

## グローバル輸送モデルと植生モデルの結合について

井口敬雄・木田秀次

京都大学大学院理学研究科

### 要 旨

土壌も含めた陸上の植生は巨大な炭素の貯蔵庫であり、その貯蔵炭素量の増減は大気中  $\text{CO}_2$  濃度に大きな影響を及ぼす。しかしながら、その詳細については不明な点が多く、大気中  $\text{CO}_2$  の収支を明らかにする上でも大きな課題となっている。大気との間に存在する様々な相互的フィードバック作用を考慮に入れながら植生の変動を調べるには、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であると考えられる。本論文では、植生も含めた全球的な炭素収支を調べる事を目的とした3次元大気輸送モデルと陸上生態系モデルとの結合モデルの開発について述べる。

キーワード:  $\text{CO}_2$ , 炭素循環, 輸送モデル, 陸上生態系, 植生

### 1. はじめに

産業革命以後、化石燃料の消費を主とした人間活動による大気中への  $\text{CO}_2$  放出量は増加の一途をたどっている。それに伴って大気中  $\text{CO}_2$  濃度も上昇を続け、この傾向が続けば地球温暖化現象が人類の生活に深刻な影響を及ぼす恐れがあると指摘されている。大気  $\text{CO}_2$  濃度の増加に伴う気候の変動については様々な研究がなされているが、今後の大気  $\text{CO}_2$  の濃度の動向を正しく予測するにはその全球規模での収支を明らかにすることが不可欠である。

大気中  $\text{CO}_2$  の収支の中でも特に重要な課題となっているのが陸上生態系の役割である。陸上生態系は植生部分が約 500GtC、土壌部分が約 2000GtC と見積もられている巨大な炭素の貯蔵庫であり (IPCC 2000)、その変動によって大気  $\text{CO}_2$  の大きな吸収源にも放出源にもなり得ると考えられる。しかし、その変動の実態についてはまだ詳しいことは分かっていない。生態系保有炭素量の変動要因には、土地利用や森林再生などの人為的なものと気候の年々変動

や大気  $\text{CO}_2$  濃度の変化に対する植生や土壌の反応による生理的なものがあるが、特に後者に関しては大気と植生との間に様々なフィードバック作用が存在するため見積もりが難しく、将来の炭素保有量の予測も困難なものとしている。そこで、大気と植生との間の炭素交換について、両者の相互的なフィードバック効果も含めて数値的にシミュレーションを行うことができれば極めて有効な研究手段であると思われる。

以前の生態系モデルは経験または現象に基づいたものがほとんどで気候の過去に例を見ないような変動に対する反応の予測能力は低かったが、最近になって生物物理学のプロセスに基づいた力学的モデルが開発されるようになってきた。Sellers *et al.* (1986) は GCM の境界条件としての植生の働きを再現するモデルとして SiB (Simple Biosphere Model) を開発し、さらにその新しいバージョンである SiB2 では植生からの  $\text{CO}_2$  フラックスも計算できるようにした (Sellers *et al.* 1996)。また Ito and Oikawa (2000) は Sim-CYCLE (Simulation

model of Carbon cYcle in Land Ecosystems)を開発し、植生と土壌で構成された陸上生態系の全球的な炭素収支のシミュレーションを可能にしている。

一方、個々のCO<sub>2</sub>の放出源・吸収源に関する研究だけではなく、数値モデルを用いた大気中CO<sub>2</sub>濃度分布のシミュレーションも重要なアプローチであることはこれまでも述べた通りである。(井口・木田 1999,2000)。井口・木田(1998)では開発した3次元輸送モデルを用い、NASA/GISSのFungがグリッドデータの形で作成した大気CO<sub>2</sub>の収支シナリオに従って大気中CO<sub>2</sub>濃度分布のシミュレーションを行った。そしてその結果を観測値と比較することによって収支シナリオの検証を行い、変更を加えたシナリオによってより観測値に近いCO<sub>2</sub>濃度分布を再現することができた。しかし、このような既存のデータを入力値として使用する方法では現在の平均的な大気—植生間の炭素交換について検討することができても、気候の変動に対応した炭素交換量の年々変動や将来の動向の予測に関する研究には対応できない。こうした点にも対応し、植生も含めた全球的なCO<sub>2</sub>の収支についてより詳しく解明するためには、与えられた気候条件に応じ、生物物理学的プロセスに基づいてCO<sub>2</sub>フラックス量を計算できる植生モデルを利用することが必要である。

上記の理由から、我々が開発した3次元大気輸送モデルと前述のSim-CYCLEとの結合モデルを現在開発中であり、本論文ではその概要と開発の現状について述べる。

## 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CO<sub>2</sub>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では植生を3層(葉、茎、根)、土壌を2層(有機土壌、鉱質土壌)に分け、層間の炭

素の移動量を計算することによって保有炭素量の変動を計算している。

Fig.1に、時刻 $t$ から $t+1$ までの1タイムステップにおける炭素の移動を示す。Fig.1において、 $W$ は保有炭素量、 $GPP$ は光合成による生成量、 $ARM$ は個体維持のための呼吸による消費量、 $ARG$ は成長のための呼吸による消費量、 $LF$ は枯死(リターフォール)、 $HR$ は土壌呼吸による消費量、 $HF$ は土壌の鉱質化を表わし、添字 $f, c, r, l, h$ はそれぞれ葉、茎、根、有機土壌、鉱質土壌を示す。また、 $GPP$ から植生の呼吸量 $AR$ を引いたものを $NPP$ (Net Primary Production)といい植生の成長量を示す。さらに、 $NPP$ から土壌の呼吸量 $HR$ を引いたものを $NEP$ (Net Ecosystem Production)といい、生態系全体の炭素保有量の増加を示す。したがって、生態系の保有炭素量の変化分が全て大気に還元されると仮定するならば、 $NEP$ に等しい炭素量が大气から吸収されるということになる。

Fig.1の $GPP, ARM, ARG, LF, HF, HR$ は気温、太陽放射、湿度、土壌水分等の関数であり、モデルにはこれらの値を入力する必要がある。

現在のSim-CYCLEでは植生を11のタイプに分けており、同じスキームでも各植生タイプでパラメータの値が異なる。

### 2.3. 結合モデルの概要

Fig.2に結合モデルの概要を示す。

現在開発中の結合モデルは、Sim-CYCLEで計算された生態系保有炭素量の変動をCO<sub>2</sub>フラックスとして3次元大気輸送モデルに取り入れ、逆に輸送モデルで計算されたCO<sub>2</sub>濃度分布をSim-CYCLEに反映させるという、CO<sub>2</sub>に関して相互作用的な結合モデルである。

タイムステップは、Sim-CYCLEの方は1日で計算された炭素量の変化はその日一日コンスタントなフラックスとして輸送モデルに与えられる。輸送モデルのタイムステップは20分である。

水平解像度は大気輸送モデル・生態系モデル共に $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ で一致させており、輸送モデルの鉛直解像度は $\sigma$ 座標で14層で上端は10hPaである。

大気輸送モデルではECMWF/TOGA解析データを読み込んでCO<sub>2</sub>の輸送を行う。また、地表面からのCO<sub>2</sub>フラックスとしてNASA/GISSのFungが作成したグリッドデータを用いる。このデータは1)化石燃料、2)土地利用、3)海洋、4)植生の4つのカテゴリから成っており、今回の結合モデルでは

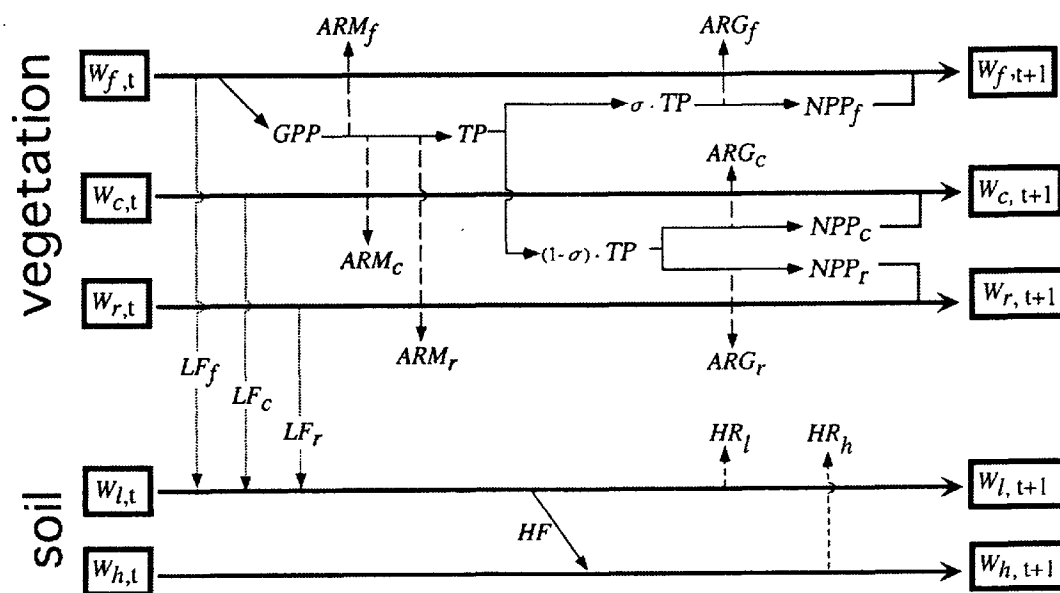


Fig.1: Carbon flow of Sim-CYCLE(presented by Akihiko Ito, Tsukuba Univ.)

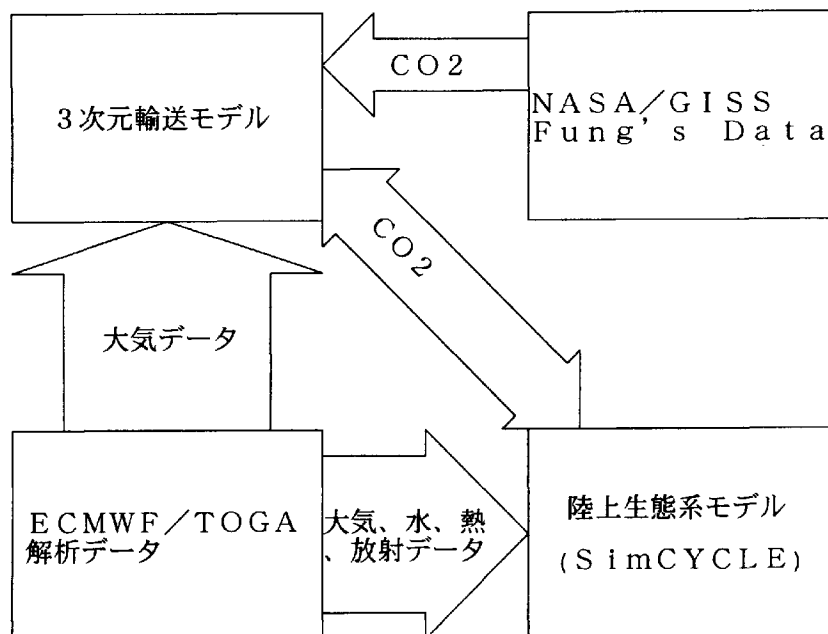


Fig.2: Structure of the coupled model

当然植生からのフラックスのデータは使用しないが、全球規模の大気 CO<sub>2</sub>収支を考える上でも残る3つのカテゴリのデータは必要である。

Sim-CYCLE が必要とする気候データには、ECMWF/Re-analysis のデータセットを用いる予定である。

### 3. シミュレーションの概要

今回行おうとし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<sub>2</sub>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<sub>2</sub>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<sub>2</sub>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全球規模の大気 CO<sub>2</sub>収支のシナリオについて検討を行う。

大気中 CO<sub>2</sub>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<sub>2</sub>観測値から内挿で得た濃度分布を用いている。

尚、生態系における炭素量分布の初期状態については次章で述べる。

### 4. Sim-CYCLE 単独による平衡実験

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。

#### 4.1. 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

結合モデルを用いたシミュレーションを行うにあたって、植生と土壌が保有する炭素量の適切な初期状態は不可欠である。適切でない初期状態からスタートして、観測等による予測では生態系が CO<sub>2</sub>の吸収源となっているはずなのにモデルの計算では大幅な放出になったり、あるいはその逆になったりするケースが発生しては信用できる大気 CO<sub>2</sub>収支の見積もりを行うことができない。

初期状態を得る方法としては、平衡実験が最も適当であると考えられる。これは、陸上生態系の分布が伐採などの人間活動による変化を除いてはほぼ安定した状態で推移してきているという仮定に基づく。また、平衡実験に用いる気候データはより長期間のものが望ましい。現在の生態系分布は長期間の

平均としての気候条件に対応したものと考えるべきであり、単年または短期間の平均の気候データを用いては現状と全く異なる平衡状態に移移する可能性があるからである。

こうした考えに基づき、Sim-CYCLE 単独による平衡実験を行ってシミュレーションに用いる生態系保有炭素量の初期条件を得る事にした。

#### 4.2. 平衡実験における使用データ

入力値として用いる長期間の気候データには、NCEP/NCAR の41年分(1958~1998)の再解析データを用いた。このデータセットは月間値であり、そのため Sim-CYCLE のタイムステップも1日から1ヶ月に変更した。尚、元のデータの水平解像度は T62 であるが、これを内挿により 2.5° × 2.5° に変更している。

また、大気 CO<sub>2</sub>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<sub>2</sub>濃度分布を用いて Sim-CYCLE に月毎に与えている。

#### 4.3. 実験結果

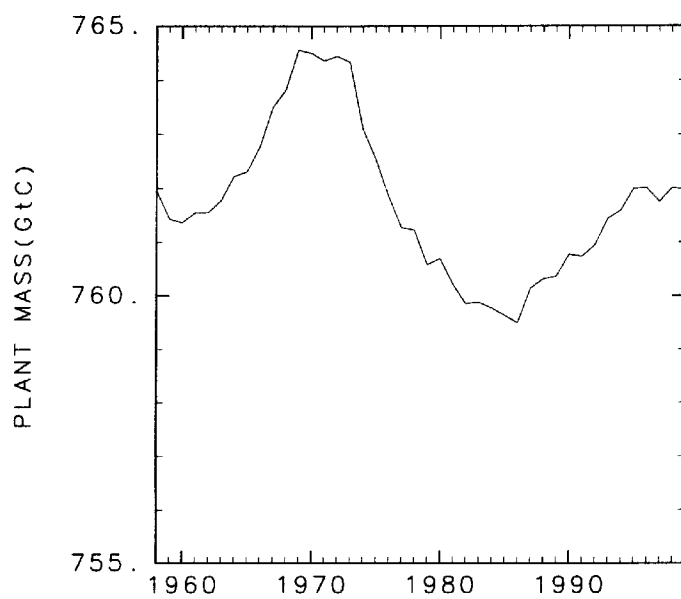
平衡実験は NCEP/NCAR の41年分の再解析データを繰り返し用いて植生、土壌共に保有炭素量が定常状態になるまで行われた。また、定常状態において全球合計した植生(タイプ別についても考慮する)および土壌の炭素量は推定値(IPCC 2000, ホイッタカー 1979)と比較し、パラメータの調節を行った。

実験の結果、平衡状態に達するまでに植生部分で100年オーダー、土壌部分で1000年オーダーの時間がかかった。また、初期状態には筑波大学の伊藤氏が行った実験の結果や、パラメータ調節前の平衡状態などを用いたが、異なる初期状態を用いても達した平衡状態には違いはなかった。

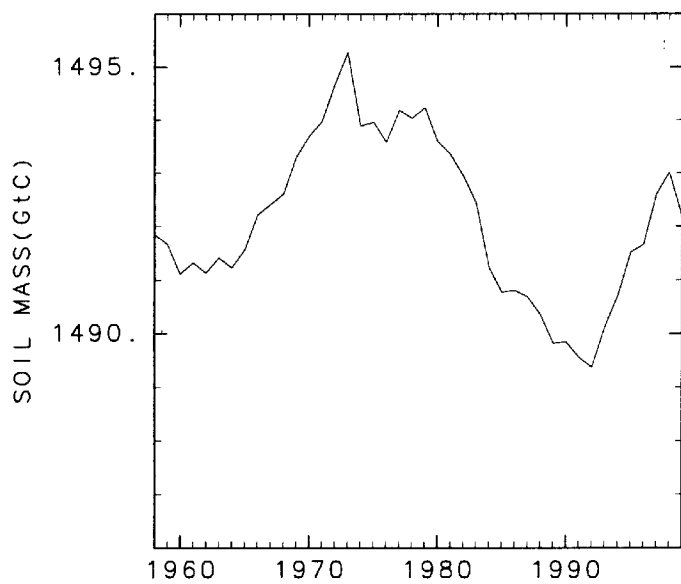
これまでにを行った平衡実験の中から最新の結果について以下に示す。

定常状態では全球合計した炭素量は41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はFig.3より位相が遅れており、植生からのリターフォールが土壌の炭素量を支配していることを反映している。

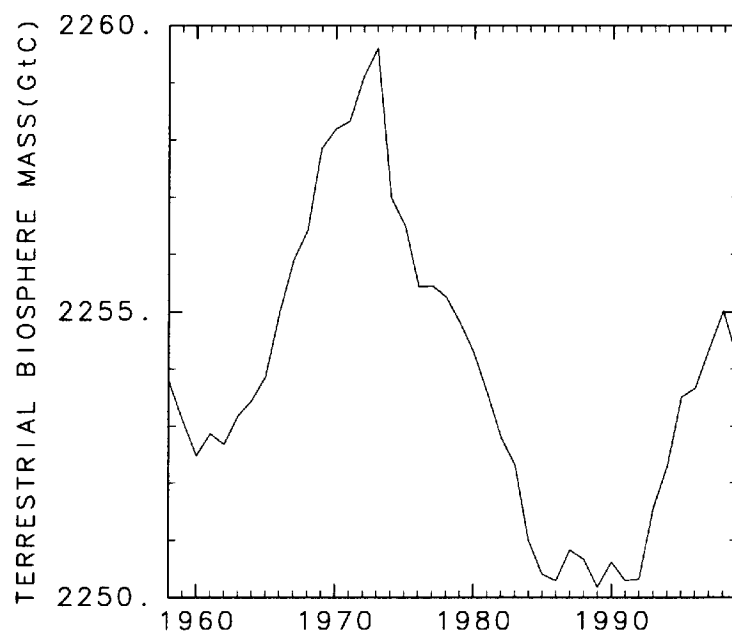
次に Fig.5に同じく41年間の生態系炭素量(植生+土壌)の変動を示す。Fig.5より、多いときで2~3GtC/y 程度の保有炭素量の変動がある事が分



**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

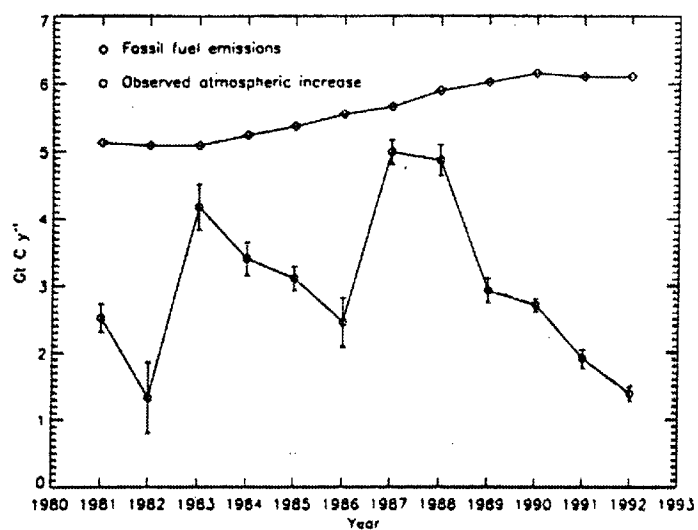


Fig.6: Annual average global atmospheric CO<sub>2</sub> increase for 1981-1992 (*Fig.12 of Conway et al.* was reprinted)

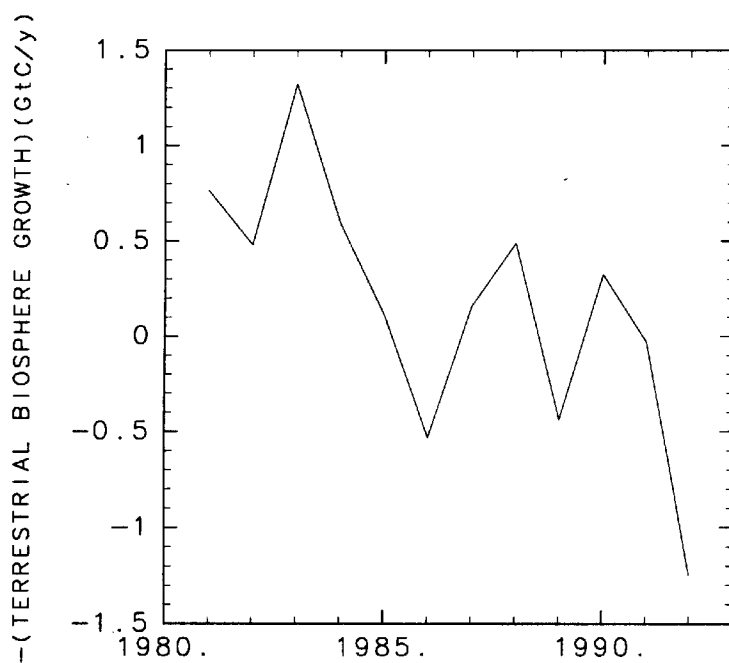


Fig.7: Increase of total biosphere carbon mass multiplied by -1 (in short, carbon flux from biosphere to atmosphere)

かる。化石燃料による CO<sub>2</sub> の放出が約 6GtC/y, そのうち約 3GtC/y が大気中に残留しているという推定値と比較してもこの変動量は同等のオーダーであり, 年平均した大気平均 CO<sub>2</sub> 濃度を求めればその年々変動にはっきり表れてしかるべき大きさである。

大気中の CO<sub>2</sub> 蓄積量については Conway *et al.* (1994) が観測値を元に推定を行っている。Fig.6は, Conway *et al.* (1994) の推定による 1981~1992 年の大気中残留 CO<sub>2</sub> 量の変動であるが, この図においても 1~5GtC/y と大気中に蓄積される CO<sub>2</sub> の量にかなりの年々変動があることが分かる。これに対応するものとして, Fig.5における 1981~1992 年の再解析データを入力値とする部分について, 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に示した。Fig.6と Fig.7とを比較してみると, 位相はかなりの部分で一致しており, 変動量についても一致しないまでも近い値になっている。この結果は, 大気中に残留する炭素量の年々変動に植生が大きく寄与していることを示唆している。変動量や一部の位相の相違については, 化石燃料消費, 土地利用, 海洋などその他の放出源や吸収源からのフラックスの年々変動が関わっていると考えられる。また, 大気 CO<sub>2</sub> 濃度の上昇が植生に与える影響もあると思われ, 結合モデルを用いて行う長期シミュレーションによる結果と Fig.6と Fig.7との比較も注目すべき点である。

なお, 平衡状態における全球合計した植生の炭素量は IPCC(2000) の見積もりと比較してまだ大きめの値となっており, さらに調整を要する。

## 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 CO<sub>2</sub> 濃度上昇率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, 大気中 CO<sub>2</sub> 収支の研究に陸上生態系モデルを用いることの重要性が改めて認識された。

今後は平衡実験を通して Sim-CYCLE の調整を進め, 得られた生態系の初期状態を用いて大気輸送一陸上生態系結合モデルによるシミュレーションを行い大気 CO<sub>2</sub> の全球規模収支の検討を行ってきたい。

## 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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。

本論文の Fig.6は Conway *et al.* (1994) の Figure12 を転載させて頂きました。本論文の 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。

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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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.
- 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.
- 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.
- IPCC(2000): IPCC special report, land use, land-use change, and forestry, policy makers summary, 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.
- 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.

## **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 CO<sub>2</sub>, a three-dimensional atmospheric transport model is being coupled with a terrestrial biosphere model.

In the coupled model, CO<sub>2</sub> flux from biosphere calculated by the biosphere model is inputted to the transport model, and, CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> increase is much due to the fluctuation of the carbon storage of terrestrial biosphere.

**Keywords:** CO<sub>2</sub>, carbon budget, transport model, terrestrial biosphere, vegetation