

北半球高緯度の陸上におけるCO₂フラックスの長期変動について

Long-Term Trend of the Terrestrial CO₂ Flux in High Latitudes of the Northern Hemisphere

井口敬雄

Takao IGUCHI

Synopsis

Terrestrial ecosystems of the northern high-latitude region are thought to have been important sinks of atmospheric CO₂, but some studies suggested that their absorption is decreasing in this century. To investigate carbon fluxes from northern high-latitude terrestrial areas and their recent trends, regional CO₂ fluxes are estimated by TransCom synthesis inversion method. The sum of inversed CO₂ fluxes from the boreal Asia region and the boreal North America region showed decreasing (i.e. absorption is increasing) in this century. The result was compared with the inversed fluxes of CarbonTracker 2013 (CT2013). The sum of CT2013 CO₂ fluxes from the boreal Asia region and the boreal North America region also showed decreasing in this century, but the signs of the trends of the fluxes from the two regions were opposite to those of this study.

キーワード: 二酸化炭素, 炭素収支, 逆転法, 陸上生態系

Keywords: carbon dioxide, carbon budget, inversion method, terrestrial biosphere

1. はじめに

陸上の生態系（主に植生）は海洋と共に、化石燃料の燃焼による大気中CO₂（二酸化炭素）濃度の急激な上昇を緩和する重要な吸収源として機能していると考えられている(IPCC, 2013). しかし陸上生態系は海洋と比較して気候の変動の影響を受けやすく、その吸収量の年々変動は激しい(Iguchi, 2011). また、長期的に見ても、地球規模の温暖化による吸収量の減少が懸念されている.

とりわけ、北極圏を含む北半球高緯度の陸上生態系による吸収量については、従来は地球全体の陸上生態系による吸収量のかなりの割合を占めていたと考えられるが(McGuire et al., 2009), それが今世紀に入って大幅に減少したのではないかという指摘がある(Hayes et al., 2011). また一方で、化石燃料によって放出されたCO₂の吸収量は全体として減っていないとの指摘もあり(Ballantyne et al., 2012), もし北半球高緯度の陸上生態系による吸収量が大幅に減って

いるならば、別のどこかで同等量の吸収量が増加していなければならない.

そこで本研究では、逆転法の手法を用いて地球表面におけるCO₂フラックス分布の年々変動を推定し、他の逆解析による推定結果とも比較しながら、北半球高緯度の陸上生態系によるCO₂フラックスの長期変動を検証してみた.

2. 逆転法によるCO₂フラックスの推定

逆転法(Synthesis inversion method)は、全球規模の大気輸送モデルを用いたシミュレーションの結果から、地表面フラックスの分布を逆解析によって求める手法である. シミュレーションの入力値として、風速などの大気再解析データと、地表面フラックスデータを与える.

逆転法では、地表面フラックスとそれが大気中に形成する濃度分布との間に線形な関係が成り立つという仮定のもと、

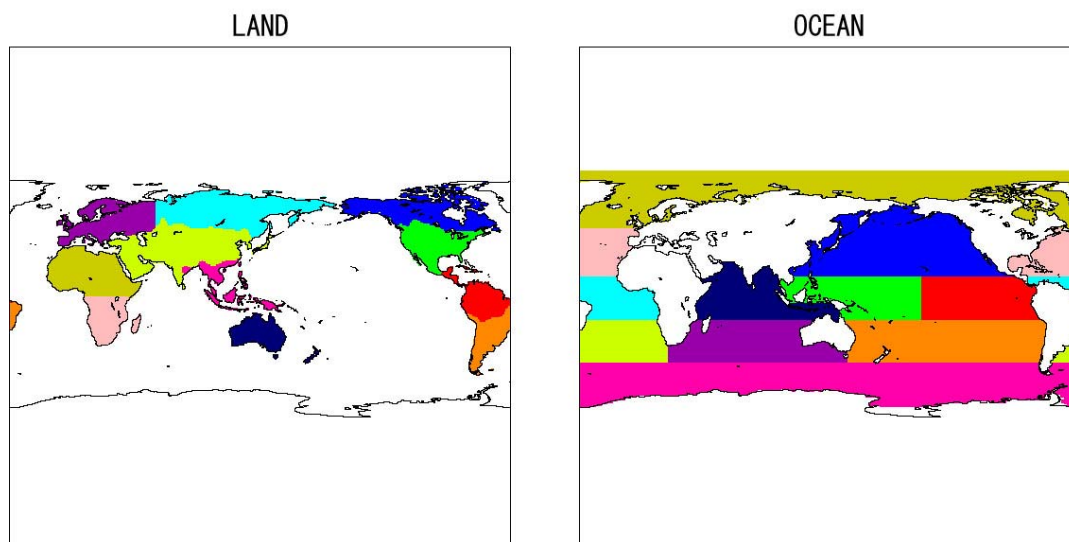


Fig. 1 TransCom3 Layer2 region map of land (left) and ocean (right).

[1] 予め別のアプローチにより推定された炭素収支シナリオ（事前推定）に基づくCO₂フラックス分布によるシミュレーション。

[2] 地表面をいくつかの領域に分割し、そのうちの一つの領域のみから単位期間に単位量のCO₂を放出させるシミュレーションをすべての領域について実行。

の2種類のシミュレーションを行い、実際に観測されたCO₂濃度と、観測点におけるシミュレーション結果の差の自乗和が最小になるよう、[1]で用いた事前推定シナリオに修正を加えてフラックスを推定する。なお推定フラックスは[2]の領域毎に求められる。

本研究では、TransCom3 Layer2 (Gurney et al., 2004; Baker et al., 2006; TransCom, 2007) の手法を用いてフラックスの推定を行った。TransCom3 Layer2 では、陸上と海洋をそれぞれ Fig. 1 に示した 11 の領域に分割している。

CO₂ 輸送シミュレーションには井口・木田(1999)が開発した3次元大気輸送モデルを用いた。本モデルはフラックス型のスキームを採用しており、CO₂の質量は保存される。

シミュレーションの結果と比較する観測データとしては、NOAA/ESRL (National Oceanic & Atmosphere Administration / Earth System Research Laboratory) (2009) の GLOBALVIEW データを使用した。GLOBALVIEW データは、モデルを用いた研究での使用を用途としたデータセットであり、実際の観測値を時間的・空間的に平滑化した値となっている。

3. 結果（逆転法により推定された陸上生態系CO₂フラックスの長期変動）

逆転法により陸上及び海上の各領域からのフラックスが推定されたが、本論文では陸上からのフラックスのみ示す。

逆転法により推定された陸上フラックスには、化石燃料の燃焼や、火災によって放出されたCO₂も含まれている。そのため、Oak Ridge National Laboratory (ORNL) Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC) の化石燃料起源CO₂フラックスデータ (Marland et al., 2009; Andres et al., 2013) および、ORNL Distributed Active Archive Center (DAAC) の Global Fire Emissions Database (GFED) Ver. 3.1 データセット (Van der Werf et al., 2004, 2006; GFED, 2012) を用いてこれらの成分の除去を行った。

2000年から2009年までの各領域のフラックスアノマリの変動をFig.2に、この期間のフラックスのトレンドについてのt-検定値をTable 1に示す。t-検定値は $|t| \geq 2.306$ なら95%、 $|t| \geq 1.860$ なら90%の水準で有意である。またFig.2(1)には、陸上生態系フラックスの合計（実線）に加え、北半球高緯度からのフラックスとして、北米大陸寒帯(a)とシベリアを含むアジア寒帯(g)を足し合わせたフラックスもプロット（破線）している。

Fig.2およびTable 1を見ると、全球で合計した陸上生態系のフラックスは減少傾向、つまり吸収量が増加傾向にあることを示している。しかしトレンドの有意性はあまり高くない。北半球高緯度について見

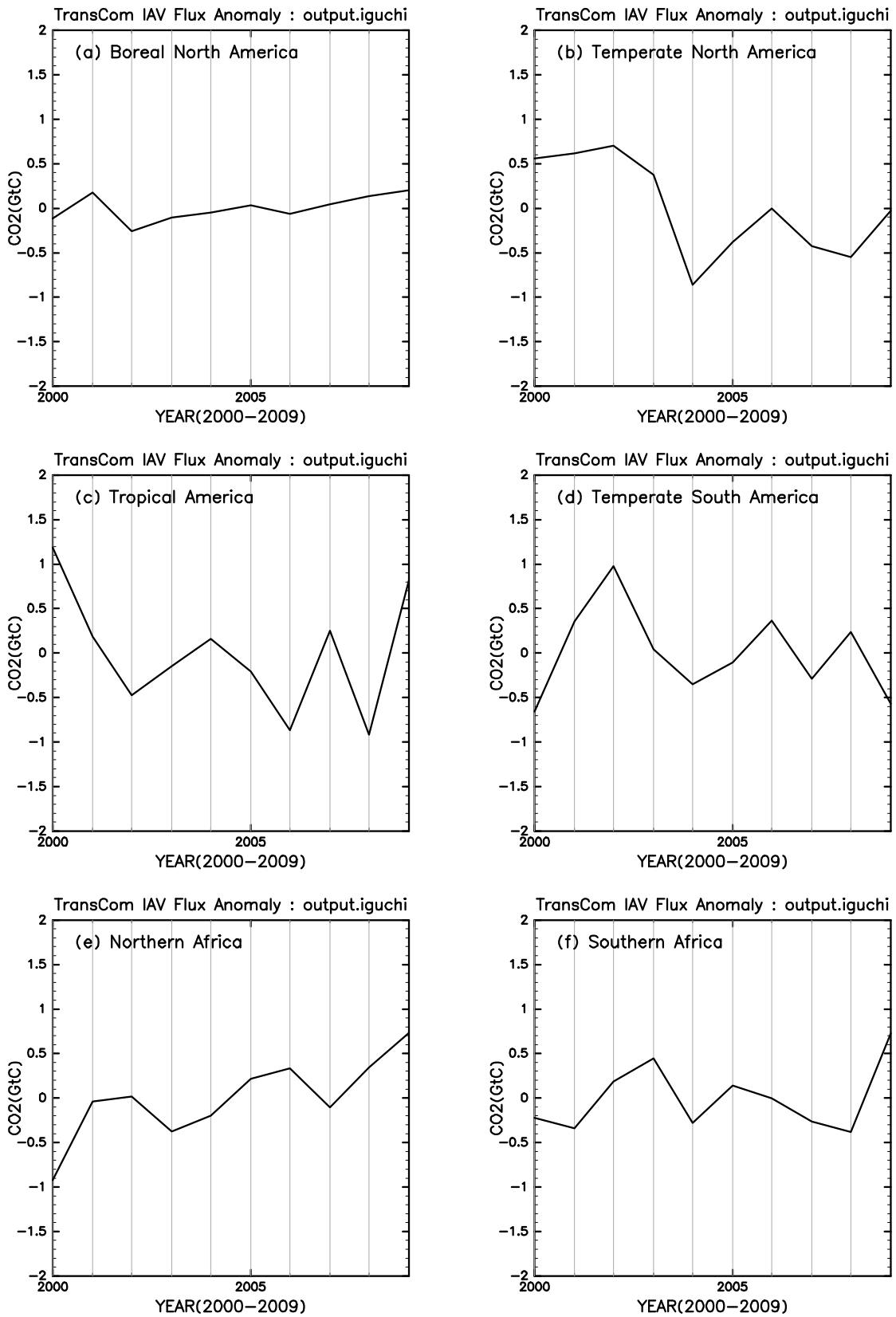


Fig. 2 Variations of annual regional CO₂ flux anomalies estimated by TransCom inversion method.

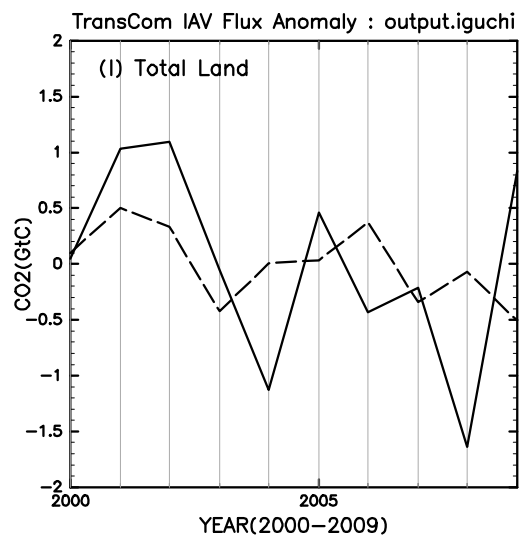
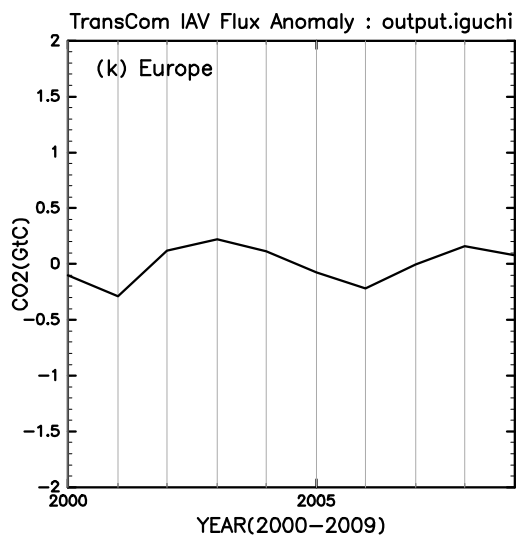
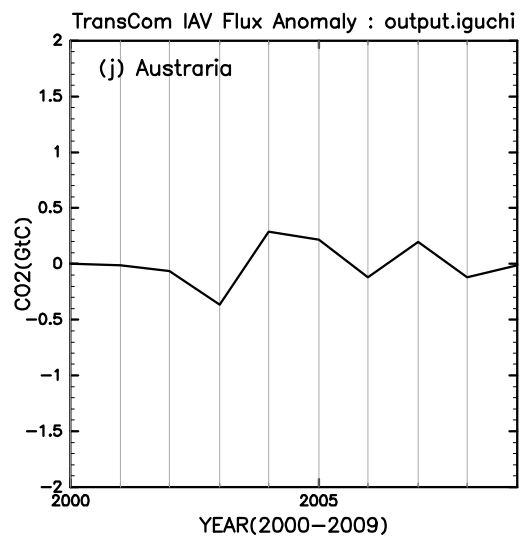
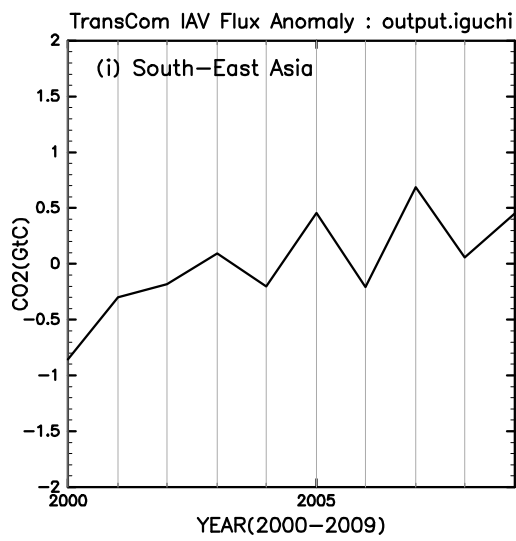
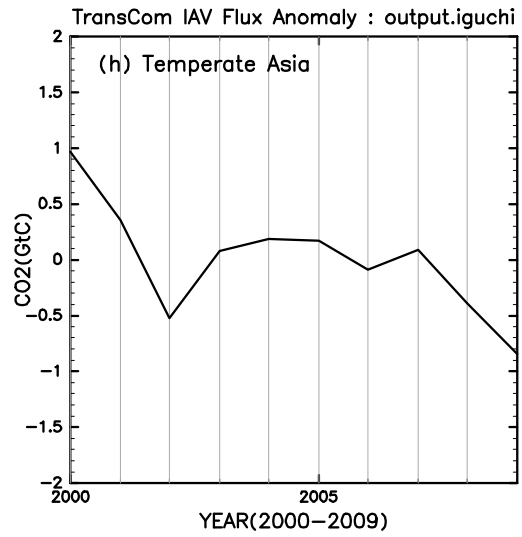
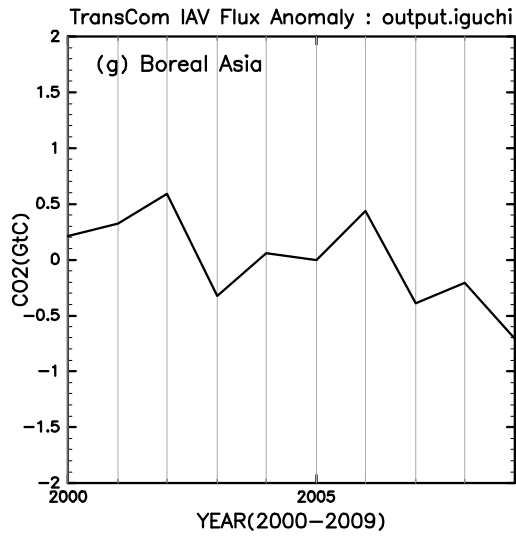


Fig. 2(continued) The dashed line in subfigure (l) is the sum of flux anomalies of (a) and (g).

TransCom Region	2000 - 2009 trend (GtC/y ²)	t-test value of the trend
(a) Boreal North America	0.026	1.815
(b) Temperate North America	-0.120	-2.496
(c) Tropical America	-0.060	-0.792
(d) Temperate South America	-0.031	-0.546
(e) Northern Africa	0.118	3.610
(f) Southern Africa	0.031	0.729
(g) Boreal Asia	-0.089	-2.494
(h) Temperate Asia	-0.115	-2.705
(i) South-East Asia	0.111	3.158
(j) Australia	0.007	0.293
(k) Europe	0.016	0.836
(l) Total Land	-0.107	-1.084
(a)+(g) NH High Latitudes	-0.063	-1.879

Table 1 Trends and their t-test values of annual regional fluxes estimated by Transcom inversion method. Trends are significant at the level of 95% for $|t| \geq 2.306$ and 90% for $|t| \geq 1.860$.

ると、北米大陸寒帯(a)でのフラックスは弱い増加傾向にある。一方、シベリアを含むアジア寒帯(g)ではフラックスは95%の有意水準で減少傾向であった。(a)と(g)を合計したフラックス (Fig.2(l)破線プロット) のトレンドは-0.063GtC/yearで、t-検定値は-1.879と90%の水準で有意であった。このトレンドは全球の陸上合計のトレンドの約6割に相当し、本研究の結果では北半球陸上生態系は依然としてCO₂の主要な吸収源として機能していることが示唆された。

4. 考察

4.1 CarbonTracker(CT2013)フラックス推定値との比較

本研究におけるフラックス逆解析の結果について検証するため、NOAA/ESRL CarbonTracker (CT2013) (Peters et al., 2007; CarbonTracker, 2013) のフラックス分布との比較を行った。

CT2013の陸上生態系起源CO₂フラックスデータをTransComの領域別に合計し、それぞれの2000年から2009年までのフラックスアノマリの変動をFig.3に、この期間のフラックスのトレンドについてのt-検定値をTable 2に示す。

TransComによる逆解析の結果とCT2013を比較してみるとかなり異なる点があることが分かる。まず、全球の合計では、両者ともよく似たトレンドであり、高い有意水準ではないが、フラックスの減少(吸収

量の増加)傾向を示している。また、北米寒帯(a)とアジア寒帯(g)の和 (Fig.3(l)破線プロット) についても両者ともフラックスの減少傾向を示しているが、TransComに比べ、CT2013では有意水準は低い。

しかし領域別に見てみると、北米寒帯(a)については、傾きの絶対値は大きくないものの、共に高い有意水準でTransComではフラックスの増加、CT2013では減少という正反対の結果になった。アジア寒帯(g)では逆に、TransComでは高い有意水準でフラックスの比較的強い減少、CT2013では低い有意水準で弱い上昇が見られた。

その他の領域も含めて見ると、TransComの方がフラックスの年々変動が大きく、トレンドが高い有意水準を示した領域が多く、それと比較してCT2013はフラックスの年々変動が小さく、トレンドの有意水準も低い領域が多いという傾向が見られた。

4.2 TransComとCT2013のフラックスの相違について

TransComの逆転法を用いたフラックス推定値とCT2013のフラックスが分割領域レベルで異なる要因としては以下の様に複数挙げられる。

(1) 逆解析の手法の違い

CarbonTrackerではデータ同化の手法を用いてフラックスの修正を行っており(Peters et al., 2007)、領域分割を行うTransComの手法とは異なっている。

(2) 事前推定フラックスの違い

TransComとCarbonTrackerとでは陸上生態系と海洋については異なる事前推定を用いている。化石燃料消費と火災を起源とするフラックスについては同じデータを使用している。

(3) 使用する大気輸送モデルの違い

事前推定フラックスや逆解析手法など他の条件をすべて同じにしても、モデル間で大きく誤差が生じることがTransComプロジェクトで示されている(Gurney et al., 2004)。

(4) モデル値と比較する観測データの違い

CarbonTrackerではGLOBALVIEWデータは使用していないが、使用されている観測データの中には、GLOBALVIEWデータの元となったものが数多くある。しかし、逆解析の結果は観測値に敏感であり、平滑化しているかどうかの違いも逆算フラックスの違いとなって現れる。

5. まとめ

TransCom逆転法によるCO₂フラックス推定の結果、北半球高緯度(北米大陸寒帯およびアジア寒帯)に

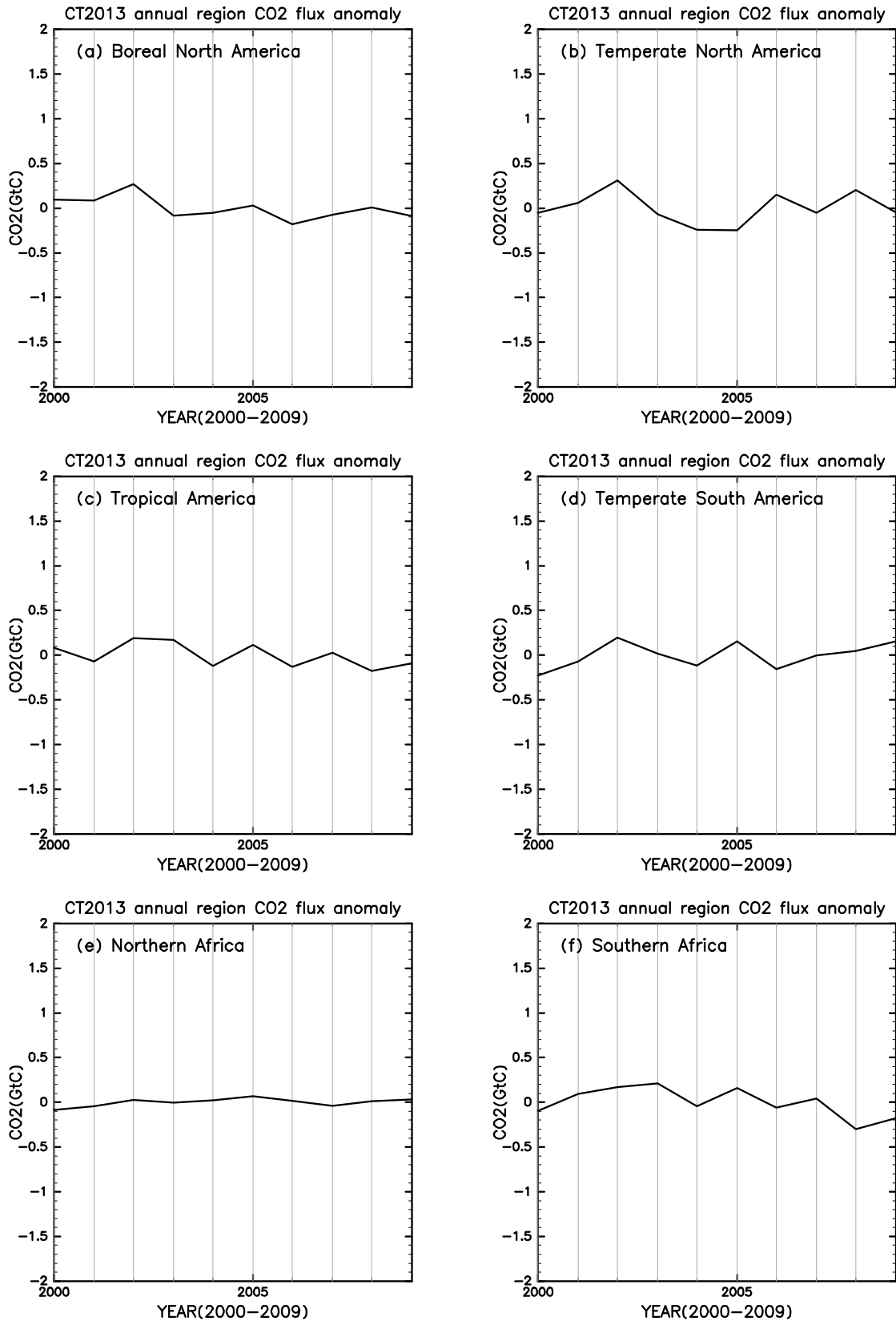


Fig. 3 Variations of annual regional CO₂ flux anomalies of CarbonTracker (CT2013) flux data. The regions are same as TransCom (Fig. 2).

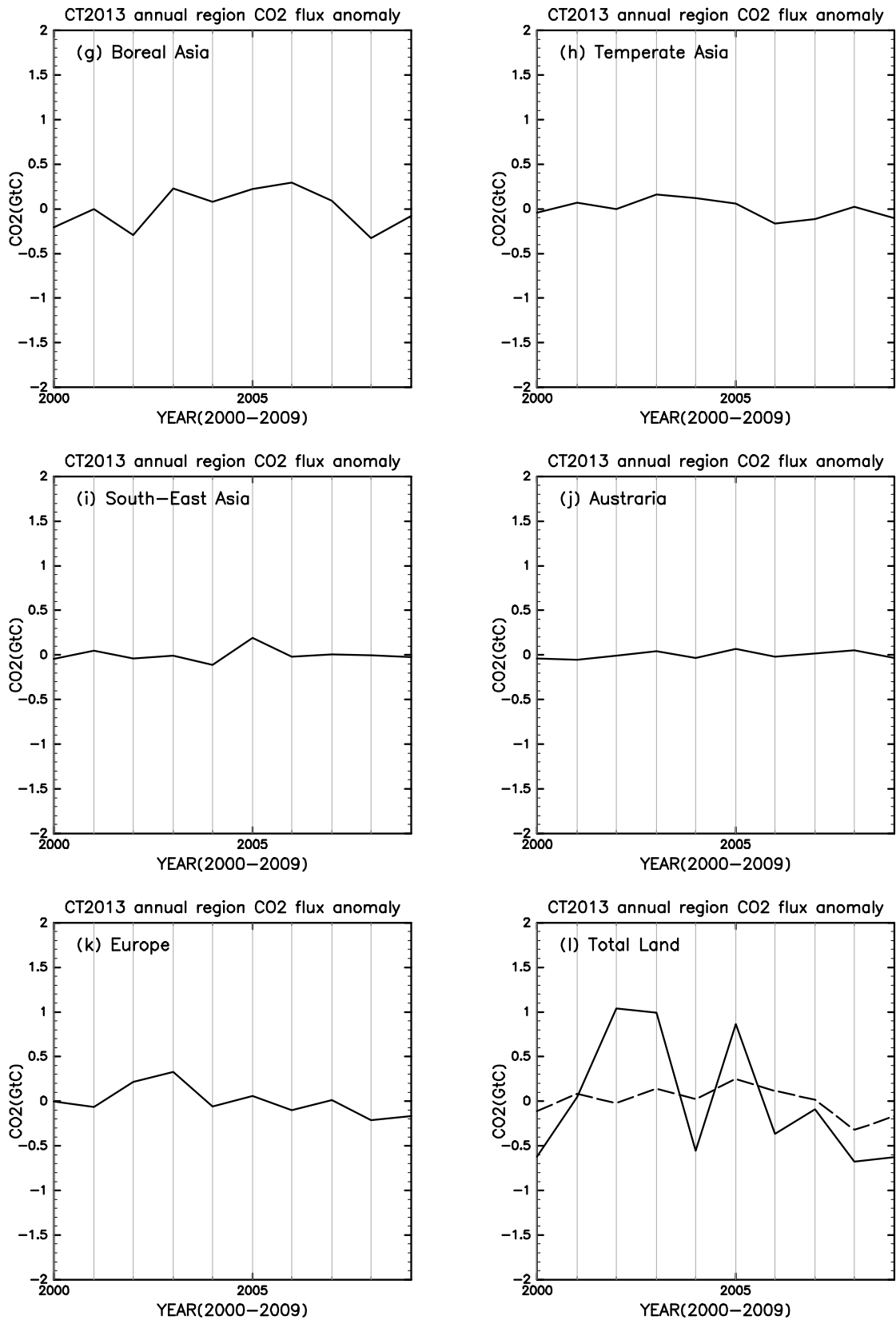


Fig. 3(continued) The dashed line in subfigure (l) is the sum of flux anomalies of (a) and (g).

TransCom Region	2000 - 2009 trend (GtC/y ²)	t-test value of the trend
(a) Boreal North America	-0.025	-2.069
(b) Temperate North America	-0.001	-0.028
(c) Tropical America	-0.023	-1.717
(d) Temperate South America	0.018	1.175
(e) Northern Africa	0.007	1.627
(f) Southern Africa	-0.029	-1.757
(g) Boreal Asia	0.007	0.258
(h) Temperate Asia	-0.015	-1.360
(i) South-East Asia	0.002	0.217
(j) Australia	0.005	1.160
(k) Europe	-0.028	-1.710
(l) Total Land	-0.081	-1.050
(a)+(g) NH High Latitudes	-0.018	-0.992

Table 2 Trends and their t-test values of annual regional fluxes of CarbonTracker (CT2013) data. The regions are same as TransCom. Trends are significant at the level of 95% for $|t| \geq 2.306$ and 90% for $|t| \geq 1.860$.

における陸上植生は依然としてCO₂の吸収源としての機能を保っていることが示唆された。CarbonTracker (CT2013) のフラックス推定値でも同様の結果が得られているが、両者のトレンドの有意性の違いや、細かい領域ごとのフラックス変動の違いは、依然として逆解析による推定値が大きな誤差を持つことを示している。

今後は推定誤差をより小さくするため、輸送モデルの改良による精度の向上や、少ない観測値を補うためGOSAT等の衛星観測CO₂データを取り入れるなどの解析手法の改良を行っていきたい。

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。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。化石燃料起源CO₂フラックスのデータはCDIACホームページより取得しました。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。CarbonTrackerのフラックス

データ(CT2013)はNOAA/ESRL CarbonTracker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.
- Andres, R.J., Boden, T.A., and Marland, G. (2013): Annual Fossil-Fuel CO₂ Emissions: Mass of Emissions Gridded by One Degree Latitude by One Degree Longitude, DOI: 10.3334/CDIAC/ffe.ndp058.2013, http://cdiac.esd.ornl.gov/epubs/ndp/ndp058/ndp058_v2013.html
- 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.
- Ballantyne, A. P., Alden, C. B., Miller, J. B., Tans, P. P., and White, J. W. C. (2012), Increase in observed net carbon dioxide uptake by land and oceans during the past 50 years, Nature, 488, pp.70-72.
- CarbonTracker (2013), CT2013, <http://carbontracker.noaa.gov>
- Conway, T. and P. Tans (2009): Trends in Atmospheric Carbon Dioxide – Global, www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends.
- GFED (2012), Global Fire Emissions Database Ver. 3.1, <http://www.globalfiredata.org/index.html>
- 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.
- Hayes, D. J., McGuire, A. D., Kicklighter, D. W., Gurney, K. R., Burnside, T. J., and Melillo, J. M. (2011), Is the northern high - latitude land - based CO₂ sink weakening?, Global Biogeochemical Cycles, 25,

- doi:10.1029/2010GB003813
- Iguchi, T. (2011): Correlations between interannual variations of simulated global and regional CO₂ fluxes from terrestrial ecosystems and El Niño Southern Oscillation, *Tellus B*, 63B, DOI: 10.1111/j.1600-0889.2010.00514.x, pp. 196-204.
- IPCC (2014): *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, UK.
- McGuire, A. D., Anderson, L. G., Christensen, T. R., Dallimore, S., Guo, L., Hayes, D. J., Heiman, M., Lorensen, T. D., Macdonald, R. W., and Roulet, N. (2009), Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic to climate change, *Ecological Monographs*, 79(4), pp. 523-555.
- 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>
- Peters, W., Jacobson, A. R., Sweeney, C., Andrews, A. E., Conway, T. J., Masarie, K., Miller, J. B., Bruhwiler, L. M. P., Pétron, G., Hirsch, A. I., Worthy, D. E. J., van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Wennberg, P. O., Krol, M. C., and Tans, P. P., An atmospheric perspective on North American carbon dioxide exchange: CarbonTracker, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(48), pp. 18925-18930, doi: 10.1073/pnas.0708986104.
- 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.

(論文受理日 : 2014年6月10日)