不安定のような総観規模力学の支配が弱い熱帯大気は、降水の生成・発達過程を大規模力学・熱力学場との関連において説明する統一的な理論を構築することが難しい。雲対流を活性化または抑制する上で鍵となる環境場の条件(大気安定度・収束場など)を特定する研究には長い歴史があるが、論争は現在に至るまで続いている。

湿度収束や地表面熱フラックスなど大気場を不安定化する大規模強制力に対し、熱帯の対流雲がその「調停者」としての役割を果たすと一般に考えられている。このような対流による中立化効果は、荒川・Schubert 両博士によって「準平衡仮説」の枠組で定式化され、以後この仮説は多くの積雲パラメタリゼーションスキームの基礎として広く受け入れられてきた。一方、近年の研究では、当初考えられた形の準平衡仮説に変更を迫る観測事実も発見されている。

また比較的新しい問題提起として、熱帯対流圏中層の湿度が降水強度と密接な関わる観測事実が着目されるようになった。降水強度は鉛直積算相対湿度(水蒸気量と飽和水蒸気量をそれぞれ鉛直積算して比を取った量、以下 CRH)に対して指数関数的に増加するが、その増加率は衛星観測の日平均データを用いた研究(Bretherton ほか、2004)に比べて現場観測を組み合わせて導出した解析(Raymond et al., 2007)のほうが遥かに強い非線形性を示すことが知られており、統一的な見解が得られていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、広域観測に不可欠な衛星データ解析を用いて熱帯・亜熱帯海洋全域

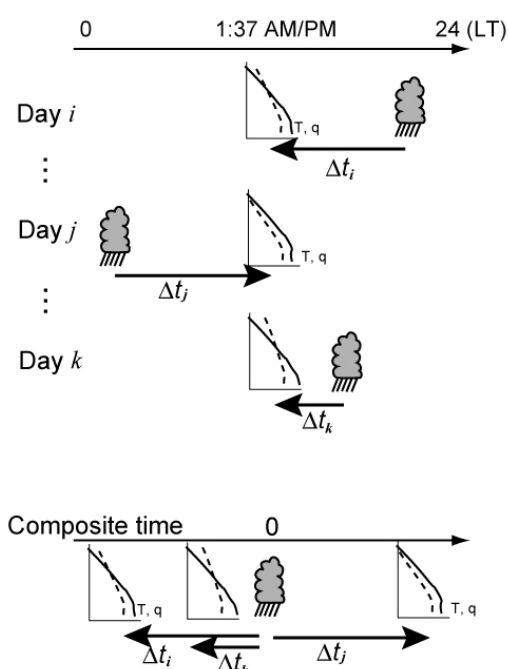
を網羅的に解析し、雲・大気相互作用の全体像を明らかにすることである。気温や湿度などの大気熱力学場は ECMWF や NCEP また気象庁等が提供する再解析データを用いた解析が一般的であるが、再解析データは使いやすさに優れる反面、固有の限界もある。とくに雲・大気相互作用に注目する研究においては、再解析データを用いるばあい同化モデルの積雲スキームに起因する不確実性を適切に評価する上で困難を伴う。解析対象を衛星データに限る利点の一つがここにある。

地球観測衛星の技術的性能と多様性は、前世紀末から現在までの 10 年余りで大きく変化した。とりわけ、熱帯降雨観測衛星(TRMM)搭載降雨レーダ(PR)や Aqua 衛星搭載高波長分解能赤外大気サウンダ(AIRS)などの登場により、気温・湿度・降水の鉛直構造を推定するリモートセンシング技術は飛躍的に向上した。TRMM 衛星運用開始から 12 年、Aqua 衛星打上げから 8 年を迎えたいま、気候学研究に耐えうる長期データ解析が可能となり、従来の衛星観測の技術的限界を超えた雲・大気相互作用の研究への道が拓かれた。本応募研究課題は、そのような衛星観測技術の新しい可能性を模索する過程から着想を得、発展させたものである。

3. 研究の方法

まず、TRMM 衛星搭載降雨レーダ(PR)エコー頂高度および可視赤外放射計(VIRS)赤外輝度温度をもとに、積乱雲と浅い積雲を個別に同定し、その緯度・経度と観測時刻を記録する。次に、各観測地点において Aqua 搭載赤外サウンダ AIRS が計測した気温・湿度データを TRMM 観測時刻 120 時間(前後 5 日間ずつ)にわたり収集する。Aqua 衛星は太陽同期衛星であり、観測地点の地方時午前・午後 1:30 に上空を通過する軌道を周回している

ので、半日間隔で 10 日分すなわち 20 組程度のデータが得られる。一方 TRMM 衛星は、観測地方時が約 46 日周期でドリフトする太陽非同期軌道を周回し、Aqua 衛星との観測時刻差は日々変動する。従って、TRMM 観測時を原点とする時間軸上に AIRS データを割り当てる形で長期観測データを合成平均（コンポジット）すると、気温・湿度プロファイルが積雲対流の前後で推移する様子を時間的に連続な統計平均値（コンポジット図）として得ることができる（下図）。

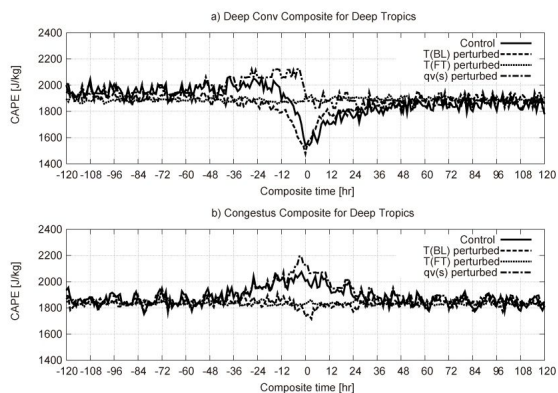


TRMM 衛星と Aqua 衛星いずれも単独では個々の対流システムや大気の状態を連続的にモニタリングすることはできないが、観測時刻そのものの精度は衛星軌道要素から正確に決定できる利点を生かし、統計的に高時間分解能データ解析を達成することが本手法の狙いである。

4. 研究成果

(1) CAPE と準平衡仮説

対流に対する大気強制力・応答を、（深く発達する）積乱雲と（より発達度の低い）雄大積雲を区別して調査した。結果は以下のとおりである。

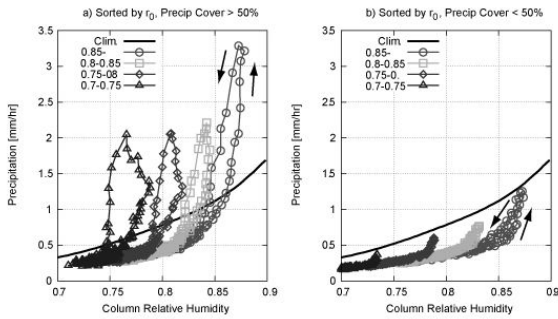


熱帯中心部では、積乱雲が活発な期間は対流調節は迅速かつ効果的であった。積乱雲の発達に伴い、大気境界層から自由対流圏への水蒸気輸送が明瞭に見られた。ただし対流有効位置エネルギー（CAPE）の時間進化は、境界層の水蒸気量だけではなく、同時に起こる境界層の冷却偏差にも大きな影響を受けていた。CAPE は対流の 12 時間前に急激な下降を示し、その後 1, 2 日かけて冷却偏差の解消とともに緩やかに回復をする（上図 a）。境界層の冷却偏差は位相が 180 度逆転した対流圏中・上層の温暖偏差を伴っており、その結果気温は双極型の偏差を示している。

CAPE の振る舞いは、湿潤対流が積乱雲を伴わず雄大積雲のみで担われるとき、まったく異なる様相を示す。CAPE は雄大積雲発生に先立つ 1 ないし 2 日間にわたり緩やかに増加し、その後同じくゆっくりともとの値に減少していく（上図 b）。この結果は、熱帯中心部であっても、対流雲が対流圏全体を貫くほど深く発達しないときは、対流調節は有効に働いていないことを示唆している。一方亜熱帯地域では、活発な対流が発生するか否かに関わらず、対流調節が効いている兆候は見出されなかった。

(2) 熱帯における水蒸気量と降水強度の関係について

降水量と可降水量（鉛直積算水蒸気量）の統計的な関係性について、時間スケールの異なる（日平均と一時間平均）データを作成して



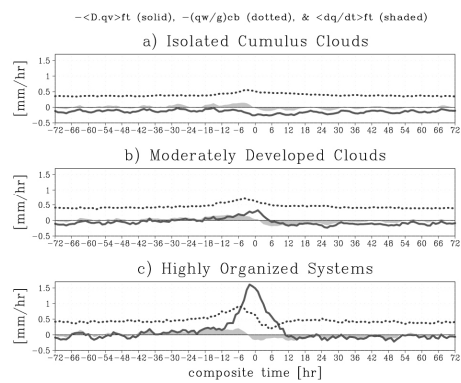
その関連を調べた。その結果を次の図に示す。日平均の気候値（実線）に比べて、降水システムの寿命と同程度の時間スケールでコンポジット解析をした場合、より強い非線形性を示すことが明確に捉えられている。この結果は、第一節（研究開始当初の背景）で述べた既存研究結果の不一致が、着目する時間スケールの相違に起因することを示唆している。日平均気候値がもつ比較的弱い非線形性は、さまざまなタイプの降水システムが持つCRH-降水関係を重ね合わせ粗視化した結果であると解釈できる。

(3) 大気熱・水蒸気収支解析

最後に、様々な衛星センサを用いて熱帯海洋上の湿潤対流に伴う大気熱力学的変動について解析を行った結果を示す。上記の成果で用いた TRMM 衛星搭載 PR および Aqua 衛星搭載 AIRS/AMSU やマイクロ波放射計 (Aqua 衛星搭載 AMSR-E) に加え、ここでは雲および降水レーダ (TRMM 衛星搭載 PR、CloudSat 衛星搭載 CPR) およびマイクロ波散乱計 (QuikSCAT 衛星搭載 SeaWinds) も解析に用いた。気温・水蒸気量・積雲雲量・海上風といった大気物理量の衛星観測値を、TRMM 衛星が検出した対流雲に対する時間差についてコンポジットすることにより、数時間から数日の時間スケールにわたる統計的に連続な時系列を得た。AIRS が観測した気温と湿度プロファイルは、それ自体は雲域を除外した推定値になっているため、半解析的に求めた雲域内の推定値と組み合わせて大規模平均場を導出した。そしてこれらの推定値を、雲底で仕切られた大

気二層それぞれで鉛直積分した水蒸気収支・熱収支方程式へ入力する。この手法により、水蒸気量および乾燥静的エネルギーの自由対流圏収束場とそれらの雲底における鉛直フラックスを、衛星データのみから評価することに成功した。主な結論は次のとおりである。孤立した積雲の発達に先立つ自由対流圏湿潤化の主な供給源は雲底からの水蒸気鉛直フラックスであるが、高度に組織化された対流系に対しては水蒸気の水平収束がもつばら湿潤化を担う（下図）。自由対流圏の非断熱加熱はほぼ瞬間的に相殺される。

背景場においては、渦乱流効果の寄与は雲底における鉛直水蒸気フラックスの約半分にあつが、高度に組織化された対流系が発達する際には全雲底フラックスの変動を決める主要因はむしろ大規模平均上昇流である。深い対流に先立ち雄大積雲の増加と自由対流圏の湿潤化に相関がみられることが知られているが、これは雄大積雲に伴う渦効果というより、雲底における大規模平均力学場により説明されるようである。



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)

Masunaga, H., 2013:

A satellite study of tropical moist convection and environmental variability: A moisture and thermal budget analysis. *J. Atmos. Sci.*, **70**, 2443-2466.

Masunaga, H., 2012:

A satellite study of the atmospheric forcing and response to moist convection over tropical and subtropical oceans. *J. Atmos. Sci.*, **69**, 150-167.

Masunaga, H., 2012:

Short-term versus climatological relationship between precipitation and tropospheric humidity. *J. Climate*, **25**, 7983-7990.

[学会発表](計12件)

Masunaga, H., , 2013

Thermal and moisture budget of tropical moist convection analyzed with multi-satellite observations
Gordon Research Conference: Radiation & Climate, New Hampshire, NH, USA, Jul. 2013 (招待講演)

Masunaga, H., and T. S. L'Ecuyer, 2013:

Short-term Variability in the Moist Static Energy Budget inferred from Satellite Observations.
American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, Dec. 2013

Masunaga, H., 2012:

A Satellite study of tropical moist convection and environmental variability: A moisture and thermal budget analysis
American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, Dec. 2012

Masunaga, H., 2012:

A Satellite study of tropical moist convection and environmental variability: A moisture and thermal budget analysis
The 4th TRMM and GPM International Science Conference, Tokyo, Japan, Nov. 2012

Masunaga, H., 2012:

Global observations of atmospheric variability on a convective time scale: Using LEO satellites like a GEO

Toward Global LES (5th International Workshop on Cloud-Resolving Global Modelling), Schloss Ringberg, Germany, Jun. 2012

Masunaga, H., 2012:

Satellite Observed Atmospheric Variability over the Life Cycle of Tropical Convective Systems
30th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Ponte Vedra Beach, FL, USA, Apr. 2012

増永浩彦, 2012 :

衛星観測による熱帯対流と環境場の変動の研究 (P)
熱帯気象研究会, 高知県高知市, 2012年9月

Masunaga, H., 2011:

A satellite study of convective development and moisture variability on hourly to daily time scales
American Geophysical Union (AGU) Fall meeting, San Francisco, CA, USA, Dec. 2011

Masunaga, H., 2011:

A Satellite Study of the Atmospheric Forcing and Response to Moist Convection
International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) General Assembly, Melbourne, Australia, Jul. 2011

Masunaga, H., 2011:

A Satellite Study of the Atmospheric Forcing and Response to Moist Convection
Dpt. of Atmospheric Science Colloquium, Colorado State University, Fort Collins, CO, Feb. 2011

増永浩彦, 2011 :

熱帯湿潤対流にする大規模強制力および大気応答に関する衛星観測研究
熱帯気象研究会, 京都府京都市, 2011年9月

増永浩彦, 2011 :

熱帯湿潤対流に対する大規模強制力および大気応答に関する衛星観測研究
日本気象学会2011年度春季年会, #A461, 東京都渋谷区, 2011年5月

[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
<http://precip.hyarc.nagoya-u.ac.jp/research-j.html>

6．研究組織

(1)研究代表者

増永 浩彦 (MASUNAGA, Hirohiko)
名古屋大学地球水循環研究センター
研究者番号：00444422

(2)研究分担者 なし

(3)連携研究者 なし