

陸上生態系モデルを用いた大気

—— 植生間の炭素交換の研究 ——

井口敬雄・木田秀次*

* 京都大学大学院理学研究科

要 旨

大気と陸上生態系との間の炭素交換を研究することを目的として、グローバルな大気輸送—陸上生態系結合モデルを開発した。結合モデルは3次元大気輸送モデルと全球規模陸上生態系モデル (Sim-CYCLE) で構成され、それぞれのモデルで計算された大気中CO₂濃度分布と陸上生態系からのCO₂フラックスがもう一方のモデルにフィードバックされる。先にSim-CYCLE単独で行われた平衡実験では、大気中に残留するCO₂量の激しい年々変動に陸上生態系が大きく寄与していることを示唆する結果が得られた。また、結合モデルを用いて行われたシミュレーションの結果では、観測と良く似たCO₂濃度の季節変動が再現され、大気中CO₂の収支についても妥当と考えられる結果が得られた。

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

化石燃料の燃焼を主とした人間活動により、1990年代の平均で毎年6GtC/y以上ものCO₂(二酸化炭素)が大気中に放出量されている(IPCC 2001)。そのうち、大気中に残留するCO₂の量は約3.2GtC/yで(IPCC 2001)、残り3GtC程度のCO₂が地表面を通じて毎年吸収されていることになる。

大気中CO₂の大きな吸収源としては古くから海洋が挙げられていた。しかし多くの研究において、その吸収量の見積もりはせいぜい2GtC/yであり(Oeschger *et al.* 1975, Tans *et al.* 1990, etc), 他に大規模な吸収源の存在が必要であるとされてきた。

海洋以外の大規模な吸収源については、かつてはミッシング・シンクという言葉で表現され謎とされてきたが、最近では陸上の植生がその正体であるとの見方が強くなった。Ciais *et al.* (1995)は大気中CO₂の¹³C/¹²C比の変動から、また Keeling *et*

al. (1996)は大気中の酸素濃度の変動から、それぞれ生態系がCO₂の大規模な吸収源であるという結果を得た。また、Tans *et al.* (1990)やFan *et al.* (1998)らは大気輸送モデルを用いた研究で北半球の陸上CO₂の大きな吸収源であるということを示唆している。

陸上生態系がCO₂を吸収する要因としては(1)大気中CO₂濃度の増加による植生の肥沃化、(2)気候の変動による植生の肥沃化、(3)森林の再生、(4)窒素化合物による施肥効果、等が考えられる。IPCC第3次報告書によれば1990年代の陸上による炭素の吸収は平均して1.4±0.7GtC/yでまだ推定誤差が大きく、しかも上記の要因がそれぞれの程度寄与しているか、その内訳は明らかになっていない。植生の生育は気温、降水量、日射量等の気候条件に大きく作用されるものであり年々変動が激しいものと思われる。逆に植生から大気に対しては蒸散、アルベド、摩擦、CO₂放出などを通じてフィードバック

効果が働いている。こうした大気と植生との深い相互関係を考慮にいれながら両者間の炭素フラックスを研究する上で数値モデルを用いたシミュレーションは有効な手段である。

植物の物質生産に関する生理学的な解明が進むとともに、植生の活動をシミュレートする数値モデルが開発されるようになってきた。Sellers *et al.* (1986) は GCM (大気大循環モデル) に境界条件として組み込むための SiB (Simple Biosphere Model) を開発し、さらに植生からの CO₂ フラックスも計算できる改良版として SiB2 を開発した (Sellers *et al.* 1996)。Ito and Oikawa (2000) は土壌も含む陸上植生の炭素の循環を計算する全球規模のモデル Sim-CYCLE (Simulation model of Carbon cycle in Land Ecosystems) を開発した。

我々は大気中 CO₂ の全球規模収支をより詳細に明らかにするために、独自に開発した 3 次元大気輸送モデルと上記の Sim-CYCLE とを結合させたモデルを開発し、結合モデルを用いたシミュレーションを行っている。本論文では、結合モデルの概要とモデルを用いたシミュレーションの結果について報告する。

2. 数値モデルの概要

この章では、結合モデルの開発に用いている各モデルの説明と結合モデルの概要について説明する。

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 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) 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

Sim-CYCLE に関する詳しい説明は、井口・木田 (2001) の中でも行っているため、Fig.1 (1 タイムステップにおける炭素の移動の説明) の紹介にとどめておく。

Fig.1 における記号は

W: 炭素保有量

GPP: 光合成による生産量

ARM: 組織維持のための呼吸による放出量

ARG: 成長のための呼吸による放出量

NPP: 第 1 次生産

LF: 腐敗

HR: 土壌呼吸

HF: 土壌の鉱質化

を表し、また添字は

f: 葉

c: 茎

r: 根

l: 有機土壌

h: 鉱質土壌

を表す。

2.3 結合モデルの概要

Fig.2 に結合モデルの概要を示す。

結合モデルの構成についても、基本的には井口・木田 (2001) で説明したものと同じであり、CO₂ に関して相互にフィードバック効果を持つ結合モデルである。具体的には、Sim-CYCLE で計算された土壌を含む生態系における炭素の出入りの収支を大気輸送モデルにおける CO₂ フラックスとして取り入れ、大気輸送モデルで計算された CO₂ 濃度分布を Sim-CYCLE に反映させていく。

タイムステップは大気輸送モデルが 20 分、Sim-CYCLE が 1 日で、陸上生態系からの CO₂ フラックスは日変化のない一日中コンスタントなフラックスとして取り扱われる。

水平方向のグリッド分布は両モデルとも 2.5° × 2.5° で一致させており、輸送モデルの鉛直解像度は σ 座標で 14 層で上端は 10hPa である。

また、1) 化石燃料、2) 土地利用、3) 海洋からの CO₂ 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。全球規模の大気 CO₂ 収支を考える上でも植生以外のこれら 3 つのカテゴリのデータは必要である。

井口・木田 (2001) からの最も大きな変更点は、Sim-CYCLE の入力データとして、ECMWF Re-analysis データから NCEP/NCAR の再解析データ (daily step) に変更したことである。陸上生態系モデルの調整や、シミュレーションに用いる初期値の決定には、長期間のデータを用いた平行実験が欠かせないが、従来の入手可能な長期間データは NCEP/NCAR の monthly step のみであり、NCEP/NCAR データによって作成した初期状態から ECMWF データを用いてシミュレーションを行うというあまり好ましくない方法を余儀なくされていた。しかし、最近になって NCEP/NCAR の

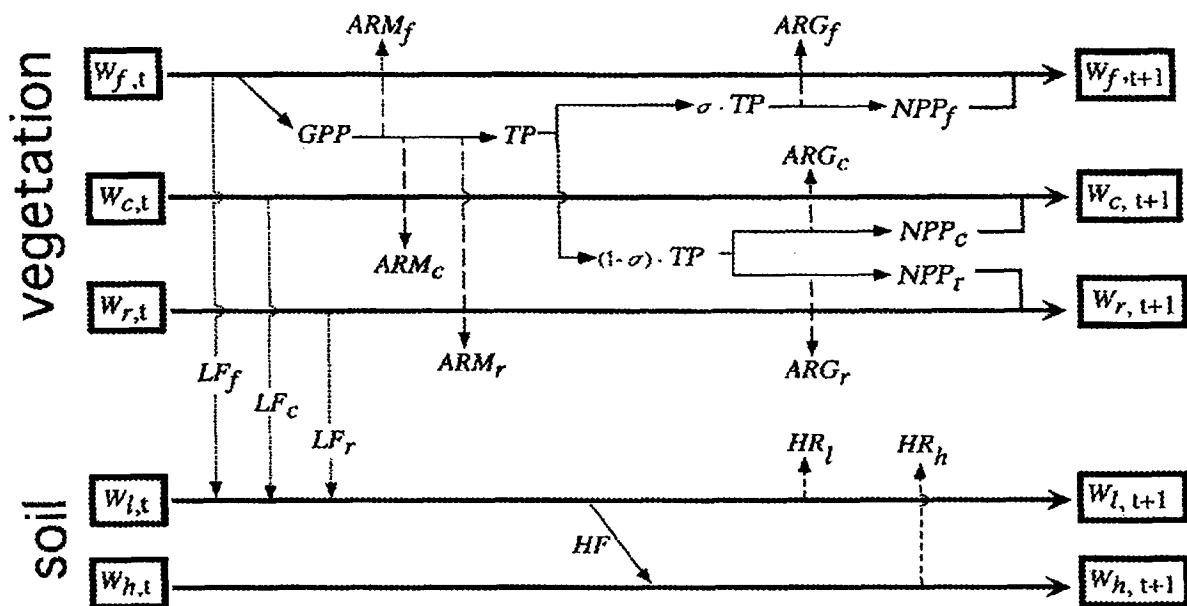


Fig.1 Carbon flow of Sim-CYCLE(presented by Akihiko Ito, Tsukuba Univ.)

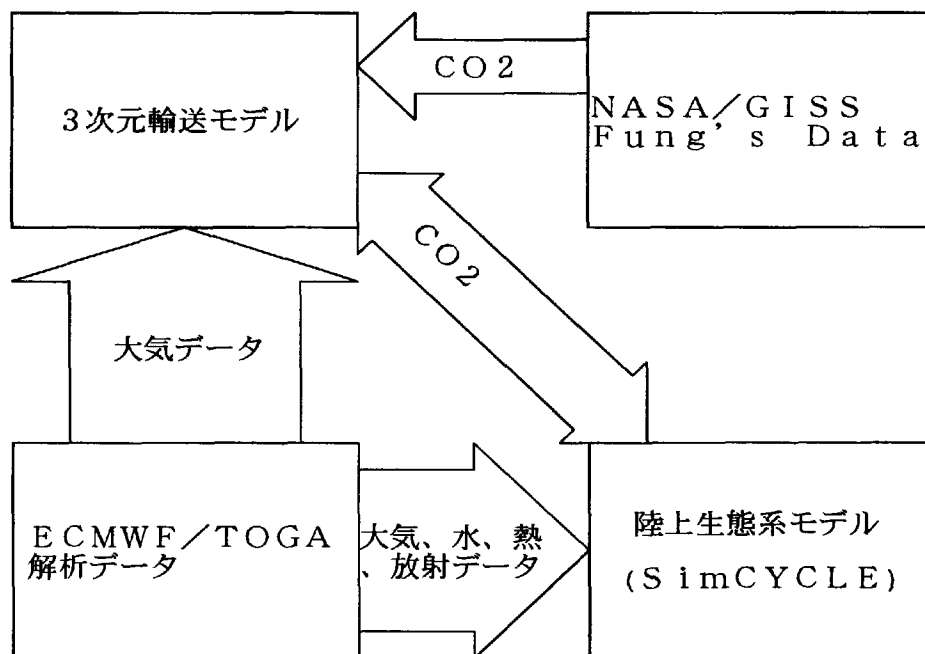


Fig.2 Structure of the coupled model

daily step データが公開され、上記の問題を回避できるようになった。NCEP/NCAR daily step データの使用に当たってはプログラムを書き直し、後述する平行実験もやり直した。また、公開されている NCEP/NCAR daily step データの解像度は T62 であり、これを $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ に内挿して Sim-CYCLE で使用している。

3. Sim-CYCLE 単独による平衡実験

Sim-CYCLE の検証と調整および、結合モデルを用いたシミュレーションに用いる生態系保有炭素量分布の初期状態を得るため、Sim-CYCLE 単独による平衡実験を行った。この章では平衡実験の概要とその結果について述べる。

3.1 シミュレーションにおける生態系保有炭素量の初期条件について

井口・木田 (2001) でも述べているので詳細な説明は避けるが、年々変動の激しい陸上生態系モデルの調整には長期間の入力データを用いた平衡実験が不可欠である。また、平衡状態に達していない状態を初期状態としてシミュレーションを開始すると、陸上生態系がでたらめな CO_2 の放出源または吸収源として働いてしまうため、その点においても平衡実験は重要である。

3.2 平衡実験における使用データ

前章で述べた通り、井口・木田 (2001) で用いた NCEP/NCAR monthly 再解析データに代わり、NCEP/NCAR daily 再解析データを平衡実験の入力データとして用いた。現在、NCEP/NCAR daily 再解析データは 1948 年から現在までのデータが公開されており、もちろん長期間のデータを使用する事が望ましいが、タウンロードや内挿処理にかかる時間、保存ディスク容量等の制約があって今回は 1981~1999 の 19 年間のデータを用いて行った。

また、大気 CO_2 濃度については、WMO/WDCGG の 1990 年の観測データ (月間値) から内挿によって得られた CO_2 濃度分布を用いて Sim-CYCLE に月毎に与えている。

3.3 実験結果

平衡実験は NCEP/NCAR の 19 年分の再解析データを繰り返し用いて植生、土壌共に保有炭素量が定常状態になるまで行われた。

これまでに行った平衡実験の中から最新の結果について以下に示す。

定常状態では全球合計した炭素量は 19 年周期の変動をすることになるが、Fig.3 にその 1 周期間の植生炭素量の変動、Fig.4 に同じく 1 周期間の土壌炭素量の変動を示す。Fig.4 と Fig.3 とは位相が似ているが、月ステップの実験で見られた土壌が植生より少し遅れるという特徴が日ステップの実験では見られなかった。なお、土壌の保有炭素量が 1000GtC 程度というのは IPCC 等の見積もり (1500~2000GtC) よりも低い値になっており、更に調整を必要とする。

次に Fig.5 に同じく 19 年間の生態系炭素量 (植生 + 土壌) の変動を示す。この中から、井口・木田 (2001) と同様に 1981~1992 年の部分について保有炭素量の年間増加分の符合を逆にした値、つまり生態系から大気への炭素フラックス量を Fig.7 に示し、Conway *et al.* (1994) の推定による 1981~1992 年の大気中残留 CO_2 量の変動 (Fig.6) と比較した。結果は前回と同様、Fig.6 と Fig.7 の年々変動は同程度の大きさであり、大気中 CO_2 の増減に陸上生態系の寄与が大きいことを示唆している。

今回は、使用したデータの期間が 1981~1999 年の 19 年と短いため、今後更に入力データを増やしていき、モデルのパラメータの調整を進めていく。

4. 結合モデルによるシミュレーション

大気輸送モデルと Sim-CYCLE との結合モデルを用いて、 CO_2 に関する大気-植生間のフィードバック効果を取り入れた炭素循環のシミュレーションを行った。この章ではシミュレーションの概要とこれまでの結果について述べる。

4.1 結合モデルによるシミュレーションの概要

現在行っているシミュレーションでは、Sim-CYCLE が計算した植生からの CO_2 フラックスと NASA/GISS Fung データの植生を除いたカテゴリによる CO_2 フラックスを 3 次元大気輸送モデルに取り入れながら、1990 年の解析データを用いて CO_2 を輸送し、求めた濃度分布を今度は Sim-CYCLE に反映させるということを繰り返す。こうして得られた結果は観測値と比較して、全球規模の大気 CO_2 収支のシナリオについて検討を行う。

大気中 CO_2 濃度分布の初期状態とシミュレーションの結果の比較材料には、WMO/WDCGG が収集した世界各地の CO_2 観測値から内挿で得た濃度分布を用いている。

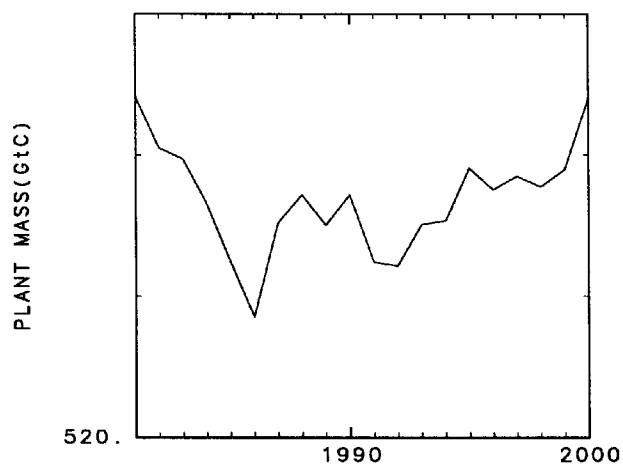


Fig.3 A cycle of total plant carbon mass in equilibrium

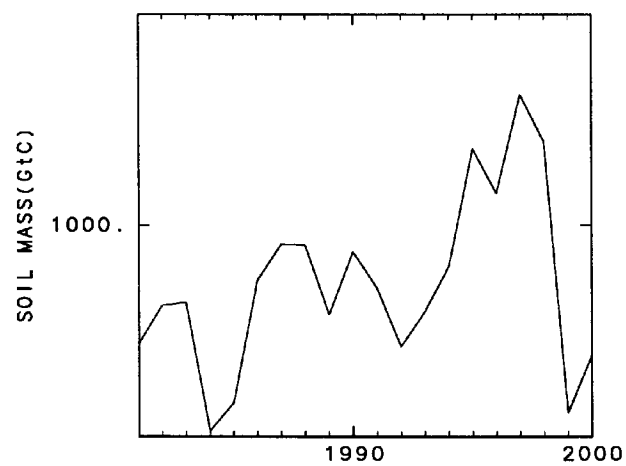


Fig.4 A cycle of total soil carbon mass in equilibrium

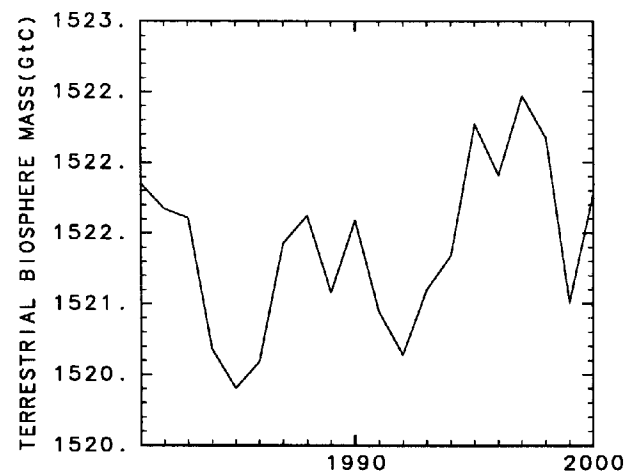


Fig.5 A cycle of total biosphere carbon mass in equilibrium

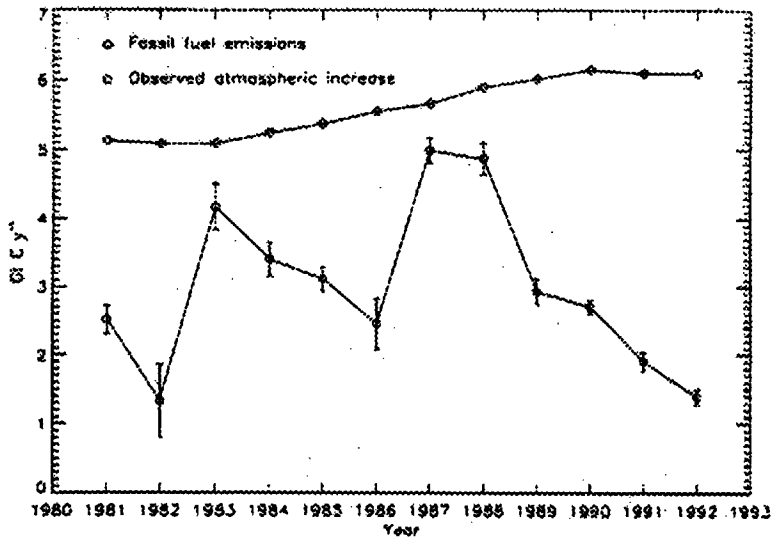


Fig.6 Global atmospheric CO₂ increase for 1981-1992 (*Fig.12 of Conway et al.* was reprinted)

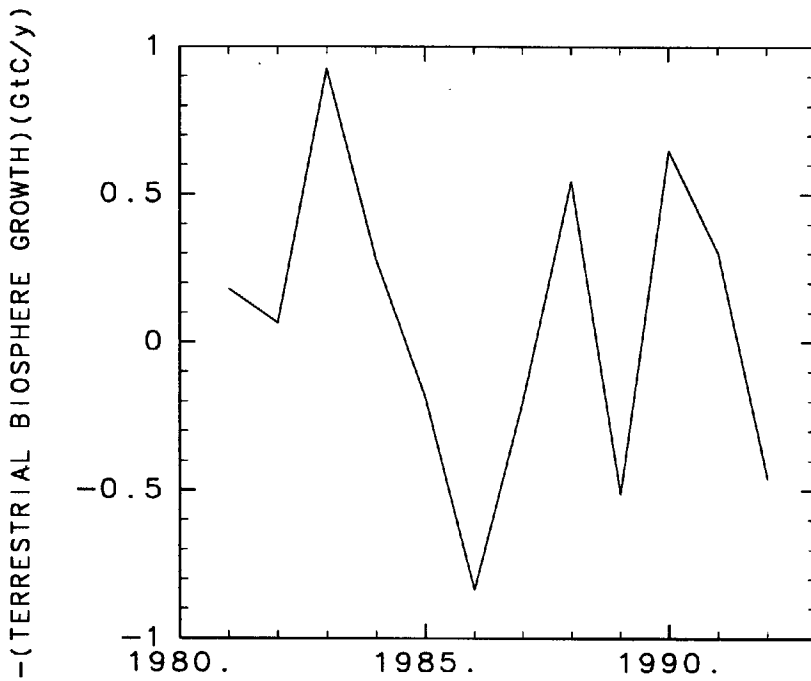


Fig.7 Increase of total biosphere carbon mass multiplied by -1 (in short, carbon flux from biosphere to atmosphere)

4.2 初期状態

先に Sim-CYCLE 単独で行われた平衡実験 (3 章) において、平衡に達した状態の 1990 年のデータを用いた年の最初の状態をシミュレーションの初期状態とした。

4.3 実験結果

Iguchi and Kida(2002) は 3 次元輸送モデルを今回と同様 1990 年の ECMWF/TOGA データで稼働させ、植生からのフラックスについても NASA/GISS 炭素フラックスデータを用いたシミュレーションを行い、(1)CO₂濃度分布のシミュレーション結果は観測値と比べ北半球で高く、南半球で低くなる、(2)北半球における CO₂濃度についてシミュレーション結果と観測値とを月毎に比較すると植生が成長する初夏において特にシミュレーション結果が観測値より高くなる、という結果が得られた (Fig.8)。NASA/GISS データの植生からのフラックスは 1 年間の合計がほぼ 0 となるようにつくられていることを考慮すれば、この結果は北半球の植生が吸収源となっていることを示唆している。ちなみに、南半球においてシミュレーションの値が低いのは NASA/GISS データにおける南半球の海洋の吸収が強すぎるためと考えられる。

今回行ったシミュレーションの結果については、この従来の研究結果との比較を行いながら、特に大気-植生間の炭素交換に重点をおいて全球規模の大気中 CO₂収支シナリオの検討を行っていく。

結合モデルによるシミュレーションの最新の結果の、地表面付近の月平均南北濃度分布を Fig.9 に示す。Fig.8 および Fig.9 において、実線がモデルの計算値、破線が観測値に基づく南北分布である。Fig.8 と Fig.9 とを比較してみると、Fig.8 で見られた初夏におけるモデル値の観測値に対する高い濃度が Fig.9 では見られず、この点で NASA/GISS のデータより Sim-CYCLE の計算値が優れているといえる。その一方で、10、11 月とモデル値の観測値に対する低さがやや顕著であり、モデルにおける植生活動の活発な期間が少々長いことをうかがわせる。

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

$$\text{陸上生態系 } -0.64\text{GtC}$$

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か、現在の CO₂増加の効果の見積もりや、それを考慮にいたし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。

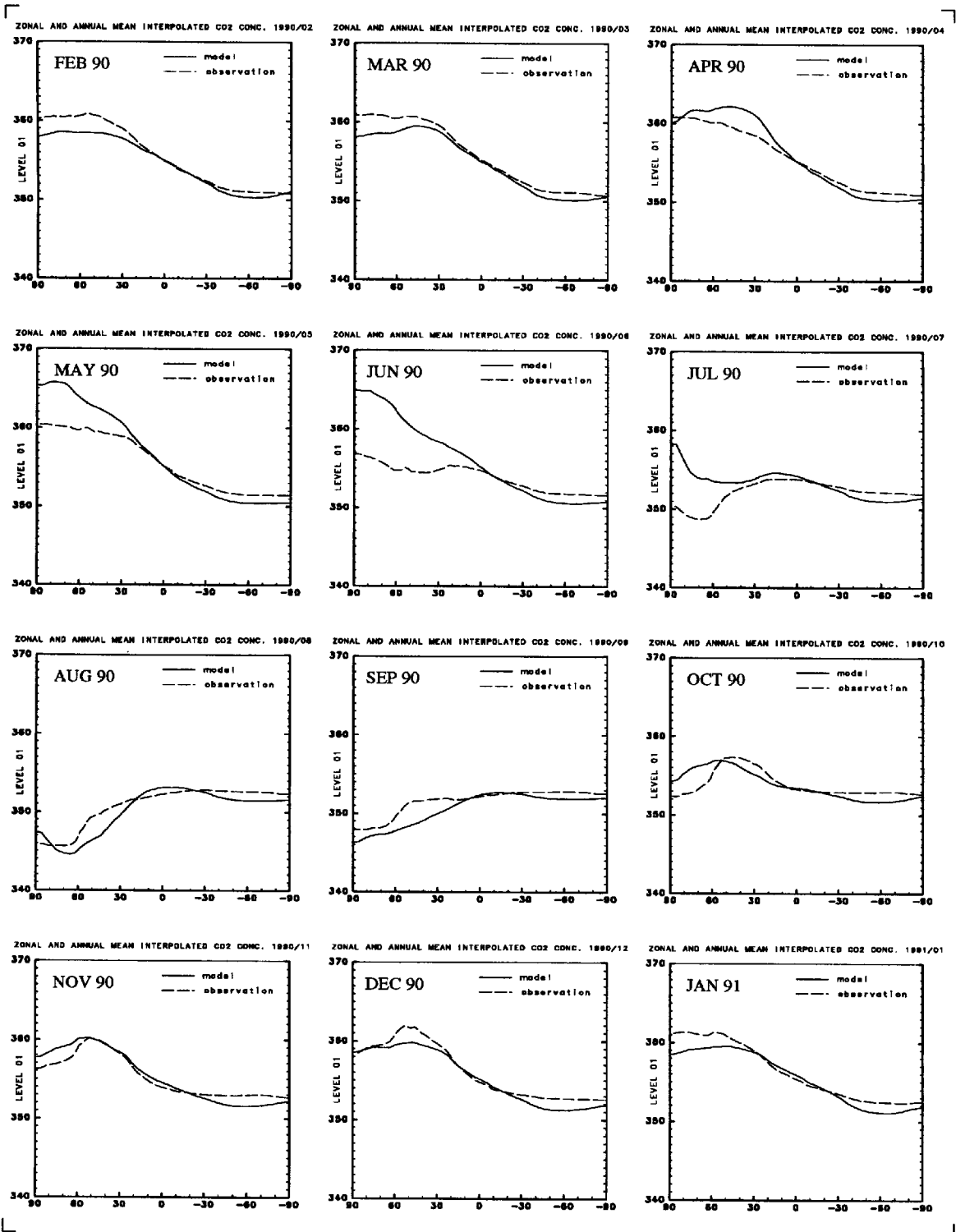


Fig.8 Zonal mean of monthly mean CO₂ distribution of the simulation using the 3D atmospheric transport model(solid line) and the observation(broken line).

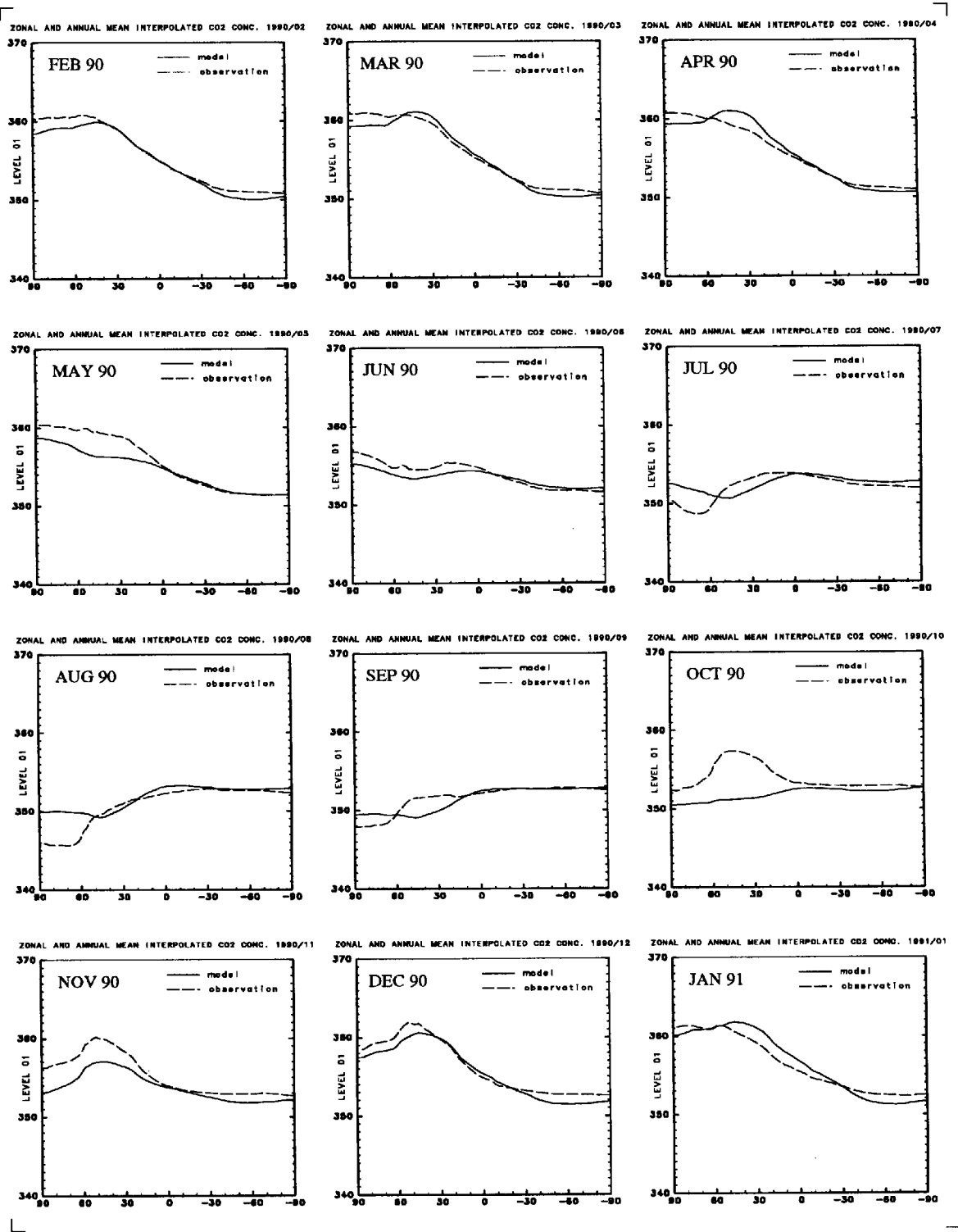


Fig.9 Zonal mean of monthly mean CO₂ distribution of the simulation using the combined model(solid line) and the observation(broken line).

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