

B-1 大気中の水・エネルギー循環の変化予測を目的とした気候モデルの精度向上に関する研究

(2) 気候変化に伴う大気中の水循環過程の変化に関する研究

東京大学 気候システム研究センター

高薮 縁・木本 昌秀

菊地 一佳^{*1)}・片山 勝之^{*2)}

清木 亜矢子^{*3)}

独立行政法人国立環境研究所

大気圏環境研究領域 大気物理研究室

野沢 徹・江守 正多

北海道大学 大学院理学研究科

林 祥介・山田 由貴子

大学院地球環境科学研究科

石渡 正樹

<研究協力者> 九州大学大学院理学院

中島 健介

地球シミュレータセンター

大淵 済

地球環境フロンティア研究センター

鈴木 恒明

現所属：*1)ハワイ大学IPRC *2)日本気象協会 *3)海洋研究開発機構地球環境観測研究センター

平成15～17年度合計予算額

21,000千円

(うち、平成17年度予算額

6,995千円)

〔要旨〕地球温暖化による気候変化に伴い水循環がどのように変化するかをより正確に把握するため、気候モデルによる水循環過程の再現性と不確定性を検証することを目的とし、以下の3つの側面から研究を行った：(i) 最新の衛星データ等を利用した降水現象解析、(ii) 気候モデルにおける降水現象の再現性の解析に基づく降水の表現手法の検討、および (iii) 降水現象の再現手法の本質を探索するための単純化した水惑星モデルによる数値実験。主な成果は以下の通りである。(A) 熱帯降雨観測計画 (TRMM) 衛星の降雨レーダーによる3次元降雨観測データから、卓越する降雨要因の推定を行った。(B) 衛星観測による大気水蒸気データを用い、熱帯季節内振動 (マッデン・ジュリアン振動、以下MJOと記す) の西半球での伝播特性を明らかにした。(C) MJOと赤道地域の持続的で強い西風 (西風バースト) の発生がエルニーニョの出現との間に相互作用関係をもつことを明らかにした。(D) 赤道域の積雲対流活動と結合した大気赤道波の再現性が気候モデルにおける積雲の表現方法 (パラメタリゼーション) になぜ依存するかの仕組みについて詳細な解析を行った。(E) 大気大循環モデルを用いて、徹底的にパラメタを振った水惑星実験を行い、赤道域降水活動の放射冷却率分布とモデル解像度に対する依存性を解析した。

気候変化に伴う大気中の水・エネルギー循環の変化に関しては、台風・低気圧の発生発達や、エルニーニョ等の長周期変動の変化を予測することが重要である。本研究の結論として、水・エネルギー循環を左右する長周期変動を気候モデルで正確に表現するためには、積雲対流活動を伴う短周期擾乱を適切に再現する必要がある、そのためには、モデルにおける雲降水活動の表現方法を適切なものにしなければならないことが確認された。また、その妥当性を検討するためには、

新しい衛星データおよび観測データを駆使して得られる降水現象に関する新しい知見を活用することが必要不可欠であることが確認された。

〔キーワード〕 熱帯降雨観測計画（TRMM）衛星、降雨要因推定、エルニーニョ、熱帯季節内振動（マッデン・ジュリアン振動）、水惑星モデル

1. はじめに

地球温暖化による気候変化の中でも、水循環、特に降水の形態や分布の変動に関しては、人間生活に深刻な影響を及ぼし得るため重要な問題である。特に我々の住むアジア域は、アジアモンスーンの豊富な降水量を利用して多くの人口を支えており、水循環の変化を正しく見積もることは逼迫した社会的要請である。近年、大気中の二酸化炭素濃度増加を考慮した将来の気候予測が気候モデルを用いて盛んに行われている。しかし、降水の形態や分布の実際を掌握すること自体がたやすいことではないのが現状であり、まして、全球モデルにおいて降水活動がどのように表現されるべきであるかという基本的な問題に関して一致した認識が得られている訳ではない。降水活動のモデル表現は、計算分解能や各種物理過程の実装に強く依存している。IPCC（Intergovernmental Panel on Climate Change: 気候変動に関する政府間パネル）の報告にも著されているように、雲降水過程はモデルによる差異が激しい過程である。そもそも、我々は降水活動の表現において、モデル間の差異がどのようにもたらされるかを十分に掌握しているわけでもない。

ここにおいて、最新のデータを用いて降水の形態や分布の実態を正確に把握し、その知見の下に気候モデルによる雲降水過程の再現性を検証し、その不確定性を定量的に明らかにすることが急務である。それにより、気候変化の社会影響研究に予測情報を橋渡しする際の情報としての、また、水循環に関する予測結果をより信頼できるものに改良するための科学的知見が得られるはずである。

2. 研究目的

本サブテーマでは、全球気候モデル（大気海洋大循環結合モデル）の開発の一環として、水蒸気・雲・地表水文過程などによってもたらされる気候変化・気候変動の不確定性を明らかにすることを主な目的とする。現実の水循環過程の理解を深め、現状の気候モデルの再現する水循環過程の検証を行うため、衛星観測等で得られた観測データの解析を有機的に組み合わせる。また、複雑な気候モデルで得られた結果を物理的に解釈するために、水惑星モデル（大気の下端が全て海と仮定したモデル）等、の単純化したモデルによる実験を援用する。

3. 研究方法

（１）降水の主要な要因（温帯低気圧・熱帯擾乱と雲クラスター・地形性降雨・夕立・台風等）を現実の降雨データ（TRMM等）や気象データ（客観解析データ等）を用いて分類する手法の基礎を開発する。特に、人工衛星TRMMの降雨レーダーやマイクロ波放射計による最新のデータを用いることによって、様々な気象条件における日変化や対流雨／層状雨比等の降水特性の相違を比較し、降水要因特定の手法に反映する。（２）衛星からのマイクロ波放射計観測による大気水蒸気量データを利用し、熱帯域の季節内振動に関して、活発な対流活動を伴わない西半球の波動

伝播と季節内振動の再開始との関係を解析する。(3) 欧州中期天気予報センターが2003年度に仕上げた40年分の再解析データERA40を利用し、降水システムを伴う短い時間スケールの擾乱と全球気候に影響をおよぼすエルニーニョとの相互関係を統計的に調べる。(4) 気候モデルの積雲対流の表現手法(対流パラメタリゼーション)を変化させた際の対流活動と結合した大気赤道波の出現特性の違いをスペクトル解析を用いて調べる。さらに、出現する赤道波構造の詳細な比較解析を行い、対流パラメタリゼーションのどのような特性がその違いを生み出しているかを明らかにする。(5) 赤道域降水構造の振舞のパラメタ依存性を調査し降水分布パターンの相違をもたらす原因についての理解を得るため、単純な水惑星条件の設定を用いて、解像度、数値スキーム、物理過程をさまざまに変化させたパラメタ研究を実施し、大気大循環モデルにおける降水活動の振舞、その組織化の様相を再検討する。熱帯の降水構造の組織化の様子を2つの大気大循環モデルを用いて調べる。各研究の詳細については、各々以下に記述する。

4. 結果・考察

(1) TRMM衛星データを用いた降雨要因特定手法の応用と気候モデルの検証実験

熱帯降雨観測計画(TRMM)衛星降雨レーダー(PR)観測により、宇宙から(i) 降雨強度の3次元での推定、(ii) 対流性降雨・層状性降雨のより精密な分類、(iii) 海上と陸上とではほぼ同質の降雨推定が可能となった。本研究では、卓越する降雨要因をTRMM PRデータから特定する手法を作成した。この方法を適用することによって、TRMMの観測範囲である熱帯から中緯度のさまざまな地域およびさまざまな季節における降雨要因を衛星から世界で初めて分類した。これにより降雨要因別の降雨量や特性を定量的に把握することができるようになった。さらに、そのような新しい切り口での降雨現象の把握を利用して気候モデルの降雨特性を検証するための解析実験を行った。

① 研究概要

「TRMM PRデータのメソスケール統計を用いた熱帯・亜熱帯域の降雨特性とその降雨要因についての研究」として、約100kmスケールの観測ボックスでのPR降雨データの統計的特徴を解析した。さらに、その結果を用いてTRMMの観測範囲の北緯35度ー南緯35度での2.5度格子、3ヶ月平均で卓越する降雨要因を特定する手法の基礎を構築した。

② 研究手法と結果

本研究では、TRMM PRデータから約 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ のメソスケールの単位で統計を取り、降雨特性を表現する5つの指標を導入して、メソスケールの観点から熱帯・亜熱帯の降雨を降雨要因別に複数のタイプに分類し、降雨の定量化を試みた。その方法としては、TRMM PRのパスの走行に対して平行な方向に20ピクセル(1ピクセル間隔は約4.3km)、直角な方向に21ピクセルから成る約 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ のメソスケールのボックスに切り出し、ボックス毎のPRデータの統計解析を行った。その結果、各ボックスにおける降雨面積(Area)、層状性降雨面積比(Stratiform Pixel Ratio: SPR [%])、層状性降水量比(Stratiform Rain Ratio: SRR [%])、降雨強度(Rainfall Strength: RS [mm/hr])、降雨頂高度(Rain Top Height: RTH [km])の5つの統計量でボックスの降雨特性をよく表現できることが示された(図1)。

ボックス降雨特性の概観 (Jul. 2000)

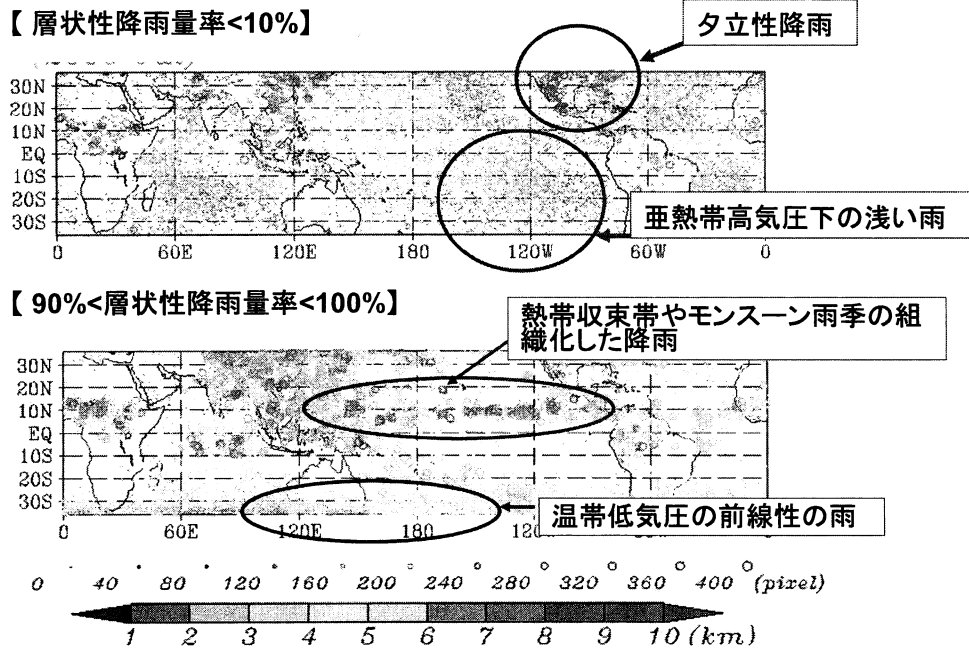


図1：対流雨が卓越するボックス（上図）および層状雨が卓越するボックス（下図）についてボックス特性を概観した例。○の大きさはボックス内の降雨面積を示し、グレースケールはボックス平均降雨頂高度を示す。

ボックス降雨特性の解析の結果、SPR 30-50%、SRR 5%前後、Area 50-100ピクセル（約1700-4700km²）の降雨特性をもつタ立の雨、RTH 2-3km以下、Area 40ピクセル（約1500km²）以下の特性を持つ亜熱帯高気圧下の浅く離散的な雨、冬半球中緯度帯における、RTH 5-6km以下、Area 360ピクセル以上の温帯低気圧の雨、海上の熱帯収束帯や雨季モンスーン域でよく見られる組織化したメソスケールのクラウドクラスターの雨など、降雨要因が異なる様々な雨の特性を分類することがわかった。

これらの指標から陸上4タイプ（TYPE1：タ立、TYPE2：shallow rain、TYPE3：温帯低気圧、TYPE4：大規模システム）、海上3タイプ（TYPE5：shallow rain、TYPE6：温帯低気圧、TYPE7：大規模システム）の計7タイプに降雨を分類し、2.5°×2.5°の各グリッドで3ヶ月ごとに卓越する降雨タイプを決定する手法（図2）を構築し、実際にTRMMデータに適用した（図3）。

次に、TRMM衛星データを用いた降雨要因特定アルゴリズムを援用して、気候モデルの降雨特性を概観した。気候モデルのデータは、最新のCCSR/NIES/FRCGC CGCMであるMIROCの高解像度版（大気モデルの解像度は水平約100km鉛直56層、海洋モデルの解像度は水平約20km鉛直48層）を用いて行われた、20世紀気候再現実験の月平均値データを使用した。TRMM PRデータに対するボックス降雨特性解析では、主として層状性降雨量率（SRR）、降雨頂高度（RTH）、降雨面積（Area）の情報を利用しているが、このうちの降雨面積については、気候モデルから同等の指標を導き出すことが困難であるため、ここでは、同指標を用いることは断念した。また、他の2つ

の指標についても、気候モデルから全く同一の指標を導き出すことが難しいため、それぞれ以下のように定義し直して解析を行った：

層状性降雨量率（SRR）＝層状性降雨量/全降雨量

降雨頂高度（RTH）＝全降水フラックスが0.5 mm/dayを下回る高度

ただし、層状性降雨量は大規模凝結スキームから診断される降雨量、対流性降雨量は積雲対流スキームから診断される降雨量、全降雨量はこれらの和である。

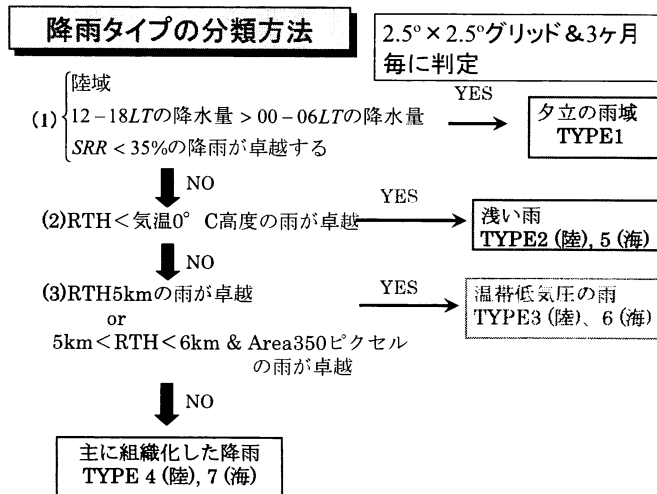


図2：2.5度格子3ヶ月ごとの卓越降雨タイプの決定方法

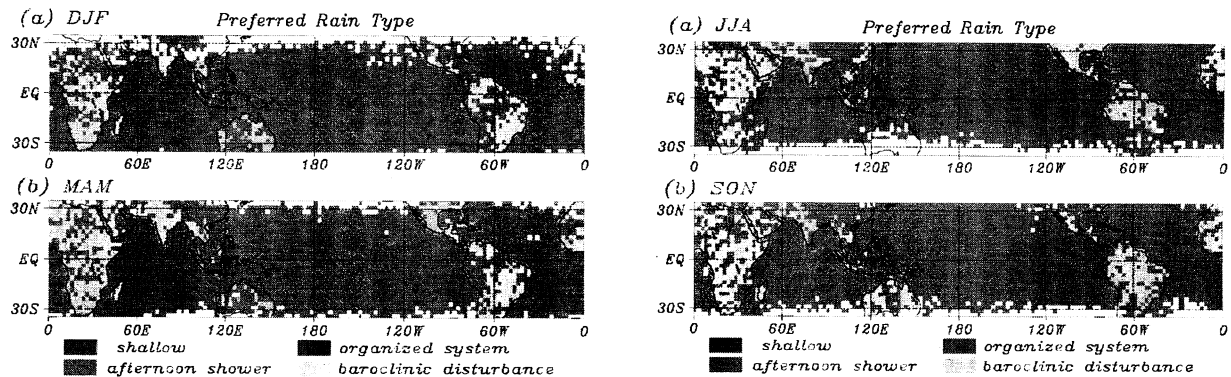


図3：この手法で決定された1998－2000年平均の季節別卓越降雨タイプ（afternoon shower：TYPE 1、shallow：TYPE2,5、baroclinic disturbance：TYPE3,6、organized system：TYPE4,7）

このようにして解析した気候モデルの降雨特性を観測（TRMM PRデータを用いた降雨特性）と比較した結果を図4に示す。「夕立性降雨」および「温帯低気圧の前線性の雨」については、モデルは観測をもっともらしく再現していると思われる。「亜熱帯高気圧下の浅い雨」および「熱帯収束帯やモンスーン雨季の大規模組織化した雨」についても、層状性降雨量率が逆センスではあるものの、地理分布としては比較的よく似た分布を持っていることが示唆された。気候モデル

の層状性降雨量率は暫定的に定義したものであり、TRMM PRデータに対する指標とは必ずしも一致するものではないため、層状性降雨量率の乖離はそれほど深刻な問題ではないと考えられる。むしろ、本解析結果は、層状性降雨量率と降雨頂高度を指標とした降雨特性の解析手法が、これら指標の定義の問題は残っているものの、気候モデルの降雨特性を検証する有効な新手法となり得ることを示唆する結果であると見なすことができる。

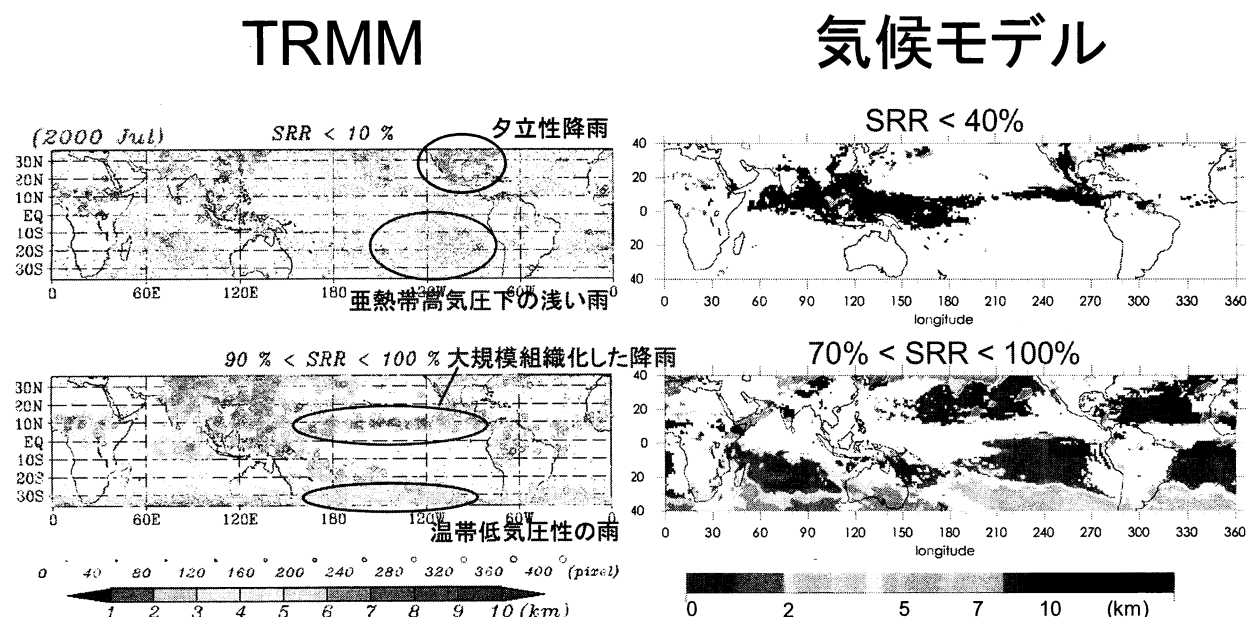


図4：2000年7月のデータに対するTRMM衛星データ（左列）と気候モデルMIROC出力（右列）の降雨特性の比較。上段は対流性降雨が卓越する格子、下段は層状性降雨が卓越する格子をそれぞれ示す。

③ 本研究で得られた成果と課題

本研究で新しく特定を試みた衛星からの降雨要因情報は、気候モデルの新しい検証方法として非常に有用な手段となることが示された。この分類結果は、JSPSのCREST課題である「衛星データによる降雨推定の高精度化」において、降雨タイプ別の雲モデル構築に利用されている。ただし実際に気候モデルの検証研究を試みた結果、衛星から得られる降雨情報と気候モデル内での降雨情報との間の相違により、観測データ解析で最大限の成果を出したとしても、その方法が直接のモデル検証にそのまま全て利用できるわけではないことが顕在化した。衛星データを用いたモデル降雨の検証においては、衛星データから得られる現象解析手法をモデル検証により適合するような最適化手法の開発が、今後必要であることが課題として示された。

（2）北半球冬季のMJOに伴い赤道域を一周する水蒸気シグナルの解析

マッデン・ジュリアン振動 (MJO: Madden-Julian oscillation) は熱帯域で見られる積雲対流を伴う変動成分のうち最も卓越する擾乱であり、東西波数1-3という大きな水平規模を持った循環の東進、30-90日という周期性によって特徴付けられる (Madden and Julian, 1971; 1972)。この現象は、現実

大気で非常に顕著であるにも拘わらず、発見から30年以上が経過した現在においても気候モデル数値実験上で伝播特性や振幅が十分に再現されていない。近年、MJOの再現性は、気候モデルにおける降水過程の表現の優劣を比較するためのひとつの指標として使われることが多い。

現実大気中のMJOの伝播特性については、東半球と西半球とで異なっている。東半球では対流活動と循環が同期しながらゆっくりと($5\text{--}6\text{ m s}^{-1}$)東進する。一方、西半球では大気擾乱と対流活動の結びつきは弱く、対流圏上層の擾乱はケルビン波として約 $10\text{--}15\text{ m s}^{-1}$ で東進することが指摘されている (Knutson and Weickmann, 1986; Hendon and Salby, 1994)。多くの数値モデルは赤道域を一周するケルビン波擾乱によってMJOが維持されていると仮定して周期性を議論していたが、2つの疑問が残っていた。一つは、西半球でのこの擾乱の東進速度($10\text{--}15\text{ m s}^{-1}$)は第一傾圧モードの鉛直構造を持ったケルビン波に期待される位相速度に比べて非常に遅いことである。もう一つは、上層の大気擾乱がどのようにして次のMJOの対流活動を励起するかという疑問である。

本研究では、衛星から得られる比較的長期間かつ高精度の可降水量データを利用して、特に水蒸気の振る舞いに注目することによって、西半球を横断する擾乱の伝播特性について詳しく記述し、イベント間の継続性について検証することを目的とした。

① データと解析手法

解析には米国海洋大気庁 (NOAA)提供の外向き長波放射(OLR)、欧州中期天気予報センター (ECMWF)客観解析データ、米国の軍事衛星DMSP搭載のマイクロ波放射計(SSM/I)による可降水量、SSM/IとECMWFから見積もられた地表風データを用いた。可降水量及び地表風については1987年7月から2001年5月まで、その他のデータについては1979年から2001年5月までの期間を使用した。

MJOを抽出する時間フィルターを施したOLR偏差に対しEEOF (拡張した主成分分析)解析(Weare and Nasstrom, 1982)を適用し、北半球冬季の典型的なMJOの伝播パターンを特定、それをもとにしてコンポジット解析 (注目する現象の中心を基準としたデータの重ね合わせにより現象のシグナルを統計的に抽出する解析)を行った。

② 研究結果

過去に指摘されているように、対流偏差は主に東半球に集中していた(図5 a)のに対し、対流圏上層の循環偏差は赤道域を一周していた(図略)。本研究の結果で注目すべき点は、可降水量正偏差も赤道域を一周していることを示したことにある(図5 b)。可降水量正偏差は対流圏上層の循環と同期し、東半球で約 6 m s^{-1} 、西半球で約 20 m s^{-1} で東進し、対流偏差に比べ約 $1/4\text{--}1/8$ 周期先行していた。つまり深い対流活動の前に大気が湿潤化していたことを示している。また、可降水量正偏差に対応した地表風の収束偏差も赤道域を一周していたことが分かった(図5 c)。地表風の収束偏差は対流圏下層の東風偏差に対応しており(図略)、ケルビン波の境界層摩擦によって生じる地表収束の構造(Hendon and Salby, 1994)と整合的であった。

西半球での擾乱の振る舞いを詳しく見ると、平均約 20 m s^{-1} で進む擾乱の中にそれよりも速い速度(約 40 m s^{-1})で進むシグナルが存在していたことが分かる(図5 a,b,c)。このシグナルは 1000 hPa のジオポテンシャル高度場でより顕著だった(図5 d)。このシグナルは中央アメリカ、アフリカ両大陸域で数日間進行を妨げられていた。第一傾圧モードの自由ケルビン波(Milliff and Madden, 1996; Bantzer and Wallace, 1996)が地形によって進行を妨げられたものであると解釈される。

最後に、西半球を横断した可降水量と次のMJO対流活動との関係を記す。西半球を横断した可降水量正偏差はインド洋に達するとそこで振幅を強めた(図6 左)。図5でも見られたように可降水

量正偏差は対流偏差に常に先行している。伝播速度の大きいケルビン波の到達に伴いインド洋で起こる可降水量増加が、次のMJOを開始させる対流活動の引き金となっていることが示された(図 6 h)。

③ 本研究の成果

本研究の結果は、北半球冬季におけるMJOの西半球での伝播特性と次のイベントへのつながりについてより明快な物理的な解釈を与えた。このような現象が気候モデル内でも同様に起こることが、季節内振動を正しく表現するために必須である。今後、気候モデル内でのMJOの振る舞いを検証する指標として、この研究成果を生かしていくことができる。

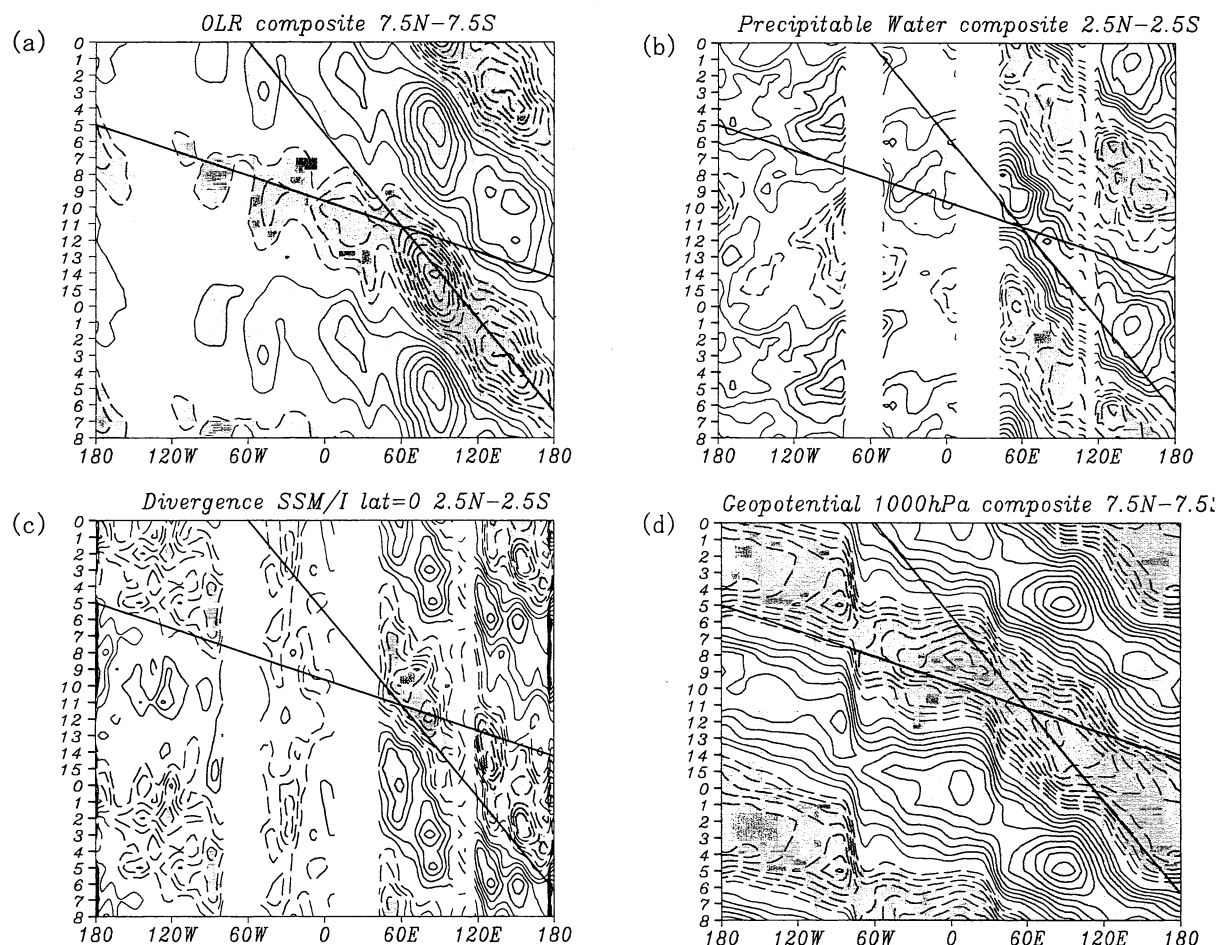


図 5: 赤道域で平均したコンポジットの時間経度断面。縦軸はコンポジットの位相で、各位相の間隔が約2.5日に対応している。薄い(濃い)陰影は正(負)の値で、(a),(d) 99%有意水準で、(b),(c) 95%有意水準で有意な領域を示す。太い線はそれぞれ東進速度 20 m s^{-1} , 6 m s^{-1} に対応する位相線である。(a) OLR偏差(7.5°N-7.5°S平均)、(b) 可降水量偏差(2.5°N-2.5°S平均)、(c) SSM/Iなどのデータから得られた地表風の発散(2.5°N-2.5°S平均)、(d) 1000 hPaのジオポテンシャル(7.5°N-7.5°S平均)。コンター間隔は(a) 5 W m^{-2} 、(b) 0.5 mm 、(c) 0.02 day^{-1} 、(d) $10 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ である。

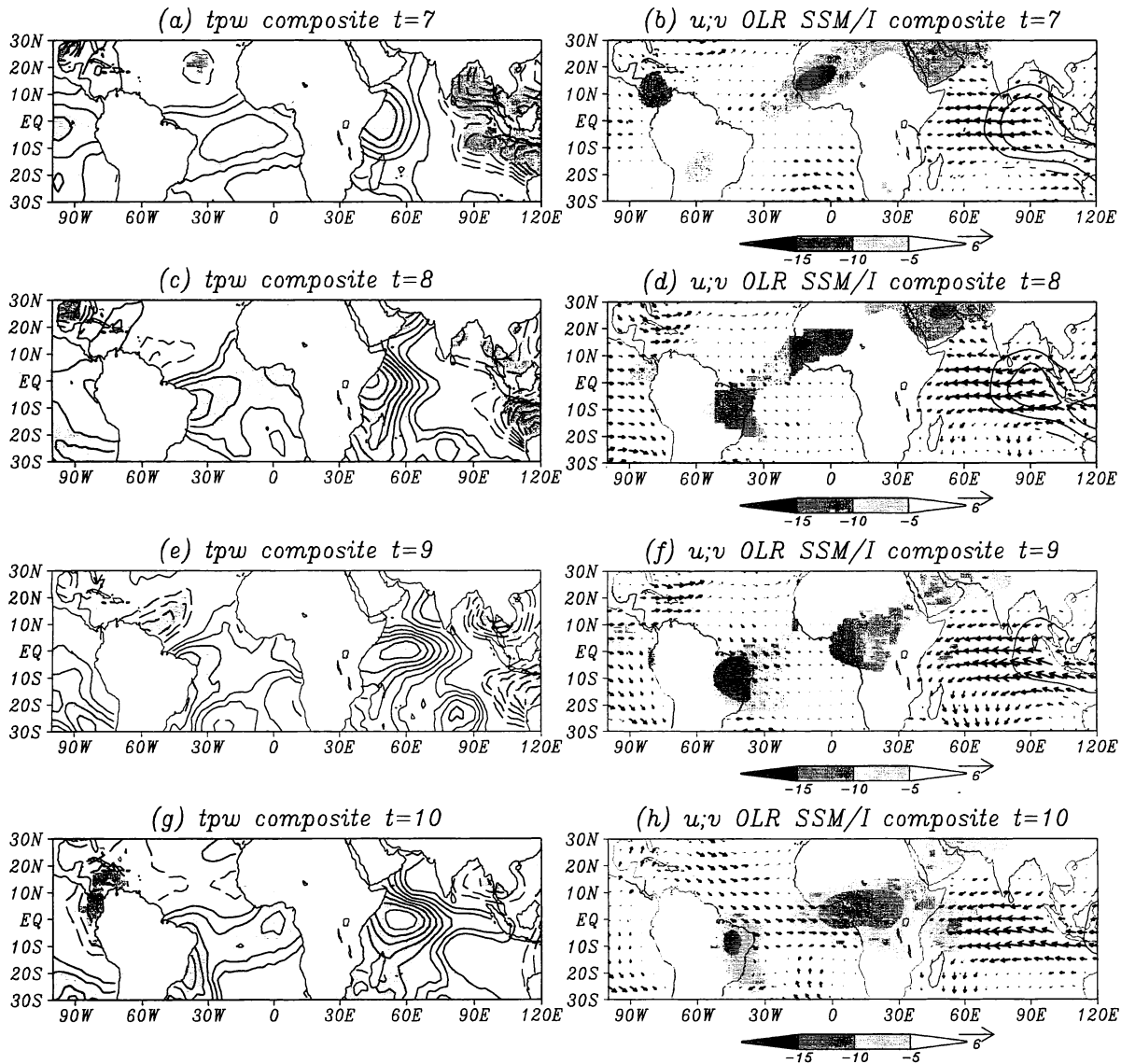


図 6：可降水量偏差(左)と1000 hPaの水平風、OLR偏差(右)のコンポジットマップ。位相はそれぞれ、(a)(b) phase 0、(c)(d) phase 2、(e)(f) phase 4、(g)(h) phase 6である。左図で濃い(薄い)陰影は95%有意水準で有意な正(負)の領域を表す。コンター間隔(左)は0.5 mmで、0の値のコンターは省略している。太い矢印(右)は99%有意水準で有意なベクトルを表す。99%有意水準で有意なOLR負(正)偏差を陰影(コンター)で表す。ただし、コンターは5,10,15 W

(3) 赤道域の西風バーストとエルニーニョ南方振動との相互作用に関する研究

① 研究の背景

エルニーニョ南方振動は、最も顕著な経年変化であり、アジアモンスーン域の水循環の経年変化にも大きな影響を与えることはよく知られている。地球温暖化予測研究において、エルニーニョやそれに関連するアジアモンスーンの変化について正確に予測することは、水循環に関する有用な情報を得るために不可欠である。エルニーニョは基本的には、熱帯海洋と熱帯大気循環とが

相互作用した数年スケールの現象であると理解されている。しかしながら、実際にエルニーニョイベントの起こるタイミング、強さ、持続性は、そのイベント毎に大きく異なっている。エルニーニョの発現のタイミングには、赤道域で強い西風が数日以上持続的に吹く「西風バースト」の出現が重要であることが、近年多くの研究によって指摘されている（例：McPhaden et al. 1988）。そして、このような短い時間スケールの現象との相互作用が、イベント毎に異なるエルニーニョの特性を決めるのに重要な役割を果たしていると考えられている。

一方、エルニーニョに影響を及ぼす西風バーストの出現は、熱帯大気の季節内振動（MJO）から生じているという事例解析（Nitta and Motoki, 1987, Sui and Lau, 1992）がある。このため過去にMJOとENSOとの関係について多くの研究がなされてきた。しかしながら、代表的な周期30-60日を持つMJO現象とENSOとの間に統計的に有意な相関はない（Slingo et al., 1999）ことが示された。一方で季節内振動の長周期（60-100日）モードやEOF解析による高次モードはENSOとの有意相関があることが発見され（Marcus et al., 2001; Kessler, 2001）、その現象的な理解が待たれている。

そこで本研究では、赤道域西風バーストを定義し、長期間（23年8ヶ月間）のERA40（ECMWF40年再解析）データを用いて全経度に渡って赤道域西風バーストイベントを抽出した。これに基づき、西風バーストとENSO、MJOとの相互関係について統計的に解析した。

② データと解析手法

解析には欧州中期天気予報センター(ECMWF)による40年再解析データ（ERA-40）、米国の軍事衛星DMSP搭載のマイクロ波放射計(SSM/I)とERA40から見積もられた地表風データ、米国海洋大気庁（NOAA）提供の外向き長波放射(OLR)および海面水温（SST）データを用いた。ERA40を用いた解析期間は1979年1月から2002年8月とした。地表風は1987年7月から2001年5月までを用い、このデータによってERA40の地表風により西風バーストを解析することの妥当性を検証した。

我々は西風バースト（WWB）を以下の3つの条件で定義した。(1)2.5N-2.5S平均の東西風が、各経度での91日移動平均の気候値から5m/s以上の偏差を持つ。(2)上記の条件を満たす地域が経度方向に10度（約1100 km）以上のスケールで広がっている。(3)上記の2条件が少なくとも2日以上（1日に経度7.5度以上動かないとして）持続する。この条件によって抽出された西風バースト（WWB）の分布を統計し、海面水温によるENSOの指標との相関を解析した。また、MJOとの関係を調べた。

③ 研究結果

図7は、抽出されたWWBの中心を赤外長波放射（OLR）による対流活動度の時間-経度断面と重ねて示したものである。1982-83, 1986-87, 1991-94, 1997-98の4つのエルニーニョイベントに伴って太平洋赤道近傍の対流活発域が東方に広がるのに伴って、WWBの抽出経度が東方に広がり、頻度が高くなっているのが分かる。WWBは、太平洋の他にインド洋域にも観測される。

解析期間全体でのWWBの出現頻度を経度方向に統計したのが図8である。図7で見られたように、太平洋に最も多く分布し、その最大頻度は170E付近、第2のピークが145E付近にみられる。インド洋にも多く観測され、ピークは85E付近にある。全期間を通じて大西洋にはWWBが観測されないことも特筆に値する。

エルニーニョ年の前後3年間での赤道域（2.5N-2.5S）東西風とWWBの中心緯度の関係（図9）を見ると、エルニーニョのピークの多くが12月-1月に季節ロックしていることを考慮して、一年を7月から翌6月までとして表示している。明らかに、WWBの出現経度と頻度とがエルニーニョの影響を受けていることが分かる。西太平洋域では、エルニーニョピークの前年の冬（DJ）お

よび先行する春から夏（MAM, JJA）にWWB発生頻度が高く、それに引き続き夏から秋には中部太平洋、秋以降は東部太平洋とWWB発生領域が移動している。他方、インド洋でのWWB発生は、エルニーニョ年には非常に抑制され、前年、および後年において一般西風の強まるSONとMAMに限られることが示された。

上の結果をさらに定量的に見るために、インド洋（40-110E）、西太平洋（110-155E）、中部太平洋（155-180E）、東太平洋（180E-80W）に領域を分け、それぞれの地域でのWWB出現とエルニーニョ指標（監視海域での海面水温）とのラグ相関解析を行った（図10）。その結果、西太平洋では顕著にエルニーニョのピークに9ヶ月先行してWWB発生のピークが見られた。99%レベルで顕著な相関は-14ヶ月から-5ヶ月に広がっていた。中部太平洋でもやはり相関が大きく、3ヶ月先行をピークとして、-8ヶ月から+2ヶ月に有意な相関が観測された。これらの結果は図9で見られた分布と一致するものであり、偶発的に現れるWWBがエルニーニョの発達を促すのではなく、WWB発生の頻度そのものがエルニーニョによる環境場の変化によってコントロールされていることを強く示す証拠である。

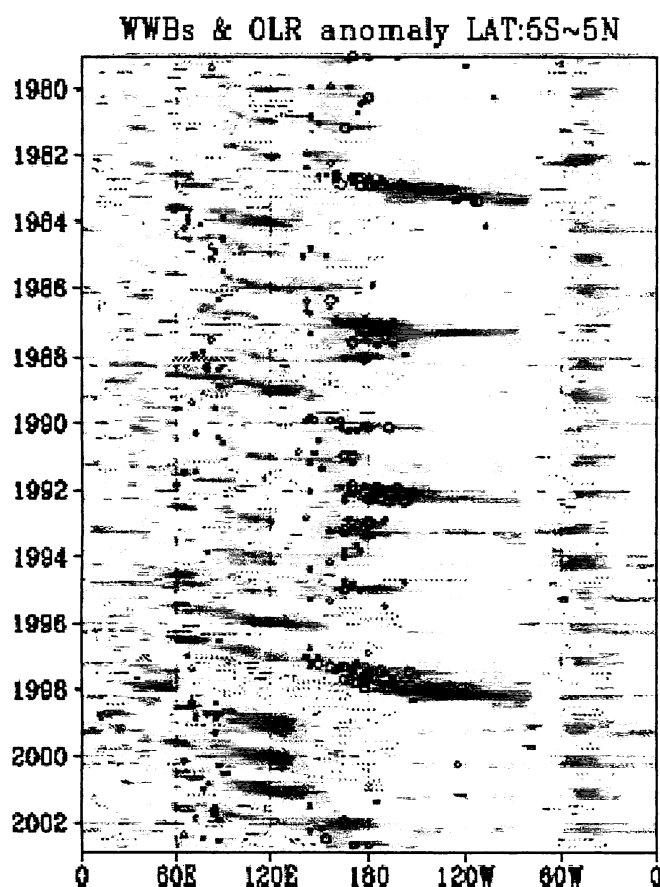


図7：5N-5S平均のOLR偏差(陰影)の経度-時間断面に、西風バースト(WWB)の中心経度を○で重ねて示した図。大きい○は、最大西風偏差が10 m/sを超えるWWBである。陰影のついているところが -20 W/m^2 以上のOLR負偏差域で、対流活動が活発な領域である。

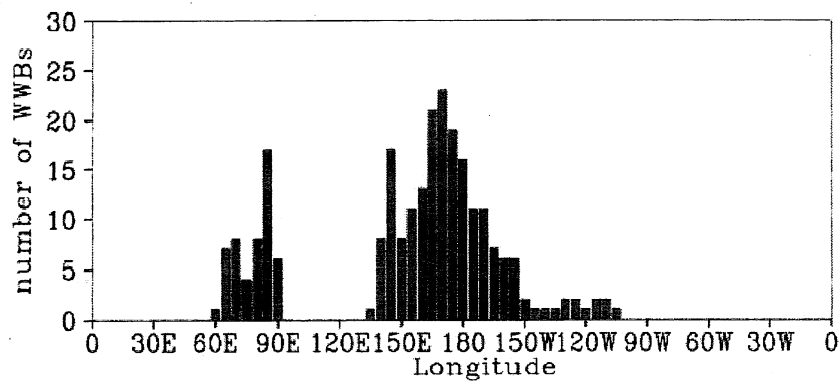


図8：解析期間全体で抽出されたWWBの出現頻度の経度分布。横軸は、例えば90Eは90E-92.5Eを示す。

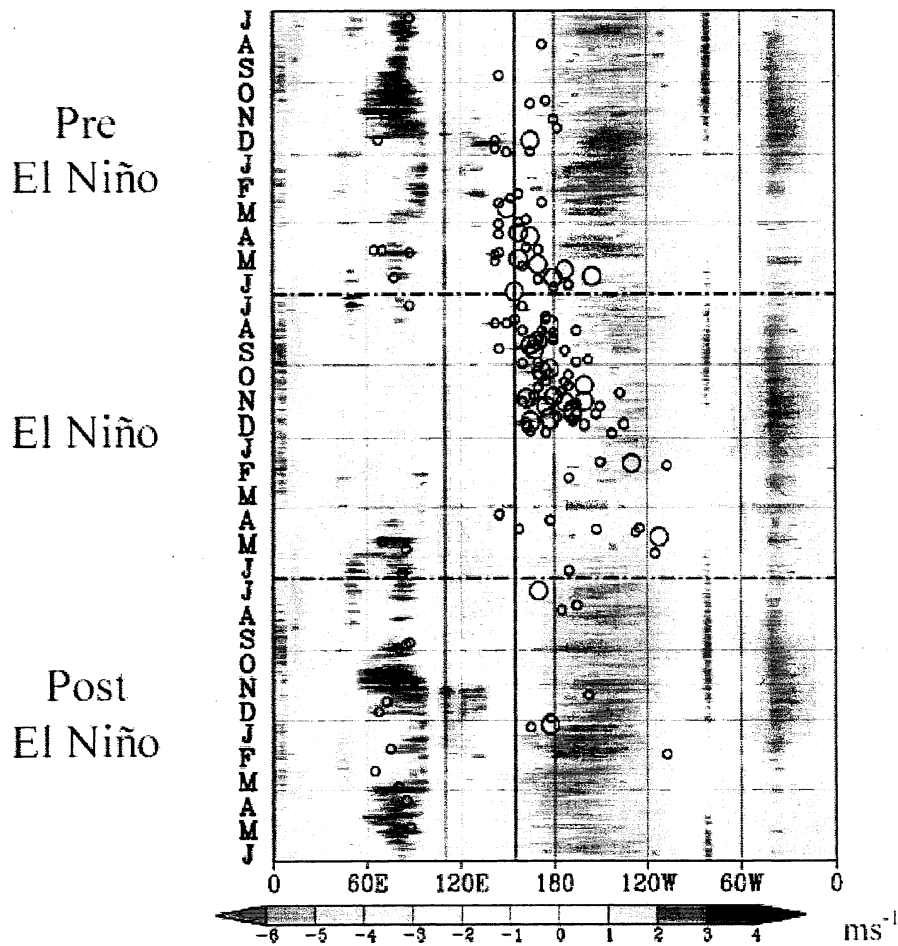


図9：気象庁エルニーニョ監視海域（5N-5S, 150W-90W）での平均海面水温を基準に経年変化の顕著な1982, 1986, 1994, 1997, 2002年の5年をエルニーニョ年とし、その前後を含めた3年間の赤道域（2.5N-2.5S）東西風とWWBの中心経度を重ねて表示した図。○については、図7に準ずる。

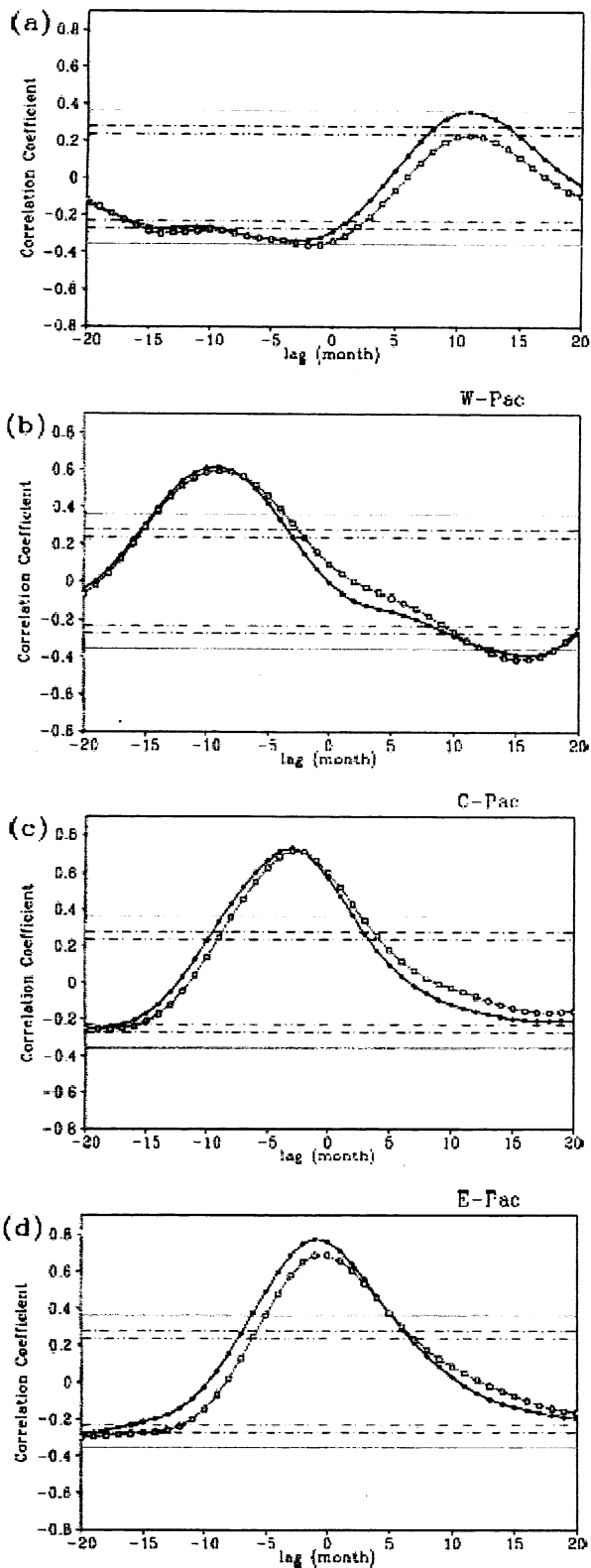


図10：インド洋（40-110E）、西太平洋（110-155E）、中部太平洋(155-180E)、東太平洋（180E-80W）の各経度帯におけるWWBの出現頻度の5ヶ月移動平均値と気象庁監視海域（実線）、Niño3領域（破線）での5ヶ月移動平均海面水温とのラグ相関。横軸はラグ（月）で、負がWWBの出現がエルニーニョのピーク（監視海域での高温SST）に先行することを示す。90%、95%、99%の有意水準が横軸に平行な実線、一点鎖線、二点鎖線で示してある。

以下、図は省略するが、本研究から、WWBの発生のほとんどがMJOから発生していることが示された。多くの場合、MJOの東進が減速され、対流活動が活発になると共に、赤道を挟んだ双子

低気圧の擾乱が発達し、赤道上の西風が強められる様相をコンポジット解析で示した。

④ 本研究の成果

本研究の結果は、エルニーニョの開始を促進すると考えられている赤道域の西風バースト現象が、いつも存在していて偶発的にエルニーニョを促進するというものではなく、エルニーニョが決める大規模場が、西風バーストの発生を促し、その西風バーストがエルニーニョの発展を促すという、時空間スケールの異なる現象同士の相互作用関係にあることを明らかにした。すなわち、このような現象を正確に再現するためには、MJOから西風バーストが発生するというような、積雲対流活動や総観規模擾乱スケールの現象をモデルが再現できる必要があることを強く示唆する。今後の地球温暖化に伴う気候変化を論ずる際にも、大気海洋結合気候モデルにおいてこのような関係が再現される必要があることを明確にした。

(4) 大気大循環モデルにおける積雲対流と赤道波との結合機構についての研究

① 研究概要

気候モデルの大気パートである高解像度大気大循環モデルの中で再現される対流と結合した赤道波（数日～数十日周期）を時空間スペクトルの方法により解析し、現実大気と比較した。その結果、積雲対流のパラメタリゼーションにおいて相対湿度による対流抑制条件の有無によって、積雲対流活動に顕在化する赤道波結合モードが変化することがわかった。そこで次に対流抑制条件の有無によって赤道波と積雲対流の結合メカニズムがどのように変化するかを、擾乱構造の解析によって調べた。その結果、Rossby波モードは境界層収束の効果が大きく、Kelvin波モードは比較的自由大気の収束発散の効果が大きいというモード間の構造の相違が、対流発生の制御ファクターの変化による対流結合強度のモード間の相違に現れていることが解明された。

② 研究手法

気候モデルの大気パートである CCSR/NIES/FRCGC 大気大循環モデルを 1980 年から 1999 年の 20 年間の海面水温で駆動した実験のデータを用いた。モデルの解像度は水平 T106 (緯経度 $1.1^\circ \times 1.1^\circ$)、鉛直 56 層である。積雲対流パラメタリゼーションにはプログノスティック荒川-シューバート手法 (Arakawa and Schubert, 1974; Pan and Randall, 1998)を用いているが、さらに雲層平均相対湿度の閾値による対流抑制手法（下記注参照：Emori et al., 2001）の導入の有無によって大気赤道波のモード間における積雲対流活動との結合強度にいかなる相違が出現するかを調べた。この比較の手法としては、対流活動指標の時空間スペクトル解析を行った。さらに大気赤道波が積雲対流活動とどのように結合するかについて、異なる赤道波モードの構造を比較解析することによって大気赤道波と積雲対流との結合におけるパラメタリゼーションの特性の効果を詳細に調べた。

(注) 雲層相対湿度による制御手法は以下の通りである。雲底、雲頂高度をそれぞれ Z_B, Z_T とし、平均相対湿度を以下の式のように定義する。

$$\overline{RH} = \int_{Z_B}^{Z_T} q \, dz / \int_{Z_B}^{Z_T} q^* \, dz,$$

ここで q は水蒸気混合比、 q^* は飽和混合比である。本研究では、このように定義した平均相対湿度の値が 80% 未満の場合対流の発現を抑制するという手法を導入した。

③ 結果と考察

図11は対流の指標である外向き長波放射（OLR）の時空間パワースペクトル分布を示す。上段が赤道対称成分、下段が赤道反対称成分に対するスペクトルである。まず、観測データであるNOAA OLR（図11a, b）について見るとTakayabu (1994)やWheeler and Kiladis (1999) で示されているように、赤道対称成分にはケルビン（Kelvin）波、ロスビー（Rossby）波に対応する顕著なシグナルが、また、赤道反対称成分には混合ロスビー重力（MRG）波、赤道内部重力(EIG) ($n=0$)波のシグナルが現れる。赤道波の等価深度は12～50 mである。

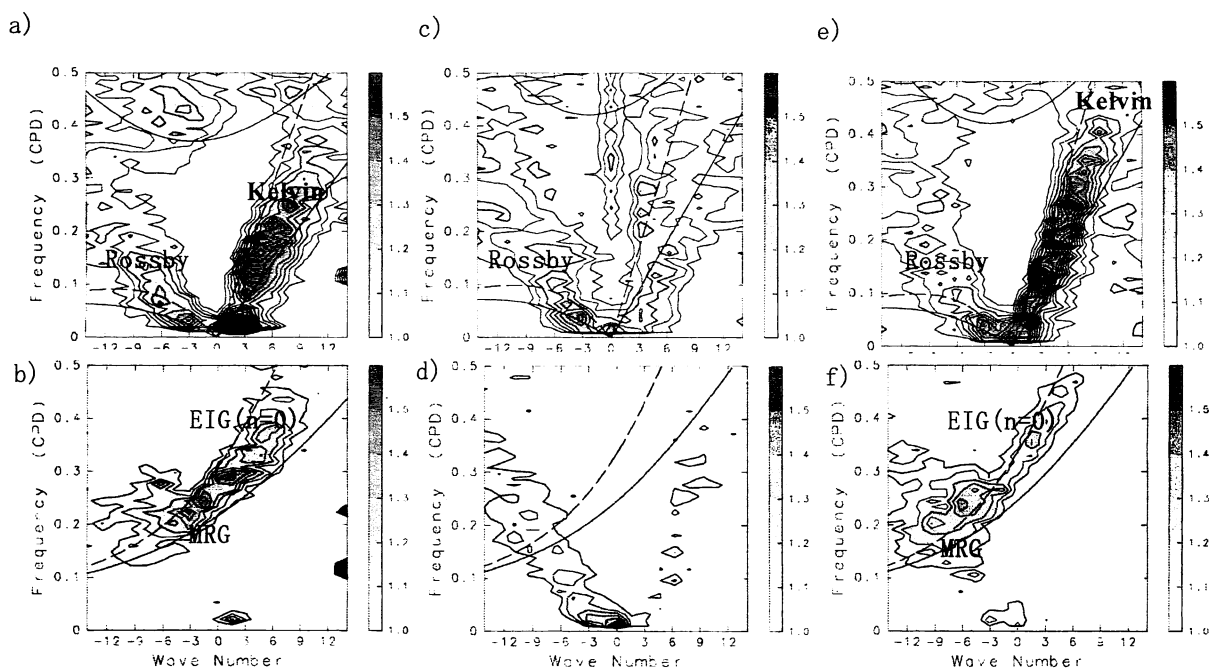


図11：OLRの時空間スペクトル。横軸は東西波数、縦軸は周波数、等値線はパワー値。上段は赤道対象成分、下段は赤道反対称成分。(a),(b)はNOAAのOLR観測値、(c),(d)は対流抑制なしモデル実験、(e),(f)は対流抑制有りモデル実験のOLRのパワーを示す。

シミュレーション結果のOLRについて同様に時空間パワースペクトルを調べてみると、対流抑制有りのラン（図11c, d）では、観測と同じように各種赤道波のスペクトルが現れる。ただし、Kelvin波を除き、シグナル強度は観測の場合よりも弱くなる。また、MJOシグナルは観測と異なってほとんど波数1に集中しており、Kelvin波の分散曲線上に現れる。すなわち、MJOというよりは長周期のKelvin波モードと考えた方が良い。対流抑制有りランにおける赤道波の等価深度は20～70mであり、観測値よりも少し深い、現実的である。これに対し対流抑制無しラン（図11e, f）では、対称成分に比較的強いRossby波的なモードは現れる。しかし、観測や対流抑制有りランの赤道対称成分に見られる対流と結合したKelvin波の強いシグナルは消えてしまい、等価深度が70mよりも

深いところと20mよりも浅いところに弱い東進するシグナルが現れる。また、赤道反対称のMRG波、EIG($n=0$)波のシグナル強度は検出範囲以下である。以上より、Arakawa-Schubert積雲パラメタリゼーションに付加的な対流抑制を導入することにより、赤道波と対流の結合の再現がより現実的になることが示された。

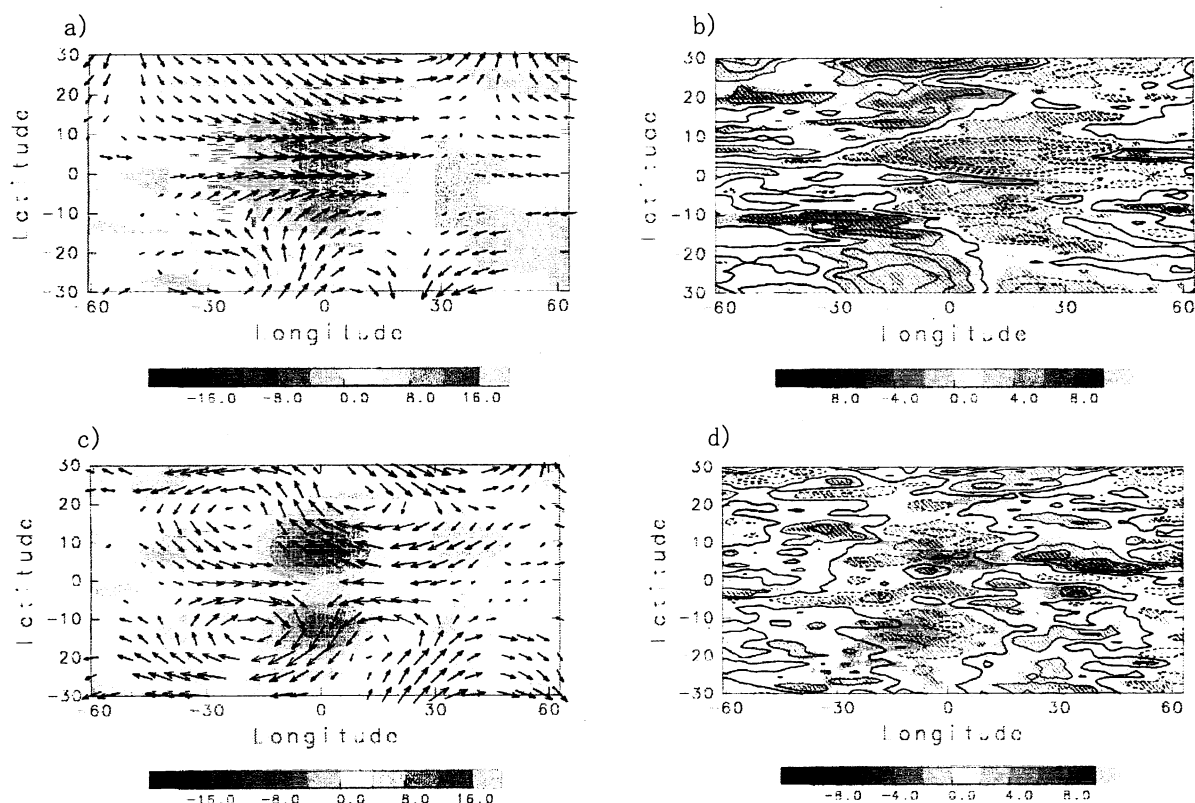


図12: (a) 850 hPaでのケルビン波モードの水平風偏差（ベクトル）とOLR偏差（陰影）。(b) 850 hPaでの発散場（等値線）、および850 hPa–1000 hPaの発散場の差（陰影）。陰影とベクトルは95%有意の場所のみ示してある。横軸は積雲対流の中心をゼロとした相対経度である。(c)(d)はそれぞれ(a)(b)と同じだが、ロスビー波モードについてプロットされている。

次に、対流抑制がないときになぜKelvin波モードが消えるのか、Rossby波モードとの違いはどうして起こるのかを調べた。対流抑制がないときは、積雲対流は対流有効位置エネルギー（CAPE）の大きさに制御される。CAPEは、境界層内の水蒸気量に最も大きく支配される。本研究では対流抑制が無い場合でもRossby波モードでは地表付近で収束があるためにCAPEが大きくなり得ることを示した（図略）。図12a,cには850 hPaの水平風のコンポジット図を、また図12b,dに対応するdiv1000-div850のコンポジット図を示す。図12a,bはKelvin波モードを、図12c,dはRossby波モードに対してコンポジットを作成しているが、水平風の分布（図12a,c）はそれぞれのモードの特徴を良く示している。ここで850 hPaは自由大気の下端、1000 hPaは地表付近で摩擦の影響を大きく受けていることを考えると、div1000-div850は摩擦収束の大きさを示していると考えられる。Rossby波モードでは地表摩擦が対流中心付近での収束を強化するのに対して、Kelvin波モードで地表摩擦が収束を弱めている。つまり、対流抑制がない場合、Kelvin波モードでは摩擦によって地表付近の収

束が弱まり、Rossby波モードのように地表付近の比湿の伝播を通して対流と結合ができなくなるために、OLRにはKelvin波モードのシグナルが現れないと考えられる。

結局、対流抑制がない場合は、対流有効位置エネルギー（CAPE）が積雲対流の発生を制御するため、積雲対流は地表摩擦による水蒸気収束が効果的なRossby波と結合することが分かった。またこの場合、Kelvin波は循環の構造上Rossby波ほどにはCAPEを蓄積できないために積雲対流と結合しにくい。一方、対流抑制を導入すると、CAPEよりも自由大気の相対湿度が積雲対流の発生を強くコントロールするようになるため、自由大気の収束発散が大きいKelvin波が積雲対流と効果的に結合するようになることを解明した。この積雲対流を伴う赤道波（Kelvin波、Rossby波）は対流と結合して有効位置エネルギーを生成することで維持されている。

④ 本研究の成果と課題

大気大循環モデルにおいて相対湿度による対流抑制という付加的な対流制御手法の導入により積雲対流活動と結合する赤道波モードが変化することが示され、その機構が解明された。現実大気においても対流圏中下層相対湿度の上昇が対流開始に先行することが指摘されており、雲層相対湿度制御の付加により赤道波出現がより現実的になったことは、このような効果が現実には強く働いていることが示唆される。しかしながら、本来環境場の効果も含めて閉じているはずのArakawa-Schubert雲対流パラメタリゼーションに付加的な効果を導入するという手法は、試験的かつ経験的なモデル調整の域を出ているとは言えない。今後、このような知見と物理に基づいた、本質的なパラメタリゼーションの改善手法を更に追求するべきであることが強く提言される。

（５）水惑星実験における赤道域降水活動の放射冷却率鉛直分布依存性と解像度依存性

① 研究概要

赤道域には、組織化された降水構造(クラウドクラスタ、スーパークラスタ、Madden-Julian 振動) が階層的に存在すると言われている (Nakazawa, 1988)。Hayashi and Sumi (1986) は、水惑星条件を与えた大気大循環モデルによる数値実験をおこない、赤道域の降水構造としてスーパークラスタと Madden-Julian 振動的な波数 1 の降水強度変調とが自発的に発生することを示した。彼らは、この実験結果をもって、これらの階層的降水構造の存在は赤道域の力学に内在する自然な降水構造であると主張した。ところが、今日においては、大気大循環モデル中の降水分布パターンは解像度、数値スキーム、物理過程の実装に強い依存性をもつことが分かってきており(Lee et al., 2001)、パターン形成の要因が自然界に内在される力学による結果であるのか、不十分なモデル表現からもたらされる見かけのものに過ぎないのか、検討が必要な状況になっている。しかしながら、モデル計算結果のそのような依存性に関する調査は、大量の計算機資源を必要とすることもあり、降水分布パターンの相違をもたらす原因についての理解は十分に得られているとは言いがたい。

本研究は、赤道域降水構造の振舞のパラメータ依存性を調査し降水分布パターンの相違をもたらす原因についての理解を得ることを目指すものである。 Hayashi and Sumi (1986) と同様に、単純な水惑星条件の設定を用いて、解像度、数値スキーム、物理過程をさまざまに変化させたパラメータ研究を実施し、大気大循環モデルにおける降水活動の振舞、その組織化の様相を再検討する。

② 研究手法

熱帯の降水構造の組織化の様子を 2 つの大気大循環モデルを用いて調べる。1 つは、簡略な水循環過程と放射過程のみを持つ、地球流体電脳倶楽部版の大気大循環モデル AGCM5 (<http://www.gfd-dennou.org/arch/agcm5/>) である。AGCM5 は物理過程が簡略であり 1 実験の実行にさほど大量の計算資源を必要としないので、これを用いてパラメータ依存性を調べるための多数の実験を行う。もう 1 つは、より複雑な物理過程を持つ大気大循環モデル AFES (地球シミュレータ用に CCSR-NIES AGCM ver 5.4.02 の並列化効率を高めたモデル; Ohfuchi et al., 2004) である。AFES は高解像度計算が可能な地球シミュレータ上でチューニングがなされているので、これを用いて解像度依存性を調べる実験を行う。両者ともに球面 3 次元プリミティブ方程式系に基づいたモデルであり、水平方向にはスペクトル変換法、鉛直方向には有限差分法を用いている。

AGCM5 では、積雲パラメタリゼーションについては、Kuo スキームを用いた実験と対流調節スキームとを用いた実験を行った。放射計算には 4 色のバンドモデルを用いる。解像度は T42L16 で固定する。境界条件としては、東西一様で南北対称な固定 SST 分布を持つ水惑星条件を与えた。

AFES では、積雲パラメタリゼーションについては、使用しない実験と Emanuel スキーム (Emanuel, 1991) を使用した実験とを行った。放射計算には Nakajima and Tanaka (1986) の放射スキームを用いる。表 1 に示した 6 通りの解像度での計算を実行した。以下では、水平解像度依存性に注目し、T39L48、T159L48 の実験結果についてのみ示す。境界条件としては、Neale and Hoskins (2000) の提唱する東西一様、南北対称の海水面温度分布を持つ水惑星条件を与えた。

表 1 : AFES を用いた実験のリスト

	T39 (3.0 deg)	T79 (1.5 deg)	T159 (0.75 deg)	T319 (0.375 deg)
24 層	T39L24			
48 層	T39L48	T79L48	T159L48	T319L48
96 層	T39L96			

Txxは、水平方向のスペクトルモデルの解像度を示す（かつこの中は、その解像度に対応する格子点の経度緯度間隔の角度）。Lxx (xx層) は、モデルの鉛直の層の数を示す。

各数値実験において発現する降水パターンは、降水量の赤道上経度時間断面図により観察する。降水構造の抽出を行うためにスペクトル解析、コンポジット解析を行う。

③ 結果

③-1 降水構造の放射冷却率分布依存性

降水パターンの相違を発生させる要因のひとつとして、凝結加熱の鉛直分布の差異が挙げられる。Numaguti and Hayashi (1991) は、水惑星実験を行い、スーパークラスタに対応すると考えられるモデル格子点スケールの降水の東進構造の維持には wave-CISK (第二種対流不安定)の力学が関与すると主張した。ここで、wave-CISK とは、波に伴う上昇流と対流活動が結合することにより波の振幅を強める過程を指す (wave-CISK という用語に関しては、その定義にしばしば混乱が見られる。本報告書においては、Numaguti and Hayashi (1991) と同様の意味で wave-CISK と

いう単語を用いる)。Numaguti and Hayashi (1991) の言うように、GCM において wave-CISK の力学が働いているのであれば、凝結加熱の鉛直分布に応じて東進する降水構造の発現のしやすさが変わることになる。wave-CISK の発現には、凝結加熱の鉛直分布が大きく影響するからである (Lau and Peng, 1987; Numaguti and Hayashi, 2000 など)。ここでは、簡単な水循環過程をもつ AGCM5 を用いて、凝結加熱の鉛直分布に着目したパラメータ依存実験を行い、水惑星大循環モデルにおける降水活動の振舞、特にその組織化の発生と維持の様相をパラメータ空間内で再検討した。放射スキームにおける乾燥空気バンドの吸収係数を変えることによって鉛直放射冷却率分布を操作し、凝結加熱率の鉛直分布の変更を実現した。

まず、積雲パラメタリゼーションとして Kuo スキームを用いた実験の結果を示す。図 13 は、放射冷却率を変えた 2 つの実験の放射冷却率と凝結加熱率の東西時間平均を示したものである。実線は下層で放射冷却率を大きくした実験の結果を示している。この場合では、結果として対流圏下層において凝結加熱率が最大となっている (以下、この実験を「下層冷却実験」と呼ぶ)。点線は上層で放射冷却率を大きくした実験を示しており、この場合では結果として対流圏上層において凝結加熱率が最大となっている (以下、「上層冷却実験」と呼ぶ)。

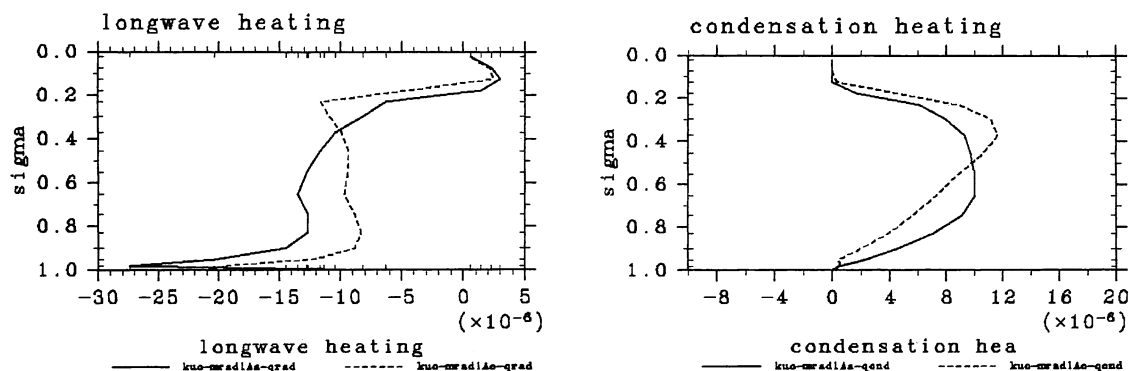


図13: 赤道域における放射冷却率(左)、凝結加熱率(右)の時間東西平均 (単位はK/s)。実線は下層冷却実験、点線は上層冷却実験を示す。

下層冷却実験では、赤道上の経度時間断面図において格子点スケールの降水域の西進が顕著に見られる (図 14 左)。これに対して、上層冷却実験では、赤道上経度時間断面図において格子点スケールの降水域の東進が顕著に見られる (図 14 右)。両実験で得られる赤道域降水量に対して、Takayabu (1994) および Wheeler and Kiladis (1999) に基づく時空間スペクトル解析を行った結果を図 15 に示す。経度時間断面図の結果に対応して、下層冷却実験(図 15 左)では西進シグナルが現れ顕著な東進シグナルは認められない。上層冷却実験(図 15 右)では、東進シグナルが現れ、西進シグナルは非常に弱いものとなっている。

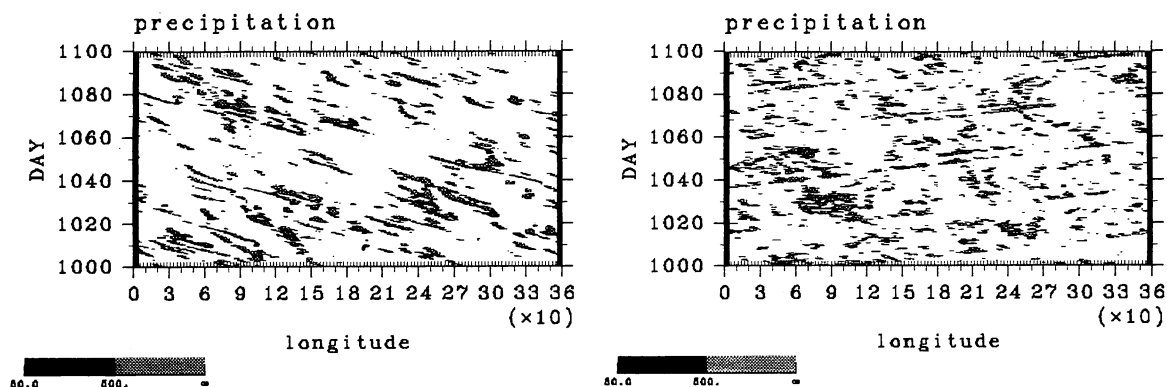


図14: 赤道域における降水量の経度時間断面 (単位は W/m^2)。 (左)下層冷却実験、(右)上層冷却実験。

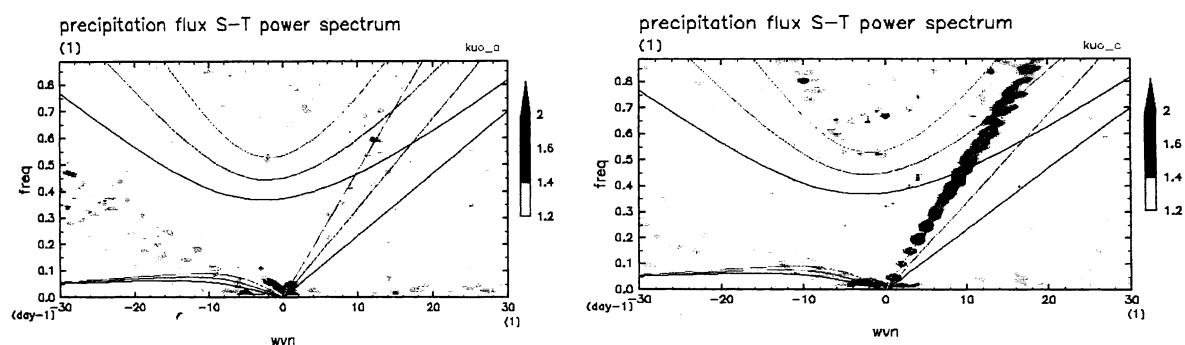


図15: Takayabu (1994) および Wheeler and Kiladis (1999) に基づく降水量の時空間スペクトル図。等価深度 $h=12, 25, 50, 100, 200 \text{ m}$ の場合のケルビン波と最低次のロスビー波、慣性重力波の分散曲線も示されている。 (左)下層冷却実験、(右)上層冷却実験。

下層冷却実験で現れた西進する降水構造の移動速度は 7 m/s 前後であり、背景風の東西平均東風風速とほぼ等しい。西進する降水域中の降水量ピークに準拠して作成したコンポジット図を図16(左)に示す。鉛直東西断面での温度場、流速場の東西平均からの偏差場から、格子点スケールの直立する対流構造が存在していることがわかる。この実験で現れている降水構造は、モデルで表現される最小スケールで生じた対流活動が偏東風によって移流されたものであると考えられる。

上層冷却実験における時空間スペクトル図に現れる東進シグナルは位相速度が約 23 m/s のケルビン波の分散曲線と良く対応している。また、東進する降水域に準拠したコンポジット図 (図16 右) では、鉛直東西断面での温度場、流速場の東西平均からの偏差に位相の西傾が見られる。この鉛直構造は、Numaguti and Hayashi (1991) によって論じられた東進構造と同様のものであり、wave-CISK の予想する構造に整合的である。よって、上層冷却実験で得られた東進構造はケルビン波と対流が結合したものであると考えられる。

積雲パラメタリゼーションとして対流調節スキームを用いた実験においても、上層で放射冷却率を大きくした実験では、下層で放射冷却率を大きくした実験に比べて、時空間スペクトル図において強い東進シグナルが現れた (図は示さない)。ただし、対流調節スキームを用いた実験では、

下層で冷却率が最大となる実験においても、東進する降水構造の存在が認められた。

kuo700mradiAa y=32 composite [t (u,-sigdot)] kuo700mradiAc y=32 composite [t (u,-sigdot)]

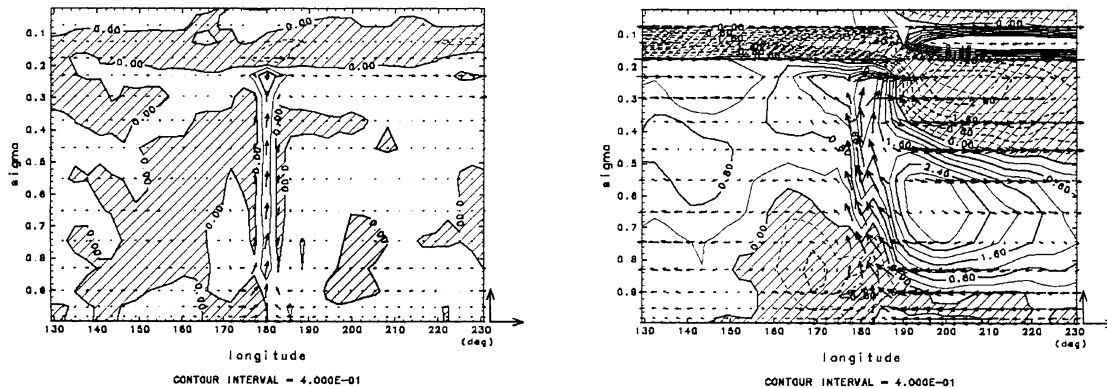


図16: 赤道上的における温度場と流れ場の降水量に準拠したコンポジット解析図。各量は東西平均からの偏差である。(左)下層冷却実験、(右)上層冷却実験。

③-2 降水構造のモデル解像度依存性

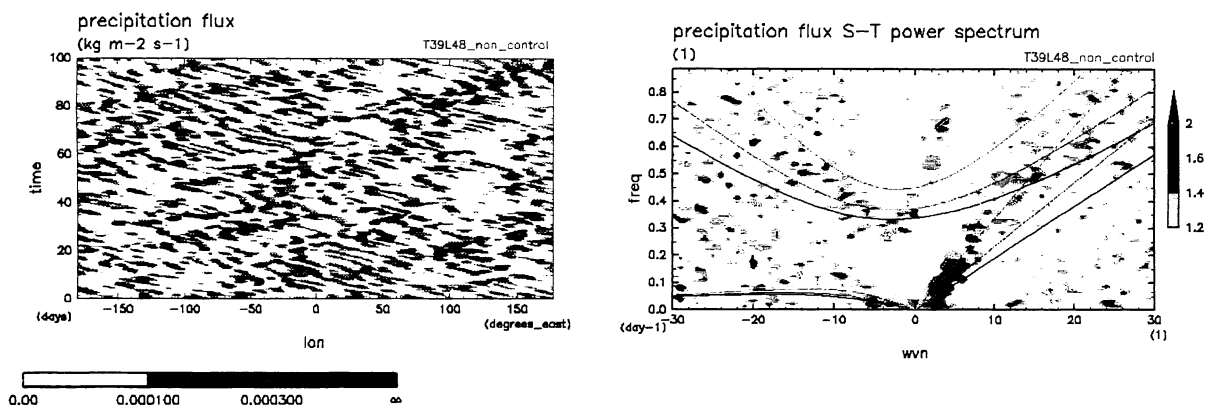


図17: T39L48 実験の結果。(左)赤道域における降水量の経度時間断面 (単位は $\text{kg}/(\text{m}^2 \text{s})$)、(右)時空間スペクトル図。等価深度 $h=12, 25, 50, 100, 200 \text{ m}$ の場合のケルビン波と最低次のロスビー波、慣性重力波の分散曲線も示されている。

ここでは、大気大循環モデルの水平解像度を変化させた場合に降水構造の振舞がどのように変化するかに注目する。雲活動本来のスケールは大気大循環モデルの格子間隔に比べてずっと小さく、大循環モデル内の個々の湿潤対流は最小格子スケールでいわば無理矢理生じさせられている。最小格子スケールよりも小さい空間スケールにおいて、降水構造が階層性を持っていたとしたら、解像度が上がればそれらが分解されていき降水構造の振舞もかなり変わったものになるだろう。そこで、水平解像度を広い範囲にわたって変更した解像度依存性実験をおこない、解像度に対して赤道域降水活動の表現がどのように変わるかを調べた。高解像度計算を行う必要があるため、AFES を用いた数値実験を行った。以下では、積雲パラメタリゼーションを使用しない実験の結

果を主に述べる。

最初に、低解像度の T39L48 実験の結果を示し、AFES による数値実験で現れる降水構造を観察する。図 17(左) は T39L48 実験における降水量の赤道上経度時間断面図である。格子点スケールの降水域として西進構造と東進構造との両方が存在し、これら 2 つの水平スケールや持続性は同程度である。図 17(右) は時空間スペクトル解析の結果である。東進シグナルも西進シグナルも広い波数域・広い振動数域にわたって存在している。各実験において現れる降水構造の種類が限られていた ③-1 の場合に比べると降水構造の特定が難しいものとなっている。

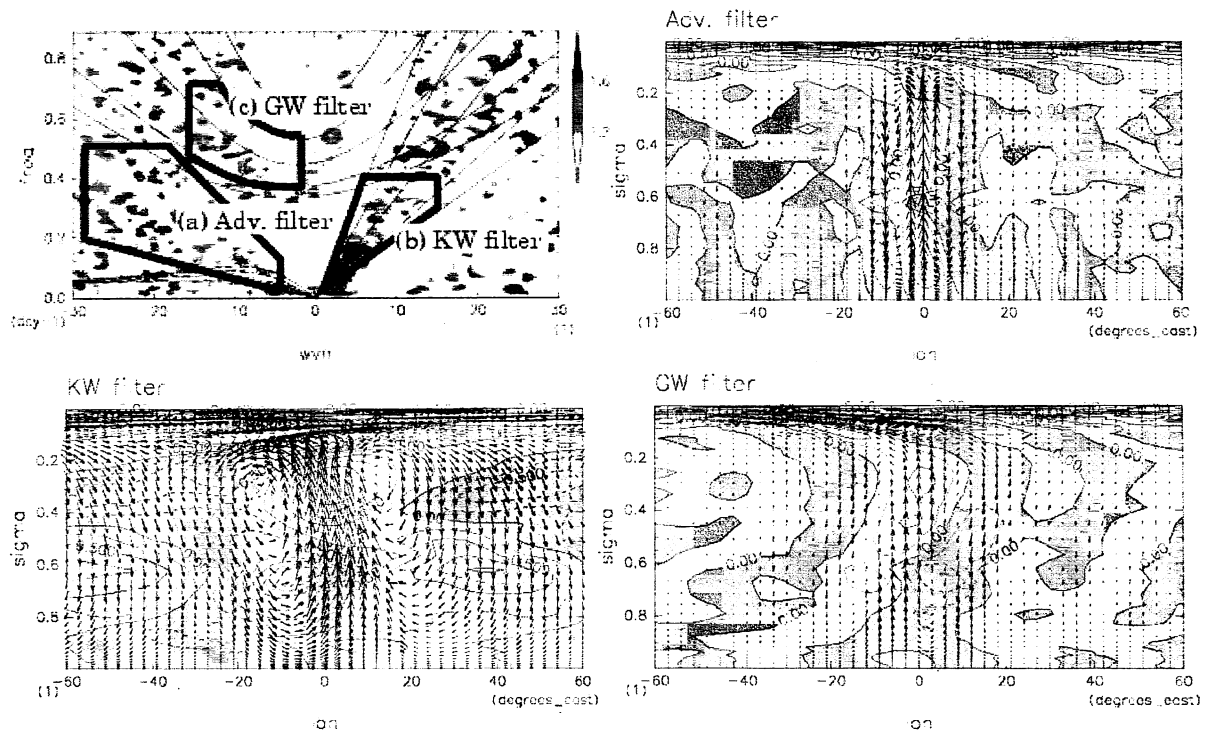


図 18: (左上)降水量の時空間スペクトルと適用するスペクトルフィルター。(右上)移流フィルターを適用した結果。(左下) ケルビン波フィルターを適用した結果。(右下)西進重力波フィルターを適用した結果。スペクトルフィルターを適用後、降水量の極大値に準拠してコンポジットした温度 [K]、東西風-鉛直風 [m/s, Pa/s] の赤道近傍経度高度図を示している。それぞれ東西平均からの偏差を示す。

そこで、Wheeler et al. (2000) を参考にして、スペクトルフィルターを適用したコンポジット解析を行った。背景風移流、ケルビン波、西進重力波のそれぞれのシグナルが抽出されるようにフィルターを適用した (それぞれ、移流フィルター、ケルビン波フィルター、西進重力波フィルターと呼ぶ; 図 18 左上 参照)。移流フィルターを適用したコンポジット図 (図 18 右上) では循環場は鉛直に直立した構造を持っている。この西進構造の移動速度は背景風の東西平均東風風速と同程度であり、格子点スケールの対流活動が偏東風によって移流されたものであると考えられる。ケルビン波フィルターを適用したコンポジット図 (図 18 左下)では循環場に位相の西傾構造が見られた。これは、図 16(右) で示された、ケルビン波と対流が結合した構造と同種のものであると考えられる。西進重力波フィルターを適用したコンポジット図を図 18(右下)に示す。この西進構

造には循環場に位相の東傾構造が見られる。

西進重力波フィルターで抽出された東傾構造は wave-CISK の力学と整合的な鉛直構造を持っているが、その維持において wave-CISK の力学の関与は弱いものであると想像される。なぜならば、循環場の時間発展においてその特徴を明確に見出すことができないからである。1 時間間隔のデータから得られる赤道断面内循環構造の時間発展を示す動画を観察したところ、西傾構造を保って東進する東西風擾乱と鉛直に直立した構造を持ち西進する比湿擾乱とが観測された (図は示さない)。これらは、それぞれケルビン波と対流が結合した構造、および偏東風によって移流される格子点スケールの対流活動に対応する。これに対して、西進重力波に伴うと考えられる構造は観察されなかった。これより、この西進構造においては東進構造に比べて波と対流との結合が弱く、西進重力波が対流によって変調されたものであると想像される。

以下では、水平解像度を上げた場合の結果について論じる。図 19(左)は T159L48 実験で得られた降水量の赤道上経度時間断面図である。T39L48 の場合に比べて、水平スケール数千 km の連続的に降水が持続する東進構造が明瞭となっている。この東進構造は、水平スケール約 200 km の西進構造を内包する形で構成されており (図 20)、明確な階層性が現れている。T159L48 実験における東進構造の移動速度は約 15 m/s である。時空間スペクトル図では、東進構造に対応するスペクトルピークがケルビン波の分散曲線に沿って現れている (図 19 右)。また東進構造に伴う下層東西風の収束域に準拠したコンポジット解析を行うと、鉛直東西断面での温度場、流速場の東西平均からの偏差に位相の西傾が見られる (図 21)。この鉛直構造は、これまでに見てきたケルビン波と対流が結合した降水構造と同様のものである。

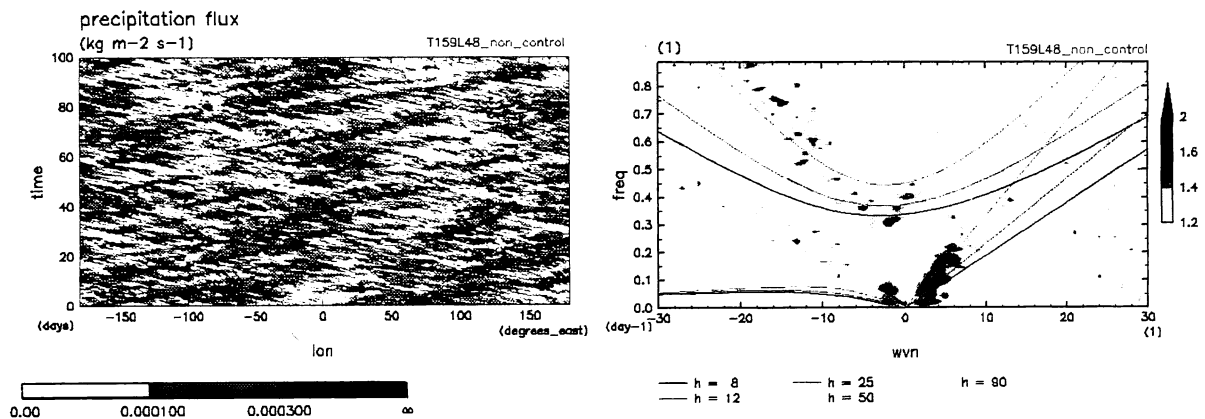


図19: T159L48実験の結果。(左)、(右)ともに図17と同様。

T159L48 実験における西進構造には、15~20 m/s の位相速度を持つものと、8~10 m/s の位相速度をもつものの 2 種類が存在するようである。15~20 m/s の移動速度をもつ西進構造に対応する時空間スペクトルピークは、西進重力波の分散曲線が存在する波数域・振動数域に現れている。この西進構造は T39L48 実験で得られていた、西進重力波が対流によって変調されたものに対応すると考えられる。8~10m/s の移動速度をもつ西進構造は、下層の平均東西風速とほぼ一致

することから、背景風に移流されている格子点スケールの対流構造であると考えられる。

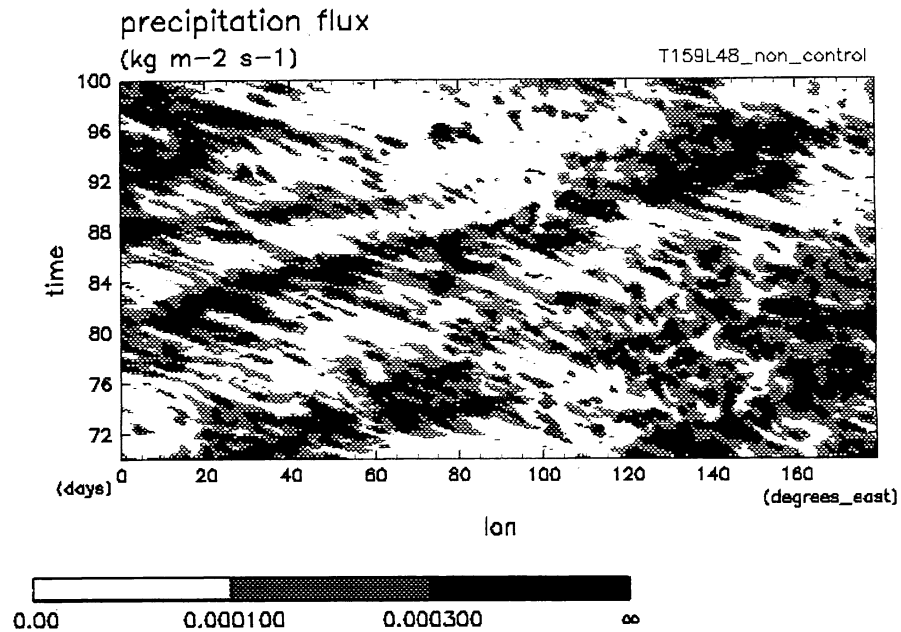


図20: 図19(左) の右半分の拡大図。

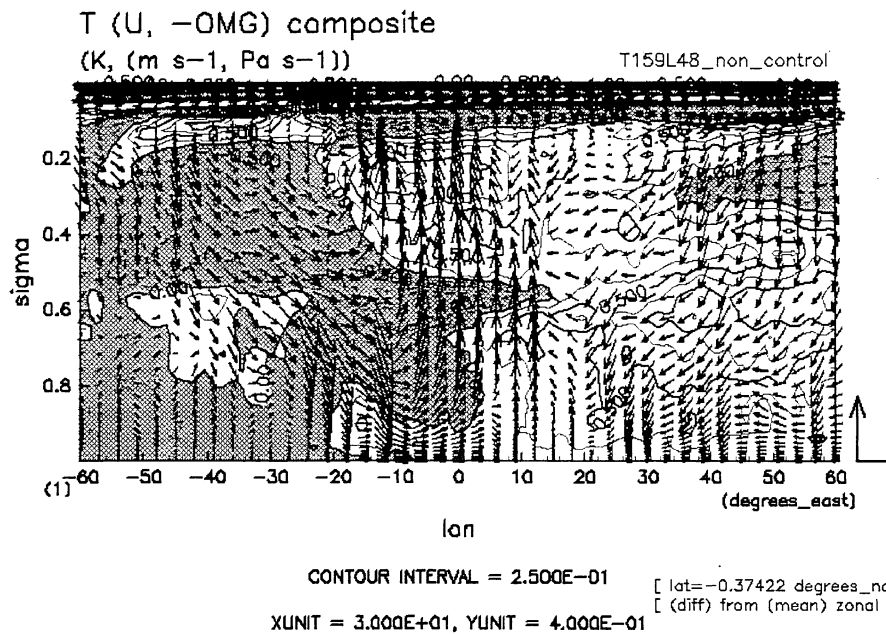


図21: 図19(右)の赤道上的における温度場と流れ場の下層の東西風の収束域に準拠したコンポジット解析図。各量は東西平均からの偏差である。

積雲パラメタリゼーションとして Emanuel スキームを用いた高解像度 (T159L48) 実験においても、西進構造を内包する形で構成された東進構造が現れ、降水構造の階層性の存在が確認された (図は示さない)。低解像度 (T39L48) 実験の場合には、積雲パラメタリゼーションスキームを

用いない実験と Emanuel スキームを用いた実験で違いが見られた。Emanuel スキームを用いた実験では明瞭な東進構造が得られなかった。

④ 本研究により得られた成果

③-1 の数値実験では、放射冷却率を上層で大きくした場合には東進する降水構造が現れやすくなることが示された。この東進構造は、wave-CISK の力学から予想される構造と整合的な鉛直構造を持っていた。本報告書においては wave-CISK という用語を、③-1 の冒頭で述べた意味で使用してきたが、wave-CISK という用語は、その定義が混乱していることもあり、近年では使用が避けられる傾向にある。また、モデルに現れる降水域の組織化に関して、より微細な構造に着目した考察もなされるようになった (Numaguti and Hayashi, 2000 など)。これに対して、本研究では、微細構造には目をつぶった粗視化した見方をするならば、放射冷却率を上層で大きくするとケルビン波と対流が結合した東進する降水構造が現れやすくなる、という wave-CISK が予想する傾向と一致した実験結果が得られ、粗視化した概念としては wave-CISK の力学はあいかわらず有効なのではないかという示唆を行うものである。当然、これはあくまで粗視化した見方がゆるされる範囲での記述でしかなく、降水パターンの発現傾向を十分に掌握するには至っていない。放射冷却率を下層で大きくした場合には、Kuo スキームを用いた実験に比べると対流調節を用いた実験の方が、東進構造がより明瞭に現れた。この違いが何によってもたらされているのかはまだ未解明である。降水パターンの発現傾向を、上記の大まかな議論よりも精度をあげて把握するためには、更に密なるパラメタ依存計算が必要である。

③-2 で示した水平解像度向上実験では、偏東風によって移流される西進降水構造と、ケルビン波と対流が結合した東進降水構造とがスケールの的に分離されている可能性がある。上述のように wave-CISK の力学を用いた大まかな記述が有効であるとするならば、以下のようなことが考えられる。wave-CISK の線形論によれば、構造の波長が小さいほどより大きな発達率で成長するはずであり、モデルが生成するスーパークラス的な構造は、モデル内において wave-CISK の仮定が許される範囲での最小スケールとして現れる、と想像される。一方、本来、クラウドクラスタとして存在する対流構造は、個々の雲の生成消滅とその持続というメソスケールの構造に起因するものであり、現実大気においては、このメソスケールの力学の存在により wave-CISK 的構造の最小スケールが規定されていると考えられる。クラウドクラスタスケールではメソスケールの力学が wave-CISK の力学の発動を抑止するわけである。メソスケールの構造を分解し得ない全球モデルにおいては、クラウドクラスタの対応物はパラメタ化された格子点スケールの降水として存在すると考えるのが自然であろう。解像度が低いモデルでは、格子点スケールの降水がクラウドクラスタ的な構造として発現するかスーパークラス的な構造として発現するか、モデル中の物理過程の実装によって決定されるのだろう。水平解像度を高くすることにより、wave-CISK 的構造を内在する条件であれば、両者の分離が表現されるのだと想像される。

③-2 の議論に関して、物理過程の実装に対してモデルで発現する降水構造の振舞がどのように依存しているのかが問題として残された。この依存性を調べるためには、パラメタリゼーションスキームで使用される内部パラメタに対する依存性調査実験、パラメタリゼーションスキームを単純化した場合についての数値計算などを行なう必要がある。そのためには、大気大循環モデルが、内部パラメタを容易に変更できるインターフェースを持つこと、スキームの一部を簡単

化する場合に変更すべき箇所がどこかがすぐにわかるプログラムコードを持つこと、スキーム全体の取替えを容易にできるプログラム構造を持つことが肝要であろう。数値計算の実行および解析作業のみならず、このような大気大循環モデル構築の実現可能性の検討も含めたソフトウェア開発作業の重要性についても認識しておく必要があるだろう。

5. 結論

気候変化に伴う大気中の水・エネルギー循環の変化に関しては、台風・低気圧の発生発達や、エルニーニョ等の長周期変動の変化を予測することが重要である。本研究の結論として、水・エネルギー循環を左右する長周期変動を正確に表現するためには、積雲対流活動を伴う短周期擾乱を適切に再現する必要がある、それはモデルにおける雲降水活動の表現方法を適切なものにしなければ得られないことが確認された。また、その妥当性を検討するためには、新しい衛星データおよび観測データを駆使して得られる降水現象に関する新しい知見を活用することが必要不可欠であることが確認された。コンピュータの能力向上に伴って気候モデルは解像度を上げ、物理過程の表現方法も変化している。大気現象は非線形であり、異なる物理過程の表現方法の導入はマルチスケール間の相互作用に関する再検討を常に必要とする。人間生活に影響をおよぼす気候の予測において何を表現することが重要でありどの部分は省略できるかについて、短絡的な想像に基づいて決めてしまうことなしに、自然現象を作り上げている仕組みの理解を追及し続けることが重要であることが結論される。

6. 引用文献

- Arakawa, A., Schubert, W.H., 1974: Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment, Part I. *J. Atmos. Sci.* 31, 674-701.
- Bantzer, C. H. and J. M. Wallace, 1996: Intraseasonal variability in tropical mean temperature and precipitation and their relation to the tropical 40-50 day oscillation. *J. Atmos. Sci.*, 53, 3032-3045
- Emanuel, K.A., 1991: A scheme for representing cumulus convection in large-scale models. *J. Atmos. Sci.*, 48, 2313-2335.
- Emori, S., Nozawa, T., Numaguti, A., Uno, I., 2001. Importance of cumulus parameterization for precipitation simulation over East Asia in June. *J. Meteorol. Soc. Japan.* 79, 939-947.
- Hayashi, Y.-Y., Sumi, A., 1986: The 30-40 day oscillations simulated in “anaqua planet” model. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 64, 451-467.
- Hendon, H. H., and M. L. Salby, 1994: The life cycle of the Madden-Julian oscillation. *J. Atmos. Sci.*, 51, 2225-2237
- Kessler, W. S., 2001: EOF representations of the Madden-Julian Oscillation and its connection with ENSO. *J. Climate*, 14, 3055-3061.
- Knutson, T. R., and K. M. Weickmann, 1986: Global-scale intraseasonal oscillations of outgoing longwave radiation and 250 mb zonal wind during northern hemisphere summer. *Mon. Weather Rev.*, 114, 605-623
- Lau, K. -M., Peng, L., 1987: Origin of low-frequency oscillations in the tropical atmosphere. Part I: Basic theory. *J. Atmos. Sci.*, 44, 950-972.

- Lee, M, Kang, I, Kim, J, Mapes, B, 2001: The influence of cloud-radiation interaction on simulating tropical intraseasonal oscillation with the Atmospheric General Circulation Model. *J. Geophys. Res.*, 106, 14219-14233.
- Madden, R. A. and Julian, P. R., 1971: Detection of a 40-50-day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J. Atmos. Sci.*, 28, 702-708.
- Madden, R. A. and Julian, P. R., 1972: Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40-50-day period. *J. Atmos. Sci.*, 29, 1109-1123.
- Madden, R. A., and J. H. Timothy and R. F. Milliff, 1999: Scatterometer winds composited according to the phase of tropical intraseasonal oscillations. *Tellus*, 51A, 263-272
- Marcus, S. L. and J. O. Dickey and Olivier de Viron, 2001: Links between intraseasonal (extended MJO) and ENSO timescales: Insights via geodetic and atmospheric analysis. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3465-3468.
- McPhaden, M. J. and H. P. Freitag and S. P. Hayes and B. A. Taft and Z. Chen and K. Wyrtki, 1988: The response of the equatorial Pacific Ocean to a westerly wind burst in May 1986. *J. Geophys. Res.*, 93, 10589-10603.
- Milliff, R. F. and R. A. Madden, 1996: The existence and vertical structure of fast eastward-moving disturbances in the equatorial troposphere. *J. Atmos. Sci.*, 53, 586-597
- Nakazawa, T., 1988: Tropical super clusters within intraseasonal variations over the western Pacific. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 66, 823-839.
- Nakajima, T., M. Tanaka, 1986: Matrix formulation for the transfer of solar radiation in a plane-parallel scattering atmosphere. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 35, 13-21.
- Neale R. B., Hoskins, B. J., 2000: A standard test for AGCMs including their physical parameterizations: I: The proposal. *Atmos. Sci. Lett.*, 1, 101-107.
- Nitta, T. and T. Motoki, 1987: Abrupt enhancement of convective activity and low-level westerly burst during the onset phase of the 1986-87 El Niño. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 65, 497-506.
- Nitta, T., T. Mizuno and K. Takahashi, 1992: Multi-scale convective systems during the initial phase of the 1986/87 El Niño. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 70, 447-466
- Numaguti, A., Hayashi, Y.-Y., 1991: Behaviors of cumulus activity and the structures of circulations in an "aqua planet" model. Part I: The structure of super clusters. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 69, 541-561.
- Numaguti, A., Hayashi, Y., 2000: Gravity-wave dynamics of the hierarchical structure of super cloud clusters. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 78, 301-331.
- Ohfuchi, W., H. Nakamura, M.K. Yoshioka, T. Enomoto, K. Takaya, X. Peng, S. Yamane, T. Nishimura, Y. Kurihara, and K. Ninomiya, 2004: 10-km mesh meso-scale resolving simulations of the global atmosphere on the Earth Simulator: Preliminary outcomes of AFES (AGCM for the Earth Simulator). *J. Earth Simulator*, 1, 8-34.
- Pan, D.-M., Randall, D.A., 1998: A cumulus parameterization with a prognostic closure. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 124, 949-981.
- Slingo, J. M. and D. P. Rowell and K. R. Sperber and F. Nortley, 1999: On the predictability of the interannual behavior of the Madden-Julian Oscillation and its relationship with El Niño. *Q. J. R.*

Meteorol. Soc., 125, 583-609.

Sui, C.-H. and K.-M. Lau, 1992: Multiscale phenomena in the tropical atmosphere over the western Pacific. *Mon. Weather Rev.*, 120, 407-430.

Takayabu, Y. N., 1994: Large-scale cloud disturbances associated with equatorial waves. Part I: Spectral features of the cloud disturbances. *J. Meteorol. Soc. Japan*, vol.72, 433-449.

Weare, B. C., and J. S. Nasstrom, 1982: Examples of extended empirical orthogonal function analyses. *Mon. Weather Rev.*, 110, 481-485

Wheeler, M., and G.N. Kiladis, 1999: Convectively coupled equatorial waves: Analysis of clouds and temperature in the wavenumber-frequency domain. *J. Atmos. Sci.*, 56, 374-399.

Wheeler, M., G.N., Kiladis, and P.J. Webster, 2000: Large-scale dynamical fields associated with convectively coupled equatorial waves. *J. Atmos. Sci.*, 57, 613-640.

7. 国際共同研究等の状況

・熱帯降雨観測衛星 (TRMM) は日米共同のサイエンスミッションであり、高薮縁がサイエンス研究に参加している。また、WCRP(世界気候研究計画)のGPCP (全球降雨気候値計画) の下で開かれた各国研究機関参加の降雨推定精度向上のためのワークショップに参加し、TRMM研究による成果について報告をまとめた。

・本サブテーマ参加者の一部は、各国研究機関の大気大循環モデルにおける水惑星実験による比較調査 APE (Aqua Planet Experiment Project, <http://www-pcmdi.llnl.gov/projects/amip/ape/>) に参加している。本研究の結果の一部も 2005 年 4 月 20-22 日の APE Workshop において発表された。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表 (学術誌・書籍)

<学術誌 (査読あり)>

- ① Kikuchi, K. and Y. N. Takayabu: *J. Meteorol. Soc. Japan*, 81, 851-869 (2003)
“Equatorial circumnavigation of moisture signal associated with the Madden-Julian Oscillation (MJO) during boreal winter”
- ② Kikuchi, K., and Y. N. Takayabu: *Geophys. Res. Lett.*, 31, 10.1029/2004GL019601 (2004)
“The development of organized convection associated with the MJO during TOGA COARE IOP: Trimodal characteristics”
- ③ Shige, S., Y. N. Takayabu, W.-K. Tao, and D. E. Johnson: *J. Appl. Meteorol.*, vol.43, 1095-1113 (2004)
“Spectral retrieval of latent heating profiles from TRMM PR data. Part 1: Development of a model-based algorithm”
- ④ Weng, Hengyi, A. Sumi, Y. N. Takayabu, M. Kimoto, and C. Li : *J. Meteorol. Soc. Japan*, 82, 775-788 (2004)
“Interannual-interdecadal variation in large-scale atmospheric circulation and extremely wet and dry summers in China/Japan during 1951-2000 Part I: Spatial patterns”
- ⑤ Weng, Hengyi, A. Sumi, Y. N. Takayabu, M. Kimoto, and C. Li : *J. Meteorol. Soc. Japan*, 82,

789-804 (2004)

“Interannual-interdecadal variation in large-scale atmospheric circulation and extremely wet and dry summers in China/Japan during 1951-2000 Part II: Dominant timescales”

- ⑥ Kimoto, M.: Geophys. Res. Lett., 32, L16701, doi: 10.1029/2005GL023383 (2005)
"Simulated change of the east Asian circulation under global warming scenario"
- ⑦ Chen, X., M. Kimoto, and M. Takahashi: SOLA, 1, 149-152, doi: 10.2151/aola.2005-039 (2005)
"Changes in ENSO in response to greenhouse warming as simulated by the CCSR/NIES/FRCGC coupled GCM"
- ⑧ 木本昌秀: 天気, 52, No. 8, 608-612 (2005)
「欧州熱波と日本の冷夏2003」
- ⑨ Inatsu, M., and M. Kimoto: SOLA, 1, 105-108, doi: 10.2151/sola.2005-028 (2005)
"Difference of boreal summer climate between coupled and atmosphere-only GCMs"
- ⑩ Kimoto, M., N. Yasutomi, C. Yokoyama and S. Emori: SOLA, 1, 85-88, doi: 10.2151/sola.2005-023 (2005)
"Projected changes in precipitation characteristics near Japan under the global warming"
- ⑪ Yamada, Y., T. Sampe, Y. O. Takahashi, M. K. Yoshioka, W. Ohfuchi, M. Ishiwatari, K. Nakajima, and Y.-Y. Hayashi: Theor. Appl. Mech. Japan, 54, 289-297 (2005)
"A resolution dependence of equatorial precipitation activities represented in a general circulation model"
- ⑫ Suzuki, T., Y. N. Takayabu, S. Emori: Dyn. Atmos. Oceans, doi: 10.1016/j.dynatmoce.2006.02.004 (2006)
"Coupling mechanisms between equatorial waves and cumulus convection in an AGCM"
- ⑬ Morita, J. and Y. N. Takayabu, S. Shige, and Y. Kodama: Dyn. Atmos. Oceans, doi: 10.1016/j.dynatmoce.2006.02.002 (2006)
"Analysis of rainfall characteristics of the Madden-Julian oscillation using TRMM satellite data"
- ⑭ Takayabu, Y. N., J. Yokomori, and K. Yoneyama: J. Meteorol. Soc. Japan, 84A, 151-169 (2006)
"A diagnostic study on interactions between atmospheric thermodynamic structure and cumulus convection over the tropical western Pacific Ocean and over the Indochina Peninsula"

<学術誌（査読なし）>

- ① WCRP Informal Report No.11, Report of the GEWEX Global Precipitation Climatology Project (GPCP) workshop on precipitation analysis, 84-88 (2003)
"Characteristics of precipitation as observed by TRMM PR (Yukari N. Takayabu)"
- ② 高荻 縁: 気象研究ノート, 204号「モンスーン研究の最前線」, 41-67 (2003)
「第2章: モンスーンの季節内振動」
- ③ 片山勝之: 2003年度東京大学大学院修士論文 (2004)
「TRMM PRデータのメソスケール統計を用いた熱帯・亜熱帯域の降雨特性とその降雨要因についての研究」
- ④ 高荻 縁: パリティ, vol.19, No.3, 丸善, p55-61 (2004)

クローズアップ 「エルニーニョを吹き飛ばした赤道上の積雲群」

- ⑤ Sumi, A., M. Kimoto, and X.-S. Shen: In East Asian Monsoon (Ed. C.-P. Chang), World Scientific, 332-353 (2004)
"Simulation studies of the Asian monsoon using the CCSR/NIES AGCM"
- ⑥ 木本昌秀, 宮坂隆之, 荒井美紀: 気象研究ノート, 210号「2003年日本の冷夏」, 155-160 (2005)
「欧州熱波と日本の冷夏2003」
- ⑦ 木本昌秀: Safety Eye (損保ジャパン広報誌), 2005年2月号, 2-9 (2005)
「2004年異常気象と地球温暖化」
- ⑧ 木本昌秀: 科学, vol.75, no.10, 1138-1140 (2005)
「異常気象への挑戦」

(2) 口頭発表

- ① 高薮 縁: 日本気象学会2003年度春季大会 (2003)
「TRMM PR2a25データを用いた熱帯降雨特性の定量的解析:季節変化」
- ② 清木亜矢子、高薮 縁: 日本気象学会2003年度春季大会 (2003)
「西風バーストとMJOとの統計的關係」
- ③ Takayabu, Y. N.: IUGG, Sapporo, Japan (2003)
“Regional and seasonal variations of precipitation characteristics analyzed with TRMM Precipitation Radar and implications to precipitation estimates and errors”
- ④ Takayabu, Y. N. and K. Kikuchi: IUGG, Sapporo, Japan (2003)
“Propagation of MJO in association with moisture signals over the western hemisphere and its recurrence mechanism during the boreal winter”
- ⑤ Shige, S., Y. N. Takayabu, W.-K. Tao, D. E. Johnson, and C.-L. Shie: IUGG, Sapporo, Japan (2003)
“Spectral retrieval of latent heating profiles from TRMM PR data: comparison of look-up tables”
- ⑥ Kikuchi, K., and Y. N. Takayabu: IUGG, Sapporo, Japan (2003)
“The development of organized convection associated with the Madden-Julian Oscillation (MJO) during TOGA COARE”
- ⑦ Seiki, A., and Y. N. Takayabu: IUGG, Sapporo, Japan (2003)
“A statistical analysis of westerly wind bursts in the equatorial tropics and their interrelationship with ENSO and intraseasonal variations”
- ⑧ 菊地一佳、高薮 縁: 日本気象学会2003年度秋季大会 (2003)
「TOGA COARE期間中のMJOに伴う対流システム発達過程にみられる3段階構造」
- ⑨ 片山勝之、高薮 縁: 日本気象学会2003年度秋季大会 (2003)
「熱帯・亜熱帯の降水システム特性とその日変化」
- ⑩ 横森淳一、高薮 縁: 日本気象学会2003年度秋季大会 (2003)
「ゾンデデータによる熱帯海洋上での対流とCAPEについての考察」

- ⑪ Kimoto, M.: International Asian Monsoon Symposium, Univ. Hawaii, USA, 17-21 February 2004
"Intraseasonal variability of the Asian summer monsoon in a modestly high resolution general circulation model"
- ⑫ Kimoto, M.: The 1st International Workshop on the Kyousei Project, Honolulu, USA, February 25-27, 2004
"High-resolution coupled ocean-atmosphere modeling on the Earth Simulator"
- ⑬ 木本昌秀 and the K-1 Japan Project Team: 地球温暖化予測研究ワークショップ, マホロバマインズ三浦, 2004年3月18-19日
「高分解能大気海洋結合モデルの開発: 現状と課題」
- ⑭ Takayabu, Y. N. : 26th Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology, Miami, USA (2004)
"A study on variations of deep-rain properties with the sea surface temperature over the tropics utilizing TRMM PR2a25 and TMI data"
- ⑮ 高薮 縁: 日本気象学会2004年度春季大会 (2004)
「TRMM PRとTMIデータを用いた熱帯域の背の高い降雨と海面水温との関係についての解析」
- ⑯ 森田純太郎、高薮 縁: 日本気象学会2004年度春季大会 (2004)
「TRMM衛星データを用いたMadden-Julian振動に伴う降水特性の解析」
- ⑰ 片山勝之、高薮 縁: 日本気象学会2004年度春季大会 (2004)
「TRMM PRデータのメソスケール統計を用いた熱帯・亜熱帯域の降雨特性とその降雨要因についての研究」
- ⑱ 横森淳一、高薮 縁: 日本気象学会2004年度春季大会 (2004)
「高層ゾンデデータ解析による熱帯大気の0° Cレベル安定層が対流に及ぼす効果についての研究」
- ⑲ 山田由貴子、石渡正樹、中島健介、林祥介: 日本気象学会2004年度春季大会 (2004)
「水惑星実験における赤道域降水活動の放射冷却率鉛直分布依存性」
- ⑳ 中村卓也、木本昌秀、江守正多: 2004年度日本気象学会春季大会講演予稿集, C303 (2004)
「高解像度大気大循環モデルで再現されたモンスーン域の季節内変動」
- ㉑ 木本昌秀: 日本気象学会公開講演会「地球温暖化と異常気象」, 学術総合センター橋記念講堂, 2004年5月16日
「コンピュータモデルによる地球温暖化予測」
- ㉒ 木本昌秀: 2004年度日本気象学会春季大会シンポジウム「2003年の日本の冷夏—異常気象をどこまで理解・予測できるか」, 学術総合センター橋記念講堂, 2004年5月18日
「欧州熱波と日本の冷夏2003」
- ㉓ 山田由貴子、三瓶岳昭、高橋芳幸、吉岡真由美、大淵 済、石渡正樹、中島健介、林 祥介: 日本流体力学会年会 2004 (2004)
「大気大循環モデルで表現される赤道域降水活動の解像度依存性」
- ㉔ Kimoto, M., T. Nakamura, and S. Emori: Proceedings of the Fourth International Symposium on Asian Monsoon Systems, Kunming-City, Yunnan Province, China, 24-29 May 2004, pp 31-36

- “Intraseasonal variability of the Asian summer monsoon in a modestly high resolution general circulation model”
- ㉓ Sumi, A., M. Kimoto, H. Hasumi, S. Emori, and T. Nozawa: Proceedings of the Fourth International Symposium on Asian Monsoon Systems, Kunming-City, Yunnan Province, China, 24-29 May 2004, pp 9-13
“Development of a high-resolution climate model”
- ㉔ Takayabu, Y. N. and M. Katayama: 1st meeting AOGS, Singapore, 8-10 July 2004
“Low-latitude rainfall characteristics and its meteorological factors analyzed with mesoscale statistics of TRMM PR data”
- ㉕ Kimoto, M: The First Joint Workshop between CCSR/Japan and CNPR/CAMS/China on Climate System Modeling, QingDao, China, 12-15 July 2004
“High-resolution coupled ocean-atmosphere modeling: Impact of resolution”
- ㉖ Takayabu, Y. N.: The University Allied workshop on Climate and Environmental Studies and Global Sustainability, Kanagawa, Japan, 20-23 July 2004
“Variations of deep-rain properties with the SST over the tropics analyzed with TRMM PR2a25 and TMI SST”
- ㉗ Kimoto, M., and the K-1 Japan Project Team: University Allied Workshop, Shonan Village Center, Kanagawa, Japan, 20-23 July 2004
“High-resolution coupled ocean-atmosphere modeling on the Earth Simulator”
- ㉘ 稲津将, 木本昌秀, Hoskins B. J., 向川均, 謝尚平: University Allied Workshop, Shonan Village Center, Kanagawa, Japan, 20-23 July 2004
“The Mid-latitude Storm-Track Response to Terrestrial and Radiative Forcing”
- ㉙ Kitoh, A., A. Noda, S. Yukimoto, S. Emori, T. Nozawa, T. Ogura, M. Kimoto, A. Abe-Ouchi, and A. Sumi: IPCC Workshop on Climate Sensitivity, Paris, France, 26-29 July 2004
“A comparison of climate sensitivity among the Japanese models”
- ㉚ Takayabu, Y. N. and M. Katayama: The 8th International Conference on Precipitation, Vancouver, 8-11 August 2004
“An attempt to determine dominant meteorological factors of precipitation utilizing mesoscale statistics of TRMM PR2a25 data”
- ㉛ Takayabu, Y. N. : ISAM4, Kunming, China (2004)
“Variations of Precipitation characteristics associated with SST analyzed with TRMM PR and TMI data”
- ㉜ Takayabu, Yukari N. : The 2nd TRMM International Science Conference, Nara, 6-10 Sept. 2004, p.6
“Variations of Deep-rain Properties with the Sea Surface Temperature”
- ㉝ Shige, S. and Takayabu, Y. N. : The 2nd TRMM International Conference, Nara, 6-10 Sept. 2004, p.8
“Specytral retrieval of latent heating profiles from TRMM PR data: Comparison of look-up tables”

- ③⑥ Takahashi, N., T. Iguchi, K. Aonashi, J. Awaka, H. Eito, M. Fujita, H. Hashizume, M. Hirose, T. Inoue, H. Kashiwagi, T. Kozu, S. Satoh, S. Seto, S. Shige, S. Shimizu, Y. N. Takayabu, and K. Okamoto : The 2nd TRMM International Science Conference, Nara, 6-10 Sept. 2004, p.55
“The global satellite mapping of precipitation (GSMaP) Project: Part II Algorithm and Precipitation Model Development”
- ③⑦ Morita, J. and Takayabu, Y. N. : The 2nd TRMM International Science Conference, Nara, 6-10 Sept. 2004, p.86
“Analysis of Rainfall Characteristics of the Madden-Julian Oscillation Using TRMM Satellite Data”
- ③⑧ Tao, W. K., E. A. Smith, R. Adler, A. Hou, R. Kakar, T. Krishnamurti, C. Kummerow, S. Lang, W. Olson, S. Satoh, S. Shige, J. Simpson, Y. N. Takayabu, and S. Yang: The 2nd TRMM International Science Conference, Nara, 6-10 Sept. 2004, p.88
“Latent Heating Structure Derived from TRMM”
- ③⑨ 宮坂隆之, 荒井美紀, 木本昌秀: 2004年度日本気象学会秋季大会講演予稿集, B104 (2004)
「2003年日本における冷夏の解析と数値実験」
- ④① 荒井美紀, 木本昌秀: 2004年度日本気象学会秋季大会講演予稿集, B205 (2004)
「AGCMで表現されるブロッキング現象の解像度依存性」
- ④② 稲津將, 木本昌秀: 2004年度日本気象学会秋季大会講演予稿集, D168 (2004)
「温暖化時のストームトラックの真冬の振動極小」
- ④③ 清木亜矢子、高薮 縁：日本気象学会秋季大会，福岡 2004年 10月，p.512
「ENSOと西風バーストとの関係におけるMJO西風期の順圧エネルギー変換の役割」
- ④④ 森田純太郎、高薮 縁：日本気象学会秋季大会，福岡 2004年 10月，p.278
「TRMM衛星データを用いたMadden-Julian振動に伴う降水特性の解析：第2報 潜熱分布、海陸の比較」
- ④⑤ 鈴木恒明、江守正多、高薮 縁、西村照幸：日本気象学会秋季大会，福岡，2004年 10月，p.260
「赤道波と対流のメカニズムに関する考察」
- ④⑥ 山田由貴子，三瓶岳昭，高橋芳幸，吉岡真由美，大淵 濟，石渡正樹，中島健介，林 祥介：日本気象学会 2004年度秋季大会（2004）
「大気大循環モデルで表現される赤道域降水活動の解像度依存性」
- ④⑦ 安富奈津子，木本昌秀：「異常気象と長期変動」研究会，京都大学防災研究所，2004年10月21-22日
「2004年夏の再現実験」
- ④⑧ 宮坂隆之，荒井美紀，木本昌秀：「異常気象と長期変動」研究会，京都大学防災研究所，2004年10月21-22日
「2003年日本における冷夏の解析と数値実験」
- ④⑨ 稲津將，木本昌秀：「異常気象と長期変動」研究会，京都大学防災研究所，2004年10月21-22日
「温暖化時のストームトラックとその主変動」

- ④⑨ 荒井美紀, 木本昌秀: 「異常気象と長期変動」研究会, 京都大学防災研究所, 2004年10月21-22日
「AGCMによるブロッキングの再現性について」
- ⑤⑩ Kimoto, M. : Workshop on Climate Change Research, Yokohama, Japan, 28-29 October 2004
“High-resolution coupled ocean-atmosphere modeling on the Earth Simulator”
- ⑤⑪ 高藪 縁・児玉安正・古津年章: 科研費特定領域研究「赤道大気上下結合」公開ワークショップ、豊橋、2004年12月
「TRMM観測による発雷・降雨量・降雨強度の地域性と季節変化」
- ⑤⑫ Tsuneaki Suzuki, Y. N. Takayabu, and S. Emori: Beijing, IAMAS 2005, Aug. 2005
“Simulation of Convectively Coupled Equatorial Wave by the CCSR/NIES/FRCGC AGCM”.
- ⑤⑬ Tsuneaki Suzuki, Y. N. Takayabu, and S. Emori: The First K-1 Workshop in 2005, May 2005
“Convectively coupled equatorial waves simulated in the CCSR/NIES/FRCGC AGCM”
- ⑤⑭ 鈴木恒明, 高藪 縁, 江守 正多: 第2回積雲対流ワークショップ, 2005年7月
「雲対流と赤道波の結合メカニズム について」
- ⑤⑮ Takayabu, Y. N., M. Hirose, S. Shige, T. Ushio, F. Furuzawa, K. Nakamura, and Y. Kodama: The 5th GPM International Planning Workshop in Tokyo, Tokyo, Japan , November 2005
“Characterizations of Tropical Precipitation with TRMM data”
- ⑤⑯ Takayabu, Y. N., S. Shige, W-K. Tao, C-L. Shie, and Y. Kodama: GPM GV workshop, Taipei, September 2005 (中村健治博士による代読)
“Latent Heating Evaluation”
- ⑤⑰ 横山千恵、高藪 縁: 日本気象学会秋季大会, 神戸, 2005年11月, p.484
「TRMM衛星データを用いた台風の降雨特性の解析」
- ⑤⑱ Yukari N. Takayabu, Junichi Yokomori, and K. Yoneyama: ISAM5, Yong-Pyong Korea, 11-13 Oct, 2005
“Diagnostics of cumulus cloud detrainment and its interaction with atmospheric thermodynamic structures utilizing the upper-air observations over the tropical western Pacific Ocean and the GAME-T rawinsonde observations”
- ⑤⑲ Takayabu, Yukari N. : ICWES13, Seoul, 26-29 August 2005
“What we have gained from 3-D rain radar observation from TRMM satellite”
- ⑥① Takayabu, Yukari N. : IAMAS2005, Beijing, 2-11 August 2005
“Analysis of Rain Characteristics Utilizing Multi Sensors of TRMM Satellite”
- ⑥② 高藪 縁: 日本気象学会春季大会、東京、2005年5月, p.204
「降雨特性の指標となるもの－OLR・雷・降雨量・降雨強度・降雨頂高度の関係－」
- ⑥③ 横森淳一、高藪 縁: 日本気象学会春季大会、東京、2005年5月, p.149
「高層ゾンデデータ解析による積雲対流活動の子午面循環への影響の解析」
- ⑥④ 横森淳一、高藪 縁: 日本気象学会春季大会、東京、2005年5月, p.150
「熱帯西部太平洋およびインドシナ半島における大気成層の特徴と積雲対流活動への影響の統計解析」

- ⑥④ Takayabu, Yukari N.: 2nd EarthCARE workshop, Tokyo, 22-23 March 2005 (invited)
“What we have gained from a 3D rain radar observation from TRMM satellite”
- ⑥⑤ 山田由貴子, 三瓶岳昭, 高橋芳幸, 吉岡真由美, 大淵 済, 石渡正樹, 中島健介, 林 祥介: 第54 回理論応用力学講演会 (2005)
「大気大循環モデルで表現される赤道域降水活動の解像度依存性」
- ⑥⑥ Yamada, Y., T. Sampe, Y. O. Takahashi, M. K. Yoshioka, W. Ohfuchi, M. Ishiwatari, K. Nakajima, Y.-Y. Hayashi: APE Workshop 2005, Reading, UK, 20-22 April 2005
“A resolution dependence of equatorial precipitation activities represented in a general circulation model”
- ⑥⑦ Hayashi, Y.-Y., Y. Yamada, Y. O. Takahashi, M. Ishiwatari, M. K. Yoshioka, W. Ohfuchi, T. Sampe, K. Nakajima: APE Workshop 2005, Reading, UK, 20-22 April 2005
“On the varieties of forced and spontaneously generated tropical precipitation patterns: some expectations and results”
- ⑥⑧ Yamada, Y., T. Sampe, Y. O. Takahashi, M. K. Yoshioka, W. Ohfuchi, M. Ishiwatari, K. Nakajima, Y.-Y. Hayashi: EGU05 General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna, Austria, 24-29 April 2005
“A resolution dependence of equatorial precipitation activities represented in a general circulation model”
- ⑥⑨ 山田由貴子, 三瓶岳昭, 高橋芳幸, 吉岡真由美, 大淵 済, 石渡正樹, 中島健介, 林 祥介: 日本気象学会 2005 年度春季大会 (2005)
「大気大循環モデルで表現される赤道域降水活動の解像度依存性」
- ⑦⑩ 山田由貴子, 高橋芳幸, 林 祥介, 石渡正樹, 大淵 済, 中島健介: 日本流体力学会年会 2005 (2005)
「大気大循環モデルで表現される赤道域降水活動の解像度依存性」
- ⑦⑪ Kimoto, M. : The 2nd International "KYOSEI" Workshop and the 7th International Workshop on Next Generation Climate Models for Advanced High Performance Computing Facilities, February 24-26, Hawaii, U.S.A, February 24-26 (2005)
“An Overview of K-1 Japan Project for Global Warming Projection”
- ⑦⑫ Kimoto, M. : International Workshop on IPCC Model Analysis, Univ. Hawaii, USA, March 1-4 2005
“Simulations of the East-Asian Summer Climate and Its Change under the Global Warming”
- ⑦⑬ 木本昌秀: 水資源学シンポジウム「国連水の日—気候変動がもたらす水問題」, 日本学術会議講堂, 2005年3月23日 (招待講演)
「地球シミュレータによる 地球温暖化予測」
- ⑦⑭ 稲津将, 木本昌秀: 2005年度日本気象学会春季大会講演予稿集, A306 (2005)
「高解像度CCSR/NIES/FRCGC GCMにおける大気海洋結合効果」
- ⑦⑮ 木本昌秀: 平成17年度神奈川県市環境・公害研究合同発表会特別講演, 横浜市教育文化センターホール, 2005年6月2日
「コンピュータによる地球温暖化の将来予測」

- ⑦⑥ Kimoto, M., and the K-1 Japan Project Team: IAMAS2005, Beijing, China, 2-11 August, 2005
“A "High-"Resolution Coupled Ocean-Atmosphere GCM for Climate Change Projection”
- ⑦⑦ Inatsu, M., and M. Kimoto: IAMAS2005, Beijing, China, 2-11 August, 2005
”The Atmosphere-Ocean Coupled Effect in a High-Resolution CCSR/NIES/FRCGC GCM”
- ⑦⑧ Chen, X., and M. Kimoto: IAMAS2005, Beijing, China, 2-11 August, 2005
“Tropical Pacific Variability in the Coupled General Circulation Models”
- ⑦⑨ Kimoto, M.: Workshop on high resolution atmospheric simulations and cooperative output data analysis, Yokohama Institute for Earth Sciences, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Yokohama, Japan, 21-22 September, 2005
“High-resolution coupled ocean-atmosphere modeling for climate studies”
- ⑧⑩ Kimoto, M.: The 9th session of the JSC/CLIVAR working group on coupled modeling, UK Met Office, Exeter, UK, 3-5 October, 2005
“Japanese climate modeling activities on the Earth Simulator”
- ⑧⑪ 稲津将, 木本昌秀: 「異常気象と長期変動」(気候変動のメカニズムと予測可能性)研究会, 京都大学防災研究所, 2005年10月27-28日
「CCSR/NIES/FRCGCにおける大気海洋結合効果」
- ⑧⑫ 木本昌秀: 2005年度日本気象学会月例会「長期予報と大気大循環」, 気象庁, 2005年11月1日
「地球温暖化と東アジアの気候変化」
- ⑧⑬ Kimoto, M.: 1st UJCC International Workshop on Current Problems in Earth System Modelling, Earth Simulator Center, Yokohama, JAPAN, 24-25 November, 2005
“An overview of Japanese contributions to AR4”
- ⑧⑭ Takayabu, Y. N., and Ayako Seiki: Workshop on the Organization and Maintenance of Tropical Convection and the Madden Julian Oscillation, Trieste, 13-17 March, 2006
”Multi-scale interaction in the generation process of equatorial westerly wind bursts”
- ⑧⑮ Tsuneaki Suzuki, Y. N. Takayabu, and S. Emori: Workshop on the Organization and Maintenance of Tropical Convection and the Madden Julian Oscillation., Trieste, 13-18 Mar. 2006
“The effect of cumulus suppression scheme in the simulation of convectively-coupled equatorial waves in a GCM”
- ⑧⑯ 山田由貴子, 高橋芳幸, 林 祥介, 石渡正樹, 大淵 済, 中島健介: 日本気象学会 2006年度春季大会 (2006)
「大気大循環モデルで表現される赤道域降水活動の解像度依存性 —背景風移流と赤道波に着目して—」
- ⑧⑰ Kimoto, M. : The 8th International Workshop on Next Generation Climate Models for Advanced High Performance Computing Facilities and the 3rd International Workshop on the Kyosei Project, February 23-25, Albuquerque, U.S.A (2006)
“High-resolution coupled ocean? atmosphere modeling for climate studies” (Key note)

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

- ① 高薮 縁, 丸善「パリティ」(2004年, vol.19, No.3、クローズアップ「エルニーニョを吹き飛ばした赤道上の積雲群」)
- ② 高薮 縁, 2004.06.19 「衛星レーダーで降雨の原因分析」—東大、予報の精度向上— 日経産業新聞他
- ③ 木本昌秀, 2005: 集中豪雨増加の背景. TBSテレビ, みのもんたの朝ズバッ! 2005年 7月12日OA (取材) .
- ④ 木本昌秀, 2005: 地球温暖化と異常気象. テレビ朝日スーパーJチャンネル2005年 12月29日放送.
- ⑤ 木本昌秀, 2006: 温暖化はコンピュータで予測できるのか? 日経エコロジー2006年2月号 (取材)

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

今後、CCSR/NIES/FRSGC気候モデルで再現される降雨特性とTRMM等の衛星観測による降雨特性との比較解析を行って論文発表することにより、次期IPCCへの貢献に努める。