

B-5 気候モデルによる気候変動評価に関する研究

(4) 気候変化に係わる雲の大気物理過程の解明に関する研究

研究代表者 国立環境研究所 高菽 縁

環境庁国立環境研究所

大気圏環境部 (委託先) 大気物理研究室 東京大学気候システム研究センター 高菽 縁、沼口 敦、菅田 誠治 中島 映至

平成3年度～5年度 合計予算額 23,965千円
(平成5年度予算額 8,305千円)

[要旨]

気候モデルにおける積雲の取り扱い手法の改善に資することを目的として、主に気象衛星データを用いた大規模な雲・大気の結合システムの解析的研究と、サブテーマB-5.1の大気大循環モデルを用いた数値実験を行った。長期観測のデータを用いた雲活動の解析からは、熱帯暖水域上の雲活動が大気の対流圏赤道波と非常に強く結合していることを明らかにした。また、その赤道波擾乱の特性値を推定することができた。これにより、気候モデルにおける積雲パラメタリゼーションの評価において、大気-雲結合システムの特性値による定量的な評価が可能となった。また、衛星によるリモートセンシングによって、広域のエアロゾルの光学的厚さと吸収確率および有効半径を求める方法を確立した。この方法により海洋性層積雲では雲凝結核の増加に伴う大規模な光学的厚さの増加が示された。一方、数値実験の結果からは、熱帯降水帯分布のような地球規模の降水帯の平均分布が、積雲パラメタリゼーションに非常に敏感であることがわかった。

[キーワード]

積雲対流、積雲パラメタリゼーション、赤道波、雲の光学特性

1. 序

地球気候システムにおける雲の効果は、太陽放射の反射・散乱および赤外放射の吸収・射出といった放射過程、および、水の蒸発・降水を介した潜熱エネルギーの輸送による力学・熱力学過程の2つの過程を通じて重要な鍵を握っている。しかしながら、現在の気候研究（特に気候モデル研究）において、雲・降水の効果をも的確に取り扱う方法はまだ確立していない。本研究は、気候モデルにおける雲の取り扱い手法の改善に資することを目的として、現象解析および数値モデル実験から雲と大規模大気循環との相互作用過程の解明に取り組んだ。現象解析においては、(1)地球スケールの循環に及ぼす影響が大きい、(2)雲活動自体が循環を決めることにおいて支配的な役割を担っているという理由から、特に熱帯域積雲活動の大規模組織化に中心をおいて行った。更に、衛星データを用いた雲の微物理量を評価する方法を開発・評価した。数値モデル研究においては、大気大循環モデルを用いて地球スケールの

気候的降水分布の決定機構に焦点を当て、3種類の積雲パラメタリゼーション手法を導入・評価した。

2. 研究手法と成果

本研究は、熱帯積雲対流のデータ解析、衛星データによる雲の微物理量を評価法、降水分布形成における積雲の役割に関する数値実験を有機的に組み合わせることで、熱帯域の雲と大規模大気循環との相互作用過程の解明を行った。以下に、これらの研究成果をこれらの3つのテーマ毎に示す。

(1) 熱帯積雲対流のデータ解析

解析に用いたデータは、気象衛星GMSによる赤外等価黒体温度データ、外向き長波放射データ、ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecasts) およびJMA (Japan Meteorological Agency) による全球客観解析データ、JMAおよびNOAAによる月平均海面水温データ、TOGA-COAREのラジオゾンデデータ、および、SSM/I衛星センターによる水蒸気と雲水量のデータである。

第1に北半球夏季の熱帯積雲活動と対流圏擾乱との結合構造の解析を行った。気象衛星「ひまわり」の赤外データおよび欧州中期予報センター (ECMWF) の全球気象データを用いて6-8月の熱帯太平洋上に観測される雲活動の組織化の解析を行った。その結果、この期間に卓越する3-5日周期の雲活動は、混合ロスビー重力波型および熱帯性低気圧型の2種類の対流圏擾乱と結合していることが示された。気候的に前者は中部太平洋、後者は西太平洋上において卓越していた。エルニーニョ年及びラ・ニーニャ年の擾乱構造の比較解析により、海面水温分布や東西風の分布といった平均場構造の違いが、このような対流活動と結合する擾乱構造の違いをもたらすことが解明された。

第2に、熱帯海洋上の大規模積雲活動の季節変化の解析を行った。ここでは、気象衛星による10年間の雲データの解析から熱帯太平洋上の雲活動の大規模組織化の特徴における季節依存性、緯度・海面水温分布依存性を調べた。特に、北半球夏季と南半球夏季とにおいて雲活動の組織化の特徴が大きく異なることが明らかとなった。北半球夏季においては混合ロスビー重力波及び熱帯低気圧型の3-5日周期の擾乱が卓越し、その場における海面水温にはあまり大きく依存しない。一方、南半球夏季においては、積雲活動は海面水温に大きく依存し、水温が十分高い場合には1.5-2.5日スケールの組織化が卓越することが示された。

引き続き、赤道域における雲擾乱の短い時間スケールの挙動を詳細に解析するためにケーススタディーとして、熱帯大気海洋相互作用に関する TOGA-COARE 研究観測計画 (Tropical Ocean and Global Atmosphere、 Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment) の集中観測期間 (IOP)におけるデータ解析を行った。図1に1992年11月の赤道上、東経156度の船上におけるラジオゾンデ観測の結果を示す。風には明瞭な5日程度の周期の変化が現われており、高度3km付近に相対湿度10%以下の乾燥した領域が1-3日間現われた現象が2回観測された。図2に経度 (156E) における、気象庁全球客観解析データによる850hPa風と気象衛星GMSの等価黒体温度(TBB)の時間

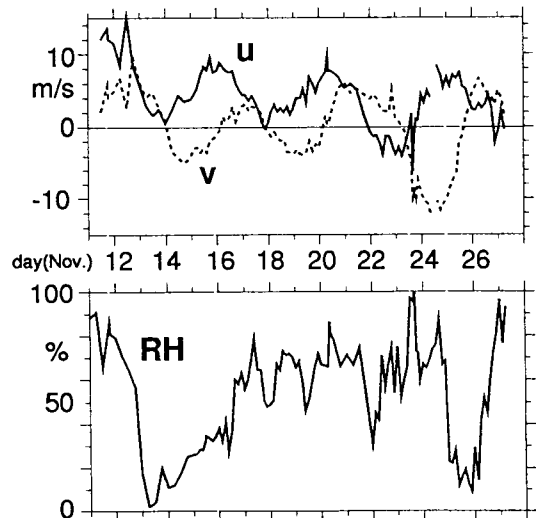


図1 (0N,156E)、高度2.6kmでの東西風(上実線)、南北風(上点線)、相対湿度(下)の時間変化(白丸、時刻はUT)

一緯度断面を示す。反時計廻りの渦状擾乱が12日、16日、21日、26日に、時計廻りの渦状擾乱が14日、18日、23日に通過していることが明瞭である。循環場と雲の場の構造の対応、および分散関係から、これらの渦状擾乱が対流活動と結合した混合ロスビー重力波型擾乱であることが示唆される。一方、15～17日、20～21日の頃の擾乱は、位置が赤道から北にずれており、循環場と雲の構造がやや異なっている。これは、この期間中に台風が発達したものであり、混合ロスビー重力波擾乱からの台風の発達が生唆された。

乾燥した相当温位の低い空気の起源を確認するために、客観解析の風を用いて、ラグランジュ的な気塊追跡解析を行なった。図3は、11月25日12時に(0N、156E)700hPaに存在した気塊を逆方向および順方向に追跡したものである。この気塊は4日前の21日には(16N、176E)680hPa付近に存在したことが示される。また、気象電報のデータにはこの空気塊の移動とよく対応している。従って、このような乾燥空気塊は、亜熱帯の広範な乾燥域から、混合ロスビー重力波などの擾乱によって輸送されてきたと結論される。さらに、衛星マイクロ波センサーSSM/Iのデータ解析により、可降水量(鉛直積分水蒸気量)の分布(図4)において、はっきりと乾燥気塊が現われ、亜熱帯域から侵入している様子が確認された。このような乾燥気塊の侵入イベントは、IOP期間の4ヶ月間(1992年11月～1993年2月)に西太平洋域だけでも6例ほど見ることができた他、インド洋域においても現われている。

このような乾燥空気塊は、放射への影響及び雲活動への影響を通して大気海洋システムに影響を与えていると考えられる。放射影響に関しては、SSM/Iに基づく雲水量の変化から、海面での日射量が約 150W/m^2 変化することが放射計算により確かめられた。また、雲対流不安定度の指標である雲仕事関数は、乾燥空気塊の存在により大きく減少することが示された。

ケーススタディーと平行して、時空間スペクトル解析による赤道域雲擾乱の気候値の評価を行った。ここでは、時空間スペクトル解析の手法を適用し、赤道域雲活動の組織化の東西伝播方向、波長、周期に対するスペクトルの気候値を求め、理論的な赤道波との対応を決定した。用いたデータは1981-1989の9年間における気象衛星「ひまわり」の3時間毎の赤外黒体輻射データである。成果として特筆される点は、大規模な雲活動の組織化に初めて西進慣性重力波を確認したこと、および、雲活動と結合した赤道波の特性値を定量化したことである。

図5は(a)赤道域および(b) 6°N での全季節平均のスペクトル振幅の周波数-波数分布を示す。図に重ねられている曲線は、相当深度17mの理論的な赤道波の低モードの分布曲線である。図から示されるように、大規模雲擾乱のスペクトル特性は、いくつかの赤道波モードと明らかに一致している。赤道域において顕著なモードは、東進ケルビン波と $n=1$ の西進慣性重力波である。 6°N では西進混合ロスビー重力波および $n=1$ ロスビー波、 $n=2$ 西進慣性重力波との対応がみられる。

図6は波長 40° - 120° で積分したスペクトルパワーの周波数-緯度分布を示す。東進モードとしては、4-11日周期のケルビン波が北緯 8° ～南緯 6° の赤道帯に分布する他、南北約 7° の緯度帯に $n=0$ モードの慣性重力波が観測される。西進モードとしては、南北半球約 7° に対称に分布する約4.6日周期のモードは混合ロスビー重力波であり、南半球 10° 付近には約11日周期の $n=1$ のロスビー波が存在する。北半球の3-7日の大きな振幅分布は上記の混合ロスビー重力波の他に非線形モードを含むと考えられる。赤道付近では、1.5-2.5日周期の西進慣性重力波の分布が卓越している。この分布に連続して、赤道からやや離れた 5°N 、 5°S 付近では、やや短周期よりの $n=2$ モードが卓越する。

雲活動に見られる赤道波モードの緯度分布を理論的に求められる赤道波の収束域の緯度分布と比較す

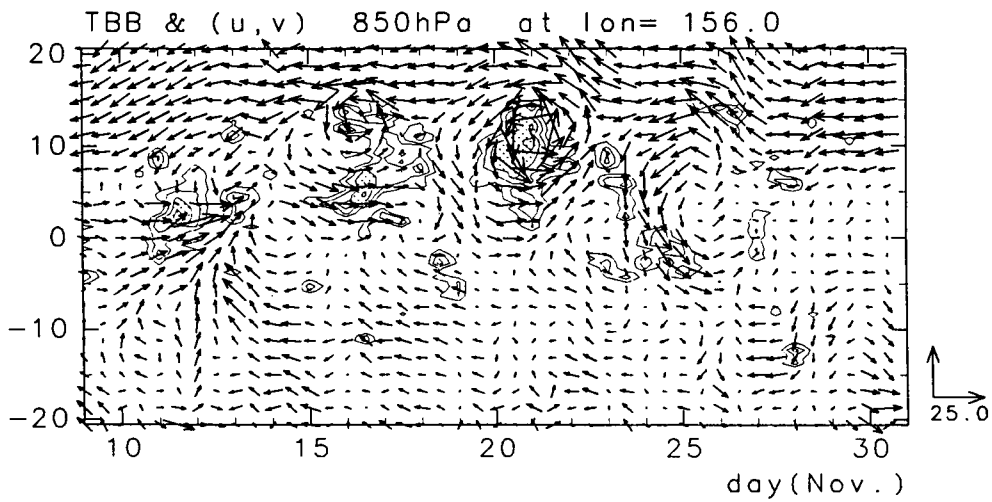


図2 156E, 850hPaにおける水平風と等価黒体温度の時間-緯度断面. コンター間隔 20K, 215K 以下に陰.

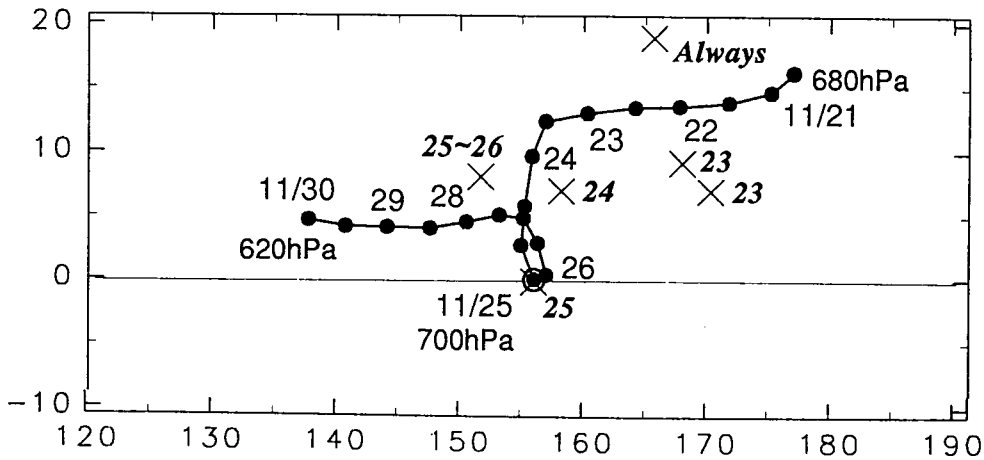


図3 11月25日12時に (0N, 156E) 700hPa に存在した空気塊の11月21日から11月30日までの経路の経度緯度面への射影. ×印とイタリック体の数字は気象電報データによる各地点での乾燥・低相当温位気塊の出現期間を示す.

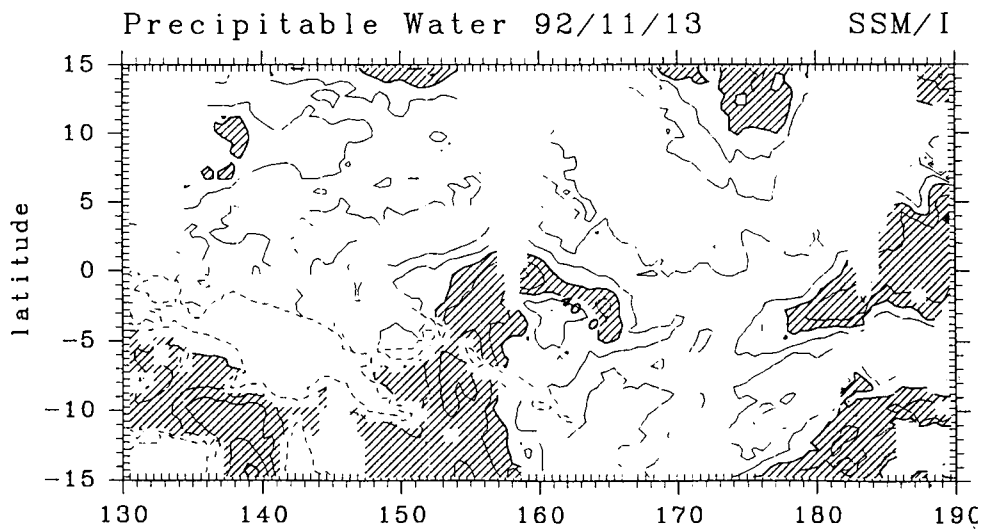


図4 11月13日の, SSM/Iによる可降水量の水平分布. コンター間隔5kg/m², 40kg/m² 以下に陰.

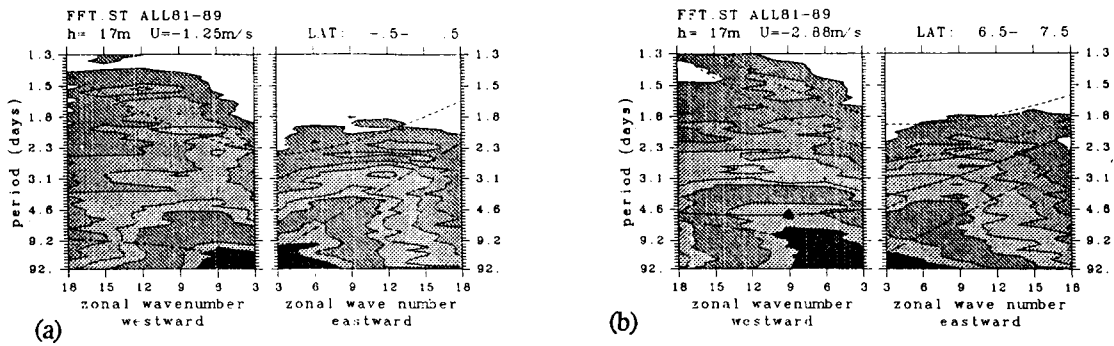


図5 相当黒体温度の時空間パワースペクトルの波数-周期分布 (a) 0.5 N-0.5 S (b) 6.5 N-7.5 N

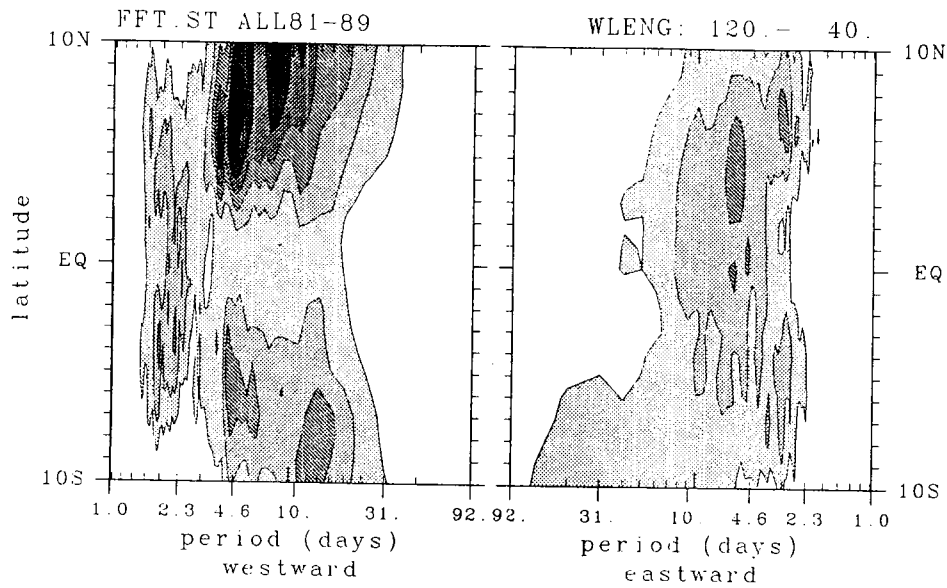


図6 1981-1989年の相当黒体温度の時空間パワースペクトルの周期-緯度分布 (気候値)

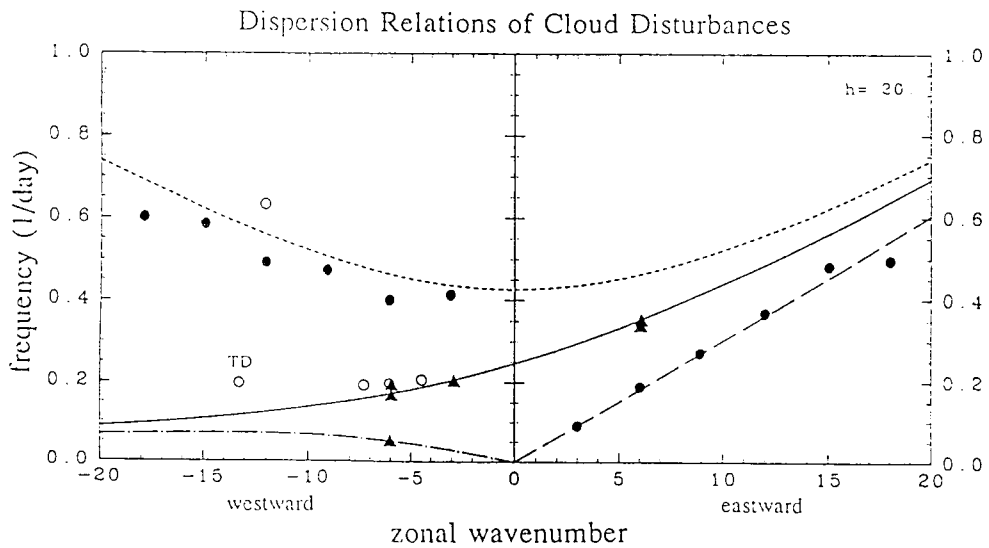


図7 波数-周期空間における雲擾乱の特性値のプロット。図中の線は等価深度20mに対する赤道波の分散関係を示す。

ると、赤道波の変形半径(特徴的空間スケール)として約 7° という値が見積もられる。この変形半径の値は、波数-周波数分布から示唆された相当深度15-20mと首尾一貫している。図7は、今回のスペクトル解析(●:赤道上、▲:緯度 $\pm 7^\circ$)と平成3年度の3-5日周期擾乱および次項に示す約2日周期擾乱のコンボジット解析(○)から求めた特性値をまとめて赤道波の分散曲線上にプロットしたものである。上述した赤道波モードと約20mの相当深度を持つ赤道波の対応が明瞭である。ここで得られた赤道波の相当深度を実現するためには、熱帯域の大規模な対流活動を、常に100kmスケールの大規模なかなとこ雲(層状雲)を伴ったシステムとして把握することが重要であることが推論された。

更に、スペクトル解析によって発見された約2日周期の西進慣性重力波の特性をより詳しく解析した。この擾乱は特に南半球夏季(12月-2月)に卓越し、対流圏下層の西風および30-60日の長周期の対流活動に比例して現れることが解明した。すなわち、平成4年度の解析結果にあらわれた南半球夏季に海面水温の上昇に比例して卓越する約2日周期の短周期擾乱は $n=1$ 西進慣性重力波であると決定された。

(2) 衛星データによる雲の微物理量の評価

雲の光学的厚さと有効雲粒半径は、衛星から推定できる有用な雲微物理パラメーターである。ここでは、カリフォルニアの夏季海洋性層積雲とアマゾン域の大陸性積雲について、これらのパラメーターをAVHRRのチャンネル1, 3, 4を用いて推定した。その結果、海洋性層積雲の場合は、大陸からの雲凝結核の影響を受けて、雲粒径が小さくなり、その結果増大した雲層の保水力のために雲の光学的厚さが著しく増大する現象が、カリフォルニア沖で大規模に発生していることが分かった。このような現象の存在は、人間起源の大気汚染によって大陸周辺の低層雲量が増大する可能性も示唆している。一方、大陸性の積雲の場合は、もともと雲凝結核が多い大気中に形成されているために、このような雲粒径の減少に伴う保水力の増加は顕著ではなく、例えば、焼き畑によって発生する煙の混入によってむしろ、太陽放射に対する雲反射率は減少する可能性が見られた。実際、図8に見られるように衛星から求めた雲粒径は煙量の増加に伴って減少しているにも拘わらず、AVHRRのチャンネル1の輝度は減少する傾向が見いだされた。

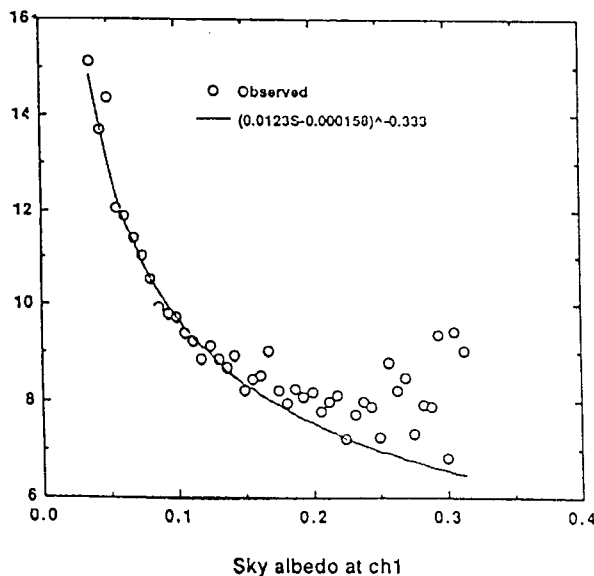


図8 アマゾン域の大陸性積雲についてのAVHRR Channel 1の輝度と有効雲粒半径(縦軸)との関係

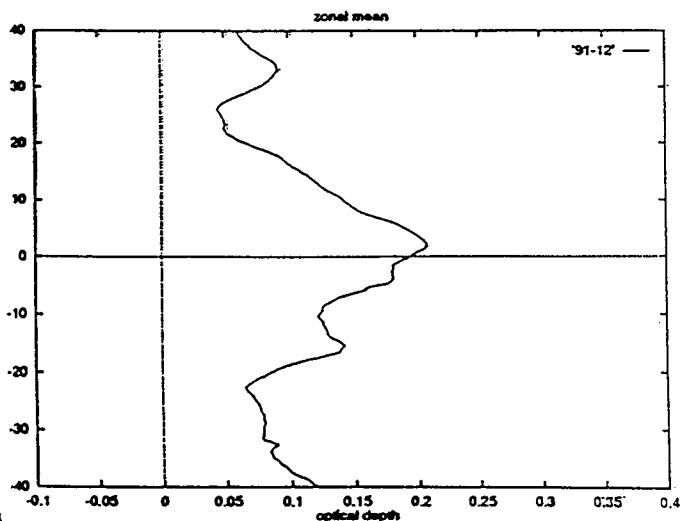


図9 エアロゾルの光学的厚さの帯状平均の緯度(縦軸)依存性(1991年12月)

大気-海洋系における放射伝達を解き、エアロゾルの存在が衛星シグナルにおよぼす影響を詳細に調べた。その結果を利用して、GMSの可視チャンネルからピナツボ火山起源の成層圏エアロゾルの発達過程を調べることができた。それによると、我々が得た結果はアメリカ海洋気象局が求め NOAA/AVHRR 放射計による光学的厚さに近い結果を得た。この結果はより時間分解能が高い静止衛星によるエアロゾルのモニタリングが有望であることを物語っている。エアロゾルの光学的厚さの画像の時系列から、光学的厚さの最大値は8月後半に見られ、0.35にも達した。その際の光学的厚さの帯状平均の緯度依存性を図9に示す。同様にAVHRRのチャンネル1、2を利用した手法を湾岸戦争に起因するクウェート油井火災のエアロゾル層に適用した。この方法では、もし地上の支援放射データがある時には、エアロゾルの光学的厚さ、有効粒径、および、エアロゾルの吸収確率を決定することができる。またこれとは独立に、海岸付近の地表反射率の大きな変化を利用するとエアロゾルの吸収確率を決定することができる。この2つの手法を比較することにより、これまで良い精度で求めることが難しかったエアロゾルの吸収確率を求めることができた。それによると湾岸域の油井火災のエアロゾルの吸収確率は0.25程度で、現場での飛行機観測値よりも小さな値であった。

(3) 降水分布形成における積雲の役割に関する数値実験

降水量の時間平均分布の形成における積雲対流と大気大循環の役割を明らかにする目的で数値実験を行った。実験においてはKuo, Manabeの対流調節(MAA), 修正されたArakawa-Schubert(MAS)という3つの積雲パラメタリゼーションを用いて比較を行った。赤道に最大値をもつ南北対象な海面水温分布を与えた実験において前者は南北緯度10付近に2本の降水帯を持つのに対して、後者では赤道上に1本の降水帯が現れた。これは、実現される平均的大気の大気鉛直成層およびハドレー循環の深さが、雪のパラメタリゼーション手法によって変わるためであり、その結果、エネルギーバランスを達成しうる大規模降水分布が大きく異なってくるのが解明された。さらに、簡略化された Arakawa-Schubert 積雲パラメタリゼーションの導入とテストを行った。

海面水温分布を南北に変化させた実験の結果、強い降水帯の位置は海面水温の勾配によって駆動される境界層の流れの収束に大きく支配されることが結論づけられた。この結果は、観測された月平均海面水温分布から診断的に求めた境界層収束量と熱帯降水活動の指標である外向き長波放射データとの相互関係の解析からも支持された。

3. まとめ

最近の世界の気候モデルの相互比較研究の結果、気候モデルの精度において、雲の効果をいかに扱うかというパラメタリゼーションの問題が重要な鍵を握っていることは、気候研究者間の共通の認識となっている。そこで、雲の効果を数値モデル上で正しく表現するための基礎的な研究として熱帯域の積雲対流のデータ解析、衛星リモートセンシングによる雲物理パラメータの評価法、降水分布形成における積雲の役割に関する数値実験等を行った。研究は主に気象衛星データを用いた大規模な雲・大気の大規模な結合システムの解析的研究と、サブテーマB-5.1の大気大循環モデルを用いた数値実験により行った。

数値実験の結果、熱帯降水帯分布のような地球規模の降水帯の平均分布が、積雲パラメタリゼーションに非常に敏感であることがわかった。長期観測のデータを用いた雲活動の解析からは、熱帯暖水域上の雲活動が大気の大気対流圏赤道波と非常に強く結合していることを解明した。また、その赤道波擾乱の特性値を推定することができた。これは、気候モデルにおける積雲パラメタリゼーションの評価において、

大気-雲結合システムの特性値による定量的な評価を可能にしたという点で重要である。また、衛星リモートセンシングによって、広域の雲とエアロゾルの光学的厚さと吸収確率を得ることができた。複数チャンネルの組み合わせによって、さらに有効半径を推定することができ、海洋性層積雲では雲凝結核の増加に伴う大規模な光学的厚さの増加が観測された。

この研究計画期間中に行われたTOGA-COARE国際集中観測からは、海洋-大気-雲の相互作用機構の理解によりデータが得られている。今回の研究成果から示唆された大気-雲結合システムのエネルギー構造および大規模な海面水温分布の境界層収束を通しての積雲対流活動への効果等についてのより詳細な解析が今後可能になる。平成5年度に行った解析からもTOGA-COAREデータをさらに収集し、研究していくことのポテンシャルの高さが認識できる。さらに今回の研究から、雲活動の大規模な組織化には、対流性の雲のみでなく、対流雲に伴う層状性の雲(かなとこ雲)が大きな役割を果していることが示唆された。層状性の雲は、水平スケールが圧倒的に大きいために、放射に果たす効果も非常に重要になる。積雲パラメタリゼーションと雲の放射パラメタリゼーションとの結合は、今回の研究計画に引き続く重要な課題である。

4. 国際協同研究等の状況

赤道域における雲擾乱の短い時間スケールの挙動を詳細に解析するためにケーススタディーとして、熱帯大気海洋相互作用に関する TOGA-COARE 研究観測計画 (Tropical Ocean and Global Atmosphere, Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment) の集中観測 (1992年11月～1993年2月) に参加した。

5. 本研究により得られた成果発表

- Higurashi, A., Nakajima, T., T. Hayasaka, and Y. Najafi, 1993: Remotesensing Persian gulf oil fire aerosols. Proc. of 1993 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Better Understanding of Earth Environment, Kogakuin University, Tokyo, Japan, August 18-21, 1993, 1956-1957.
- Kaufman, Y. J., and T. Nakajima, 1993: Effect of Amazon smoke on cloud microphysics and albedo - Analysis from satellite imagery. J. Appl. Meteor., 32, 729-744.
- Nakajima, T., A. Higurashi, T. Hayasaka, and Y. Najafi, 1994: Remotesensing of Persian Gulf Oil Fire aerosols. American Meteor. Soc. meeting, Jan. 23-28, 1994, Nashville, Tennessee.
- Nakajima, T., 1993: The role of clouds in climate. Kagaku, 63, 658-663 (in Japanese).
- Nakajima, T., 1993: Study of climatic effects of cloud-aerosol interaction. Satellite Remote Sensing of the Oceanic Environment, I. S. F. Jones, Y. Sugimori, and R. W. Stewart, Eds., Seibutsu Kenkyusha CO., Ltd., 528pp, 235-239.
- Nakajima, T., 1993: Passive remote sensing of cloud microphysics properties. IRS '92: Current Problems in Atmospheric Radiation, 1992., Eds. S. Keevallik et al., A. Deepak Publishing, 565pp, 52-56.
- Numaguti, A., and Y.N. Takayabu, 1994: Intrusion of dry air into the equatorial area by tropical disturbances. J. Meteor. Soc. Japan, to be submitted.
- Numaguti, A., 1992. Dynamics and energy balance of the Hadley circulation and the tropical precipitation zones: Significance of the distribution of evaporation., J. Atmos. Sci., 50, 1874-1887
- Spinhirne, J. D., and T. Nakajima, 1994: The glory of clouds in the nearinfrared. Accepted by Applied. Optics.
- Suzuki, T., Tanaka, M., and T. Nakajima, 1993: The microphysical feedback of cirrus cloud in climate change. J.

- Meteor. Soc. Japan, 71, 701-713.
- Takayabu, Y.N. and Ts. Nitta, 1993. 3-5 day-period disturbances coupled with convection over the tropical Pacific Ocean., J. Meteor. Soc. Japan, 71, 221-246
- Takayabu, Y.N. 1994a, Large-scale cloud disturbances associated with equatorial waves. Part I: Spectral features of the cloud disturbances., J. Meteor. Soc. Japan, 72 (in printing)
- Takayabu, Y.N. 1994b, Large-scale cloud disturbances associated with equatorial waves. Part II: Westward-propagating inertio-gravity waves., J. Meteor. Soc. Japan, 72 (in printing)
- Takayabu, Y.N. and Ts. Nitta: On the structures of cumulus convective systems with 3-5 day variations and their relationship with environmental conditions over the tropical Pacific Ocean. Clouds and Ocean in Climate, International WCRP Symposium, NAGOYA, 1992.10
- Zhao, F.-S., T. Nakajima, and Ta. Nakajima, 1994: Remote sensing study of the aerosol optical thickness, cloud microphysics and their interaction over East China Sea and ASTEX regions. American Meteor. Soc. meeting, Jan.23-28, 1994, Nashville, Tennessee.