

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(2)～北半球中高緯度における季節変化～

井口敬雄・木田秀次*

* 京都大学大学院理学研究科

要 旨

植生と土壌における炭素移動を計算する陸上生態系モデルと大気輸送モデルとを用い、統合的なシミュレーションを行った。陸上生態系によって放出/吸収される炭素フラックスの季節変化は特に北半球の中高緯度において大気中の二酸化炭素分布に重要な役割を果たしているが、シミュレーション結果と観測値との間には濃度の季節変化に関して幾つかの相違点が見られた。その相違点を詳しく検討し原因を調べた結果、現在の陸上生態系モデルの特徴や問題点が明らかになりモデルの再現性向上のための課題が示された。

キーワード：二酸化炭素，植生，数値モデル，陸上生態系

1. はじめに

陸上生態系（植生および土壌）は巨大な炭素の貯蔵庫であり、その増減は大気中の二酸化炭素(CO₂)濃度に大きな影響を与える。植生は大気（気象）の影響を大きく受け、また大気にもフィードバック作用を及ぼす。こうした関係を考慮しながら両者の間の炭素交換を調べ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。

井口・木田(2003)は筑波大学で開発された陸上生態系モデルSim-CYCLE(Ito and Oikawa, 2000)を用いてシミュレーションを行い、産業革命以降の人間活動による急激な大気中CO₂濃度の増加が陸上生態系に肥沃化をもたらす、海洋に匹敵する濃度上昇の緩和役を果たしていることを示唆した。

しかし植生の役割は長期的な濃度変動への影響だけではない。大気中のCO₂濃度は特に北半球中高緯度で振幅の大きな季節変動があるが（Figure 1）、これも植生活動が形成するものである。こうした大きな振動が存在する場合、例えばCO₂フラックスの年間の積分が0であっても、大気輸送との兼ね合いで年平

均して南北方向に濃度傾度を形成する場合がある(Denning *et al.*, 1995)。またCO₂濃度は放射による大気の加熱や植生の生育にも影響を及ぼす。したがって、植生モデルも年間の合計フラックスだけでなく、季節変動の振幅も正しく再現できなくてはならない。

井口・木田(2004)は大気輸送モデルとSim-CYCLEを組み合わせ大気中CO₂濃度分布のシミュレーションを行い、その季節変化に関して観測値との比較を行った。本論文では、その結果についてさらに検討を進め、北半球中高緯度におけるCO₂濃度の季節変動に関するモデル値と観測値との食い違いについて詳しく述べる。

2. 使用モデル

本研究では、3次元大気輸送モデルと陸上生態系モデル(Sim-CYCLE)という2つのグローバルモデルを用いてシミュレーションを行った。

3次元大気輸送モデル(井口・木田, 1999)は大気中におけるCO₂の濃度分布を再現する。

Sim-CYCLE(Ito and Oikawa, 2000)は植物の光合

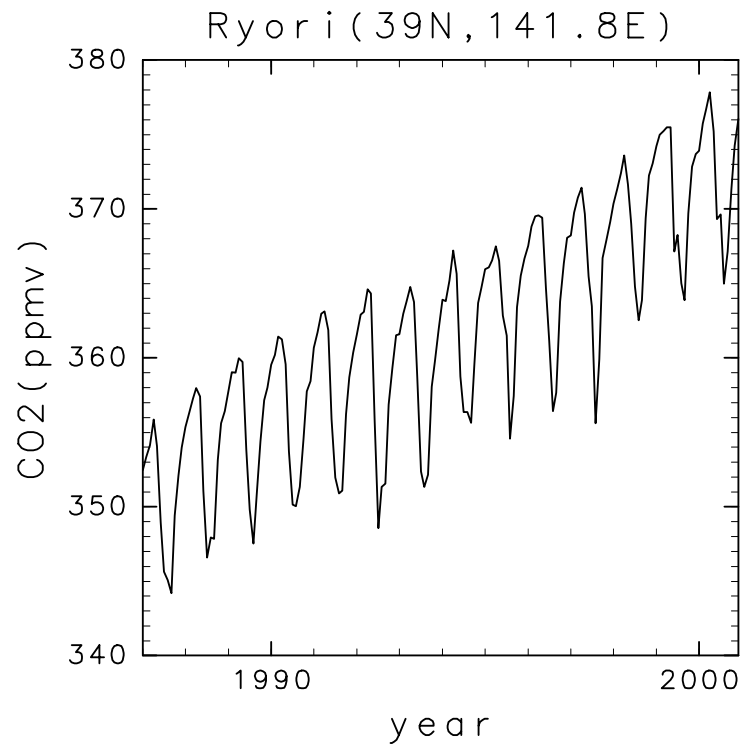


Figure 1: Long term trend and seasonal variation of CO₂ value at Ryori, Japan.

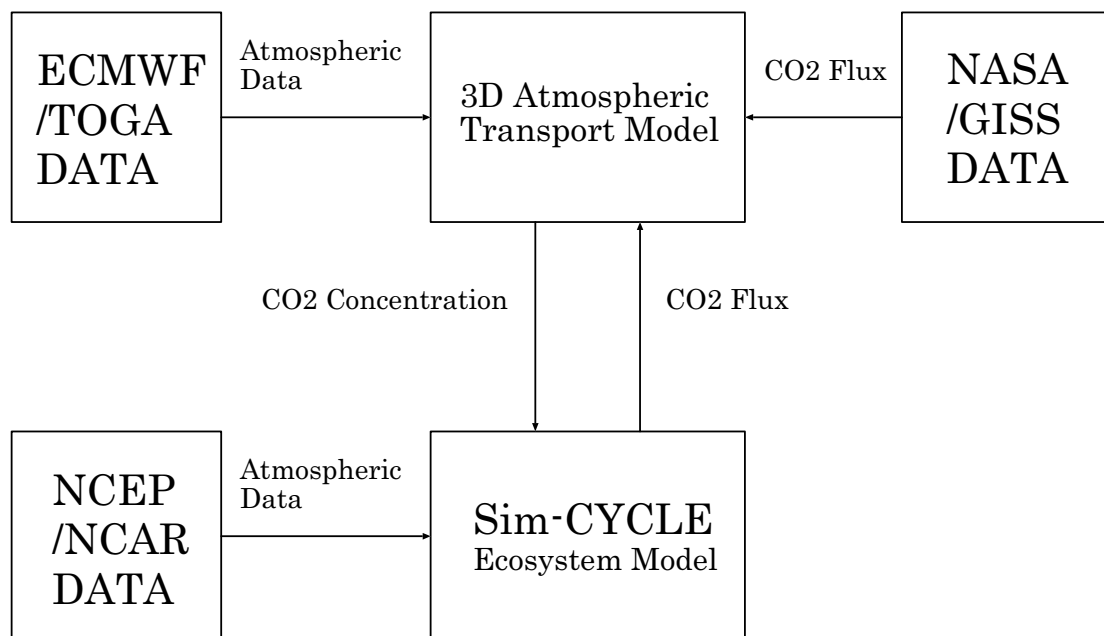


Figure 2: Construction of models and data sets for the simulation.

成・呼吸活動や土壌中での有機物分解など、陸上生態系内における炭素のダイナミクスを計算する。

今回のシミュレーションでは、Sim-CYCLEによって計算された陸上生態系からの炭素の出入りは大気へのCO₂フラックスとして大気輸送モデルに加えられる。また、大気輸送モデルで計算されたCO₂濃度分布はSim-CYCLEに反映される。

Sim-CYCLEへの入力値として必要な大気や水のデータはNCEP/NCARの再解析データを、大気輸送モデルへの入力値としての大気データはECMWF/TOGAのデータセットを用いた。また、植生以外のCO₂フラックス源（化石燃料、土地利用、海洋）についてはNASA/GISSのFungが作成したグリッドデータを用いた。

モデルおよびデータの構成はFigure 2に示す。

3. シミュレーションの概要

シミュレーションは、1990年の解析データを用いて1年分行い、その結果はWMO/WDCGGが世界各地から収集した同じ年のCO₂濃度観測値（月間値）から内挿で求めた濃度分布と比較し、検討を行った。

4. シミュレーションの結果

シミュレーションの結果については井口・木田(2004)で詳しく述べているので、本論文では簡潔に述べる。

4.1 年間平均CO₂濃度

全球的にはシミュレーションの結果は観測値に比べやや高濃度となった(Figure 3,4)。Sim-CYCLEが計算した陸上生態系による年間の吸収量は約1.4GtCであった。尚、Figure 3のヨーロッパ周辺においてモデルと観測の濃度が大きく異なるが、これについては井口・木田(2004)でも触れており、輸送モデルの鉛直解像度が粗く地表面付近の強い鉛直濃度傾度が再現できないためと思われる。

4.2 月平均CO₂濃度に見る北半球中高緯度における季節変化

月平均濃度の比較をFigure 5に示す。これを見ると、北半球の高緯度では夏季、観測値のような低い濃度までは下がらず、秋になって観測値の濃度が上昇しても暫くはそれまでの濃度を維持している。

比較材料として、Sim-CYCLEを用いず、NASA/GISSの植生起源炭素フラックスデータ(Fung et al., 1987)を用いて行ったシミュレーションの結果を

Figure 6に示す。こちらの方では初夏、観測値の濃度が下がり始める時期になってもモデル値は依然高濃度のままであり、夏季には観測値よりも低い濃度に一気に下がる。Figure 5においてSim-CYCLEと観測とで違いの大きかった秋の濃度上昇についてはモデルと観測との違いはそれほど無かった。

5. 考察

前章で紹介した北半球中高緯度におけるCO₂濃度の季節変化のモデル値と観測値の食い違いについて、詳細に調べてみた。

まず、Figure 5～6は帯状平均だったので、各観測点におけるCO₂濃度の季節変化についても比較を行ってみた。Figure 7に、(a) Ryori(39N, 141.8E), (b) Cape St. James(51.9N, 131W), (c) Alert(82.5N, 62.5W), (d) K-pushta(47N, 19.6E), (e) Kyzylcha(40.9N, 66.2E), (f) Niwot Ridge(40.1N, 105.6W),の6箇所におけるモデル値と観測値の季節変化をプロットした。この図を見ると、北太平洋や北極海沿岸の観測点（Figure 7(a)～(c)）において、夏季に観測値ほど濃度が下がらない、秋季に観測値に比べて濃度の回復が遅い、というFigure 5の帯状平均されたモデル値とほぼ同じ特徴が見られた。しかし内陸の観測点（Figure 7(d)～(f)）では位相・振幅共に上3箇所と同じ特徴は確認出来ない場合も多かった。これらの地点では周囲の植生フラックスの影響を強く受けていると考えられる。(d)においてモデルと観測の濃度が大きく異なるが、この観測点はヨーロッパに位置しており、4.1で述べた事由に該当すると考えられる。また(d)と(e)の観測値で4月から5月にかけて明確な濃度の上昇が見られるが、その要因は現在のところ不明である。

またNASA/GISSデータと大気輸送モデルを用いたシミュレーションの結果についても、同じ6つの観測点における観測値との比較をFigure 8に示す。こちらの方では観測値に比べてモデル値の方が夏季の濃度の低下が大きい。観測値が低下を始める初夏になっても濃度上昇を続け、モデル値が大きく上回るというFigure 6の特徴はやはり北太平洋や北極海沿岸の観測点（Figure 8(a)～(c)）で見られた。秋に濃度が回復する時期については大部分の観測点においてモデル値と観測値で大差が無かった。

次に、Sim-CYCLEで計算された陸上生態系から大気への炭素フラックスとNASA/GISSの植生起源炭素フラックスデータについて、緯度・季節分布をプロットした(Figure 9)。この図からも、北半球中高緯度におけるSim-CYCLEの夏季の吸収がNASA/GISSデータに比べ弱く長期間持続しているという特徴が

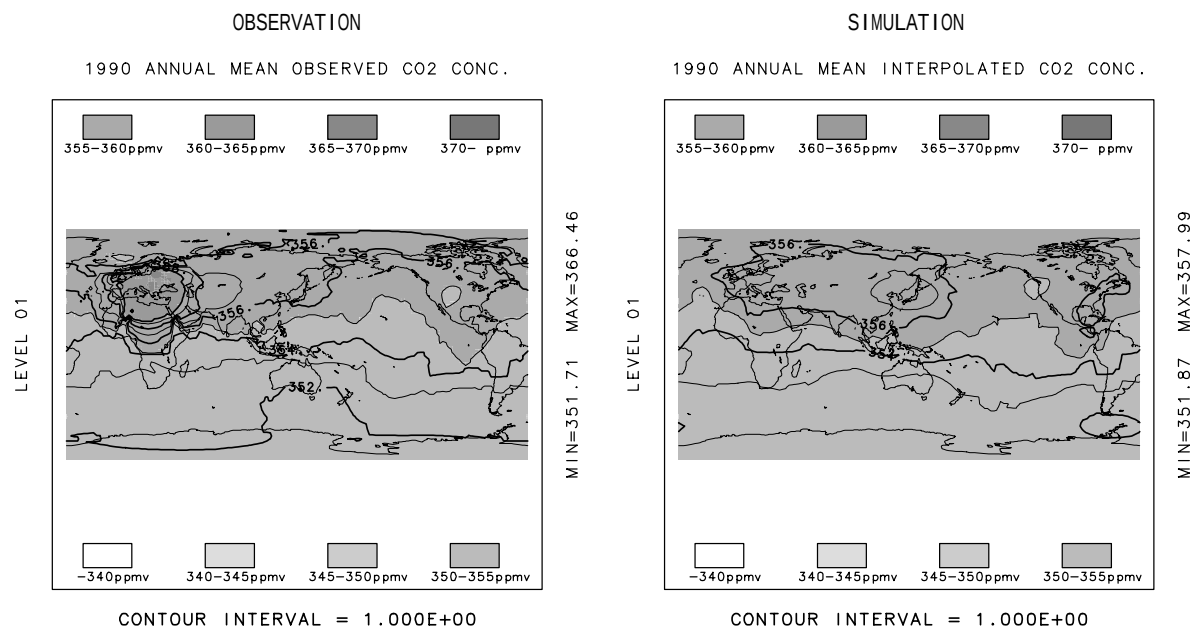


Figure 3: Annual mean CO₂ distribution interpolated from observed data (left) and simulated values at the positions of the observation stations (right).

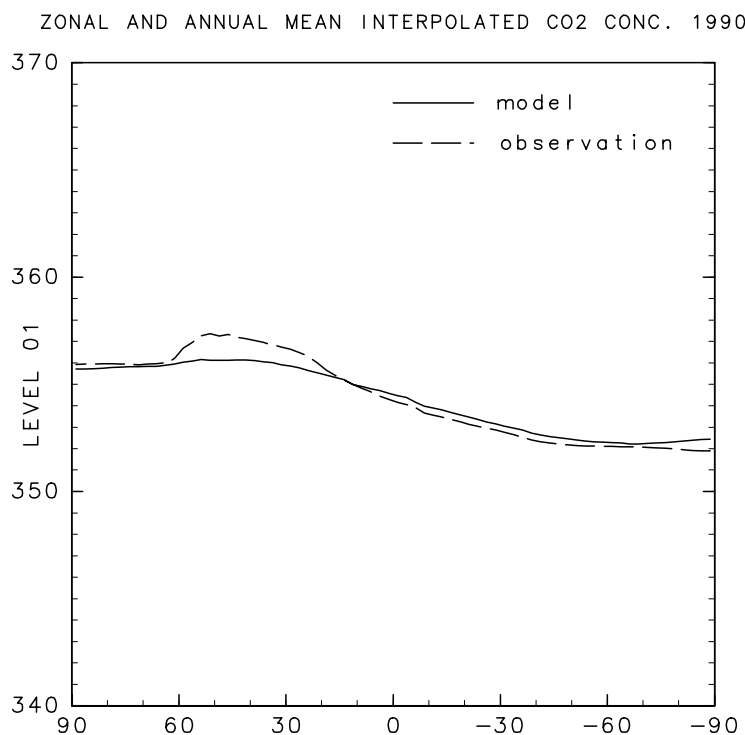


Figure 4: Zonal mean of CO₂ distribution shown in Figure 3. The solid line is simulation and the broken line is observation.

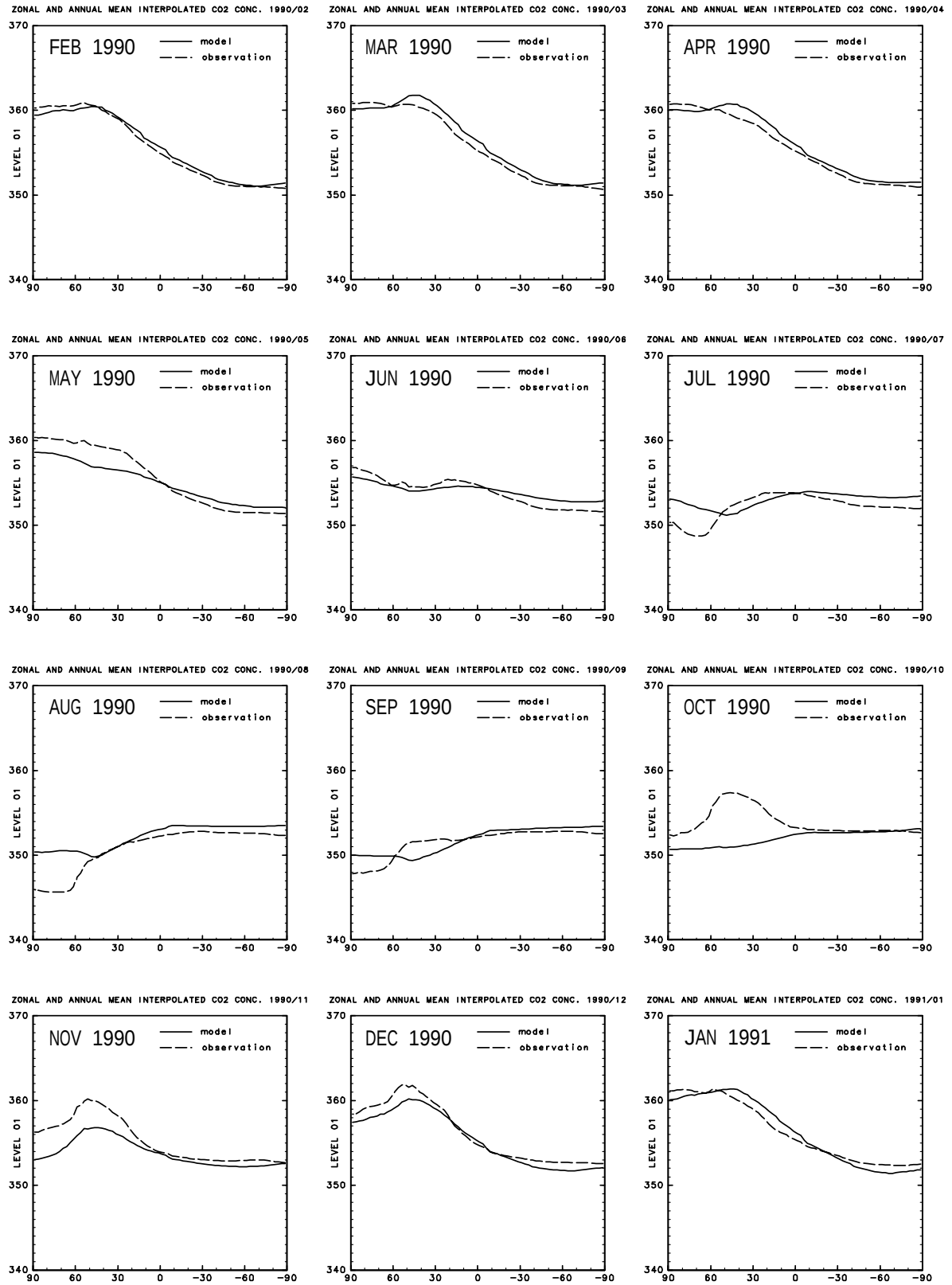


Figure 5: Monthly and zonal mean of CO₂ distributions. The solid line is result of the simulation using the combined model, and the broken line is observation.

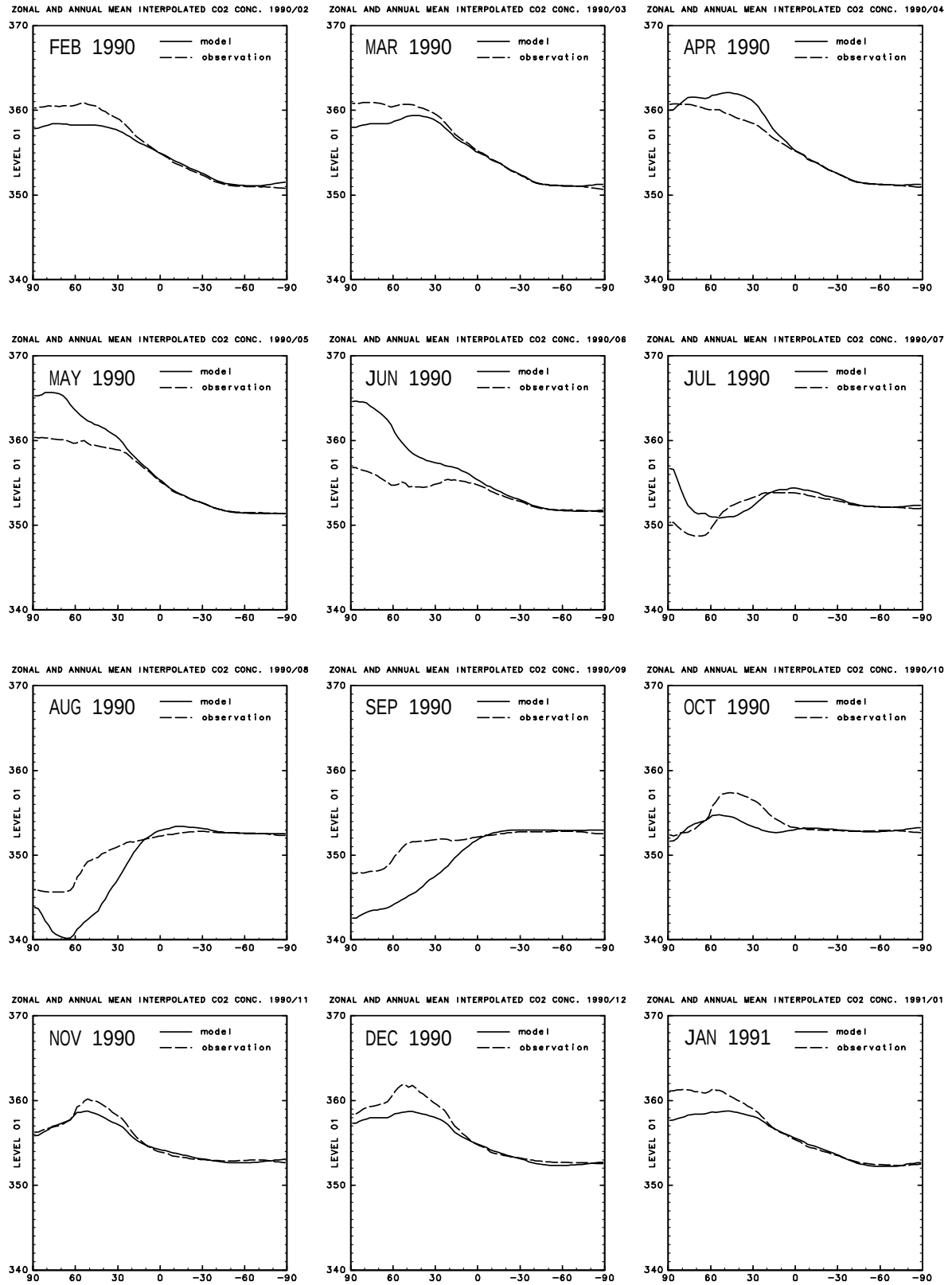


Figure 6: Monthly and zonal mean of CO₂ distributions. The solid line is result of the simulation using the transport model and NASA/GISS carbon flux data set, and the broken line is observation.

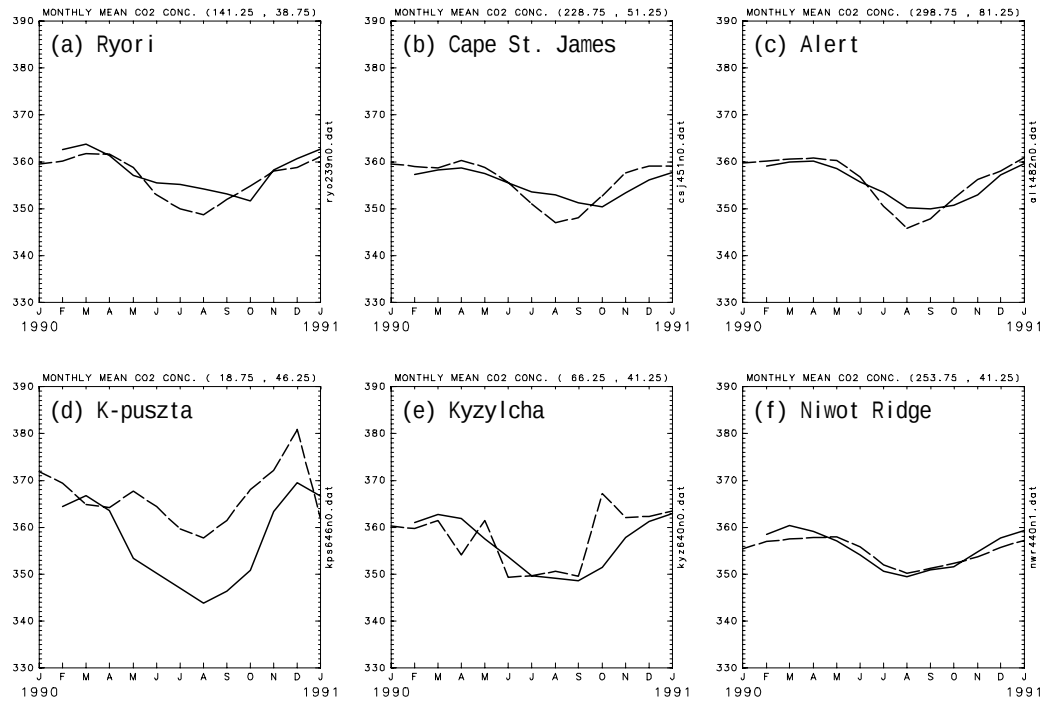


Figure 7: Monthly CO₂ values at (a) Ryori(39N, 141.8E), (b) Cape St. James(51.9N, 131W), (c) Alert(82.5N, 62.5W), (d) K-pusztta(47N, 19.6E), (e) Kyzylcha(40.9N, 66.2E), (f) Niwot Ridge(40.1N, 105.6W). The solid line is result of the simulation using the combined model, and the broken line is observation.

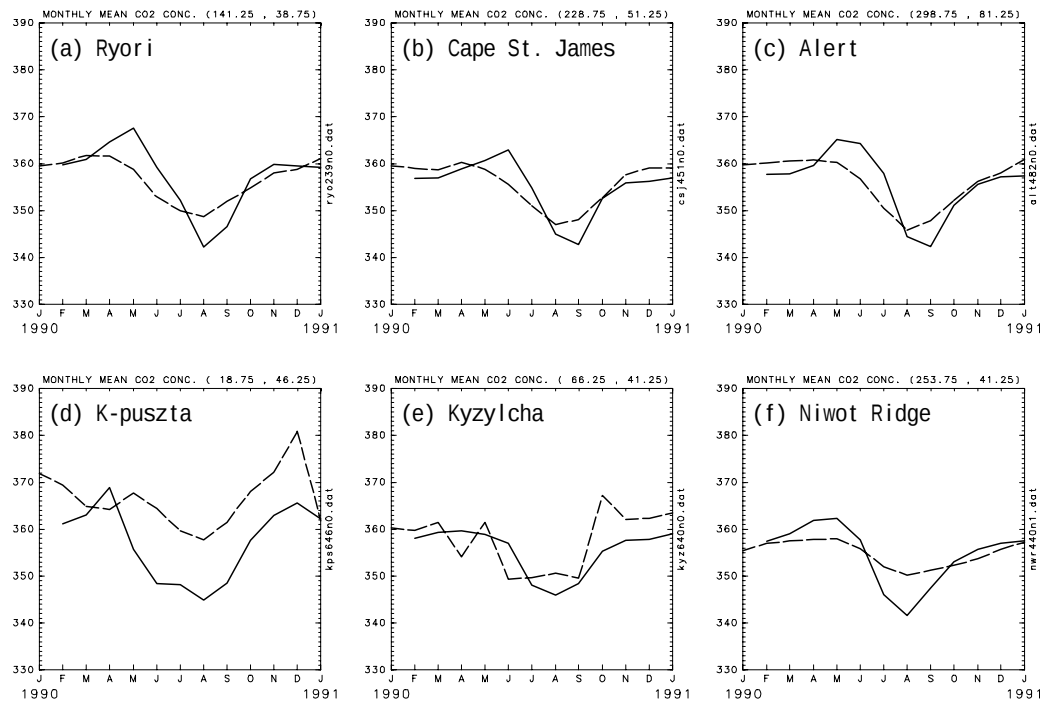


Figure 8: Monthly CO₂ values at 6 stations same as Figure 7. The solid line is result of the simulation using the transport model and NASA/GISS carbon flux data set, and the broken line is observation.

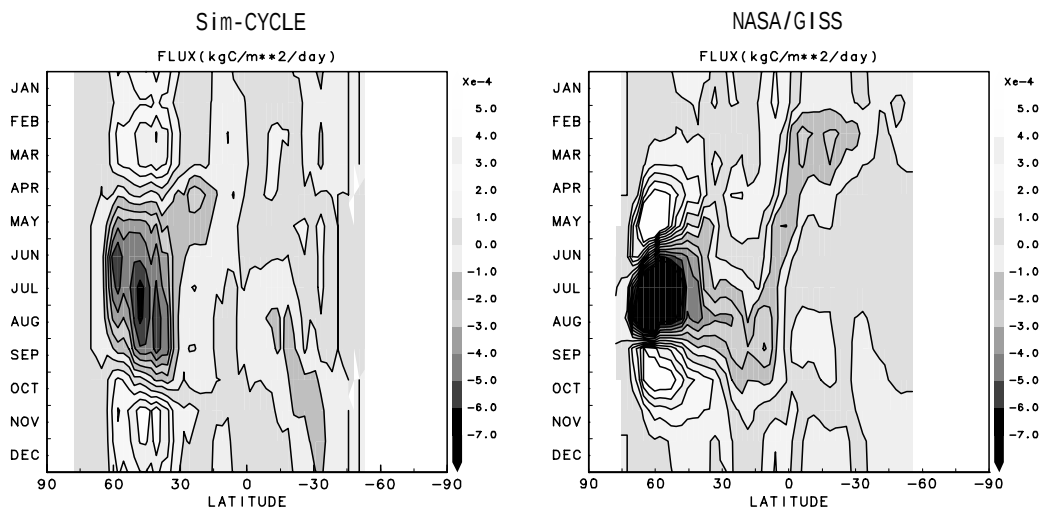


Figure 9: Latitude-month distribution of CO₂ flux. The left side is simulation by Sim-CYCLE, and the right side is NASA/GISS data set.

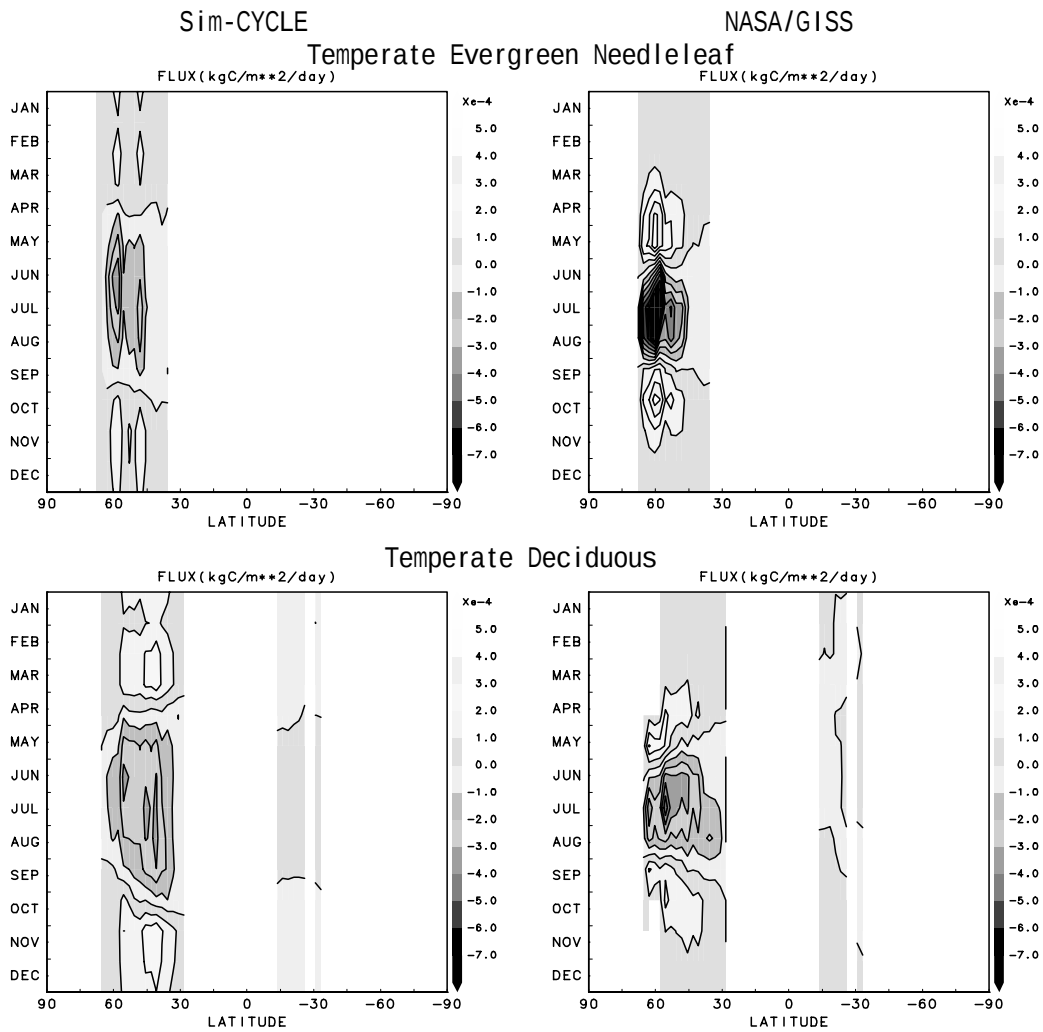


Figure 10: Components of Figure 9. The upper is Temperate evergreen needleleaf, and the lower is Temperate deciduous.

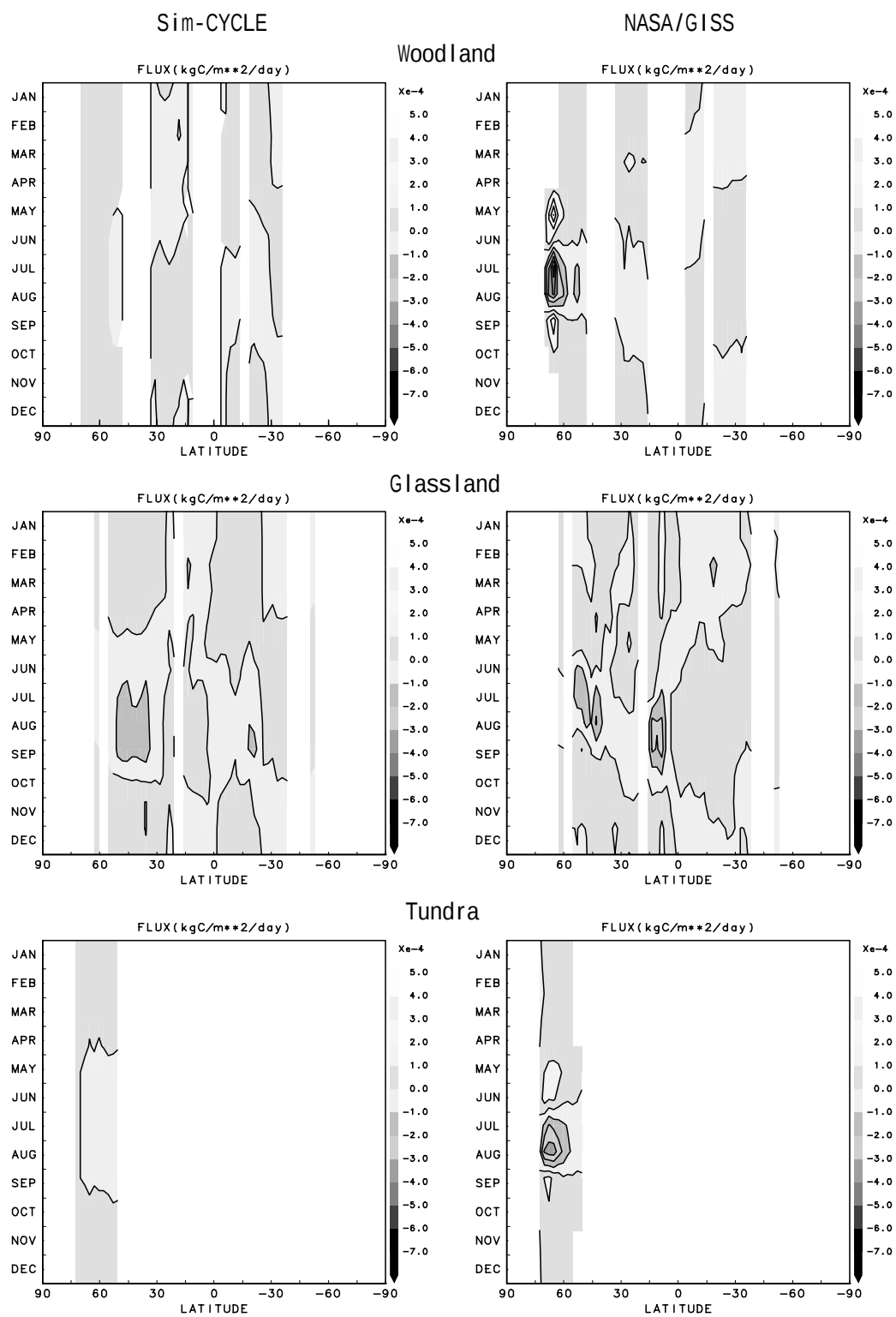


Figure 10 (continued): Components of Figure 9; woodland (upper), grassland (middle), and Tundra (lower).

分かる。これを、植種別に分けて示したのがFigure 10である。Sim-CYCLEでは1つのグリッドエリアは1つの植種しか扱っておらず、その植生マップにしたがってFigure 9からFigure 10への分解を行った。NASA/GISSのデータセットもSim-CYCLEの植生マップと同じMatthews(1983)の植生マッピングを基に作られているため、このマップに従った分解には問題はないと思われる。Figure 10を見ると、両者の間で特に針葉樹林による吸収の強さの違いが大きく、Sim-CYCLEを用いたシミュレーションで北半球中高緯度の夏季の濃度が観測値ほど低くならなかった主な要因であると思われる。吸収期間が長いという点はほとんどの植種においてみられた。また全球規模のCO₂濃度への影響は小さいが、Sim-CYCLEでは北半球高緯度における疎林、ツンドラの活動が弱いことが示された。

NASA/GISSの植生起源炭素フラックスデータは衛星リモートセンシングによる植生の活動度を基にフラックスの位相を決めており、紅葉や落葉は正確に検出されるが、光合成活動の活発化は必ずしも葉面積指数に比例して表れる訳ではない為、Figure 6のようなモデル値と観測値のずれが生じたものと考えられる。したがって、これらの特徴をあらかじめ踏まえておけば非常に有用な比較・参考データである。

以上の解析結果から、Sim-CYCLEが北半球中高緯度において現実に近いCO₂濃度の季節変化を再現するためには、陸上生態系による吸収期間を短くする事と、その短い期間により強い吸収を行う事、この2点を実現するよう改良する必要がある。今回は観測値とNASA/GISSの炭素フラックスデータを比較材料として用いたが、植生からのフラックスの実地観測も盛んに行われるようになってきているので、公開されたデータは出来るだけ利用してSim-CYCLEのフラックスの検証を行う必要がある。

6. まとめ

本研究ではSim-CYCLEが再現する北半球中高緯度におけるCO₂濃度季節変動について観測値やNASA/GISSデータとの違いを検討し、その原因を究明した。井口・木田(2004)で明らかにした熱帯雨林をはじめとする常緑樹のCO₂フラックスの問題とあわせて、モデルの課題点を明確にする事が出来た。

今後はこれらの課題を中心にSim-CYCLEの改良を行っていく。モデルの再現性が上がれば、モデルを用いた大気中CO₂のシンク/ソース分布の推定や、大気大循環モデルや陸面過程モデルとの組み合わせによる将来のCO₂濃度の推定にも応用する事が期待

できる。

謝 辞

本研究で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（現・地球フロンティア）・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/TOGAおよびNCEP/NCARの再解析データを使用させていただきました。NASA/GISS炭素フラックスデータはインターネットを通じてダウンロードし使用させていただきました。CO₂濃度の観測値としてはWMO/WDCGGが収集した月平均データを使用させていただきました。

本論文中の図の描画には地球流体電脳倶楽部の電脳ライブラリ(DCL-5.2)およびCOLA/IGESのGrADSを使用させていただきました。

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（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（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.
- 井口敬雄・木田秀次（2004）：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, 京都大学防災研究所年報, 第47号, B, pp. 349-364.
- Denning, A.S., I. Fung, and D. Randall (1995): Strong simulated meridional gradient of atmospheric CO₂ due to seasonal exchange with the terrestrial biota, *Nature*, 376, pp.240-242.
- 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*, 92, D3, pp.2999-3015.
- Itoh, A. and T. Oikawa (2000): The large carbon emission from terrestrial eCO₂systems in 1998: a model simulation, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 78, pp. 103-110.
- Matthews, E. (1983): Global vegetation and land use: New high resolution data bases for climate studies; *J. Clim. App. Meteor.*, 22, 474-487.

A study of seasonal variation of carbon flux from the biosphere using the global models (2)
: Seasonal variation at mid-high latitudes in the Northern Hemisphere

Takao IGUCHI and Hideji KIDA *

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

Synopsis

1990's atmospheric CO₂ distribution was simulated using global terrestrial ecosystem model (Sim- CYCLE) and three-dimensional transport model. The calculated CO₂ value had some discrepancies with observation as for its seasonal variation at middle and high latitudes in the Northern Hemisphere. This is due to the carbon flux computed by Sim-CYCLE, and detail analysis of the flux showed longer and weaker absorption of the model compared with real terrestrial ecosystem.

Keywords: CO₂, carbon cycle, biosphere, vegetation