

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

井口 敬雄・木田 秀次
(京都大学大学院理学研究科)

要 旨

大気中におけるCO₂収支の研究を目的として、3次元のグローバル輸送モデルを作成した。このモデルは大気をグリッドボックスに分割し、隣り合うグリッドボックス間のCO₂フラックスを計算するオイラー方式の輸送モデルであり、モデル内のCO₂質量の保存を保証する。本モデルの開発においては当初、移流、拡散、鉛直流の計算において問題があり、基本的なスキームのみでは計算不安定を起こしたり、非現実的なCO₂濃度分布が計算されたりした。こうした問題のそれぞれについてスキームの修正や計算法の改良を行い、それによってモデルの安定した動作と合理的なCO₂濃度分布が得られることを輸送実験によって確認した。

キーワード: CO₂、炭素循環、輸送モデル、物質輸送

1 大気CO₂の放出源および吸収源の研究

産業革命以後、人類は石炭、石油などの化石燃料を大量に消費するようになり、それによって発生した大量のCO₂が大気中に放出されるようになった。

人間活動によって大気中のCO₂濃度が急激に上昇していることを明らかにしたのは、Keeling(1976)がハワイのマウナ・ロア山上で1958年から続けてきたCO₂濃度の定点観測である。観測開始当初315ppmv程度であった年平均濃度は1990年には350ppmvを超え、1995年には360ppmv近くにまで達した(Figure 1)。南極大陸の氷床コアの測定によれば、産業革命以前の大気CO₂濃度は約280ppmvである。

この急激な大気中CO₂の増加により、温室効果による気候への影響が関心を集めるようになった。しかしながら今後の大気中CO₂濃度の変化を予測するためにはその収支を明らかにする必要がある。

化石燃料の消費によるCO₂の放出量は、国連がまとめた化石燃料の生産量や消費量のデータなどを用いて見積もることができる(Keeling,1973; Marland,1985)。1994年の放出量は6.1GtC/yと見積もられている(IPCC,1995)(尚、GtC/yという単位は、1年間に放出されたCO₂の炭素部分が何Gt(=10⁹t)あるかを表わす単位であり、以後本文ではこの単位を用いる)。この内、大気中に残留するCO₂量の増加は1980年代で3.3GtC/yと見積もられている(IPCC,1995)。

残りのCO₂の行方については当初その大部分が海洋によって吸収されるものと考えられていた。しかし、森林破壊を主とする土地利用によっても化石燃料の消費に匹敵する規模のCO₂量が放出されるとの見積もりが出され(Bolin,1977)、従来の海洋によるCO₂吸収の見積もり(Oeschger et al.,1975)では収支が合わなくなってきた。そのため、海洋以外にも大きなCO₂の吸収源があるのではないかと見られる

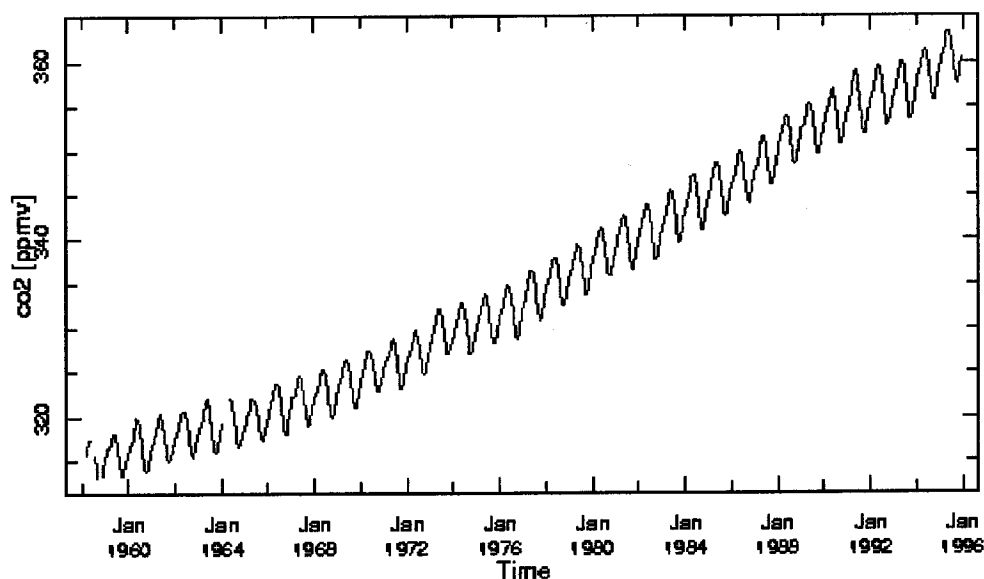


Figure 1. CO₂ concentration at Mauna Loa (This plot was taken from home page of Columbia University IRI/LDEO Climate Data Library.)

ようになった (Broecker et al., 1979)。

この問題はかつてミッシングシンクと呼ばれていたが、IPCC(1995)の第2次報告書では陸上生態系が炭素の貯蔵庫となっていることが示唆されている。その主な要因としては北半球の森林の再生、CO₂施肥効果、窒素沈着による施肥効果、気候の変化による効果が考えられる。

植生—大気間のCO₂のやり取りについても研究が行われている。Fung 他 (1987) が植生の物質生産量データ、土壌の呼吸に関するデータおよび人工衛星で観測された植生の活動度を基に植生—大気間のCO₂交換量を月毎に推定した。山本他 (1998a)、三枝他 (1998b) は、植生の上空でCO₂濃度を直接測定し、フラックスの計算を行っている。しかし現在のところ、全体としての植生がCO₂の吸収源であるという確証は得られていない。

以上に述べたCO₂の主な放出源・吸収源のうち、化石燃料の消費と大気中への残留を除いてはいずれも見積もりの誤差が大きく、大気中CO₂収支の全容はまだ正確には把握されていない。また、大気中への残留量についても年々変動が大きく (Conway et al., 1994)、CO₂収支についても大きな年々変動があるものと考えられる。

2 モデルを用いた大気CO₂収支の研究

大気CO₂収支を明らかにするためのアプローチとして、1章で述べたようなCO₂の放出源や吸収源を直接調べる他に、モデルを用いた方法もある。

3次元の輸送モデルを用いることによって、推定されたCO₂の放出源または吸収源の分布やその強度に基づいて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してその推定を検証したり、逆に観測値に近いCO₂濃度分布をシミュレーションで再現することによってCO₂のソースまたはシンクの分布やその強さを推定する (逆転法) 事ができる。

前述のFung 他 (1987) は推定した植生—大気間のCO₂交換量と輸送モデルを用いてシミュレーションを行い、観測値に近いCO₂濃度の季節変化を得た。Tans 他 (1990) は海面付近における大気と海水のCO₂分圧の差の観測値から海面におけるCO₂のフラックス分布を推定し、それを用いて輸送モデルでシミュレーションを行った。その結果、観測地に近い濃度分布をモデルで再現するためには北半球の陸上に大きな吸収源の存在が必要という結論に達した。

輸送スキームについても従来のオイラー方式に加え、ラグランジュモデルやセミラグランジュモデルが開発され、用いられるようになってきた。Taylor (1989) はラグランジュ型の輸送モデルを開発し、CO₂輸送のシミュレーションを行って大気中CO₂の

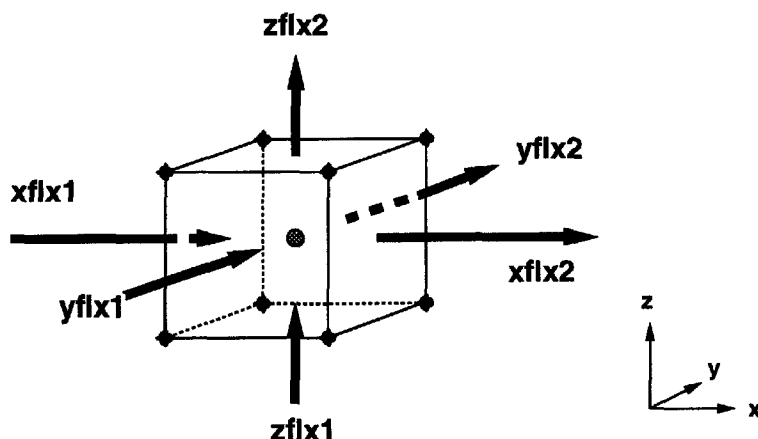


Figure 2. CO₂ fluxes of the grid box

収支について検討をおこなった。田口 (1994) はセミラグランジュ型の輸送モデルを開発して CO₂ の輸送実験を行い、地表面における CO₂ のシンク/ソースの分布について議論している。

また、大気中の CO₂ と各放出源から放出される CO₂ とでは ¹³C/¹²C 比が異なることを利用した放出量の推定法も盛んになってきており、輸送モデルによるシミュレーションと組み合わせた研究も行われている (Keeling et al., 1989; Enting et al., 1995)。しかし、この方法における見積もりにはその絶対値と同等以上の誤差があるのが現状である。

3 3次元輸送モデルの開発

我々は大気中 CO₂ の収支における植生効果の数値的研究を目的とし、オイラー方式の3次元輸送モデルを開発した。本章では、開発した輸送モデルについての技術的な解説を行う。

3.1 モデル計算の基本

本モデルは風速などの大気データを外部から読み込んで CO₂ の輸送を行うオイラー方式のグリッドモデルである。

モデルで用いるスキームの基本となるのは、質量保存の式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

である。これは単位体積に含まれる物質量の流入、流出による変化を表わした式であるが、本モデルでは大気をグリッドボックスに分割して各ボックス内における CO₂ 量を計算して求めている。モデルは各グリッドボックス内における CO₂ の質量と混合比をデータとして保持しておく。そして読み込んだ大気データを元に隣り合うグリッドボックスとの間の CO₂ フラックス量を計算して次タイムステップにおけるグリッドボックス内の CO₂ 量を求める。Figure 2 で示すように、グリッドボックスの各面における CO₂ フラックス量を xflx1, xflx2, yflx1, yflx2, zflx1, zflx2 とし、計算前後のボックス内の CO₂ 質量を mass1, mass2 とおくと、

$$\begin{aligned} \text{mass2} = \text{mass1} \\ + \text{xflx1} - \text{xflx2} \\ + \text{yflx1} - \text{yflx2} \\ + \text{zflx1} - \text{zflx2} \end{aligned} \quad (2)$$

で次タイムステップにおけるボックス内の CO₂ 量が求められ、さらにボックス内の CO₂ 濃度も求められる。

このスキームの特長は、基本的には特別な調節を何も行わなくてもモデル内の CO₂ 総量の保存が保証されるという点である。輸送モデルにおいて物質の質量が保存されるべきであるのは当然のことであるが、特に CO₂ は最も重要な温室効果気体の一つであり、放射過程を通じて気候に与える影響は大きいため、質量の保存は重要な条件である。

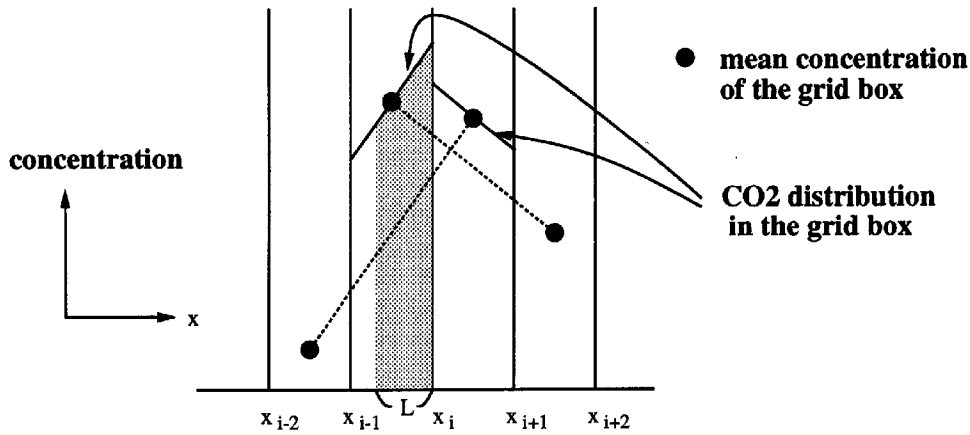


Figure 3. Vertical CO₂ distribution in grid boxes

3.2 移流

本モデルでは移流項（式 (2) の $xflx$ および $yflx$ ）の計算の際、数値拡散をなるべく抑えるため、Emde(1992)のMCスキームを参考に行っている。その概念図を Figure 3 に示す。Figure 3 において、 x_{i-1} と x_i の間の領域（これを領域 $i-1$ と呼ぶ）における平均濃度を C_{i-1} とすると、領域 $i-1$ 内における CO₂ の濃度分布は

$$\begin{cases} C(x) = a(x - x_{i-1}) + b \\ a = (C_i - C_{i-2}) / (2\Delta x) \\ b = C_{i-1} - a \cdot \Delta x / 2 \\ \Delta x = x_i - x_{i-1} (\text{等間隔}) \end{cases} \quad (3)$$

の形で線型に分布するものとする。ここで x_i における境界面を横切って、 x 座標で L の範囲に相当する空気量が東向き（ i が大となる方向）に輸送されるとすると、Figure 3 の陰をつけた部分が輸送される空気の CO₂ 濃度と考え、CO₂ のフラックス量を求める。この方法では、境界面において濃度の不連続が発生することになるが、Figure 3 はかなり誇張した図となっており、実際の CO₂ の変動はもったんだらかであるので計算に悪影響を及ぼすものではない。

また、輸送される空気量がグリッドボックス内の空気量を超えてしまう場合、すなわち CFL 条件 ($u\Delta t \leq \Delta x$) を満たさない場合についても対策を行った。こうしたケースは、東西方向のグリッド間隔が狭くなる極付近での u 成分の風による輸送では避けられない。こうした場合、基本的なスキームではフラックス量を外挿によって求めることになり、異常なフラックス量が計算される可能性がある。

そこで本モデルでは、極付近では東西方向に並ん

だ幾つかのグリッドボックスを一つにまとめ、1 個のグリッドボックスとして u 成分の風による輸送を計算している。まとめて取り扱うグリッドボックスの数は、プログラムのパラメータで設定することができ、CFL 条件をみたすよう極に近くなるほど多くなるようにしている。

3.3 拡散

基本的な拡散方程式は

$$\frac{\partial p}{\partial t} = K \nabla^2 \rho \quad (4)$$

ρ : 濃度

K : 拡散係数

であり、例えば x 方向に垂直な単位面積を通る x 方向のフラックスは

$$F_x = -K \frac{\partial \rho}{\partial x} \quad (5)$$

で表わされる。これを基に本モデルでは拡散による CO₂ 輸送については、隣り合うグリッドボックスの平均濃度の差から求めた濃度傾度に拡散係数を掛け、フラックス量を求めている。本モデルで用いる基本的なスキームは

$$FD_i = -K \frac{C_i - C_{i-1}}{\Delta x} S_i \Delta t \quad (6)$$

で表わされる。 FD_i は x_i における境界面を通るフラックス量（東向きを正）、 S_i は x_i における境界面の面積、その他は式 (3) と同じである。

しかし、この式をそのまま用いると東西方向のグリッド間隔が小さくなる極付近では不都合が生じる。

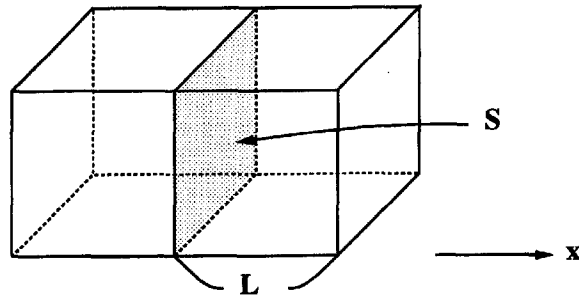


Figure 4. Diffusive CO₂ flux between two grid boxes

これについて、Figure 4に示したような、直方体のグリッドボックス間における拡散を例にとって説明する。 x 方向のグリッド間隔を L 、境界面の面積を S とおく。式(6)によって計算される1タイムステップの間の流量は、

$$FD_i = -K \frac{\Delta C}{L} S \Delta t \quad (7)$$

である。一方、二つのグリッドボックスに含まれるCO₂総量の差は $\Delta C S L$ だから、(拡散による輸送量) $\ll$ (CO₂総量の差)であるためには、

$$L^2 \gg K \Delta t \quad (8)$$

が条件になる。現モデルで使用している値 $K = 5.0 \times 10^4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 、 $\Delta t = 1200 \text{ sec}$ の場合、これを(8)に代入すると $L \gg 7746 \text{ m}$ ということになる。これに対して、現モデルのグリッド間隔は $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ なので、 Δx は緯度 87.5° では 3858 m 、 85.0° では 7716 m である。したがって極付近で(6)を用いると、二つのグリッドボックスのCO₂総量の差と同程度かそれ以上のCO₂の量が輸送されることになり、その結果計算不安定が生じる。

そこで本研究では、水平拡散に関しては次のスキームを用いることにした。

$$FD_i = -\frac{1}{n} \Delta x S (C_i - C_{i-1}) \{1 - e^{-\frac{nK}{(\Delta x)^2} \Delta t}\} \quad (9)$$

n : 定数 (整数でなくてもよい)

(9)では、 $(\Delta x)^2 \gg K \Delta t$ をみたす Δt に対しては(6)を用いた場合とはほぼ同じ値が得られ、 Δt が大きくなってくると $-\Delta x S (C_i - C_{i-1})/n$ に漸近する。現モデルでは n の値を3に設定している。

拡散係数 K の値については、Ishikawa(1995)を参考にし、水平方向には $5.0 \times 10^4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 、鉛直方向には $50 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (高度 1000 m 以下) および $0.5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (同 1000 m 以上) としている。

尚、境界層の取り扱いについては現在、最下層(現モデルでは中低緯度で $1400 \sim 1500 \text{ m}$ 程度)を混合層と見なし、地表面でのCO₂フラックスについても即座に層内で混合されるようにしている。空間的・時間的解像度の低い外部データを用いて如何にして乱流輸送の効果を適切に再現するかは今後の重要な課題の一つである。

3.4 鉛直流

外部データは本来収束または発散のバランスがとれているものであっても、輸送モデルに用いるために内挿を行うとそのバランスは崩れてしまう。したがって、鉛直流についてのみ、外部データをそのまま用いずモデル内で計算している。

Figure 2を用いて鉛直流の計算を説明する。CO₂フラックス $xflx1$, $xflx2$, $yflx1$, $yflx2$, $zflx1$, $zflx2$ に相当する空気フラックスを $axflx1$, $axflx2$, $ayflx1$, $ayflx2$, $azflx1$, $azflx2$ とし、移流前と移流後のグリッドボックス内の空気の質量を $amass1$, $amass2$ とすると、

$$\begin{aligned} azflx2 = amass1 - amass2 + axflx1 - axflx2 \\ + ayflx1 - ayflx2 + azflx1 \end{aligned} \quad (10)$$

によって、鉛直フラックス $azflx2$ が求められる。最下層においては境界条件として $azflx1=0$ であるから、上に向かって計算していくことになる。

鉛直流計算において生じる問題点は

1. 計算される鉛直流が上層において異常に強くなる。
2. 最上層におけるCO₂フラックス量の取り扱いをどうするか。

の2点である。

1. については、基本的に (A) 外部データの水平風の収束が上層 (成層圏) に行く程良くなるため、下層での収束・発散による鉛直流が次々と上層に持ち越され、空気の密度が小さくなる分風速が大きくなっていくことが原因であり、さらに (B) 極付近では特に水平風の収束・発散が悪くなりがちで、強い鉛直流が計算される、という事が分った。また 2. については、この鉛直流の計算方法だとモデルの上部境界 (現モデルでは 10hPa) を通過する CO₂ フラックスを仮想的に求める必要がでてくるという事である。

対策としては、1. の (B) については、3.2 章で説明したように、極付近の東西方向に並んだ複数のグリッドボックスを一つのボックスとして扱うことにより、改善することができた。次に、(A) については、上部境界において $azflx2=0$ を条件とし、上層から下層に向かって鉛直流を計算すれば、全体的に見て異常な鉛直流は大幅に減少した。しかし、この方法では最下層において異常な鉛直流が計算される可能性があり、さらに 2. と同様、下部境界 (地表面) を通過する仮想的な CO₂ フラックスを求めなければならない。モデルによって地表付近の CO₂ 濃度分布をより正確に求めようとする上でこれらの問題は非常に不都合である。

そこで、本モデルでは、中間の層で調整を行う方法を採用した。この方法では、下部境界で $azflx1=0$ 、上部境界で $azflx2=0$ を境界条件とし、最下層から上に向かって、同時に最上層から下に向かって鉛直流を計算していく。調整を行う層では、まず計算された $azflx1$ と $azflx2$ 、および水平フラックスを用いて各グリッドボックスにおける CO₂ 混合比を計算する。そしてその混合比と層内の CO₂ 全質量とに基づいてグリッドボックス内の CO₂ 質量と混合比を再設定する。調整を行う層はパラメーターによって指定することができるが、対流圏上部 (~10km) に位置する層に設定している。この方法では、2. の問題も回避することができる。

4 輸送モデルによるシミュレーション

開発した輸送モデルにを用いて大気中 CO₂ の輸送シミュレーションを行い、その動作を確認した。シミュレーションの概要と結果について述べる。

4.1 使用データ

4.1.1 大気データ

大気データは ECMWF/TOGA の解析データを用いた。このデータは水平解像度 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ で輸送モデルの現仕様と同じであるが、グリッドの位置は異なる。また、鉛直方向には地表面データおよび p 座標で 15 層、時間間隔は 12 時間毎である。これを空間的・時間的に内挿してモデルに取り入れた。

4.1.2 地表面 CO₂ フラックスデータ

また、地表面における CO₂ フラックスデータとして、NASA/GISS の Fung が編集・作成したグリッドデータを用いた。

このデータセットは (1) 化石燃料の消費、(2) 土地利用、(3) 海洋、(4) 植生の 4 つのカテゴリからの CO₂ フラックスデータで構成されており、(1) は Marland(1989)、(2) は Houghton 他 (1987)、(3) は Tans, Fung and Takahashi(1990) および Broecker 他 (1986)、(4) は Fung 他 (1987) の研究をもとに作成されている。

Table 1 にこのデータによる 1 年間の CO₂ 放出 (吸収) 量を示す。(4) の植生からのフラックスについては、年間の合計が近似的に 0 になるように作られている。

(1) と (2) は $1^\circ \times 1^\circ$ 、(3) と (4) は $4^\circ \times 5^\circ$ の解像度となっており、これを輸送モデルで使用する $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ のデータに変換した。また、(1)、(2) および (3) は年間放出 (吸収) 量のデータとなっており、モデルではコンスタントなフラックスとして取り扱っている。一方、(4) については月毎のフラックス値となっており、これをスプラインして 1 日毎にフラックスが変化するようにした。日変化についてはまだ取り入っていない。

4.2 初期状態

シミュレーションの初期状態となる CO₂ 濃度分布については、WMO/WDCGG が収集した世界各地の観測データから 1990 年 1 月の月平均値を用いて内挿を行い、設定した。

この初期状態 (1990 年 1 月 16 日の状態とする) から、y1990 の ECMWF/TOGA のデータおよび CO₂ フラックスデータを読み込み、1 年分の時間積分を行った。

	北半球	南半球	合計
化石燃料	5.0	0.3	5.3
土地利用	0.18	0.12	0.3
海洋	0.3	-2.9	-2.6
植生	0.0	-0.0	-0.0
大気中への残留	5.5	-2.5	3.0

年間放出量

1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
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

植生の月別放出量（上が北半球）

Table 1. Annual CO₂ budget of NASA/GISS Fung's data (unit: GtC)

4.3 シミュレーションの結果

まず、シミュレーション開始後3ヶ月半経過した時点での濃度分布を Figure 5 に示す。Figure 5 では、赤道付近に等濃度線が密集しているところが見られる。これは赤道収束帯 (ITCZ) の位置に相当するものと思われるがこのように濃度が急激に変化する領域の存在は観測でも確認されている。また、CO₂濃度の高い空気がヨーロッパ付近から極方向に輸送されていく様子が見られる。極に近い高緯度の観測点では近くに大きなCO₂のソースが存在しないにもかかわらず時折高い濃度が観測されることがあるが、この図はこうした現象を裏付けるものとなっている。

こうした結果から、水平方向の輸送には問題ないと思われる。

次に、Figure 6 に、Figure 5 と同時刻における子午面 (10°E) 内 CO₂濃度分布を示す。縦軸は σ 値であり、現モデルでは第7層 ($0.192 \leq \sigma \leq 0.296$) で調整を行っている。Figure 6 にも見られる通り、鉛直濃度分布についても異常な点は見られなかった。鉛直流計算および途中の層における調整についても問題はないと思われる。

さらに、年平均した最下層の濃度分布について、観測値と比較したものを Figure 7 に示す。Figure 7 の左右の分布図とも比較のために、各グリッド点における濃度を観測点の位置における濃度から内挿して求めている。Figure 5 が全グリッド点の濃度にモデル計算の結果をそのまま用いているのとは異なる

という点に注意して欲しい。CO₂フラックスデータの気体CO₂収支が実際と異なることによる濃度分布の違いについてはここでは言及しない。ヨーロッパ付近の濃度が大きく異なるが、これは3.3章で説明した通り、最下層を大きくとっているために強いCO₂フラックスがある地域での大きな鉛直濃度傾度を再現できなかったためと考えられる。また、Figure 8 には Figure 7 の CO₂濃度分布をさらに帯状平均したものを示す。モデルの年平均全球濃度は観測に基づく値 (Conway et al., 1994) と等しくなるようにしているが、赤道付近においてモデル値は必ず観測値よりも高くなってしまふ。これは、積雲対流によるCO₂の鉛直輸送を考慮していないことが原因と考えられる。

5 まとめと今後の課題

大気中における CO₂収支の研究と目的として開発した3次元グローバル輸送モデルには当初、移流（極付近）、拡散（極付近）、鉛直流の計算において問題があり、計算不安定が起こったり非現実的な濃度分布が計算されたりした。

本論文で示した改良をモデルに加え、シミュレーションを行った結果、こうした計算不安定や異常な濃度分布は発生せず、CO₂が大気データによって正常に輸送されていることが確認できた。

ただ、境界層における乱流輸送や積雲対流による

CO2 CONC. 1990/05/01 00:00

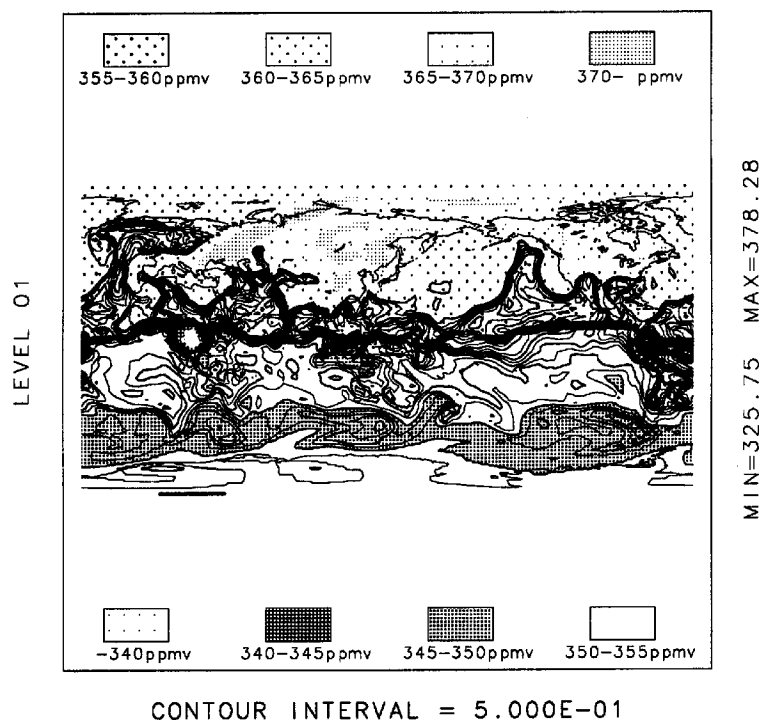


Figure 5. Horizontal transportation of CO₂ by the model

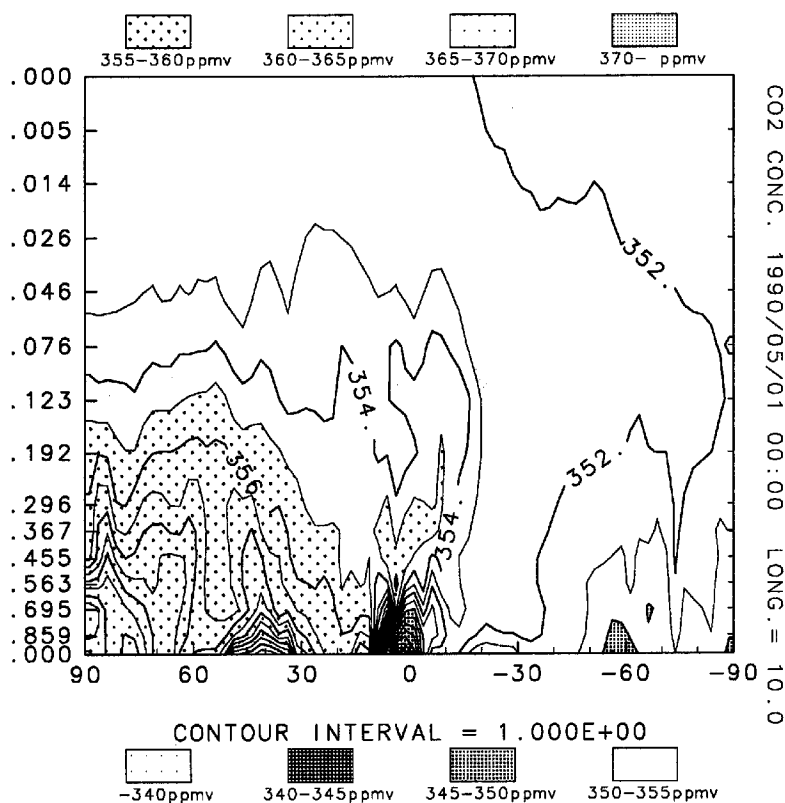


Figure 6. Meridional-vertical distribution of simulated CO₂

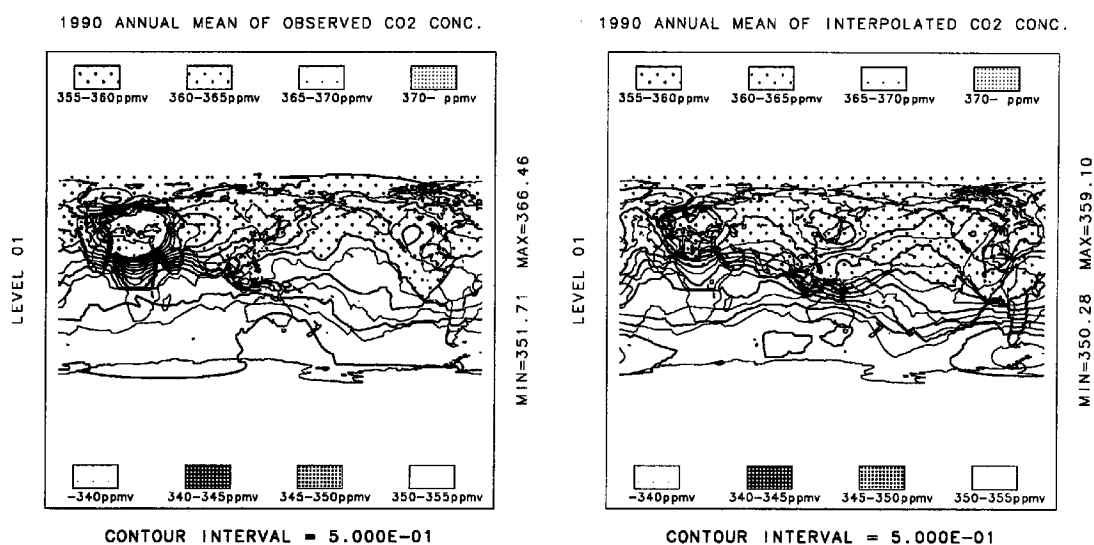


Figure 7. Comparison of annual mean CO₂ distribution between observation(left) and simulation(right)

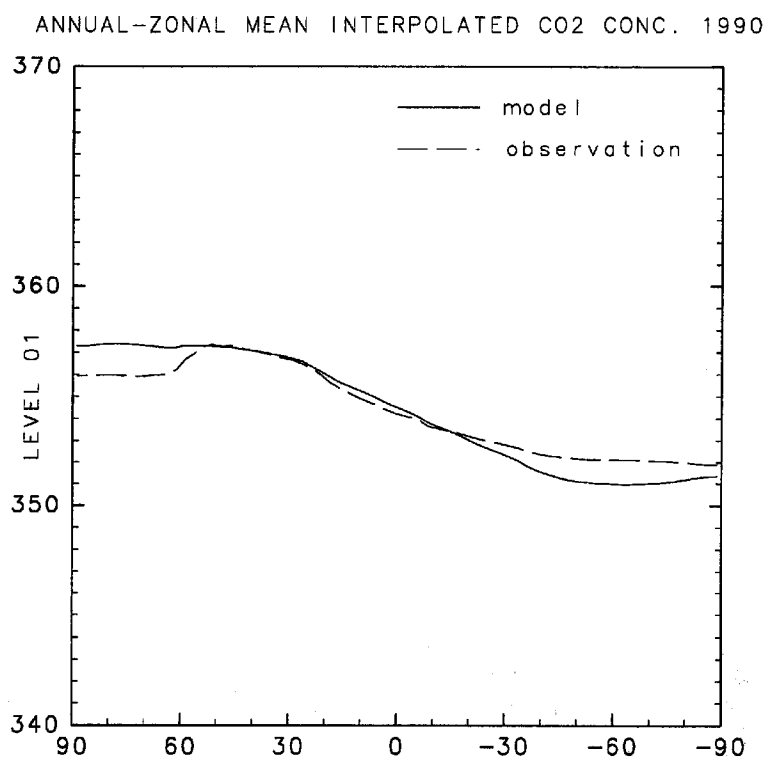


Figure 8 Comparison of zonal and annual mean CO₂ distribution between observation(left) and simulation(right)

輸送の効果の導入など、改良の余地は残されている。

今後はこうした改良も行いつつ、さらに輸送モデルを植生モデルやGCMとも結合させたりしながらシミュレーションを行い、大気CO₂の収支や大気-植生の相互作用に関する研究を行っていきたい。

謝辞

本モデルの開発に当たっては、京都大学防災研究所の石川裕彦先生および資源環境技術総合研究所の田口彰一氏に有用な助言を頂きました。また、京都大学防災研究所大気災害研究部門災害気候分野の皆様にはECMWF/TOGA データを使用させて頂き、NASA/GISS のデータに関する情報を提供して頂きました。以上の方々に御礼申し上げます。

本論文に関する計算には京都大学科学研究所スーパーコンピュータラボラトリおよび京都大学大型計算機センターのスーパーコンピュータを、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) を使用させて頂きました。本研究で利用した CO₂ フラックスデータは NASA/GISS の計算機よりインターネットを通じて取得しました。また、本文中 Figure 1 の Mauna Loa 山上における CO₂ 濃度観測値のプロットは Columbia 大学 IRI/LDEO 気候データライブラリのホームページのものを利用させて頂きました。

参考文献

井口敬雄 (1996) : 3次元輸送モデルによる大気中二酸化炭素濃度分布の数値実験, 1995年度修士論文
三枝信子, 村山昌平, 山本晋, 近藤裕昭 (1998) : 渦相関法による CO₂・H₂O フラックスの長期測定, 日本気象学会 1998 年度秋季大会予稿集, pp.146
田口彰一 (1994) : 3次元移流拡散モデルを用いた大気中二酸化炭素の研究—化石燃料の消費と季節変化する陸上生態系に対する応答—, 資源と環境, Vol.3, pp.283-295
山本晋, 村山昌平, 三枝信子, 近藤裕昭, 中原和真 (1998) : 落葉広葉樹林における CO₂ 濃度高度分布・フラックスの観測とそのモデル化, 日本気象学会 1998 年度春季大会予稿集, pp.81
Bolin, B. (1977) : Changes of land biota and their importance for the carbon cycle, Science, Vol.196, pp.613-615

Broecker, W. S., T. Takahashi, H. J. Simpson and T. H. Peng (1979) : Fate of fossil fuel carbon dioxide and the global carbon budget, Science, Vol.206, pp.409-418
Conway, T. J., P. P. Tans, L. S. Waterman and K. W. Thoning (1994) : Evidence for interannual 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
Emde, K. V. D. (1992) : Solving conservation laws with parabolic and cubic splines, Monthly Weather Review, Vol.120, pp.482-492
Enting, I. G., C. M. Trudinger and R. J. Francey (1995) : A synthesis inversion of the concentration and ¹³C of atmospheric CO₂, Tellus, 47B, pp.35-52
Fung, I. Y., C. J. Tucker and K. C. Prentice (1987) : Application of advanced very high resolution radiometer vegetation index to study atmosphere-biosphere exchange of CO₂, Journal of Geophysical Research, Vol.92, pp.2999-3015
IPCC (1995) : Climate Change 1995: The Science of Climate Change, Cambridge University Press
Ishikawa, H. (1995) : Evaluation of the effect of horizontal diffusion on the long-range atmospheric transport simulation with Chernobyl data, Journal of Applied Meteorology, Vol.34, pp.1653-1665
Keeling, C. D. (1973) : Industrial production of carbon dioxide from fossil fuels and limestone, Tellus 25, pp.174-198
Keeling, C. D., R. B. Bacastow, A. E. Bainbridge, C. A. Ekdahl, P. R. Guenther and L. S. Waterman (1976) : Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii, Tellus 28, pp.538-551
Keeling, C. D., S. C. Piper and M. Heimann (1989) : A three-dimensional model of atmospheric CO₂ transport based on observed winds: 4. Mean annual gradients and interannual variations, Aspects of Climate Variability in the Pacific and Western Americas, Geophysical Monograph 55, Washington(USA), pp.305-363
Marland, G., R. M. Rotty and N. L. Treat (1985)

- : CO₂ from fossil fuel burning: global distribution of emissions, *Tellus*, 37B, pp.243-258
- Oeschger, H., U. Siegenthaler, U. Schotterer and A. Gugelmann (1975) : A box diffusion model to study the carbon dioxide exchange in nature, *Tellus*, 27, pp.168-192
- Taguchi, S. (1993) : Inter-hemispheric exchange in the troposphere by an atmospheric transport model based on observed winds, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol.71, pp.123-135
- Tans, P. P., I. Y. Fung and T. Takahashi (1990) : Observational Constraints on the global atmospheric CO₂ budget, *Science*, Vol.247, pp.1431-1438
- Taylor, J. A. (1989) : A stochastic lagrangian atmospheric transport model to determine global CO₂ sources and sinks - a preliminary discussion, *Tellus*, 41B, pp.272-285