

グローバル・モデルによる大気中 CO₂ 分布のシミュレーション

井口敬雄・木田秀次
(京都大学大学院理学研究科)

要 旨

大気と陸上植生,あるいは大気と海洋との間における CO₂のやり取りを明らかにすることは大気中における CO₂収支を明らかにする上で欠かせない課題である。これらの間における CO₂のやり取りは互いにフィードバック機構を持つ相互作用的なものであり,したがってその研究方法として数値モデルを用いたシミュレーションは有効であると考えられる。本論文では,大気モデルと陸上生態系モデルあるいは海洋モデルとを組み合わせた結合モデルによる相互作用炭素交換シミュレーションの準備段階として,大気大循環モデル(GCM)と3次元輸送モデルとを結合させたグローバルモデルを用いて行った大気中 CO₂濃度分布のシミュレーションの結果について報告する。

キーワード: CO₂, 炭素循環, 輸送モデル, 物質輸送

1 イントロダクション

大気中における CO₂濃度は上昇の一途をたどっており,その温室効果による地球規模の気候変動が人間生活に与える影響が注目を集めるようになってきた。今後の CO₂濃度の変化を予測するためには大気中 CO₂の収支を明らかにすることが必要であり,その研究方法として数値モデルを用いたシミュレーションが有用であることは井口・木田(1999)で述べた。

井口・木田(1999)では,開発した3次元輸送モデルと解析された大気データおよび地表面における CO₂フラックスのグリッドデータを用いて大気中 CO₂濃度分布のシミュレーションを行い,結果を観測値と比較することによってそのフラックスデータにおける大気中 CO₂収支のシナリオについて検討を行った。この研究は,現在の状態について明らかにする上では有効な方法であるが,将来の予測を行うには適していない。

例えば,大気と陸上植生について考えてみる。気

温,湿度,降水量,雲量(日射量)および CO₂濃度といった大気の状態は植物の生育にとって,重要な条件である。しかし逆に,アルベド,粗度,蒸発散そして CO₂の放出/吸収といった点に関し,陸上の植生は大気にとって重要な境界条件と言える。現実の世界では,両者は互いにこれらの影響を及ぼし合いながら変化したり平衡状態を保ったりしているはずであり,したがってこうした相互作用を考慮にいれながら大気と陸上植生の CO₂交換を予測していく手段として,大気モデル(GCM)と陸上植生モデルとを結合させ,互いにフィードバックを行いながらシミュレーションを行うという方法が有効であると考えられる。

生物物理学のプロセスに基づいた陸上植生の数値モデルは最近盛んに開発されるようになってきた。Sellers 他(1986)は GCM に境界条件を与えるモデルとして SiB(Simple Biosphere Model)を開発した。また Ito and Oikawa(2000)は陸上植生の炭素保有量の計算を目的として Sim-CYCLE(Simulation

model of Carbon cYcle in Land Ecosystems) を開発し、地球上の炭素循環における陸上植生の寄与を見積もっている。

同様に、大気と海洋の間においても熱のやり取りをはじめとした相互作用が存在しており、CO₂増加が気候に与える影響について大気-海洋結合モデルを用いて行った研究もいくつか発表されるようになってきた(高田他(1995)、野田他(1995))。

このように植生や海洋の数値モデルの進歩により、大気と植生および海洋との間の相互作用的シミュレーションの実現が可能になってきた。特に炭素循環に注目してシミュレーションを行う場合、植生や海洋による強制力をGCMに取り入れ、それによって計算された風などの大気データを用いて大気中のCO₂濃度分布を求め、さらにその濃度分布を大気と植生あるいは海洋との間のCO₂交換過程に反映させる必要がある。

本論文ではこうした結合モデルによる相互作用のシミュレーションを実現するための段階として、GCMによって計算された大気データを用いてオンラインで大気中のCO₂輸送を行うシミュレーションを試みた。

2 モデルの説明

今回のシミュレーションは、3次元輸送モデルとGCMとを結合させたモデルを用いて行った。ここではそれぞれのモデルについて説明する。

2.1 3次元輸送モデル

大気中におけるCO₂の分布をシミュレートするために開発した、風などの大気データを外部から読み込んでトレーサの輸送を行う3次元輸送モデルである。このモデルの詳細については、井口・木田(1999)に説明してある。

今回のシミュレーションにおいても水平解像度は2.5°×2.5°であるが、鉛直方向については η 座標(気象庁ハイブリッド座標)で20層としている。また、時間ステップは10分にしてある。

2.2 大気循環モデル

今回使用した大気大循環モデル(GCM)は、千葉他(1996)が開発した気象研究所全球スペクトル大気大循環モデル(MRI-GSPM)である。このモデルは大気の主要な物理過程を含むプリミティブ方程式系のスペクトルモデルで、特に新しい放射スキーム

を導入し、中層大気の再現性を向上させたことに特長があるが、今回はまずモデルの結合を実現させることに重点を置いたこと、さらにCO₂の循環という観点から見れば成層圏上部より上の大気循環が下層のCO₂濃度分布に与える影響は非常に小さいことから、上部境界の高度を約30kmとした。また海面水温については月毎の気候値を時間的に内挿して用いている。

水平方向の解像度はT42で、鉛直方向の解像度と時間ステップは輸送モデルに合わせてそれぞれ η 座標で20層、10分としている。

2.3 結合モデルの構造

結合モデルではGCM側で計算される風速などの大気データを用いて輸送モデル側でCO₂の輸送および濃度分布の計算を行う(Fig. 1)。

輸送モデルとGCMは鉛直方向の層構造を同一にしてあるので、鉛直方向の内挿を行う必要はない。また、水平面上のグリッド位置は異なるが、スペクトルモデルなのでGCMで求められたスペクトル係数から輸送モデルのグリッド位置でのデータを正確に求めることができる。しかしながら、この輸送モデルのグリッド点におけるデータの再計算は計算時間のかかなりの割合を占めるので、輸送モデルのグリッド位置を従来の等間隔からGCMのGaussian gridの位置に合わせることでデータの再計算を簡略化する事も考えられ、今後の課題にしたい。

井口・木田(1999)における輸送モデルでは、使用した解析データの空間的および時間的解像度の低さから、最下層を大気境界層と同じぐらいの厚さ(約1.4~1.5km)にとり、地表面からのCO₂フラックスも即座に層内で均一になるように扱っていた。そのため、現実では強いCO₂フラックスの存在する地域で境界層内に発生する鉛直方向の大きなCO₂濃度傾度がモデルでは再現されず、地上CO₂観測値とモデル値の間に大きな差が生じた。しかし、今回はGCMによって計算された境界層内のより解像度の高いデータをつかうことができ、境界層内における鉛直濃度分布や積雲対流によるCO₂の鉛直輸送も再現することができる。MRI-GSPMでは、乱流による鉛直混合はLouis(1979)、積雲対流による鉛直輸送はKuo(1974)のスキームを用いて水蒸気や顕熱等の輸送を行っており、したがって輸送モデルでも同じスキームを用いてCO₂の鉛直輸送を計算している。

さらにCO₂濃度についても、輸送モデルで計算

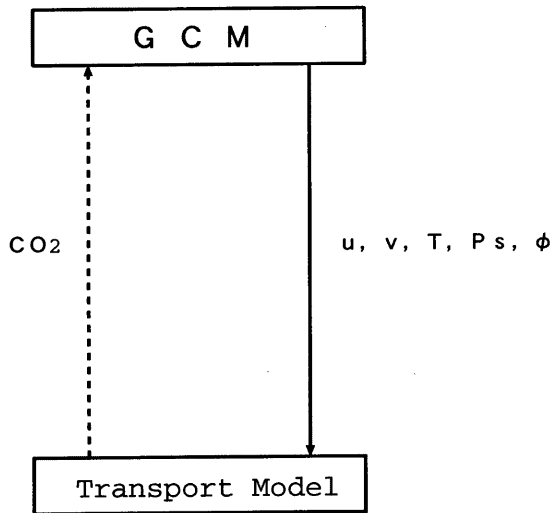


Fig. 1 Coupling of GCM and transport model

された CO₂ の濃度分布から GCM の放射過程へのフィードバックを行うことができるが、今回は簡略化のために行っておらず、GCM の放射スキームは CO₂ 濃度を全球 350ppmv で一様だとして計算されている。

3 シミュレーション

3.1 概要

結合モデルを用いて大気中 CO₂ の濃度分布シミュレーションを行い、結果を 1989 年の CO₂ 観測値と比較した。今回は結合モデルの動作を確認する事を目的とした最初のテストであり、必ずしもモデル値と観測値の厳密な比較を必要とする訳ではないが、本章に述べるようにシミュレーションの条件を観測に近づけるよう考慮した設定をいくつか行った。

3.2 使用データ

地表面からの CO₂ フラックスデータとして、NASA/GISS の Fung が作成・編集した地表面フラックスデータを用いた。

このデータについては井口・木田 (1999) に説明してあるが、シミュレーションの説明として重要と思われるので再度要点を記す。

(1) 地表面における炭素フラックスのグリッドデータを化石燃料の消費、土地利用の変化、海洋、植生の 4 つのカテゴリについてまとめている。

(2) データの解像度は化石燃料と土地利用が $1^\circ \times 1^\circ$ 、海洋と植生は $4^\circ \times 5^\circ$ となっており、これを $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ に変換して用いた。

(3) 化石燃料、土地利用、海洋の 3 つのカテゴリについては年間のフラックス量となっており、シミュレーションでもコンスタントなフラックスとして与えた。また、植生のみ月毎のフラックスが用意されており、スプラインによって 1 日毎にフラックス量が少しずつ変化するようにした。なお、植生からのフラックスに現在は日変化は取り入れていない。

ただし今回のシミュレーションでは、井口・木田 (1998) の研究において、シミュレーション結果の年平均された南北両極の濃度差がより観測に近くなるように Fung のデータに変更を加えたものを用いた (Table 1, Table 2)。

また、シミュレーション結果と比較する観測値は、WMO/WDCGG が収集した 1989 年の世界各地の CO₂ 観測値 (月平均値) からモデルのグリッド地点で内挿して求めた水平濃度分布をさらに年平均したものを用いた。

	Northern Hemisphere	Southern Hemisphere	Total
Fossil fuel	5.0	0.3	5.3
Land use	0.18	0.12	0.3
Ocean	0.3	-2.9	-2.6
Vegetation	0.0	-0.0	-0.0
Reserve in the atmosphere	5.5	-2.5	3.0

【Annual Flux (GtC/y)】

Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0.80	0.56	0.70	1.40	0.92	-0.85	-2.66	-3.08	-0.36	0.96	0.87	0.74
-0.11	-0.76	-0.58	-0.08	0.03	0.28	0.30	0.35	0.39	0.23	0.08	-0.14

【Monthly Flux from vegetation(GtC/mon)】

Table 1 Global CO₂ budget of original NASA/GISS Fung's data

	Northern Hemisphere	Southern Hemisphere	Total
Fossil fuel	5.3	0.3	5.6
Land use	0.7	0.5	1.2
Ocean	-0.2	-2.4	-2.6
Vegetation	-0.9	0.0	-0.9
Reserve in the atmosphere	4.9	-1.6	3.3

【Annual Flux (GtC/y)】

Table 2 Global CO₂ budget of modified NASA/GISS Fung's data

3.3 シミュレーションの手順

GCMにおける初期状態は無風、気温一定、地上気圧一定（地形は考慮）とし、まずこの状態から2年間の慣らし運転を行い、3年目のCO₂濃度分布を観測と比較することにした。モデルの大気状態は1年分も走行させれば初期状態の影響がなくなるので2年という準備期間は充分な長さである。海面水温のデータは1987年のものから用いている。これは、モデル結果と比較するCO₂観測値が1989年のものなので、ちょうど3年目が1989年の海面水温データを用いることになるからである。

また、CO₂の濃度についても全球一様（347.8 ppmv）を初期状態とした。この初期濃度は、シミュレーションを開始して3年目の全球平均濃度が観測値に基づく1989年の推定値（Conway *et al.*, 1994）と等しくなるように決めてある。

4 結果

Fig. 2に、シミュレーション3年目における地表（最下層）の年間平均濃度分布を示す。一方、Fig. 3は、1989年の月平均観測値からの内挿によって求めたCO₂濃度分布の年間平均値である。そこで、シミュレーションの結果についても、観測点に最も近いグリッドの値のみを取り出し、そこから内挿を行って求めたCO₂濃度分布をFig. 4に示した。

モデル値と観測値を比較すると、モデル値が北半球でかなり高く、南半球で逆にかなり低くなっていることがわかる。これは、乱流によるCO₂の鉛直混合が不十分なためと思われる。Fig. 5およびFig. 6は、Fig. 3およびFig. 4の値をさらに帯状平均したものである。Fig. 6においてCO₂のソースやシンクが近くにない南北両極の濃度は観測に近いものであるが、それ以外ではソースやシンクの緯度別分布の傾向がはっきりと表れている。CO₂濃度の鉛直分布に関するデータは少ないが、中澤他（1995）が西シベリア上空において行った観測がある（Fig. 7）。その結果と比較するために、観測点に最も近いグリッドのCO₂濃度鉛直分布のシミュレーション結果をFig. 8に示した。Fig. 8の濃度分布は年平均値であるが地表付近での鉛直濃度傾度は明らかに観測値を大きく上回っており、この結果もモデルでのCO₂の鉛直混合が不十分であることを示している。

またFig. 2およびFig. 4において目立つ点とし

て、北アメリカ大陸東部から太平洋赤道域にかけてCO₂の高い濃度の領域が続いており、赤道向きにCO₂が流されているように見えることが挙げられる。Fig. 9とFig. 10にECMWF/TOGAの解析データおよびGCMで計算された1月と7月の平均風を示すが、いずれも北アメリカ大陸東部から赤道方向に北東の風が吹いているのがわかる。Fig. 3の観測値を見ても、この北東の風の領域に相当する地域のCO₂濃度がその東西の地域よりも若干高い事が確認でき、実際にこの方向にCO₂が輸送されていることがわかる。さらに赤道付近の海域はCO₂の放出源にもなっており、この2つの効果が鉛直混合の不十分さによって強調され、Fig. 2およびFig. 4の様に目立って濃度の高い領域となって表れているものと思われる。

また、年間・帯状平均されたCO₂観測値の南北分布（Fig. 5）は赤道付近で緩く下に凸となるカーブを描いているが、井口・木田（1999）のモデルによるシミュレーションの結果ではこうしたカーブを描かずほぼ直線状の分布となっており、モデルでは取り入れていなかった積雲対流によるCO₂鉛直輸送の効果と考えられた。今回、積雲対流の効果を取り入れたモデルによるシミュレーションで観測と同じような分布が見られないかと期待されたのだが（Fig. 6）、赤道付近の高いCO₂濃度に邪魔されて確認することができなかった。今後乱流混合の効果を改良した際は再度この点に注目したい。

その他CO₂の濃度分布において様々な違いが見られるが、これはシミュレーションにおけるCO₂のソースおよびシンク分布の実際との違いや、GCMによって計算された風と現実に吹いた風との違いも影響している。

5 まとめ

今回は、GCMと輸送モデルとを結合させたモデルを用いてCO₂輸送の長期シミュレーションを行うことができることを示した。しかし、シミュレーションによるCO₂濃度分布と観測値とを比較した結果、境界層内の乱流による鉛直混合が不十分であることが示され、第一の課題として残った。今後はこの点について改良すると共に、モデルの解像度、計算速度等についても向上を図り、植生モデルや海洋モデルとの結合による炭素循環のシミュレーションの実現へと発展させていきたい。

1989 ANNUAL MEAN CO₂ CONC.

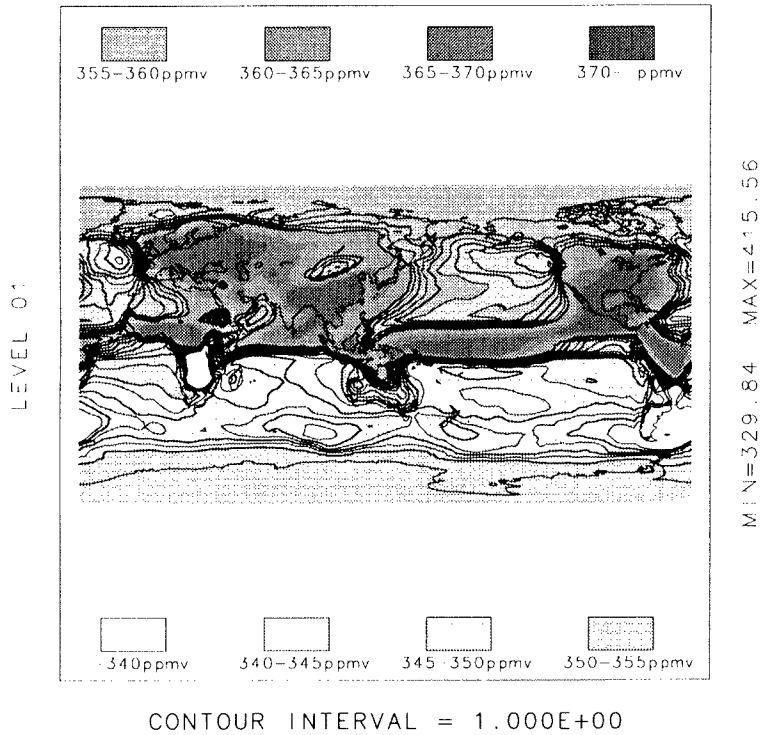


Fig. 2 Annual mean simulated CO₂ distribution in the lowest layer

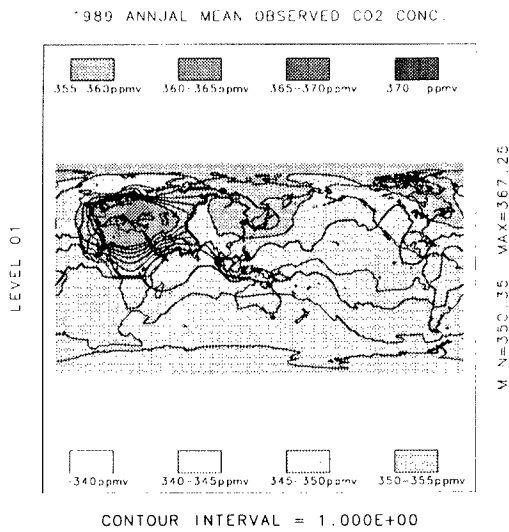


Fig. 3 Annual mean CO₂ distribution interpolated from ECMWF/TOGA 1989 observation data

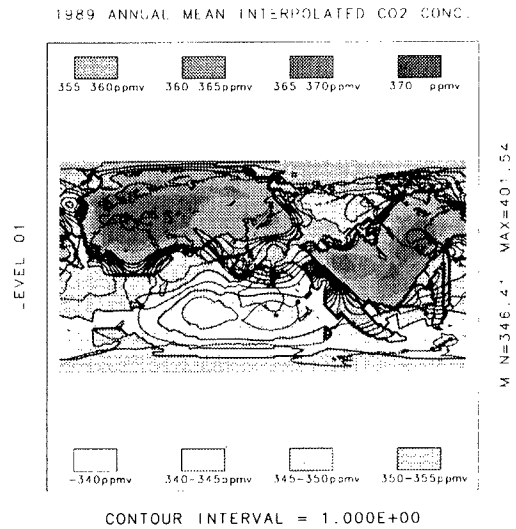


Fig. 4 Annual mean CO₂ distribution interpolated from the simulated values at the stations

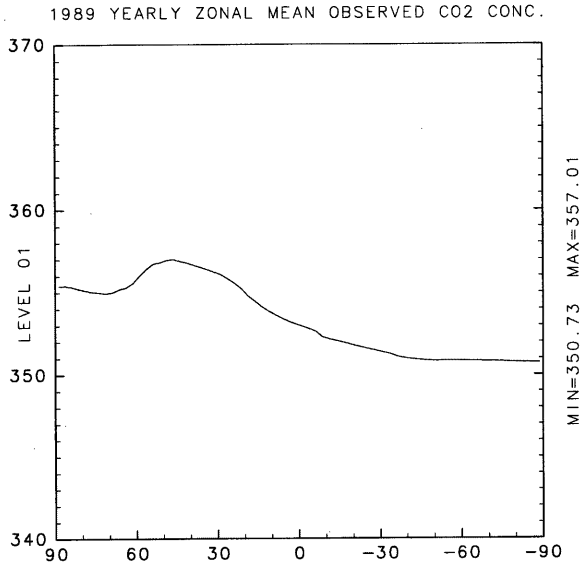


Fig. 5 Annual and zonal mean CO₂ distribution interpolated from 1989 observation data

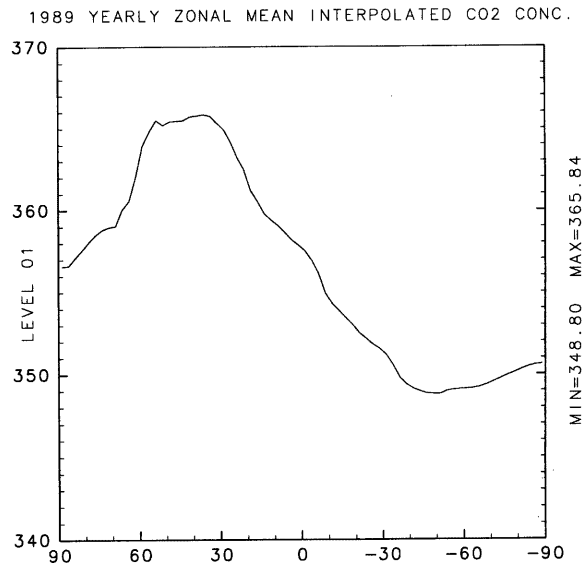


Fig. 6 Annual and zonal mean CO₂ distribution interpolated from the simulated values at the stations' locations

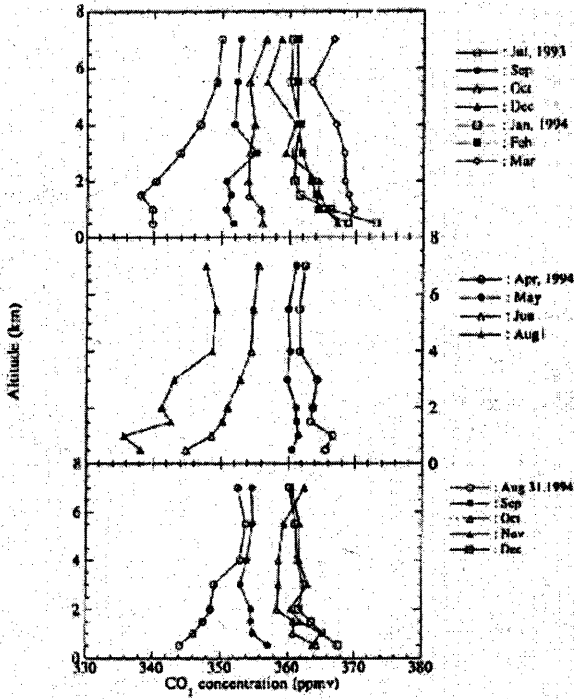


Fig. 7 Vertical CO₂ profile at west Siberia(61°N, 73°E) observed by Nakazawa *et al.* (1995)

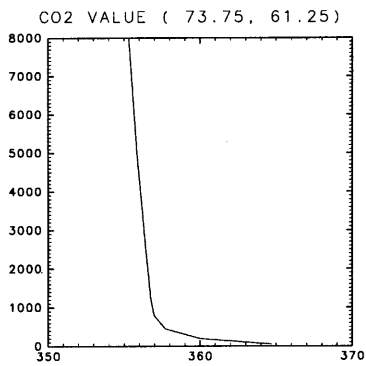
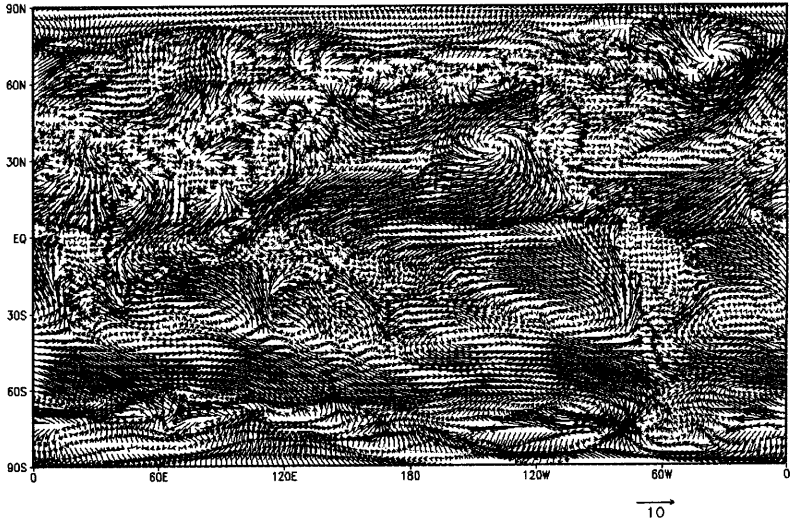


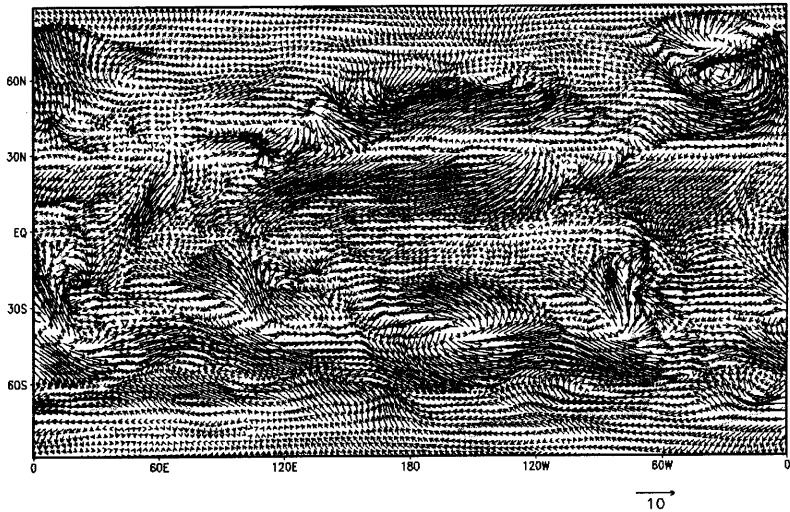
Fig. 8 Vertical CO₂ profile of the simulation at west Siberia(61.25°N, 73.75°E)

ECMWF/TOGA SURFACE WIND 1989/01



GrADS: COLA/IGES

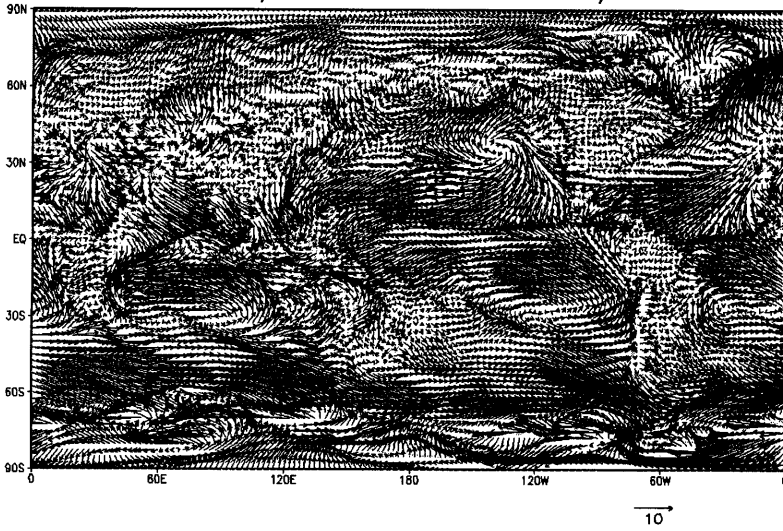
GCM SURFACE WIND 1989/01



GrADS: COLA/IGES

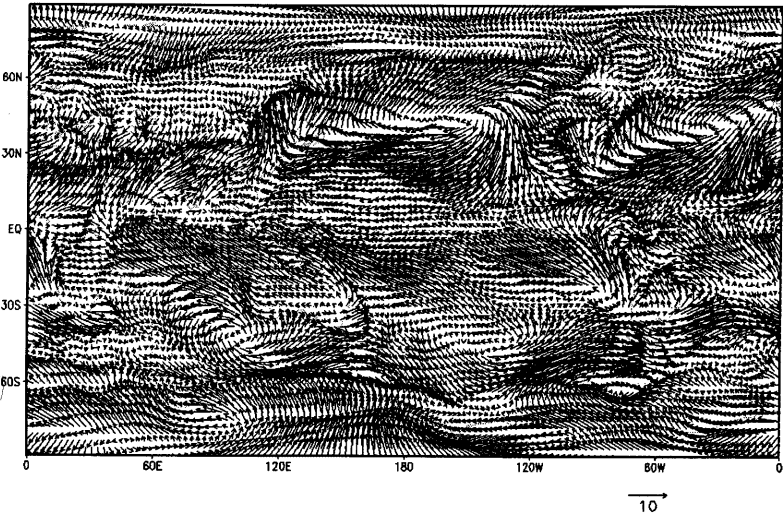
Fig. 9 1989/01 monthly wind of ECMWF/TOGA and GCM

ECMWF/TOGA SURFACE WIND 1989/07



GRADS: COLA/IGES

GCM SURFACE WIND 1989/07



GRADS: COLA/IGES

Fig. 10 1989/07 monthly wind of ECMWF/TOGA and GCM

謝辞

本研究に用いた大気大循環モデルMRI-GSPMは、気象研究所の千葉長氏のご厚意により使用させて頂きました。

本論文に関する計算には京都大学大型計算機センターのスーパーコンピューターを、東京大学気候システム研究センターの補助も受け使用させて頂きました。本論文中の図の作成には地球流体電脳倶楽部の電脳ライブラリ(dcl-5.0)およびGrADSを使用させて頂きました。本研究で使用したCO₂フラックスデータはNASA/GISSのFung氏が作成したものをインターネットを通じて取得しました。またCO₂濃度の地上観測値はWMO/WDCGGより配布されたものを使用させて頂きました。

以上の各氏と各機関に御礼申し上げます。

参考文献

- 井口敬雄・木田秀次(1998): 3次元輸送モデルを用いたシミュレーションによる大気CO₂収支の研究, 1998年度日本気象学会秋季大会予稿集, pp.149
- 井口敬雄・木田秀次(1999): 3次元輸送モデルを用いた大気中におけるCO₂収支の研究, 京都大学防災研究所年報, 第42号, B-1, pp.385-395
- 高田久美子 他(1995): CCSR/NIES 大気-海洋混合層結合モデルによるCO₂倍増実験, 1995年度日本気象学会春季大会予稿集, pp.80
- 千葉長・山崎孝治・柴田清孝・黒田友二(1996): 気象研究所全球スペクトル大気大循環モデル(MRI-GSPM)の記述と10年積分の結果の平均統計量, 気象研究所報告, 第47巻第1号, pp.1-45
- 中澤高清 他(1995): シベリア上空におけるCO₂濃度の分布と変動, 1995年度日本気象学会春季大会予稿集, pp.230
- 野田彰 他(1995): CO₂漸増実験/MRI-GCMにおけるオホーツク海の温暖化について, 1995年度日本気象学会春季大会予稿集, pp.81
- Conway, T. J. *et al.* (1994): Evidence for inter-annual variability of the carbon cycle from the National Oceanic and Atmospheric Administration/Climate Monitoring and Diagnostics Laboratory Global Air Sampling Network, *Journal of Geophysical Research*, Vol.99, pp.22831-22855
- Itoh, A. and T. Oikawa(2000): The large carbon emission from terrestrial ecosystems in 1998: a model simulation, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol.78, No.2, pp.103-110
- Sellers, P.J., Y. Mintz, Y. C. Sud and A. Dalcher(1986): A simple biosphere model(SiB) for use within general circulation models, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol.43, No.6, pp505-531