

推定された全球および領域別CO₂フラックスの10年規模トレンド

井口敬雄

要 旨

TransComの逆転法により1988-2008年における地表面からのCO₂フラックスの分布とその年々変動を推定し、その結果について全期間および1988-1998年と1998-2008年におけるフラックスの長期トレンドを調べた。その結果、全球規模で見ると、過去20年間では海洋起源フラックスの増加率が陸上生態系起源フラックスの増加率を上回っていたが、有意なトレンドは見られなかった。陸上領域別では有意な正または負のトレンドが見られ、化石燃料消費や植生量の増加等が原因として考えられる。海洋領域別では、北半球高緯度におけるフラックスの増加率が高かった。火災によるフラックスについては、放出量そのものは寄与が大きい事が分かったが、長期トレンドや年々変動についてはそれほど大きな影響を与えるものではなかった。

キーワード: CO₂, 二酸化炭素, 逆転法, 生態系, 海洋, 火災

1. はじめに

代表的な温室効果気体であるCO₂は今後の大気中濃度の動向が注目されているが、その予測をより正確に行うには、大気中の収支の詳細な実態とメカニズムを明らかにしていく必要がある。

大気中のCO₂濃度分布から地表面フラックスを逆算する逆転法は、大気中CO₂収支解明の重要なアプローチの一つである。Bousquet et al. (2000) は陸上を11、海洋を8の領域に分割し、1980年から1998年までの各領域のCO₂フラックスの年々変動を求めた。一方、TransComプロジェクト(Baker et al. 2004, Gurney et al. 2004) は陸上と海洋をそれぞれ11の領域に分割し、複数の輸送モデルを用いて1988年から2001年までの領域別フラックスの変動を推定し、モデル間の誤差も含めたフラックスの解析を行った。

一方、大気中CO₂の収支そのものも時間と共に変化していく。まず、人間が化石燃料を燃焼させることによるCO₂放出量は増加の一途である(Conway and Tans 2009)(Fig. 1)。これは、新興国の経済発展による消費量の増加が原因である(Marland et al. 2009)。また、大気中CO₂の主たる吸収源として考えられてきた海洋については、これまでの吸収量の推定が低く修正されたり(Quere et al. 2007)、将来的な飽和による吸収量の低下の可能性が指摘されたりしている。さらに、もう一つの主要な吸収源である陸上生態系について

も、温暖化による呼吸活動の活発化が光合成の活発化を上回り、全体としての吸収量の低下や放出源への転化の可能性が指摘されている。その他、世界各地で多発する大規模な森林火災からのCO₂放出の重要性も指摘されるようになった(Werf et al. 2004)。今後はこうしたフラックスの変動や新しい知見も考慮に入れて大気中CO₂の収支の解明を行っていかねなければならない。

本研究では、TransCom 3の逆転法を用いて1998年から2008年までの領域別CO₂フラックスの推定を行い、その結果から1998-2008年、1988-1998年および1998-2008年の長期トレンドを求め、フラックスの長期変動について検討を行った。また、ORNL DAACデータを用いて火災起源CO₂フラックスの大気中CO₂収支に対する寄与についても調べた。

2. TransCom逆転法

逆転法とは、①予め別の方法で推定されたフラックスデータおよび②各領域からの単位フラックスを用いて大気輸送モデルによるシミュレーションを行い、その結果から、観測点におけるモデル値が観測値に尤も近くなるようなフラックス分布を逆算で求める手法である。ここでは、フラックスが作る濃度分布について重ね合わせの原理が成り立つものと仮定している。

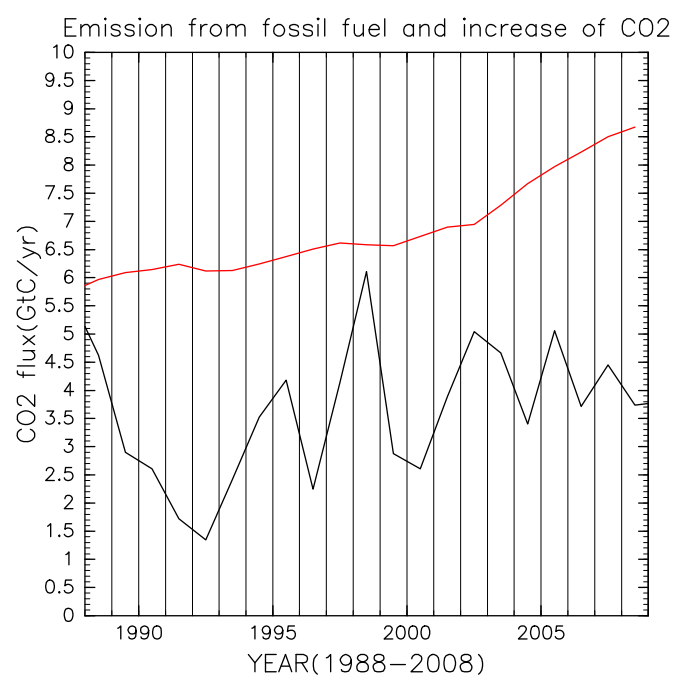


Fig. 1 CDIAC (Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Department of Energy) data of annual CO₂ emission from fossil fuel consumption (Marland et al. 2009) (the red line) and NOAA/ESRL (National Oceanic & Atmosphere Administration / Earth System Research Laboratory) 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.

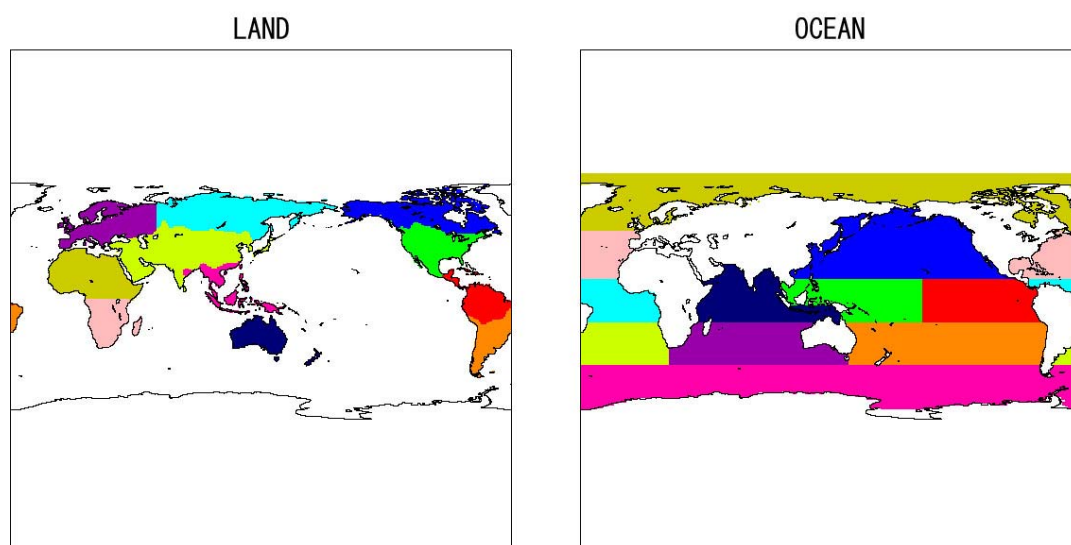


Fig. 2 TransCom3 Layer2 region map of land (left) and ocean (right).

TransComは、逆転法において輸送モデルの違いに起因する誤差の大きさを調べるため、フラックスデータや輸送実験方法など出来るだけ同じ条件の下で異なる複数の輸送モデルでフラックスの推定を行うというプロジェクトである。TransCom3 Layer2では、陸上と海洋をそれぞれ11の領域に分割し、各領域からのCO₂フラックスを求めた。Fig. 2に、領域の分割を示す。

TransComで用いられたフラックスデータや実験手順、逆算プログラムはホームページで公開されている(TransCom, 2007)。本研究では、TransCom3 Layer2の手法により、井口・木田(1999)が開発した3次元大気輸送モデルを用いて輸送実験を行い、フラックスの推定を行った。ただし、2002年以降は、化石燃料フラックスの増加分の影響を確認するため、事前推定フラックスにおける化石燃料フラックスは2001年のままである。したがって、2002年以降のフラックス推定値は化石燃料燃焼によるフラックスの増加量を含んでいる。

3. GLOBALVIEW CO₂データ

2章で述べた通り、逆転法においては観測データが不可欠である。TransComのホームページで配布されているデータは2001年までしかないので、新たにNOAA/ESRL (National Oceanic & Atmosphere Administration / Earth System Research Laboratory)

(2009)のGLOBALVIEWデータを用いて作成した。

GLOBALVIEWデータは、世界各地の定点観測値および航空機や船舶による定期観測値が集められているが、モデル研究を用途としたデータセットであり、実際の観測値ではなく時間的・空間的に平滑化された値となっている。

本データを使用するに当たっては、TransComホームページで提供されているデータになるべく近くなるように観測点(183地点)を選別し、それらの観測点におけるデータから月平均値を求め、逆算プログラムに用いる入力データファイルを作成した。

4. GFED 火災起源CO₂フラックスデータ

森林火災からのCO₂フラックスのデータとして、Oak Ridge National Laboratory (ORNL) Distributed Active Archive Center (DAAC)のGlobal Fire Emissions Database (GFED) Ver. 2.1データセットを用いた。このデータは、衛星データから判別した火災面積と生態系モデル(CASA)から焼失したバイオマス量を推定し、さらにCO₂フラックス量を求めたものである(Van der Werf et al., 2006)。解像度は1°

×1°、月間値で期間は1997-2005年である。

5. 結果

以下に、逆転法によるフラックスの推定値とその解析の結果を示す。

5.1 全球規模フラックス

Fig. 3に、陸上合計、海洋合計および全球合計フラックスのアノマリを示す。この結果について、1988-2008年、1988-1998年および1998-2008年のトレンドとその有意性のt検定値を求めた(Table 1)。

Table 1によると、1988-2008年の全期間では海洋からのフラックスの方が増加率が高かった。また1988-1998年の期間では陸上はやや減少傾向で海洋は高い増加率、1998-2008年の期間では一転して陸上が高い増加率、海洋が低い増加率という結果が出た。しかしt検定による有意性は低く、海洋からのフラックスが増加傾向にあるという事が最も確からしいがそれすら統計的に有意とはいえない。また、2章で述べたように、2002年以降の陸上からのフラックスに化石燃料起源フラックスの増加分が含まれていることを考えると、生態系からのフラックスが明確に増加傾向であるとは言えず、むしろ吸収を強めている可能性すらある。

5.2 陸上領域別フラックス

Fig. 4に、陸上領域別フラックスのアノマリを、Table 2にTable 1と同様の長期トレンドを示す。

Table 2によると、陸上領域別フラックスの長期トレンドは全球フラックスに比べ、有意性の高いものが多い。特に高いのが、1998-2008年のアジア中部からのフラックスのトレンドである。この領域は中国やインドといった新興国が含まれており、こうした国々からの化石燃料起源のフラックスの増加がこの結果に表れているとも考えられる。また、南米熱帯と東南アジアでは増加傾向であるが、土地利用による森林伐採の影響が考えられる。ただしどちらも1998-2008年の期間では増加率が低くなっている。

また、北米寒帯では1988-1998年は減少で1998-2008年は増加、北米温帯はちょうどその逆、アジア北部は1988-2008年で減少、アフリカ北部は1998-2008年で減少といったトレンドが見られる。これらについては気候変動に伴う植生活動の長期的な変動や、森林の再生、温暖化による植生面積の増加などが考えられる。

5.3 海洋領域別フラックス

陸上と同様に、海洋領域別CO₂フラックスについ

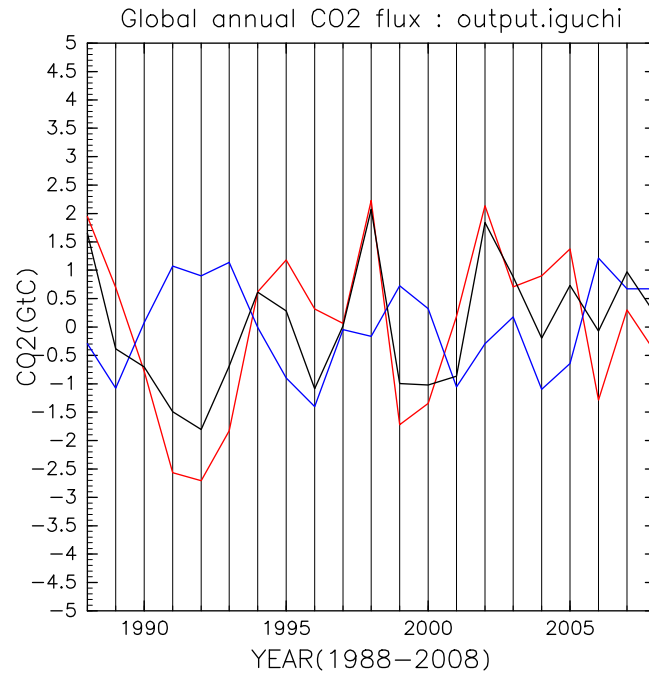


Fig. 3 Interannual variation of annual CO₂ flux from land (the red line), ocean (the blue line) and total globe (the black line) estimated by TransCom synthesis inversion method.

Table 1 Long term trends of global CO₂ fluxes shown in Fig. 3. Unit of the trends is GtC/yr. Lower values in round brackets are t-value. A trend is significant if $|t| \geq 2.09$ (for 10-year trend, $|t| \geq 2.26$).

	1988-2008	1988-1998	1998-2008
Total Globe	0.037 (0.68)	0.118 (0.71)	-0.036 (-0.26)
Total Land	0.011 (0.37)	-0.041 (-0.48)	0.060 (0.82)
Total Ocean	0.048 (1.23)	0.077 (0.64)	0.024 (0.23)

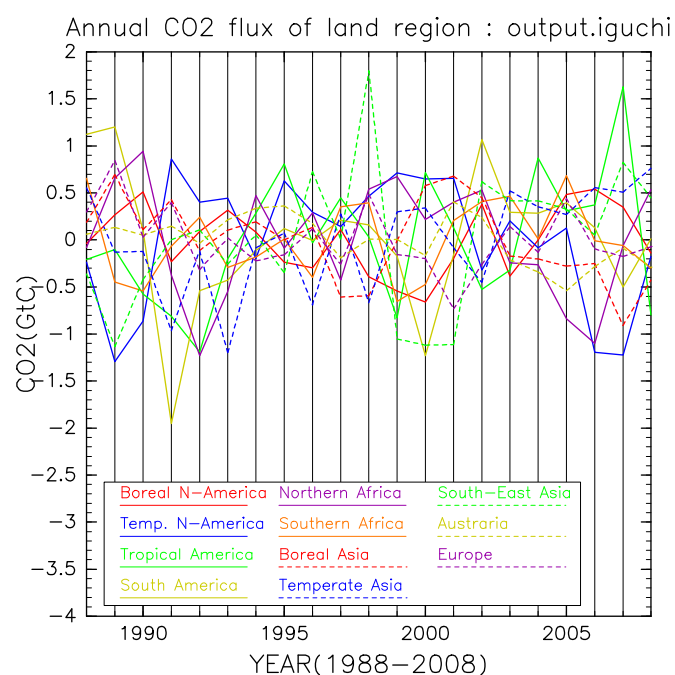


Fig. 4 Interannual variation of annual regional land CO₂ flux estimated by TransCom synthesis inversion method.

Table 2 Long term trend of regional land CO₂ fluxes shown in Fig. 4. Unit of the trends is GtC/yr. Lower values in round brackets are t-value. A trend is significant if $|t| \geq 2.09$ (for 10-year trend, $|t| \geq 2.26$).

Region	1988 - 2008	1988 - 1998	1998 - 2008	Region	1988 - 2008	1988 - 1998	1998 - 2008
Boreal North America	0.001 (0.08)	-0.044 (-1.79)	0.085 (2.63)	Boreal Asia	-0.033 (-2.39)	-0.087 (-3.40)	-0.071 (-1.63)
Temperate North America	-0.013 (-0.53)	0.106 (1.90)	-0.157 (-3.53)	Temperate Asia	0.043 (2.53)	-0.037 (3.21)	0.092 (2.88)
Tropical America	0.041 (1.77)	0.089 (1.82)	0.058 (0.80)	South East Asia	0.042 (1.64)	0.164 (3.21)	0.063 (0.71)
Temperate South America	0.000 (-0.01)	-0.041 (-0.49)	0.021 (0.37)	Australia	-0.023 (-2.98)	-0.003 (-0.21)	-0.042 (-1.84)
North Africa	-0.013 (-0.58)	-0.008 (-0.13)	-0.092 (-1.80)	Europe	-0.019 (-1.54)	-0.039 (-1.13)	-0.001 (-0.02)
South Africa	0.010 (0.68)	0.019 (0.48)	0.008 (0.19)				

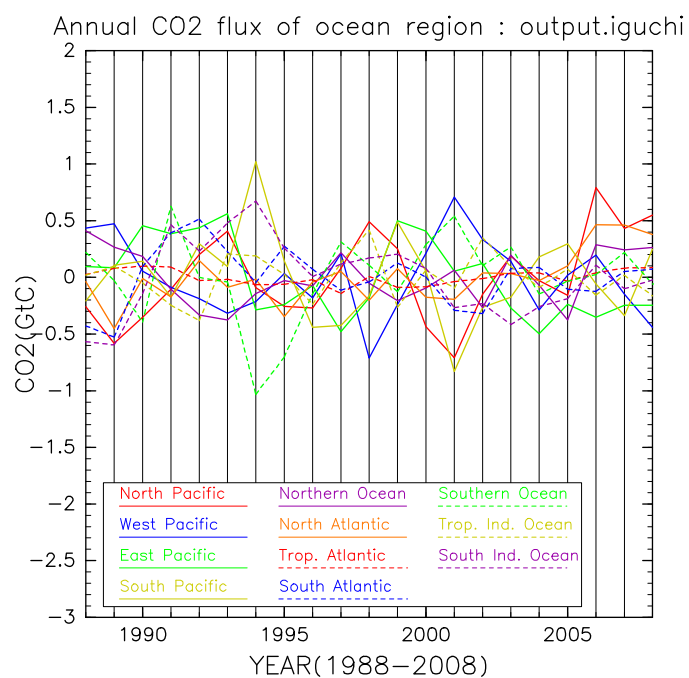


Fig. 5 Interannual variation of annual regional ocean CO₂ flux estimated by TransCom synthesis inversion method.

Table 3 Long term trend of regional ocean CO₂ fluxes shown in Fig. 5. Unit of the trends is GtC/yr. Lower values in round brackets are t-value. A trend is significant if $|t| \geq 2.09$ (for 10-year trend, $|t| \geq 2.26$).

Region	1988 - 2008	1988 - 1998	1998 - 2008	Region	1988 - 2008	1988 - 1998	1998 - 2008
Northern Pacific	0.028 (2.17)	0.055 (1.99)	0.054 (1.28)	Tropical Atlantic	0.000 (0.08)	-0.015 (-2.83)	0.014 (3.46)
Western Tropical Pacific	-0.008 (-0.66)	-0.066 (-2.51)	-0.003 (-0.08)	Southern Atlantic	-0.001 (-0.14)	0.025 (0.80)	0.006 (0.39)
Eastern Tropical Pacific	-0.029 (-2.73)	-0.065 (-2.35)	-0.062 (-2.53)	Southern Ocean	0.010 (0.71)	-0.020 (-0.42)	-0.015 (-0.73)
Southern Pacific	-0.008 (-0.54)	-0.021 (-0.52)	0.010 (0.28)	Tropical Indian Ocean	0.001 (0.09)	0.024 (1.10)	-0.023 (-1.16)
Arctic Ocean	0.001 (0.16)	-0.027 (-1.14)	0.035 (1.76)	Southern Indian Ocean	-0.007 (-0.53)	0.064 (1.83)	-0.018 (-0.91)
Northern Atlantic	0.024 (3.49)	0.005 (0.31)	0.063 (4.57)				

でもFig. 5に年間フラックスのアノマリを、Table 3に長期トレンドを示す。

海洋は全球的にもフラックスの増加傾向が見られたが、領域別には北太平洋、北大西洋および北極海の北半球中高緯度で1998-2008年の期間の増加率が高い。これは北極海における海水の減少と関係があるのかもしれない。

次に特徴的なのは、熱帯東部太平洋におけるフラックスの有意な減少傾向である。この領域はペルー沖の湧昇流を含む海域であり、エルニーニョ現象の頻度が高まる事によって湧昇流が減ってCO₂放出量が減少しているのではないかという見方が出来る。

その他、南インド洋では1988-1998年にフラックスの増加傾向が見られたが、1998-2008年ではそれが無くなっている。これについては海面水温のアノマリ等を確認する必要がある。また、Quere et al. (2007)の研究で飽和の可能性が議論された南大洋については、1988-2008年の期間で正のトレンドが計算されたものの、有意性は認められなかった。

5.4 火災起源CO₂フラックスの寄与について

GFED火災起源CO₂フラックスデータについて、領域別に年間フラックス量を集計した。フラックスの年々変動をFig. 6に、そのアノマリをFig. 7に示す。

全球合計したフラックスの大きさは大部分の年で2~4GtC/yrにもおよび、大気中CO₂の収支を考える上で欠かすことのできない要因であることが明らかになった(Fig. 6)。領域別に見ると、アフリカ、熱帯アメリカ、東南アジア、北方アジアにおける放出量が大きい。1997年には東南アジア、1998年は世界的に大規模な火災が発生して全球合計でも突出しており、大気中CO₂残留量の急増の(Fig. 1)の要因であることが示唆される。

その一方で、火災起源フラックスの年々変動量は、大気中CO₂残留量や逆転法で求められたフラックスの年々変動量に比べれば非常に小さく、年々変動成分に関して言えばほとんど寄与はしていないと言える。また、1997-1998年の突出したフラックス量の多さを除けばフラックスのトレンドは小さく、有意性はなかった。

6. まとめ

逆転法によって陸上および海洋を分割した領域毎にCO₂フラックスを推定し、その年間値について長期トレンドとトレンドの有意性を調べた。

全球規模のフラックスについては、海洋からのフラックスに増加傾向が認められたが、十分な有意性は示されなかった。陸上生態系からのフラックスに

についても有意なトレンドは認められなかった。

領域別に見ると、陸上では、化石燃料燃焼や土地利用など、人間活動が原因と見られるフラックスの増加や、気候変動に対する生態系の反応としてのフラックスの増減と思われるトレンドが見られた。また海洋については、北半球高緯度におけるフラックスの高い増加傾向や、エルニーニョの関与が考えられる熱帯太平洋東部でのフラックスの減少傾向が見られた。ただしこれらの結果については、生態系や海洋のモデルや観測に基づく研究結果とも比較してみる必要がある。

また、火災起源のCO₂フラックスについては、フラックス量そのものは大気CO₂収支に重要な役割を果たしていたが、年々変動成分や長期トレンドに関する寄与は殆どなかった。

謝 辞

本研究で用いたTransCom3 Layer2の逆転法のプロトコル、使用されるデータおよび逆解析プログラムはTransComホームページより取得しました。逆転法での逆解析に用いられたGLOBALVIEW CO₂観測値データはNOAA/ESRLホームページより取得しました。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の年間残留量データはNOAA/ESRS Global Monitoring Divisionホームページより取得しました。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を使用して行いました。火災起源CO₂フラックスのデータはORNL DAACのホームページより取得しました。本論文の図は地球流体電脳倶楽部の電脳ライブラリを用いて作成しました。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.
- 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.

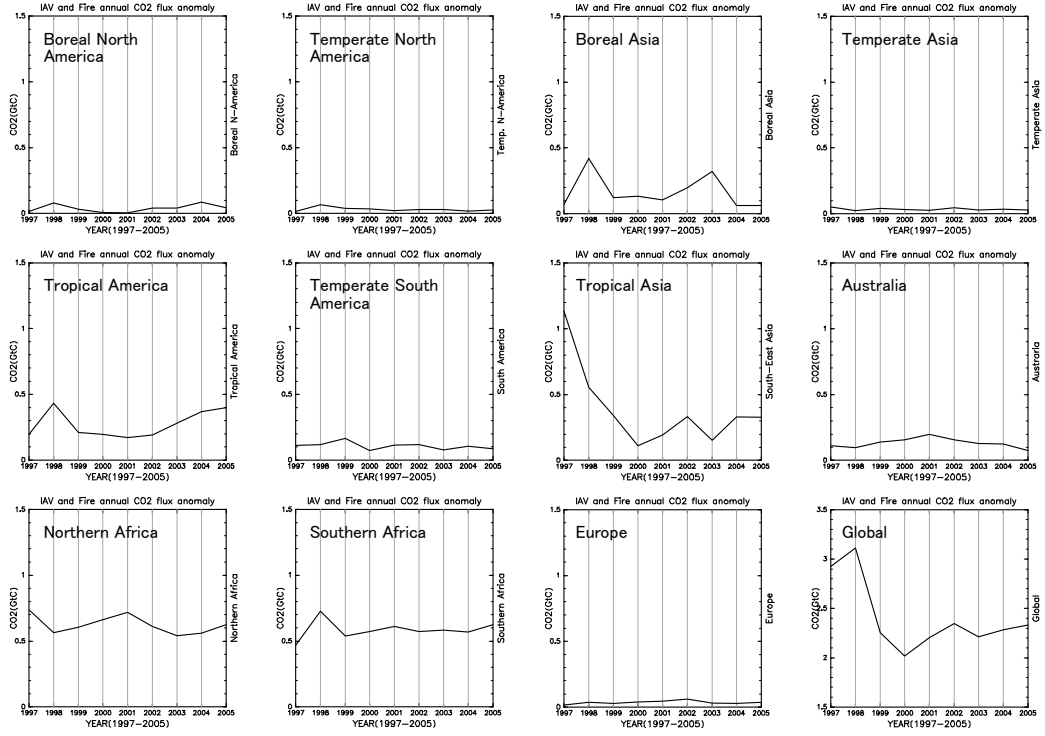


Fig. 6 Interannual variation of regional fire CO₂ emission for 1997-2005. Data is ORNL DAAC Global Fire Emission Database Ver. 2.1.

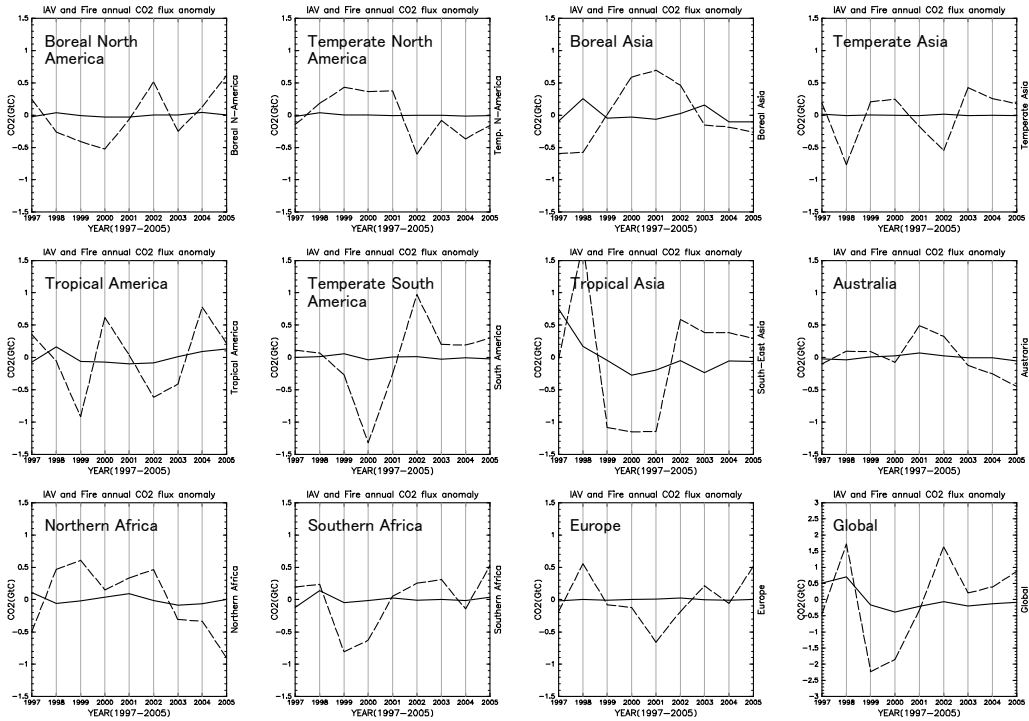


Fig. 7 Anomaly of fire CO₂ emission shown in Fig. 6. The broken line is anomaly of regional CO₂ flux estimate by synthesis inversion method.

- Bousquet P., Peylin, P., Ciais, P., Quéré, C. L., Friedlingstein, P. and Tans, P. P. (2000), Regional changes in carbon dioxide fluxes of land and oceans since 1980. *Science*. 290, pp. 1342-1346.
- 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 inter-comparison: Model mean results for the estimation of seasonal carbon sources and sinks, *Global Biogeochemical Cycles*, Vol. 18, GB1010, doi:10.1029/2003GB002111.
- 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.
- TransCom (2007): The TransCom Experiment, <http://www.purdue.edu/transcom/index.php>
- Van der Werf, G. R., Randerson, J., Collatz, G. J., Giglio, L., Kasibhatla, P. S., Arellano Jr, A. F., Olsen, S. C. and Kasischke, E. S. (2004): Continental-scale partitioning of fire emissions during the 1997 to 2001 El Niño/La Niña period, *Science*, 303, pp. 73-76.
- Van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., Collatz, G. J. and Kasibhatla, P. S. (2006): Interannual variability in global biomass burning emission from 1997 to 2004, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, pp. 3423-3441.

Decadal Trends of Estimated Global and Regional CO₂ fluxes

Takao IGUCHI

Synopsis

Using synthesis inversion method of Transcom, interannual variations of regional surface CO₂ fluxes were estimated for the period of 1988-2008. Then for the estimated fluxes, long-term trends were calculated. The result shows that the annual global flux from ocean seems to be increasing, but the global flux from biosphere doesn't have a significant trend. As for regional fluxes, some land regions show significant trends. The positive trends of Temperate Asia, Tropical Asia, and Tropical America correspond with combustion of fossil fuel and land use change in these regions. Other significance trends of land regions are thought to be due to responds of terrestrial ecosystems to climate change. Also some ocean regions show significant trends. Regions of mid-high latitude of Northern Hemisphere show high positive trends. Flux from east tropical Pacific region shows negative trend. CO₂ emission from fire does not contribute to the long-term trend of annual increase of atmospheric CO₂.

Keywords: CO₂, carbon dioxide, synthesis inversion method, terrestrial ecosystems, ocean, fire