

グローバルモデルを用いた植生起源炭素フラックスの季節変化の研究

井口敬雄・木田秀次*

* 京都大学大学院理学研究科

要 旨

全球規模の3次元大気輸送モデルおよび陸上生態系モデル (Sim-CYCLE) を用いてシミュレーションを行い、大気—植生間における炭素交換の季節変化について調べた。シミュレーションでは1990年の大気解析データおよびNASA/GISSの地表面炭素フラックスデータを用いて大気中CO₂の濃度分布をシミュレートし、結果を観測値に基づく季節変化と比較した。その結果、北半球の植生の活動が活発になる初夏から夏にかけては観測値と良く一致したが、活動が衰え落葉もある夏の終りから秋にかけて違いが目立った。また、南半球低緯度ではNASA/GISSデータとSim-CYCLEとでほとんど逆の位相となる陸上生態系起源炭素フラックスの季節変化が見られた。これらの結果は大気—植生間炭素交換の詳細を明らかにすると共に、Sim-CYCLEにおける植生活動の取り扱いに課題を示すものである。

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

大気中のCO₂濃度において、陸上の植生は非常に重要な役割を果たしている。現在、化石燃料の燃焼によって大気中に放出されたCO₂の吸収源として土壌も含めた陸上生態系が考えられており (Tans *et al.* 1990, Ciais *et al.* 1995, Fan *et al.* 1998, IPCC 2001), 大気中CO₂濃度の動向を探るためにも陸上生態系による長期的な炭素吸収の実態解明は欠かせない課題である。井口・木田 (2002, 2003) は全球規模の大気輸送モデルや陸上生態系モデルを用いてシミュレーションを行い、その結果と観測値との比較によって、植生の役割を含む大気中のCO₂収支について検討を行ってきた。

陸上生態系のもう一つの重要な役割は大気中CO₂

濃度の季節変動に与える影響である。陸上の植生は呼吸と光合成という二つの活動を行うことにより、大気中へのCO₂の放出または吸収を行う。二つの活動を年間を通じて行う植生もあるが、夏期のみ光合成を行う季節林や草が多く存在しており、南北各半球全体として夏期にCO₂の吸収、冬季に放出という働きをしている。そしてその効果は観測されるCO₂濃度の季節変化として特に北半球ではっきり現れている。Keeling (1976) を始めとするCO₂濃度の定点観測でも、北半球では夏に濃度が下がり、冬に上昇するという季節変化がはっきり示されており、植生の影響の大きさを示している。さらにこのCO₂フラックスの季節変化は年間の収支が0の場合でも境界層や大規模場の風の季節変化との関連で

南北方向に濃度傾度を生じさせることも指摘されている (Denning et al.,1995)。

現在、陸上生態系を生理学的プロセスに基づいてシミュレートするモデルが開発されており、その中には光合成活動を再現するモデルもある (Sellers et al. 1996, Ito and Oikawa 2000)。大気—植生間の炭素交換の季節変化の実態を明らかにする上でも、またこうしたモデルの信頼性・有用性を高める上でも、これらのモデルを用いたシミュレーションにおいて CO₂ のフラックスや濃度分布の季節変化を検討することは重要である。

本研究で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) および 3 次元の大気輸送モデルを用いた、大気中 CO₂ 濃度分布のシミュレーションを行い、その季節変化および大気—植生間の炭素フラックスの季節変化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

Sim-CYCLE は植生および土壌からなる陸上生態系の炭素ダイナミクスをシミュレートするために開発されたモデルで、生理学的プロセスに基づいて光合成、呼吸、分解といった炭素の移動を計算する。本モデルで計算された光合成による炭素の吸収、呼吸と分解による炭素の放出の収支は大気—陸上生態系間の CO₂ フラックスとして取り扱われる (Fig.1)。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 の詳細についても、井口・木田 (2001,2002) の中で説明しているため、ここでは省略する。

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 CO₂ 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 CO₂ 濃度分布は Sim-CYCLE に反映させていく。つまり、本モデルは CO₂ 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 CO₂ 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 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。

大気輸送モデルに用いる入力データは、ECMWF/TOGA 再解析データを用いた。先に同じデータを用いて CO₂ 濃度分布のシミュレーションを行っており (Iguchi and Kida, 2004)、その時の結果も参考として今回の結果との比較材料に用いる。

Sim-CYCLE については、陸上生態系の初期状態を得るための平衡実験にできるだけ長期間の解析データが必要であるため、50 年を超える期間のデータが利用できる NCEP/NCAR 再解析データを使用した。

3. 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 との結合モデルによる大気中 CO₂ 分布のシミュレーションを行った。

3.1 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、予め Sim-CYCLE 単独で CO₂ の濃度を産業革命以前 (1751 年) の 280ppmv から 2000 年まで増加させる実験を行い、その途中 1990 年始めの状態を用いた。また大気中 CO₂ 濃度の初期状態は、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ている。

この状態から前章で述べたデータを用い、1990 年一年間の大気中 CO₂ 濃度分布をシミュレートした。

3.2 実験結果と考察

3.2.1 CO₂ 濃度分布の季節変化

Fig.3 に今回行ったシミュレーションの結果を月間・帯状平均して得られた CO₂ 濃度の南北分布を示す。Fig.4 は大気輸送モデルと NASA/GISS 炭素交換データを用いて行ったシミュレーションの結果を月間・帯状平均して得られた CO₂ 濃度の南北分布で

ある。Fig.3, Fig.4 共に実線がモデル値であり、観測値を破線で示してある。観測値については、各月毎に観測値から内挿によって全球規模の水平濃度分布を求め、そこからさらに帯状平均して南北分布を求めている。したがって、モデル値についても同様に、観測点の位置におけるモデル値から内挿によって全球規模の水平濃度分布を求め、そこからさらに帯状平均して南北分布を求めている点に注意されたい。二つのモデル値の違いは植生からの炭素フラックス量が Sim-CYCLE で求めた値か、NASA/GISS の植生起源フラックスデータの値かであり、それ以外の化石燃料消費、海洋、土地利用からのフラックス量は同一である。Fig.4 の場合、植生の活動が活発になる北半球初夏においてモデルの濃度が観測値に比べてかなり高く、この時期の植生による吸収が NASA/GISS では十分ではないと考えられるがこの点では Sim-CYCLE の計算の方がより観測値に近い結果を出している。しかしその一方で、逆に植生の光合成活動が衰えていく秋において観測値よりも目立って濃度が低くなるという結果が出た。現在の Sim-CYCLE では、11 月に北半球の落葉が起きるようになっており、そのため光合成活動の期間が実際よりも長くなっていると考えられる。今後は緯度による落葉時期の変動、さらには気候条件による自動的な落葉活動のモデル化を目指して Sim-CYCLE の改良を行っていかねばならない。

次に、観測点毎に観測値とモデル値の季節変化を比較してみた。1990 年の場合、観測点は多数あるので季節変化のパターンが似ている 6 つの領域に絞り、それぞれの代表となる観測値と対応するモデル値を示す。Fig.5 ~ Fig.12 に示すように、北半球では

1. 濃度の極小値は観測値の方が低い。
2. 濃度が極小となる時期はモデルの方が遅い。

という特徴が多く地域と観測点において見られた。濃度に大きな違いが見られたのがヨーロッパ中緯度である。この地域は化石燃料消費による CO₂ 放出が強い地域であるが、現在の大気輸送モデルは最下層が 1.4~1.5km と厚く、地表面からの CO₂ フラックスはこの範囲で直ちに均一化されて濃度に加えられる。したがって、この地域で現実には存在していると思われる高い鉛直濃度傾度と地表面付近の高い濃度が再現されておらず、その分モデル値が観測値よりも低い濃度になっていると考えられる。

3.2.2 陸上生態系起源炭素フラックスの季節変化

Sim-CYCLE と NASA/GISS それぞれについて、帯状平均された CO₂ フラックスの季節変化を示したのが Fig.13 と Fig.14 である。横軸は月、縦軸は緯度を示す。両者を比べてみると、まず北半球高緯度における吸収・放出期間が異なることに気付く。吸収期間が異なるのは光合成活動の期間の違いと思われる、先に Fig.3 のところで述べた通りである。放出期間の方は、NASA/GISS データの場合吸収期間の前後に二つの放出量の極値を持ちその間にはほとんどフラックスの無い期間があるのに対し、Sim-CYCLE の場合は吸収期間以外は全て放出期間と言ってもよく、極値も一つのみである。これは、雪氷期間の炭素フラックスの取り扱いという問題を内包している。NASA/GISS データの場合は土壌呼吸データに基づいており、地面の凍結する期間はフラックスはないものとしている。現在の Sim-CYCLE は地面が凍結した場合や雪で覆われた場合も関係なく土壌呼吸による CO₂ 放出が行われる。現実にはどの程度の積雪で土壌中からのフラックスが存在するか等については詳しくは分かっていない。この地域の土壌中からの炭素フラックスは存在しても微量で、大気中 CO₂ 濃度に大きな影響を与えるものではない。しかし、モデルの再現性向上の点から見ても、雪や氷に覆われた地面からのフラックスの詳細を明らかにし、より詳細な地表面データを使用した場合、あるいは GCM と結合させた場合に対応することが望ましい。

Fig.13~14 においてもう一つ目につくのは南半球低緯度におけるフラックスの季節変化の位相の違いである。この逆と言ってもいいくらいの位相の違いを考える上で、Fig.15~16 を見ていただきたい。Fig.15 は南米の (64W,11S) と (49W,21S) という二つのグリッドポイントにおける Sim-CYCLE モデル値と NASA/GISS データの月毎の炭素フラックスである。Sim-CYCLE において前者は熱帯雨林、後者は熱帯季節林として扱われている。熱帯雨林の方は両者の位相が全く逆になっていることが分かる。そこで、両グリッドポイントにおいて Sim-CYCLE フラックス値を光合成生産量と植生 + 土壌の呼吸消費量に分けてプロットしたのが Fig.16 である。熱帯雨林、熱帯季節林ともに呼吸の季節変化ははっきりしており、気温の高い夏に活発で逆に冬に弱くなる。一方、光合成を見ると、熱帯季節林は夏期のみ集中して呼吸を上回る活動を行い、年間を通じて収支を保っている。これに対して熱帯雨林

の方は年間を通じて光合成を行い呼吸とつりあいをとるわけであるが、呼吸よりも季節変化が少なく、夏期は呼吸の方が光合成を上回った。その結果、熱帯雨林では夏に放出、冬に吸収という一見矛盾した結果となった。こうした結果は他の常緑性の植生でも見られた (Fig17)。この現象が現実には起きていることかどうかは、十分可能性のあることであり、今後調べてみる必要がある。一方、NASA/GISS データは前述の通り NDVI 指数によって決められており、NDVI 指数の元となる衛星データからも、夏に南半球低緯度の植生が活発になっていることは信頼性が高いと思われる。今回の食い違いの原因として考えられるのは植生の種別の取り扱いである。Sim-CYCLE では一つのグリッド領域で一つの植生しか扱わない。実際には広いグリッド領域には複数の植生種別が存在しているが、その中から代表的なものを一つ選ぶことになる。例えば、熱帯雨林 7 割、熱帯季節林 3 割というグリッド領域があれば Sim-CYCLE では熱帯雨林として扱われるが、そうした領域が 100 あるものをすべて熱帯雨林として扱うには問題がある。このような場合は 30 を熱帯季節林として扱うことにより、そこからの CO₂ フラックスの季節変化を再現することができる。今回は熱帯雨林が中心となる領域を全て熱帯雨林として扱ったために上記のような理由で NASA/GISS と異なるフラックスの季節変化を示したものと思われる。こうした少数派の植生種別を考慮していくことも今後は必要であろう。

4. まとめ

陸上生態系モデル (Sim-CYCLE) および大気輸送モデルを用いて大気中 CO₂ 分布のシミュレーションを行い、再現された季節変化を観測値や NASA/GISS 炭素フラックスデータと比較した。

観測値との全球規模での比較では、春～夏にかけて良くあったが、秋において違いが目立ち、モデルの落葉の取り扱いに問題が示された。また、観測点毎の比較では、北半球において濃度が極小となる時期のずれが目立ち、南半球では位相の大きなずれが見られた。

NASA/GISS データとに比較では、北半球高緯度と南半球低緯度に季節変化の違いが見られた。前者は雪や氷の覆われた土壌からの炭素フラックスに関するモデルの不十分な対応が現れている。後者は常緑樹における炭素フラックスが季節林と逆になる可能性を示唆すると共に、Sim-CYCLE における植生

種別の取り扱いに問題点を示した。

これらの結果をもとにして今後さらにモデルの改良を進め、より新しい観測結果により検証を行っていく必要がある。さらに、GCM 等との結合を行い、大気中 CO₂ の動向の予測などに利用していきたい。

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独自に改良を加えたものです。

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。Hawaii Mauna Loa 山頂における CO₂ 観測データは CDIAC (二酸化炭素情報分析センター) のホームページより取得しました。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.3~14 の作成には地球流体電脳倶楽部の電脳ライブラリ (del-5.0) を使用しました。また、Fig.15~17 の作成には COLA/IGES のツール GrADS を使用しました。

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 (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.
- 井口敬雄・木田秀次 (2002): 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, 京都大学防災研究所年報, 第 45 号, B, pp.221-231.
- 井口敬雄・木田秀次 (2003): 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, 京都大学防災研究所年報, 第 46 号, B, pp.361-372.
- 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.
- Denning, A. S., I. Y. Fung, and D. A. Randall (1995): Gradient of atmospheric CO₂ due to seasonal exchange with land biota, *Nature*, 376, 240-243.
- Enting, I. G., C. M. Trudinger and R. J. Francey (1995): A synthesis inversion of the concentration and δ^{13} of atmospheric CO₂, *Tellus*, 47B, 35-52.
- 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.
- Iguchi, T. and H. Kida(2004): A Numerical Study of the Atmospheric CO₂ Budget using a Global Transport Model, **現在投稿中**.
- IPCC (2001): CLIMATE CHANGE 2001 *The scientific Basis*, Cambridge Univ. 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.
- 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
- 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

A study of sesonal variation of carbon flux from the biosphere using the global models

Takao IGUCHI and Hideji KIDA*

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

synopsis

Using Sim-CYCLE, a global terrestrial ecosystem model, and the three dimensional transport model, CO₂ distribution in 1990 was simulated and its sesonal variation was verified. The monthly mean latitudinal CO₂ distributions agree with those of the observation in the peiod from spring to summer, but disagree from summer to autumn. Compared with NASA/GISS carbon exchange data sets, seasonal variation of carbon flux from the biosphere calculated by Sim-CYCLEdiffers much at lower latitudes in the southern hemisphere. These discrepancies show the clues to reveal the detail of carbon exchange between the biosphere and the atmosphere, and to improve Sim-CYCLE.

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

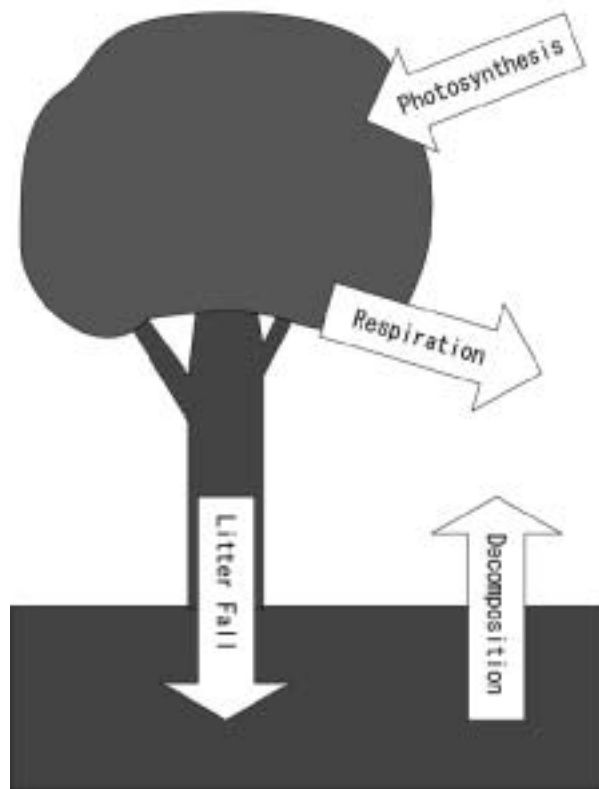


Fig.1 Carbon flow of terrestrial ecosystem.

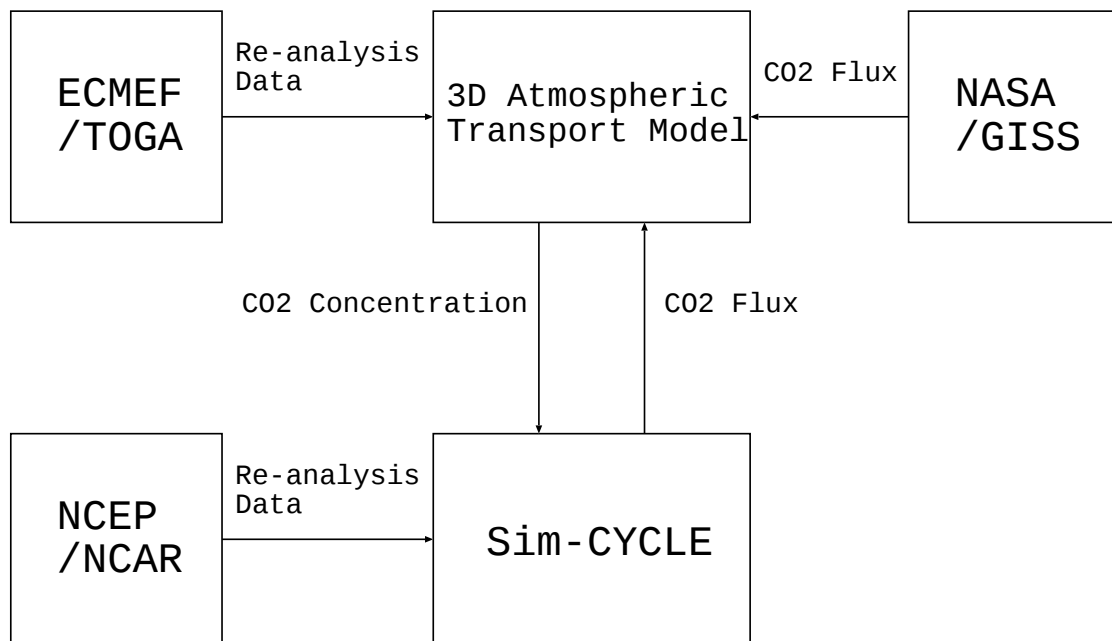


Fig.2 Structure of the coupled model.

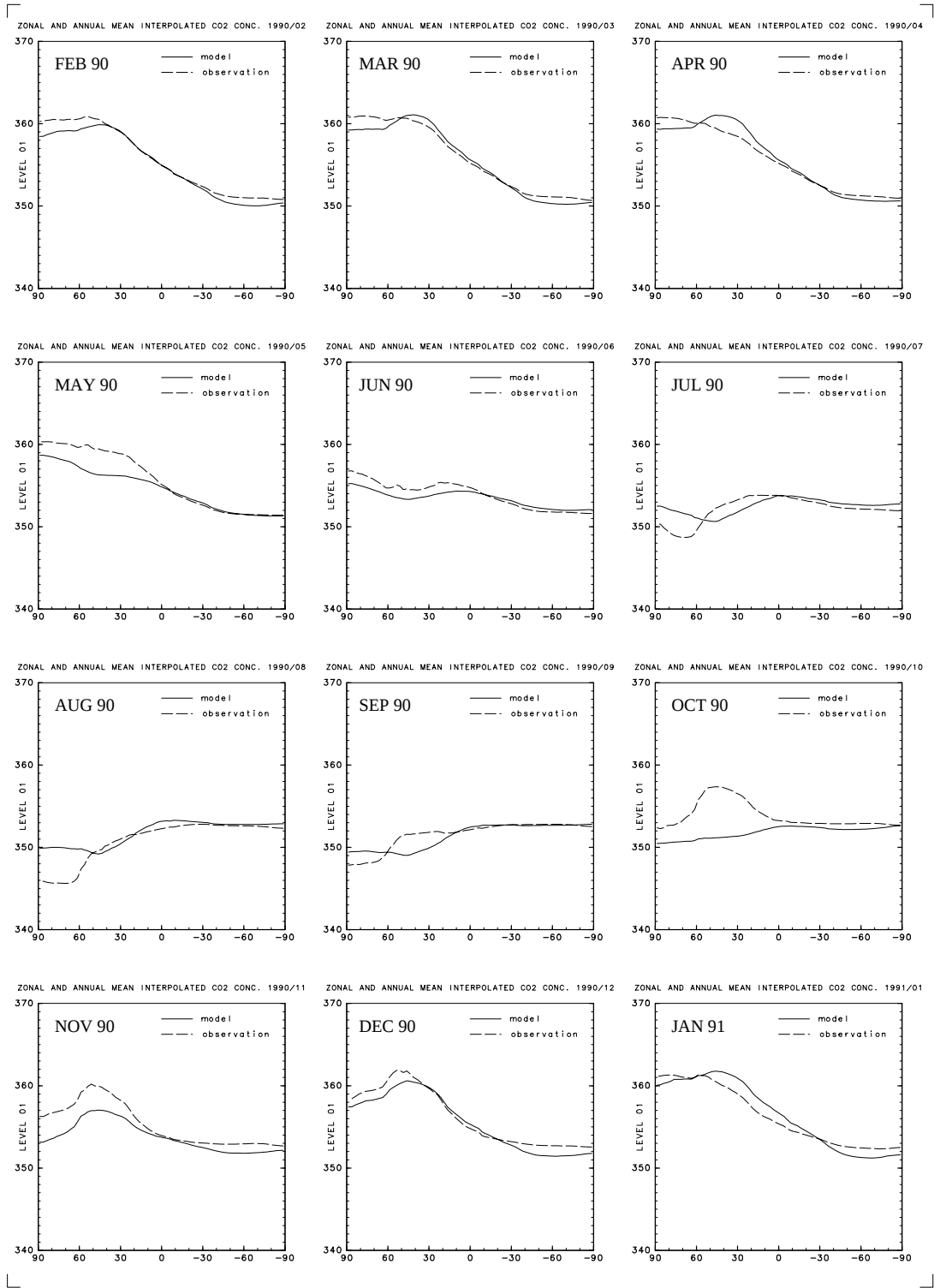


Fig.3 Zonal mean of monthly mean CO₂ distribution of the simulation using the combined model(solid line) and the observation(broken line).

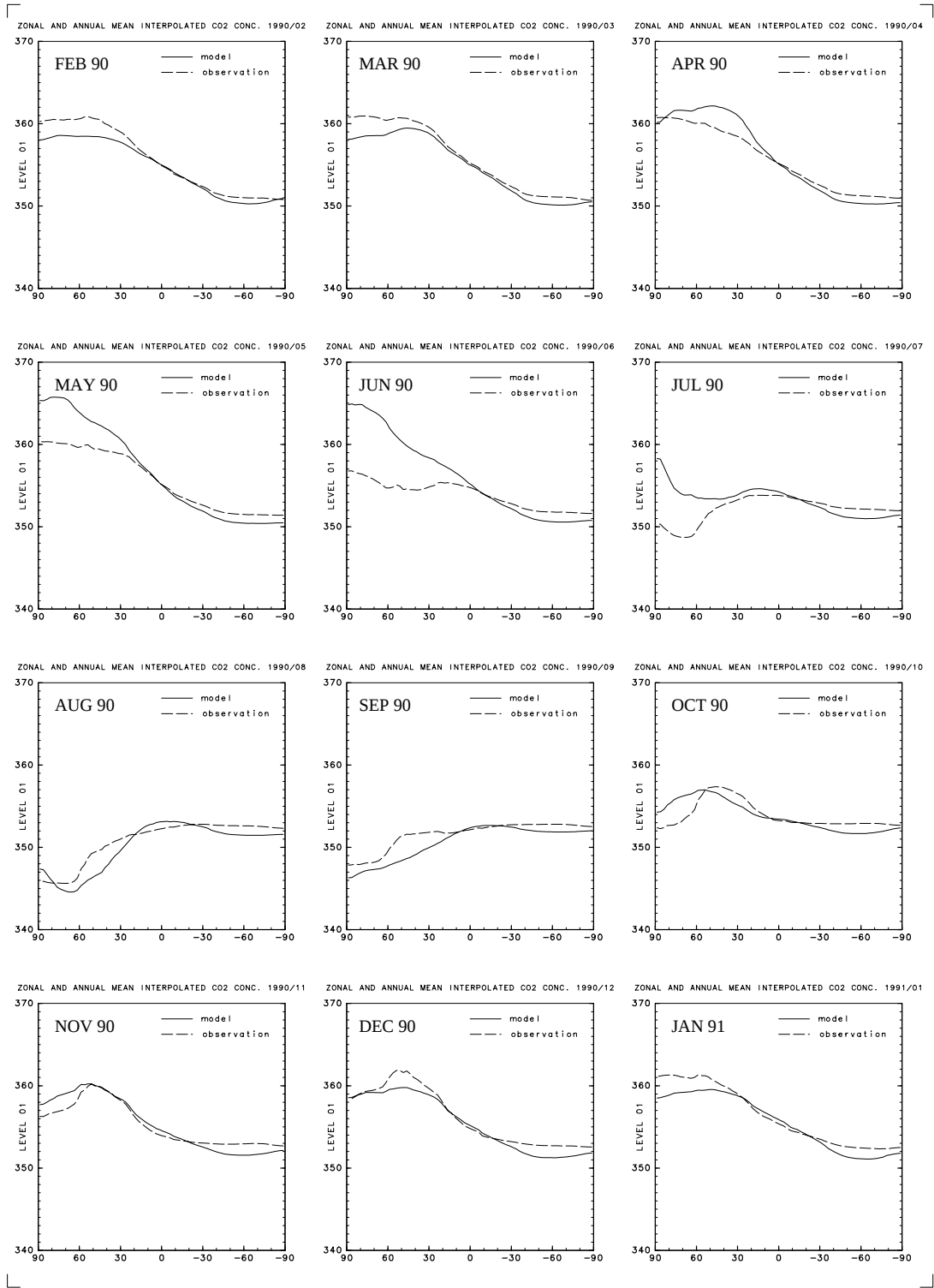


Fig.4 Zonal mean of monthly mean CO₂ distribution of the simulation using the 3D atmospheric transport model(solid line) and the observation(broken line).

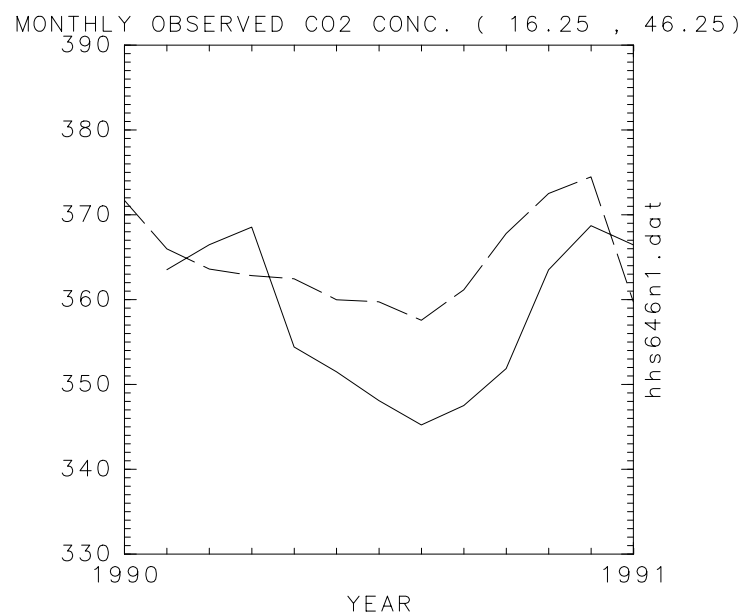


Fig.5 Seasonal CO₂ variation at the middle of Europe(16E, 46N). Solid line is the calculated value, and broken line is the observed value.

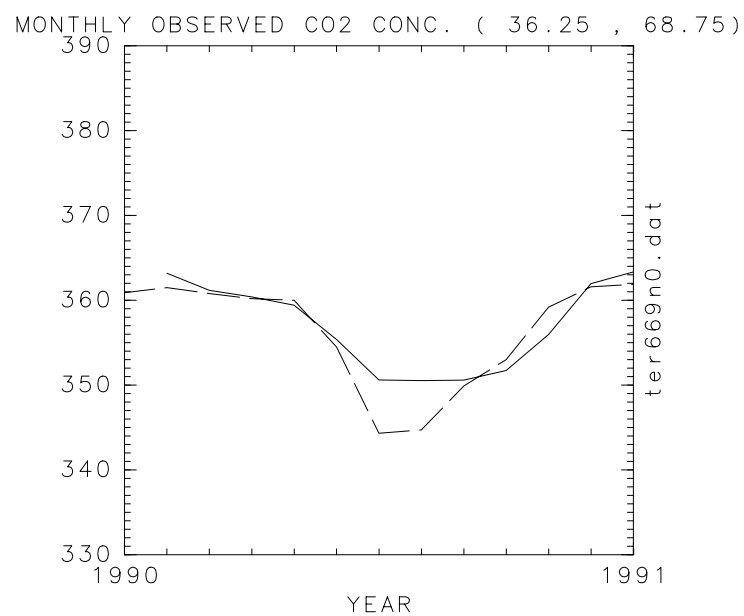


Fig.6 Seasonal CO₂ variation at North Europe(36E, 69N). Solid line is the calculated value, and broken line is the observed value.

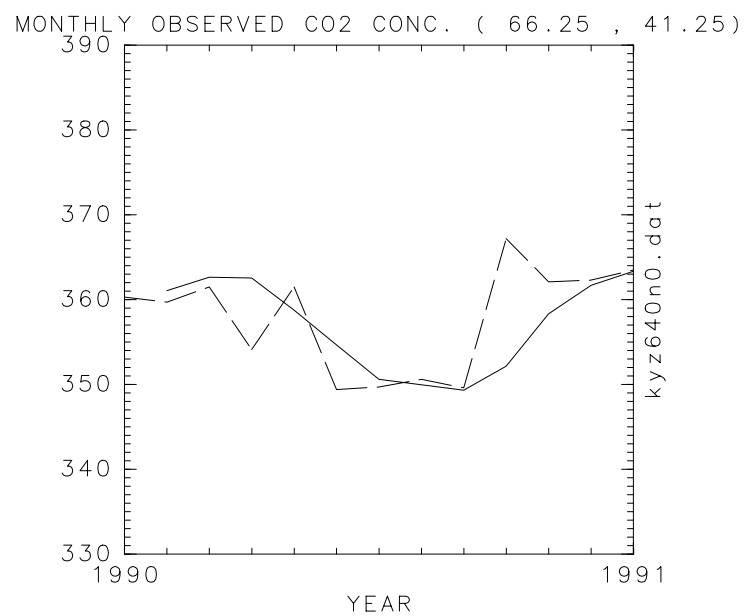


Fig.7 Seasonal CO₂ variation at the middle of Eurasia(66E, 41N). Solid line is the calculated value, and broken line is the observed value.

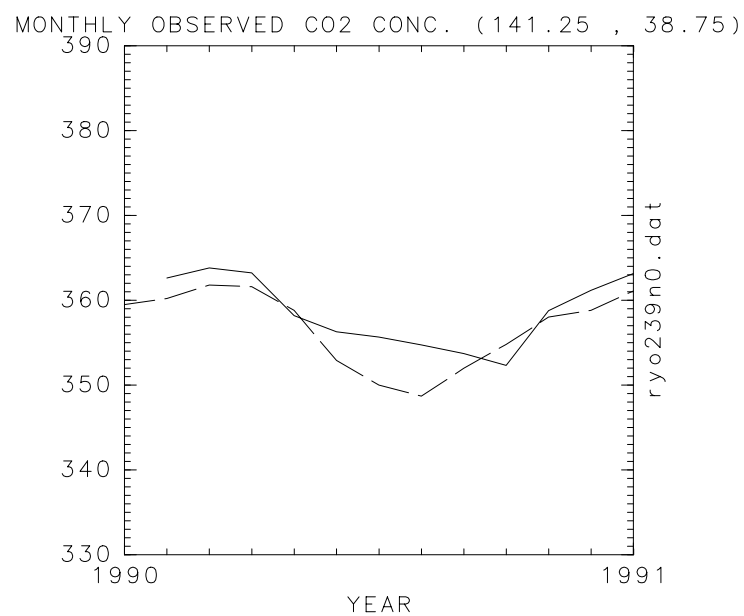


Fig.8 Seasonal CO₂ variation at western Pacific(141E, 39N). Solid line is the calculated value, and broken line is the observed value.

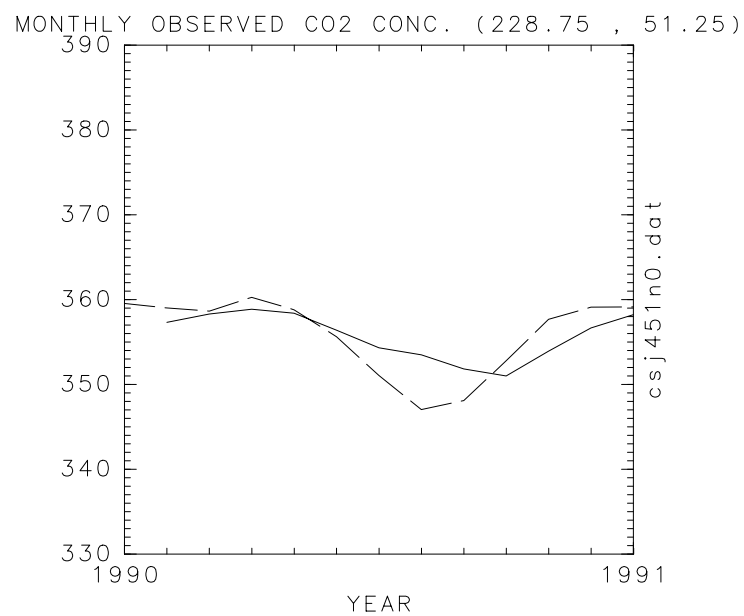


Fig.9 Seasonal CO₂ variation at eastern Pacific(131W, 51N). Solid line is the calculated value, and broken line is the observed value.

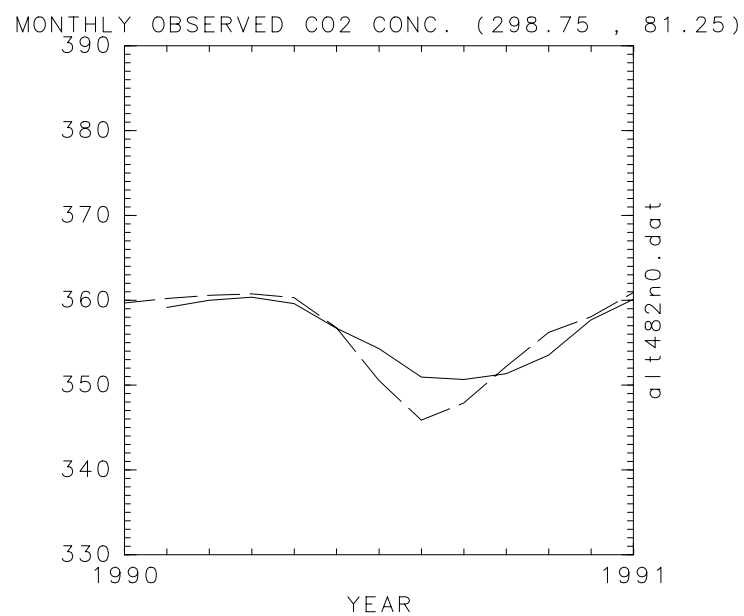


Fig.10 Seasonal CO₂ variation at Arctica(61W, 81N). Solid line is the calculated value, and broken line is the observed value.

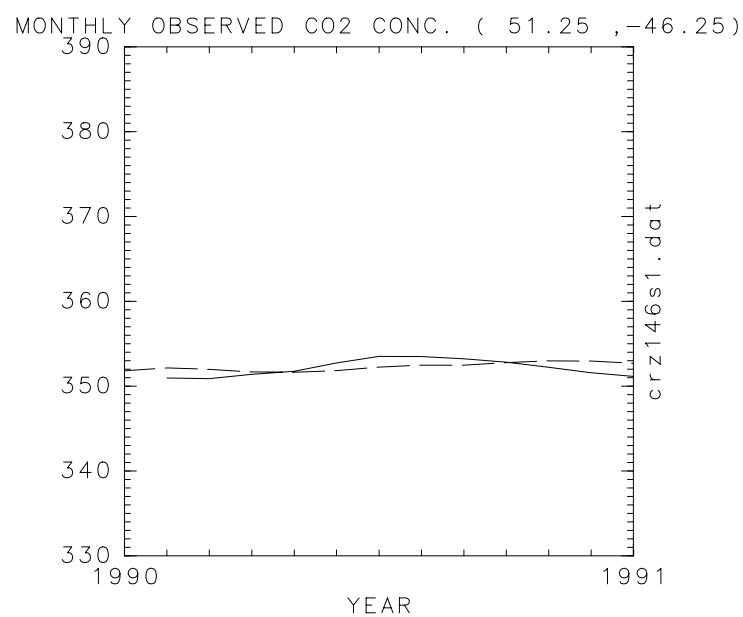


Fig.11 Seasonal CO₂ variation at the middle latitude of Southern Hemisphere(51E, 46S). Solid line is the calculated value, and broken line is the observed value.

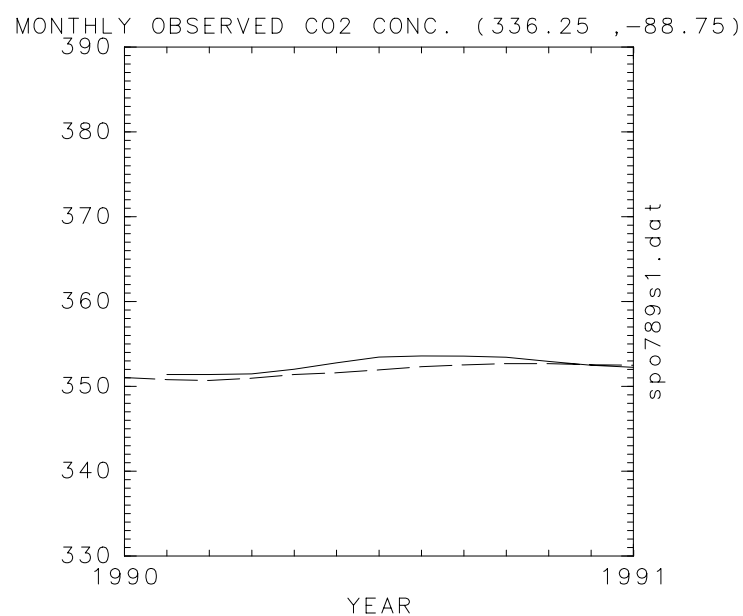


Fig.12 Seasonal CO₂ variation at South Pole(24W, 89S). Solid line is the calculated value, and broken line is the observed value.

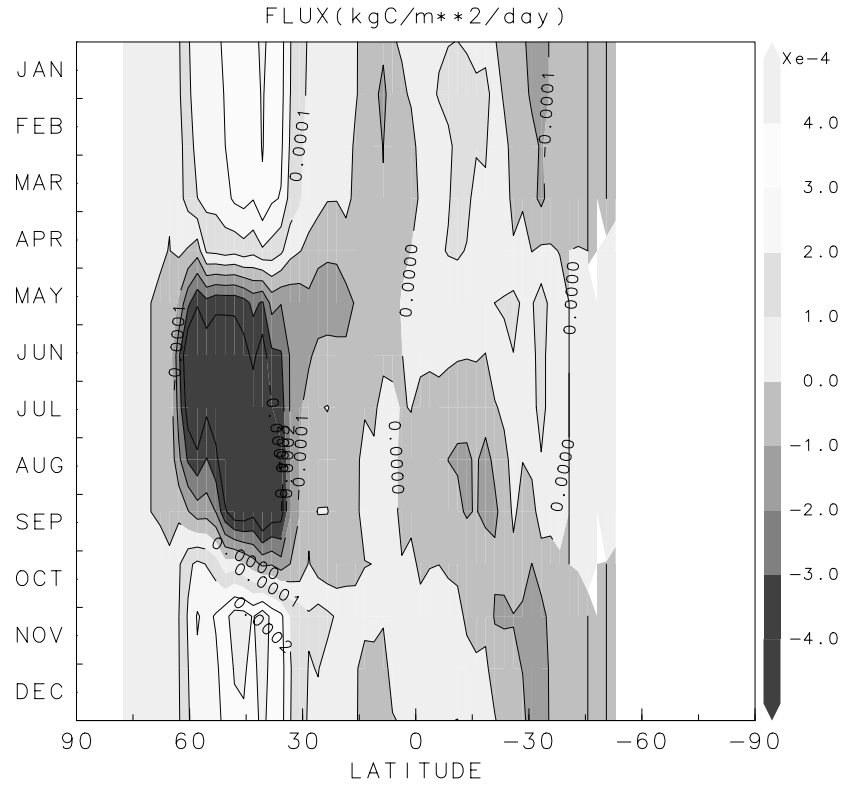


Fig.13 Monthly distribution of zonal mean CO₂ flux calculated by Sim-CYCLE.

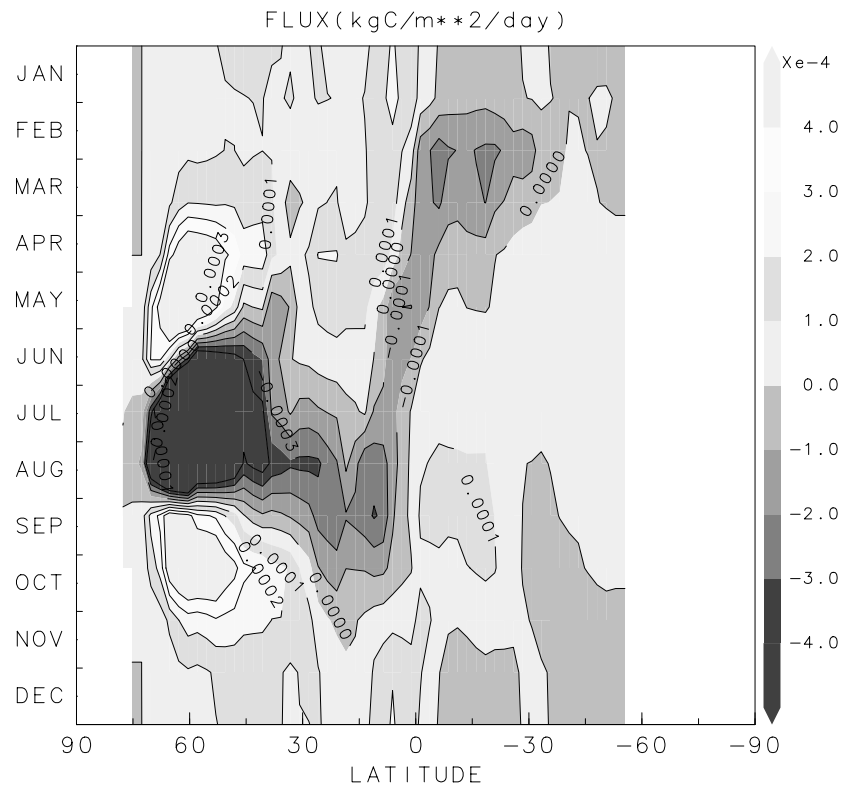
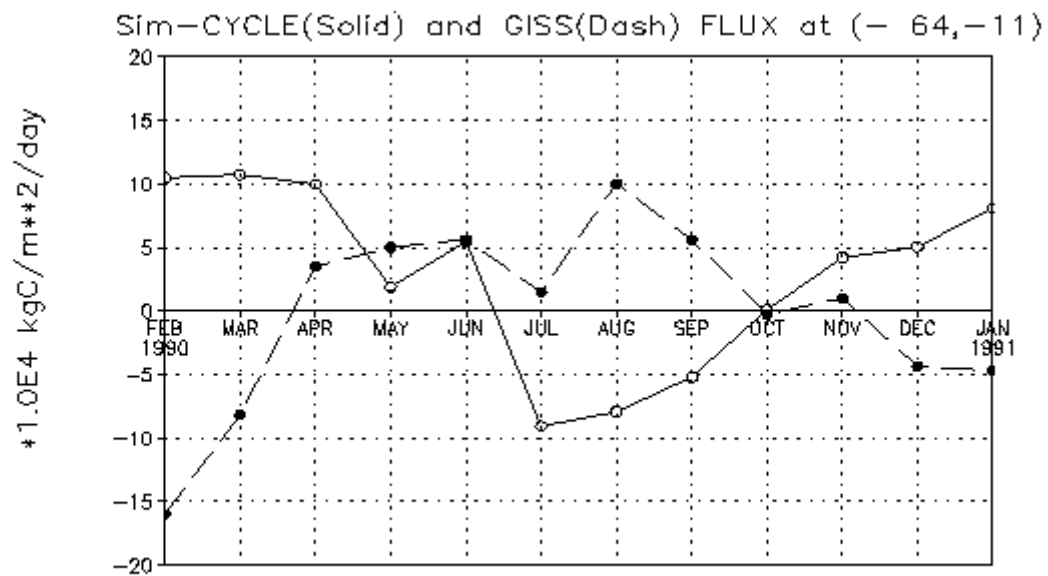


Fig.14 Monthly distribution of zonal mean CO₂ flux of NASA/GISS CO₂ flux data.



GrADS: COLA/IGES

2004-03-10-19:50

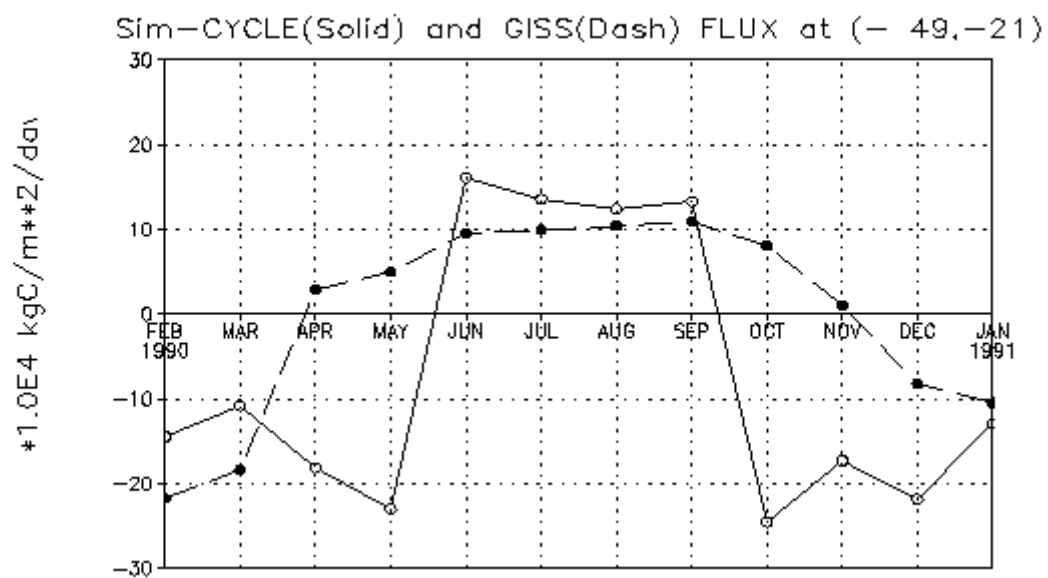
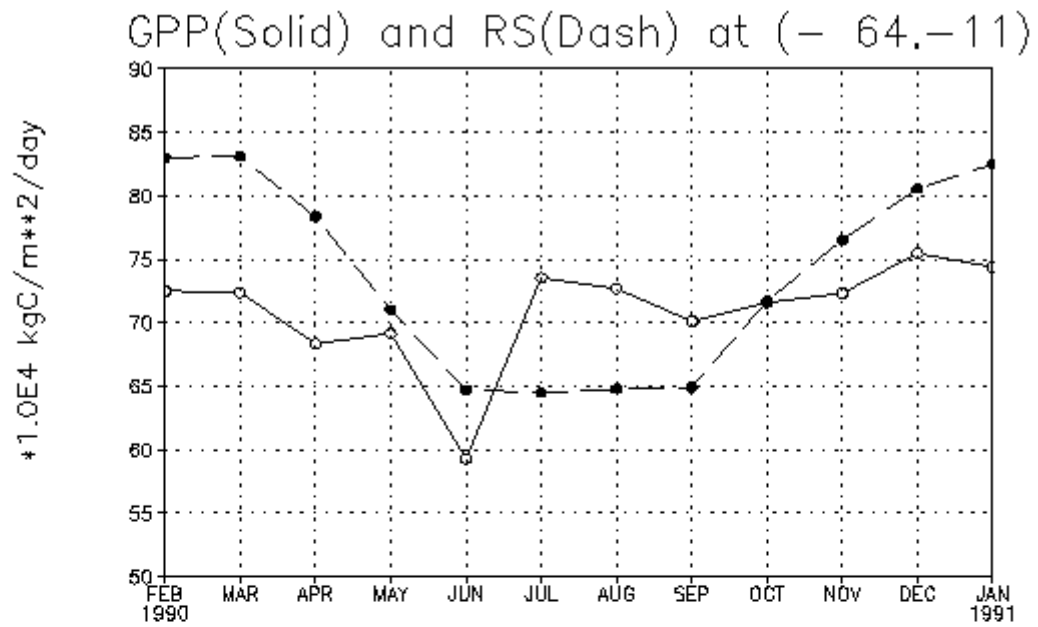


Fig.15 Seasonal change of carbon flux from tropical rainforest(upper) and tropical deciduous forest(lower).



GrADS: COLA/IGES

2004-05-13-16:32

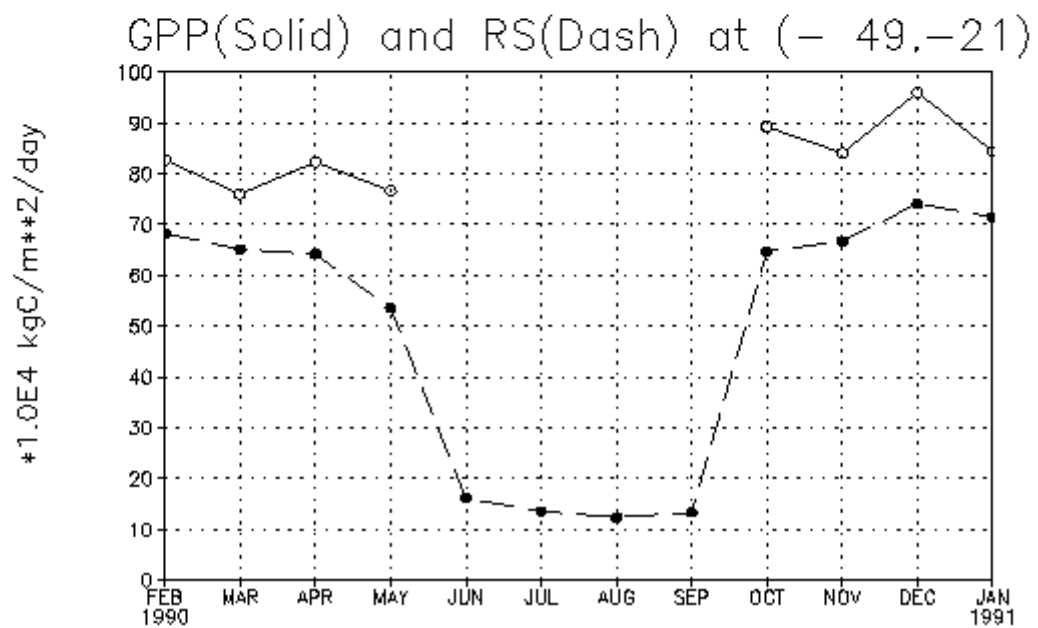
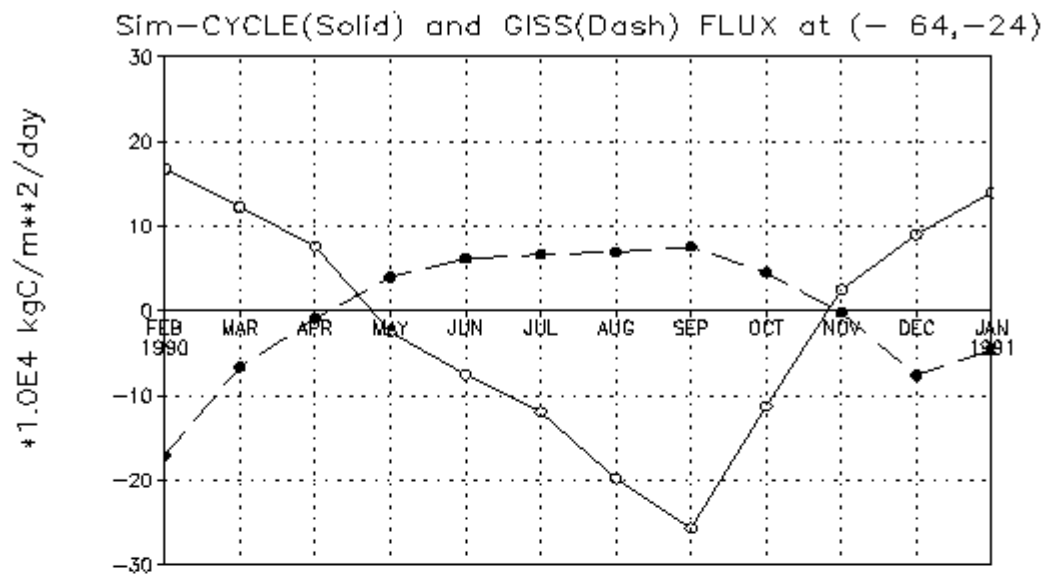


Fig.16 Seasonal change of GPP and respiration at tropical rainforest(upper) and tropical deciduous forest(lower).



GrADS: COLA/IGES

2004-04-05-11:07

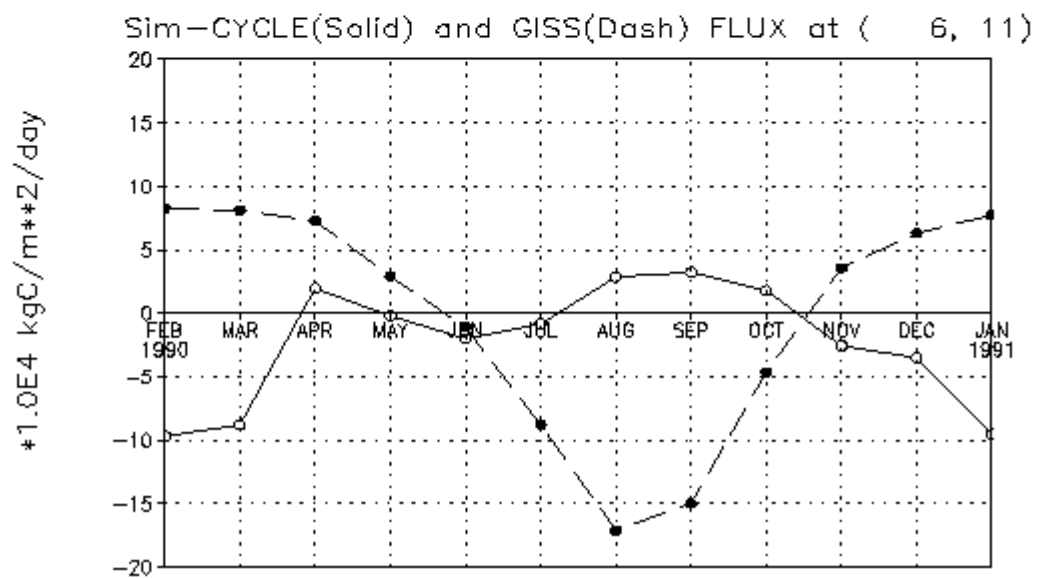


Fig.17 Seasonal change of carbon flux from woodland in South Hemisphere(upper) and savanna in North Hemisphere(lower).