

大気輸送モデルを用いた逆転法により推定された 二酸化炭素フラックスの近年の動向

井口敬雄

要 旨

TransCom3 Layer2の逆転法の手法を用い、最新のGLOBALVIEW観測値から新たに作成したデータを入力値として1979年から2008年までの地表面CO₂フラックスの変動を推定した。その結果、陸上よりも海洋からのフラックスの増加が大きいことが示された。陸上からのフラックスの増加は化石燃料燃焼によるCO₂放出量の増加が占める割合が多いと思われ、陸上生態系からのフラックス増加は小さいかむしろ減少している可能性もある。また海洋からのフラックスは中高緯度の海域からのフラックスが増加傾向で特に太平洋北部と大西洋北部の増加率が高かった。その一方、熱帯など低緯度海域のフラックスは弱い減少傾向との結果が出た。

キーワード：二酸化炭素，逆転法，炭素収支

1. はじめに

大気中における二酸化炭素(CO₂)濃度の増加は主として化石燃料の燃焼によるものであるが、1990年から2005年の間、化石燃料の燃焼によって放出されたCO₂の内大気中に蓄積されたのは約半分と見られている(IPCC 2007) (Fig. 1)。その残りは海洋あるいは陸上生態系によって吸収されていると考えられる。

しかしこれらの吸収源については、その能力が将来にわたって維持できるかどうか疑問視する向きがある。Quéré et al. (2007) は従来CO₂の主要な吸収源と思われていた南大洋の実際の吸収量が当初の推定値よりもずっと小さく、さらに近年減少傾向である事を示してこの海域におけるCO₂が飽和状態に近づきつつある可能性を示唆した。また、Schiermeier (2005) は、樹木に長期間にわたって高濃度のCO₂を与え続けてもバイオマス増加の明確な促進は見られなかったという実験結果を紹介している。この実験については議論の余地があるとされているが、今後温暖化の傾向が進めば呼吸による陸上生態系からのCO₂放出速度の上昇は確実なので、陸上生態系全体としてのCO₂吸収力が弱まりさらには放出源に転じる事は十分考えられる。今世紀に入り、化石燃料の燃焼によるCO₂の放出量は新興国の排出量増大によると見られる増加率の上昇 (Fig. 1) を見せており、さらに海洋や陸上生態系の吸収力の低下が起きれば今

後の大気中CO₂濃度の変動に加速度的な上昇をもたらす可能性がある。

井口 (2008) はCO₂観測データと大気輸送モデルを用いた逆転法により、地表面におけるCO₂フラックス分布の年々変動を2001年まで推定した。本研究では最新のCO₂観測データを用いて逆転法によるCO₂フラックスの推定を行い、今世紀に入ってから領域別CO₂フラックスの長期的傾向について検証を行った。

2. 逆転法について

逆転法とは、輸送モデルが再現するCO₂濃度分布と実際に観測されたCO₂濃度より、地表面からのフラックスを推定する手法である。

本研究では、TransCom3 Layer2で用いられた逆転法の手法を用いて、領域別地表面CO₂フラックスの年々変動を求めた。

TransComプロジェクトは、出来る限り統一された手法を用いて複数の輸送モデルによるCO₂フラックスの推定を行い、結果を比較する事によって輸送モデルに起因する誤差の分散を求めるものである。TransCom3 Layer2実験では、陸上と海洋それぞれを11に分割した領域(Fig. 2)についてCO₂フラックスを月単位で求め、領域別フラックスの長期変動を調べる事が出来る (Gurney et al., 2004; Baker et al., 2006)。

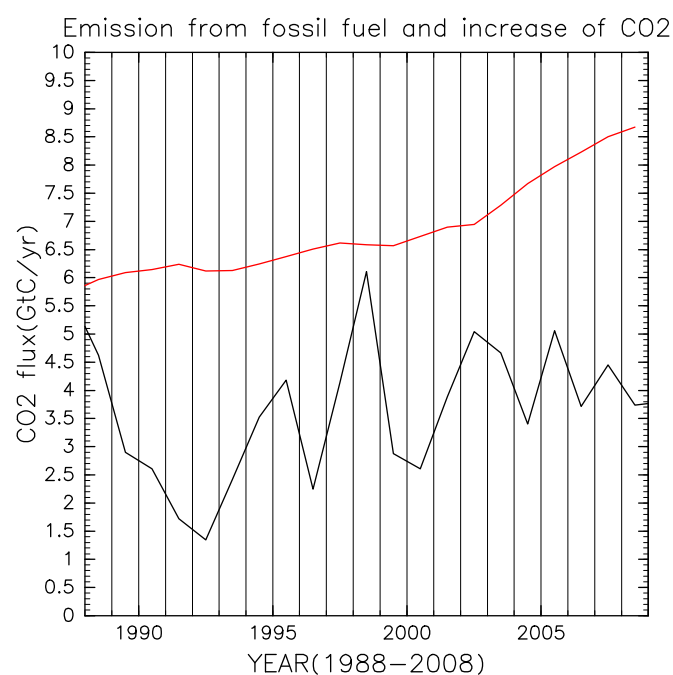


Fig. 1 CDIAC (Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Department of Energy) data of annual CO₂ emission from fossil fuel consumption (Marland et al. 2009) (the red line) and NOAA/ESRL (National Oceanic & Atmosphere Administration / Earth System Research Laboratory) data of annual increase of atmospheric CO₂ (Conway and Tans 2009) (the black line). As for NOAA/ESRL data, CO₂ concentration data was converted by the rate of 1ppm=2.1GtC.

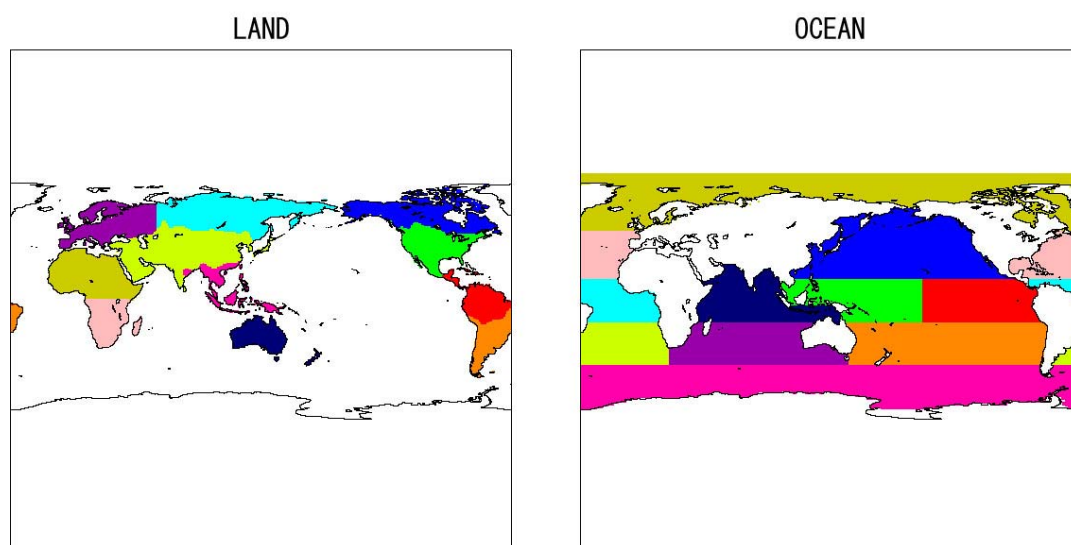


Fig. 2 TransCom3 Layer2 region map of land (left) and ocean (right).

TransCom3 Layer2の手法や必要なデータ、プログラムはTransComホームページ (TransCom 2007) より入手する事が出来る。

TransCom3 Layer2では、(1)予め別の方法によって推定されたCO₂フラックス分布(事前推定)のデータを用いた輸送実験、(2)各領域から単位時間に単位量のCO₂を放出させる輸送実験、の2種類のシミュレーションを行う。その結果から、CO₂のフラックス分布とそれが大気中に作る濃度分布は線形であるとの仮定の下に、モデルの濃度分布と観測値の自乗誤差が最小となるようなCO₂フラックス分布を逆解析によって求める。

CO₂輸送実験を行うための大気輸送モデルには、井口・木田(1999)が開発した三次元の大気輸送モデルを用いた。本モデルは全球のCO₂質量を保存しつつ、大気中の濃度分布を再現する。

3. GLOBALVIEWデータ

2章で述べたTransComのホームページでは、逆転法に必要なCO₂観測データも入手可能である。しかし現在入手できるデータには2001年までの観測値しかなく、今世紀に入って以降のフラックス変動の推定には用いる事が出来ない。そこで、新たにデータを作成する事にした。

使用したデータはNOAA/ESRL (National Oceanic & Atmosphere Administration / Earth System Research Laboratory) (2009) のGLOBALVIEW CO₂データである。本データはモデル研究での使用を目的としたものであり、実際の観測値に対して平滑化などの処理を行っている。実際の観測値は誤差が含まれており、その誤差がたとえば逆転法ではフラックスの推定値に大きな影響を及ぼしてしまうためである。データのタイムステップは年間48ステップで、4ステップ毎に平均して月間値とした。また、観測点についてはTransComホームページで配布しているデータと比較して廃止や追加があるが、なるべく同じ観測点を使用することとし、183地点のデータを使用して逆転法に必要な入力データを作成した。

4. 結果と考察

第2章で説明した手法および第3章で説明したデータを用いて、1988～2008年の21年間についてフラックスの年々変動の推定を行った。その結果について以下に示す。

まず、陸上全体、海洋全体および全球合計したフラックスの年々変動についてFig.3に示す。それぞれのフラックスについて期間内の長期トレンドを

Table 1に示した。Table 1によると、陸上よりも海洋からのフラックスの増加が大きい事が分かる。ここで注意しなければならないのは、2001年以降の陸上フラックスには化石燃料からのCO₂放出量の増加分が含まれているということである。化石燃料からのCO₂放出量は他のCO₂フラックスに比べ高い精度で見積もられており (Marland et al. 2009) , TransComの逆転法ではその事前推定値にファクターを掛けることにより陸上フラックスの年々変動に化石燃料起源のフラックスが含まれるのを抑制していた。本研究ではそのファクターを2000年以降は一定値としている。これは、新興国における化石燃料消費量が大きく増加した事により、近年の化石燃料起源CO₂フラックスの分布が事前推定値(1995年のものを使用)に単純なファクターを掛けただけでは得られなくなっていると思われる事と、報告義務のある先進国に比べて比較的分かりにくい新興国からの化石燃料起源CO₂フラックスの伸びが逆転法によって検出されるかどうか確認したいという二つの理由がある。したがって、陸上からのCO₂フラックスが化石燃料起源フラックスの増加を含んでいる事を考慮に入れば、陸上生態系による吸収量の低下はさらに小さく、逆に増加している可能性もある。

次に、陸上の領域別CO₂フラックスの年々変動をFig. 4に、各領域の長期トレンドをTable 2に示した。Table 2によると、熱帯アメリカ、温帯アジア、熱帯アジアで高い増加率を示した。前述の通り陸上からのフラックスには今世紀に入ってから化石燃料起源CO₂フラックスの増加が含まれており、ブラジルが含まれる熱帯アメリカや、インドと中国が含まれる温帯アジアでフラックスが増加している事はこれらの国で化石燃料消費によるCO₂放出量が増加していると見られている事と一致する。また熱帯アジアの領域は中国とインドに近接しており、その影響を受けている可能性がある。但し、熱帯アメリカは森林伐採、熱帯アジアは森林火災によるCO₂放出も大きいと思われ、更に詳細な検討が必要である。それ以外の領域では、アフリカ南部でやや上向きのトレンドが見られた以外はフラックスの目立った増加は無い、むしろ減少(つまり吸収量の増加)が見られた。この点から見ても、全球的には陸上生態系の吸収量は衰えておらず、むしろCO₂濃度増加に反応して増加している可能性がある。

陸上と同様に海洋領域のフラックス変動と長期トレンドをFig. 5とTable 3に示した。Table 3によると、北半球中高緯度の太平洋と大西洋でフラックスが増大しているという結果が出た。これらの海域は従来CO₂の吸収源と考えられており、今回の結果は吸収力の低下の可能性を示唆している。一方、Quére et al.

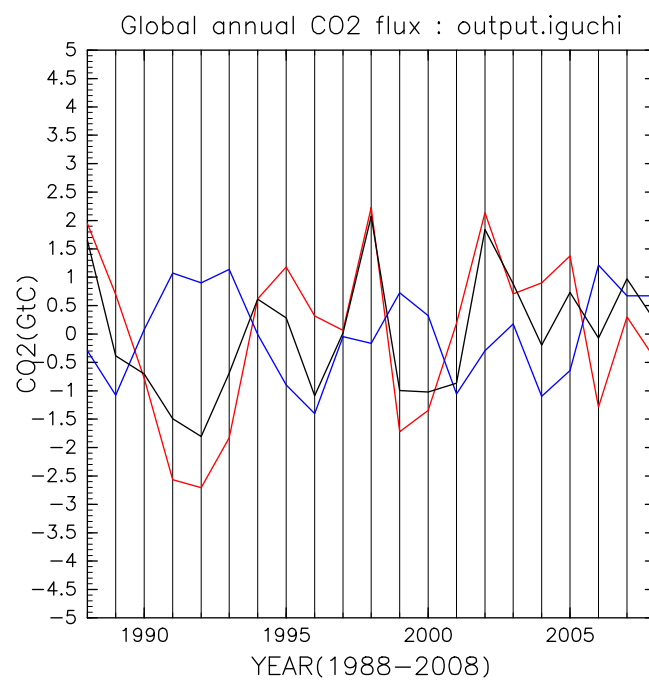


Fig. 3 Interannual variation of annual CO₂ flux from land (the red line), ocean (the blue line) and total globe (the black line) estimated by TransCom synthesis inversion method.

Table 1 Long term trend of global CO₂ fluxes shown in Fig. 3 for the period of 1988-2008.

	Long-term trend (GtC/yr**2)
Total Land	0.011
Total Ocean	0.048
Total Globe	0.037

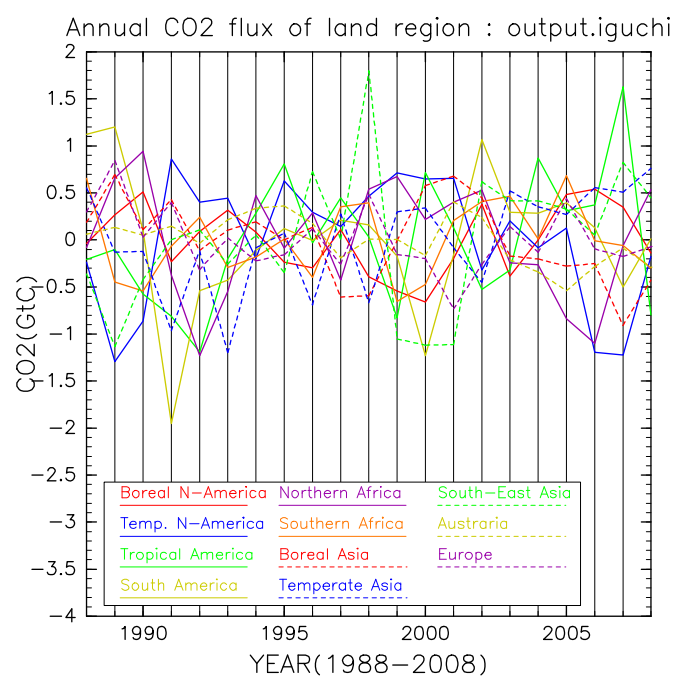


Fig. 4 Interannual variation of annual regional land CO₂ flux estimated by TransCom synthesis inversion method.

Table 2 Long term trend of regional land CO₂ fluxes shown in Fig. 4 for the period of 1988-2008.

Region	Long-term trend	Region	Long-term trend
Boreal North America	0.001	Boreal Asia	-0.033
Temperate North America	-0.013	Temperate Asia	0.043
Tropical America	0.041	South East Asia	0.042
Temperate South America	0.0	Australia	-0.023
North Africa	-0.013	Europe	-0.019
South Africa	0.010		

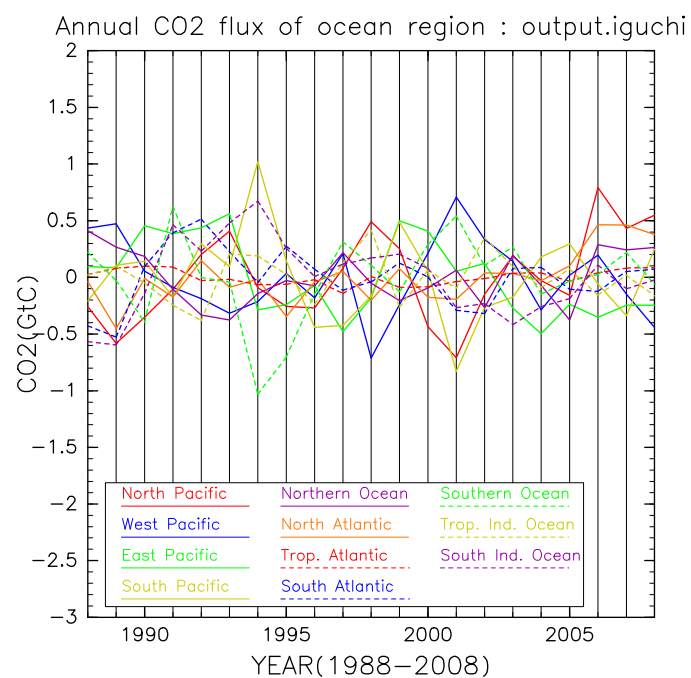


Fig. 5 Interannual variation of annual regional ocean CO₂ flux estimated by TransCom synthesis inversion method.

Table 3 Long term trend of regional ocean CO₂ fluxes shown in Fig. 5 for the period of 1988-2008.

Region	Long-term trend	Region	Long-term trend
North Pacific	0.028	Tropical Pacific	0.0
West Tropical Pacific	-0.008	South Pacific	-0.001
East Tropical Pacific	-0.030	Southern Ocean	0.010
South Pacific	-0.008	Tropical Indian Ocean	0.001
Arctic Ocean	0.001	South Indian Ocean	-0.007
North Pacific	0.024		

(2007) でCO₂飽和の可能性が指摘された南大洋は確かに長期的な正のトレンドを示したが、その値は前述の二つの領域よりは小さかった。また海水の減少が懸念されている北極海では目立ったフラックスの長期トレンドは見られなかった。その一方で、熱帯太平洋東部のようにフラックスが高い負のトレンドを見せた海域もあった。この海域は通常ペルー沖の湧昇流によるCO₂の放出源として知られているが、頻発するエルニーニョによって湧昇流が減少し、CO₂放出量が低下した可能性がある。その他、赤道を含む海域で弱いフラックスの長期的減少が見られた。大気中CO₂濃度の上昇による分圧差の減少が理由として考えられるが、さらなる調査が必要である。

5. まとめ

最新のGLOBALVIEWデータを用いて1979～2008年の期間について逆転法によるCO₂フラックス分布の推定を行った結果、海洋からの放出の増加が陸上からの放出の増加を大きく上回っているという結果が出た。陸上で放出量が増加した領域は化石燃料の燃焼による放出の増加の可能性が高い領域であり、それ以外では微増あるいは減少していた。したがって陸上生態系による大気中CO₂の吸収力は衰えておらず、むしろ高まった可能性もあるが、詳細は陸上の他のフラックス要因も含めて総合的に調べる必要がある。海洋については中高緯度の海域からのCO₂放出が増加しており、特に北半球での増加率が高かった。一方、熱帯を含む低緯度海域からの放出量はやや減少しているという結果となった。

謝 辞

本研究で用いた逆転法の手法に関するプロトコル、データ、解析プログラムはTransComホームページより取得いたしました。逆転法で用いた最新のCO₂観測値データはNOAA/ESRL GLOBALVIEWホームページより取得いたしました。本論文のFig. 1で用いた化石燃料起源CO₂フラックスのデータはCDIACホームページより、大気中CO₂年間残留量データはNOAA/ESRS Global Monitoring Divisionホームページより取得いたしました。逆転法における大気輸送モデルを用いたCO₂輸送実験は京都大学学術情報メディアセンター（全国共同利用）のスーパーコンピューターを使用して行いました。以上の機関に謝意を表します。

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, 防災研究所年報, 第42号B-1, pp. 385-396.
- 井口 敬雄 (2008) : 大気輸送モデルを用いた逆転法による領域別CO₂フラックスとその年々変動の推定, 防災研究所年報, 第51号B, pp. 399-407.
- Baker, D. F., Law, R. M., Gurney, K. R., Rayner, P., Peylin, P., Denning, A. S., Bousquet, P., Bruhwiler, L., Chen, Y.-H., Ciais, P., Fung, I. Y., Heimann, M., John, J., Maki, T., Maksyutov, S., Masarie, K., Prather, M., Pak, B., Taguchi, S. and Zhu, Z. (2006): TransCom 3 inversion intercomparison: Impact of transport model errors on the interannual variability of regional CO₂ fluxes, 1998-2003, *Global Biogeochemical Cycles*, Vol. 20, GB1002, doi:10.29/2004GB002439.
- Conway, T. and P. Tans (2009), Trends in Atmospheric Carbon Dioxide – Global, www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends.
- Gurney, K. R., Law, R. M., Denning, A. S., Rayner, P. J., Pak, B. C., Baker, D. F., Bousquet, P., Bruhwiler, L., Chen, Y.-H., Ciais, P., Fung, I. Y., Heimann, M., John, J., Maki, T., Maksyutov, S., Peylin, P., Prather, M. and Taguchi, S. (2004): TransCom3 inversion intercomparison: Model mean results for the estimation of seasonal carbon sources and sinks, *Global Biogeochemical Cycles*, Vol. 18, GB1010, doi:10.1029/2003GB002111.
- IPCC (2007): Climate change 2007 – The physical science basis, Cambridge University Press, US.
- Marland, G., Boden, T. A. and Andres, R. J. (2009): Global, Regional, and National Fossil Fuel CO₂ Emissions, in Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn.
- NOAA/ESRL (2009): GLOBALVIEW, <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/globalview/index.html>
- Quéré, C. L., Rödenbeck, C., Buitenhuis, E. T., Conway, T. J., Langenfelds, R., Gomez, A., Labuschagne, C., Ramonet, M., Nakazawa, T., Metzl, N., Gillett, N. and Heimann, M. (2007): Saturation of the Southern Ocean CO₂ sink due to recent climate change, *Science*, Vol. 316, DOI: 10.1126/science.1136188, pp. 1735-1738.
- Schiermeier, Q. (2005): Trees don't suck up carbon dioxide as hoped, *Nature News*, Vol.2, doi:10.1038/news050822-7/25.
- TransCom (2007): The TransCom Experiment, <http://www.purdue.edu/transcom/index.php>

Recent Trend of Global and Regional Carbon Dioxide Fluxes Estimated by Synthesis Inversion Method using Atmospheric Transport Model

Takao IGUCHI

Synopsis

To estimate recent trend of global and regional annual surface CO₂ fluxes, TransCom3 Layer2 synthesis inversion method was implemented using three-dimensional atmospheric transport model for the period of 1979-2008. For this study, input observational data was revised from GLOBALVIEW CO₂ data set. The result showed that increase ratio of total ocean CO₂ flux was larger than that of total land CO₂ flux. The increasing ratio of land CO₂ flux includes the increasing ratio of emission from fossil fuel, so the increasing ratio of CO₂ flux from terrestrial ecosystem was smaller and maybe minus value. The CO₂ flux from ocean increased at mid and high latitude areas, especially at North Pacific and North Atlantic. On the other hand, the CO₂ fluxes from tropical and low latitude ocean regions slightly decreased.

Keywords: co2, carbon dioxide, carbon budget, inversion method