

# 逆転法と数値モデルによる 陸上生態系からの炭素フラックスの推定値の比較

## Comparison of Fluxes from Terrestrial Ecosystems Estimated by Synthesis Inversion Method and Process-Based Model

井口敬雄

Takao IGUCHI

### Synopsis

As the first step of investigating uncertainty of estimation of carbon flux from terrestrial ecosystems, regional monthly carbon fluxes estimated by TransCom synthesis inversion method and SiB3 terrestrial ecosystem model were compared. Amplitude of the seasonal variation of the flux calculated by the biosphere model is much larger than the flux estimated by the inversion method. As for phase of the seasonal variation, the two fluxes are opposite in temperate North America while they are in phase at other mid or high latitude regions in the northern hemisphere.

**キーワード:** 二酸化炭素, 炭素収支, 逆転法, 生態系モデル

**Keywords:** carbon dioxide, carbon budget, inversion method, biosphere model

## 1. はじめに

化石燃料の燃焼や土地利用の変更といった人間の活動によって、大気中のCO<sub>2</sub>は年々上昇を続けているが、こうした人為起源のCO<sub>2</sub>放出量に対し、大気中におけるCO<sub>2</sub>の増加量はその半分程度にとどまっている(IPCC, 2013). 残りの半分は海洋と陸上の生態系(植生および土壌)によって吸収されていると考えられているが、陸上による吸収量については推定誤差が大きく、フラックスの詳細な分布やその年々変動についてもまだ分かっていないことが多い。

また、陸上生態系の活動は気候変動の影響を受けやすいため、それに伴いCO<sub>2</sub>フラックスも大きく変動する(Iguchi, 2011). 従来、陸上による人為起源CO<sub>2</sub>の吸収においては北半球高緯度の陸上生態系が重要な役割を果たしてきたと考えられているが(McGuire et al., 2009; Hayes et al., 2011), この地域は地球温暖化の影響が大きく出ると考えられており、それによってこの地域の陸上生態系からのCO<sub>2</sub>フラックスが大きく変化すれば大気全体の炭素収支バランスに大きな影響を及ぼす可能性がある。現在のCO<sub>2</sub>収支の詳細

を解明し、さらに将来の大気中CO<sub>2</sub>濃度を予測するためには陸上生態系からのフラックスをより正確に見積もることができることが不可欠である。

陸上生態系からのフラックスを見積もる方法としては、逆転法の様に大気中のCO<sub>2</sub>濃度の変動から地表面におけるフラックスを逆解析によって求める方法(トップダウン型)と、観測や陸上生態系モデル等を用いてフラックス量を推定する方法(ボトムアップ型)がある。しかし、その推定量には依然として大きな不確実性が存在している。

本研究では、逆転法と陸上生態系モデルという二つの異なる手法によって求められた陸上からのフラックスを比較し、結果の食い違いの詳細について調べてみた。

## 2. 陸上CO<sub>2</sub>フラックスの推定値について

### 2.1 逆転法によって推定された陸上CO<sub>2</sub>フラックス

逆転法(Synthesis inversion method)は、予め推定されたCO<sub>2</sub>フラックスデータと全球規模の大気輸送モ

デルを用いて行ったシミュレーションの結果と、観測された大気中CO<sub>2</sub>濃度データから、修正されたCO<sub>2</sub>フラックスの分布を逆解析によって求める手法である。

井口(2011)はTransCom3 Layer2 (Gurney et al., 2004; Baker et al., 2006; TransCom, 2007) の逆転法の手法を用いて、井口・木田(1999)の大気輸送モデルによって行ったCO<sub>2</sub>濃度分布のシミュレーションの結果とGLOBALVIEWの大気CO<sub>2</sub>濃度データ(NOAA/ESRL, 2009)によりフラックスの逆解析を行い、その長期トレンドについて調べた。本研究ではその逆解析の結果となった陸上フラックスの推定値を用いる。

## 2.2 陸上生態系モデルによって推定された陸上CO<sub>2</sub>フラックス

陸上生態系モデルは、植生の生物物理学的プロセスや土壌中の有機物分解の過程を数値モデル化し、植生と土壌を合わせた生態系内における炭素の移動のシミュレーションを行い、大気との間のCO<sub>2</sub>フラックスの計算を行う。

本研究では、ORNL/DAAC(The Oak Ridge National Laboratory / Distributed Active Archive Center for Biogeochemical Dynamics)が公開している、SiB3モデルによって計算された炭素フラックスデータ(Baker et al., 2009)を使用した。

## 3. 逆転法および陸上生態系モデルにより推定された陸上生態系CO<sub>2</sub>フラックスの比較

### 3.1 逆転法で推定されたCO<sub>2</sub>フラックス

TransCom3 Layer2では、陸上と海洋をそれぞれ11ずつの領域に分け、フラックスの推定は領域単位で行われる。Fig. 1に領域の区分地図を示す。

逆解析の結果求められるのは、CO<sub>2</sub>輸送シミュレーションで用いられた事前推定フラックスを除いたいわゆる残差フラックス(residual flux)で、それに事前推定のNEPフラックスデータを加えたものが陸上におけるフラックス量ということになる(Gurney et al., 2008)。ただしそれは化石燃料起源フラックスの事前推定値が正しいという仮定の下で成り立つ。本研究での輸送シミュレーションでは、化石燃料起源事前推定値は1990年と1995年の推定値の内挿または外挿で決められており、しかも2000年以降は同じ値を使用している。そのため、今世紀に入ってからの新興国を中心とする放出量の増加には対応していない。また、近年注目されている森林火災によるCO<sub>2</sub>フラックス (Van der Werf et al., 2004) も事前推定フラックスとしては考慮されていない。これらの事前には考慮されていないフラックスは前述の残差フラックスに含まれる形で推定されていることになる。

そこで、推定されたCO<sub>2</sub>残差フラックスに含まれる化石燃料や火災を起源とするフラックス分を除去するため、

$$\begin{aligned} & (\text{逆解析で求められた残差フラックス}) + (\text{事前推定NEPフラックス}) + (\text{事前推定化石燃料起源フラックス}) - (\text{化石燃料起源フラックスデータ}) - (\text{火災起源フラックスデータ}) = (\text{陸上生態系からのフラックス}) \end{aligned}$$

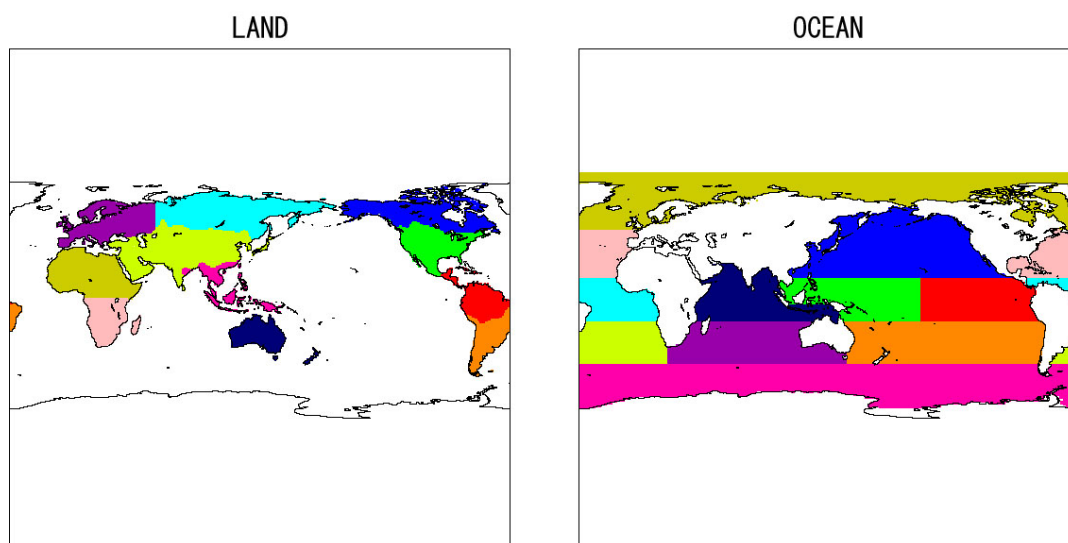


Fig. 1 TransCom3 Layer2 region map of land (left) and ocean (right).

の計算を行った。なお、土地利用によるフラックスについては今回考慮は行っていないが、その主要な割合を占める焼畑農業での伐採した草木の焼却は火災起源フラックスデータにも含まれていると考えられる。化石燃料起源フラックスデータはORNL/CDIAC (Carbon Dioxide Information Analysis Center) の化石燃料起源CO<sub>2</sub>フラックスデータ (年間値) (Marland et al., 2009; Andres et al., 2013), 火災起源フラックスデータはORNL/DAAC(Distributed Active Archive Center) のGlobal Fire Emissions Database (GFED) Ver. 3.1 データセット(月間値)(Van der Werf et al., 2004, 2006; GFED, 2012)を用い、TransCom領域別に集計して計算に用いた。

### 3.2 SiB3 CO<sub>2</sub>フラックスデータについて

今回使用したSiB3フラックスデータは、水平解像度が1° × 1° の日間値グリッドデータである。これをTransCom領域別に月毎に集計した。

## 4. 結果

Fig. 2(a)~(l)に、1998年から2006年までのSiB3フラックス(緑線)および3.1で求めた陸上からの逆解析フラックス(黒実線)の月間フラックス量を示す。(a)~(k)は各領域のフラックス量で、(l)はそれらの合計である。また、参考として、NEPの事前推定フラックスを黒点線で示してある。NEP事前推定値には年々変動がないため、同じ季節変化が繰り返されている。NEP事前推定値は陸上生態系モデルCASAの推定値を元に作成されており(Randerson et al., 1997), CASAモデルとの比較にもなる。ただし、NEP事前推定値は年間の合計がほぼ0になるように調整されている。

Fig. 2で両者のフラックスを比較してまず目につくのが季節変動の振幅の違いである。すべての領域において、SiB3モデルによるフラックスの方が季節変化が大きい。その中では、アフリカ南部(f)と北方アジア(g)において両フラックスの振幅の差が比較的小さい。また、陸上合計(l)についても、個々の領域の振幅の差を考えれば比較的両者の振幅の差は小さいといえる。

次に、季節変動の位相の違いについて見てみる。SiB3フラックスと逆解析フラックスとで季節変動の位相が合っていると明確に確認できるのは北米寒帯(a)、アジア寒帯(g)、ヨーロッパ(k)、陸上合計(l)であった。ただし、フラックスの極小(吸収量の最大)月は1か月ほどのずれがある。北米温帯(b)については、ほぼ逆位相であった。アフリカ北部(e)、東南アジア(i)も北米温帯ほど明瞭ではないが逆位相

に見える。温帯アジア(h)、オーストラリア(j)は逆解析フラックスの振幅が小さいが、極小月はSiB3と3か月ほどずれていることが確認できる。南米熱帯(c)、南米温帯(d)、アフリカ南部(f)は事前推定フラックスに見られた明瞭な季節変化が逆解析フラックスでは判別しにくくなってしまっている。

## 5. 考察

SiB3では、NEP事前推定フラックス(CASAモデル値)や逆解析によって求められたフラックスに比べ、大きな季節変動の振幅を示した。フラックスに対する大気中CO<sub>2</sub>濃度の感度は使用する輸送モデルによって異なるため、本研究で使用したモデルのみで評価を下すことはできない。複数のモデルを用いた検証が必要である。また、陸上全領域を合計した場合の振幅(極大と極小の差)は5GtC/monthを超え、大きい年には10GtC/month近くに達する。これについては、CO<sub>2</sub>観測に基づいて推定される全球大気濃度と比較してみる必要がある。

季節変動については、北米温帯の領域において、SiB3フラックスと逆解析結果およびCASAモデルの結果を元にした事前推定フラックスとで位相が逆になっている点が注目になる。他の北半球中高緯度領域では両者のフラックスは季節変動においては概ね合致している事、さらに北米温帯には多くのCO<sub>2</sub>観測点があり比較的推定フラックスの誤差が小さい事を考慮すれば、この結果は原因を探ってみる必要がある。また、CASAモデル以外の陸上生態系モデルの推定値とも比較を行う必要がある。

## 6. まとめ

今回、逆転法によって推定された陸上炭素フラックスと陸上生態系モデルによって求められたフラックスとの比較において、その季節変動の振幅や位相に大小様々な違いが見られた。今後は、これらの食い違いの要因について詳しく調べていきたい。

また、輸送モデルの改良、他の輸送モデルや陸上生態系モデルによる推定値との比較も行い、手法によるフラックス推定の誤差とその要因について明らかにすることにより、フラックス推定の誤差の改善につながることを期待される。

## 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

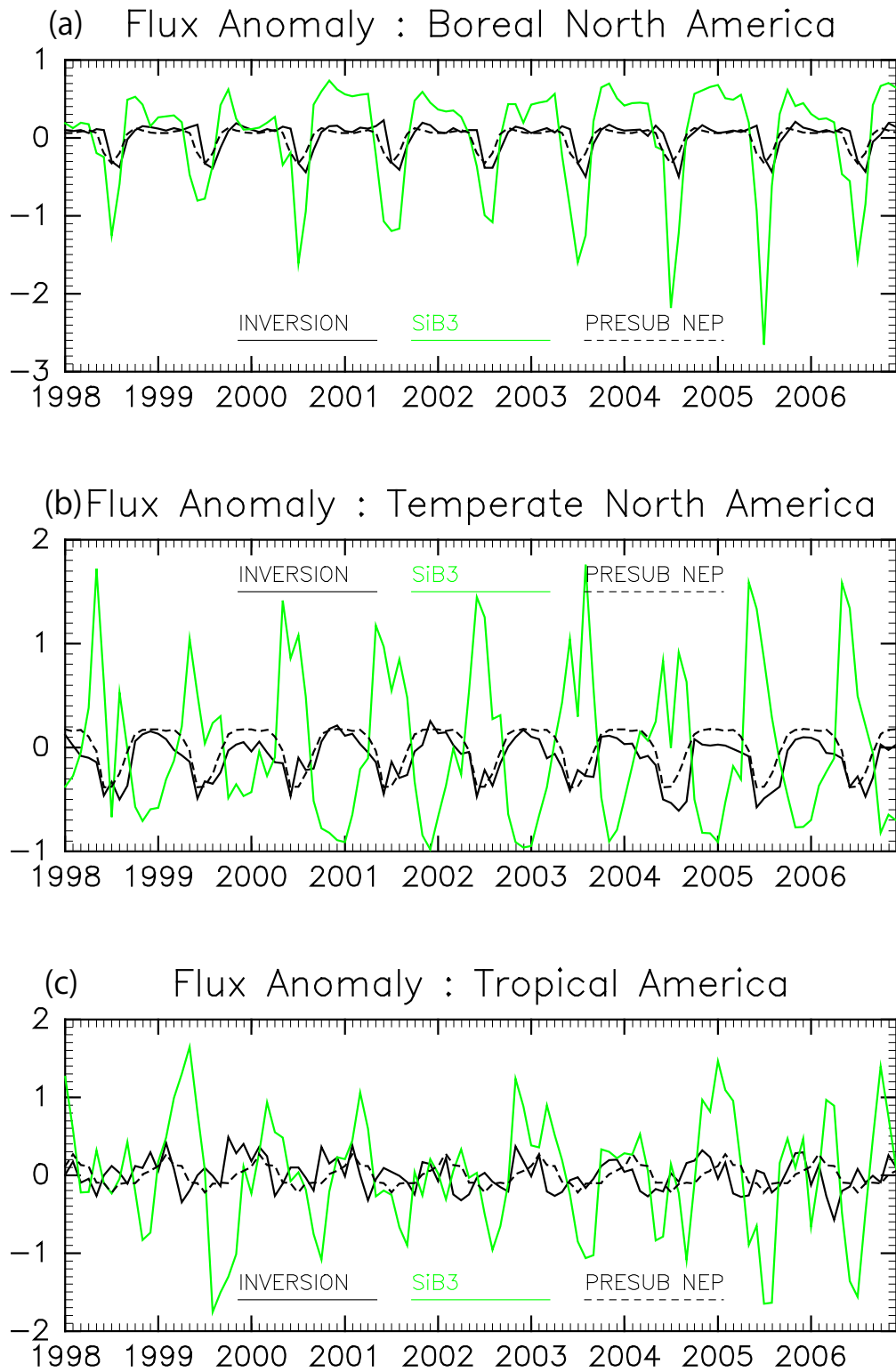


Fig. 2 Monthly regional carbon flux estimated by TransCom inversion method (the solid black line) and SiB3 biosphere model (the solid green line). The dotted black line is prescribed NEP flux of TransCom inversion method. The regions are TransCom land regions showed in the left side of Fig. 1.

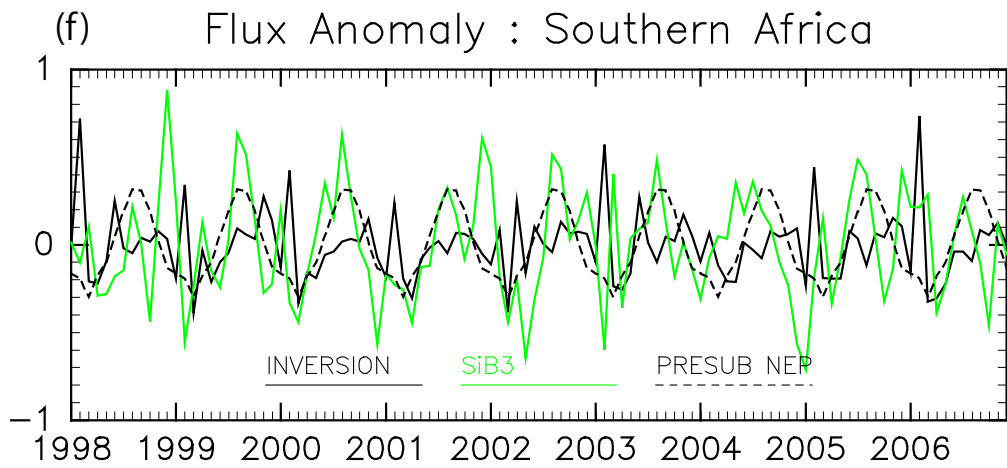
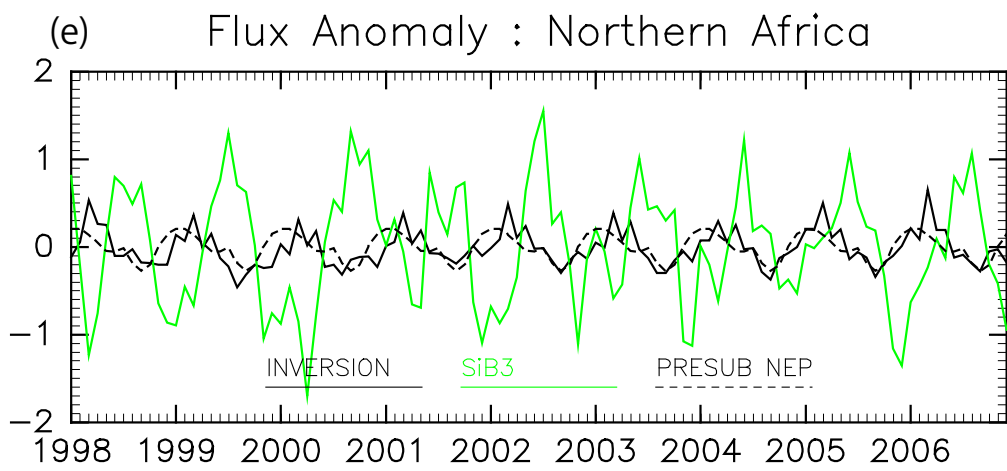
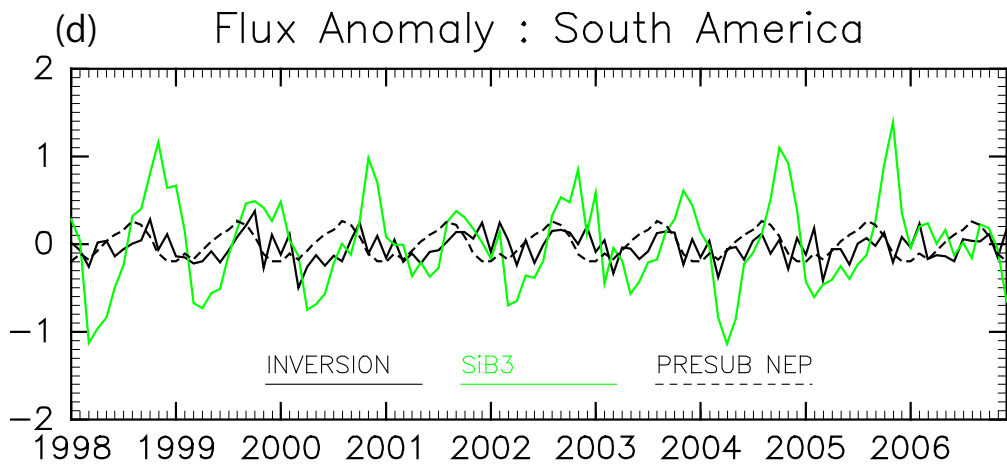


Fig. 2(continued)

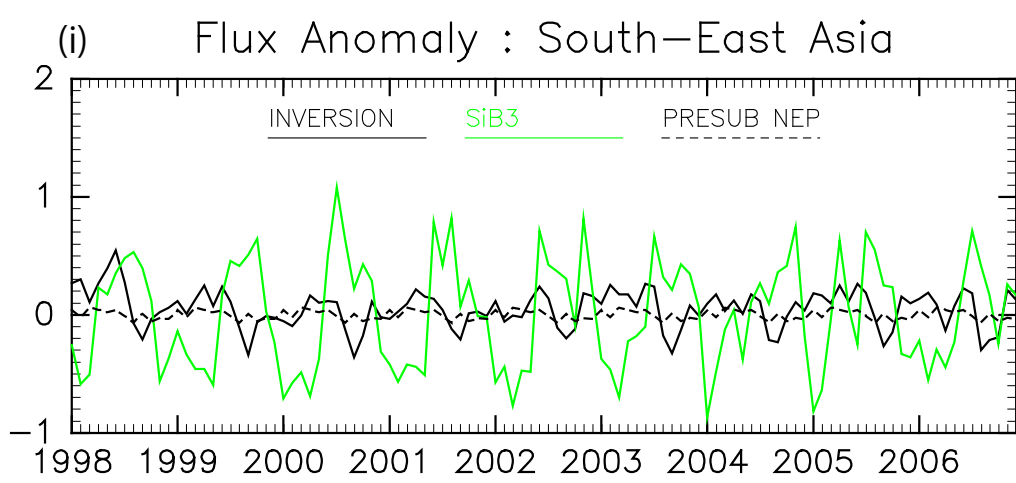
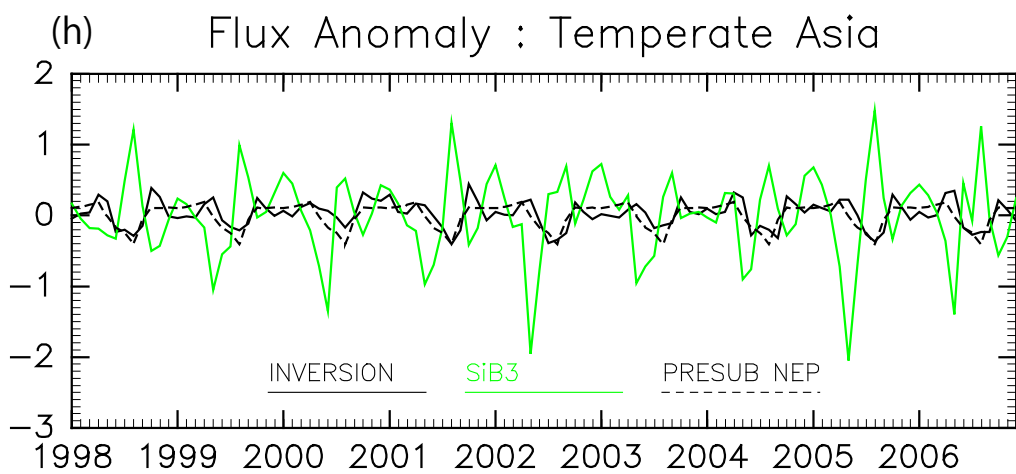
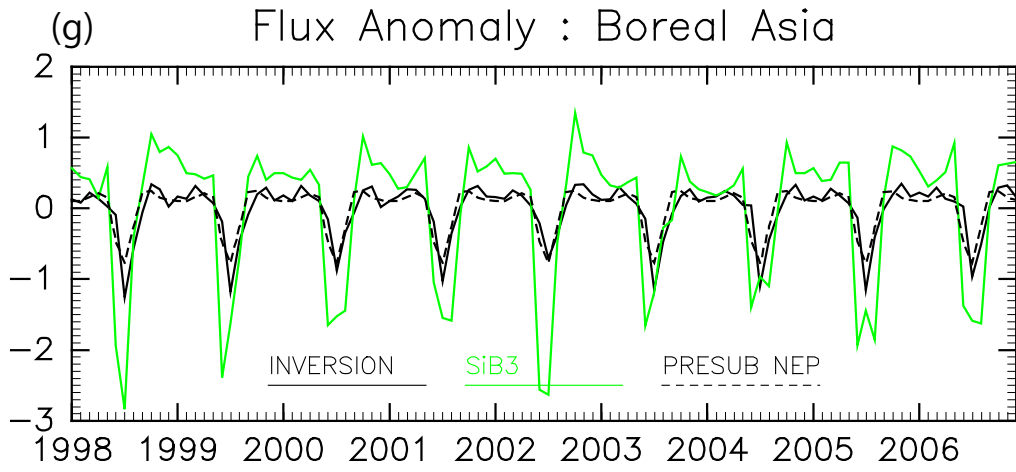


Fig. 2(continued)

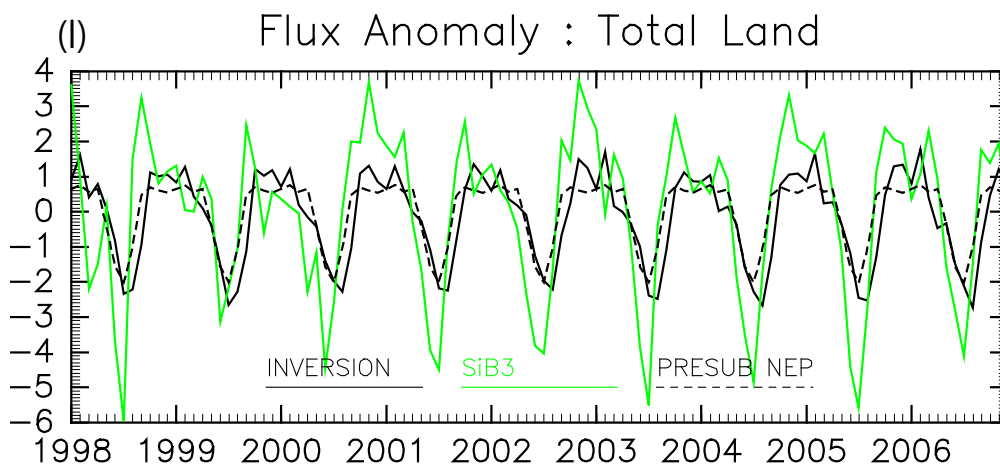
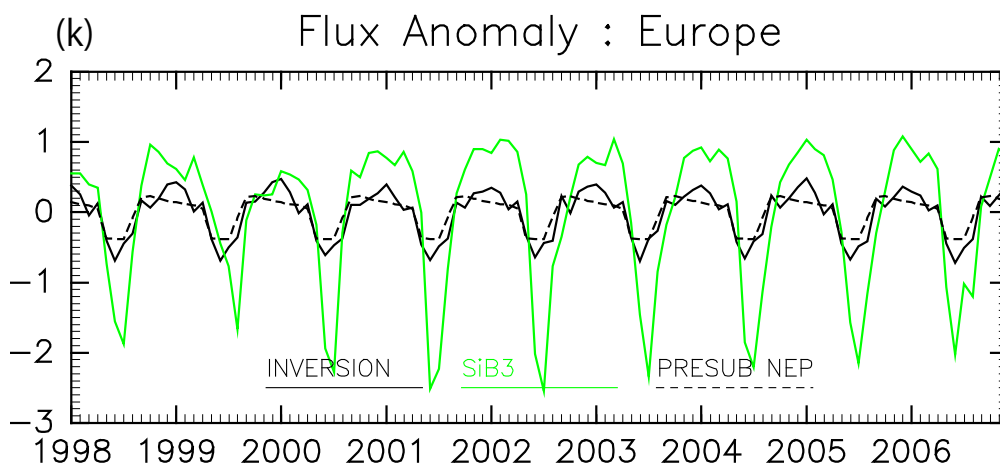
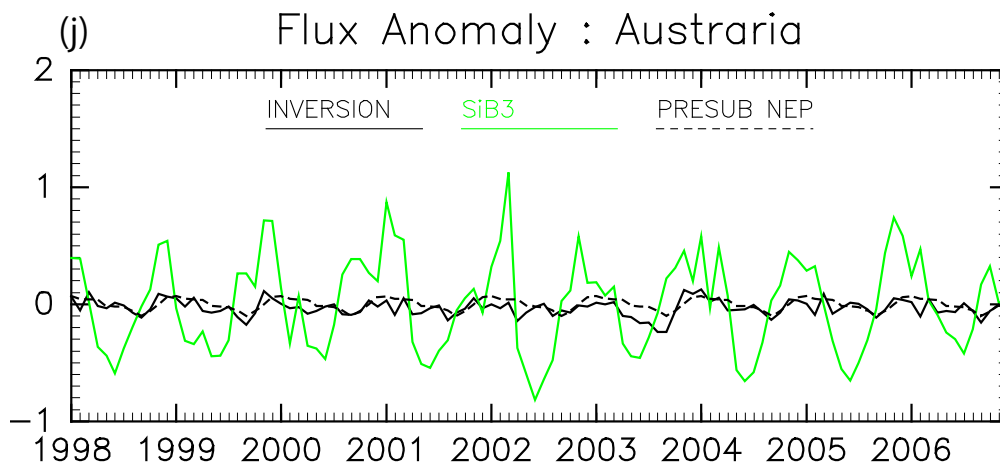


Fig. 2(continued)

における大気輸送モデルを用いたCO<sub>2</sub>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。逆転法での逆解析に用いられたGLOBALVIEW CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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。SiB3のフラックスデータはORNL/DAAC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CO<sub>2</sub>収支の研究, 防災研究所年報, 第42号B-1, pp. 385-396.
- 井口 敬雄(2011): 推定された全球および領域別CO<sub>2</sub>フラックスの10年規模トレンド, 防災研究所年報, 第54号B, pp. 283-291.
- Andres, R.J., Boden, T.A., and Marland, G. (2013): Annual Fossil-Fuel CO<sub>2</sub> 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](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 CO<sub>2</sub> fluxes, 1998-2003, *Global Biogeochemical Cycles*, Vol. 20, GB1002, doi:10.1029/2004GB002439.
- Baker, I.T., Denning, A.S., Prihodko, L., Schaefer, K., Berry, J.A., Collatz, G.J., Suits, N.S., Stockli, R., Philippot, A., and Leonard, O., (2009): SiB3 Modeled Global 1-degree Hourly Biosphere-Atmosphere Carbon Flux, 1998-2006. Data set. Available on-line [<http://daac.ornl.gov/>] from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A. doi:10.3334/ORNLDAAC/909.
- Conway, T. and P. Tans (2009): Trends in Atmospheric Carbon Dioxide – Global, [www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends](http://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.
- Gurney, K. R., Baker, D., Rayner, P., and Denning, S. (2008): Interannual variations in continental-scale net carbon exchange and sensitivity to observing networks estimated from atmospheric CO<sub>2</sub> inversions for the period 1980 to 2005, *Global Biogeochemical Cycles*, 22, GB3025, doi:10.1029/2007GB003082.
- 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 CO<sub>2</sub> sink weakening?, *Global Biogeochemical Cycles*, 25, doi:10.1029/2010GB003813
- Iguchi, T. (2011): Correlations between interannual variations of simulated global and regional CO<sub>2</sub> 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., Lorenson, 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 CO<sub>2</sub> 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>
- Randerson, J. T., Thompson, M. V., Conway, T. J., Fung, I. Y., and Field, C. B. (1997): The contribution of terrestrial sources and sinks to trends in the seasonal cycle of atmospheric carbon dioxide, *Global Biogeochemical Cycles*, 11(4), 535-560.
- 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 : 2015年6月11日)