

## 大気輸送モデルを用いた逆転法による 領域別地表面CO<sub>2</sub>フラックスとその年々変動の推定

井口敬雄

### 要 旨

陸上および海洋起源CO<sub>2</sub>フラックスの分布やその年々変動を調べるため、TransCom3 Layer2の逆転法を用い、自ら開発した三次元大気輸送モデルでCO<sub>2</sub>の輸送実験を行い、それぞれ11に分割された陸上と海洋の領域毎に1988～2001年のフラックスを推定した。その結果、全球規模でのフラックスの年々変動については、大気中CO<sub>2</sub>の年間残留量やTransComメンバーのモデルによる推定値と大体同じ結果が得られた。一方、陸上の領域別フラックスの年々変動については、Sim-CYCLEで求めた領域別フラックスとの間に食い違いも見られ、植生活動以外のCO<sub>2</sub>フラックスの重要性も含めて今後課題を残した。

キーワード：二酸化炭素，輸送モデル，逆転法

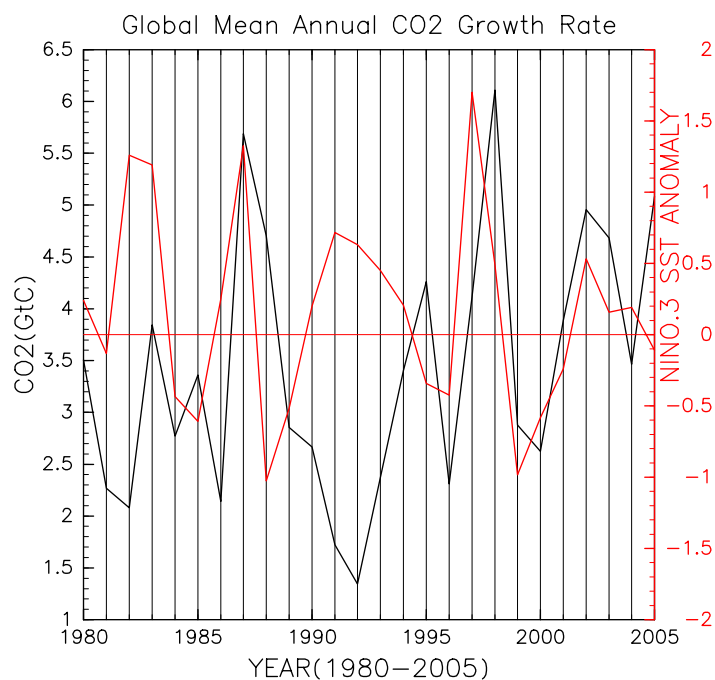
### 1. はじめに

18世紀半ばの産業革命以来、大気中における二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の濃度は増加の一途を辿っている。しかもその増加率も上昇し続けており、2000年代以降の平均は4.1GtC/年に達する(IPCC 2007)。温室効果気体であるCO<sub>2</sub>の濃度上昇は地球の気候に大きな変動をもたらす事が予想され、その具体的な影響とともに今後のCO<sub>2</sub>濃度の動向に関心が集まっている。

この大気中CO<sub>2</sub>濃度の上昇の原因が石油・石炭等の化石燃料の燃焼や森林の伐採による土地利用の変化といった人間活動によるものであることは明白であるが、こうした活動により放出されたCO<sub>2</sub>の全てが大気中に残留し蓄積されている訳ではなく、4割近い量が地表面から吸収されている事が知られている(IPCC 2007)。主な吸収源としては、海洋による吸収や、陸上生態系(植生および土壌)の炭素保有量の増加による吸収効果が考えられるが、その詳細な内訳は明らかにはなっていない。さらに、大気中のCO<sub>2</sub>濃度の年間増加率(=大気中における人為起源CO<sub>2</sub>の年間残留量)についても、大きな年々変動があることが分かっている(Conway et al. 1994)。近年の大気中CO<sub>2</sub>残留量の年々変動をFig.1(黒実線)に示す。Fig.1に見られる年々変動に比べれば化石燃料によるCO<sub>2</sub>放出の年々変動はずっと小さいと見積もられており(Marland 2007)、土地利用変化によるCO<sub>2</sub>の放出量についても化石燃料に比べ推定値の誤差は大きい

(Houghton 2003)もの人間活動であり、これほど年によって差が出ることは考えにくい。したがって、海洋あるいは陸上によるCO<sub>2</sub>の吸収量に大きな年々変動があるものと考えられる。この年々変動の詳細を明らかにする事は大気CO<sub>2</sub>収支の全体を明らかにする上で重要な課題であり、さらに将来のCO<sub>2</sub>濃度変動を予測する上でも必要であると言える。

地表面からのCO<sub>2</sub>フラックスの推定には大きく分けて二種類の手法がある。一つは、フラックスの源を直接研究してフラックスの分布や変動を研究するボトムアップ型の手法であり、もう一つは、大気中のCO<sub>2</sub>濃度や同位体比の分布を観測し、それを基に地表面からのフラックスを推定するトップダウン型の手法である。ボトムアップ型の研究には、森林や草原等の生態系の上空でCO<sub>2</sub>濃度を観測したり、海洋表層水のCO<sub>2</sub>分圧を測定したりすることによって直接フラックスを求める方法や、陸上生態系や海洋における炭素循環のメカニズムを数値モデル化してシミュレーションを行い、フラックスを推定する方法(Ito and Oikawa 2002, Cao and Prince 2002他)などがある。一方、トップダウン型の手法には、輸送モデルによるシミュレーションの結果と観測値からフラックスを逆算する逆転法(詳細は後述)(Bousquet et al. 2000, Baker et al. 2006他)や、植生や海洋による炭素同位体の分別効果を利用して大気中CO<sub>2</sub>の炭素同位体比(<sup>13</sup>C)の変動を測定する事によりCO<sub>2</sub>フラックスの起源を推定しようとする手法(Miller et al. 2003)な



**Fig. 1** Year-to-year variation of increase of CO<sub>2</sub> in the atmosphere (the black line). NOAA/ESRL data is used and converted from ppm to GtC at the rate of 1ppm=2.1GtC. The red line is year-to-year variation of annual mean NINO.3 SST anomaly, which is used as an ENSO monitoring index in Japan Meteorological Agency

どがある。いずれの手法も理論的な根拠に基づいているが同時に現実的な欠点も含んでおり、推定された大気中CO<sub>2</sub>の収支は互いに食い違いが見られる。決定的な手法が存在しない現状では、それぞれの手法の長所を認識した上で、複数の手法の結果を総合的に判断するのが妥当と考えられる。

井口・木田(2007)は陸上生態系モデルSim-CYCLE (Ito and Oikawa 2002)を用いてシミュレーションを行い、陸上生態系からのフラックスの年々変動が大気中残留CO<sub>2</sub>の年々変動と同様にENSOと高い相関関係を持つ事を示した。この結果は大気中CO<sub>2</sub>濃度の年々変動における陸上生態系の役割の重要性を示唆するものだが、陸上生態系起源のCO<sub>2</sub>フラックスはあくまでも大気中CO<sub>2</sub>収支の一部であり、その全体を明らかにするためには海洋をはじめ他の要因からのフラックスの推定が欠かせない。

井口・木田は三次元大気輸送モデルも既に開発しており、大気中におけるCO<sub>2</sub>の分布を再現する事を可能にしている。この輸送モデルを用いて逆転法によるフラックスの推定を行う事で、前述の陸上生態系モデルによる推定の結果と合わせ、大気中CO<sub>2</sub>濃度の年々変動についてより詳しい理解が得られる事が期待できる。

こうした考えの下、TransComの逆転法の手法を用

いて、1988~2001年の領域別地表面CO<sub>2</sub>フラックスの推定を試みた。本論文ではその結果について報告する。

## 2. 逆転法について

### 2.1 逆転法の概要

逆転法は、大気輸送モデルを用いてCO<sub>2</sub>の輸送シミュレーションを行い、その結果が観測値になるべく近くなるようなフラックスの分布を求める手法である。尚、地表面はあらかじめ幾つかの領域に分割されており、フラックスの推定はこの領域毎に行われる。

逆転法で行うCO<sub>2</sub>輸送シミュレーションには、事前推定フラックスによるシミュレーションと、単位フラックスによるシミュレーションがある。事前推定フラックスとは、他の何らかの方法で推定されたフラックスの分布である。一方、単位フラックスは各領域から一定期間に単位質量（例えば1ヶ月間で1GtC）放出させ、濃度分布の変化を調べるシミュレーションである。事前推定フラックスを用いて行われたシミュレーションによる結果と観測値の差が最も小さくなるようにするためのフラックス分布の修正量を、単位質量を用いたシミュレーションの結果

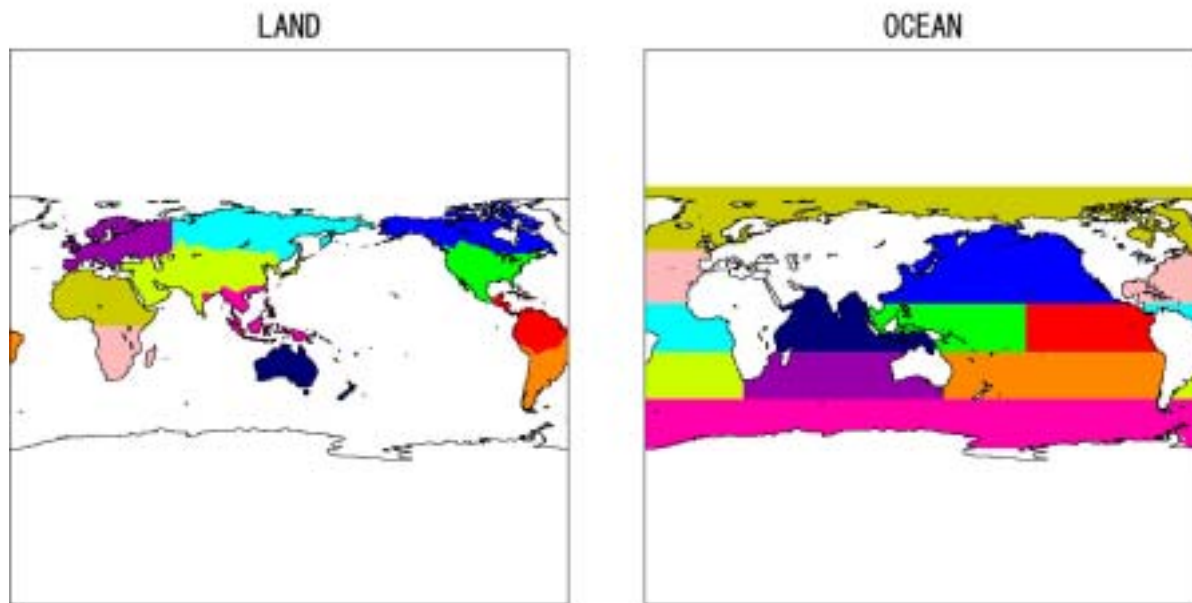


Fig. 2 Land(left) and ocean(right) regions used in TransCom3 Layer2 inversion (Baker et al. 2006).

を基に計算する。

フラックス分布には、全球合計フラックス量 (= 大気中CO<sub>2</sub>残留量) や事前推定の誤差といった束縛条件があるため、修正によって観測値と一致するようなフラックス分布が求められることはまずない。したがって、観測値と修正値との誤差の自乗和が最も小さくなるようなフラックス修正量を求める事になる。

## 2.2 TransComについて

逆転法によるフラックスの推定は従来複数の研究で行われてきたが、研究による食い違いが大きかった。これらの研究はそれぞれ異なる大気輸送モデル、CO<sub>2</sub>観測データ、逆計算モデルを使用しており、そのどれもが誤差の要因と考えられる。そこで立ち上がったのがTransComプロジェクトで、輸送モデル以外の条件を同じにしてフラックスの推定を行い、まずモデルによる誤差を検証しようというものである。

今回使用したのはTransCom3 Layer2の逆転法で、22(陸上11, 海洋11, Fig.2参照) に分割された領域毎のフラックス年々変動をもとめる事ができる。CO<sub>2</sub>輸送実験の手法、実験を行うために必要なフラックスデータ、輸送実験結果からフラックスを逆算するためのプログラム等はTransComのホームページ(<http://www.purdue.edu/transcom/>)から入手できる。TransComホームページからはまた、TransComメンバ

ーの輸送モデルを用いて求めたフラックス年々変動(1988~2001)も入手できる。本研究でも同じ1988年~2001年についてフラックスの推定を行い、これらの推定値とも比較できるようにした。

## 3. 使用したモデルおよびデータ

本研究では、以下の数値モデルとデータを使用した。

### 3.1 大気輸送モデル

大気中のCO<sub>2</sub>濃度を再現する三次元の大気輸送モデルは井口・木田が開発したものをを用いている。本モデルは大気をグリッドボックスに分割し、隣り合うボックス間のフラックスを計算する方法でトレーサーの輸送を行い、質量の保存を保証する。水平解像度は2.5°×2.5°、鉛直14層(p座標)で上部境界は10hPa、タイムステップは20分である。

### 3.2 大気再解析データ

3.1の大気輸送モデルは風速などの大気データを外部から読み込んで輸送を行う。本研究ではNCEP/NCARの1990年の再解析データを用いた。データの水平解像度は2.5°×2.5°、鉛直17層(p座標、上部境界は10hPa)および地表面データで、タイムステップは6時間である。これを輸送モデルのグリッド

とタイムステップに合わせて空間的・時間的に内挿を行って使用している。

## 4. 結果

### 4.1 全球合計フラックスの年々変動

Fig.3に、本研究における逆転法によって得られた全球合計CO<sub>2</sub>の1988～2001年の年々変動を示す。赤線は陸上からのフラックスの全球合計、青線は海洋からのフラックスの全球合計、そして黒線は全フラックスの全球合計である。

全球合計CO<sub>2</sub>フラックス (Fig.3の黒線) の年々変動は、TransComメンバーのモデルの結果と比較して全体的に大きな違いは無かった。フラックスを求めた期間 (1988～2001年) における最大フラックスと最小フラックスの差は約3.5GtC/yrで、Fig.1に示した同期間の大気中CO<sub>2</sub>年間残留量の最大値と最小値の差 (約4.5GtC/yr) と比較すると小さいが、これはTransComメンバーの結果でも同様である。他の目立った点としては、1988年のフラックスが他モデルでは放出になっているのに本モデルでは弱い吸収になっている事、2000年のフラックスが他モデルでは前後の年より低くなっているのに本モデルではやや高くなっている事が挙げられる。

陸上 (Fig.3の赤線) と海洋 (同青線) の全球フラックスを見てみると、他モデルと比較して陸上フラックスは高目、海洋フラックスは低目の結果が出た。しかし年々変動成分については全体的に他モデルとよく似た結果が出た。部分的には、陸上全球フラックスについて、1988-1989年のフラックスの減少が小さい、2000年のフラックスが前後の年よりもはっきりと高くなっているという点で、前述の全球合計フラックス (黒線) の年々変動に関する特徴は陸上全球フラックスに起因している事が分かる。また、1992年のフラックスが前後の年より高くなっている点も他のモデルと異なる点である。Fig.4にSim-CYCLEでのシミュレーションによって求めた全球合計陸上生態系起源CO<sub>2</sub>フラックスの同期間の年々変動を示すが、上記の3点については今回の自モデルを用いた逆転法の結果と異なり、TransComの他モデルの結果と同じであった。海洋全球フラックスについては陸上ほどの特徴的な点は見られなかった。

### 4.2 陸上領域別フラックスの年々変動

次に、陸上領域別のCO<sub>2</sub>フラックスの年々変動をFig.5に示す。

他モデルの結果との比較で目に付いたのは熱帯アメリカ (南米大陸北部の熱帯地方を主とした領域) におけるフラックスで、他モデルの半数以上で期間

を通し最も高いかまたはそれに準ずるフラックス量が推定され、CO<sub>2</sub>の放出源とされたのに対し、本モデルでは全陸上領域の中間くらいに位置し、年間フラックス量も0前後を変動している。但し他モデルの中にも同様な結果が出たものもある。

その他の領域では、北半球中高緯度の領域ではモデル間の違いが小さく、逆に熱帯や南半球の領域ではモデル間の違いが大きいという傾向が見られた。Schimel他(2001)は、1990年代に北半球温帯域の陸上生態系が吸収に転じたとしているが、本モデルも含め、TransComの多くのモデルによる逆転法の結果において、北米大陸温帯域とヨーロッパ領域が期間を通して吸収となっており、これに合致している。尚、フラックスの年々変動についてはモデルによる差が大きく、共通した性質は見出せなかった。

さらに、Sim-CYCLEによるフラックスで得られた領域別生態系起源CO<sub>2</sub>フラックスの年々変動をFig.6に示す。Fig.6では熱帯アメリカは放出源となっており、これはTransComメンバーの逆転法の結果と同じである。一方、アフリカ北部が最も強い吸収源となっているが、逆転法でこのような結果が出たのは少数 (2例) である。また、ヨーロッパは弱いながらも吸収源となっていたが、北米大陸温帯は1999～2000年に吸収となっているがそれ以外は吸収源とも放出源ともいえない。

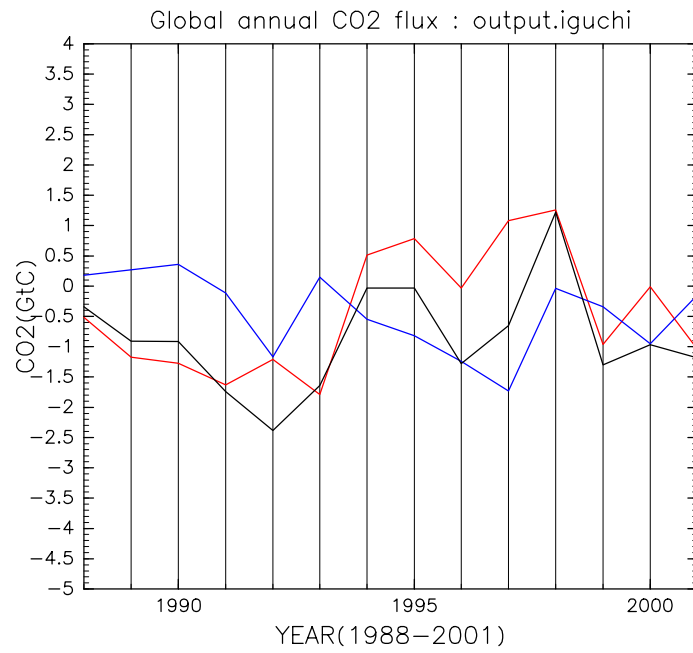
### 4.3 海洋領域別フラックスの年々変動

海洋領域別フラックスの年々変動をFig.7に示す。海洋の場合は陸上に比べ領域によるフラックス量の違いも少なく、また年々変動の振幅も小さい。これは他モデルによる結果でも同様である。

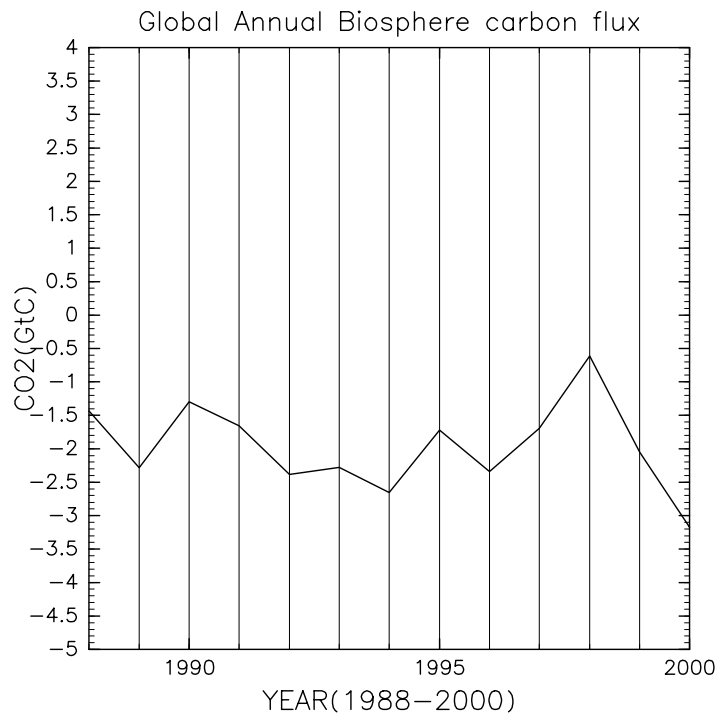
この中で注目すべきは南大洋がCO<sub>2</sub>フラックスの放出源とされている点で、本モデルの他、TransComメンバーの逆転法の結果にも共通していた。元来南半球の海洋はCO<sub>2</sub>の主要な吸収源と考えられてきた (Tans et al. 1990) が、他の南半球の海洋フラックス (これはモデルによって結果が異なる) を合わせても南半球中高緯度の海洋による吸収は僅かという事になる。これは最近の海洋表層水のCO<sub>2</sub>分圧測定によるフラックス推定値とも隔たりがあり、CO<sub>2</sub>収支を考える上で大きな問題となっている (中澤他 2006)。

## 5. 議論

自ら開発した大気輸送モデルを用いた逆転法の結果は、同じ手法を用いてTransComメンバーが行った逆転法の結果やSim-CYCLEを用いて行ったシミュレーションの結果 (Fig.4, Fig.6)、さらに大気中CO<sub>2</sub>年間残留量 (Fig.1) と比較して様々な共通点や食い違う点



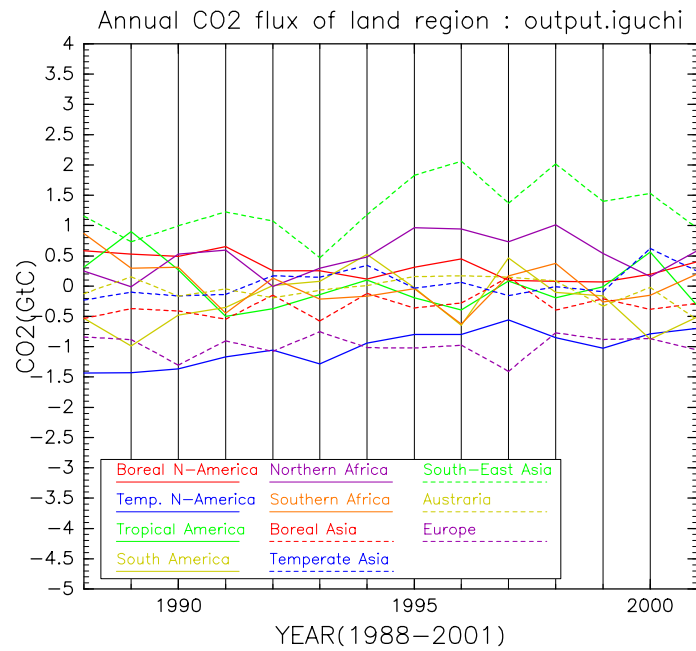
**Fig. 3** Year-to-year variation of global CO<sub>2</sub> fluxes estimated by synthesis inversion using our transport model. The red, blue, and black lines are fluxes of land, ocean, and total respectively.



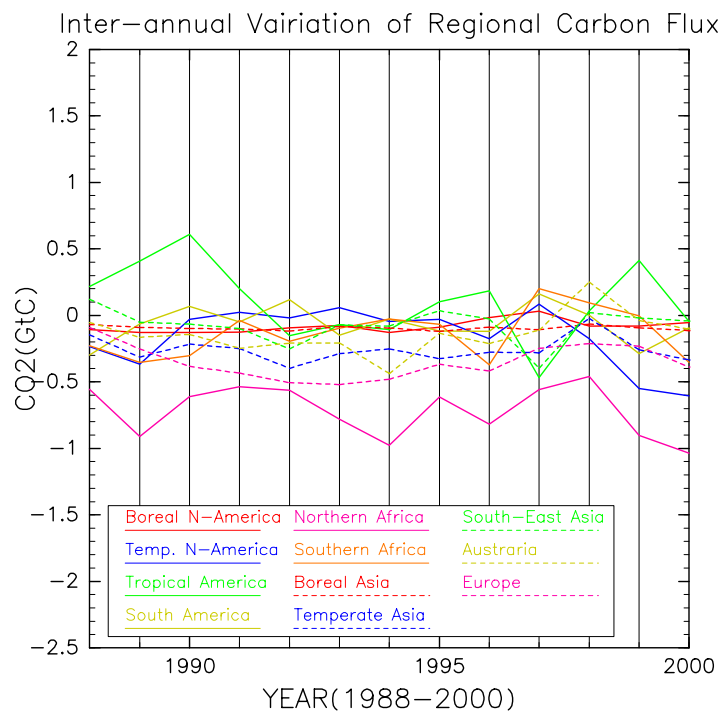
**Fig. 4** Year-to-year variation of global CO<sub>2</sub> flux from terrestrial ecosystems calculated by Sim-CYCLE.

が確認された。食い違いの原因には様々な要因が考えられ、現時点では特定するには至っていない。

まず、全球合計したフラックスの強さと年々変動が他モデルと同様な結果を示したという事は輸送モ



**Fig. 5** Year-to-year variation of regional land CO<sub>2</sub> fluxes estimated by synthesis inversion using our transport model.



**Fig. 6** Year-to-year variation of regional CO<sub>2</sub> fluxes from terrestrial ecosystems calculated by Sim-CYCLE.

デルによるCO<sub>2</sub>濃度分布の再現が概ね妥当であったと考えられる。しかし、陸上合計フラックスと海洋

合計フラックス、さらに領域別フラックスと細分化していくと、モデルによる結果の違いが顕著になっ

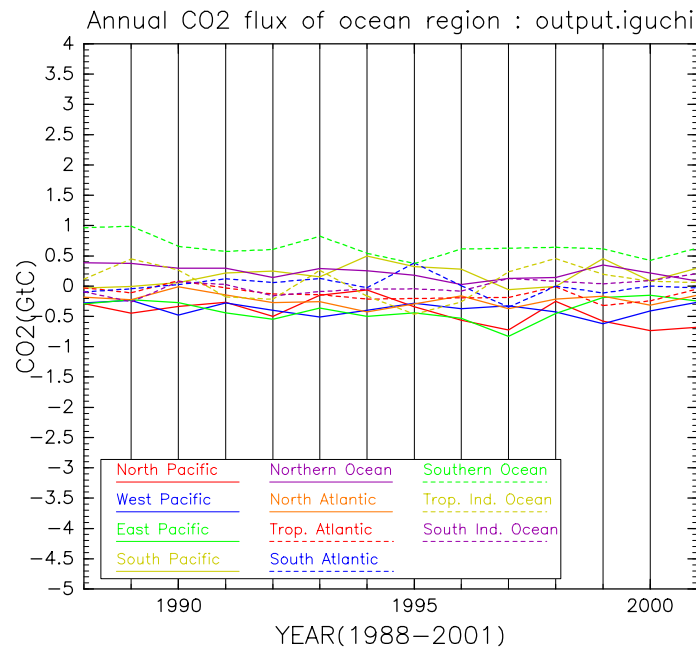


Fig. 7 Year-to-year variation of regional ocean CO<sub>2</sub> fluxes estimated by synthesis inversion using our transport model.

た。同じ手法を用いているのだから誤差の原因は基本的にモデルに起因する事になる。本研究の結果では他モデルと比較して陸上合計フラックスが高く、海洋合計フラックスが低くなる傾向が見られたが、その原因としては(i)モデル最下層(中緯度で1.5km程度)全体を混合層として扱っている、(ii)拡散係数が適切でない、が考えられる。この点についてはさらに十分に検討した上でモデルの改良を進めていきたい。またモデルの違いだけでなく、TransCom Layer2実験では大気データを統一していないという事情もある。本研究ではNCEP /NCARの1990年の大気データを使用したが、異なる年のデータを用いれば結果も異なってくると考えられる。さらに観測点の数や密度が十分でないこともモデル間の誤差を大きくしている要因と思われる。全球規模フラックスでは小さかったモデル間の誤差が、領域別に細分化するほど大きくなった事や、観測点が密な北半球中高緯度でモデル間の誤差が比較的少なく疎な領域で大きいのはその表れと言える。

海洋合計フラックスの年々変動が推定できた事は全球規模での大気中CO<sub>2</sub>収支を考える上で重要である。全球合計フラックスの年々変動が陸上合計フラックスの年々変動に近いという点では他モデルの結果と合っているし、Sim-CYCLEを用いて行ったシミュレーションの結果とも合致する。しかし、海洋合計フラックスの年々変動も陸上のそれと比較して

無視できない大きさであることが示された。特に、全球合計フラックスが極小値となる1992年や極大値となる1998年は陸上合計フラックスの変動と同等以上に海洋合計フラックスの変動が寄与している事が示された。この点については海洋フラックスのさらなる研究による確認が必要と言える。

大気中CO<sub>2</sub>残留量の年々変動(Fig.1)との違いについては 推定のために使用しているCO<sub>2</sub>観測データの違いなどが原因として考えられる。

陸上合計フラックスの年々変動がSim-CYCLEの全球合計フラックスと一致しない理由には、植生の有機物生成・分解活動によるCO<sub>2</sub>フラックス以外も含まれる事が考えられる。Patra(2005)は火災によるCO<sub>2</sub>フラックスの重要性を指摘しているが、火災はエル・ニーニョの年は発生件数が増えるなど年々変動が大きく、今後十分考慮していく必要がある。また、Sim-CYCLEについても現在は土壌水分への依存性が無い為、干ばつの年において水ストレスによるCO<sub>2</sub>放出の増加を十分再現できていないといった問題点も残っている。

## 6. 結論

大気輸送モデルを用いた逆転法により、全球規模のCO<sub>2</sub>フラックスの年々変動を推定する事が出来た。この結果は大気中CO<sub>2</sub>残留量の見積りや陸上生態系



モデルによるシミュレーション結果と合わせ、全球規模の大気中CO<sub>2</sub>収支を解明する上で役立つ物であることが分かった。しかし領域別フラックスの年々変動の推定についてはまだモデル間の誤差が大きいということが示された。

今後はこうした結果と現状を踏まえ、他の輸送モデルを用いた結果や他の手法によるCO<sub>2</sub>収支に関する推定とも比較を行いつつ、総合的に検討する事によって逆転法の推定値をCO<sub>2</sub>収支の解明に役立てていきたい。

## 謝 辞

本研究におけるTransCom3 Layer2実験の手法と他モデルによる逆転法結果などのデータはTransCom Home Pageにて公開されているものをダウンロードし使用させていただきました。

大気輸送モデルの入力値として使用した再解析気候データはNCEP/NCAR Re-analysis Data Setをインターネットを通じて取得し使用させていただきました。

本論文において比較資料として使用したシミュレーション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・及川武久氏が開発したものを提供していただき独自の変更を加えたものです。

大気中におけるCO<sub>2</sub>残留量の年々変動のデータは米国海洋大気庁地球システム調査研究所地球監視部(NOAA/GMD)が作成しホームページで公開しているものを使用させていただきました。

ENSO監視指数は気象庁がホームページで公開しているデータを使用させていただきました。

本論文で使用した図は、地球電腦倶楽部の電腦ライブラリを使用して作成しました。

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 (2007): 数値モデルを用いた大気 - 陸上生態系間炭素フラックスの年々変動のシミュレーション, 京都大学防災研究所年報, 第50号.

中澤高次郎(2006): 第7回二酸化炭素国際会議報告, 天気, 53, pp.153-158.

Baker, D. F., et al. (2006): TransCom 3 inversion intercomparison: Impact of transport model errors on the interannual variability of regional CO<sub>2</sub> fluxes, 1998-2003, Global Biogeochemical Cycles, Vol. 20,

GB1002, doi:10.29/2004GB002439.

Bousquet, P. et al. (2000): Regional changes in carbon dioxide fluxes of land and oceans since 1980, Science, Vol. 290, pp. 1342-1346.

Cao, M. and Prince, S. D. (2002): Increasing terrestrial carbon uptake from the 1980s to the 1990s with changes in climate and atmospheric CO<sub>2</sub>, Global Biogeochemical Cycles, Vol. 16, No. 4, 1069, doi:10.1029/2001GB001553.

Conway, T. J. et al. (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, No. D11, pp.22831-22855.

Houghton, R. A. (2003): Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850-2000, Tellus, 55B, pp.378-390.

IPCC (2007): CLIMATE CHANGE 2007 THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Cambridge University Press.

Ito, A., and Oikawa, T. (2002): A simulation model of the carbon cycle in land ecosystem (Sim-CYCLE): A description based on dry-matter production theory and plot-scale validation, Ecological Modelling, 151, pp.143-176.

Marland, G., Boden, T. A., and Andres, R. J. (2007): Fossil fuel CO<sub>2</sub> emission data is available at CDIAC home page, [http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/em\\_cont.htm](http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/em_cont.htm).

Miller, J. B. et al. (2003), The atmospheric signal of terrestrial carbon isotopic discrimination and its implication for partitioning carbon fluxes, Tellus, 55B, pp. 197-206.

Patra, P. K. et al. (2005): Role of biomass burning and climate anomalies for land-atmosphere carbon fluxes based on inverse modeling of atmospheric CO<sub>2</sub>, Global Biogeochemical Cycles, Vol. 19, GB3005, doi:10.1029/2004GB002258.

Schimel, D. S. et al. (2001): Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems, Nature, 414, pp.169-172, doi:10.1038/35102500.

Tans, P. P., I. Y. Fung and T. Takahashi (1990): Observational Constraints on the global atmospheric CO<sub>2</sub> budget, Science, Vol.247, pp.1431-1438.



# **Estimation of Year-to-year Variation of Regional CO<sub>2</sub> Fluxes by Synthesis Inversion Using Atmospheric Transport Model**

Takao IGUCHI

## **Synopsis**

By TransCom3 Layer2 synthesis inversion method using originally developed three-dimensional atmospheric transport model, CO<sub>2</sub> fluxes from 11 land regions and 11 ocean regions for the period of 1988-2001 are estimated. As a result, year-to-year variation of global total flux was similar to that of TransCom members' results and increase of atmospheric CO<sub>2</sub>. On the other hand, year-to-year variation of CO<sub>2</sub> fluxes from land regions have some discrepancies with those calculated by terrestrial ecosystem model (Sim-CYCLE). These discrepancies may involve both problems of inversion method and importance of CO<sub>2</sub> sources other than photosynthesis.

**Keywords:** carbon dioxide, transport model, inversion problem