

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 沼口 敦

環境庁 国立環境研究所

大気圏環境部 大気物理研究室

(委託先) 東京大学 気候システム研究センター

沼口 敦, 菅田 誠治

住 明正, 杉ノ原伸夫, 中島 映至,

高橋 正明, 木本 昌秀, 山中 康裕,

阿部 彩子, 高田 久美子

平成 6 年度～平成 8 年度 合計予算額 21,342 千円
(平成 8 年度予算額 7,231 千円)

[要旨]

現実的な気候値を定量的に再現することを目標として、大気大循環モデルと海洋大循環モデルの開発と改良、および両モデルの結合に関する開発を行なった。大気大循環モデルの放射、雲、陸面等の各物理過程において、物理的考察に基づいたパラメタリゼーションの改良を行い、モデルの気候再現性が向上した。大気大循環モデルを長期間積分することにより、気候値の再現性は高いことが示された。また計算範囲を地表から成層圏および中間圏下部の一部にまで拡大して長期間積分を行っても良好な性能を示すことがわかった。海洋大循環モデルを大幅に高速化し、様々な数値実験を行なった。良好な気候再現性を有することが明らかになったが、より定量的な結果を得るためには各種のサブグリッドスケールの現象をモデルに導入する必要があることがわかった。大気大循環モデルと海洋大循環モデルの結合に関する開発・改良に着手し、結合モデルによる長時間ランを可能な態勢を整えた。大気大循環モデルで得られた大気循環データを用いて全球的物質循環に関して研究を開始した。赤道付近の収束帯と同様に南北両半球の中緯度にも南北の物質輸送を妨げるバリアとなる緯度帯があることがわかった。

[キーワード]

気候モデル, 大気大循環, 海洋大循環, 水循環, 陸面過程, パラメタリゼーション, 大気海洋結合, 物質輸送

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高精度の数値モデルが必要である。地球環境研究総合推進費の第一期「B-5 気候モデルによる気候変動評価に関する研究」の「(1) 気候モデルの開発・改良に関する研究」は、このような高精度・高能率の大気大循環モデルならびに海洋大循環モデルを開発し、その上で両者の結合モデルを開発することが目的である。大気大循環モデルおよび海洋大循環モデルにおいては、定性的な気候の再現に成功するとともに結合モデルの開発改良に着手した。これまでの研究成果は以下の通りである。

1. 大気大循環モデルの物理過程パラメタリゼーションの開発・改良

- 大気放射過程パラメタリゼーションの最適化
- 放射過程における有限雲の効果の導入
- 雲と乱流の相互作用の適切化
- 陸面過程のパラメタリゼーションの精密化

2. 大気大循環モデルによる気候値の再現実験

3. 大気大循環モデルの成層圏への範囲拡大

4. 海洋大循環モデルの開発・改良

- プログラムコードの効率化と Bryan の加速法による高速化

5. 海洋大循環モデルによる数値実験

- 海面駆動力の季節変動に関する数値実験。

6. 大気大循環モデルと海洋大循環モデルの結合に関する開発・改良

7. 大気中での全球的物質輸送に関する研究

2 研究成果

2.1 大気大循環モデルの開発・改良

(1) 大気放射過程パラメタリゼーションの最適化

大気放射過程の高精度の評価は気候値の定量的な見積りの基本となるものである。しかし、高精度の放射フラックスの評価は通常膨大な時間を必要とし、高精度化とともに効率化が重要な問題となる。この研究ではチャンネル最適化アルゴリズムを開発・使用して、放射パラメタリゼーションの精度向上と高速化を行った。従来の手法と同程度の計算時間で、 CH_4 , N_2O , CFC 等による吸収を含めて精密に計算することが可能になった。

(2) 放射過程における有限雲の効果の導入

層雲の被覆率は大規模蒸発過程において各高度レベル・各計算格子領域毎に計算されている。この研究では従来の放射計算に層雲同士が鉛直方向に重なりあう効果を導入し、放射収支をより定量的に扱うことを可能にした。層雲は鉛直にランダムに重なりあうと仮定し計算を行う。その際に、各層の反射・透過係数に有限雲の効果を取り込んで計算するセミ・ランダム法を開発することにより、全層での晴れ・曇りの組み合わせを計算する従来のランダム法と比較して、同程度の精度でかつ時間を大幅に縮小して計算することが可能になった。

(3) 雲と乱流の相互作用の適切化

雲と乱流の相互作用の適切な評価をするべく、湿潤リチャードソン数を用いた鉛直拡散係数の評価式をより適切なものに改めた。この結果、境界層上部での雲水量の強い極大が解消され、雲の水平分布の気候値再現性が向上した。

(4) 陸面過程のパラメタリゼーションの精密化

熱と水蒸気に対する地表面の粗度は、運動量に対する地表面の粗度よりも通常1桁程度小さいとされている。その効果を表現するために、バルク係数を求める際に粗度の違いを考慮した補正を導入した。また、気孔抵抗の効果を簡略的に取り入れるために、地表面からの蒸発効率に土壌水分量に依存せず気孔抵抗の大きさに依存する上限を設けた。気孔抵抗は地表面のタイプに応じて決定される。これらの精密化によって、夏季の大陸上の蒸発量の過大が修整され、陸地表面の全体的な乾燥傾向が改善された。

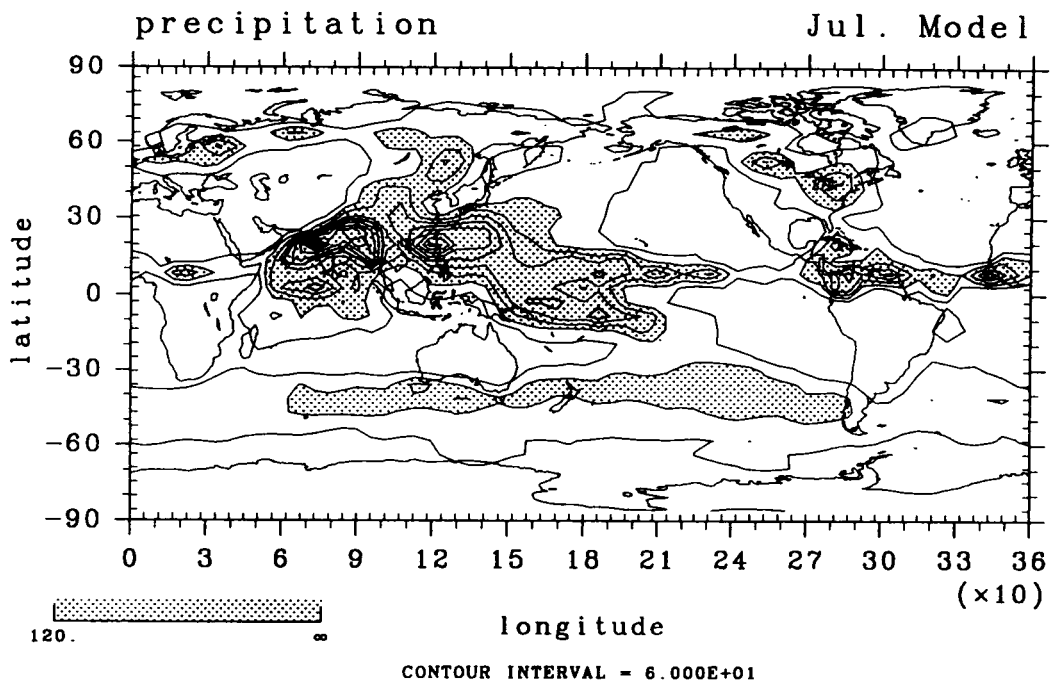


図 1: 7月の降水量の分布。コンター間隔は 60mm/月。影部は 120mm/月以上。

上述した改良点を大気モデルに導入して、気候値の海面水温を境界条件とする長期間ランを行い気候再現性を調べた。その結果、モデルの結果は全体としてかなり良好な気候再現性を有する(図1)が、次のような点に依然問題があることが判明した。

1. 亜熱帯域の対流圏下層および陸表面が乾燥しすぎる。
2. 夏季に西太平洋亜熱帯域で高層の雲量が多すぎる。
3. 成層圏が低温になる傾向がある。

2.2 海洋大循環モデルの開発・改良

(1) 海洋大循環モデルの改良

従来の海洋大循環モデルを大幅に改良した。すなわち、差分スキームはプリンストン大学地球流体研究所 (GFDL) のモデルと同様であるが、変数を全て一次元化すること等徹底的にコーディングに工夫をこらすことにより GFDL の海洋モデルの数倍の計算スピードを得ることが出来た。海洋モデルは大気モデルとの結合を意識し、海面でのみ駆動力 (風の応力, 水温・塩分分布) を与え、現在のコンピュータの性能から中規模渦は分解しない粗い格子間隔モデルとし、数十年スケールの気候変動予測に堪えるよう特に中層・深層の再現性に力点を置いた。

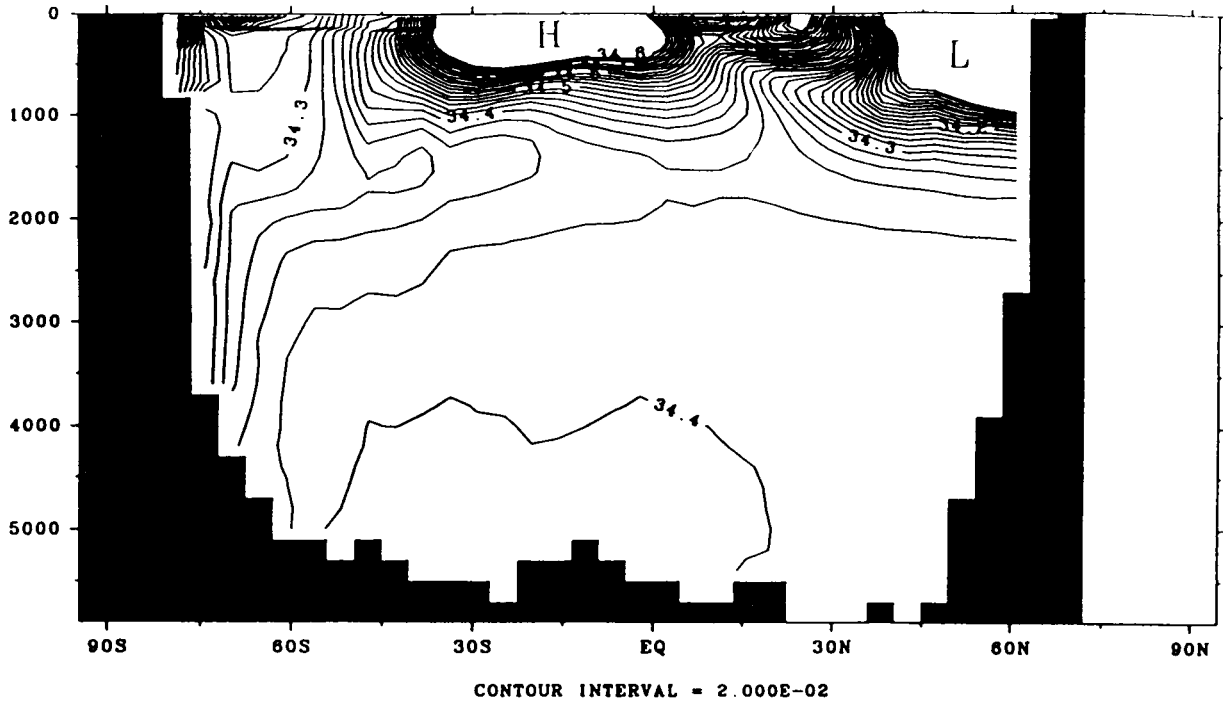
まず、世界で最も標準的な水平分解能 $3.75^\circ \times 4^\circ$ を用い (鉛直分解能は 17 レベル) モデルの性質を明らかにするための積分を行った。海洋大循環の形成に季節変動する海面駆動力 (風の応力, 海面水温・塩分) が重要であることは、例えば冬季にのみ深層水が深い対流によって形成されることから良く知られているが、ここでは海面での駆動力は、観測された年平均あるいは冬季のみといった時間的に一定のものを与え、定常問題として調べた。解釈の複雑さを避けるため、渦粘性・拡散係数は一定値に取った。他のモデルの結果と比較したところ、トップレベルのモデルに比肩しうる結果が得られた。

(2) 海洋大循環モデルによる数値実験

水平分解能 $2^\circ \times 2^\circ$ 、鉛直 40 レベル (最大格子間隔 200m) の高分解能モデルによる本格的な実験を行なった。この分解能ではドレイク海峡をはじめとする深層循環に重要な働きをする数多くの海峡・水道が正しく表現され、海岸地形も飛躍的に現実的になり、各種西岸境界流もより現実的なものが求まることが期待される。海面における駆動力を現実的な範囲で変えたり、水平、鉛直の拡散係数の値を変えたりする数多くのケースを計算した。その中で観測を最も良く再現するケースの結果の塩分分布を、太平洋について示す (図 2 上図)。このケースは南・北両半球ともに海面で与える水温・塩分を冬季のものとしている。上層 1000m の水温・塩分とも良く再現されているが、それ以深は余り良くない。すなわち、水温は 2000~3500m 深で $2\sim 3^\circ\text{C}$ 高く、塩分分布は、南からの極小水 (南極中層水) の 1000m 深での北方への拡がりは見えるがそれ以深の北からの一様な高塩分水の張り出しが不十分である。このように観測される大まかな特徴は再現しているが、いくつかの問題点が残った。注目すべきは、この欠点は $3.75^\circ \times 4^\circ$ モデルと同じであり、水平・鉛直分解能の向上によっても著しい改善が見られないことである。その上、地域的な循環や西岸境界流の再現性が大幅に高まったが、南北熱輸送量が観測に比べ小さすぎるといった全球的特性についての弱点は改善されなかった。次に海洋大循環の形成に重要と思われる海面駆動力の季節変動を完全に考慮した全世界海洋モデルを実行した。(図 2 下) 南極中層水に大きな変化が見られるなど、海面駆動力の季節変動を取り入れることの重要性が検証された。また、計算時間を大幅に短縮する Bryan の加速法が季節変動する系に対しても有効であることを確認された。

次にこれらの原因を探る為、単純化したモデルも含めた多様なモデル実験を行った。その結果、モデルの再現性を飛躍的に向上させる為には、下部北大西洋深層水及び南極底層水の形成過程を正しくモデルに取り込む必要があることを明らかに出来た。その為には、潮汐混合やエントレインメントといった現象の効果を粗い格子間隔モデルへの導入が重要である。従って、各種のサブグリッド現象のより本格的なパラメータ化を目指した研究が必要である。

Pacific Salinity (winter Case)



Pacific Salinity (seasonal Case)

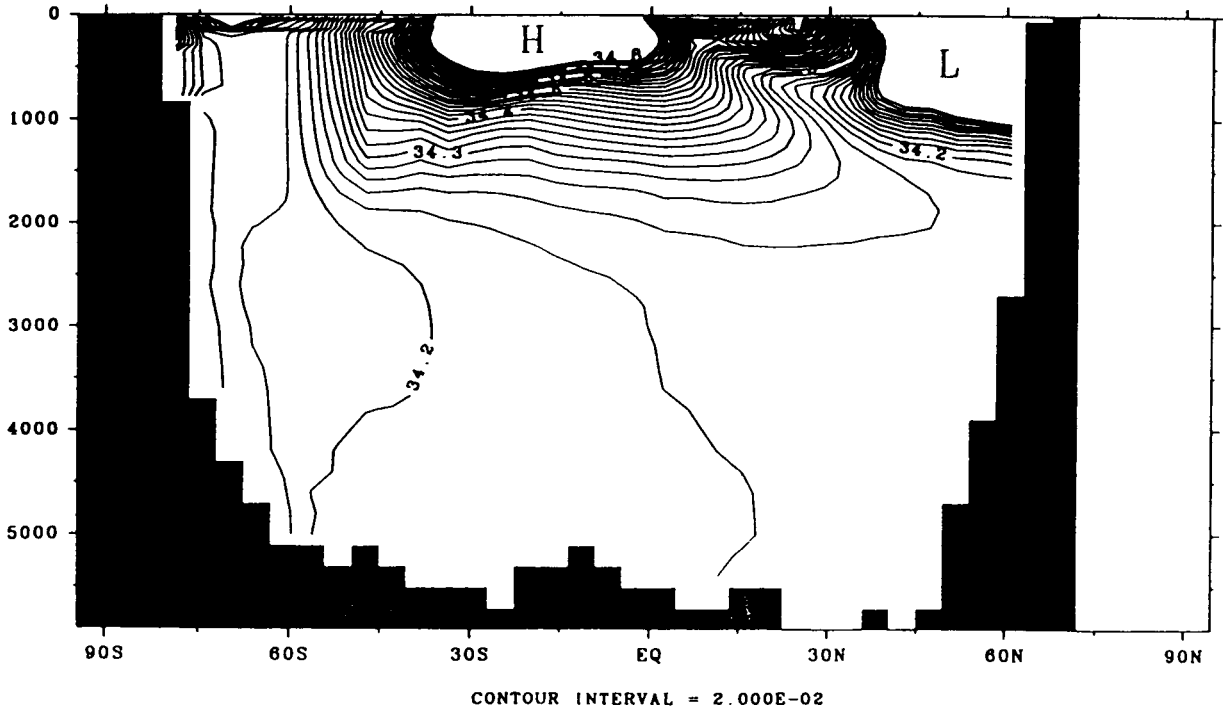


図 2: 太平洋の東西平均塩分分布. 上:定常モデル(冬季駆動力), 下:季節変動モデル. 季節変動する海面駆動力を用いたモデルでは南極中層水が再現されていない.

2.3 大気大循環モデルと海洋大循環モデルの結合

これまで独立に開発されてきた大気大循環モデルと海洋大循環モデルの結合に着手した。両モデルを統合して動かすドライバの部分と、大気と海洋の境界における両モデル間でのエネルギー・物質のやり取りを扱う部分の開発を行った、大気・海洋モデル自体はそれぞれほとんど変更することなく結合できるシステムになっている。これにより今後の大気・海洋モデルの個々の改良が結合モデルにも容易に反映できる。大気海洋間の運動量・熱・水フラックスに対して必要とされる補正の適切な値を把握し、結合計算前に海洋モデル側では加速して慣らし計算を行った後に非加速でさらに慣らし計算を行うことの有効性が確認された。結合して計算した数値実験の結果を見ると、海面温度や海洋の深層循環などをかなりよく再現しているが、結果は海氷過程等に大きな依存性を持つことが判っており、今後の改良が必要とされる。

2.4 大気大循環モデルの成層圏への範囲拡大

本研究全体としての主たる対象は地表から下部成層圏にかけての大気であり、これまでのモデルの開発・改良および計算もこの領域を中心に進められてきた。しかし、温暖化物質の分布変動とそれに伴うフィードバックを考慮して気候値を定量的に評価するためには、モデルの計算領域を成層圏全域まで広げることがより望ましい。ここでは成層圏全域から下部中間圏も含めて計算した場合の性能を評価すること、さらにモデルに含まれている力学上のパラメタリゼーションをどのように扱うべきかを調べた。鉛直 72 層とし、最上層は下部中間圏にあたる高度約 70km に置いた。鉛直方向には、下部成層圏では約 500m と十分な分解能を与え、上に行くほど粗くした。水平分解能は T21 を用いた。放射計算においては本モデルの最高精度を出し得る放射パラメタを用いた。

気候再現性を調べるために気候値の海面水温を境界条件として 6 年の積分を行い最後の 2 年の各季節平均を調べた。図 1 は冬期三ヵ月 (12 月～1 月) 平均の東西平均した東西風および温度の子午面分布を示したものである。東西風の分布の概形や、観測との偏差が概ね 5 度程度に納まっている温度の分布を見ると、モデルの結果は全体として良好であると判断できる。しかし、定量的に観測と比較して依然いくつかの問題点がある。冬半球の西風ジェットが中心が高緯度に寄りすぎており、かつその中心風速がかなり強いこと、夏半球の高緯度側の下層の西風が上層まで貫入しすぎていること、成層圏全域で低温の傾向があり、特に極域付近でその傾向が強いこと等である。同様の傾向は世界の他のモデルの多くでも見受けられる。

以上のような傾向を踏まえて、上層におけるレイリー摩擦の強さ、重力波抵抗スキームの力学上のパラメタリゼーション等が成層圏を対象とした計算をするにあたってどのように影響を与えているかを調べる種々の実験を行った。その結果、これらは定性的に劇的な変化をもたらすものではないことが示された。前述の問題点を解決するためには、これまで取り込まれていない力学的要因を考慮する必要があると思われる。

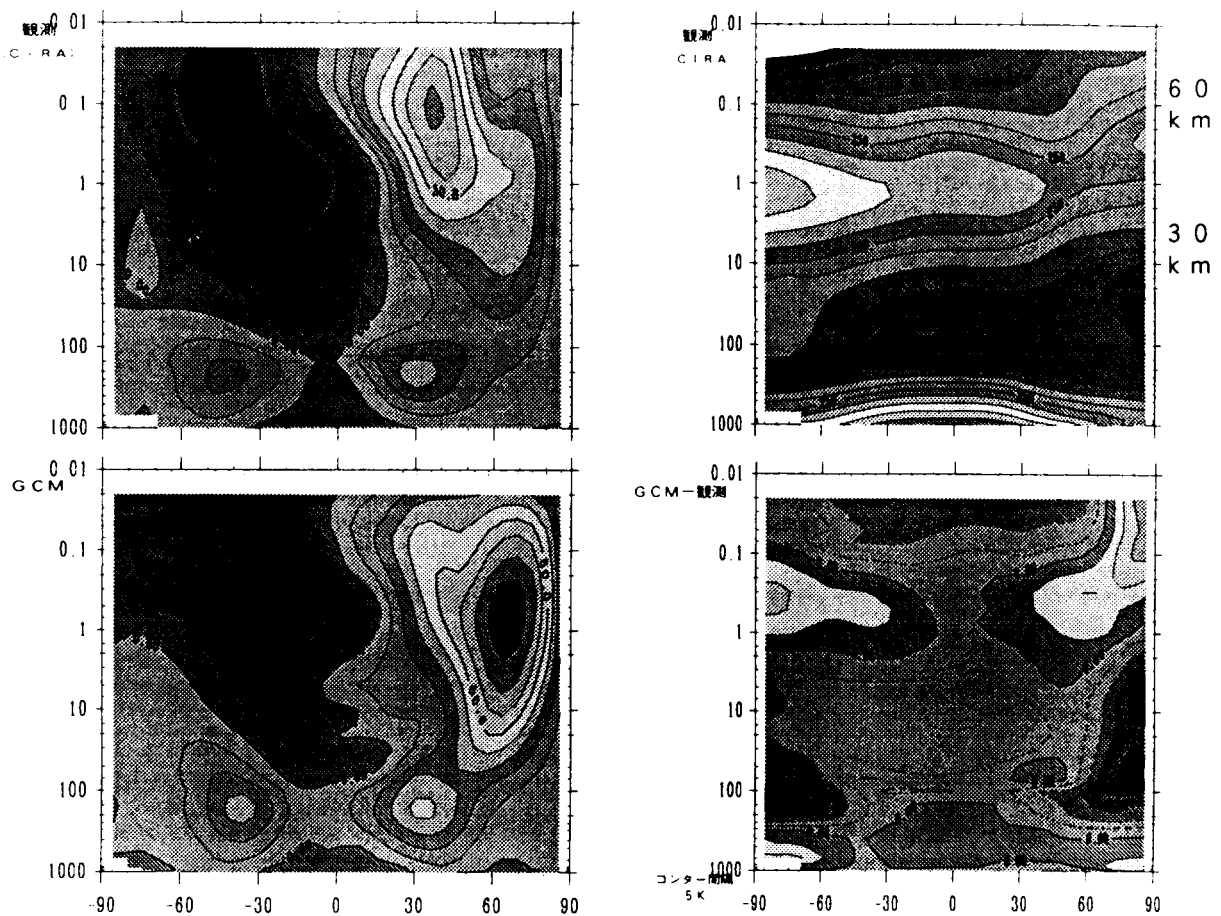


図 3: 冬期三ヵ月(12月~1月)平均の東西平均した東西風と温度の子午面分布. 東西風の観測(左上)とモデル(左下). 温度の観測(右上)とモデルと観測との差(右下) コンター間隔は10m/s(左),10K(右上),5K(右下).

2.5 大気中での全球的物質輸送に関する研究

気候変動の定量的評価のためには全球的物質循環とそれに伴うフィードバックを解明することが不可欠である. この研究は, 大気大循環モデルの出力データを用いて多数の物質粒子(現時点では仮想的粒子)の運動を計算するオフライン型の空気塊追跡モデルを開発し, それを用いて多数の大気塊の運動を調べることにより, 大気大循環モデルで得られる大気大循環場における全球的物質循環を把握することを目的とする.

粒子輸送モデルにおいて, 粒子の位置は移流または積雲対流による上昇により移動する. 位置計算の時間間隔は30分であり, 大気大循環モデルの風速三成分および積雲対流質量輸送量の4時間毎の平均データを使用した. 10万個以上の空気塊を初期に緯度2度おき, 鉛直50hPaおきに全球に配置した. 東西方向には低緯度で密に高緯度で粗に等間隔に並べて, 粒子一個一個が等質量の大気を代表するようにした. 大気大循環モデル中のある年の1月1日に計算を始め空気塊の位置を3ヵ月間計算した. 位置結果の保存は4時間おきに行った.

大気中には多くの波動が存在するために, 南北移動した粒子の多くは数日以内に元の緯度帯に戻る. 数日以上寿命を持つ物質の全球的南北分布を考える場合には, こういった南北移動は実質的物質輸送に寄与しないと考えられる. こういった実効的でない空気塊の南北移動を落とし, 実効的物質移

動だけを選択するために、この研究では時間スケール条件付きの南北通過という概念を導入した。例えばある緯度に対して7日以上時間スケールで有効な南北通過とは、その緯度の南(北)側に連続して7日以上滞在した経験を持つ粒子が、その緯度を通過後に北(南)側に連続して7日以上滞在した場合のみであるとする。

各緯度帯における2月一ヶ月間の南北通過空気量の緯度分布を調べた。通常の数え方であれば赤道でのみ極小を示す南北分布になったが、3日ないし7日といった時間スケールで有効な南北通過を数えると、赤道のみならず南北中緯度40度付近にも極小が現れた。すなわち、一般に言われる、赤道付近の物質輸送のポテンシャルバリアに相当するバリアが中緯度40-50度にも存在することが示された。次に、ポテンシャルバリアの実体を調べるために解析を進めた。ポテンシャルバリアとなっている緯度帯において、各経度において南北方向に空気塊の通り抜ける頻度を調べた。その結果空気塊は特定の経度帯で頻繁に南北に通り抜けていることがわかった。(図4)

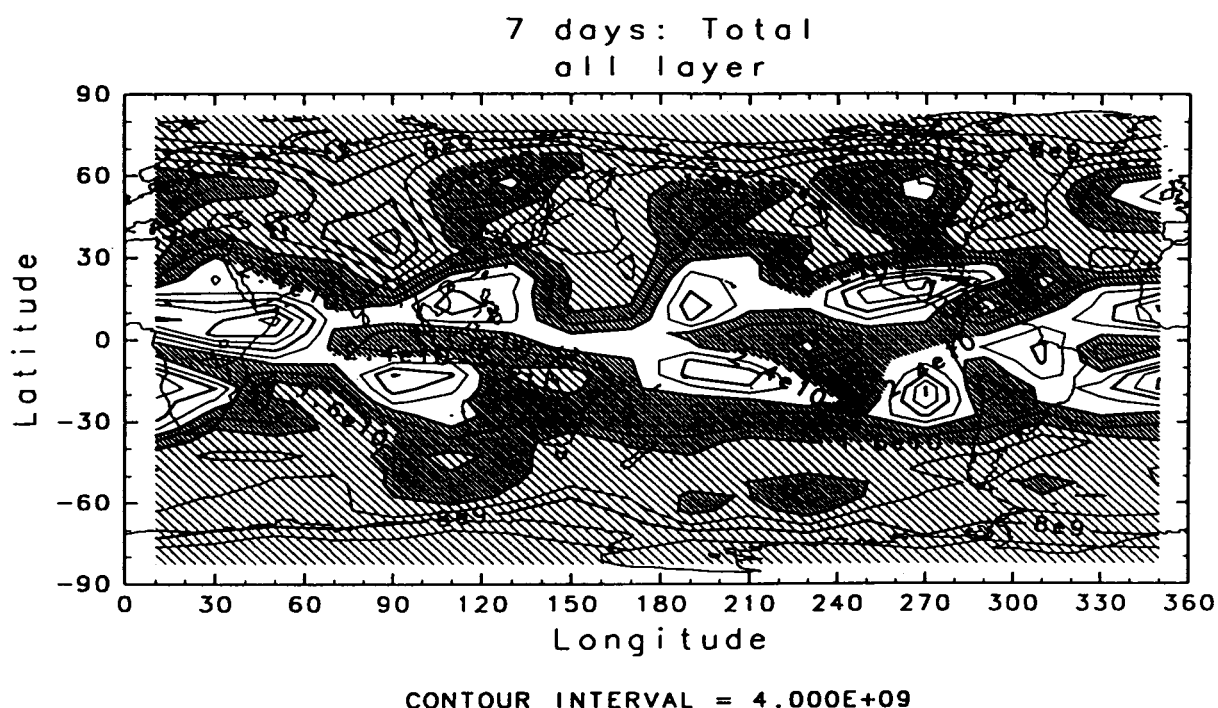


図4: 2月一ヶ月間に各位置を南北に通過した粒子数の鉛直積算値の緯度経度分布図。7日の条件付通過数。通過数の少ない順から粗いハッチ, 細かいハッチ, ハッチなしである。南北両半球中緯度で通過頻度が他経度に比べ多い経度帯がある。

3 まとめ

現実的な気候値を定量的に再現することを目標として、大気大循環モデルの放射、雲、陸面等の各物理過程において、物理的考察に基づいたパラメタリゼーションの改良を行なった。気候値を境界条件としてモデルを長期間積分することにより、気候値の再現性は高いことが示された。しかし、定量的には依然いくつかの問題点があることがわかった。海洋大循環モデルにおいても、様々な数値実験により良好な気候再現性を有することが明らかになったが、より定量的な結果を得るためには各種のサブグリッドスケールの現象をモデルに導入する必要があるとわかった。大気・海洋両モデルの結合に着手

した。両モデルのドライバと両モデル間の入出力データを管理するパーツから成り、大気・海洋モデル自体はそれぞれほとんど変更することなく結合できるシステムである。

大気大循環モデルを成層圏から下部中間圏の一部まで適応範囲を拡大して長期間積分を行った結果、成層圏においても高い性能を保有していることが示された。また、大気大循環モデルで得られた大気循環中の物質循環について調べた結果、赤道収束帯付近と同様、南北中緯度にも物質輸送に関するポテンシャルバリアがあることがわかった。

4 研究発表の状況

論文

- A. Numaguti: Dynamics and energy balance of the Hadley circulation and the tropical precipitation zones. Part II: Sensitivity to meridional SST distribution, *Journal of the Atmospheric Science*, 1995, Vol.52, 1128–1141.
- M. Takahashi and M. Shiobara: A note on a QBO-like oscillation in a 1/5 sector three-dimensional model derived from a GCM, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1995, Vol.73, 131–137.
- I. Ishikawa, Y. Yamanaka, and N. Suginohara: Effects of Presence of a circumpolar region on buoyancy-driven circulation, *Journal of Oceanography*, 1995, Vol.50, 247–263.

講演

- ・ A. Numaguti, S. Sugata, S. Mitsumoto, M. Takahashi, M. Kimoto, T. Nakajima, A. Sumi, T. Matsuno: Current Status of CCSR/NIES Atmospheric General Circulation Model, UCLA/Univ. of Tokyo Joint Workshop
- ・ 沼口 敦, 光本 茂記, 高橋 正明, 熊倉 俊郎, 中島 映至, 塚本 雅仁, 住 明正, 松野 太郎, 江守 正多: CCSR/NIES 大気大循環モデルの気候値 (第 2 報), 日本気象学会 1994 年春季大会
- ・ 塚本 雅仁, 中島 映至: k -distribution のチャンネル最適化による大循環モデル用放射コードの高速化, 日本気象学会 1994 年春季大会
- ・ 中島 映至, 塚本 雅仁, 沼口 敦, 熊倉 俊郎, 高橋 正明, 住 明正, 松野 太郎: CCSR/NIES 大循環モデルにおける放射収支の様相, 日本気象学会 1994 年春季大会
- ・ 菅田誠治, 高橋正明: CCSR/NIES 大気大循環モデルの成層圏の振舞について (序報), 日本気象学会 1995 年度秋季大会
- ・ 菅田誠治: 大気大循環におけるラグランジュ的粒子運動 (その 2), 日本気象学会 1995 年度秋季大会
- ・ 菅田誠治: 粒子の運動の時間スケールに基づいたラグランジュ的大気大循環, 日本気象学会 1996 年度秋季大会