

数値モデルを用いた植生起源 CO₂フラックス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

全球規模の陸上生態系モデル (Sim-CYCLE) を用いて大気—植生間の炭素交換についてシミュレーションを行った。まず、Sim-CYCLE を単独で用い、産業革命以後の大気中二酸化炭素 (CO₂) の変動を与えて陸上生態系の保有炭素量の変動をシミュレートした。その結果、大気中 CO₂ の増加とともに陸上生態系の保有炭素量の増加が確認された。年平均増加量は 1751~2000 の 250 年間に約 0.44GtC/y、最後の 10 年間 (1991~2000) は約 2.06GtC/y であった。次に、3 次元輸送モデルと Sim-CYCLE との結合モデルを用いて、1990 年の大気中 CO₂ の濃度分布についてシミュレートした。シミュレーションの結果では、大気中の CO₂ 量は 1 年間で約 2.9GtC 増加し、陸上生態系による炭素の吸収は約 1.24GtC であった。

キーワード: CO₂, 炭素循環, 輸送モデル, 陸上生態系, 植生

1. はじめに

陸上生態系 (植生および土壌) は、炭素の巨大な貯蔵庫であり、その保有炭素量の変動は大気中の二酸化炭素 (CO₂) 濃度に大きな影響を及ぼす。化石燃料の燃焼によって大気中の CO₂ が増加し続けている現在、陸上生態系は海洋とともに大気中 CO₂ の大規模な吸収源であると考えられている。

陸上生態系が大気中 CO₂ を吸収するメカニズムについてはまだはっきりしていないことが多いが、今後の大気中 CO₂ 濃度の動向を予測する上でもこの詳細なメカニズムの解明は重要なテーマである。大気と植生の間には様々な相互作用が存在しており、これらの作用によるフィードバック効果を考慮にいれながら両者の炭素交換を研究するには数値モデルを用いたシミュレーションは有効なアプローチ手段である。

我々は筑波大学生物科学系で開発された全球

規模の陸上生態系モデル (Sim-CYCLE) (Ito and Oikawa, 2000) を用いて、大気—植生間の炭素交換のシミュレーションに取り組んでいる。井口・木田 (2002) では、Sim-CYCLE 単体および大気輸送モデルとの結合モデルを用い、モデルの検証を兼ねたシミュレーションを行った。今回はさらに、CO₂ 濃度の長期変動も考慮にいれたシミュレーションを行い、大気—植生間の炭素フラックス量および全球規模の大気 CO₂ 収支について検討を行った。

2. 数値モデル

2.1 3 次元大気輸送モデル

大気中における CO₂ 濃度分布のシミュレーションを行うために開発した、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全球規模の 3 次元輸送モデルである。水平解像度は $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 、鉛直方向は σ 座標で 14 層 (上端=10hPa) としてい

る。また、タイムステップは 20 分である。その他、このモデルの詳細については、井口・木田 (1999) で説明してあるのでここでは省略する。

2.2 陸上生態系モデル

Fig.1 に陸上生態系における炭素収支の基本的な図を示す。植生は光合成活動で CO_2 を吸収すると同時に、呼吸によって放出も行う。落ち葉や腐敗した組織はまず土壌に蓄えられ、時間をかけて分解され最終的には CO_2 として大気中に放出される。したがって、Fig.1 における「光合成」、「呼吸」、「分解」による CO_2 フラックスの差引きが大気—陸上生態系間のフラックスという事になる。

Sim-CYCLE は生理学的プロセスに基づいて Fig.1 に示すような炭素の移動を計算する。水平解像度は大気輸送モデルと同じく $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 、タイムステップは 1 日である。Sim-CYCLE に関するより詳しい説明は、井口・木田 (2001,2002) の中で行っている。

2.3 結合モデルの概要

Fig.2 に結合モデルの概要を示す。

Sim-CYCLE で計算された大気—陸上生態系間の CO_2 フラックスは大気輸送モデルに取り入れられ、逆に大気輸送モデルで計算された CO_2 濃度分布は Sim-CYCLE に反映させていく。つまり、本モデルは CO_2 についてインタラクティブな結合モデルであると言える。なお、陸上生態系からの CO_2 フラックスはコンスタントなフラックスとして取り扱われ、日変化はない。

また、大気輸送モデル内における 1) 化石燃料、2) 土地利用、3) 海洋からの CO_2 フラックスデータとして NASA/GISS の Fung が作成したグリッドデータを用いた。

入力データは、大気輸送モデルに対しては ECMWF/TOGA 再解析データ、Sim-CYCLE に対しては NCEP/NCAR 再解析データを用いた。モデルによって使用データが異なる理由は、

1. 過去に大気輸送モデルと ECMWF/TOGA 再解析データを用いて CO_2 濃度分布のシミュレーションを行っており (井口・木田, 2001) その結果と今回のシミュレーションの結果を比較したかった。

2. Sim-CYCLE で用いる陸上生態系の初期状態を得るための平衡実験には、できるだけ長期間の解析データが必要であり、50 年を超える期間のデータが利用できる NCEP/NCAR 再解析データがもっとも相応しかった。

である。

3. Sim-CYCLE 単独による CO_2 漸増実験

まず Sim-CYCLE を単独で用い、産業革命以降の大気中 CO_2 濃度の増加を与えて陸上生態系の保有炭素量の変動を調べた。

3.1 産業革命以降の大気中 CO_2 濃度の変動

今回の CO_2 漸増実験で入力値として用いる全球・年平均大気 CO_2 濃度を Fig.3 に示す。Fig.3 の濃度変動は次のようにして決めた。

1. 1750 年以前の CO_2 濃度は 280ppmv で一定であるとする。
2. 1959 年以降の CO_2 濃度は Mauna Loa 山頂で観測された濃度を使用する。(数値は xx のホームページより取得)
3. 1751~1958 の期間は南極の氷床コアの解析結果 (IPCC, 1995) をもとにスプライン関数で決定した。

また、 CO_2 濃度の水平分布 (グリッド値) は 1990 年の WMO/WDCGG 観測データ (月間値) から内挿によって求め、さらに季節変化についてはスプライン関数を用いて 1 日毎に求めた。シミュレーションでは 1 日毎に、求めた CO_2 濃度のグリッド値に Fig.3 に示した全球平均濃度の該当年と 1990 年の差を加えた値を用いて計算を行う。したがって今回は、 CO_2 濃度の季節変化や水平方向の傾度に関する年々変動は考慮にいていない。

3.2 使用データ

前章で述べた通り、NCEP/NCAR daily 再解析データを Sim-CYCLE の入力データとして用いた。使用したデータの期間は 1951~2000 年の 50 年間で、1751~2000 年の 250 年分のシミュレーションに対してこれを繰り返し用いている。

3.3 初期状態

シミュレーションに用いる陸上生態系の初期状態は、全球平均 CO₂濃度を 280ppmv に固定して、植生および土壌の保有炭素量が定常状態になるまで平衡実験を行って求めた。CO₂濃度の水平分布および季節変化は 3.1 で説明した通りであり、気候データは 3.2 と同じ NCEP/NCAR daily 再解析データ 50 年分を繰り返し用いた。

3.3 実験結果

Fig.4 に、CO₂漸増実験で得られた陸上生態系(植生 + 土壌)の保有炭素量の変化を示す。大気中 CO₂濃度の上昇と同様に、保有炭素量も加速的に増加していることが分かる。最後の 10 年間(1991~2000)の保有炭素量の平均増加量は 2.06GtC/y であり、かなり大きな大気中 CO₂の吸収源となっている。細かい変動成分は、50 年分の解析データを繰り返し用いているため周期 50 年の周期性がある。

Fig.4 についてこれをさらに植生と土壌の保有炭素量に分けたのが Fig.5 と Fig.6 である。2 つの図の細かい変動を比較してみると、植生の炭素量の増減に対して土壌の炭素量の増減がやや遅れていることが分かる。これは、土壌の保有する炭素の供給源が植生であることによる。

3.4 考察

50 年分の再解析データを繰り返し用い、CO₂濃度を上昇させるシミュレーションにより、陸上生態系の保有炭素量は上昇した。これはつまり、産業革命以降大きな地球規模の気候変動がなかったという仮定のもとで、陸上生態系が炭素の重要な吸収源として作用してきた可能性を示したものである。しかし、CO₂濃度の上昇による植生の肥沃化には限度があることが実験などでも示されており、また、今後温暖化が進んで気候が大きく変動する可能性を考慮すれば、将来における大気中 CO₂濃度の上昇が陸上生態系による吸収につながるとは言えない。

4. 結合モデルによるシミュレーション

先に行われた CO₂漸増実験の結果を用い、大気輸送モデルと Sim-CYCLE との結合モデルによる大気中 CO₂分布のシミュレーションを行った。

4.1 結合モデルによるシミュレーションの概要

シミュレーションにおける陸上生態系の初期状態は、先におこなった CO₂漸増実験での 1990 年開始時の状態を用いた。また大気中 CO₂濃度の初期状態は、地表面近く(最下層)は 1990 年の観測データを内挿して得られた濃度分布、上層は大気輸送モデルと NASA/GISS CO₂フラックスデータおよび 1989 年の ECMWF/TOGA データを用いて行ったシミュレーションで得られた濃度分布を用い、途中の層でつなぎ合わせている。

4.3 実験結果

4.3.1 年平均濃度

Iguchi and Kida(2002) は 3 次元大気輸送モデルと NASA/GISS CO₂フラックスデータおよび 1990 年の ECMWF/TOGA データを用い、今回と全く同じ CO₂濃度分布の初期状態から 1 年間のシミュレーションを行った。今回の結合モデルによるシミュレーションの結果について、この先に行ったシミュレーションの結果とも比較しながら検討を行っていく。

Fig.7 に年平均した CO₂濃度分布(地表面)を示す。左側が観測値、右側がシミュレーションの結果である。左側の観測値に基づく濃度分布は各グリッド点の値を観測値から内装して求めている。したがって、右側についてもモデル値をそのまま用いるのではなく、観測点の位置におけるモデル値からグリッド値を内装して求めた。Fig.7 においてヨーロッパ付近の濃度が観測値とモデル値で大きく違うのは、モデルの最下層が約 1.4~1.5km と厚く、この付近に存在すると思われる強い鉛直濃度傾度が再現できないためである。また、人間活動が活発で CO₂放出の強い場所に観測点が多くおかれている可能性もある。Fig.8 は Fig.7 の濃度分布を帯状平均したもので、実線がモデル値、破線が観測値である。北半球中緯度で観測値が高くなっているのは前述のヨーロッパ付近の高濃度が影響している。

次に Fig.9 と Fig.10 に輸送モデル単独で行ったシミュレーションの結果を示す。Fig.9 は Fig.7 に、Fig.10 は Fig.8 に対応する。このシミュレーションでは、南北両極間の濃度差について観測値と等しくなるよう、NASA/GISS CO₂フラックスデータに変更を加えた。今回結合モデルを用いて行ったシミュレーションでもこの変更を加えた CO₂フラックスデータを用いており、植生からの CO₂フラックスデータの代わりに Sim-CYCLE からのフラックス

を用いている以外は初期条件、輸送に用いる大気データともに輸送モデル単独のシミュレーションと同じである。Fig.7 と Fig.9 を比較すると、結合モデルの結果は輸送モデル単独に比べ北米大陸西側の CO₂濃度が低く、この近辺の植生による吸収が活発な事を示している。Fig.8 と Fig.10 の比較では、結合モデルの結果が輸送モデル単独に比べ北半球で低く、南半球で高いという結果が出た。

4.3.2 季節変動

井口・木田 (2002) では、大気輸送モデルと NASA/GISS CO₂フラックスデータを用いて行ったシミュレーションの結果における季節変化の観測値との食い違いが、結合モデルでは改善されていることを示した。今回も月間・帯状平均した CO₂濃度分布では井口・木田 (2002) と同様の結果が得られた。

4.3.3 炭素収支

今回のシミュレーションにおける NASA/GISS データのカテゴリ別の CO₂放出量は

化石燃料	6.0GtC
土地利用	0.8GtC
海洋	-2.7GtC

で、モデルにおける大気中 CO₂の増加量は 3.5GtC であった。したがって Sim-CYCLE の計算した陸上生態系による吸収量は

陸上生態系 -0.64GtC

ということになる。大気中 CO₂の増加量 3.5GtC という値は、Fig.6 の Conway *et al.* (1994) が求めた 1990 年の値が 3GtC 弱であるから、それよりは大きい値となっている。もちろん、現実には 1 章で述べたように純粋な植生活動以外の要因の存在も考慮しなければならない。また、陸上生態系による炭素吸収量の -0.64GtC という値は、Fig.7 の平衡実験におけるフラックス値とは正負逆になっている。この理由としては、(1) 上記の Fig.8 と Fig.9 の比較で述べたように、モデルにおける植生の活発な期間が少し長いこと、(2) 平衡実験が季節変化はするものの長期トレンドのない CO₂濃度を用いているのに対し、本シミュレーションでは化石燃料等のフラックスも加えて増加していく CO₂濃度を Sim-CYCLE に反映させたことによる CO₂施肥効果、が考えられる。今回は考慮していないが、CO₂濃度の増加が

及ぼす効果もこのように無視できない問題である。平衡実験で得られたモデルのパラメータや陸上生態系の平衡状態を基本にしながらも、現在の CO₂増加の効果の見積もりや、それを考慮にいったシミュレーションの初期状態の決定等も今後の重要な課題である。

5. まとめ

陸上生態系モデル (Sim-CYCLE) 単独による平衡実験の結果、大気中に残留する CO₂量の年々変動に植生が大きく寄与していることを示唆する結果が得られた。

大気輸送—陸上生態系結合モデルを用いたシミュレーションでは、CO₂濃度分布の季節変化について従来の既成のデータを用いたシミュレーションよりも良い結果を得ることができた。また、大気中 CO₂の収支についても、他の様々な要因の検討が必要ではあるが、まずは信頼性のある結果が得られた。

これまでの結果では、大気中 CO₂収支の研究に陸上生態系モデルを用いることの有効性が改めて示されたといえる。今後は、さらにモデルの調整と改良を進め、CO₂施肥効果など様々な課題を考慮に加えながら研究を進めていきたい。

謝辞

本研究に用いた陸上生態系モデル Sim-CYCLE は、筑波大学生物科学系の伊藤昭彦氏・及川武久氏が開発したものを提供して頂きました。また本論文中の Fig.1??も伊藤氏作成の図を転載させて頂きました。

本研究では ECMWF/Re-analysis および NCEP/NCAR の再解析データセットを使用させて頂きました。本研究で使用する 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。

本論文中の Fig.6??は Conway *et al.* (1994) の Figure12 を転載させて頂きました。本論文中の Fig.3,4,5,7 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。

本研究の一部は日産学術研究助成金の支援を受けて行われました。

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, p.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.
- 井口敬雄・木田秀次 (2000): 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, 京都大学防災研究所年報, 第 43 号, B-1, pp.237-247.
- 井口敬雄・木田秀次 (2001): グローバル輸送モデルと植生モデルの結合について, 京都大学防災研究所年報, 第 44 号, B-1, pp.95-103.
- ホイッタカー, R. H. (1979), 生態学概説: 生物群集と生態系 第 2 版, 宝月欣二訳, 培風館.
- P. Ciais, P. P. Tans, M. Trolier, J. W. C. White, and R. J. Francey (1995): A large Northern Hemisphere terrestrial CO₂ sink indicated by the ¹³C/¹²C ratio of atmospheric CO₂, Science, 269, pp.1098-1102.

- 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.
- S. Fan, M. Gloor, J. Mahlman, S. Pacala, J. Sarmiento, T. Takahashi, and P. Tans (1998): A large terrestrial carbon sink in North America implied by atmospheric and oceanic carbon dioxide data and models, Science, Vol. 282, pp.442-446.
- IPCC(2001): CLIMATE CHANGE 2001 - The Scientific Basis, Cambridge University Press.
- 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.
- R. F. Keeling, S. C. Piper, and M. Heimann (1996): Global and hemispheric CO₂ sinks deduced from changes in atmospheric O₂ concentration, Nature, 381, pp.218-221
- 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
- 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, pp.505-531.
- Sellers, P. J., D. A. Randall, G. J. Collatz, J. A. Berry, C. B. Field, D. A. Dazlich, C. Zhang, G. D. Collelo, and L. Bounoua (1996): A revised surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model Formulation, Journal of Climate, Volume 9, pp.676-705.
- Tans, P. P., I. Y. Fung and T. Takahashi (1990) : Observational Constraints on the global atmospheric CO₂ budget, Science, Vol.247, pp.1431-1438

Coupling of a Global Atmospheric Transport model and a Terrestrial Biosphere Model

Takao IGUCHI and Hideji KIDA*

* Department of Geophysics, Graduate school of Science, Kyoto University

synopsis

To investigate the global budget of atmospheric CO₂, a three-dimensional atmospheric transport model is being coupled with a terrestrial biosphere model.

In the coupled model, CO₂ flux from biosphere calculated by the biosphere model is inputted to the transport model, and, CO₂ distribution calculated by the transport model is inputted to the biosphere model.

To get an appropriate initial condition of biosphere for the simulation using the coupled model, a preceding simulation of equilibrium using only the biosphere model was implemented. Result of the simulation suggested that the fluctuation of the rate of atmospheric CO₂ increase is much due to the fluctuation of the carbon storage of terrestrial biosphere.

Keywords: CO₂, carbon budget, transport model, terrestrial biosphere, vegetation

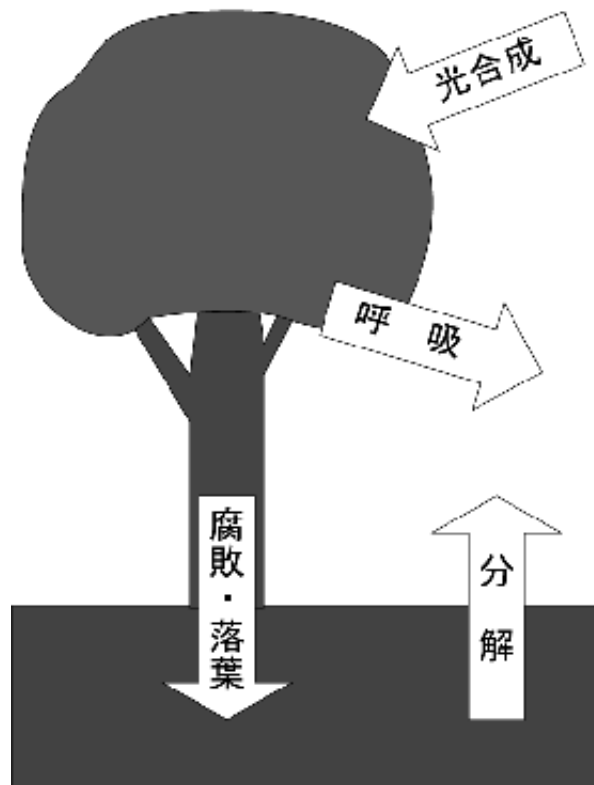


Fig.1 Carbon flow of terrestrial ecosystem.

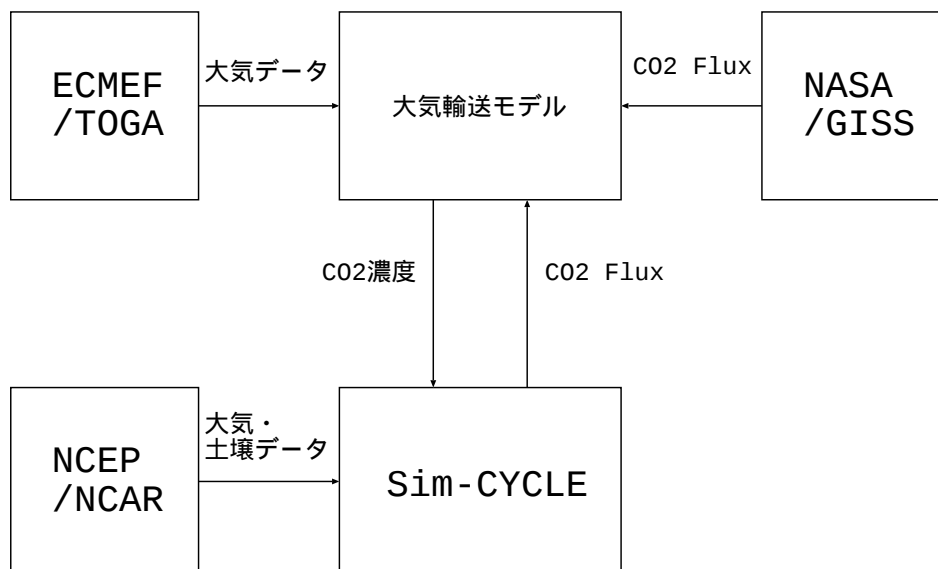


Fig.2 Structure of the coupled model.

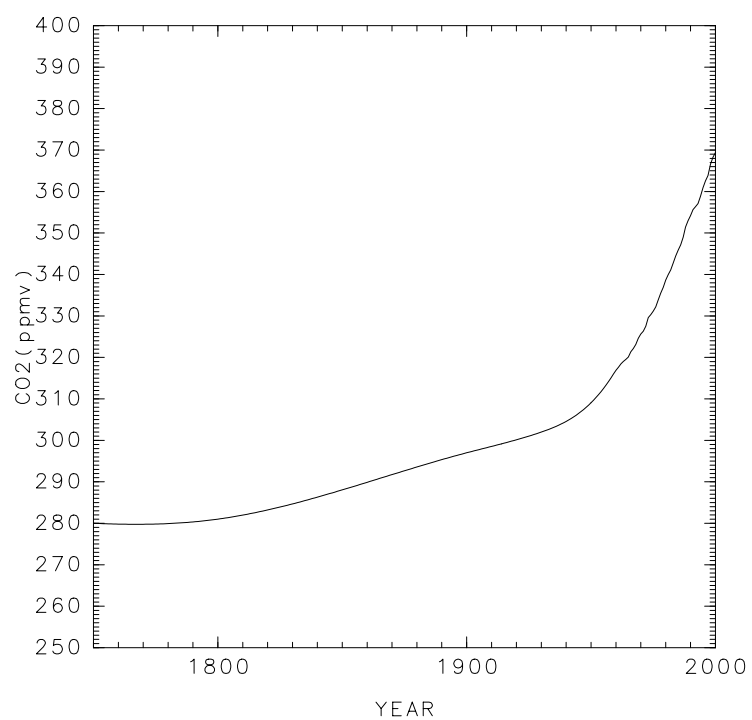


Fig.3 CO₂ increase since 1750.

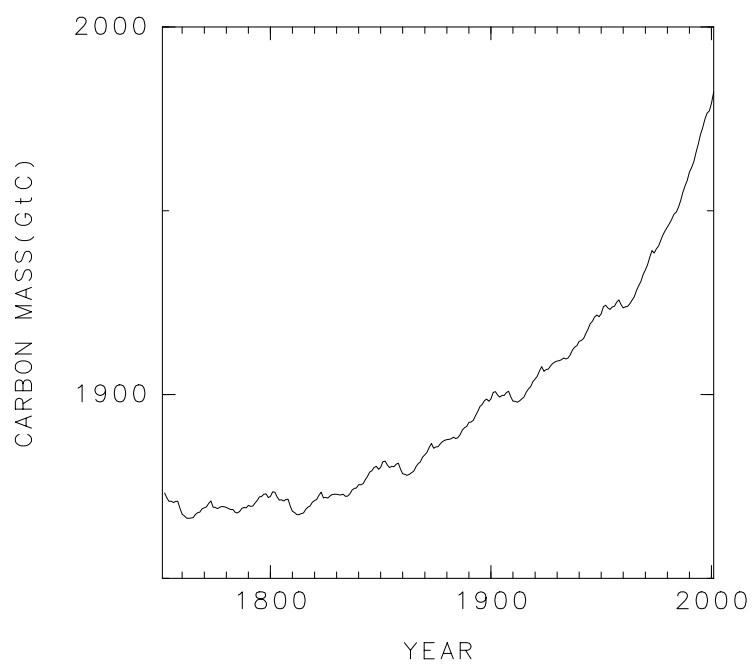


Fig.4 Calculated Total carbon mass for the period of 1751-2000.

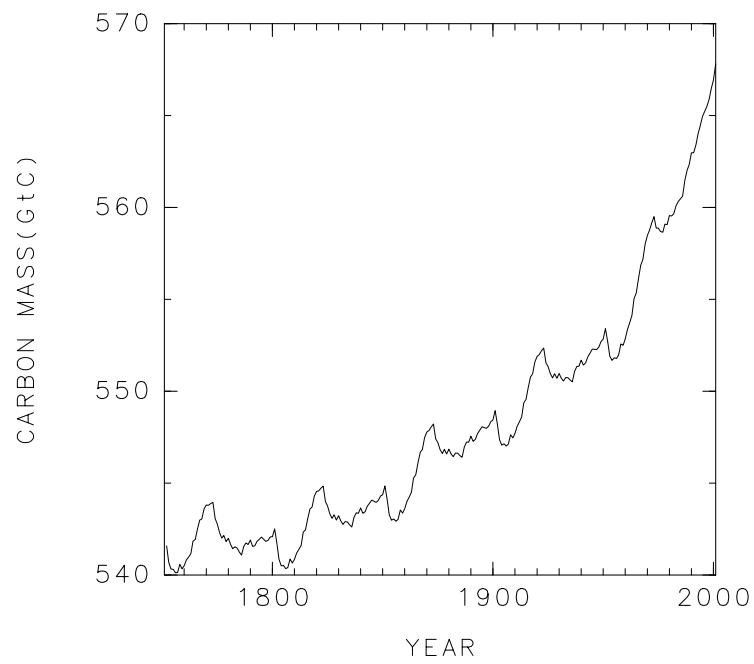


Fig.5 Calculated plant carbon mass for the period of 1751-2000.

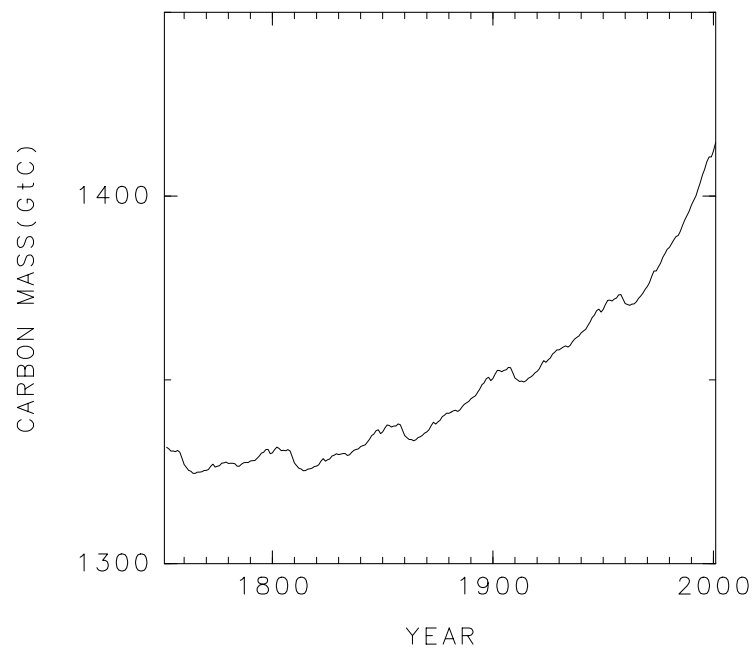


Fig.6 Calculated soil carbon mass for the period of 1751-2000.

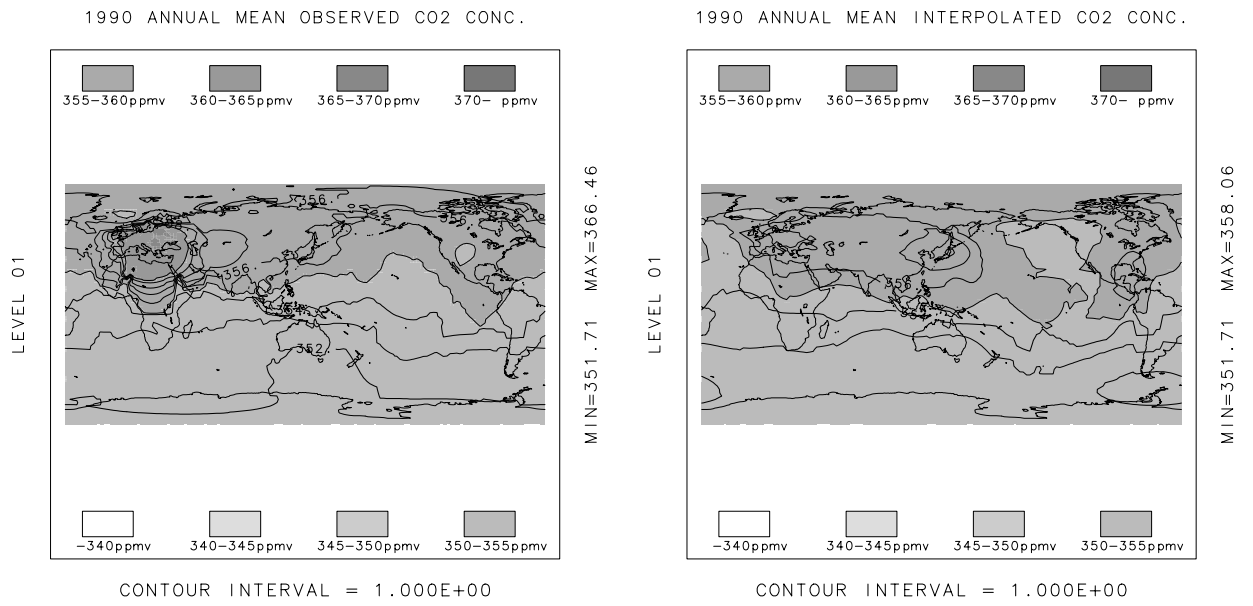


Fig.7 1990 annual mean CO₂ distribution. The left is observation, and the right is calculation by the combined model.

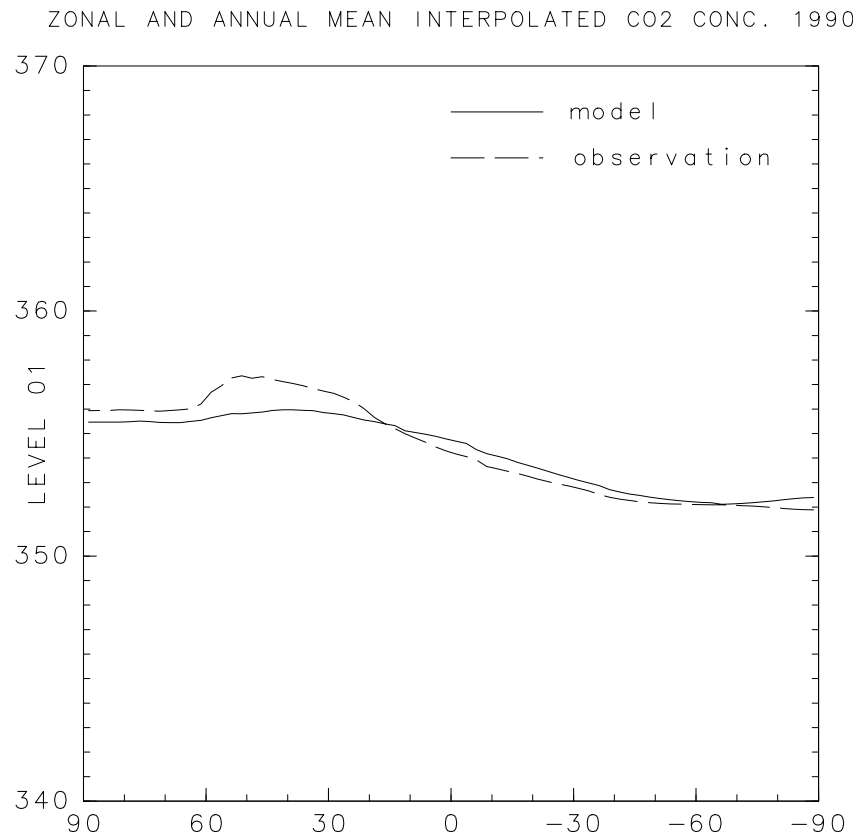


Fig.8 1990 annual and zonal mean CO₂ distribution. The broken line is observation, and the solid line is calculation by the combined model.

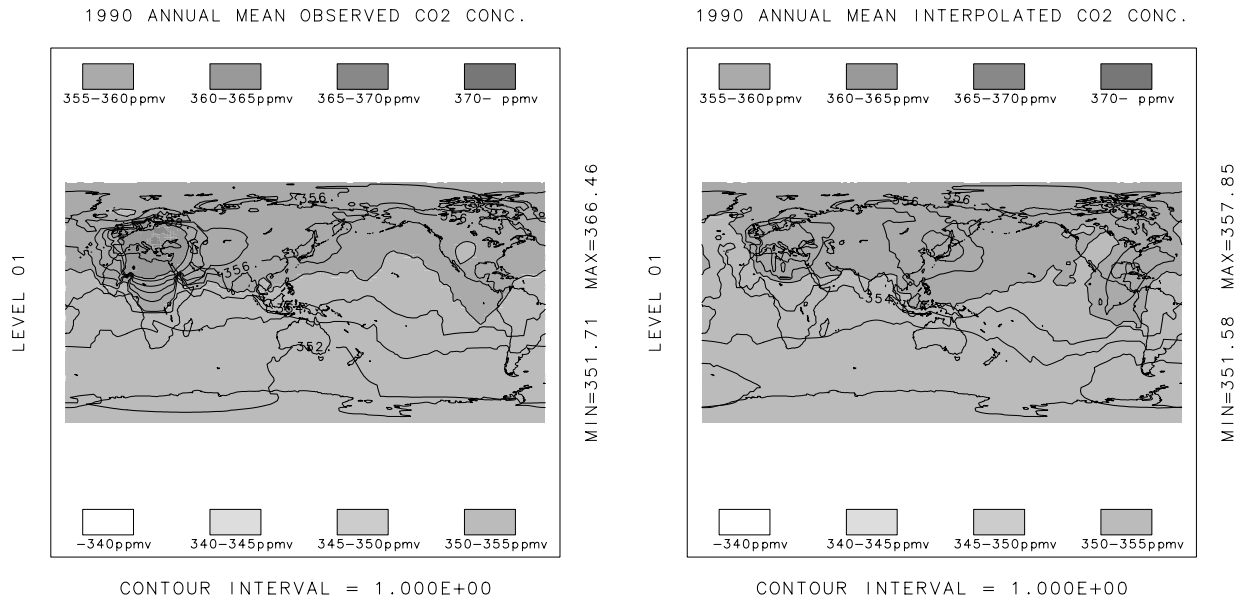


Fig.9 1990 annual mean CO₂ distribution. The left is observation, and the right is calculation by the transport model.

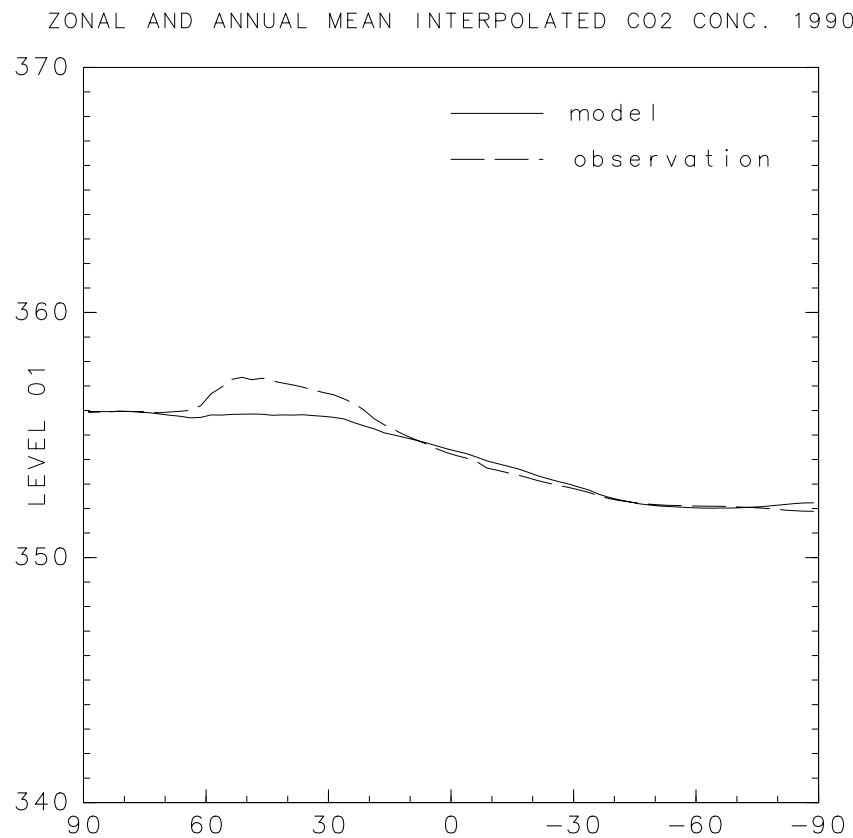


Fig.10 1990 annual and zonal mean CO₂ distribution. The broken line is observation, and the solid line is calculation by the transport model.

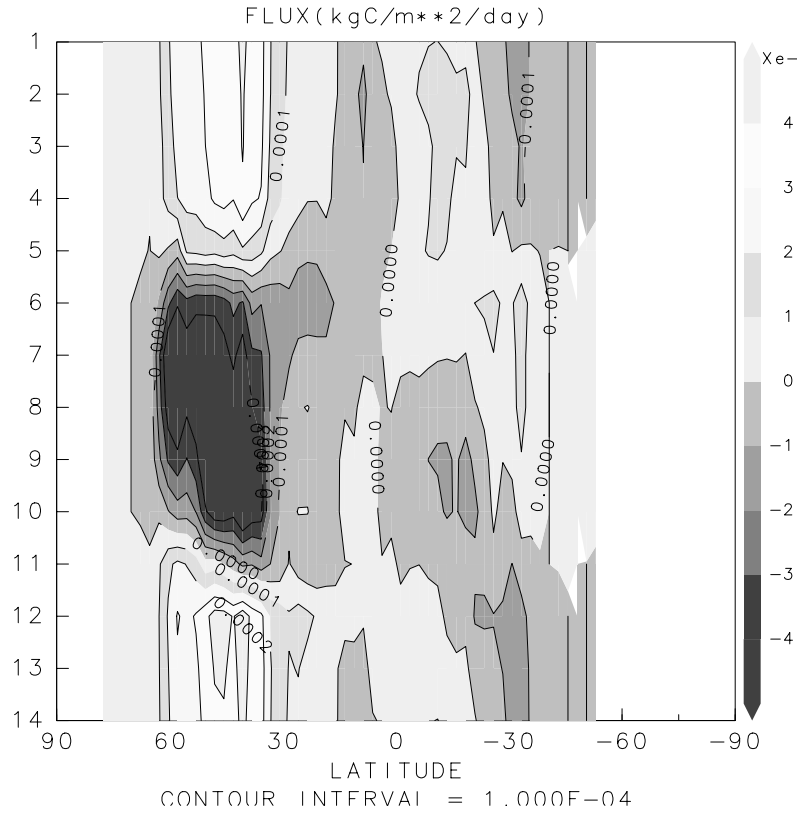


Fig.11 Monthly distribution of zonal mean CO₂ flux calculated by Sim-CYCLE.

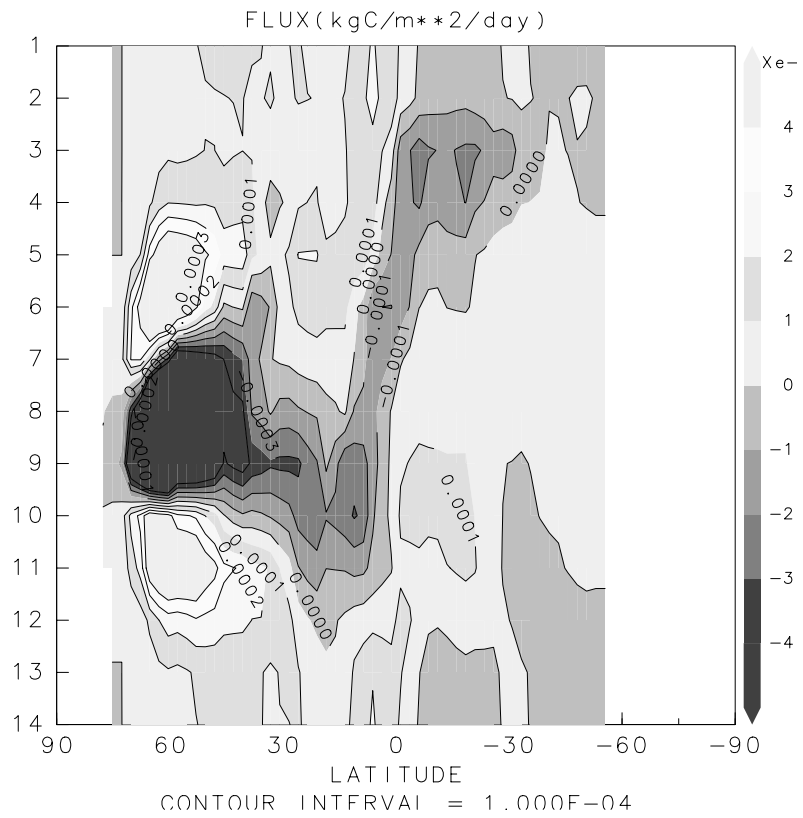


Fig.11 Monthly distribution of zonal mean CO₂ flux of NASA/GISS CO₂ flux data.