

B-1 気候変動の将来の見通しの向上を目指したエアロゾル・水・植生等の過程のモデル化に関する研究

(2) 地球温暖化に伴う気候変化と水循環過程との相互関係に関する研究

東京大学 気候システム研究センター

高薮 縁・木本昌秀

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

北海道大学大学院 地球環境科学研究科

沼口敦 (平成12年度のみ)

平成12～14年度合計予算額 25,028千円

(うち、平成14年度予算額 7,064千円)

[要旨] 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目的として、現実データと共に全球気候モデルにおける水循環過程の特性を解析し気候モデルの改良を図る研究を行った。

本研究計画では、雲降水過程と気候変化との相互関係の解明に向け大きな3つの目標(1)最新のモデルを用いて温暖化に伴う水循環過程の変化の予測を試み、その感度を調べる。(2)着手可能な部分についてモデルの高度化を行う。(3)最新の観測データや長期データを用い、次世代モデルの精密化に向けて詳細な現象解明を行う。)を掲げてこの問題に取り組んだ。

主な研究成果は次の7項目である。①地球温暖化に伴い積雪量は減少すると予測される地域と増加すると予測される地域があることを示し、その要因を調べた。②温暖化時の梅雨活動について気候モデルを用いた実験を行い、温暖化に伴って梅雨活動が強化されると予測されることを示し、それはいかなる大規模場の変化によるものかを示した。③気候モデルにおける水蒸気の力学的輸送スキームを改良した。④気候モデルにおける大気海洋結合過程の人為的調節(フラックス調節)をはずした新バージョンの開発を行い、大気海洋結合モデルを高精度化した。⑤TRMM衛星観測データによる降水特性の解析を行い、次世代気候モデルによって表現されるべき熱帯降雨の統計的特性について新しい知見を示した。さらにこの知見において現在の気候モデルの中の大気大循環モデルの降水特性を検討した。⑥南アジアモンスーン降水量の経年変化機構について解析し、東西風の鉛直シアがモンスーン低気圧の発達に及ぼす影響という新しい視点から、エルニーニョと南アジアモンスーンとの関係を解析した。⑦季節内振動に伴う組織化した積雲対流に対する大規模大気成層構造の効果について解析し、降水過程の精密なモデルには雲物理に起因する大気の準安定層の再現も必要であることを示した。

[キーワード] 全球気候モデル, 水循環過程, 地球温暖化と降雨量変化, 熱帯降雨観測衛星, エルニーニョ・モンスーン・季節内振動

1. はじめに

IPCC 第3次評価報告書は、過去50年の気温上昇について人間活動が主たる要因であると述べている。また、先進の気候モデルは気候変化をかなりの程度予測できると評価している。温暖化の社会への影響を見積もった上で対策をとることは明らかな急務であり、そのためには地球温暖化が地域気候に及ぼす影響を正確に予測する必要がある。しかしながら、気候モデルは地域的な気候や異常気象を精度よく予測する段階にはまだ達していない。その見通しを向上するための重要なポイントは、気候に大きなフィードバック効果を持つ水蒸気・雲・降水を含む水循環過程の正確なモデル化である。中でも、アジアモンスーンの降水量の変化を正確に予測するためには、モンスーンの季節的な進行の細部を気候モデルでうまく再現できるかに影響される(IPCC)。

本サブテーマでは、(H12年度)水蒸気の力学的輸送スキームの改良、水蒸気・降水の振舞の観測データ及びモデルデータの解析、(H13年度)気候モデルにおける水循環過程と気候の経年変動との相互関係の解析、現実の現象との比較検証、(H14年度)気候モデルにおける積雲パラメタリゼーションの検討、代表的な経年変化に伴う水循環過程の変化とその気候へのフィードバックの解析という計画の下に、現実データと共に全球気候モデルにおける水循環過程の特性を解析し気候モデルの改良を図る研究を行った。

2. 研究の背景と目的

現在の先進的な気候モデルにおいても、気候変動の地域的特性や、実際の社会生活に大きな影響を与える極端な気候・気象現象を適切に再現するのはまだ困難と評価されている。そのひとつの原因として、気候に大きなフィードバック効果を持つ水蒸気・雲・降水を含む水循環過程が適切にモデル表現されていないということが指摘される。

気候モデルは、基礎的な運動方程式や熱力学方程式の他に、雲降水過程や放射過程などの物理過程を表現する数式から成り立っている。後者は、本質的にはミクロの世界の微物理であるが、気候モデル格子の数100kmスケールを代表する物理量で表現しなければならない。この両者を繋ぐ手法をパラメタリゼーションと呼び、さまざまな手法が用いられている。しかしながら、観測による検証や現象の理解がまだ不十分のため、現在の気候モデルでは全球規模の降水分布のような基本的特性さえもなかなか適切に表現されない。ところが、この物理過程の表現に対して気候モデルは非線形的に応答し非常に敏感であるため、これを適切に表現しなければ、温暖化に伴う気候変動の将来の見通しの向上は図れないことは明らかである。

そこで我々は雲降水過程と気候変化との相互関係の解明に向け、次の3つの目的を掲げてこの問題に取り組んできた。(1)各時点で最新のモデルを用いて温暖化に伴う水循環過程の変化の予測を試み、その感度を調べること。(2)現時点で着手可能な部分についてのモデルの高度化を行うこと。(3)次世代モデルの精密化に向けて最新の観測データや蓄積された長期のデータを用い、より詳細な現象解明を行うこと。

3. 研究手法

前述の3つの目的に沿って、以下に研究手法を述べる。

(1) 気候モデルによる温暖化に伴う水循環過程の変化の予測実験および感度調査

① 地球温暖化に伴う積雪量変化の地域的特性の研究

比較的長期の積雪量データが入手できた旧ソビエトとカナダの二つの地域について、観測から得られた積雪量のトレンドを調べ、過去30年～120年の積雪量の特徴を明らかにした。この結果と大気海洋結合モデル及び大気大循環モデルによる温暖化シナリオ実験の結果を比較し、モデルの予測の妥当性を検討した。さらに、このモデルから得られた降雪量や融雪量を用いて雪の収支を解析することによって積雪量の変化のメカニズムを詳しく調べた。

② 地球温暖化時の梅雨活動の強化についての気候モデル研究

水平解像度約600 kmの大気モデルと約300 kmの海洋モデルの結合モデルによってシミュレートされた二酸化炭素(CO₂)年率1%漸増実験におけるCO₂倍増時の海面水温を計算した。これを境界条件として、解像度約110 kmの大気モデルを積分したタイムスライス実験を行った。この実験結果に見られる地球温暖化時の6月の東アジアの気候変化について詳しく調べた。

(2) モデルの高度化

① 水蒸気の力学的輸送スキームの改良

水蒸気輸送スキームとしてスペクトル法に代わりフラックス形式の格子法を導入した。この手法における極の取り扱いの問題に関してはflux-form semi-Lagrange法(FFSL法: Lin and Rood, 1996¹⁾)を用いることで解決した。また質量連続の式の不一致に関してはスペクトル法での質量収束から水平・鉛直流を格子上で再構成することによって解決した。

② 大気海洋結合モデルの高精度化

これまでの水平解像度大気約600 km、海洋約300 kmのモデルを大気約290 km、海洋は可変格子を用いて緯度方向約100 km(赤道域では最小約60 km)、経度方向約150 kmにグレードアップした。さらに、大気モデルは雲・降水過程を中心に海洋モデルは移流スキームや混合層スキームを中心に大幅な改良を施して、現実的な現在気候の再現のために必要とされてきた大気海洋間の熱・水フラックス交換量の人為的調整(フラックス修正)を廃した新バージョンの開発を行った。

(3) 観測データを用いた雲降水過程の詳細な現象解明

① TRMM 衛星観測データによる降水特性の解析および大気大循環モデルの降水特性の検討

初めて熱帯域のあらゆる地域における降雨強度の鉛直プロファイル観測を可能にした、熱帯降雨観測計画(TRMM)衛星搭載降雨レーダー(PR)のデータを利用し、対流雨と層状雨の区別に着目して赤道近傍域の海洋上、陸上の降雨特性の平均的描像を解析した。さらにこれを用いて気候モデル中の大気大循環モデルにおける降雨特性の検討を行った。

②南アジアモンスーン降水量の経年変化機構についての解析

モンスーン低気圧の活動度を季節変化・経年変化・季節内変動という様々な自然変動の切り口から解析することにより、モンスーン降雨量の経年変化機構の理解を試みた。1980-1999年20年間のNOAAのOLR(外向き長波放射)および気象衛星「ひまわり」の赤外相当黒体輻射データを積雲対流活動の指標として利用し、ECMWF(欧州中期気象予報センター)の客観解析データを大気擾乱および循環場の解析に用いた。東西風鉛直シアがモンスーン低気圧活動に及ぼす効果という視点から、南アジアモンスーンの経年変化とエルニーニョ現象との間の高い相関関係について考察した。

③季節内振動に伴う組織化した積雲対流に対する大規模大気成層構造の効果についての解析

1992年11月から1993年2月にかけて行われたTOGA-COARE(熱帯海洋全球大気-大気海洋結合実験)集中観測期間の高層観測データおよび気象衛星「ひまわり」の赤外ヒストグラムデータを用い、コンポジット解析によって熱帯の季節内振動に伴う雲システムの発達段階と大気成層との関係を調べた。

4. 結果1: 地球温暖化に伴う積雪量変化の地域的特性の研究

4.1 研究目的

IPCC(1995)によれば、19世紀の後半から1990年までの間で全球平均の地表面気温は 0.3°C から 0.6°C 程度上昇した。気温の上昇は全球で見られたが、その度合は一様ではなく北緯40度から70度の大陸上で最大となっている。それらの地域では特に冬と春の気温の上昇の度合が大きい。

高緯度陸上で冬から春に昇温が大きくなるいくつかの原因の中で重要な部分を占めると考えられているのが雪と氷のアルベドフィードバックである。Groisman et al. (1994a, b)²⁾³⁾は観測結果を用いて、北半球の春(4, 5月)の積雪域の変化によってもたらされるアルベドの変化と気温のアノマリーには密接な関係があることを示し、その放射バランスの変化が全体の気温の上昇の約50%をもたらすことを示した。これにより、彼らは高緯度北半球における近年の春の気温の上昇には雪氷のフィードバック効果が半分程度効いていると考えた。

一方、降雪量や積雪量の変化について観測データを用いた解析から、その特性の地域隔差が指摘されている。例えばGroisman and Easterling(1994)⁴⁾は地上観測点のデータを用いて、1950~1990年の期間に年平均の降雪量がカナダの北緯55度以北で20% アラスカで11%増加し、北緯45-55度の緯度帯では減少傾向にあることを示した。Karl et al. (1993)⁵⁾は年平均の降雪量と気温との相関はアメリカや南カナダでは大きい、アラスカでは小さいことを示した。しかし、そのメカニズムの検討や観測からの検証は不十分であると思われる。特に、どのような領域で積雪量が増加し、どのような領域で減少するのか、その差異がどのようなプロセスによって支配されているのか、また、現実の観測データとモデルによる予測がどれだけ一致

するのかどうかという点に関して、明らかにされていない点が多い。

そこで本研究では積雪量を対象として以下の3つの事について注目し、観測データと数値モデルの結果を比較しながら調べることによって、気候に対する積雪の役割の理解を進めることを目的とした。

- ・ 温暖化に伴う積雪量の変化はどのような地域的特性をもつのか
- ・ 積雪量の変化パターンは現実の結果とモデルの予測とで一致しているか
- ・ 積雪量の変化にはどのような物理的過程が効いているのか

4.2 研究方法

比較的長期の積雪量データが入手できた旧ソビエトとカナダの二つの地域について、観測から得られた積雪量のトレンドを調べ、過去30年～120年の積雪量の特徴を明らかにした。この結果と大気海洋結合モデル及び大気大循環モデルによる温暖化シナリオ実験の結果を比較し、モデルの予測の妥当性を検討した。ここにおいて、標準モデルによるCO₂漸増実験(Emori et al. 1999⁶⁾)では、観測に比べてより遅くまで積雪が残る特性をもっていることがわかった。そこで積雪の短波反射率を気温の関数とする調整を行った結果、積雪分布と期間の改善が見られた。さらに、このモデルから得られた降雪量や融雪量を用いて雪の収支を解析することによって積雪量の変化のメカニズムを詳しく調べた。

4.3 結果と考察

図4.1は、観測値から最小2乗法を用いて求めた春(3、4月)についての積雪のトレンドの地域的分布を示す。ユーラシア大陸では内陸部の北緯55°以北で大きな増加が見られる。一方、西側の東経50°以西および北緯50°以南では減少のトレンドが見られる。東経120°

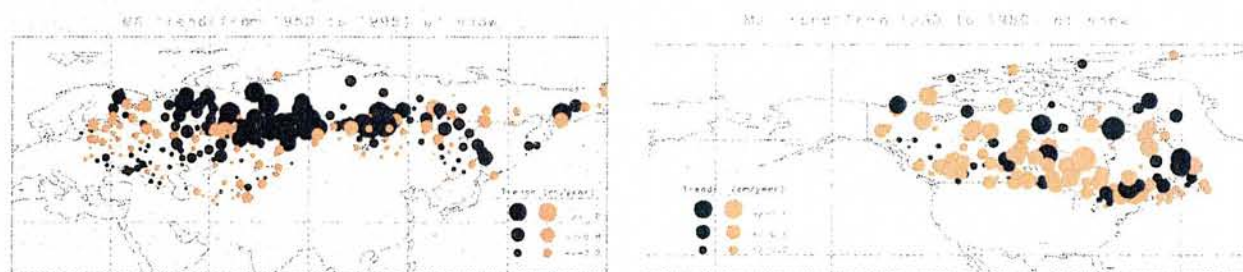


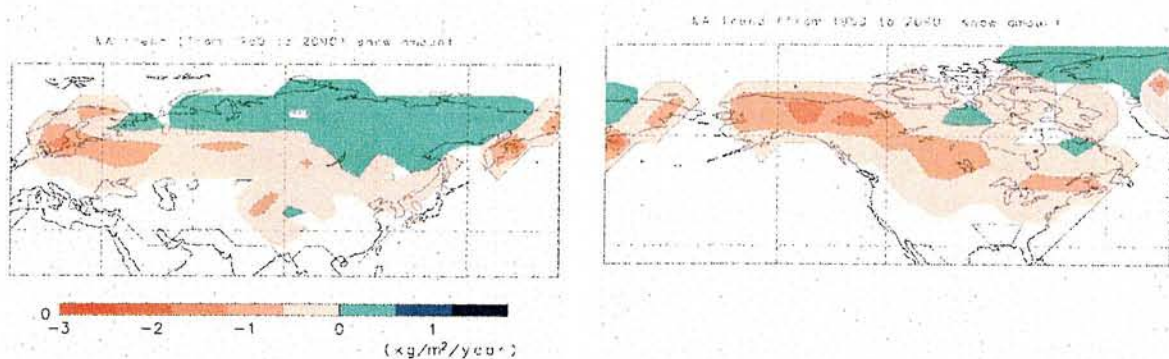
図4.1 観測された春期(3、4月)の積雪量変化。左は1950年～1995年までのトレンド、右は1950年～1980年までのトレンド。濃い円が増加、薄い円が減少を示しており、円の大きさはトレンドの絶対値に比例させた。

以東では増加トレンド、減少トレンドが共に見られる。一方、北アメリカ大陸では全体に大きな減少傾向が見られ、特に東側の内陸部でその傾向が強い。ただし、北アメリカ大陸の東海岸と北緯60°以北とでは増加となる点が多い。

将来の積雪の変化について、気候モデルを用いた二酸化炭素漸増実験を行った。図4.2は

1950年～2090年までの積雪の変化をトレンド解析した結果である。積雪量はユーラシア大陸で高緯度で増加、中緯度で減少を示し、特に大陸の西側では顕著な減少が見られる。

また、ユーラシア大陸では積雪量が減少から増加に向かう境界線が北アメリカ大陸よりも南に位置している。この傾向は1950年から現在までのモデルの結果(図略)のトレンドと定性的に一致する。ただし、長期のモデル積雪量のトレンドのパターンの方が、1950年から現在までのモデルの中のトレンドよりも、観測による1950年から現在までのトレンドのパターンとの類似性が高い。これは、より短期のトレンドにおいては温暖化と直接関係のない年々変動によるノイズの影響が大きい、長期間のトレンドを求めることによりその影響が軽減されたためではないかと考えられる。



(a) ユーラシア大陸

(b) アメリカ大陸

図 4.2 漸増実験によってみられた 1950 年～2090 年までの春期(3、4 月)の積雪量の変化。コンター間隔は $0.6\text{kg/m}^2/\text{year}$

温暖化によって、積雪量は減少すると予測される地域と増加すると予測される地域があることが示された。こういった地域的傾向の原因は何によってもたらされるのかを調べるために各地域の雪収支から積雪量のメカニズムの理解を試みた。図 4.3 には、パターン A(北東シベリア域に代表される積雪量が増加傾向を示す地域)、パターン B(カナダ西海岸域に代表される積雪量が減少傾向を示す地域)の収支を示す。

図 4.3 において 1950 年代と 2080 年代を比べると、パターン A、B ともにどちらも気温(5 段目)は同じ割合で上昇し、また降水も増加していた。しかし、積雪期の 11～3 月の降雪率(3 段目)が、パターン A では 100%のまま変化しないがパターン B では大きく低下していた。このため降雪量(1 段目)はパターン A では増加するが、パターン B では減少していた。また、積雪期の融雪率(4 段目)もパターン A で変化は認められなかったが、パターン B では上昇していた。

さらに、平均気温および気温変化の標準偏差との対応を見ると、温暖化に伴う積雪量の増加・減少には、降水のうちの降雪の割合(降雪率)の変化および融雪率の変化(積雪の一ヶ月に融解する割合)が重要であり、温暖化に伴うこれらの値の変化が平均気温や気温変化の標準偏差に依存するため、積雪量変化の地域差がもたらされていると考察される。

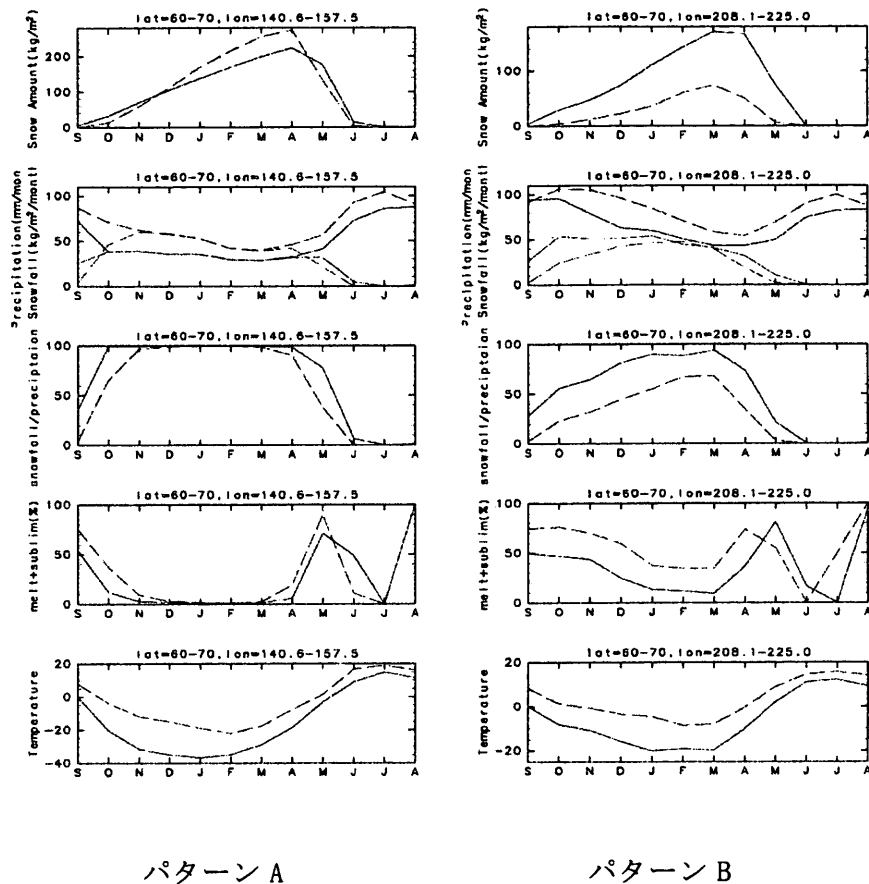


図 4.3：二つのパターンの積雪収支(改良モデルの結果) 左がシベリア北東部、右がカナダ西海岸部である。図は上段から積雪量(kg/m²)、降水量(kg/m²/month)と降雪量(kg/m²/month)、降雪率(%)、融雪率(%)、気温(°C)を示す。実線が1950年代の平均値、点線が2080年代の平均値

5. 結果2：地球温暖化時の梅雨活動の強化についての気候モデル研究

5.1 はじめに

わが国では秋の台風シーズンとともに梅雨期の降水が年降水量の大きな部分を占めている。集中豪雨に伴う災害も多い。地球温暖化に伴って梅雨期の降雨がどのように変化するかは大きな関心事である。

一般に、温暖化すると大気中の水蒸気量が増えるため水循環が活発になり、全球で平均した降水量は増える。しかし、増加量には地域差が大きく、大規模な大気循環がどのように変化するか大きく依存する。

梅雨を含むモンスーン域の降雨量は、温暖化に伴って増加するとするシミュレーション結果が多い。これは主として水蒸気量の増加による。一方、湿潤化に伴う気温減率が安定化することにより鉛直循環が弱まる効果や、エアロゾルのアルベド効果によりモンスーンが弱化する可能性も指摘されている。一方、温暖化実験にこれまで用いられてきた大気大循環モデルは解像度が低く、梅雨前線のような数百kmスケールの現象は十分に表現できていない。

ここでは、低解像度の気候海洋結合モデルを用いて行った温暖化漸増実験の海面水温予測値を高解像度大気大循環モデルに与えるタイムスライス実験によって梅雨期東アジアにお

ける気候変化を議論する。

5.2 モデルと実験方法

ここで用いる大気海洋結合モデルは、大気部分が水平解像度 T21（格子間隔にして約 600 km）、鉛直 20 層、海洋は水平約 300 km、鉛直 17 層の比較的粗いモデルである（Emori et al. 1999⁶⁾）。これを用いて現在気候から年率 1% の割合で二酸化炭素を増加させた漸増実験を行う。ここで用いた低解像度の気候モデルが表現する初夏、6 月の東アジア付近の気候変化は、わずかに中国南部や日本付近で降水の増加が見られるものの、パターンははっきりせず、伴う気圧配置もあいまいである（図 5.1；陰影は二酸化炭素倍増時と現在の降水量の変化。矢印は大気下層 850hPa の風の変化。等値線は 500hPa の高度の変化）。

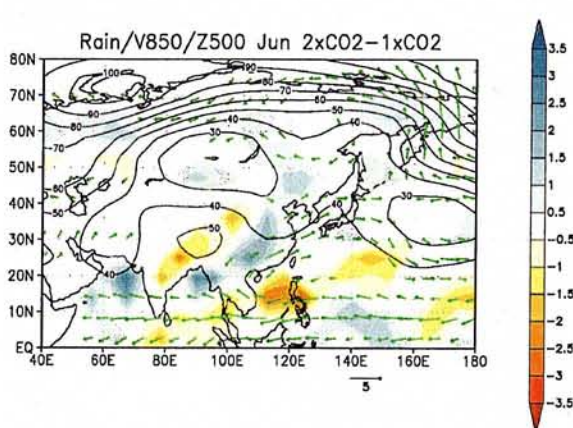


図 5.1 低解像度大気海洋結合モデルでシミュレートされた二酸化炭素倍増時 6 月の日本付近の気候変化。現在との差を示す。陰影は降水量 (mm/day)、矢印は 850hPa 風 (m/sec)、等値線は 500hPa 高度 (m) の変化を表す。

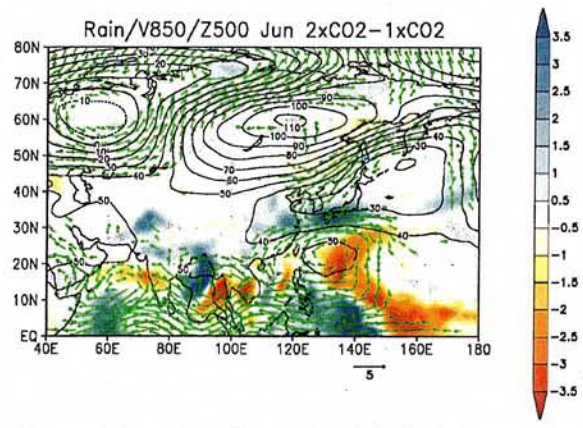


図 5.2 図 5.1 と同様。ただし高解像度大気モデルによるタイムスライス実験でシミュレートされた二酸化炭素倍増時 6 月の日本付近の気候変化。

そこで、大気海洋結合モデルによって予測された海面水温をより高解像度の気候モデルに与えるタイムスライス実験を行った。現在および二酸化炭素倍増時の海面水温を与えてそれぞれ 7 年間 T106 大気モデルを積分し、後半の 4 年間の平均値を比較する。二酸化炭素量も増加させている。

5.3 結果と考察

図 5.2 は、図 5.1 と同じ 6 月の気候変化を T106 モデルについて示したものである。日本付近、梅雨前線に沿った降水量の増加と南海上での減少、後者を中心とする下層風の高気圧性の変化とそれに伴う梅雨前線への南西風吹き込みの強化、また、500hPa 高度場では、北東シベリアでの高気圧性の変化とその南西下流域の低気圧性変化といった様相が低解像度モデルよりはっきりと表現されている。この高解像度モデルの結果によれば、初夏 6 月の日本付近の梅雨前線活動は、南海上からの暖湿気移流と、上層気圧配置による北方の気団の居座りという 2 つの要素によって強化される可能性が示唆される。

図 5.3 は、低解像度大気海洋結合モデルによる二酸化炭素倍増時 6 月の地表気温の変化を示している。赤道太平洋では西側より東側の温度の上昇の方が相対的に大きい、いわゆる「エルニーニョ型」の気候変化を示している。一方、ユーラシア大陸では高緯度ほど昇温量が

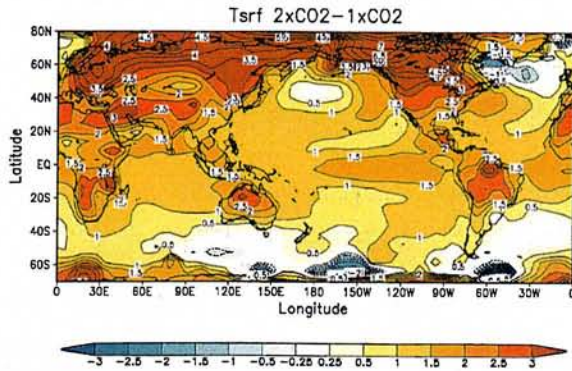


図 5.3 低解像度大気海洋結合モデルでシミュレートされた二酸化炭素倍増時6月の地表気温の変化(°C)。現在との差を示す。

大きい。これらの特徴では、世界の他の多くのモデルでも見られるものである。

高解像度モデルによってシミュレートされた気候変化は、より現実性が高いように見受けられるが、その信頼性を検証することは容易ではない。エルニーニョ型の海面水温変化は、東太平洋での上昇流、西太平洋での下降流、すなわちウォーカー循環の弱体化を伴うものと考えられる。西太平洋フィリピン付近での下降気流は、大気下層に高気圧性の偏差をもたらし、それによって梅雨前線域に南西の暖湿気移流の強化をもたらすことが期待される。また、シベリア

高緯度での昇温は南西方向下流に気圧波を誘起することが期待される。

シミュレーションの検証の一環として、現在観測される年々の気候変動の中でこれら2つの要因が梅雨前線の降雨増加にどう関係しているかを調べてみる。まず、図 5.4 は過去10回のエルニーニョ時の夏(6-8月)の海面水温(左上)と外向き長波放射(OLR)、850hPa風、500hPa高度場(右下)のそれぞれ気候学的平均値からの偏差の合成図である。右下のパネルを見ると、中国南部から日本にかけてOLRの負偏差域が帯状に広がり、梅雨前線の活動強化が示されている。下層風偏差は図 5.2 と比較すると南北にやや小スケールの変化が目立つが日本南海上には高気圧性偏差が見られる。

図 5.5 は、北シベリア東経80-140°、北緯50-70°の範囲(上図の長方形範囲)の地表気温偏差の6月の時系列をインデックスとして、ユーラシア～東アジア域の各格子点での地表気温偏差(上)、および、降水量、850hPa風、500hPa高度偏差(下)の回帰係数をプロットしたものである。シベリア高温域上空の高気圧とその南西下流の低気圧、梅雨域の降雨強化など、高解像モデルによる温暖化時の変化(図 5.2)と類似した特徴が見られる。

図 5.6 (上) は、高解像モデルによる東アジア域の東経120°-140°、北緯30°-40°の範囲内の5°×5°の格子内での夏季(6-8月)90日間の日降水量の度数分布を示す。二酸化炭素倍増時と現在の分布を比較すると、わずかではあるが、多降水量時の度数が増加していることがわかる。地球温暖化時には、一般的に、降水の多い場所(時期)にはより多く、また、乾燥傾向の場所(時期)はより少なくなる傾向があると推察されているが、このシミュレーションは、極東の梅雨期には、極端な豪雨の頻度が増加する傾向を示唆している。しかし一方で、図 5.6 下図で現在気候時のシミュレーションと衛星による降雨推定値(GPI)の頻度分布を比較すると、モデルは弱い雨の頻度を過大評価し、強い雨の頻度を過小評価する傾向が明らかである。

5.4 今後の課題—不確実性の低減に向けて

高解像度大気モデルによるタイムスライス実験によって温暖化時の梅雨に伴う降水強化の可能性が示され、その要因としてエルニーニョ型の海水温変化と高緯度大陸での昇温が示

唆された。温暖化時の海水温変化パターンは結合モデルの予測結果に大いに依存する。世界の多くのモデルでエルニーニョ型の海水温変化が予測されてはいるもののその程度やパターンには大きなばらつきがある。予測の信頼度向上には、例えばさまざまなモデルによる海面水温予測結果を用いた高解像度大気モデルによるタイムスライスアンサンブル実験等が有効であろう。

また、モデルの降水頻度分布の予測結果の信頼性向上にはモデルの解像度とともに物理過程の精度向上が不可欠である。現在このための調整開発を行っている。図 5.7 は、最新バージョンの T106 鉛直 56 層大気モデルとここでの実験で用いた旧バージョン T106 鉛直 20 層モデルによる夏の日本付近日降水量の頻度分布を $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 格子および $1^\circ \times 1^\circ$ 格子で衛星推定値と比較したものである。図 5.6 (下) で指摘した旧バージョンの弱点が新バージョンでは改善されていることがわかる。新バージョンで行った数多くの変更のうち、上層湿度に応じた積雲対流の発現制御や境界層から自由大気への水蒸気の輸送等に関わる過程がより現実的な降水の再現に必要ならしく、詳しい要因分析を行っている。モデルの再現性向上とともにそれに係る物理過程を明らかにしてゆくことが温暖化等にもなう気候変動予測の不確実性の低減につながるものと信じている。

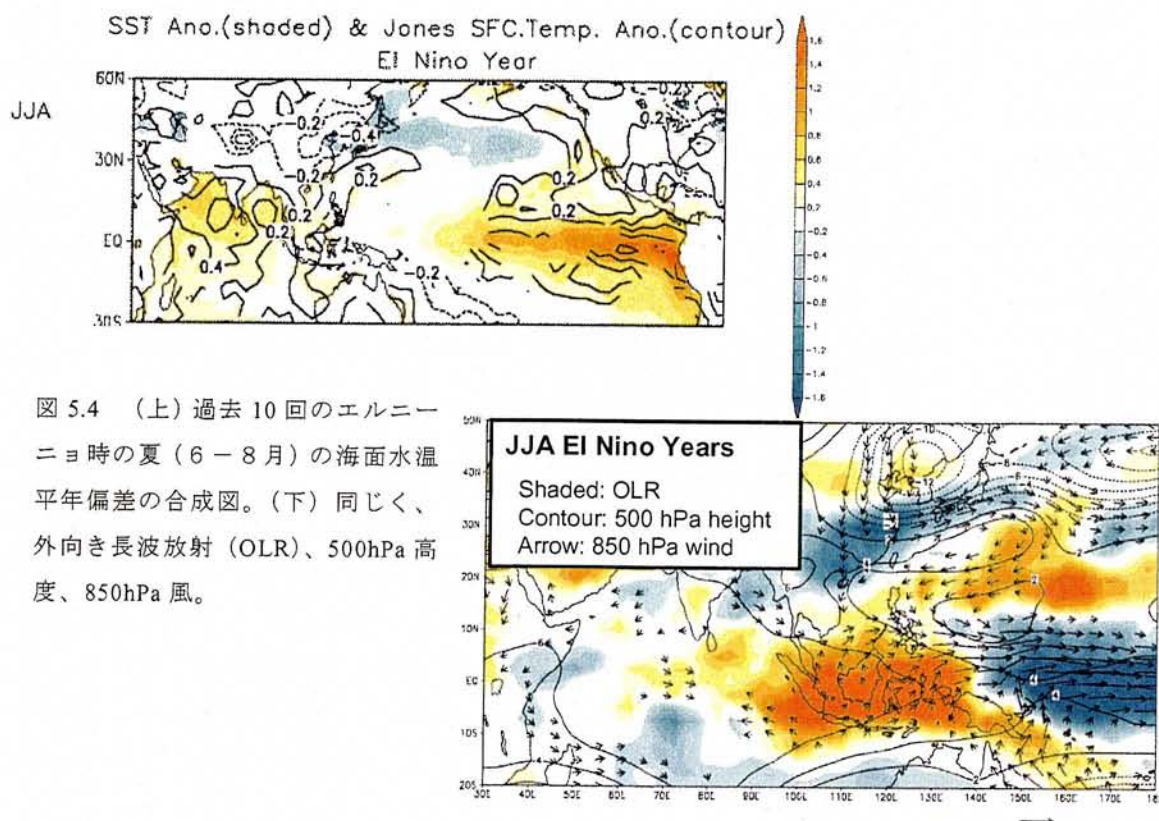


図 5.4 (上) 過去 10 回のエルニーニョ時の夏(6-8月)の海面水温
 年偏差の合成図。(下) 同じく、
 外向き長波放射(OLR)、500hPa 高
 度、850hPa 風。

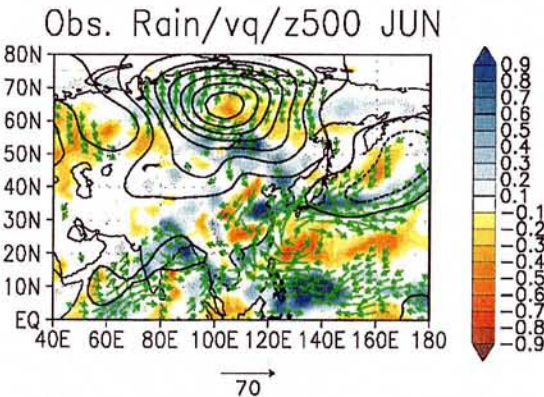
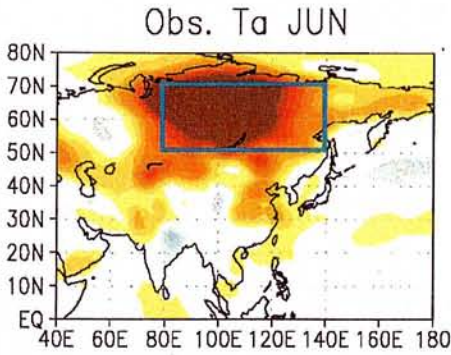


図 5.5 北シベリア東経 80-140°, 北緯 50-70° の範囲 (上図の長方形範囲) における 6 月の地表気温偏差の時系列観測値と、各格子点での地表気温偏差観測値 (上)、および、降水量、850hPa 風、

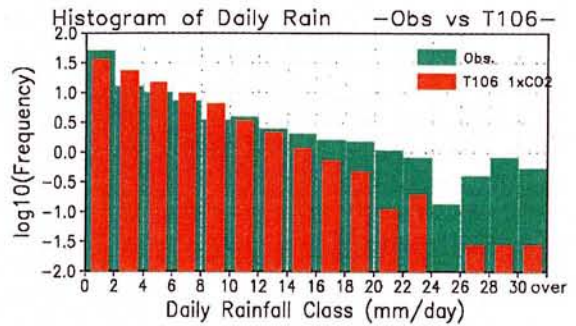
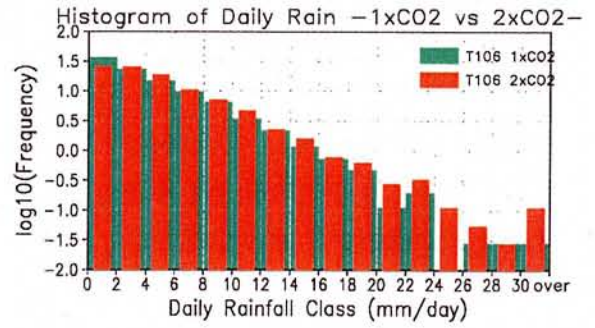


図 5.6 (上) 高解像 (T106) モデルによる東アジア域の東経 120° -140°, 北緯 30° -40° の範囲内の 5° ×5° の格子内での夏季 (6-8 月) 90 日間の日降水量の度数分布。二酸化炭素倍増時 (赤) と現在気候 (青)。(下) 現在気候の頻度分布の T106 モデルと衛星による推定値の比較。

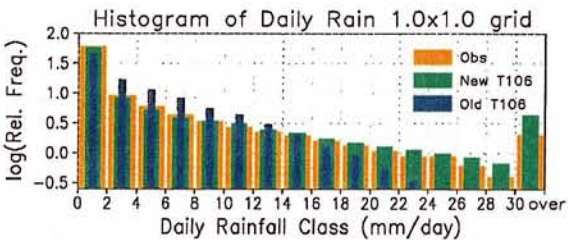
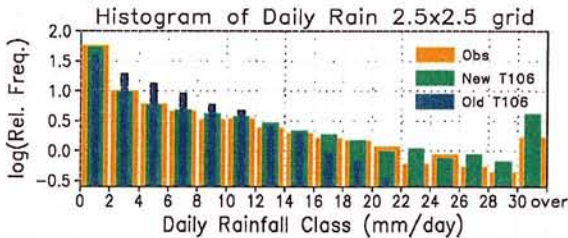


図 5.7 高解像 (T106) モデル (旧バージョン: 青; 新バージョン: 水色) と衛星推定値 (橙) による東アジア域の東経 120° -140°, 北緯 30° -40° の範囲内の夏季 (6-8 月) 90 日間の日降水量の度数分布。(上) 2.5° ×2.5° の格子、(下) 1° ×1° 格子。

6. 結果3：水蒸気の力学的輸送スキームの改良

6.1 研究目的

従来の CCSR/NIES 大気大循環モデルにおいては、基本的な力学の枠組と一致したスペクトル法によって水蒸気の輸送を評価している。スペクトル法は高精度ではあるが、Gibbs 現象と呼ばれる数値的ノイズがあるため、物理的には出るべきでない負の値が出たり、飽和すべきでないところが飽和したりするという問題点がある。そこで格子法に基づき、このような問題が起こらず、かつ高精度で効率的なスキームを開発し、大気大循環モデルの水蒸気輸送に適用した。

6.2 フラックス形式セミ-ラグランジアン (FFSL) 法の適用

スペクトル法に代わる輸送スキームとして主に用いられている方法は semi-Lagrange 法である。この方法は、滑らかでない物質の表現に優れ負の値が出ない、単調性を満たし輸送によって新たな極値をもたらさない、極の取り扱いが容易等の長所を持つが、保存性を満たさないという欠点がある。一方、フラックス形式の格子法は保存性を満たし、単調性を保つことも可能だが、極付近での計算条件を満たすことが難しい。さらにスペクトルモデルに適用する際には、モデル本体と格子輸送とで連続方程式の離散化表現が一致せず、単調性と保存性の両立が困難である。

今回用いた方法は、このフラックス形式の格子法であるが、極の問題に関しては flux-form semi-Lagrange 法 (FFSL 法: Lin and Rood, 1996¹⁾) を用いることで、また質量連続の式の不一致に関してはスペクトル法での質量収束から水平・鉛直流を格子上で再構成することによって解決した。

大気モデルへの適用は以下の手順で行った。

1. スペクトル法で、水蒸気以外の量 ($P_s(t+\Delta t)$, $v(t+\Delta t)$ など) を予報する。
2. 球面調和関数展開により、 $(t-\Delta t)$ と $(t+\Delta t)$ の平均の v を用いて (semi-implicit leap-flog に合わせ)、

$$\frac{\partial P_s}{\partial t} = -\frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial P_s u}{\partial \lambda} - \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial P_s v \cos \varphi}{\partial \varphi} - P_s \frac{\partial \sigma}{\partial \sigma}$$

の右辺第1項 C_x および第2項 C_y を評価する。

3. C_x , C_y と $\partial P_s / \partial t$ から、格子上での数値差分に対応した積分により格子上 (C-grid) での $P_s v$, σ を求める。
4. $P_s q$ の輸送式を格子上で離散化し、leap-flog 法で時間積分し、 $P_s(t+\Delta t)$ で割って $q(t+\Delta t)$ を求める。

$$\frac{\partial P_s q}{\partial t} = -\frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial P_s u q}{\partial \lambda} - \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial P_s v q \cos \varphi}{\partial \varphi} - P_s \frac{\partial \sigma q}{\partial \sigma}$$

フラックス ($F_x = P_s u q$ など) の計算には、van Leer 法, PPM 法, FCT 法などを用いることができる。

極付近で、CFL 数 $C = 2 \Delta t u / \Delta x$ が 1 を越えるところでは、 $C = I + \hat{C}$ (I : 整数, $-0.5 \leq \hat{C} < 0.5$)

のように整数部と小数部に分け、

$$F_{x,i-\frac{1}{2}} = \hat{F}_{x,i-\frac{1}{2}} + \sum_{i'=i-1}^{i-1} q_{i'} P_s \frac{\Delta x}{2\Delta t}$$

などと FFSL 法を適用する (\hat{F} は、 \hat{C} に対応するフラックス、上記は $D>0$ の場合)。

6.3 結果と考察

大循環モデル (CCSR/NIES AGCM T21L11) を用い、水蒸気輸送に FFSL 格子法を適用した結果 (FFSL) とスペクトル法を用いた結果 (SPCT) とを比較した。水蒸気・降水量・積雪量などの結果に定性的に大きな差はないが、定量的な相違として大陸内陸部のいくつかの地域で FFSL の降水量が SPCT に比べて少ないことがあげられる。また、冬季のシベリア付近の積雪量が多くなるのも顕著である。したがって、大陸スケールの水循環の評価において適切な水蒸気スキームの適用が重要であることを示している。

今後の改良の方向として以下の点が挙げられる。

- (1) 単純な移流計算テストを行うと、極を越える流れにおいて変形が強い。極に最近接の格子点における取り扱いの改良が必要である。
- (2) スペクトル系での連続の方程式と格子系での連続の方程式を離散系で完全に一致させることができないため、保存性、もしくは一定値が一定値のまま留まる性質のどちらかは、完全には満たすことができない。その原因の一部は、スペクトル系での地表気圧の予報に semi-implicit 法を使っている点を正確に考慮していないことにある可能性が高い。より詳しく検討することにより、保存性と一定値の保証との両立の可能性を探る必要がある。
- (3) 格子差分法として 4 次の van-Leer 法を採用したが、より精度の高い方法の利用を検討する。特に鉛直差分の精度について検討する。
- (4) コードを改良し計算効率を上げる。

7. 結果 4 : 大気海洋結合モデルの高精度化

7.1 はじめに

前節でも述べたように、地球温暖化等のシミュレーションに現在用いられている大気海洋結合気候モデルは、解像度をはじめ、物理過程等もまだ不十分な点が多い。ここでは、結合モデルの高精度化を目的とした開発研究を行っている。本年度は、これまでの水平解像度大気約 600 km、海洋約 300 km のモデルを大気約 290 km、海洋は可変格子を用いて緯度方向約 100 km (赤道域では最小約 60 km)、経度方向約 150 km にグレードアップし、さらに、物理過程等にも大幅な改良を施して、現実的な現在気候の再現のために必要とされてきた大気海洋間の熱、水フラックス交換量の人為的調整 (フラックス修正) を廃した新バージョンの開発経過を報告する。

7.2 モデル

大気、海洋モデルとも並列計算対応しており、大気は、CCSR/NIES 大気大循環モデル (AGCM) バージョン 5.6、海洋は CCSR Ocean Component Model (COCO) を用いる。大気モデルは、雲・降水過程を中心に再調整を行い、海洋モデルは、移流スキームや混合層スキームを中心に改良が施された。なお、海洋モデルでは、現在は上端で剛体壁を仮定しているが、海水位可変版もテスト中である。

海洋を約 300 年スピナップした後、同じくスピナップした大気と結合して 99 年間積分を行ったが、積分途上で各種のパラメータ調整を行っているため、ここではパラメータが固定された 51 年目から 90 年目までの 40 年間の平均気候についての結果を示す。

7.3 結果

図 7.1 は、計算された年平均海面水温気候値の観測値との差を示す。上段は新モデル、下段は低解像度 ($\sim 600 \text{ km}$ 大気 $+2^\circ \times 2.5^\circ$; 海氷モデルを含まず、緯度 60° 以上では海面水温を観測気候値に緩和) の旧バージョンである。新モデルでは、観測値との差が大陸西岸や北大西洋の一部を除く広い領域でおおむね 2°C 以下に収まり、結合系の代表的変数である海面水温再現の精度が格段に高まっていることがわかる。降水、海水温のみならず、モンスーン等各種季節変動についても良好な再現結果が得られている (図略)。

夏季モンスーン域の水循環の年々変動は、海洋と結合しない、観測される海面水温を与えた大気モデルにおいても現実的な再現は容易でない。ここでは、対流圏 ($1000\sim 100 \text{ hPa}$)

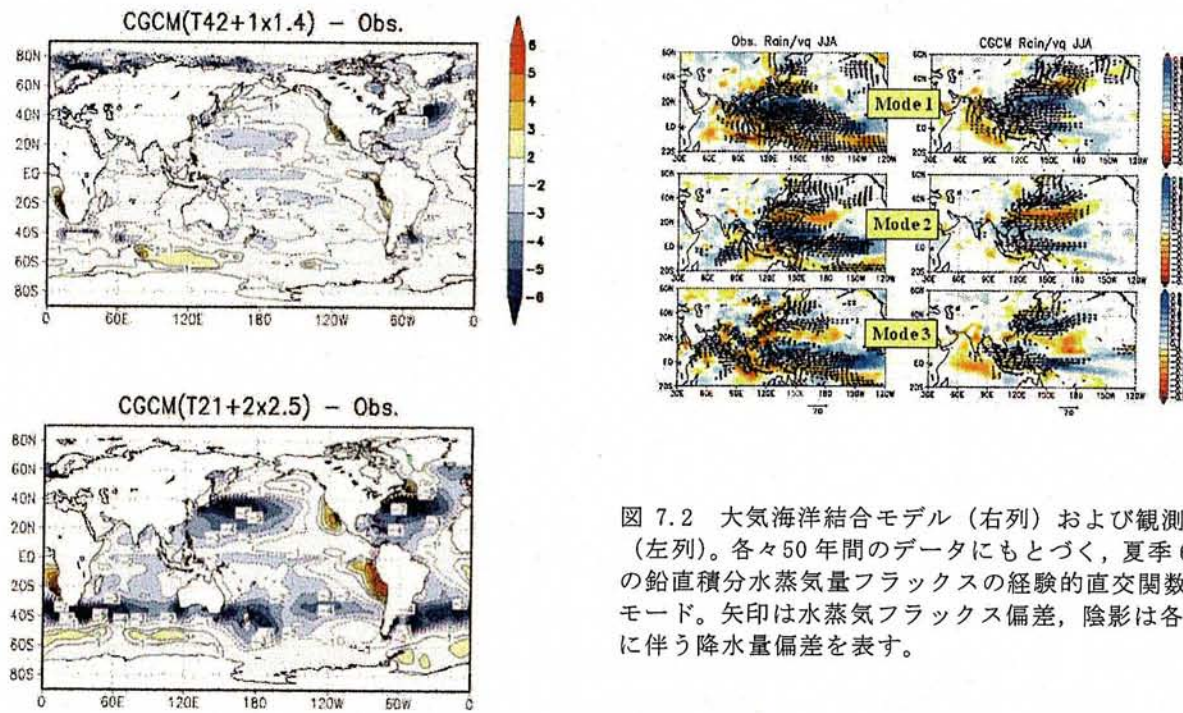


図 7.2 大気海洋結合モデル (右列) および観測データ (左列)。各々 50 年間のデータにもとづく、夏季 6-8 月の鉛直積分水蒸気量フラックスの経験的直交関数上位 3 モード。矢印は水蒸気フラックス偏差、陰影は各モードに伴う降水量偏差を表す。

図 7.1 大気海洋結合モデルによって再現された年平均海面水温の観測値との差。(上) 新バージョン、(下) 旧バージョン。

で鉛直積分した夏季 6-8 月の水蒸気輸送ベクトルの年々変動の主要変動モードを結合モデルと観測値で比較する。図 7.2 は、モデル、観測それぞれ 50 年間のデータからもとめた

経験的直交関数 (EOF) の第 1-3 モードを比較したものである。第 1 モードは前節でも触れた日本の南海上の沈降場～高気圧性循環偏差を表すもので (図では南海上が低気圧偏差になっているが、EOF 解析では正負両符号が同等に出現することが仮定されている)、東北日本とその東海上では逆符号の循環となっており、観測、モデルとも東アジア域における南北双極子様の偏差の卓越を示している。第 2、第 3 モードはこの南北双極子の微妙な位相とスケールの変化を表現するものと見ることができる。観測される海面水温を与えた大気モデルでも再現の容易でない水蒸気フラックスの変動成分について、結合モデルによってこの程度の観測との類似性が得られたことは心強い。モード形成に関わる大気海洋相互作用等今後解明すべき興味深い課題が満載している。

7.4 考察

気候値、季節変動を中心に新結合モデルの性能には希望が持てる一方、早急に解決すべき課題もある。再現されたエルニーニョの振幅が観測のおよそ半分程度しかないこと、積分が進行するにつれて北大西洋深層循環が弱まる傾向にあることなどである。また、ここでは触れられなかったが、雲-放射等の物理過程に対する温暖化時の気候感度依存性についてより詳しい解析をすすめる必要がある。

8. 結果 5 : TRMM 衛星観測データによる降水特性の解析および大気大循環モデルの降水特性の検討

8.1 研究目的

降水は潜熱解放によって大気を加熱する。すなわち、大気最下層にある水蒸気の潜熱として蓄えられているエネルギーを大気上層に運んで解放する。大気はこの加熱によって大循環の運動エネルギーを得ている。降水は対流性降雨 (以下対流雨) と層状性降雨 (層状雨) との 2 種類に大きく分けられる。そしてこの 2 種の降雨による非断熱加熱は全く異なる鉛直分布をもっている (例 Houze, 1982⁷⁾)。大気のどの高さが加熱されるかということとはどのような循環を励起するかということに大きな影響を与えるため、この 2 種の降雨を区別して定量化することは、大気循環をシミュレートするための知識としてたいへん重要である。

最近まで対流雨と層状雨とを衛星から全球的に区別して観測することはできなかった。1997 年 12 月に打ち上げられた TRMM (熱帯降雨観測計画) 衛星搭載の PR (降雨レーダー) 観測により、熱帯域のあらゆる地域における降雨強度の鉛直プロファイルが得られるようになり、これを利用した対流性降雨と層状性降雨との分離が可能になった。本研究では TRMM PR2A25 Version 5 の 2 年分のデータを利用し、赤道近傍域の海洋上、陸上の降雨特性の平均的描像を解析した。さらにこれを用いて気候モデルの中の大気大循環モデルにおける降雨特性の検討を行った。

8.2 データと実験

TRMM 衛星データの解析には、PR2a25 と呼ばれる衛星軌道上の降雨レーダー分解能のまま物理量 (降雨率) に変換されたデータを用いた。1998 年～1999 年の衛星直下データ全てについて、

10N-10S の緯度帯において統計を行った。対流性／層状性降雨の分類は、TRMM PR2A23 アルゴリズム (Awaka et al. 1998⁸⁾ : プライトバンドの存在・および降雨強度と水平偏差を基準とした判定) によるフラグに基づいた。

比較する大気大循環モデルデータには、1979-1995 年の海面水温データを与えて約 2.8 度緯経度の空間分解能で行った実験の出力を用いた。これは世界の大気大循環モデルの比較検討プロジェクト (AMIP2) に対応して行われた実験の結果である。

8.3 結果と考察

降雨の日変化については、これまでに多くの研究があり、海上と陸上での日変化特性の違いについても基本的な概念図は描かれている。しかしながら、これまでの研究は、地上 (海上) 降雨レーダー観測による時間的・空間的に限られたデータに基づくものであるか、もしくは、衛星からの赤外放射観測データによる雲情報からの推定値に基づくものであるかのいずれかであった。したがって、海上・陸上の広域にわたり対流雨・層状雨を区別した降雨データというものは TRMM 以前には存在しなかった。そこで時空間的に広範な鉛直降雨観測を可能にした TRMM 衛星データを利用して統計的に十分に有意な数のサンプルを使い、海上と陸上における日変化の平均的・定量的な統計解析を行った。

図:8.1(上)に、海上・陸上・全体の対流雨と層状雨についての日変化を 3 時間毎の平均値で求めたものを示す。海上と陸上とは、日変化特性が顕著に異なる。海上では、ピークは 03-06LT、極小値は対流雨が 15-18LT、層状雨が 18-21LT にあり、層状雨が対流雨に若干遅れる傾向は見られるが、対流雨と層状雨がほぼ同量でほぼ同位相の日変化をしている。海洋上では対流と層状性のアンビルとが共存する大規模に組織化されたシステムによる降雨の割合が高く、対流雨・層状雨のほぼ同位相の日変化は、この組織化された降雨がシステムとして日変化をしていることを表しているものと解釈できる。

これに対し陸上では、対流雨と層状雨の日変化が大変異なっている。対流雨は 09-12LT に最小値をとり、15-18LT のピークに向かって急速に立上り、大きな午後の山を形成している。その平均降雨量はそれぞれ 0.06mm/h と 0.25mm/h である。一方、層状雨は、09-12LT の最小値は対流雨と共通であるが、午後のピークは存在せず、最大値を 00-03LT の真夜中にとる日変化を示す。つまり午後の対流活動のピーク (夕立ち) は、対流と組織化したアンビル活動をあまり伴っていないことが示唆される。そして、層状雨が深夜にピークを持つのは夕立ちとは別の特性を持つ降水活動によるものと考えられる。

図 8.1 下図は、降雨ピクセルのみの条件付き平均降雨強度の日変化である。この図は雨が降っている場合の平均強度という条件付きなので、対流雨が層状雨の数倍の値を示している。海陸を比較すると、層状雨は陸上やや強いものの、ほぼ同じ 2mm/h 程度の強度であるのに対し、対流雨は、海上では 7mm/h 程度・陸上では 11mm/h 程度であり、層状雨との強度比は海上が 3.6 倍・陸上は 5.1 倍と陸上の対流雨の方が顕著に強い。大変興味深いのは、降雨量で大きなピークを示す午後の夕立ちの雨は、降雨強度では特に強くはなく、むしろ対流雨の中では平均的な値を持ち、強度の最大値はより夜間の 21-24LT の時間帯に見られることである。つまり、

陸上の夕立は頻度が高いために総雨量への貢献が大きいですが、陸上のもっとも強い雨は夜間に観測され、その時刻には層状雨も卓越することがわかる。

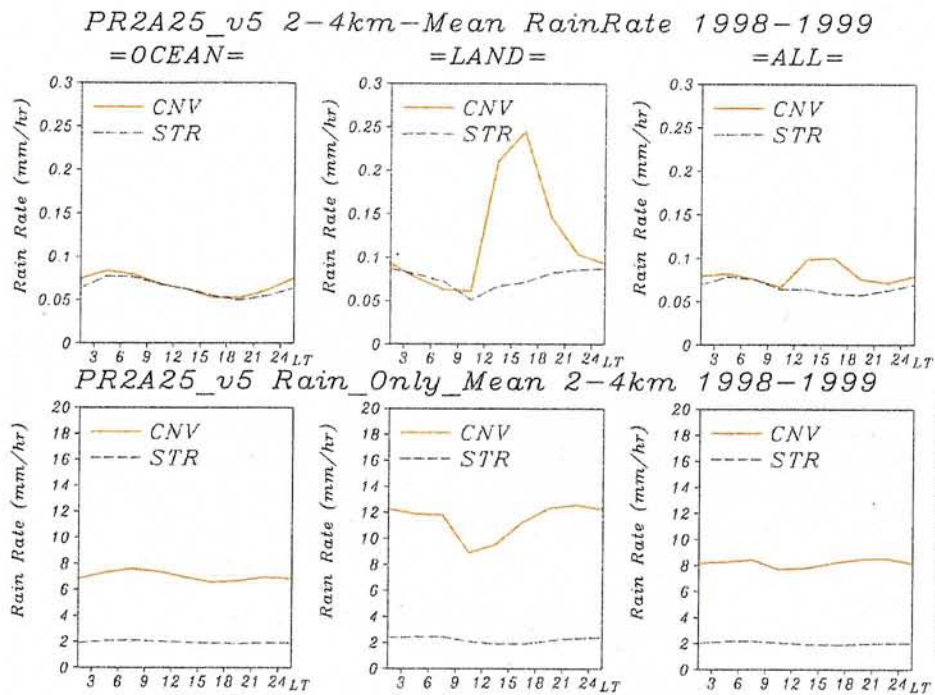


図 8.1 : 対流雨(実線)・層状雨(破線)別の降雨率の平均日変化。下の図は降雨がゼロでないピクセルのみによる平均降雨強度の日変化。

衛星直下の 3km 高度における平均降雨および対流雨/層状雨比に関する統計結果を表 8.1 に示す。海上と陸上とでは、対流雨/層状雨比が顕著に異なり、海上ではほぼ半々の 52:48 であるのに対し、陸上では 63%が対流雨で降っていることが明らかになった。つまり、海上では対流雨と層状雨が降雨量にほぼ同程度貢献しているのに対し、陸上では対流雨の貢献が大きい。

表 8.1 PR2A25 Nadir Statistics at 3km for 1998-1999

	海上	陸上	全体
平均総降水率 (mm/h)	0.14	0.21	0.16
対流雨:層状雨 比率 (%) 降雨量	52:48	63:37	56:44
対流雨:層状雨 比率 (%) 面積	23:77	25:75	23:77

観測データを用いた現象解析と比較しながら、海面水温データを与えた大気大循環モデルシミュレーションの出力を降水過程に焦点を当てて解析すると、さまざまな現実との相違が現れる。例えば、図 8.2 からは、総降雨量に対する対流雨の割合が、モデルと現実とで大きく異なることがわかる。上記の解析でも示したように、TRMM の観測結果によると赤道域海上では平均的

に対流雨と層状雨の割合がほぼ半々であるのに対し、モデル出力では対流雨が 60-80%を占めている。さらに、陸上では 63:37 で対流雨が卓越するという観測結果に対し、モデル出力は陸上でむしろ海上よりも対流雨の割合が少ない。

最近まで対流雨・層状雨を直接観測するデータが得られなかったため、このような視点での比較はできなかった。対流雨と層状雨の割合は大気加熱の鉛直構造を通して大気循環に大きく影響するため、モデルにおける正確な表現はたいへん重要であると考えられる。

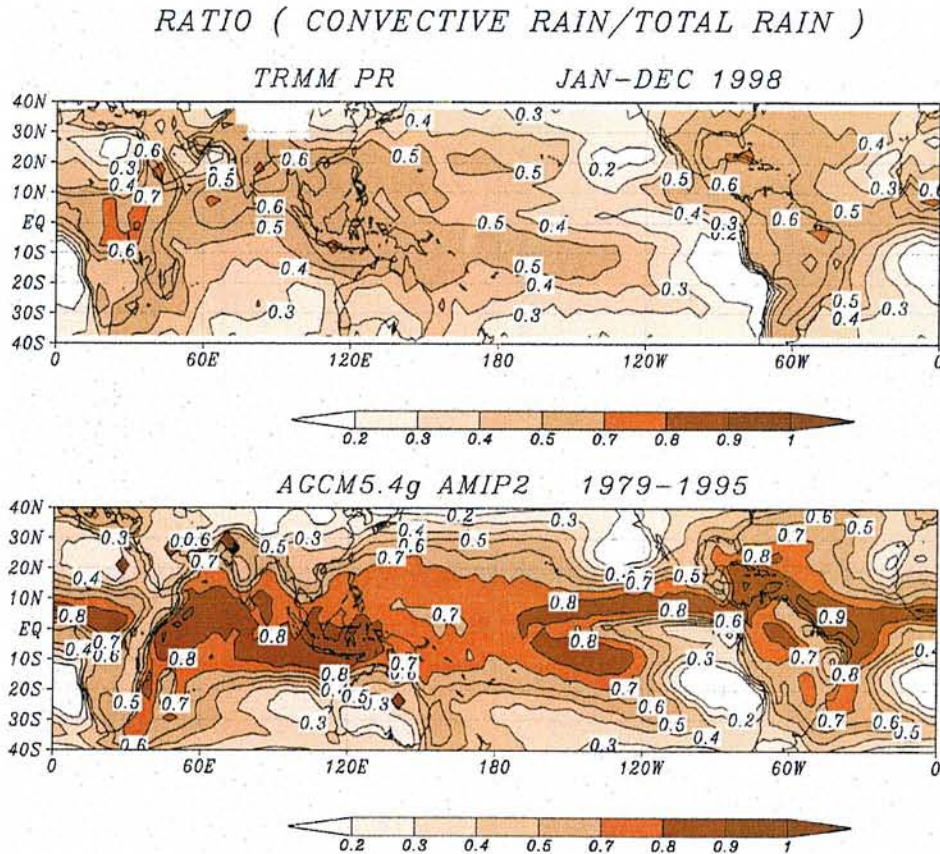


図 8.2 総降水量に対する対流雨の割合の比較。(上)TRMM PR データによる 1998 年平均値、(下)モデル実験結果の平均値(AMIP2 実験)。

9. 結果 6 : 南アジアモンスーン降水量の経年変化機構についての解析 ——東西風鉛直シアがモンスーン低気圧活動に及ぼす効果——

9.1 背景

南アジアモンスーンの経年変化とエルニーニョ現象との間に高い相関があることが、過去の研究において注目を集めた (Shukla and Paolino 1983⁹⁾, Meehl 1987¹⁰⁾, Ju and Slingo 1995¹¹⁾, Shen and Kimoto 1999¹²⁾, Yanai and Liu 2000¹³⁾他)。しかし、エルニーニョ現象とモンスーン降雨との相互相関をもたらす要因は必ずしも明らかでなく、ENSO がモンスーンに影響する

という説とモンスーンが ENSO に影響するという説とがある。また、この相関は 10 年スケールの長周期で変動しているという近年の指摘もある(安成 1999¹⁴⁾; Kumar et al. 1999¹⁵⁾)。

一方、観測研究からモンスーン降雨は主にモンスーン低気圧によってもたらされると言われている(Krishnamurti et al. 1975¹⁶⁾)。モンスーン低気圧は湿潤過程を含む東風シア中の傾圧不安定であるという理論研究(Moorti and Arakawa 1985¹⁷⁾) およびそれを支持する解析研究(Saha and Chang 1985¹⁸⁾)がある。本研究では、モンスーン低気圧の活動度を季節変化、経年変化、季節内変動という様々な自然変動の切り口から解析することにより、モンスーン降雨量の経年変化機構の理解を試みた。

9.2 研究手法

解析に使用したデータは、NOAA の OLR (外向き長波放射) および気象衛星「ひまわり」の赤外相当黒体放射データを積雲対流活動の指標として利用し、ECMWF (欧州中期気象予報センター) の客観解析データを大気擾乱および循環場の解析に用いた。解析期間は 1980-1999 年の 20 年間である。

ポテンシャル渦度の南北勾配を用いた傾圧不安定性の解析により、モンスーン低気圧の活動度と環境場との関係を調べた。第 1 にモンスーンの季節変化、第 2 にエルニーニョ南方振動との関係、第 3 にモンスーン季節内振動について調べた。エルニーニョ年として 1982, 1987, 1991, 1997 年を、ラニーニャ(傾向)年として 1983, 1988, 1995, 1998 年を用いた。

9.3 結果と考察

まず南アジアモンスーン域の積雲対流活動の卓越周期を OLR の時間スペクトル解析により調べた(図 9.1)。モンスーン最盛期の 7-9 月には、エルニーニョ年・ラニーニャ年に拘らず、7-10 日周期にパワーの顕著なピークがあり、モンスーン低気圧活動の卓越が確認できた。しかしながら、モンスーン明けの 10-11 月になると、7-10 日のモンスーン低気圧活動が、ラニーニャ年には持続しているのに対し、エルニーニョ年には消滅していることがわかった。つまり、エルニーニョは通常 12-1 月ころにピークを持つが、そのピークの前の夏のモンスーンにおいては、モンスーン低気圧の活動が早い時期に終息することが示された。

このエルニーニョとアジアモンスーンの関係を理解するためには、モンスーン降雨がいかなる条件で活発化するかを調べる必要がある。その第一ステップとして季節変化を調べた。図 9.2 は、南アジアモンスーンの経度域での 15 年平均東西風(影)と上昇流(等値線)の緯度-高度断面である。モンスーン最盛期の 6-9 月には、北緯 10-20 度帯で上層ほど東風の強い(東風シア)状態が卓越し、活発な対流活動を示す上昇流が観測される。基本的に南アジアモンスーンの雨季は、発達に有利な東風シアの中でモンスーン低気圧が活発な季節であるといえる。傾圧不安定の条件は、ポテンシャル渦度の南北勾配(式 1)が 3 次元領域内で符号を変えることである。この値の 15 年平均季節変化を描いたのが図 9.3 である。等値線は OLR の小さい、すなわち、積雲対流の活発な領域を示す。ここには対流圏下層の値がプロットしてあるが、対流活発域に当たる緯度と期間に傾圧成分が上層(図略)と符号逆転を起しており、確かに東風シアによる傾圧不安定がモンスーンの降水活動と対応していた。

$$\frac{\partial}{\partial y}(\text{Potential Vorticity}) = \beta - \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} - \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{f_0^2}{\sigma} \frac{\partial \bar{u}}{\partial p} \right) \quad (1)$$

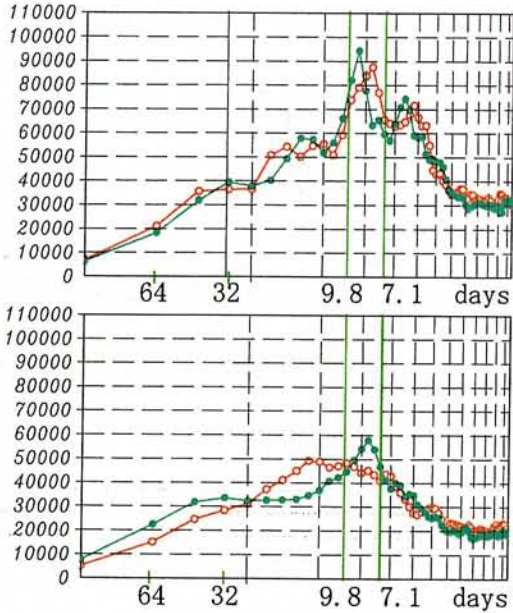


図 9.1: エルニーニョ年(黒丸)、ラニーニャ年(白丸)における雲活動データのスペクトルパワー分布。上: 7-9月平均、下: 10-11月平均

ERA U & Omega < 0 70E-100E 1979-93mean

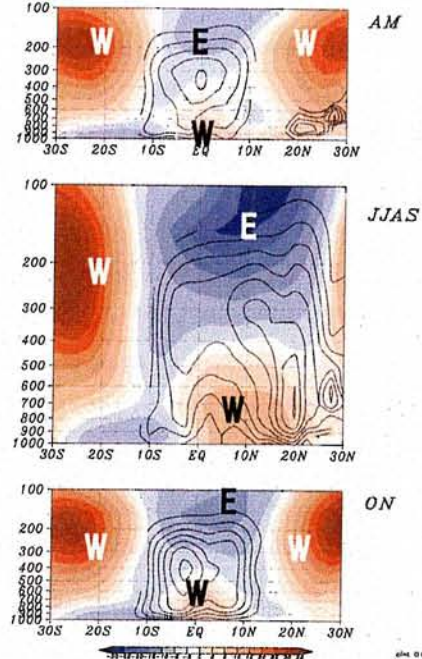


図 9.2: 南アジアモンスーン域(70-100E)の15年平均東西風の南北鉛直分布(影)と上昇流(等値線)分布。W:西風、E:東風。

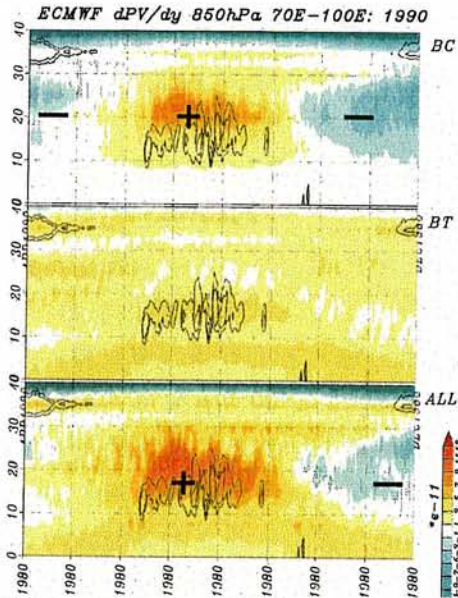


図 9.3: 1979-1993年平均の850hPa面でのポテンシャル渦度南北勾配(式1)の傾圧成分(上)、順圧成分(中)およびトータル値(下)。

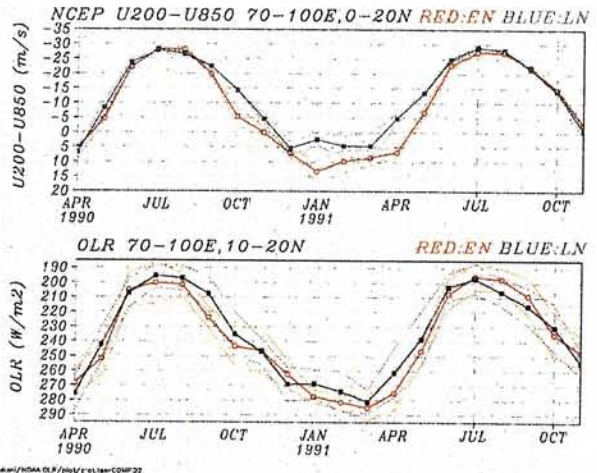


図 9.4: NCEP 客観解析データによる南アジアモンスーン域の東西風シア(上図: 70-100E, 0-20N 平均)および雲活動データ(OLR)(下図: 70-100E, 10-20N 平均)の時系列。エルニーニョ年を白丸、ラニーニャ年を黒丸で表示してある。エルニーニョの最盛期の1月が中心にくるように描かれている。

次に、エルニーニョ年とラニーニャ年との東風シアの季節変化を比較したのが図 9.4 であ

る。12月周辺をピークにもつエルニーニョの季節依存に伴い、南アジアモンスーン域の東西風鉛直シアも、12月周辺を中心に差が有意である。先行する夏のモンスーンの終息期と翌年のモンスーンの発生期において、ラニーニャ年の方がエルニーニョ年よりも東風シアが強い。このことは、図9.1において、エルニーニョ年とラニーニャ年のモンスーン低気圧擾乱の活動度の差異が主にモンスーン明けの季節に顕著であったことと整合的である。

図9.5の影は、北緯0-20度平均の東西風シアの経度-時間断面図であり、左がエルニーニョ年平均、右がラニーニャ年平均である。等値線は各年の低OLR値を対流の指標として重ねたものである。70E-100Eの南アジアモンスーン域に注目すると、6-9月のモンスーン期を中心として、影で示した東風シアの卓越と同期して総観規模擾乱が西進するという関係が見られる。10-11月には、ラニーニャ年にはこの関係が持続するが、エルニーニョ年には消滅している。

エルニーニョ年には、ウォーカー循環の季節的東進が早まることが報告されており(Meehl 1987¹⁰)、これが南アジアモンスーン域における東風シアの早い消滅をもたらす。このシアの変化が傾圧不安定性の変化を通じてモンスーン低気圧の活動の早い終息をもたらすと考えられる。このことは、前述の季節変化における傾圧不安定域と対流活動との対応と整合的である。

最後にモンスーンの降水活動に観測されている季節内(数十日)変動について、同様に傾圧不安定性との関係を調べた。解析の詳述は他に譲るが、図9.6は、例として1988年のポテンシャル渦度南北勾配を図9.3と同様にプロットした。この年にはモンスーン期の対流活動に数十日周期の規則的な北進が見られるが、これが傾圧不安定領域の北進とよく一致していることが確かめられた。

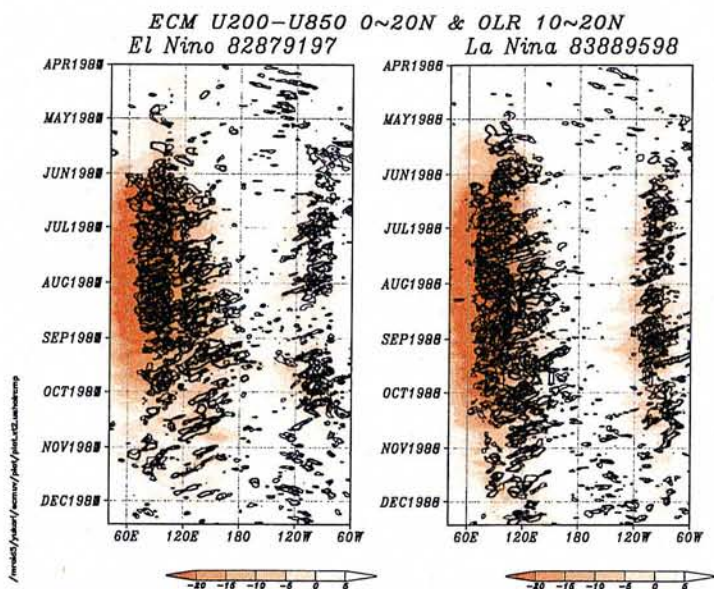


図9.5: ECMWF データによる 0-20N の平均東西風シア (U200-U850,影) と各年の雲データ (OLR) の 195K,175K 等値線。左図はエルニーニョ年、右図はラニーニャ年。

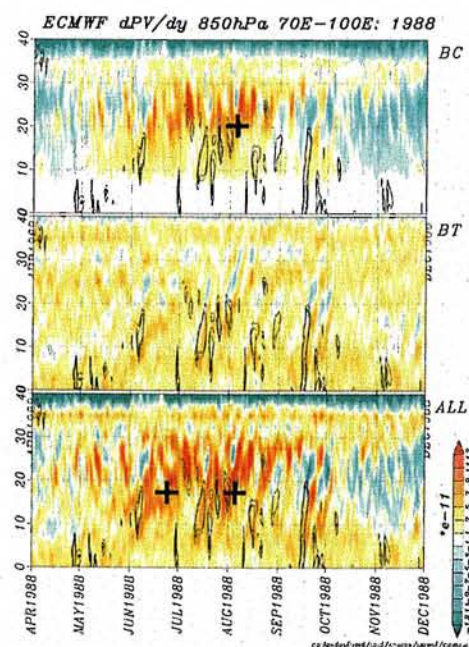


図9.6: 図9.3に同じ。ただし、1988年。

9.4 考察

このように、モンスーン降雨活動の季節変化・季節内変動・経年変化は、湿潤過程を伴う傾圧不安定を介して環境場の東西風シアに支配されていると統一的に理解することができる。エルニーニョと南アジアモンスーンとの関係は、エルニーニョによりウォーカー循環の下降域がモンスーン降雨活動を抑制すると解説されているが、モンスーン擾乱の活動度がシアに影響されるという理解により、冬にピークを持つエルニーニョがそのピーク前後の夏のモンスーンにいかなる影響をもつかをより物理的に解釈することができるようになった。

10. 結果7：熱帯季節内振動に伴う組織化した積雲対流に対する大規模大気成層構造の効果についての解析

10.1 はじめに

現在の気候モデルにおいても熱帯の移動性の対流活動擾乱はあまり適切に再現されていない。中でも熱帯の数十日スケール変動である季節内振動 (Madden-Julian Oscillation 以下 MJ0 と記す; Madden and Julian, 1971¹⁹⁾; 1972²⁰⁾) は、アジアモンスーンやオーストラリアモンスーンオンセットのタイミングに影響を与えたり、エルニーニョの発達を促進したりと、より長期スケールの気候変動に作用するため、最近では気候モデルの中での再現が必要と考えられているが、現実的な MJ0 の再現は数ある気候モデルにおいても成功しているとはいえない。それは、MJ0 の本質でもある対流と大気擾乱との相互作用について数値モデルが正しく表現できていないからであると言える。

MJ0 の特性の理解については理論モデルも完成されていない。初期に考えられたモデルは、下層での水蒸気収束に比例して対流加熱が生成され大気波動を不安定化すると仮定している。これは一般的に wave-CISK (conditional instability of second kind) と呼ばれている (Lindzen, 1974²¹⁾)。しかし、wave-CISK には、いくつかの欠点が指摘されている。一つは、得られる不安定モードの位相速度が観測される値よりもずっと速いこと、もう一つは最も不安定なモードが最小規模になるという問題である。一方、循環による地表面フラックスの増加によるフィードバックが MJ0 の東進機構にとって重要であるということが Emanuel (1987)²²⁾ と Neelin et al (1987)²³⁾ によってほぼ同時に提案され、一般的に WISHE (wind-induced surface heat exchange instability) と呼ばれている。しかし、最近の観測結果は対流の東よりも西で蒸発偏差が大きいことを示しており、WISHE で考えられている構造との不一致が見られる。

このような理論的な研究に対して、最近の観測研究の結果は、MJ0 に伴う対流発達過程をより詳しく理解する必要があることを示唆している。MJ0 に伴う大規模な対流活動のもとでは、対流システムよりずっと東の領域でケルビン波の摩擦収束によって地表付近で収束が起こることが示されており (Hendon and Salby, 1994²⁴⁾)、この収束領域では対流活動に先行した水蒸気の蓄積が見られる (Maloney and Hartmann, 1998²⁵⁾)。深い対流に先行した水蒸気蓄積の重要性は、Kemball-Cook and Weare (2001)²⁶⁾ のゾンデデータを使った研究でも指摘されている。つまり、対流が十分に発達するためには準備段階が必要であることを示唆している。

そこで本研究では、MJO が 6ms^{-1} という比較的ゆっくりとした速度で東進するインド洋から西太平洋の暖水域上において、MJO に伴う積雲対流活動の組織化の様相を高解像度の衛星雲データおよび TOGA COARE 特別集中観測における高層観測データを用いて詳細に記述し、過去に見落とされていた MJO の特性を解明することを目的とする。

10.2 データと解析手法

1992 年 11 月から 1993 年 2 月にかけて行われた TOGA-COARE (熱帯海洋全球大気-大気海洋結合実験) 集中観測期間 (図 10.1) の高層観測データおよび気象衛星「ひまわり」の赤外ヒストグラムデータを用い、コンポジット解析によって熱帯の季節内振動に伴う雲システムの発達段階と大気成層との関係を調べた。

コンポジットには、対流システムの通り道であるウジュン・パダン ($119^{\circ}\text{E}, 5^{\circ}\text{S}$) とクパング ($123^{\circ}\text{E}, 10^{\circ}\text{S}$) の 2 地点のデータを用いた。MJO に伴う雲システムの通過に際し、この 2 地点では同様な対流システムの発達過程が見られ、1) 抑制期, 2) 発達期, 3) 成熟期, 4) 消滅期の 4 段階に分けられた。このように特定した発達段階に着目し、2 地点のデータについてコンポジットを作成した。

10.3 結果

前節で説明した方法で行ったコンポジットの結果を図 10.2 に示す。コンポジットの結果、次の 5 つの段階が顕著となった (図 10.2 左上)。1) 抑制期, 2) 浅い対流期 (2-3 日), 3) 発達期 (3-4 日), 4) 成熟期 (4-5 日), 5) 消滅期。

1) 抑制期では、貿易風逆転層・融解層高度の安定層ともに強く、雲頂高度は 305 K のところに集中している。これは、ほぼ地表を見ているということを表していると考えられる。相対湿度 80%以上の湿潤層は主に 800 hPa までで抑えられているが、相対湿度 50%以上の準湿潤層は融解層高度までみられる。境界層内には弱い収束がある。

2) 境界層内の収束の強まりとともに、浅い対流期へと移行する。この段階でも抑制期と同様に貿易風逆転が強いが、その高さが多少高くなっている。多くの雲の成長は 300 K の高さで抑えられ、発達する雲でも 285 K 付近で抑えられる。この段階は 2-3 日続く。

3) 発達期への移行と貿易風逆転の弱まりは対応している。この段階でもほぼ一定の強い境界層収束が存在した。発達期では 290-300 K の高さで抑えられる積雲と融解層高度で抑えられる雄大積雲が共存している。時間とともに融解層高度まで発達する雲の割合が多くなる。融解層高度の安定層は特にこの段階に見られる訳ではないが、平均的にいつも弱い安定層が存在していることがわかる。また、この段階には散発的に対流圏界面まで達する雲も存在する。一方、相対湿度 80%以上の湿潤層も概ね融解層高度で抑えられるが、散発的に生じる深い対流に対応して、500 hPa 付近で加湿化が起こる。この段階の終盤には深い対流により上層が湿り、対流圏上層の深いアンビル雲が形成され、システムの成熟期へと移行する。また、発達期の終盤から成熟期の初期にかけて、融解層高度には安定層がほとんど見られない。

4) 成熟期には対流が非常に発達し、対流圏界面まで成長する。このとき、下層が透けて見えないことから、上層では水平方向に 100km スケールの規模をもったアンビル雲が形成されていることがわかる。また、準湿潤層も対流圏上層まで成長していた。このとき、相対湿度

の極大は融解層高度に見られた。融解層高度および貿易風逆転は対流システムの発達とともに強まる。対流システムの発達とともに、境界層内では収束から発散へと変化し、対流活動の最盛期に境界層内の発散が最大となる。対流システムが最盛期を迎えた後、急速に衰退し、消滅期へと遷移する。

5) 消滅期では対流圏中層で雲が存在する。境界層内は基本的に発散位相である。また、融解層高度で乾燥化が見られ、湿潤層は対流圏下層、準湿潤層は対流圏上層に存在する。融解層高度の乾燥化に対応して、600 hPa あたりで安定層の強まりが見られる。また、相対湿度の極大は境界層上端付近で見られ、貿易風逆転も比較的にはっきりとしている。

10.4 結論と考察

TOGA COARE 観測以前には、熱帯域では trade inversion、対流圏界面の 2 つの安定層で成長を抑えられる雲が多いと考えられていた (Simpson, 1992²⁷⁾)。しかし、Johnson et al. (1999)²⁸⁾ は TOGA COARE 期間中のレーダーデータを用いて、積雲、積乱雲のほかに雄大積雲も熱帯海上に頻発する雲であることを示した。そして雄大積雲の雲頂である融解層高度には弱い安定層の存在が発見されている (Johnson et al., 1996²⁹⁾)。これら 3 種類の雲は 30-60 日周期で大きく変動する (Johnson et al., 1999²⁸⁾)。さらに、MJO に伴う対流の前に雄大積雲が卓越し、中層を湿潤化することが深い対流の準備段階として重要であることが推測されている (Johnson and Lin, 1997³⁰⁾; Johnson et al., 1999²⁸⁾)。しかし、実際に MJO に伴う対流活動がどのように発達するか、また対流発達と水蒸気蓄積とはどのような関係になっているのかについて高解像度の雲データおよび高層観測データを同時に用いて示した研究はなかった。

本研究では、MJO の境界層収束領域では、上記のような発達過程を経て大規模な対流活動が組織化していく段階を詳細に示した。今回の結果は、対流の発達と安定層の存在が強く関係していることを明瞭にした。また、過去の研究で指摘されている水蒸気蓄積と対流システム発達の位相差は貿易風逆転層、融解層高度準安定層という 2 つの安定層の存在を考慮することによって理解できる可能性があることを示唆した。

この研究結果は、雲降水過程をより正確に表現することを考慮した次世代モデルの開発において、貿易風逆転層はもちろんのこと、雲物理に係る融解層高度の準安定層の再現も重要であることを示唆している。

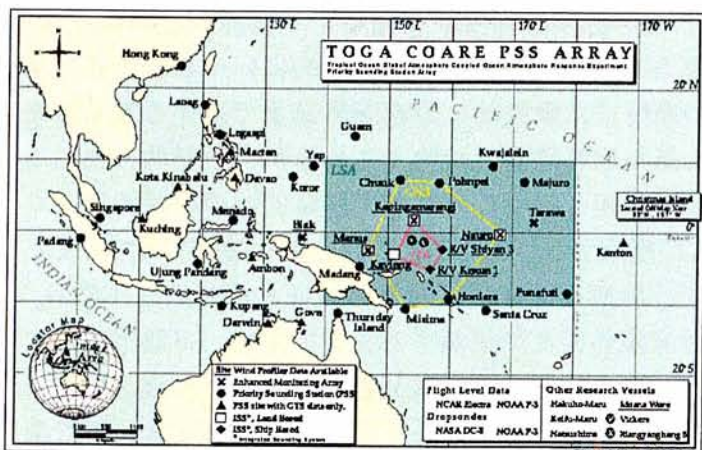


図 10.1. TOGA COARE 領域における上層大気の観測地点。観測地点は主要観測点 (PSS) [黒丸 (高解像度) と黒い三角 (GTS データ)]、ISS 観測点 [白い四角 (陸上)、黒いひし形 (船上)]、EMP 観測点 (黒い x)、風速プロファイラー (名前の下に下線) より成る。

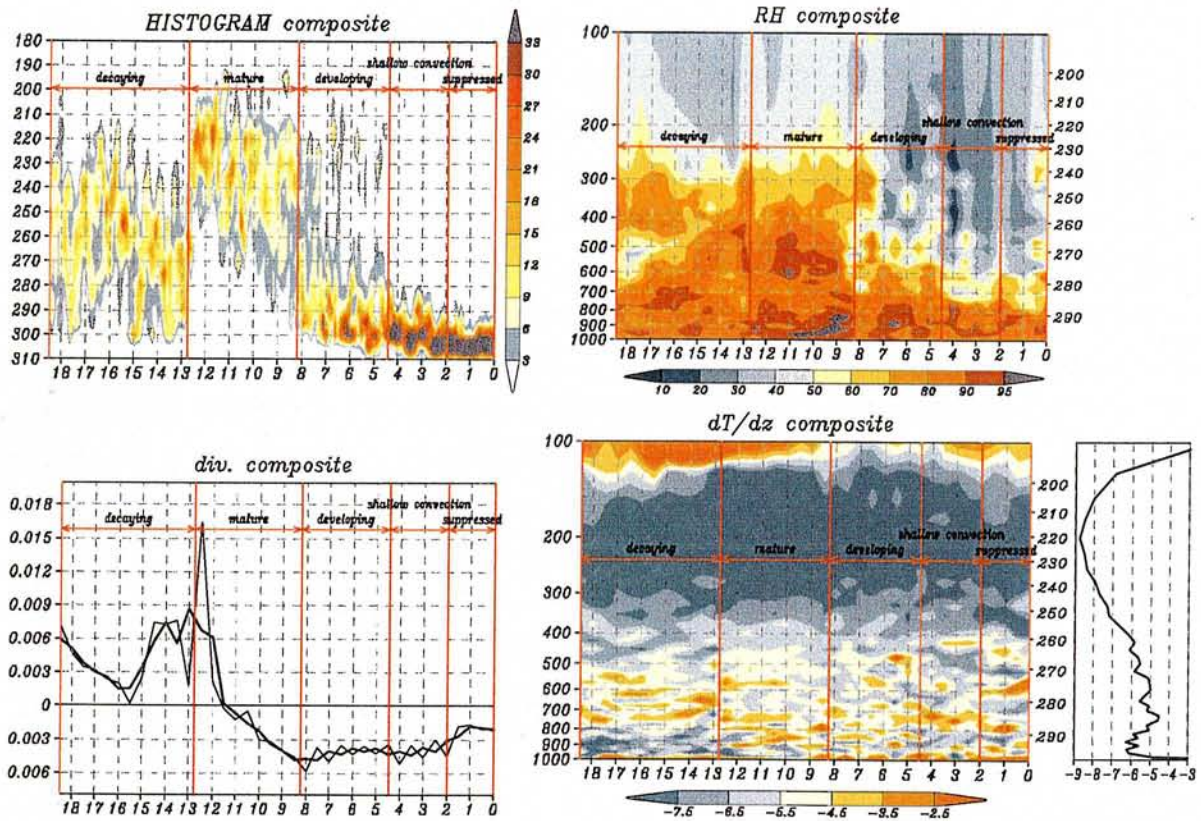


図 10.2 2 地点(Ujung Pandang, Kupang)での対流発達過程の位相に着目して行ったコンポジットの結果。(左上)雲頂高度の頻度分布、(右上)相対湿度。単位は双方とも%。(左下)境界層内(地表から 900 hPa まで)の収束の積分値。単位は $\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。(右下)温度減率および期間平均の温度減率で単位は Kkm^{-1} 。

11. おわりに

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目的として、現実データと共に全球気候モデルにおける水循環過程の特性を解析し気候モデルの改良を図る研究を行った。雲降水過程と気候変化との相互関係の解明に向け大きな3つの目標 ((1)最新のモデルを用いて温暖化に伴う水循環過程の変化の予測を試み、その感度を調べる。(2)着手可能な部分についてモデルの高度化を行う。(3)最新の観測データや長期データを用い、次世代モデルの精密化に向けて詳細な現象解明を行う。)を掲げてこの問題に取り組んだ。

それぞれにおいて、主な結論を以下にまとめる。(1)温暖化に伴う水循環過程の変化には、地域性がある。温暖化に伴う積雪量の増加・減少には、降水のうちの降雪の割合の変化および融雪率の変化が重要であり、温暖化に伴うこれらの値の変化が平均気温や気温変化の標準偏差に依存するため、積雪量変化の地域差がもたらされていると考察される。高解像度大気モデル

によるタイムスライス実験によって温暖化時の梅雨に伴う降水強化の可能性が示され、その要因としてエルニーニョ型の海水温変化と高緯度大陸での昇温が示唆された。温暖化時の海水温変化パターンは結合モデルの予測結果に大いに依存する。世界の多くのモデルでエルニーニョ型の海水温変化が予測されてはいるもののその程度やパターンには大きなばらつきがある。予測の信頼度向上には、例えばさまざまなモデルによる海面水温予測結果を用いた高解像大気モデルによるタイムスライスアンサンブル実験等が有効であろう。また、モデルの降水頻度分布の予測結果の信頼性向上にはモデルの解像度とともに物理過程の精度向上が不可欠であることが示された。(2) 気候モデルにおける水蒸気の力学的輸送スキームを改良した。また、大気海洋結合過程の人為的調節(フラックス調節)をはずした新バージョンの開発を行い、大気海洋結合モデルを高精度化した。(3) TRMM 衛星観測データ解析により、次世代モデルの物理過程の精度向上のために再現すべき降水特性の定量化を行った。また、降雨をもたらす移動性短周期擾乱の再現が、アジアモンスーンなどの領域気候の予測に重要であることを示した。さらに、気象衛星データと高層観測データとの詳細解析から、移動性の大規模積雲対流システムの再現には、大気成層の精密な再現が必要であることを示した。

今後、次世代の高精度気候モデルに向けて、降水量データ等を利用した現実大気の降水特性解析およびその結果を利用した数値実験の降水過程の検討をさらに進める必要がある。

12. 引用文献

- 1) Lin S.-J. and R. B. Rood, 1996: Multidimensional flux-form semi-Lagrangian transport schemes. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 2046-2070.
- 2) Groisman et al., 1994a: Changes of snow cover, temperature, and the radiative heat balance over the Northern Hemisphere. *J. Climate*, **7**, 1633-1656.
- 3) Groisman et al., 1994b: Observed impact of snow cover on the heat balance and rise of continental spring temperatures. *Science*, **263**, 198-200.
- 4) Groisman, P. Ya and D. R. Easterling, 1994: Variability and trends of precipitation and snowfall over the United States and Canada. *J. Climate*, **7**, 184-205.
- 5) Karl et al., 1993a: A new perspective on recent global warming: Asymmetric trends of daily maximum and minimum temperature. *Bull. Am. Met. Soc.*, **74**, 1007-1023.
- 6) Emori, S., T. Nozawa, A. Abe-Ouchi, A. Numaguti, M. Kimoto, and T. Nakajima, 1999: Coupled ocean-atmosphere model experiments of future climate change with an explicit treatment of sulfate aerosol scattering. *J. Meteor. Soc. Japan*, **77**, 1299-1307.
- 7) Houze R. A., Jr., 1982: Cloud clusters and large-scale vertical motions in the tropics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **60**, 396-410.
- 8) Awaka, J., T. Iguchi, and K. Okamoto, 1998: Early results on rain type classification by the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) precipitation radar, *Proc. 8th URSI Commission F Open Symp.*, Aveiro, Portugal, 143-146.

- 9) Shukla, J., and D. A. Paolino, 1983: The Southern Oscillation and long-range forecasting of the summer monsoon rainfall over India. *Mon. Wea. Rev.*, **111**, 1830-1837.
- 10) Meehl, G. A., 1987: The annual cycle and interannual variability in the tropical Pacific and Indian Ocean regions. *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 27-50.
- 11) Ju, J., and J. Slingo, 1995: The Asian summer monsoon and ENSO. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **121**, 1133-1168.
- 12) Shen, X., and M. Kimoto, 1999: Influence of El Nino on the 1997 Indian Summer Monsoon. *J. Meteor. Soc. Japan*, **77**, 1023-1037.
- 13) Yanai, M., and X. Liu, 2000: Annual cycle and interannual variability of the Asian-Australian monsoon system. *Submitted to J. Climate*.
- 14) 安成哲三, 1999: 変わりつつあるアジアモンスーン-ENSO 結合システム. *科学*, **69**(8), 713-718.
- 15) Kumar K. K., B. Rajagopalan, and M. A. Cane, 1999: On the weakening relationship between the Indian Monsoon and ENSO. *Science*, **284**, 2156-2159.
- 16) Krishnamurti, T. N., M. Kanamitsu, R. Godbole, C. B. Chang, F. Carr and J. H. Chow, 1976: Study of a monsoon depression (I) synoptic structure. *J. Meteor. Soc. Japan*, **53**, 227-239.
- 17) Moorthi, S. and A. Arakawa, 1985: Baroclinic instability with cumulus heating. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 2007-2031.
- 18) Saha, K., and C. P. Chang, 1983: The baroclinic processes of monsoon depressions. *Mon. Wea. Rev.*, **111**, 1506-1514.
- 19) Madden, R. A., and P. R. Julian, 1971: Detection of a 40-50-day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J. Atmos. Sci.*, **28**, 702-708
- 20) Madden, R. A., and P. R. Julian, 1972: Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40-50-day period. *J. Atmos. Sci.*, **29**, 1109-1123
- 21) Lindzen, R. S., 1974: Wave-CISK in the tropics. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 156-179
- 22) Emanuel, K. A., 1987: An air-sea interaction model of intraseasonal oscillations in the Tropics. *J. Atmos. Sci.*, **44**, 2324-2340
- 23) Neelin, J. D., I. M. Held, and K. H. Cook, 1987: Evaporation-wind feedback and low-frequency variability in the tropical atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, **44**, 2341-2348
- 24) Hendon, H. H. and M. L. Salby, 1994: The life cycle of the Madden-Julian oscillation. *J. Atmos. Sci.*, **51**, 2225-2237
- 25) Maloney, E. D., and D. L. Hartmann, 1998: Frictional moisture convergence in a composite life cycle of the Madden-Julian oscillation. *J. Climate*, **11**, 2387-2403
- 26) Kemball-Cook, S. R., and B. C. Weare, 2001: The onset of convection in the Madden Julian oscillation. *J. Climate*, **14**, 780-793
- 27) Simpson, J., 1992: Global circulation and tropical cloud activity. *The Global Role of Tropical Rainfall*, J. S. Theon et al., Eds., A Deepak Publishing, 77-92

- 28) Johnson, R. H., T. M. Rickenbach, S. A. Rutledge, P. E. Ciesielski, and W. H. Schubert, 1999: Trimodal characteristics of tropical convection., *J. Climate*, **12**, 2397-2418
- 29) Johnson, R. H., P. E. Ciesielski, and K. A. Hart, 1996: Tropical inversions near the 0°C level. *J. Atmos. Sci.*, **53**, 1838-1855
- 30) Johnson, R. H., and X. Lin, 1997: Episodic tradewind regimes over the West Pacific warm pool. *J. Atmos. Sci.*, **54**, 2020-2034

13. 国際共同研究等の状況

木本および野沢は2002年から英国ハドレーセンターのモデリンググループと「高解像度大気海洋結合モデルの相互比較」を行っている。

気候システム研究センター(木本・高藪)は2002年から Seoul National University Climate Environment Research Center (CES)と気候モデル開発について共同のワークショップを開催して研究連絡を取っている。

高藪は日米共同の熱帯降雨観測衛星 (TRMM) のサイエンス研究に参加している。

14. 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 赤澤悠子: 北海道大学大学院修士号論文 (2000).

「2000: 温暖化に伴う積雪変化の地域的特性 -モデルと観測データの比較-

- ② M. Lal, D. Aggarwal, T. Nozawa, S. Emori, H. Harasawa, T. Takahashi, M. Kimoto, A. Abe-Ouchi, T. Nakajima, T. Takemura, and A. Numaguti: *Current Science*, vol.81, no.9, 1196-1207 (2001).

“Future climate change: Implications for Indian summer monsoon and its variability”

- ③ Y. N. Takayabu: *Geophys. Res. Lett.*, 29, 10.1029/2001GL014113 (2002)

“Spectral representation of rain profiles and diurnal variations observed with TRMM PR data over the equatorial area”

- ④ M. Watanabe, F.-F. Jin, and M. Kimoto: *J. Climate*, vol.15, no.3, 1537-1554 (2002).

“Tropical axisymmetric mode of variability in the atmospheric circulation: Dynamics as a neutral mode”

- ⑤ K. Kikuchi, and Y. N. Takayabu: *J. Meteor. Soc. Japan*, accepted (2002)

“Equatorial circulation of moisture signal associated with the Madden-Julian Oscillation (MJO) during boreal winter”

<学術誌 (査読なし)>

なし

<書籍>

- ① T. Matsuno and H. Kida, Eds.: *Present and Future of Modeling Global Environment Change: Toward Integrated Modeling*, Terra Scientific Publishing Company, 458pp, 49-62 (2001).

“Studies of climate variability using general circulation models (M. Kimoto)”

- ② T. Matsuno and H. Kida, Eds.: Present and Future of Modeling Global Environment Change: Toward Integrated Modeling, Terra Scientific Publishing Company, 458pp, 15-28 (2001).
“Projections of future climate change in the 21st century simulated by the CCSR/NIES CGCM under the IPCC SRES scenarios (T. Nozawa, S. Emori, A. Numaguti, Y. Tsushima, T. Takemura, T. Nakajima, A. Abe-Ouchi and M. Kimoto)”

<報告書類等>

なし

(2) 口頭発表

- ① 高薮縁：日本気象学会 2000 年春季大会，つくば，2000 年 5 月
「TRMM PR データによる熱帯降雨の地域特性と日変化特性の解析」
- ② 赤澤悠子，沼口敦：日本気象学会 2000 年度秋季大会，2000 年 10 月
「温暖化に伴う積雪変化の地域的特性 -モデルと観測データの比較-」
- ③ 高薮縁：日本気象学会 2000 年秋季大会，2000 年 10 月
「TRMM PR データ解析による熱帯降雨の平均的描像」
- ④ T. Nakazawa et al.: US TRMM Team Meeting, Maryland, October 31, 2000.
“TRMM data use for climate and monsoon research in Japan”
- ⑤ 野沢徹，阿部彩子，對馬洋子，江守正多，沼口敦，竹村俊彦，中島映至，木本昌秀：日本気象学会 2001 年春季大会，東京，2001 年 5 月。
「温暖化実験にみられる CCSR/NIES CGCM の気候感度について」
- ⑥ 高薮 縁：日本気象学会 2001 年春季大会，東京，2001 年 5 月。
「ENSO とアジアモンスーンを結ぶもの： Part I.」
- ⑦ T. Iguchi, T. Kozu, R. Meneghini, K. Nakamura, Y. Takayabu, R. Oki: IAMAS, Innsbruck, July 2001.
“Rain estimation and some results from TRMM Precipitation Radar data analysis”
- ⑧ Y. N. Takayabu: IAMAS, Innsbruck, July 2001.
“What connects South Asian monsoon rainfall with ENSO?”
- ⑨ 高薮縁，H. Weng：日本気象学会 2001 年秋季大会，岐阜，2001 年 10 月
「ENSO とアジアモンスーンを結ぶもの： Part II」
- ⑩ 安富奈津子，木本昌秀：日本気象学会 2001 年秋季大会，岐阜，2001 年 10 月
「北半球夏季におけるアジアモンスーン域の主要変動モード—その時間・空間発展」
- ⑪ E. Cha, E.-J., and M. Kimoto: Third International Symposium on Asian Monsoon Systems, Okinawa, Japan, December 2001.
“The autumnal snow cover, the Arctic oscillation, and the East Asian winter monsoon”
- ⑫ M. Kimoto: Third International Symposium on Asian Monsoon Systems, Okinawa, Japan, December 2001.
“Monsoon variability in a coupled ocean-atmosphere general circulation model”
- ⑬ Y. N. Takayabu, and H. Weng: Third International Symposium on Asian Monsoon Systems, Okinawa, Japan, December 2001.

“An influence of vertical wind shear on the activity of monsoon depressions. -- Possible link between SAM, ENSO, and ISV --”

- ⑭ N. Yasutomi, and M. Kimoto: Third International Symposium on Asian Monsoon Systems, Okinawa, Japan, December 2001.
“Principal modes of Asian summer monsoon variability”
- ⑮ M. Kimoto: Climate of the 20th century international workshop, Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies, Calverton, Maryland, U.S.A., January 2002.
“Tropical axisymmetric mode of variability in a C20C experiment by the CCSR/NIES AGCM”
- ⑯ M. Kimoto: Present status. International Workshop on the Next-generation Climate Model, Awaji Yumebutai, Hyogo, Japan, March 2002.
“CCSR coupled ocean-atmosphere general circulation model”
- ⑰ S. Shige, Y. N. Takayabu, W.-K. Tao, and D. E. Johnson: 25th Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology, San Diego, USA, April -May 2002
“Spectral representation of rain features and diurnal variations observed with TRMM PR data over the equatorial area”
- ⑱ S. Shige, Y. N. Takayabu, W.-K. Tao, and D. E. Johnson: 25th Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology, San Diego, USA, April -May 2002.
“Spectral retrieval of latent heating profiles from TRMM PR data: Algorithm development with a clod-resolving model”
- ⑲ Y. N. Takayabu: 25th Conference on Hurricane and Tropical Meteorology, American Meteorological Society, San Diego, April-May 2002.
“Spectral representation of rain features and diurnal variations observed with TRMM PR data over the equatorial area”
- ⑳ S. Shige, Y. N. Takayabu, W.-K. Tao, and D. E. Johnson: The 2nd Global Precipitation Measurement (GPM) International Planning Workshiop, Tokyo, May 2002.
“Spectral retrieval of latent heating profiles from TRMM PR data: Algorithm development with a clod-resolving model”
- ㉑ N. Takayabu: The 2nd Global Precipitation Measurement (GPM) International Planning Workshop, Tokyo, May 2002.
“Rain characteristics observed with TRMM PR and expectations to GPM”
- ㉒ 金丸由紀子, 木本昌秀: 日本気象学会 2002 年春季大会, さいたま, 2002 年 5 月.
「大気海洋結合モデルにおける海洋混合層と鉛直温度勾配の関わり」
- ㉓ 菊地一佳・高藪 縁: 日本気象学会 2002 年春季大会, さいたま, 2002 年 5 月
「MJO のライフサイクル(I): 北半球冬季に地球を巡る MJO」
- ㉔ 車恩貞, 木本昌秀: 日本気象学会: 2002 年秋季大会, さいたま, 2002 年 5 月.
「Extratropical Teleconnections related to El Nino Summer」
- ㉕ 重 尚一・高藪 縁; 日本気象学会 2002 年春季大会, さいたま, 2002 年 5 月
「TRMM PR データからの潜熱加熱プロファイルのスペクトル推定: 雲解像モデルによるアルゴリズム開発」

- ⑳ 清木亜矢子・高薮 縁：日本気象学会 2002 年春季大会，さいたま，2002 年 5 月
「西風バーストの地域性、季節性、年々変動」
- ㉑ S. Shige, and Y. N. Takayabu, W.-K. Tao, D. Johnson: TRMM International Science Conference, Honolulu, July 2002.
“Spectral retrieval of latent heating profiles from TRMM PR data. Part I: Algorithm development with a cloud resolving model”
- ㉒ Y. N. Takayabu, and S. Shige: TRMM International Science Conference, Honolulu, July 2002.
“Spectral retrieval of latent heating profiles from TRMM PR data. Part II: Experimental applications to PR2A25 rain profiles”
- ㉓ Y. N. Takayabu: TRMM International Science Conference, Honolulu, July, 2002.
“Spectral representation of rain features and diurnal variations observed with TRMM PR data over the equatorial area”
- ㉔ Y. N. Takayabu, and A. Seiki: 2002 Western Pac. Geophysical Meeting (AGU), Wellington, July 2002.
“Statistical analysis on mutual relationships among MJO, WWBs, and ENSO”
- ㉕ K. Kikuchi, and Y. N. Takayabu: 2002 Western Pac. Geophysical Meeting (AGU), Wellington, July 2002.
“The composite life cycle of the Madden-Julian oscillation : Recurrence mechanism of the MJO during southern summer”
- ㉖ M. Kimoto: 1st CCSR and CES Joint Workshop, Tokyo, July 2002.
“The CCSR Coupled Ocean-Atmosphere General Circulation Model: Present Status and a Near-Future Plan”
- ㉗ Y. N. Takayabu: 1st CCSR and CES Joint Workshop, Tokyo, July 2002.
“Statistics of tropical rain observed from TRMM”
- ㉘ M. Kimoto, M. Watanabe, and F.-F. Jin: International Workshop on Air-Land Interaction in Arid and Semi-Arid Areas and its Impact on Climate, Dunhuang City, August 2002.
“Upstream ENSO Teleconnection over the Eurasian Continent via a Tropical Axisymmetric Mode of Variability”
- ㉙ X. -S., Shen, and M. Kimoto: International Workshop on Air-Land Interaction in Arid and Semi-Arid Areas and its Impact on Climate, Dunhuang City, August 2002.
“Coupling of the springtime surface air temperature over Eurasia and the extratropical circulation anomalies”
- ㉚ 高薮縁：日本気象学会 2002 年秋季大会，札幌 2002 年 10 月
「熱帯域の対流性・層状性降雨比と環境場との関係」
- ㉛ 清木亜矢子・高薮 縁：日本気象学会 2002 年秋季大会，札幌 2002 年 10 月
「西風バースト発生と MJO との関係」
- ㉜ 重 尚一・高薮縁・W.-K. Tao・D. E. Johnson: 日本気象学会 2002 年秋季大会，札幌，2002 年 10 月
「TRMM PR データからの潜熱加熱プロファイルのスペクトル推定：雲解像モデルによるア

ルゴリズム開発(2)」

- ⑩ 重 尚一・高 薮 縁・W.-K. Tao・D. E. Johnson：第4回非静力学モデルに関するワークショップ，京都，2002年11月-12月
「TRMM PR データからの潜熱加熱プロファイルのスペクトル推定：雲解像モデルによるアルゴリズム開発」
- ⑪ 三浦裕亮，木本昌秀：第4回 非静力学 モデルに関するワークショップ，京都，2002年11月-12月
「雲解像モデルを用いた温暖化想定実験」
- ⑫ M. Kimoto: Workshop on Climate System Monitoring, Diagnosis and Prediction in the Asia-Pacific Region, December 2002, .
“Phenomena affecting the Asian-Pacific Climate”
- ⑬ M. Kimoto: Fifth Annual Symposium on Japanese-American Beckman Frontiers of Science, Irvine, CA, U.S.A., December 2002
“Moist Convection and the General Circulation of the Atmosphere”
- ⑭ M. Kimoto: The 10th U.S.-Japan Workshop on Global Climate Change, Irvine, U.S.A., January, 2003,
“Prediction of Climate and Water Cycle Variability on Monthly, Seasonal and Annual Time Scales”
- ⑮ Y. N. Takayabu: Joint Symposium THORPEX and NWP Heavy Rain over Asia, Tokyo, February 2003.
“A review on observational studies on Madden-Julian Oscillation”
- ⑯ M. Kimoto, M., and the K-1 Japan National Team: The 5th Workshop on Next Generation Climate Models for Advanced High Performance Computing Facilities, Rome, Italy, March 2003.
“High-resolution coupled ocean-atmosphere general circulation modeling on the Earth Simulator”
- ⑰ Y. N. Takayabu: GEWEX-GCIP Workshop on Precipitation Analysis, Reading, March 2003.
“Characteristics of precipitation observed by TRMM PRM.”
- ⑱ Kimoto: International Symposium on Climate Change, Beijing, China, March-April 2003.
“Simulated Enhancement of Baiu-Meiyu Activity under the Global Warming”

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

- ① フジTV「EZ-TV」(桜の早期開花と暖冬・北極「震」動について) 2002年3月31日
- ② 日本経済新聞(エルニーニョ今夏発生のかざし 商品市況かく乱も) 2002年4月2日夕刊
- ③ アエラ(大規模エルニーニョの兆候 9年ぶりコメ大凶作か? '02.4.8No.15 pp.12-13)

2002年4月

- ④ NHK ラジオ第一「ラジオ朝一番 ニュースアップ」(7月に2つの台風日本を襲う) 2002年7月24日
- ⑤ 毎日放送「リアルタイム」2002年8月9日
- ⑥ テレビ朝日「素敵な宇宙船地球号」(「シリーズ 温暖化と向き合う」vol.1 温暖化 その未来地図) 2002年8月11日
- ⑦ 東京新聞(桜 4月危機 3月の気温上昇早まる開花) 2002年3月18日
- ⑧ 共同通信社配信(「熱帯の雨を解明 温暖化予測の精度向上」等のタイトルで各種地方新聞に掲載、岐阜新聞、伊勢新聞、茨城新聞、北國新聞、東奥新聞、高知新聞、山形新聞、福島新聞、富山新聞) 2002年9月1日

15. 成果の政策的な寄与・貢献について

- ① 気象庁アジア太平洋気候センター主催の東南アジアの季節予報担当者向けの「アジア太平洋地域の気候に影響を与える現象」についての講義(口頭発表④)
- ② 文科省と米国科学アカデミーの日米科学協力への貢献(口頭発表④)
- ③ 学術振興事業団が世話し、日米科学技術協力協定にもとづく第10回日米地球変動ワークショップ「気候と水」への貢献(口頭発表④)
- ④ GEWEX-GCIP(全球エネルギー・水循環研究計画 GEWEX 大陸規模国際プロジェクト)主催で降水推定精度向上に向けての提言をまとめたワークショップへの貢献(口頭発表④)