

B-5 気候モデルによる気候変動評価に関する研究

(4) 気候変動に係わるフィードバックプロセスの詳細なモデル化に関する研究

② 大気水循環と雲過程におけるフィードバック機構の評価

研究代表者 国立環境研究所 高萩 緑

環境庁 国立環境研究所

大気圏環境部 大気物理研究室

高萩 緑, 沼口 敦

(委託先) 東京大学気候システム研究センター 中島 映至

平成6年度～平成8年度合計予算額 12,937千円

(平成8年度予算額 4,300千円)

[要旨]

雲が気候に及ぼすフィードバック機構を明らかにするため、衛星データおよび放射モデルを用いた雲の特性とその効果の解析を行った。また、気候モデルにおける雲の取扱の改良を行った。主な成果は以下の通りである。

(1) 大気大循環モデルにおける有限雲の存在の効果を実放射過程に取り込むためのセミ・ランダム法を開発し、放射コードに組み込むことに成功した。その結果、従来のランダム法に比較して時間計算が大幅に縮小できることが判明した。

(2) TOGA COARE(熱帯海洋と全球大気プログラム/海洋-大気結合応答実験) 観測のデータを用いた総合的な解析により、熱帯海洋上の準2日周期雲システムに焦点をあて、数千 km スケールの大気擾乱に伴う雲群の構造を調べた。その結果、気候モデルの分解能に匹敵する大規模なスケールに組織化された力学的な大気擾乱と積雲対流雲・アンビル雲(かなとこ雲)との関係が明らかになった。

(3) ERBE(地球放射収支実験)、ISCCP(国際衛星雲気候計画)の衛星データを用いて雲の放射強制力(雲の存在による大気上端での下向き放射フラックスの増加分)の解析を行った。その結果、雲の放射効果は地理特性と強い関わりを持っていることが解明した。中でも特徴的なのは、地表面の気温・反射効果の高い砂漠では雲が保温効果に働くこと、また、高度が大きい巻雲域の放射強制力は中立に近いことであった。特に熱帯域の巻雲の放射効果に関しては、積雲対流の組織化などの力学的な効果との相互作用によるバランス機構を考慮する必要性が示唆された。

(4) ISCCPによる雲の光学的特性のデータを精密な放射モデルにとりこみ、雲型別の雲の放射効果を推定する方法を開発し、実際のデータによる計算を行った。この方法による解析は、雲の放射効果と積雲対流の大規模組織化の力学的作用との相互作用について気候モデルを評価する際に有効である。

(5) 赤外チャンネルを用い、上層雲の雲微物理特性(有効粒径および光学的厚さ)の推定量を求めるアルゴリズムについて研究した。上層雲が存在した場合に人工衛星が受ける放射輝度について、精密な放射伝達モデルによる数値シミュレーションを行い、赤外窓領域2波長での輝度温度を利用した従来の Split Window 法を改良した NSW 法(規格化した Split Window 法)を開発した。この方法は様々な雲頂高度・地表面温度に対しても適用可能であり、また、近赤外波長も併用することで、より精度の高い解析が可能となった。さらにこの解析アルゴリズムを実際の NOAA 衛星の AVHRR(高性能高分解能放射計) 観測による赤外3チャンネルデータに適用し、上層雲を構成する氷粒子の有効粒

径および光学的厚さの全球解析を行った。その結果得られた知見は、地球の温暖化に対して、熱帯の上層雲が中-高緯度のものよりも大きな役割を果たしていることを示唆している。

[キーワード] 雲の放射強制力、雲の光学的特性、衛星データ、高精度放射伝達モデル、積雲対流の組織化、セミ・ランダム法

1. 序

地球気候システムにおいて、雲は、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。また、雲量1%の変動は大気上端での放射収支数 $W m^{-2}$ の変動に相当し、これは温室効果気体による過去200年間の変動よりもはるかに大きい。しかしながら、気候変化に対する雲のフィードバック効果については、その符号についてさえもまだ統一した見解が得られていない。

Cess et al.(1990) は、世界の代表的な19の大循環モデルにおける気候感度の比較を行った。その結果、晴天部分平均についてはどのモデルもほぼ同程度の値を示しているのに対し、全球平均ではモデル間のばらつきが大きいことを示した。つまり、モデル間の気候感度の相違が、主に雲のモデリングの相違によるものであること、しかも雲過程のどの部分によるものかが未解明であることを指摘した。この結果はIPCCでも重要な問題としてとりあげられた。最近、Cess et al.(1996) は、再び同様のモデル相互比較を行い、1990年に比較してモデル間のばらつきが減少したことを報告した。しかし、これは雲のフィードバック効果についての理解が進んだ結果ではないことが指摘されている(IPCC95)。

一方、Ramanathan and Collins(1991) は、衛星による放射観測データ(ERBE)を用い、ENSO(エルニーニョと南方振動)に伴う大気上端での雲による放射フラックスの変化分(雲の放射強制)を見積もった。彼らは熱帯海洋上の積雲対流に伴う上層雲が中立に近い冷却効果を持ち、海面水温変化に対してサーモスタットの役割を果たしていると議論した。しかしながら、彼らの解析は、中部太平洋という限られた領域内での雲と海面水温との関係を示したに過ぎないという批判もあり(Fu et al. 1992)、温暖化に伴う雲の効果を正確に把握するためには、大規模循環の力学と雲との関係を包含した理解が必要であると指摘されている(Wallace 1992, Lau et al. 1994)。

近年、全球的なエネルギー収支を把握するために、衛星観測を利用した様々な計画が推進されている。ERBE(地球放射収支実験)では、大気上端における長波・短波の放射フラックスが観測された。また、雲の放射効果を全球的に理解しようという目的では、現在ISCCP(国際衛星雲気候プロジェクト)による全球的な衛星雲データが整えられている(Rossow et al. 1985)。雲型の判別には、NOAAの軌道衛星等に搭載されているAVHRRの可視・赤外多チャンネル観測も有効である。また、雲水や水蒸気に関しては、米国DMS-P衛星によるSSM/Iデータも有効であることが示されている。また、1995年から運用されている日本の気象衛星GMS-5も赤外スプリットウィンドウおよび水蒸気チャンネルを備え、雲や水蒸気の情報を得られるようになった。このように、全球規模での雲の放射効果に関する衛星データが整備されつつある。

このような状況の下で、本研究では、様々な衛星データと高精度な一次元放射伝達モデルとを利用して、現実大気中の雲のフィードバック効果を理解する上での様々な不確定要素に取り組む研究を行っ

た。これにより、気候モデルにおける雲の取扱を評価し、改良を図ることを目指した。特に、雲のフィードバック効果で重要とされている熱帯域に注目し、大規模循環の力学と雲の大規模(数千 km)組織化と雲の放射効果という3者の相互関係の解明に焦点を当てた。

2. 研究目的

本研究の目的は、気候モデルにおける雲の取扱を評価し改良を図るため、現実大気の雲のフィードバック機構を理解することである。そのために、様々な衛星データと高精度の一次元放射モデルとを利用して、雲の分布と大規模場との関係、雲の光学的特性についての研究を行った。また、気候モデルにおける雲の取扱に関する改良も行った。研究内容は以下の通りである。

- (1) セミ・ランダム法を用いた気候モデルにおける有限雲の取扱いの改良
- (2) TOGA COARE データを用いた準2日周期大規模雲システムの詳細解析
- (3) 衛星データを用いた雲の放射特性に関する研究
 - ① ERBE データおよび ISCCP データによる雲の放射強制力に関する研究
 - ② AVHRR 赤外チャンネルによる上層雲の光学的特性の導出に関する研究
 - ③ ISCCP データと一次元放射モデルを用いた雲型別放射特性の解析

3. 研究成果

(1) セミ・ランダム法を用いた気候モデルにおける有限雲の取扱いの改良

雲には積雲、層雲を始めとして、様々な水平分布を持ったものがあり、その分布は太陽放射へのアルベト効果に大きく影響を及ぼす。放射コードにおいて有限雲を取り扱えるようにすることは、放射収支を正確にモデル化するために非常に重要な問題である。そこで有限雲を放射コードに組み込み、組み込まない場合との比較を行った。有限雲の取り扱い方法としては、ランダム法がよく知られているが、計算速度の点で気候モデルに組み込むには問題がある。ここでは同様な計算をより短時間で行うセミ・ランダム法を開発し、放射コードに組み込んだ。セミ・ランダム法の精度の評価のため、ランダム法を組み込んだ場合との比較を行った。なお、両比較のために放射コードで用いた大気鉛直プロファイルは US 標準大気を用いた。

a. 有限雲のパラメタリーゼンションの感度解析

有限雲を表現する変数としては、既に GCM の大規模凝結のサブルーチンから得られている各層の雲量(水平被覆率)を外変数として取り込んだ。図1、2に、高度2Km,6Km,9Kmの層に雲を入れたときの雲量1の場合(有限雲の取り込みなし)と、雲量0.2(有限雲取り込みあり)の場合の各層の加熱率の計算結果を示す。但し、雲水量としては一定になるよう有限雲の場合は密度を5倍にした。図1、2に示すように、赤外光、可視光の場合とも有限雲を考慮することにより、晴天大気の場合と、雲量1の場合の中間の値を得た。

b. セミ・ランダム法とランダム法の比較

ランダム法では、各層の晴れ・曇りの場合を考慮し、2の層数乗回の計算をするのに対し、セミランダム法では各層の反射・透過行列に有限雲の効果を取り込むため、約2×層数回の計算で済み、時間計算が大幅に縮小できる。全体的な傾向としては semi-random 法の法が random 法より大きな値を出すことが判明した。誤差は0.04[K/day]とほぼ各層にわたって均一な値となった。これは加熱率自体と比べ 10^{-2} のオーダーである(図3)。

今後は、有限雲を取り入れたモデルの実行結果の解析と、様々な雲の元での観測での放射フラックスの値を比較・検討を進める予定である。

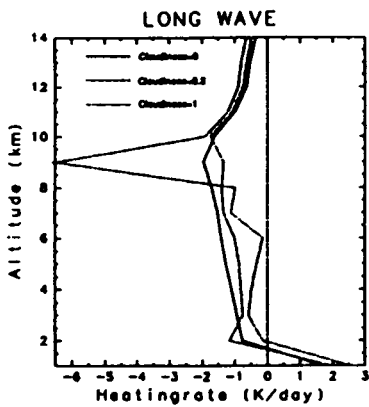


図1 雲量1(有限雲の取り込みなし)と、雲量0.2(有限雲の取り込みあり)の場合の各層の長波加熱率。

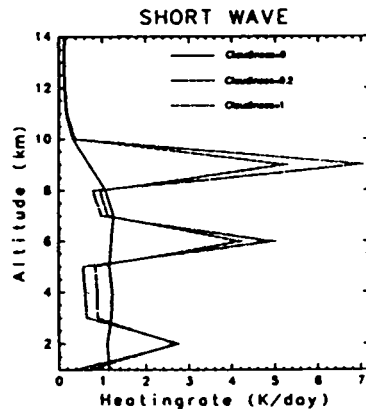


図2 図1と同じ。ただし短波加熱率。

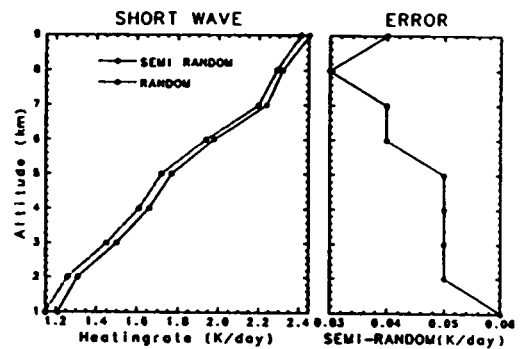


図3 ランダム法とセミランダム法での加熱率の相違。

(2) TOGA COARE データを用いた準2日周期大規模雲システムの詳細解析

CCSR/NIES 気候モデルにおいて、雲は、積雲対流雲と大規模凝結雲との2つの過程で取扱われる。前者は、対流活動に伴う積雲・積乱雲、後者は層雲・巻雲等の層状性の雲を表現する。気候変動問題において、熱帯海洋上のアンビル雲(かなとこ雲)による放射調節の効果の重要性が指摘されている。CCSR/NIES 気候モデルにおいては、アンビル雲は大規模凝結雲として扱われるものであるが、現実にはこの層状性の雲は、必ず水物質の供給源としての活発な積雲対流雲と結合した雲クラスターという形で存在する。本研究においては、このようなアンビル雲と積雲対流雲との関係を適切に表現し得るような気候モデルへの改良を目標として、積雲対流雲と放射性的層状雲との相互関係の解明を目的としている。

本研究では、1992年11月-1993年2月に熱帯太平洋暖水域で展開された、TOGA COARE(熱帯海洋と全球大気プログラム/海洋-大気結合応答実験)観測のデータを生かし、この期間に観測された準2日周期大規模雲システムの詳細解析を行なった。これは、現実大気における数千 km スケールの雲-大気結合システムの構造を明らかにし、モデルで再現され得るべき大規模な大気力学と積雲対流活動、さらには、積雲対流活動とアンビル雲との相互関係を解明するためである。

図4は、観測域の中心を含む経度 $7^{\circ} \times$ 緯度 5° (IFACR)および $19^{\circ} \times 19^{\circ}$ (OSACR)の領域で平均した赤外黒体放射温度の1992年12月の時系列である。気候モデルのグリッドサイズに匹敵する $7^{\circ} \times 5^{\circ}$ スケールで、約2日周期の雲活動変動が顕著である。時空間スペクトル解析の結果、この変動は、東西波長約 30° 、 $\sim 15^{\circ}/\text{day}$ で西進するモード $n=1$ の慣性重力波の特性をもっていることが分かった。

また、大気循環場の変動もこれと一致する構造を示している (図略)。

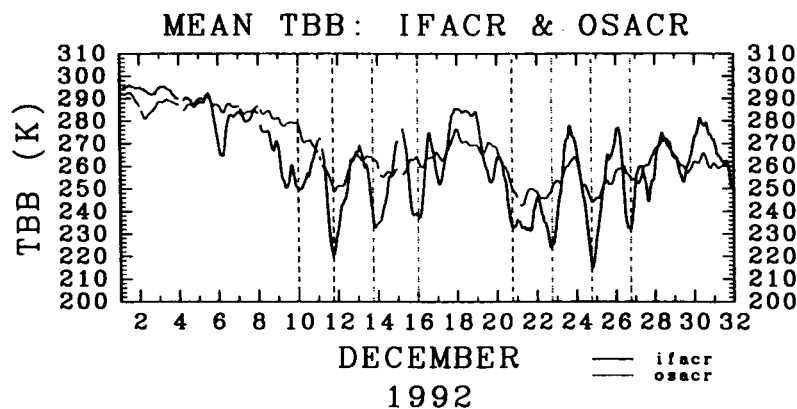


図 4: 観測の中心域で平均した雲のインデックスの時系列. 1992 年 12 月.

次に 4km の高データ分解能を生かした赤外ヒストグラムデータで、このシステムに伴う雲変動の鉛直分布の情報を表したのが図 5 である。-24 RH (RH: コンポジット相対時間) から約 10 時間は、浅い雲頂高度にもっとも多いピクセル密度がみられ、高いものでも 250K (~350hPa) にとどまっている。その後、約 8 時間 (-14 to -6 RH) は 200K 以下の非常に高い雲頂高度のピクセルが観測されるが、中・下層の雲も透けて見えるため、背の高い対流雲が立っている状態であると考えられる。基準時間を挟んで約 12 時間は、上層のアンビルに覆われた状態、その後 +24 RH に向けて、アンビルの衰退が観測される。観測船による 2 台の降雨レーダデータを用いると、前半に対流性の降雨、後半に層状性の降雨を示す。Houze(1977) による 3mm/hour の域値を用いると、弱い層状性の降水の占める割合は、ほぼ 40% となる (図略)。

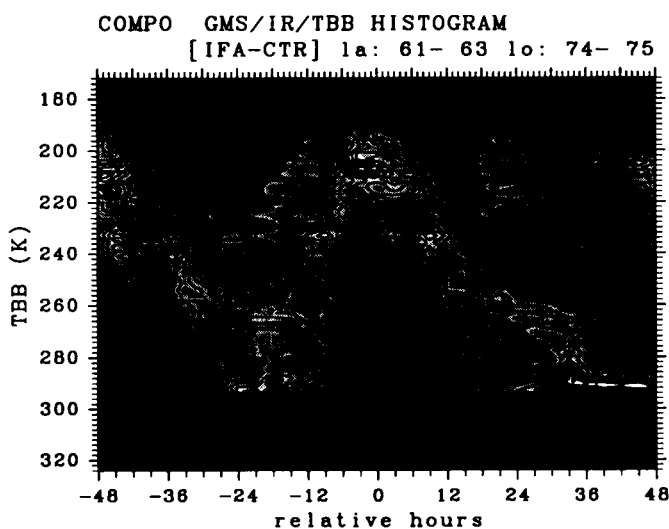


図 5: 赤外ヒストグラムデータを用いた準 2 日周期に伴う雲の鉛直分布の時間変化の様子. 横軸は相対時間.

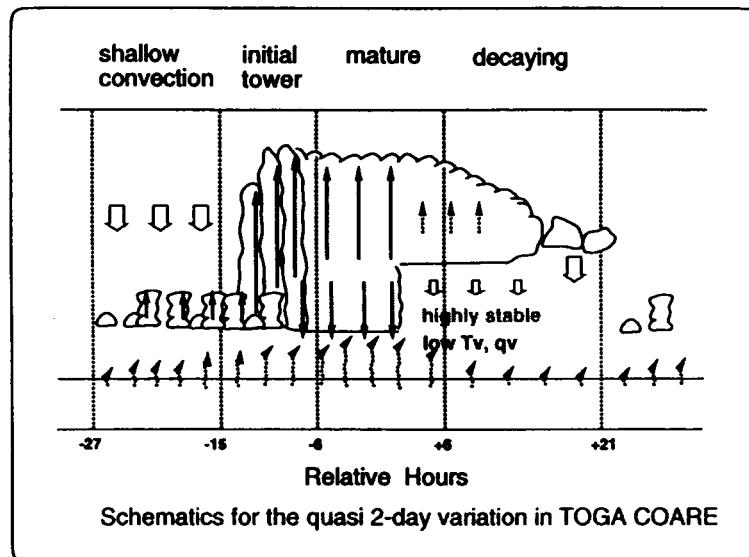


図 6: 準 2 日周期に伴う積雲システムの一生涯の模式図

解析の結果に対応して、準 2 日周期の一生を 4 ステージに分けることができる (図 6)。Shallow Convection Stage では、大規模擾乱の下降流によって、対流が低く抑えられる。中層が湿ってくると、深い対流が立ち (Initial Tower Stage)、その後、アンビルが維持される (Mature Stage) が後半から下層は安定化して対流は立ちにくくなり、雲システムは衰退していく (Decaying Stage)。

本研究では、TOGA COARE(熱帯海洋と全球大気プログラム/海洋-大気結合応答実験) 観測のデータを用いた総合的な解析により、熱帯海洋上の準 2 日周期雲システムに焦点をあて、数千 km スケールの大気擾乱に伴う雲群の構造を調べた。その結果、気候モデルの分解能に匹敵する大規模なスケールに組織化されている力学的な大気擾乱と積雲対流雲・アンビル雲(かなとこ雲)との関係が明らかになった。高分解能の静止衛星ヒストグラムデータを利用することにより、熱帯海洋上の大規模システムについて、過去の研究では得られたことのない詳細な雲群の構造を解明することができた。準 2 日周期変動は、気候値的にも北半球冬期の熱帯太平洋上の雲擾乱として卓越している (Takayabu 1994)。今後、気候モデル上において、雲の役割をより現実的に表現するために、このような大規模力学を伴う積雲対流雲およびアンビル雲の結合した組織化をいかに表現していくかが検討すべき課題となる。

(3) 衛星データを用いた雲の放射特性の推定に関する研究

序章にも記した様に、雲の放射フィードバック効果は、気候変動予測を左右する重要な問題である。雲の効果の予測には、少なくとも雲の短波・長波のトータルの放射強制力(雲の存在による大気上端での下向き放射フラックスの増加分)の気候感度を知らなくてはならない。そのためには、第 1 に雲量の変化の決定要因、第 2 に光学的特性を左右する雲の微物理を知る必要がある。しかしながら、現実の雲についてもこれらの点は十分に把握されていない。

現実の雲の気候値や時間変化を地球規模で把握するための唯一の手段は、衛星隔測によるデータを利用することである。この課題では、ISCCP (International Satellite Cloud Climatoloty Project) による複数衛星の可視赤外観測による雲データ、ERBE (Earth Radiation Budget Experiment) による衛星からの大気上端の放射収支観測データ、軌道衛星 NOAA による可視赤外輝度データ、および精密な放射 1 次元モデルを用いて、雲の放射強制力と光学的特性について全球的に求める手法を開発し、解析を試みた。

① ERBE データおよび ISCCP データによる雲の放射強制力に関する研究

衛星データによる雲の研究が行なわれる過程で、雲の種類や分布する地理によって、放射強制力が異なることが明らかになってきた。特に上空に薄く広がる巻雲については、加熱に働くという説 (Stephens et al.,1990) が出された後、エルニーニョの領域では冷却効果に働いている (Ramanathan & Collins,1991) という指摘がなされ論議を呼んだ。そこで雲の地理的分布と放射強制力の関係について調べた。

a. データと解析方法

大気上端の放射データとして ERBE、雲データとして ISCCP C2 データを用いた。1985 年 2 月から 1990 年 1 月の期間について 12 カ月平均を施し、解析を行なった。雲形分類は、ISCCP C2 データを用い、雲の光学的厚さと雲頂高度のパラメタ領域から求められる (図 7)。「CIRRUS」は、上層の巻雲に対応する。雲の放射強制力は、観測される放射量と晴天時の放射量との差として定義される (下向きが正)。これは、短波放射についての強制力と長波放射についての強制力との和として計算される。

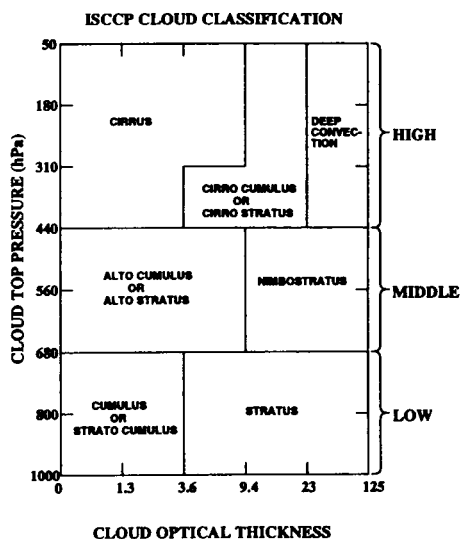


図 7 ISCCP C2 データにおける雲形の分類

b. 結果

放射強制力と場所・雲形との対応を見るために、各グリッドで一番雲量の多い雲形を選び、短波の放射強制力と長波の放射強制力の内訳を調べた (図 8)。重ねられたベクトルは、右方向が長波強制力の正方向、上方向が短波放射強制力の正方向に対応する。白いベクトルは、放射強制力が負 (冷却方向)、濃い色のベクトルは、正 (加熱方向) であることを示す。

全体の傾向として、雲の放射強制力はほとんどの部分で冷却に働いている。特に大陸西岸では寒流

により海面水温が低い上に雲頂高度が低いいため、雲の温室効果が効きにくく、結果として短波の放射強制力が主に作用し、冷却されている。

加熱領域に着目すると、熱帯高温域・砂漠で加熱に働いていることがわかる。砂漠域では放射強制力自体が小さい。これは砂漠が乾燥しており、雲量自体が少ないことを示す以外に、地表面アルベドが非常に高いことからアルベド効果が働きにくくなっていることを示す。そのような中で、地表面気温が非常に高いことから多少低い雲でも温室効果に働きやすく、わずかな雲が加わることにより、砂漠では雲によって地表面が加熱される場合が多い。一方、ベクトルが比較的長く、加熱される領域は、CIRRUS に被われていることが多い。だが、CIRRUS に被われた加熱領域の中でも、短波・長波の放射強制力の相対的な強さは場所によって大きく異なっている。

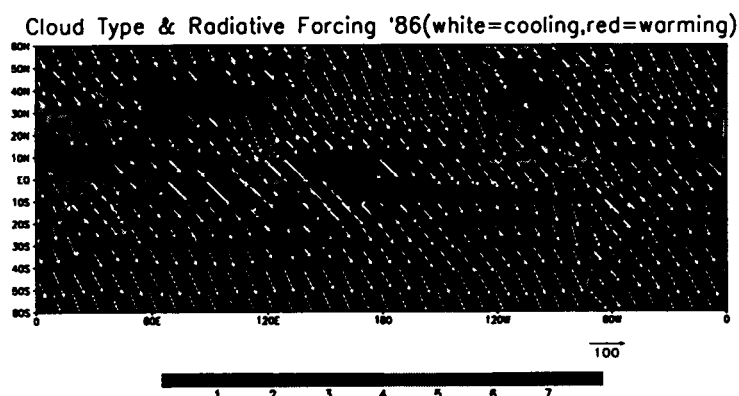


図8 最大雲量の雲形と放射強制力。(雲形: 1:cumulus, 2:stratus, 3:alto cumulus, 4:nimbo stratus, 5:cirrus, 6:cirro stratus, 7:deep convective, ベクトル:放射強制力の長波と短波の内訳。→:長波強制力の正方向, ↑:短波強制力の正方向。)

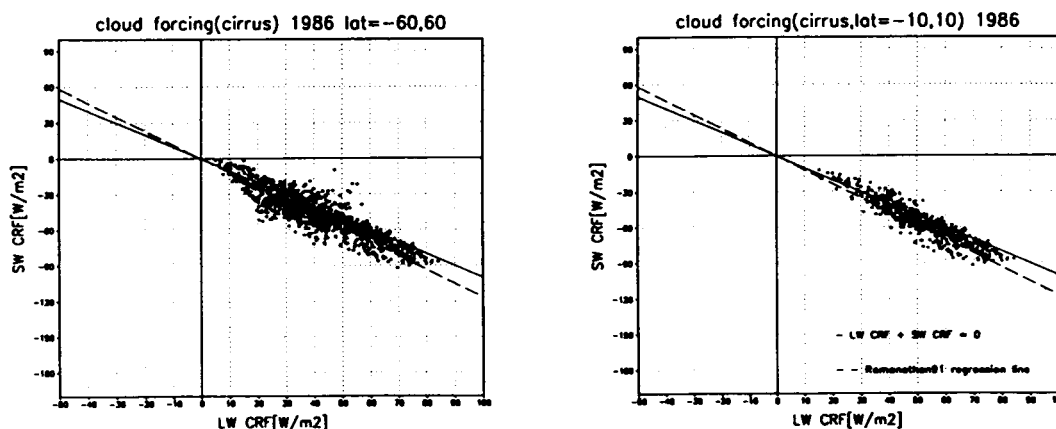


図9 CIRRUS の放射強制力。(a) 北緯 60 度-南緯 60 度, (b) 北緯 10 度-南緯 10 度。

図9(a)は北緯60度-南緯60度の範囲のCIRRUSが支配的な領域で、短波と長波の放射強制力の効き方を示す。CIRRUSの放射強制力は非常に中立に近く(実線)、短波・長波の強制力の大きさの幅が広いことがわかる。その中で一部加熱に作用している。破線はRamanathan & Collins(1991)の回帰直線である。一方、図9(b)は、北緯10度-南緯10度の熱帯域でのCIRRUS領域での放射強制力

を示す。熱帯域では雲は非常に中立に近い。CIRRUS の下に対流性の雲があり強い冷却効果を働かせているにも関わらず、そこでの放射強制力は図に示されるように CIRRUS 領域の中でも特に中立である。

熱帯の大気は水蒸気を豊富に含んでおり、深い対流活動による雲が生成している。ここで見られる CIRRUS はかなとこ雲のきれはしと考えられる。そのため CIRRUS が卓越している場所であっても、その下には対流性の厚い雲が存在している。SST 高温域で雲量×光学的厚さが厚くなっているのは、対流活動の頻度が高いことの表れと考えられる。このような高い対流性の雲により、熱帯高温域における雲の放射強制力は、アルベド効果も強く、温室効果も強くなる。実際の効果は海面水温と、雲の厚さの微妙なバランスによって加熱か冷却かが決まる。加熱されるには、海面水温が高温であり、かつ対流活動の端にあって、雲の光学的厚さが薄いことが必要である。対流活動の端で、雲が薄くても、海面水温が少しでも下がってしまうと、雲は冷却に効く。

c. 結論

雲の放射強制力は地理特性と強い関わりを持っている。砂漠では一般に雲の放射強制力は小さいが、地表面自体の気温・アルベドの高さによって保温効果に働くところが多いことが見いだされた。CIRRUS の放射強制力は非常に中立に近く、特に熱帯域の CIRRUS の放射強制力は力学的なバランス機構が働いていることも考えられる。

② ISCCP データと高精度放射モデルを用いた雲型別放射特性の解析

前節で用いた ERBE の観測は、雲の放射効果の積分値である。一方先にも述べた様に、雲のフィードバックは、雲の光学的特性の変化や大気大循環などの力学過程による雲型別雲量変動にも左右される。従って気候モデルにおける雲の効果の評価するためには、実際に雲がどのようにして生成し、どのような雲がいかなる放射効果を持つかを知る必要がある。そこで本研究では、毎日の ISCCP 雲データを放射モデルに組み込むことにより、現実の雲型別の放射強制力を計算する手法を開発した。

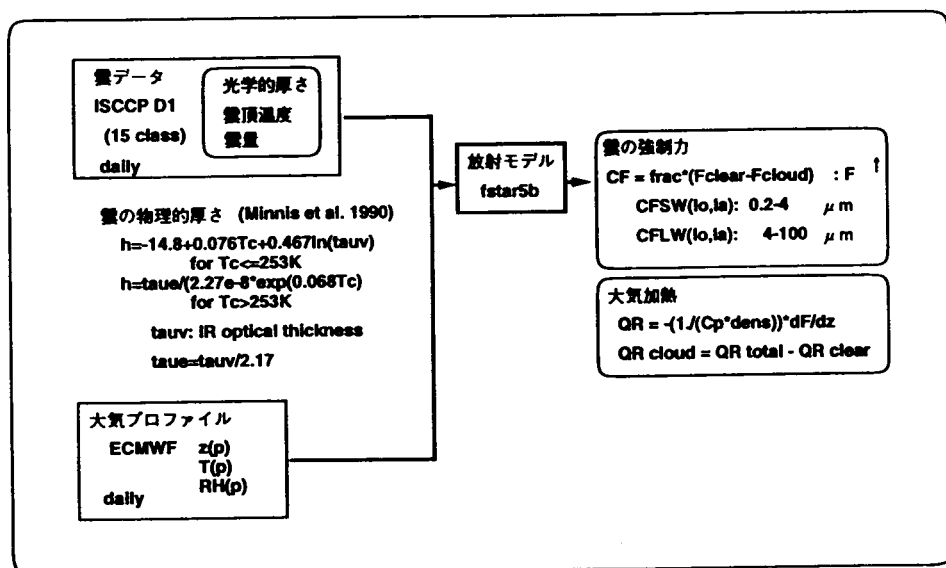


図 10: 計算手順

a. 計算手法

図 10 に計算手順を示す。ISCCP D1 データ (2.5° 格子、3 時間毎) によって分類された 15 種類の雲

型それぞれについて、雲の光学的厚さ、雲頂温度、雲量をデータとして用いる。雲の物理的厚さは、Minnis et al.(1990)の方法で与える。大気鉛直構造は、ECMWFの格子点データから、気温、高度、相対湿度を放射モデルの鉛直50層にスプライン内挿して用いる。以上のデータを入力として、15種類の雲それぞれについて、精密な放射モデル fstar5b(中島他)を用いて、放射フラックスを計算する。

b. 解析結果

西太平洋暖水塊域での1992年12月の雲形別の放射強制力の時間変化を図11に示す。この月の中旬には、Madden-Julian振動と呼ばれる大規模な雲システムがこの領域を通過した。全ての雲型の雲による放射強制力(図11(a))は、この雲システムの通過に伴って、短波・長波で大きな振幅を持つことがわかる。雲型別に調べると、深い対流活動に伴う厚いアンビル(図11(b))は、短波・長波の振幅の大部分を担うが、トータルではほとんどキャンセルしてほぼ中立になっている。一方、光学的厚さの小さい巻雲(図11(c))が、トータルの加熱のほとんどを担っている。また、中層雲・下層雲の効果(図11(d)(e))は冷却方向であるが、この領域では比較的小さい(注:縦軸のスケールは拡大している)。ただし、この期間、上層雲が卓越して中・下層雲を覆っていたため、中・下層雲の効果を過小評価している可能性がある。

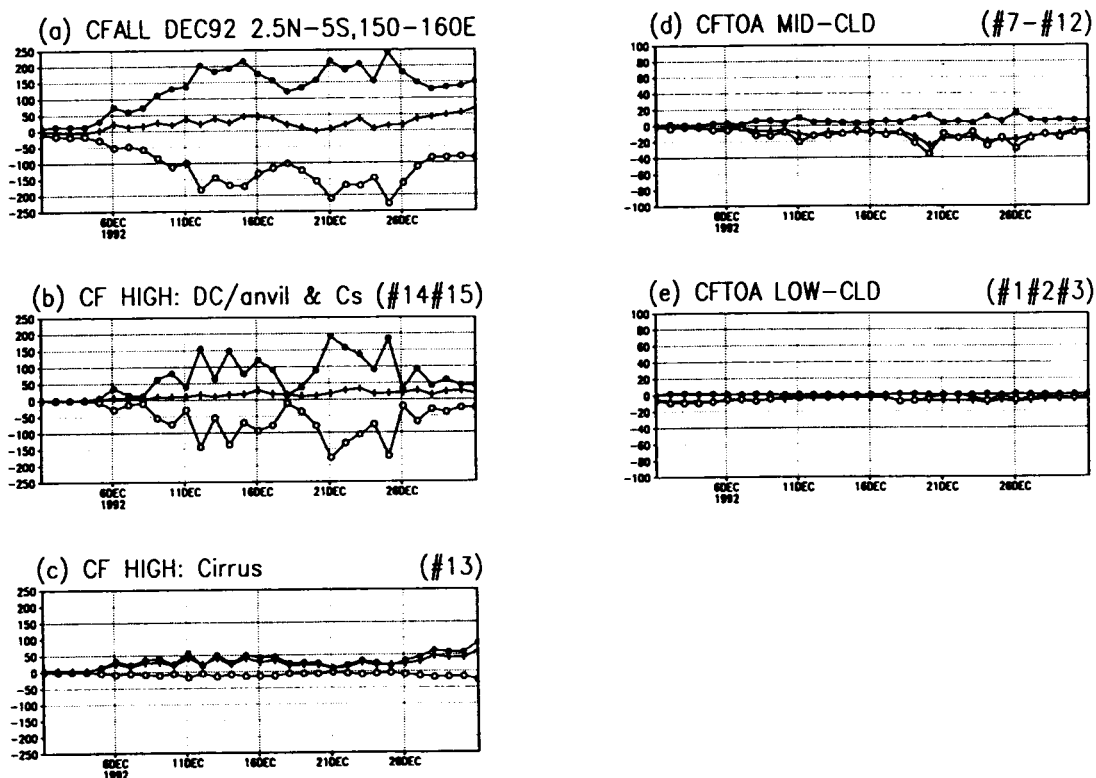


図 11: 西太平洋域の大気上端での雲形別放射強制力の時系列 ($W m^{-2}$). 1992 年 12 月. (a) 全雲型、(b) 厚い上層雲、(c) 薄い上層雲(巻雲)、(d) 中層雲、(e) 下層雲による 長波:●、短波:○、トータル:+ の放射強制力.

図 12(a) は、1992 年 11 月-12 月の西太平洋暖水塊域における上層雲の雲型別放射強制力である。光学的に薄い巻雲は加熱、厚いかなとこ雲のような上層雲は中立に近い冷却傾向を持つ。トータルとしては、この解析域の上層雲は加熱を示す (図 12(b))。この結果は、ERBE の観測によるこの地域の雲放射強制力の加熱傾向と一致するが、やや過大である。これは、下層雲の効果が計算に入っていないことにもよるが、衛星可視赤外観測では、雲の重ね合わせの評価が不十分であることも考慮しなければいけない。

今後、雲の微物理特性や力学場との関係の把握を含めて、全球的な雲の放射効果の気候値と時間変化解析をさらに精密化していくことが重要である。

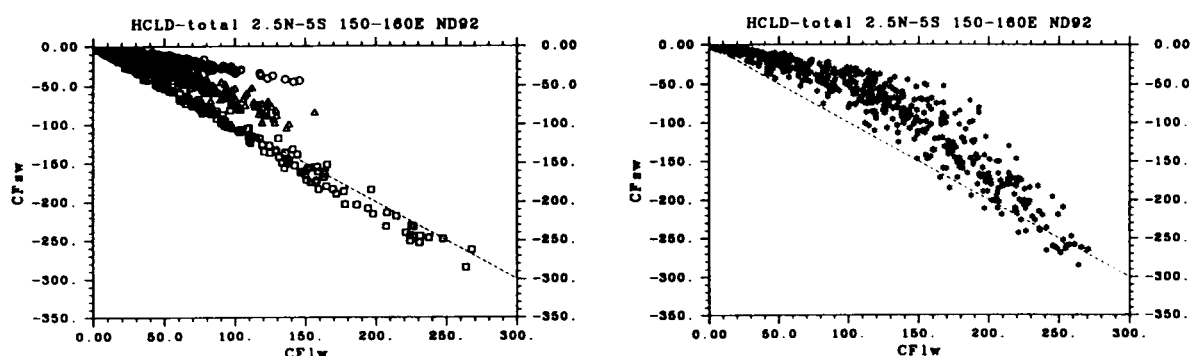


図 12: 西太平洋暖水塊域の 1992 年 11-12 月の上層雲放射強制力の毎日の値。横軸は長波、縦軸は短波 (W m^{-2})。 (a) 雲型別: ○巻雲, △巻層雲, □深い対流雲, (b) 上層雲合計, ●は全期間全領域の平均値。破線は長波+短波=0 の中立線。

③ AVHRR 赤外チャンネルによる上層雲の光学的特性の導出に関する研究

雲の放射収支に与える影響は、雲の光学的厚さや粒径などの微物理特性や、雲頂高度などにより様々に変化する。また、これら諸量はエアロゾルや海面水温などの雲と相互作用をする環境によって変化する。例えば雲の放射収支に対するフィードバックは粒径 $24\mu\text{m}$ を境に、これよりも小さければ負のフィードバック、大きければ正のフィードバックをもたらす (Stephens et al., 1990)。また、赤道域では短波と長波の雲放射強制力はほぼ相殺し、そのどちらが優位になるかは海面温度により変化する上層雲量によって決まり、それによって逆に海面温度が安定化されている可能性がある (Ramanathan and Collins, 1991)。

したがって、正確な雲のパラメタリゼーションを行うためには、これら雲微物理量の全球にわたる分布を知らなくてはならない。現在は人工衛星からのリモートセンシングによって、地球規模の観測が可能になり、雲に関する多くの情報が得られるようになった。しかし、放射収支に対する影響が特に複雑である氷晶雲については、全球の分布すらよく分かっていない。

そこで、本研究では人工衛星の赤外チャンネルを利用して上層雲の光学的厚さと雲粒の半径等の微物理特性を推定する手法を開発し、これを応用して実際のデータにより全球解析を行うことを最終目的とした。NOAA 衛星に搭載された AVHRR 放射計の $10.8\mu\text{m}$ チャンネルと $12.0\mu\text{m}$ チャンネルによる Split Window Method に、 $3.7\mu\text{m}$ チャンネルから得られる情報を加えて解析を行った。

a. 規格化された Split Window 法の開発

Split Window 法は赤外波長窓領域 2 チャンネルの輝度温度差が厚い雲や晴天域では小さく、巻雲では大きくなること、および、輝度温度が雲頂高度に依存する性質を利用して雲の特性を調べる方法である (Inoue, 1987; Inoue, 1989)。

本研究では、まず、気象衛星 NOAA に搭載されている AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) の $10.8\mu\text{m}$ 、 $12.0\mu\text{m}$ 、 $3.7\mu\text{m}$ の 3 チャンネルの輝度温度 (以下 T10.8, T12.0, T3.7 と記す) について精密な放射伝達の数値シミュレーションを行い、全球の雲の光学的特性を解析するために適していると考えられる規格化された Split Window Method を開発した。

数値計算には汎用放射伝達パッケージ rstar5b (Nakajima et al., 1996) を用いた。放射伝達計算は Nakajima and Tanaka (1983, 1986, 1988) のアルゴリズムに基づき、大気-海洋系の取り込み、Discrete Ordinate 法、Adding 法、TMS 法によって高速かつ正確な放射輝度計算が可能になっている。ガス吸収モデルは、LOWTRAN-7 (Kneizys et al., 1986) の Narrow band 近似が用いられている。

まず、氷晶雲の場合について、1. 雲頂高度、2. 地表面温度、3. 雲量、4. 雲の幾何学的熱さ、5. 射出角、6. 大気プロファイルの諸量を変化させ、T10.8-T12.0、T3.7-T10.8 の 2 組のスプリットについて、シミュレーションを行った。その結果、T10.8-T12.0 の値が T10.8 に対して描くアーチは、様々な条件の変化に対して、非常に相似性が良く、地表面と雲頂との輝度温度差によって規格化されるため、雲の有効粒径の効率のよい検出に適していることがわかった。一方、T3.7-T10.8 のアーチは、雲頂温度側の直線部分の傾きが急で、雲が光学的に厚くなると値が急速に小さくなるため、雲頂温度の検出に適していることが分かった。また、雲の光学的厚さの情報は、T10.8 のみではほぼ決定できることが分かった。

b. 解析データとアルゴリズム

赤外輝度温度としては、NOAA/AVHRR 観測データより作成された GAC (Global Area Coverage) データから、 $10.8\mu\text{m}$ 、 $12.0\mu\text{m}$ 、 $3.7\mu\text{m}$ の 3 チャンネルを用いた。全球解析のためには一日 14 周分のデータを処理し、一枚の全球セグメントデータを作った。輝度温度差によるアーチを作るために、解析対象とする $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ の格子に対し 100 個のデータを格納した。地表面温度と圏界面温度は客観解析データから得た。

規格化された Split Window Method を雲の全球解析に応用するためのアルゴリズムを開発した。概要を以下に示す。

(i) T10.8 と T3.7 による雲頂温度の決定：一つの格子の 100 個のデータを T10.8-T3.7 のアーチに重ねた例を図 13 に示す。まず、100 個のデータの中から T10.8 の最低値を雲頂温度候補とし、T3.7-T10.8 によって雲頂温度であるかどうかを判断して、雲頂温度と判断された輝度温度で全球の雲頂温度のマップを作る。雲頂温度不明の格子については、自分の周囲のデータから雲頂温度を決定する。

(ii) T10.8 と T12.0 による光学厚さと有効粒径の決定 (図 14 参照)：有効粒径は、T10.8-T12.0 の最大

値を雲頂温度と地表面温度によって規格化し、規格化されたテーブルと比較して求める。光学的厚さは、1ピクセル内の100個のデータのT10.8を平均し、それをテーブルと比較して求める。

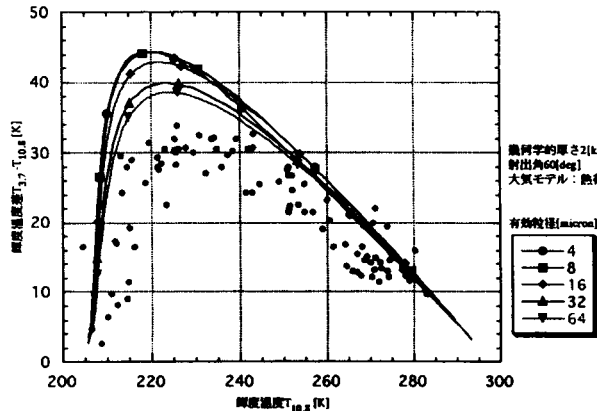


図 13: 様々な有効粒径についての T3.7-T10.8 の T10.8 に対するアーチ。1 格子より得られた 100 個のデータの例を重ねる。

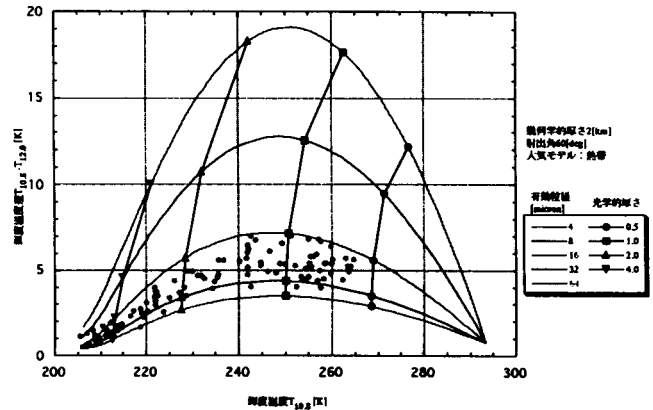


図 14: 様々な有効粒径についての T10.8-T12.0 の T10.8 に対するアーチ。1 格子より得られた 100 個のデータの例を重ねる。

c. 全球解析と考察

前節で述べたアルゴリズムに従って氷晶雲の全球解析を行った。1990 年 1 月 17 日の解析結果を図 15 に示す。積雲活動が盛んな西太平洋熱帯域では、雲頂高度が高く、光学的に厚い雲が多い。またその周辺では外側に向かって光学的に薄い雲が流れ出している。中・高緯度では前線に伴う光学的に厚い氷晶雲が多く存在している。また、南米大陸上空の氷晶雲も風に乗って流れ出ていることがわかる。熱帯では一カ月を通して同じ領域で盛んに氷晶雲が発生しているといえる。

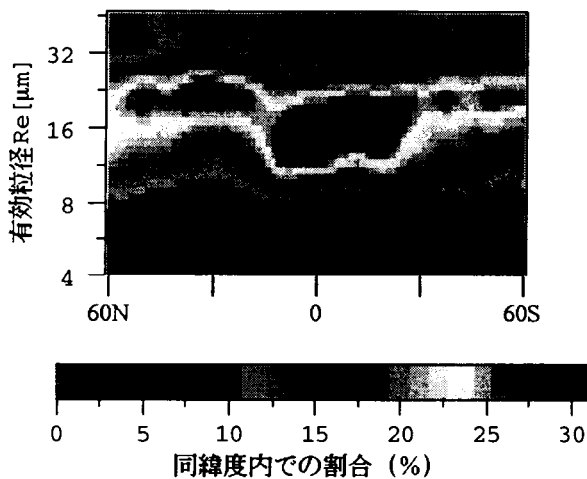


図 16: 有効粒径の緯度別分布。縦軸は有効粒径、横軸は緯度。同一緯度に現れた粒子全体数に対する各粒径の個数分布の割合を示す。

図 16 に有効粒径の緯度別分布を示す。中・高緯度と比べ熱帯では粒径が小さい傾向が強いことがわかる。熱帯の粒径は 12-22 μm に多く分布し、中・高緯度では 18-24 μm に分布している。これは、熱帯と中・高緯度での雲システムの違いを示している。熱帯では強い対流によって一気に圏界面付近まで持ち上げられた水蒸気が氷晶となるので十分に成長する時間が無いのに対し、中・高緯度では前線に伴い徐々に高度を増した水蒸気がゆっくりと成長するためと考えられる。

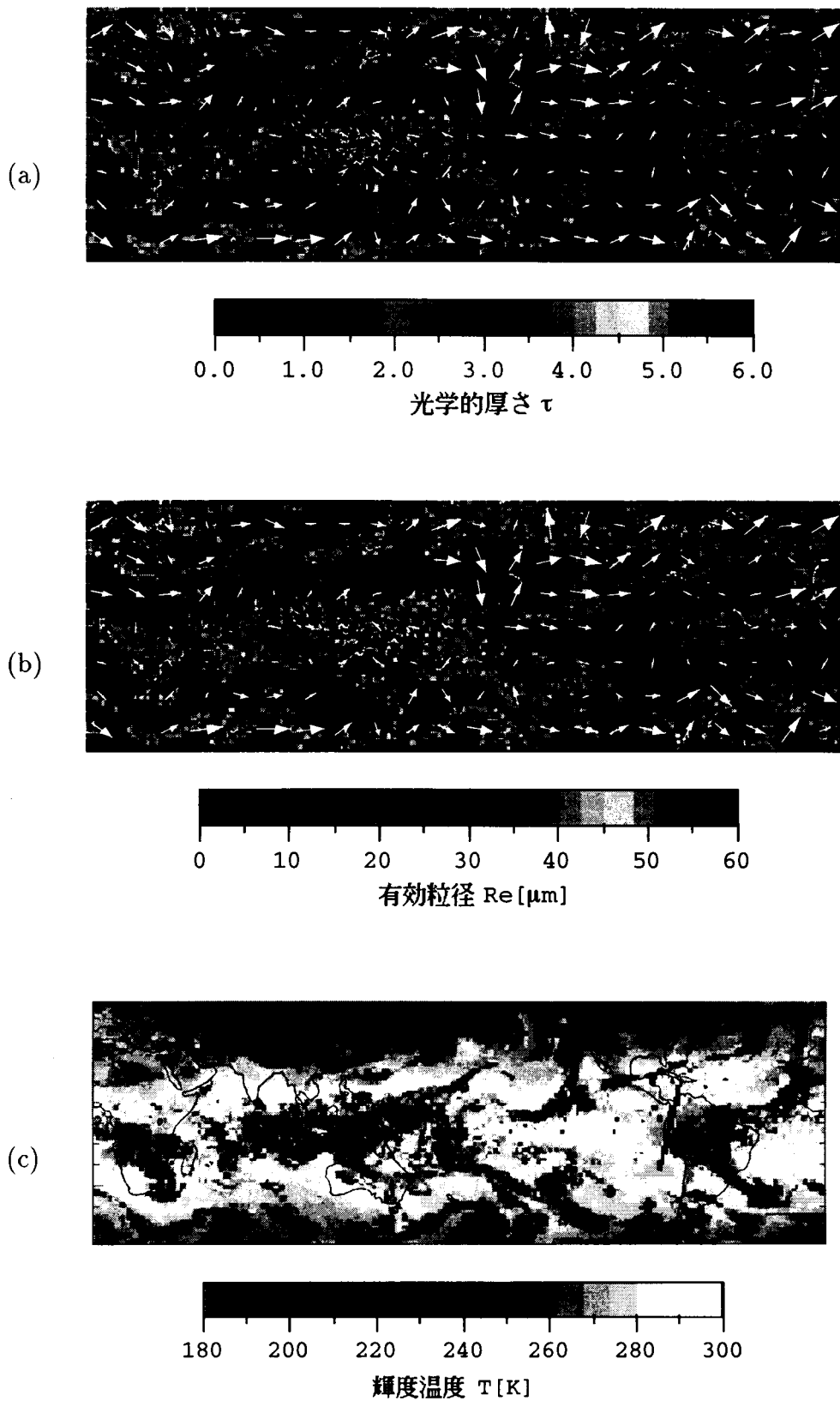


図 15: 氷晶雲の全球解析結果 (a) 光学的厚さ (b) 有効粒径 (c) 赤外チャンネルによる輝度温度. 共に 1990 年 1 月 11 日の解析結果. 参考のために客観解析データより 250 hPa での風の場を示してある.

図 17 に有効粒径の雲頂温度との関係を示す。雲頂温度が低い熱帯では $20\mu\text{m}$ 以下が多く、雲頂温度が高くなるにつれて粒径が大きくなる傾向がある。この有効粒径の雲頂温度依存性は観測値の傾向と良く一致している。230K 付近では氷晶の形が円柱型から弾丸集合型に変化するため、有効粒径が大きく変化している。図 18 には雲頂温度に対する光学的厚さの分布を示す。ここに示したように中-高緯度の雲頂温度が高い氷晶雲の光学的厚さは、熱帯の低温の氷晶雲に比べ厚い傾向にあり、210K と 230K の雲では約 25% 増加している。

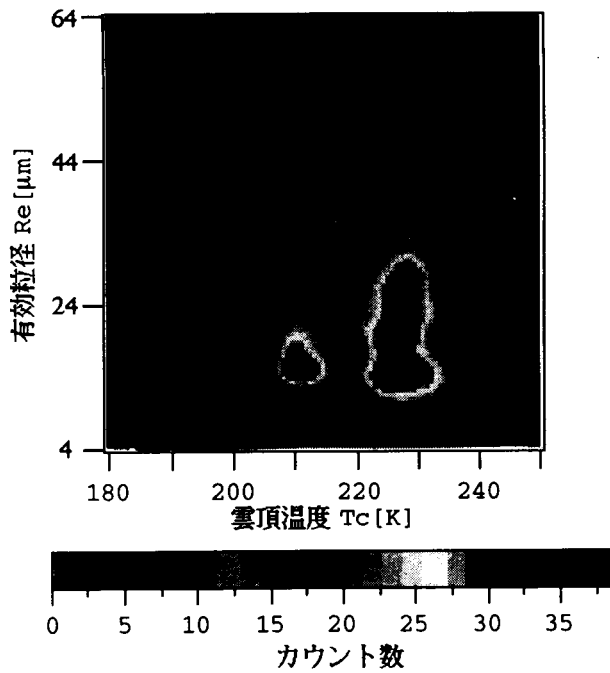


図 17: 雲頂温度に対する有効粒径の分布. 1990 年 1 月 11 日-15 日の 5 日間の積算出現数.

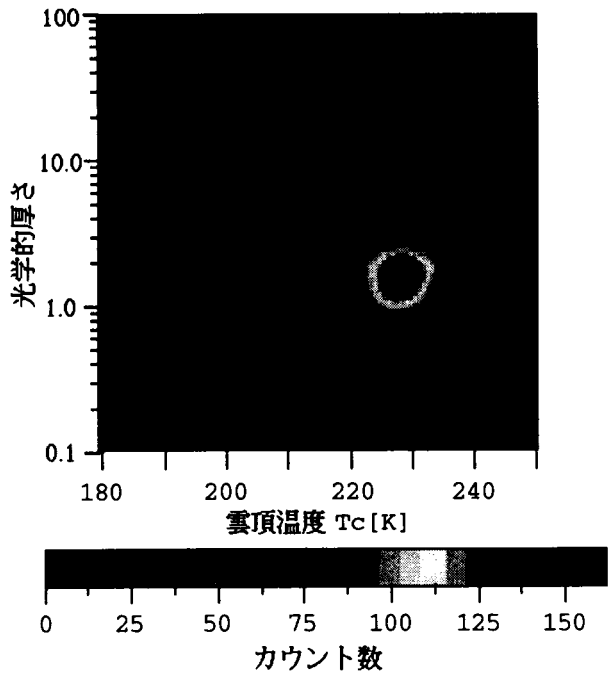


図 18: 雲頂温度に対する光学的厚さの分布. 1990 年 1 月 11 日-15 日の 5 日間の積算出現数.

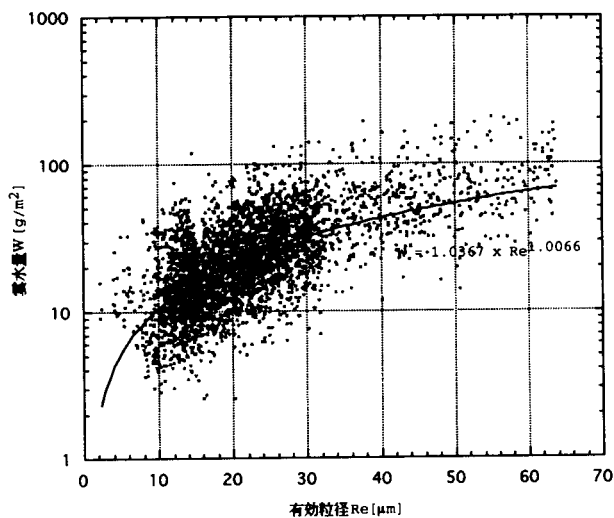


図 19: 有効粒径に対する雲水総量の分布. 1990 年 5 月 11 日の分布。

図 19 に有効粒径と気柱雲水量の分布を示す。有効粒径が大きくなるにつれて粒子の落下速度が

増し、雲水総量の増加が飽和する傾向が現れている。

中島(1996)によると、雲の微物理量を反映した高層雲に対するフィードバックパラメタは次のように書くことができる。

$$\beta_c = 0.114n\tau_c(1 - \frac{24.5}{r_e})1.06(1 - \epsilon)\sigma(T_c^4 - T_i^4) = \eta[\frac{(1-\alpha_i)(1-\alpha_c)}{1-\alpha_i\alpha_c}]^2 Q \frac{dT_c}{dT_i}$$

この式によると、フィードバックパラメタの符号は $\frac{dT_c}{dT_i}$ の符号と有効粒径 r_e が $24.5\mu\text{m}$ より大きいかどうかによって決まることがわかる。

今回の解析によると、赤道では有効粒径は $12\mu\text{m}$ から $22\mu\text{m}$ に多く分布し、中-高緯度では $18\mu\text{m}$ から $24\mu\text{m}$ に多く分布している。赤道での粒径は上記の $24.5\mu\text{m}$ よりもかなり小さい部分に分布しているため、このフィードバックパラメタの粒径依存の部分は、大きく負に振れている。したがって、熱帯の氷晶雲は中-高緯度のものよりも気候に対して大きなインパクトを与えている可能性が大きい。

今後は、より多くのチャンネルを持った衛星データにここで開発したアルゴリズムを応用することにより、高層雲の気候への影響を知るために必要な微物理量のより高精度な導出が望まれる。

4. まとめ

雲のフィードバック効果は、気候変動予測の結果を左右する重要な問題である。雲の効果の予測には、雲の短波・長波のトータルの放射強制力(雲の存在による大気上端での下向き放射フラックスの増加分)の気候感度を知らなくてはならない。そのためには、第1に雲量の変化の決定要因、第2に光学的特性を左右する雲の微物理を知る必要がある。しかしながら、現実の雲についてもこれらの点は十分に把握されていない。そこで、本課題では様々な衛星データと高精度な次元放射伝達モデルとを利用して、現実大気中の雲のフィードバック効果を理解する上での様々な不確定要素に取り組む研究を行なった。これにより、気候モデルにおける雲の取扱を評価し、改良を図ることを目指した。主な成果を以下にまとめる。

(1) 大気放射コードにおける有限雲の取り扱い、放射収支を正確にモデル化するために非常に重要な問題である。そこで有限雲を放射コードに組み込み、その感度解析を行った。有限雲の取り扱い方法としてよく知られているランダム法は、計算速度の面で気候モデルに組み込むには問題がある。本研究では同様な計算をより短時間で行うセミ・ランダム法を開発し、放射コードに組み込むことに成功した。その結果、従来のランダム法に比較して計算時間が大幅に縮小できることが判明した。

(2) TOGA COARE(熱帯海洋と全球大気プログラム/海洋-大気結合応答実験)観測のデータを用いた総合的な解析により、熱帯海洋上の準2日周期雲システムに焦点をあて、数千 km スケールの大気擾乱に伴う雲群の構造を調べた。その結果、気候モデルの分解能に匹敵する大規模なスケールに組織化されている力学的な大気擾乱と積雲対流雲・アンビル雲(かなとこ雲)との関係を明らかにした。高分解能の静止衛星ヒストグラムデータを利用することにより、熱帯海洋上の大規模システムについて、過去の研究では得られたことのない詳細な雲群の構造を解明することができた。

(3) 月平均の雲放射データ(ERBEおよびISCCP C2)を用いて、雲による放射強制力の解析を行った。これにより、地理的特性による雲の放射強制力の相違が明らかになった。サーモスタット効果が議論されている熱帯域の上層巻雲については、非常に中立に近い放射強制力を持ち、力学的なバランス機構が働いていることが示唆された。

(4) ISCCPによる雲の光学的特性のデータを精密な放射モデルにとりこみ、雲型別の雲の放射効果

を推定する手法を開発し、TOGA COARE 期間の実際のデータによる計算を行った。この方法での解析により、(2)の結果として示したような大規模大気擾乱に伴う雲群のライフサイクルと雲の放射効果とを関連づけることが出来る。従って、雲の放射効果と積雲対流の大規模組織化の力学的作用との相互作用について気候モデルを評価する際に有効である。

(5) 赤外チャンネルを用い、上層雲の雲微物理特性(有効粒径および光学的厚さ)の推定量を求めるアルゴリズムについて研究した。上層雲が存在した場合に人工衛星が受ける放射輝度について、精密な放射伝達モデルによる数値シミュレーションを行い、赤外窓領域2波長での輝度温度を利用した従来の Split Window 法を改良した NSW 法(規格化した Split Window 法)を開発した。この方法は様々な雲頂高度・地表面温度に対しても適用可能であり、また、近赤外波長も併用することで、より精度の高い解析が可能となった。さらにこの解析アルゴリズムを実際の NOAA 衛星の AVHRR(高性能高分解能放射計)観測による赤外3チャンネルデータに適用し、上層雲を構成する氷粒子の有効粒径および光学的厚さの全球解析を行い、これらの量の緯度依存性や雲頂温度依存性を調べた。その結果得られた知見は、地球の温暖化に対して、熱帯の上層雲が中・高緯度のものよりも大きな役割を果たしていることを示唆している。

5. 考察

雲の気候に対するフィードバック効果を理解するためには、現在の知見において様々な不確定要素が残されている。本課題では、近年蓄積されてきた様々な衛星隔測データや精密な放射伝達モデルを利用して、雲システムの構造、および雲の放射特性を解明するための手法開発および解析研究を行った。また、気候モデルでの雲の取扱に関する改良も行なった。

その結果、大規模循環や地理的特性による雲の放射効果の相違、雲の光学的特性、雲の大規模組織化に伴う放射効果の時間変化について、従来より詳しい解析が可能となった。また、これらの手法を用いた解析により、現実の雲の放射効果を定量的に把握できることを示した。ただし、個々の衛星隔測データは、例えば可視・赤外輝度データが雲の重なりの情報を持たない等、それぞれに不可避の短所を伴っている。それを補うには、複数のセンサーのデータを同時に使用した解析や複数の手法間の比較解析も必要である。今後は、その点を考慮すると共に、これらの手法を用いて、さらに長期間の雲の放射特性を解析し、大循環の力学と雲の効果とがいかなる機構において相互作用するかについての知見を深めることが重要である。

6. 参考文献

- Cess, R. D. et al. 1990: Intercomparison and interpretation of climate feedback processes in 19 atmospheric general circulation models. *J. Geophys. Res.* **95**, 16601-16615.
- Cess, R. D. et al. 1996: Cloud feedback in atmospheric general circulation models: An update. *J. Geophys. Res.* , .
- Fu, R. et al. 1992: Cirrus-cloud thermostat for tropical sea surface temperatures tested using satellite data. *Nature* **358**, 394-397.

- Houze, R. A., Jr., 1977: Structure and dynamics of a tropical squall-line system. *Mon. Wea. Rev.*, **105**, 1540-1567.
- Inoue, Toshiro, 1987: A cloud type classification with NOAA 7 split-window measurements, *J. Geophys. Res.*, **92**, 3991-4000.
- Inoue, Toshiro, 1989: Features of clouds over the tropical Pacific during northern hemisphere winter derived from split window measurements, *J. Meteor. Soc. Japan*, **67**, 621-637.
- IPCC, 1995: *Climate Change 1995: The science of climate change*, J.T. Houghton, L.G. Meria Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell (eds). Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Kneizys, F. X., E. P. Shettle, L. W. Abreu, J. H. Chetwynd, G. P. Anderson, W. O. Gallery, J. E. A. Selby, and S. A. Clough, Users Guide to LOWTRAN 7, AFGL-TR-88-0177, AFGL, Hanscom AFB, MA 01731, 1986.
- Lau, K. M., C.-H. Sui, M.-D. Chou and W. K. Tao, 1994: An inquiry into the cirrus-cloud thermostat effect for tropical sea surface temperature. *Geophys. Res. Letter*, **21**,12, 1157-1160.
- 中島 映至, 1996: 温暖化のメカニズム. 大気水圏から見た地球温暖化(半田暢彦編), 名古屋大学出版会, 9-67.
- Nakajima, T. and M. Tanaka, 1983: Effect of wind-generated waves on the transfer of solar radiation in the atmosphere-ocean system. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **29**, 521-537.
- Ramanathan, V. and W. Collins 1991: Thermodynamic regulation of ocean warming by cirrus clouds deduced from observations of the 1987 EL Nino. *Nature*, **351**, 27-32.
- Rossow, W. B. and F. Moshier, E. Kinsella, A. Arking, M. Desbois, E. Harrison, P. Minnis, E. Ruprecht, G. Seze, C. Simmer and E. Smith, 1985: ISCCP cloud algorithm intercomparison, *J. Climate. Appl. Meteor.*, **24**, 877-903.
- Stephens, G. L., S.-C. Tsay, P. W. Stackhouse, Jr. and P. J. Flatau, 1990: The relevance of the microphysical and radiative properties of cirrus clouds to climate and climatic feedback. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 1742-1753.
- Wallace, J. M. 1992: Effect of deep convection on the regulation of tropical sea surface temperature. *Nature* **357**, 230-231.

7. 国際共同研究等の状況

準 2 日周期変動の解析については、米国 NASA/GSFC の Climate and Radiation Branch (Dr.

K.-M. Lau) との共同研究である。

8. 研究発表の状況

講演発表

Takayabu, Y.N. and T.Nitta: 1994, Seasonal variations of synoptic-scale cumulus convective system over the equatorial Pacific Ocean, International Conf. Monsoon Variability and Prediction.

高萩 縁, K.M. Lau, C.H. Sui, 1995: TOGA-COARE 観測における準日周期大気-雲システム, 第5回 TRMM 研究会.

高萩 (中込) 縁, K.-M. Lau and C.-H. Sui, 1995: TOGA-COARE 観測機関の準2日周期変動, 日本気象学会 1995 年秋季大会.

Takayabu, Y. N., K.-M. Lau and C.-H. Sui: 1995, Quasi two-day wave observed during TOGA COARE., , UCLA-Tokyo Univ. workshop, Honolulu

対馬 洋子, 中島 映至, 1996: 衛星データを用いた雲の放射強制力に関する研究, 日本気象学会 1996 年春季大会.

高萩 縁, 熱帯海上における雲型別放射強制力の試算, 1996, 日本気象学会 1996 年秋季大会.

論文発表

○ Takayabu, Y., 1994: Large-scale cloud disturbances associated with equatorial waves. Part II: Westward-propagating inertio-gravity waves, *J. Meteorological Society of Japan*, 72, 451-465.

対馬 洋子, 1996: 衛星データと大気大循環モデルを用いた地球の放射収支に関する研究, 東京大学修士論文

○ Takayabu, Y.N., K.M. Lau and C.-H. Sui, 1996: Observation of quasi-two-day wave during TOGA COARE, *Mon. Wea. Rev.*, 124, 1892-1913.

片桐 秀一郎, 1997: AVHRR 赤外チャンネルによる上層雲の光学的特性の導出に関する研究, 東京大学修士論文

謝辞

本研究を遂行するに当たっては、東京大学気候システム研究センターの対馬洋子さん、片桐秀一郎さん、日暮明子さんと 宇宙開発事業団の中島孝さんに大変お世話になりました。