

B-5 気候モデルによる気候変動評価に関する研究

(1) 気候モデルの開発・改良に関する研究

研究代表者

国立環境研究所

鵜野 伊津志

環境庁 国立環境研究所

大気圏環境部

大気物理研究室

光本 茂記, 沼口

敦, 菅田 誠治

(委託先) 東京大学 気候システム研究センター

杉ノ原伸夫, 高橋

正明, 熊倉 俊郎,

中島 映至, 山中 康裕

平成3年度～平成5年度合計予算額 37,007千円

(平成5年度予算額 12,252千円)

[要旨]

数年から数百年程度の時間スケールでの気候変化のメカニズムを研究し、その定量的評価に用いるための、共同利用可能な気候モデルを作成することを目的として、大気および海洋の大循環モデルの開発・改良を中心とした研究を行った。大気放射過程、水循環過程等に関する、物理的基礎に基づくパラメタリゼーションを開発することにより、気候変動研究に使用可能な大気大循環モデルを構成した。さらに、高精度・高効率の全球海洋大循環モデルを開発した。これらのモデルに現実的な境界条件を与えて走らせた結果、観測された気候値を良く再現することが可能であり、世界の最先端レベルに比肩できるようなモデルであることが確認された。さらに、これらと組み合わせて気候モデルの構成要素となる陸面モデルと海水モデルの開発を試み、その性質を調査した。

キーワード

気候モデル, 大気大循環, 海洋大循環, 地表面過程, パラメタリゼーション

1 序

地球温暖化をはじめとする気候変動を定量的に評価するためには、気候システムの力学とエネルギー・物質循環を表現する良質の数値モデルが必要である。そこで、数年から数百年程度の時間スケールでの気候変化のメカニズムを研究し、その定量的評価に役立つための共同利用可能な気候モデルを作成することを目的として、この研究を行った。

現在、二酸化炭素が次第に増加する場合の気候変動を、海洋の変動も含めて定量的に評価することの可能な大気海洋結合気候モデルは、米国地球流体力学研究所 (GFDL), 米国国立大気研究センター (NCAR), 英国気象局ハドレーセンター, ドイツ・マックスプランク気象研究所などで用いられており、日本の気象研究所でも開発が進められている。また、気候モデルの大気部分を構成する大気大循環モデルは、これらを含めて約10の機関において開発が行われ、二酸化炭素の倍増時の気候変化の実験がなされている。それらの結果は、温暖化予測の定性的な面では一致を示すものの、定量的には

一致しない点が多く、大きな問題点を残している。例えば、大気大循環モデルによる二酸化炭素の倍増時の全球気温上昇量は、モデルによって2°C以下から5°C以上まで3倍近い違いを示している。また、各モデルが現在の気候を再現する能力も、気候変動の研究にとって十分であるとはいえないのが現状である。例えば、大気海洋結合モデルにおいては、大気海洋間のフラックスを人為的に調整をしない限り、現実的な気候分布を再現することができない。また、大気モデルでは、極域の成層圏下層の気温が低すぎるといような、多くの共通の問題を抱えている。これらの問題は、大気および海洋のモデルにおける諸物理過程の表現が不十分であることや、モデルの空間分解能の不足によっていると考えられている。

このような状況を考慮して、定量的な気候変動評価に耐えうるモデルを目指して、気候モデルの構成要素をなす大気および海洋の大循環モデルの開発を行った。その際の基本方針として、大気および海洋の物理過程において出来る限りにおいて経験的なパラメータを排除し、明確な物理法則に基づいたモデル化を試みることにした。また、高分解能で長期間実行可能なモデルとするために、効率的なモデルコードを作成することを考慮した。さらに、共同利用を可能とするために、コードの可読性と交換可能性とを重視して整備を行った。開発するモデルのベースとしては、東京大学で開発された、大気大循環基礎モデルおよび海洋大循環基礎モデルを用いた。

主な研究成果は以下の通りである。

1. 大気放射過程パラメタリゼーションの精密化
2. 大気物理過程パラメタリゼーションの高度化
3. 大気大循環モデルによる気候値の再現実験
4. 陸面過程モデルの検討
5. 全球海洋大循環モデルおよび海水モデルの開発

2 大気放射過程パラメタリゼーションの精密化

気候を決定する要因として、大気放射過程は欠くべからざるものであり、その正確な見積りは気候の定量的評価にとって非常に重要である。今回新しく開発した放射過程パラメタリゼーションは、雲や様々な種類の地表面による放射の散乱・吸収、および温室効果ガスによる放射の吸収を精密に計算できる様に設計された。

まず、雲を含む地球大気系での多重散乱を含めた放射の伝達を解くことのできる DOM(Discrete Ordinate Method) 法と Adding 法を組み合わせることで解く方式を定式化した。次に、ガスの吸収線を取り扱う種々の方式を比較・検討し、k-分布法が、精度と計算速度、今後の発展性などの点から最適であることがわかった。この k-分布法で使用する吸収パラメータを最適化することにより、放射コードの高速化を図った。さらに、雲による散乱・吸収モデルの精度について検討した。以上により、太陽光から赤外域の熱放射までを統一的に扱うことのできる極めて高効率のコードを生成することができた。

(1) k-分布ガス吸収モデルの最適化

数値気候モデルで必要とされる放射による大気加熱・冷却を求めるためには、波長0.2ミクロンから200ミクロンにおよぶ波長範囲で70万本に及ぶ吸収線に対応した放射フラックスを評価する

必要がある。散乱・吸収過程を含む放射伝達方程式の解法として本研究で採用した Discrete Ordinate / Adding 法は、他の手法と比較して高速であるが、それを用いても、現在の計算機資源の現状では、せいぜい 100 チャンネル程度を計算するのが上限である。そこで、このように少ないチャンネル数で波長積分を正確に評価する工夫をしなければならない。

多数の吸収線を含む非常に複雑な波長依存性を示すガス吸収係数を含む放射伝達方程式は、吸収係数の確率密度関数を重みにした等価波長積分の問題に置き換えられる。この k-分布法を使用することによって大幅にチャンネル数を減らすことができるが、正確な波長積分のためには、100 を越えるチャンネル数が必要となる。特に、複数のガスの吸収が重なる波長帯では急速に必要なチャンネル数が増加する。そこで、放射フラックスと加熱率の計算にあまり寄与しないチャンネルを削除し、削除に伴うチャンネル位置と重みを最適に修正する非線型最適化法を適用することを考案した。高度 40km 以下で加熱率の誤差が $0.5^{\circ}\text{K} / \text{日}$ 以下という条件の下で、k-分布理論で設定した 242 チャンネルから出発して、48 チャンネルまでチャンネル数を削減することができた。

結果として得られた 48 チャンネルのガス吸収パラメータを利用して、アメリカ標準大気について求めた加熱率の鉛直プロファイルを図 1 に示す。図 1 によると最適化コードが適切に作動していて、40km 以下での誤差が目標どおり 0.5 度以下になっていることが分かる。

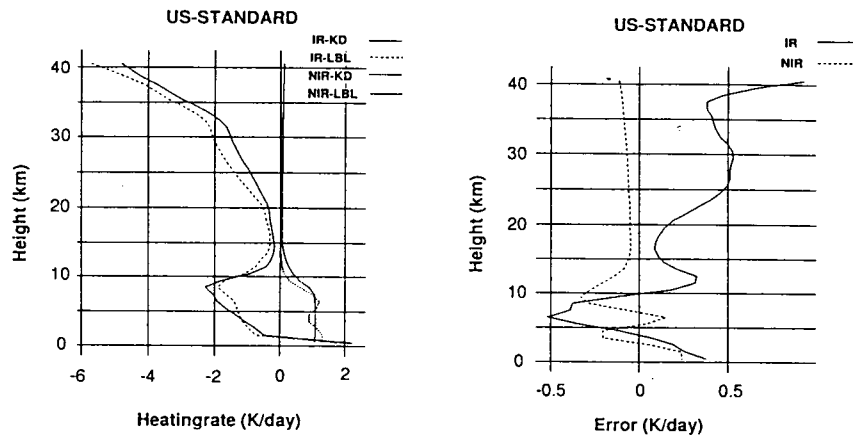


図 1: アメリカ標準大気を入れた場合の長波 (IR) および短波 (NIR) 域の加熱率の k-distribution 法 (KD) と厳密計算 (LBL) の比較. 右図に誤差を示す.

(2) 雲による散乱・吸収モデルの検討

ここで開発された放射コードで雲による散乱・吸収を適切に扱うためには、雲の光学的厚さと一回散乱当たりの光吸収確率の各バンドでの平均値を正しく評価する必要がある。ここで、吸収確率は波長によって大きく変動するために、幅の広いバンドで吸収確率を平均する方法は自明ではない。そこで、(a) 消散断面積と吸収断面積とを平均し、その比を吸収確率とする方法 (断面積平均法) と、(b) 吸収確率の平方根を平均する方法 (平方根平均法) の 2 通りの方法を行い、精密な計算と比較することにより評価を行った。

この 2 通りの方法による、大気の加熱率の鉛直プロファイルを図 2 に示す。赤外域での加熱率はどちらでも正しく評価されるが、太陽放射に対する加熱率は、断面積平均法では雲層内で過大評価となること、一方、平方根平均法では雲頂で過少評価となるものの、ほぼ真値を再現することが明らか

となった。

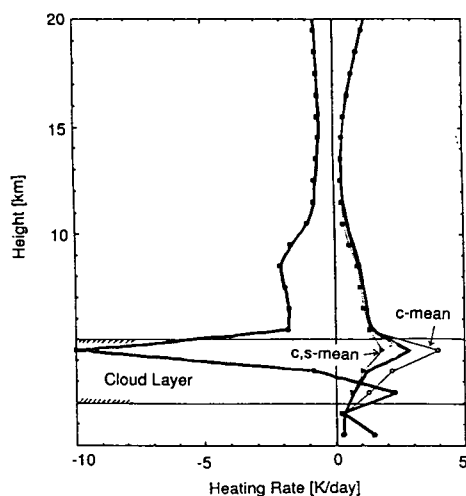


図2: 雲を含む大気加熱率の鉛直分布. 太線は厳密計算. c-mean(○) は断面積平均法, c,s-mean(△) は平方根平均法の場合. アメリカ標準大気に, 2km から 5km の間に光学的厚さ 10, 有効半径 $8\mu\text{m}$ の雲を入れた場合.

3 大気物理過程パラメタリゼーションの高度化

地球温暖化などの気候変動においては, 雲や水蒸気, 降水, 雪氷などの水循環の変動がフィードバック過程として非常に重要であることが認識されている. そこで, 水循環過程を物理的に正しく表現するための水循環に関する諸過程のパラメタリゼーションの高度化を試みた. さらに, そこで, 成層圏付近の循環の改良を試みるために, 最近その重要性が認識された重力波抵抗を導入した.

(1) 雲水量の予報スキームの導入

大気の放射フラックスを正確に見積るためには, 雲の効果を正しく評価することが非常に重要である. その雲水量の評価においては, これまでのモデルでは経験的な値を用いることが多かったが, ここでは, より物理的な基礎に基づいて雲水量を評価する方法の開発を試みた.

ここで採用した方法は, 予報変数を水蒸気と雲水を含めた総水量とし, 過飽和分の水は雲水量であると解釈してある時定数(2 時間程度)で雨水に変換し降水させるものである. さらに降水の蒸発過程と, 格子内の水蒸気量の不均一性の効果を取り入れている. この方法を適用することによって, 図3に示すような雲水量の3次元分布が計算され, 気候変動時の雲水量の通したフィードバック過程を表現することが可能となった.

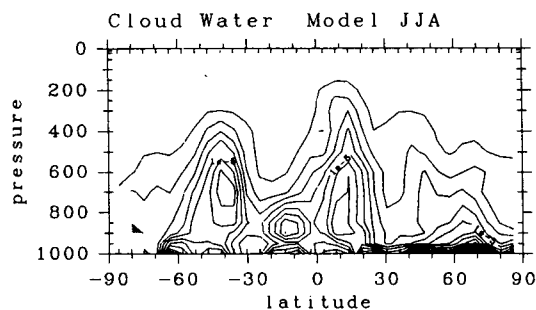


図3: 雲水予報スキームによる, 雲水量の東西平均分布. 6月から8月の3ヶ月平均値. コンター間隔 2×10^{-6}

(2) Arakawa-Schubert 積雲パラメタリゼーションの導入

積雲活動は、特に低緯度において、降水の分布を大きく決めており、大気の温度成層状態や湿度の分布に大きな影響を与えている。その効果の正確な見積りは、大気フィードバック過程を考える上で非常に重要である。そこで、ここでは、サブテーマ(4)の成果を利用して、現時点で最も物理的基礎が明確な Arakawa-Schubert 積雲パラメタリゼーションを大気大循環モデルに導入した。導入に際しては、雲の質量フラックスを雲仕事関数を用いた予報方程式によって解く方法を用いている。さらに、最近注目されている、降水の蒸発にともなう強い下降流(ダウンドラフト)の効果を簡単な形で取り入れることにより、大気下層の湿度分布などが改良されることを確認した。

(3) 大気境界層拡散過程に関する改良

雲と境界層拡散過程の相互作用過程を表現するために、雲の存在する領域について湿潤リチャードソン数を用いて鉛直拡散係数を計算する方式を検討した。また、海洋上の水蒸気・熱・運動量のフラックスの計算において、自由対流にともなう輸送の効果を考慮し、風速の弱い領域での蒸発量の表現を改良した。さらに、境界層における対流運動にともなう非局所的拡散の効果を取り入れる試みを行った。これらの改良により、大気下層の水蒸気量や雲水量の分布が改善された。

(4) 重力波抵抗の導入

山岳等の地形で励起される定常的な内部重力波を仮定し、地表での運動量フラックス標高の分散に比例するとして、内部重力波の運動量フラックスの鉛直分布を風と温度の鉛直構造によって見積もることによって、内部重力波抵抗の効果を導入した。

この内部重力波抵抗の導入により、東西風の分布等が現実的な値に近付くことが示された。さらに、パラメータを変えた感度実験を行い、適当な値の範囲を定めた。

4 大気大循環モデルによる気候値の再現実験

これまで述べたような各物理過程のパラメタリゼーションを大気大循環モデルに導入し、モデルの長期間の積分を行なった。その結果を気候値データと比較検討し、問題点を明らかにした。さらに、このモデルを応用することにより、熱帯成層圏における顕著な振動現象(準2年振動)の3次元大気大循環モデルによる再現に世界で初めて成功した。

(1) 季節変化の気候値再現

季節変化を含む現実的な境界条件を設定して大気モデルの長期間の積分を行なった。以下には、低分解能(格子間隔約 5.5°)の結果を示すが、高分解能(格子間隔約 3°)のモデルでも同様な結果が得られている。

図4は、等温静止状態から始めて10年後の、夏期3ヶ月間(6~8月)平均の温度の東西に平均した分布と、その観測値からの偏差である。対流圏では、多くの領域で 2° 以下の偏差となっており、モデルによってほぼ気候値が再現されていることを示す。一方、対流圏界面付近では大きな低温偏差が見られ、特に極付近で大きい。この偏差はほとんど全ての大気大循環モデルに共通にみられるものである。

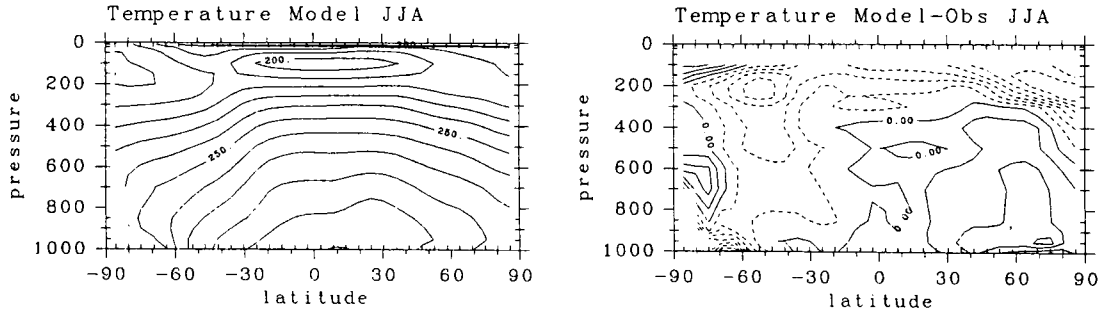


図 4: 東西平均気温分布 (左) と、観測値からの偏差 (右). 6 月から 8 月の 3ヶ月平均値. コンター間隔 10K(左), 2K(右)

図5は、同じ時期の降水量分布を示す。熱帯の降水帯の位置や強度は概ね現実気候値に近く、モンスーンによる降水も比較的良好に表現されている。

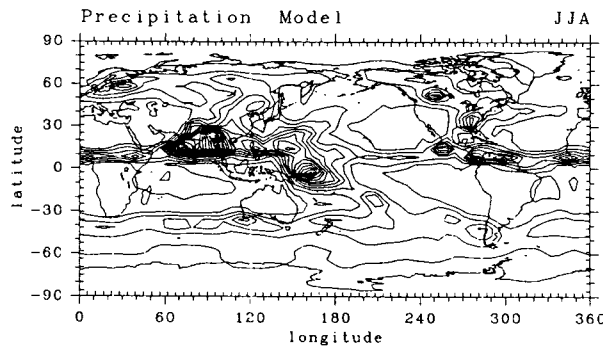


図 5: 降水量の空間分布. 6 月から 8 月の 3ヶ月平均値. コンター間隔 50mm/month

図6は、東西平均の相対湿度の分布である。観測値と比較すると、熱帯域の対流圏中層でやや大きな乾燥偏差がみられる。また、対流圏上層や中緯度では逆に湿潤偏差が明らかである。この結果は、積雲パラメタリゼーションや雲水のパラメタリゼーションに問題があることを示唆しているが、相対湿度に関しては観測データの質にも問題が多いことがわかっており、今後さらなる検討が必要である。

この他、さまざまな出力結果を観測データ等と比較した結果、モデル全体として定性的に大きな問題はないことが確認され、このモデルを用いた気候変動の研究が可能であることが示された。しかしながら、定量的な面では、上に挙げた相対湿度の問題を含め、成層圏循環の再現性が悪いなど、今後改良すべき点が多いことが明らかとなった。

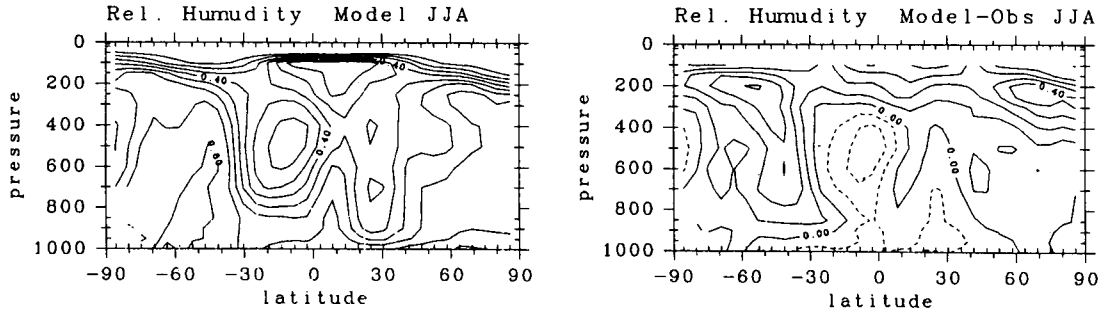


図6: 東西平均相対湿度(左)と、観測値からの偏差(右). 6月から8月の3ヶ月平均値. コンター間隔0.1

(2) 雲の放射強制力

雲の放射強制力は、雲が存在する場合とない場合との大気上端における放射フラックスの差で定義され、大気-海洋システム全体に対する、雲の存在による放射影響を表す。この放射強制力のモデルによる計算値と衛星による観測値を図7に比較する。

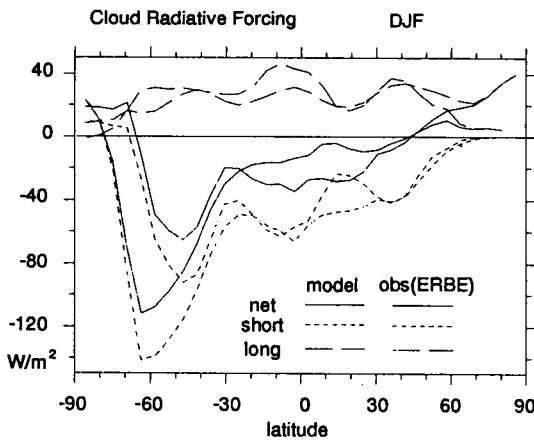


図7: 雲放射強制力の東西平均分布と衛星観測値(ERBE)との比較. 12月から2月の3ヶ月平均値.

予備的な計算にもかかわらず、雲放射強制力の定性的な緯度依存性を再現することができた。しかし、南緯60度付近では、雲の太陽放射強制力および赤外放射強制力ともに過小評価されており、雲水量がモデルでは著しく少ないことが示されている。また、赤道域では赤外放射強制力のみが若干過小評価されており、太陽放射の良い再現と合わせてみると、モデルによって雲頂高度が正しく再現されていない可能性が示唆される。これらの結果から、雲放射強制力がモデル内の雲の再現度に敏感に依存していることが分かる。雲放射強制力は衛星から精密に求めることができるので、このような比較を通じてモデルの性能を良く診断できることが確認された。

(3) 準2年振動の再現実験

熱帯成層圏の準2年振動(QBO)は、1970年頃に基本的な力学が解明されたものの、大気大循環モデルによる再現に成功した例はなかった。

この準2年振動を起こすメカニズムは、対流圏から伝播して来る波が平均流と相互作用を起こす

ことと理解されているが、最近の研究により、これまで重要であると考えられてきたロスビー波や混合ロスビー重力波の他に、慣性重力波が重要であるということがわかってきた。そこで、大気大循環モデルを、地球の自転の効果のない東西-鉛直2次元モデルに直して計算を行ったところ、短い周期ではあるが、準2年振動に似た振動現象を得ることができた。また、3次元モデルにおいても、同様に地球の自転を止め、非常に高い海面水温を与えた場合には、準2年振動的な振動現象が現れることを確認した。

これらの結果は、これまで大気大循環モデルによる再現が困難であったのは、水平・鉛直分解能の不足という直接的な原因の他に、慣性重力波がうまく表現できていないためであることを示唆している。そこで、慣性重力波をよく表現するために、高分解能モデル(格子間隔約1.1度)を用い、重力波を作りやすい積雲パラメタリゼーション(対流調節)を用いた実験を行った。この実験は、地球自転があり、現実的な海面温度の状況である。その結果、図8にみられるように、定性的に地球大気の準2年振動と対応しうる振動現象を得ることができた。

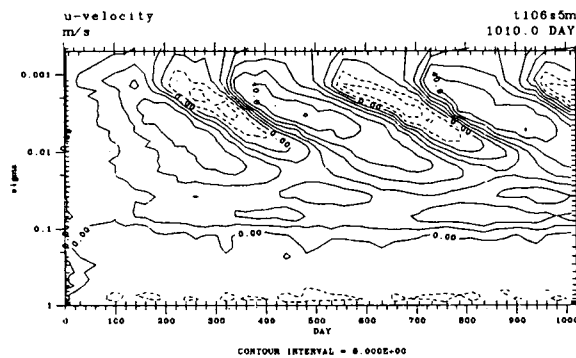


図8: 3次元モデルによるQBOの再現

5 陸面過程モデルの検討

気候モデルに組み込むための、物理法則に基づいた陸面過程モデルを作成することを目標として、1次元モデルを中心とした研究を行った。

陸面過程のパラメタリゼーションの役割は、地表面に到達する日射のエネルギーを潜熱、顕熱、長波放射、地中熱伝導に正しく分配すること、地表面に到達する降水を蒸発、流出、地中への浸透に正しく分配することである。その際においては、気候モデルの格子の中により小さなスケールのさまざまな陸面の要素が存在していることを考慮し、その総合的な効果を、気候の時間スケールにおいて正しく表現することが重要である。そこで、1次元の陸面モデルを作成し、それを用いた感度実験を行った。その結果、長い時間スケールでの陸面のふるまいを考える上では、特に地中深くの水分の挙動と流出を適切に考慮することが重要であることが示された。さらに、陸面モデルに植生の効果を取り入れる試みを行った。

(1) 陸面土壌1次元モデルの作成

地中の温度と土壌水分の鉛直分布の時間変化を表現する簡単な1次元モデルを作成した。基礎方程式として、温度については熱伝導方程式を用い、土壌中の水分量(体積含水率)については、水理ポテンシャルに基づく Richards の式を用いた。ここで、体積含水率 θ と圧力ポテンシャル ψ の関係については van Genuchten の式を用いた。また、積雪層を独立した1層で表し、雪の表面と底面でのエネルギー・バランスを考慮して融雪を評価する積雪・融雪過程を導入した。土壌水分量の下端の境界条件についての検討を行い、地下水面がある程度以上深い場合には地表面での交換過程はその深さに依存しないことが明らかとなった。

(2) 気候時間スケールでの特性の検討

基盤までの深さを陽に扱う土壌モデルを開発し、このモデルの特性を、気候学的水収支の立場から整理した。

土壌モデル上端は地表面で大気境界層モデルと接続され、下端には基盤を設定した。基盤の深さは5m~15mとした。また、地下水流出率は、河川からの流出を想定し、平均的な傾斜と河川密度に依存するとした。ここで、地表流出は簡単のために土壌表層が飽和したときのみ生じるとしている。また、境界層上端からの放射、降水、境界層の風速などは外力として与え、陸面から雲、降水などへのフィードバックは無視している。このモデルを用いて年間降水量を変化させたときのモデルの応答を調べた。他に土壌タイプ、地形的要因による流出率、基盤の深さ、降水の季節変化パターン、透水係数の含水率依存性を変化させて感度実験を行なった。

計算結果の一例を図9に示す。この結果は、過去の観測的研究によって提示された降水量と蒸発量の関係式を定性的によく再現している。結果の解析から、モデルの応答の定量的な性質は地下水流出の起こりやすさに依存すること、また、降水の季節変化パターンの違いが重要であることが示唆された。

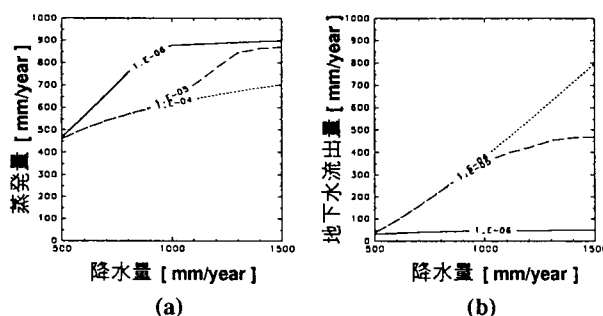


図9: 与えられた年間降水量に平衡する年間蒸発量 (a) と年間地下水流出量 (b). 地形的要因による流出率を変化させた3通りの場合を示した。

(3) 植生の効果の取り込み

陸面モデルへの植生の効果の取り込みを、Sellers *et al.*(1986) による SiB に基本的に基づいて行った。すなわち、2層の植生層と土壌、大気との間の熱と水の交換を、気孔抵抗の日射、温度、水分への

依存性, 植生による降雨の捕捉, 根による地下水の吸い上げなどのプロセスを考慮して評価するものである。

水蒸気移流の外力を与えた1次元モデルによるシミュレーションの結果から, 植生による蒸散と降雨捕捉を考慮する場合としない場合で, 蒸発量の季節変化のパターンが大きく異なることが示された。

6 全球海洋大循環モデルおよび海氷モデルの開発

気候モデルの重要な部分である, 全球海洋大循環モデルならびに海氷モデルの作成を行った。

(1) 全球海洋大循環モデルの開発

現在広く一般的に用いられている GFDL モデルと同じ水準の物理過程を含み, かつ高速に計算できる独自のモデルを開発を行った。その結果, 同一条件の下で GFDL モデルに比べ3倍から10倍程度高速なモデルを作成することができた。これを, 水平分解能2度の, 現実的な海底地形を含む条件で実験を行った結果, モデルは現実の海洋の温度場, 流速場をよく再現することが確認された。この結果は, GFDL モデル等の世界最先端のモデルとほぼ同等な水準であり, 一部他のモデルよりも良く表現されている部分もある。しかし, 他のモデルに共通した問題点も同様に現れており, その改善に向けて, 今後の研究が必要である。

(2) 海氷モデルの開発

気候変動において非常に大きな役割を担う海氷の効果を評価するため, 気候モデルに用いるための海氷のモデルを作成した。このモデルは, 氷の熱力学のみならず, 氷の力学を適切に考慮していることが特徴である。これを用いて, 海洋・海氷結合モデルを作成し, 実験を行った。その結果, 海氷の力学を考慮した場合と考慮しない場合において, 海氷域の広がりや厚さの分布に有意な差が出ることを確認され, 海氷の力学を適切に考慮することが重要であることが明らかとなった。

7 まとめ

全球3次元気候モデルを構成する, 大気大循環モデルと海洋大循環モデル, およびそれと組み合わせるべき陸面モデルと海氷モデルの作成を試みた。その結果, 大気および海洋モデルによる現実の気候値の再現に概ね成功し, 世界の最先端レベルに比肩できるようなモデルであることが確認された。これらのモデルにおいては, 気候変動にともなうフィードバック過程を正しく表すために, できる限り物理的基礎に忠実に基づく物理過程のパラメタリゼーションを採用した。いくつかの過程に関しては, 単純化された状況でのパラメータ感度実験を行い, モデルの性質および気候システムの性質に関する知見を得ることができた。

まとめとして、現時点における大気モデルの仕様を示す。

方程式系	全球プリミティブ方程式系
予報変数	風速, 温度, 地表気圧, 比湿, 雲水量
水平離散化	スペクトル変換法
鉛直離散化	σ 系 (Arakawa and Suarez, 1983)
放射	2 ストリーム DOM/adding 法
雲過程	雲水予報 (Le Treut and Li, 1991)
積雲対流	雲質量フラックス予報型の Arakawa-Schubert スキーム
鉛直拡散	Mellor and Yamada(1974) level2, 対流混合層の非局所的拡散
地表 flux	Louis(1979) バルク式, 自由対流の効果
重力波抵抗	McFarlane(1987)
地表面過程	多層熱伝導, 新バケツモデル (Kondo, 1993)

モデルの性能は定性的な気候の再現という観点からはほぼ満足できるものであったが、今後、定量的な気候変動評価に用いるためには、まだ多くの改良を必要としている。さらに、今回作成された大気モデルと海洋モデルとを結合したモデルを作成することも、今後の大きな課題である。今後の研究の方向性として、以下のようなことが挙げられる。

1. 放射過程に関しては、最適化法を工夫して、より高速化をはかるとともに、メタンなど、二酸化炭素以外の温室効果ガスの吸収を取り込む。さらに、雲が存在する大気の放射加熱率の計算精度の向上をはかる。
2. 大気水循環過程に関しては、雲や水蒸気の分布が正確に表現され、物理的メカニズムを正しく表したパラメタリゼーションを確立する。
3. 成層圏過程に関しては、オゾンなどの物質循環の観点からの研究を開始するとともに、極圏界面での低温偏差の原因を究明する。
4. 陸面過程に関しては、雪氷、植生の効果などを大気大循環モデルに取り入れる方法を確立し、空間非一様性を含めて、グローバルなパラメタをいかに抽出するかを検討する。
5. 大気大循環モデルを用いた実験により、熱帯の雲活動や中緯度の低気圧活動などの擾乱のふるまいや、海面水温の変動に対する年々の気候変動が正しく表現されるかどうかを調べ、必要であればモデルを調整する。
6. 海洋大循環モデルに関しては、海洋中の物理過程を改良し、高分解能のモデルを用いることにより、出来る限り正確な現実の海洋の再現を目指す。
7. これらの研究を総合して、人為的なフラックスの調整を行わずに気候が再現できるような海洋大気結合モデルを開発する。

研究発表の状況

- 光本茂記, 江守正多, 阿部寛治, 1994: 土壌モデルの地中下端境界条件が地表面における長時間の熱および水分交換過程に及ぼす影響— 1次元大気境界層-陸面モデルを用いた感度分析 — 水文・水資源学会誌, 第7巻4号掲載予定
- Nakajima, T., and M. Tsukamoto, 1994: An accurate calculation scheme of radiative flux transfer for general circulation model studies. *CGER's supercomputer activity report 1992*, 1, 10-11.
- Numaguti, A. 1994: Dynamics and energy balance of the Hadley circulation and the tropical precipitation zones. Part II: Sensitivity to meridional SST distribution. *J. Atmos. Sci.*, submitted.
- Numaguti, A., S. Mitsumoto, M. Takahashi, T. Kumakura, T. Nakajima, M. Tsukamoto, A. Sumi, and T. Matsuno, 1993: Preliminary results of CCSR/NIES atmospheric general circulation model: Sensitivity to physical parameterizations. *IAMAP-IAHS '93 abstracts*, IAMAP, Yokohama, M3-52.
- Suginohara, N., S. Aoki and M. Nakata, 1993: Modelling of western Pacific abyssal circulation - preliminary experiment. *Deep Ocean Circulation, Physical and Chemical Aspects*, T. Teramoto Ed., Elsevier.
- Takahashi, M., 1993: A QBO-like oscillation in a two-dimensional model derived from a GCM. *J. Meteor. Soc. Japan*, 71, 641-654.
- Takahashi, M., A. Numaguti, T. Kumakura, T. Nakajima, S. Mitsumoto, K. Takano, A. Sumi, 1992: Preliminary Results of a new CCSR GCM. *2nd Int. Conf. Modeling Global Climate Change & Variability*, Hamburg, September 1992.
- Takahashi, M. and M. Shiobara, 1994: A note on a QBO-like oscillation in the 1/5 sector CCSR/NIES general circulation model. *J. Meteor. Soc. Japan*,, submitted.