

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(2) 領域別フラックスの季節変動と北半球中高緯度の寄与

Comparison of Carbon Fluxes from Terrestrial Ecosystems Estimated by Synthesis Inversion Method and Process-Based Model (2) Seasonal Cycle of Regional Flux and Contribution of Mid-high Latitudes on Northern Hemisphere

井口敬雄

Takao IGUCHI

Synopsis

Estimated regional monthly carbon fluxes using TransCom synthesis inversion method and SiB3 terrestrial ecosystem model were compared. The amplitude and the phase of the seasonal cycle of the regional fluxes are relatively similar in Boreal North America, Boreal Asia, Europe, and global total. But in Temperate North America, their phases are opposite. In every region, amplitude of the carbon flux calculated by SiB3 is larger than that by TransCom inversion method. Total carbon flux of these four regions dominates the global total terrestrial carbon flux except 1998, the year of strong El Niño.

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

大気中のCO₂ (二酸化炭素) は化石燃料の燃焼を主とする人間活動により年々増加しているが, 人間活動によって放出されるCO₂のうち, 大気中に蓄積されているのは2001年から2011年の期間で平均すると半分強にとどまっている(IPCC, 2014). 残りは再び地表面から吸収されていることになるが, 海洋とともに主要な吸収源と考えられているのが陸上生態系(植生)である. 陸上によるCO₂の吸収量は $2.5 \pm 1.3 \text{GtC/yr}$ (IPCC, 2014)で, その大部分は陸上生態系によるものと推定されるが, その詳細についてはまだ分かっていないことが多い.

陸上生態系からの炭素フラックス(CO₂の吸収および放出)の推定が困難な要因は, 植生の活動が気候の変動に対して非常に敏感なことにある(Iguchi, 2011). 化石燃料の燃焼によるCO₂の放出量は単調に増加しているが, それに対して大気中におけるCO₂

の蓄積量は年によって大きく変動している(Conway et al., 1994). これは気候の年々変動への応答としての陸上生態系の吸収量の変動によるものと考えられている. また, 全球規模の気候の温暖化が進行することによって, 陸上生態系全体が現在のCO₂の吸収源から, 将来は放出源に転じる可能性もある.

大気と陸上生態系との間の炭素交換量については, 実地調査に基づく陸上生態系の保有炭素量の推定, フラックスの直接測定に基づく推定, 陸上生態系モデルによるシミュレーション, 大気輸送モデルと観測値からの逆解析, といった様々な方法で推定が行われているが, 推定誤差が大きいというのが現状である. 前述の $2.5 \pm 1.3 \text{GtC/yr}$ (IPCC, 2014)という値についても, 放出量の推定値から海洋による吸収量の推定値を除いた残差に過ぎない. 陸上生態系からのCO₂フラックスを, その地域分布と年々変動まで詳細に見積もることは, 現在の炭素循環のメカニズムに関する理解を深め, さらに将来の大気中CO₂濃度と気

候変動を予測するうえでも必要な事である。

井口(2015)は陸上生態系からの炭素フラックスの推定誤差の実態とその要因を探る一歩として、逆転法の手法を用いて推定したフラックス値と、陸上生態系モデルのシミュレーションによって計算されたフラックス値の比較を行った。本論文ではその結果についてさらに詳しい解析と考察を行った。

2. 陸上生態系CO₂フラックス推定値の比較

本研究では、井口・木田(1999)の大気輸送モデルおよび GLOBALVIEW の大気 CO₂ 濃度データ(NOAA/ESRL, 2009)を用い、TransCom3 Layer2 (Gurney et al., 2004; Baker et al., 2006; TransCom, 2007) の逆転法の手法によって求めた領域別炭素フラックス推定値と、ORNL/DAAC(The Oak Ridge National Laboratory / Distributed Active Archive Center for Biogeochemical Dynamics)が公開している、陸上生態系モデル SiB3 によって計算された炭素フラックスデータ(Baker et al., 2009)との比較を行った。

尚、TransCom3 Layer2 の逆転法では、地球の表面を海陸それぞれ 11 の領域(Fig. 1)に分割し、推定フラックスは各領域からの月間フラックス値として求められる。そのため、SiB3 モデルの計算値についても、TransCom3 と同じ領域について月間合計したフラックスを比較に用いている。

また、逆転法による陸上からのフラックス推定値

には、化石燃料起源フラックスとその事前推定値との差や、火災によるフラックスも含まれている。こうした成分を補正するため、ORNL/CDIAC (Carbon Dioxide Information Analysis Center) の化石燃料起源 CO₂ フラックスデータ (年間値) (Marland et al., 2009; Andres et al., 2013), 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)を用いた。

3. 結果

TransCom逆転法とSiB3陸上生態系モデルとの炭素フラックス推定値 (TransCom領域別, 月間値) の比較については井口(2015)に紹介しているので詳細な説明は省くが、SiB3のモデル計算結果は年間の合計値が近似的に0になるように作られているため、主に季節変動の比較となった。比較の結果、

- (i) フラックスの季節変動の振幅は、全ての領域および全球合計についてSiB3モデルによる計算結果の方が逆転法の結果より大きい。
 - (ii) フラックスの季節変動の位相については、SiB3の結果ではほとんどの領域で確認できるのに対し、逆転法の結果では、北半球中高緯度の領域と全球を除くとノイズに隠れ確認できないものが多かった。
- という結果が出た。

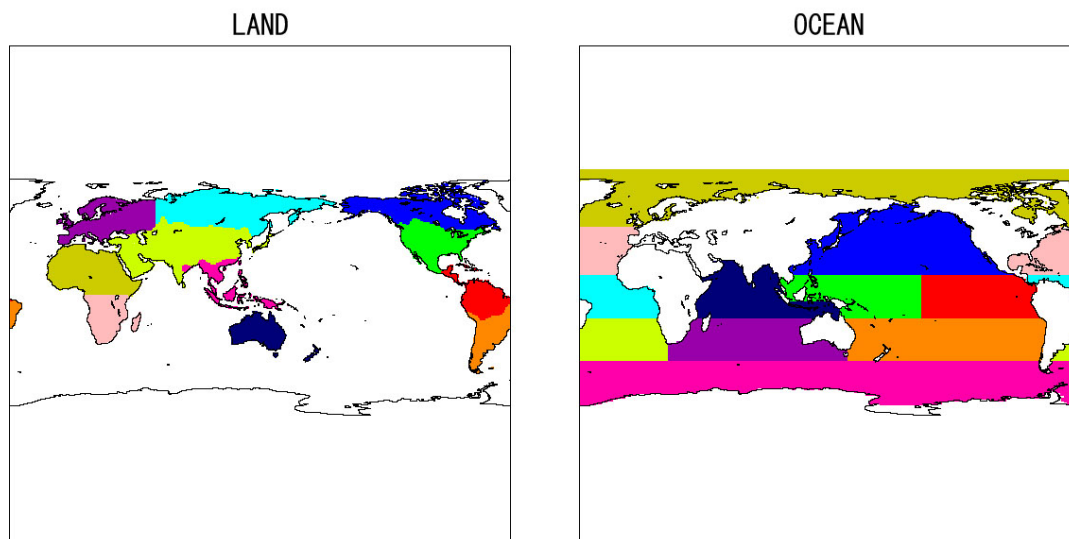


Fig. 1 TransCom3 Layer2 region map of land (left) and ocean (right).

4. 結果についての考察

4.1 全球フラックスの季節変動の振幅について

前章で述べた通り、SiB3により計算されたフラックスの季節変動は、全ての領域および全球合計において逆転法による推定値より大きい(井口, 2015)。そこで、逆転法でも使用した大気輸送モデル(井口・木田, 1999)を用い、両者のフラックスデータを入力値とした2通りのシミュレーションを行った。

シミュレーションの結果より、ハワイ Mauna Loa の位置における濃度の変動の振幅を Fig. 2 に示す。Mauna Loa 観測所は太平洋の真ん中の高度 3000m に位置し、そこでの観測値は地表面濃度の全球平均に近い事が知られている。Fig 2 において、赤線が逆転法によるフラックス推定値を用いたシミュレーション、青線が SiB3 モデル計算フラックス値を用いたシミュレーション、黒線が GLOBALVIEW データである。これらは、季節変動のみの比較を行うため、トレンドを除去した上でアノマリの比較を行っている。Fig. 2 でも、SiB3 の結果を用いたシミュレーションにおける CO₂濃度の振幅が逆転法の結果を用いたシミュレーションおよび GLOBALVIEW CO₂濃度データの振幅より大きいという結果が出た。逆転法によるフラックスは、シミュレーション値と観測値の自乗和が最小になるよう求められており、同じモデルでシミュレーションを行ったからといって必ずしも観測値と一致する濃度が計算される訳ではないが、このプロットでは比較的近い値が出ている。ただ、この結果から SiB3 モデルによるフラックスの季節変動が現実より大きいと判断するのは輸送モデルが正確であるという前提の上であり、その検証のためには異なる複数の輸送モデルを用いたシミュレーションも必要になってくる。

4.2 領域別フラックスの季節変動について

井口(2015)で示した領域別月間フラックスのプロットでは、細かい振動(ここではノイズと呼ぶ)が多く、季節変動が分かりにくいという問題点があった。そこで、長期トレンドを除去し、アノマリ成分を求めた上で6か月の移動平均をとることによってノイズを除去し、季節変動が分かりやすいようにした。その結果を Fig. 3 に示す。

逆転法と SiB3 とで位相が比較的良好に合っていたのは(a)北米寒帯、(g)アジア寒帯、(k)ヨーロッパ、

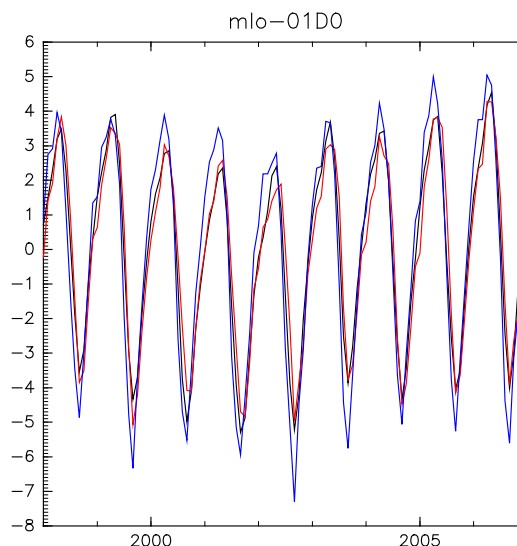
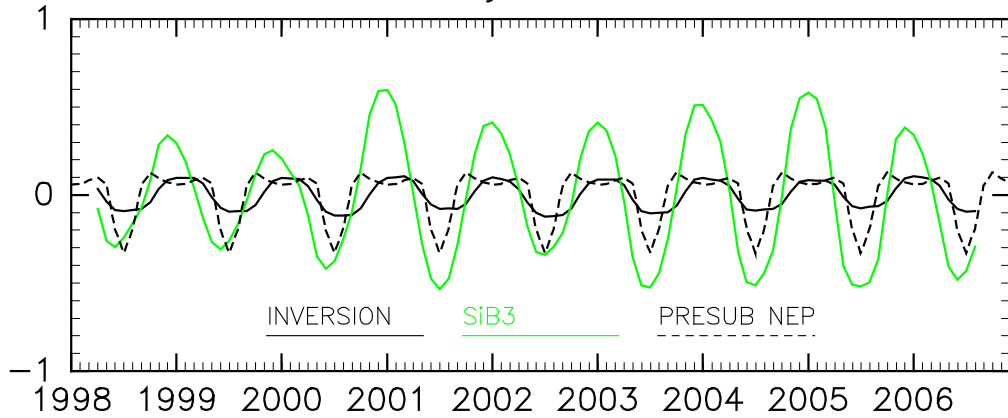


Fig. 2 Anomaly of inversed CO₂ (red line), simulated CO₂ by SiB3 (blue line), and GLOBALVIEW CO₂ data (black line) at Mauna Loa.

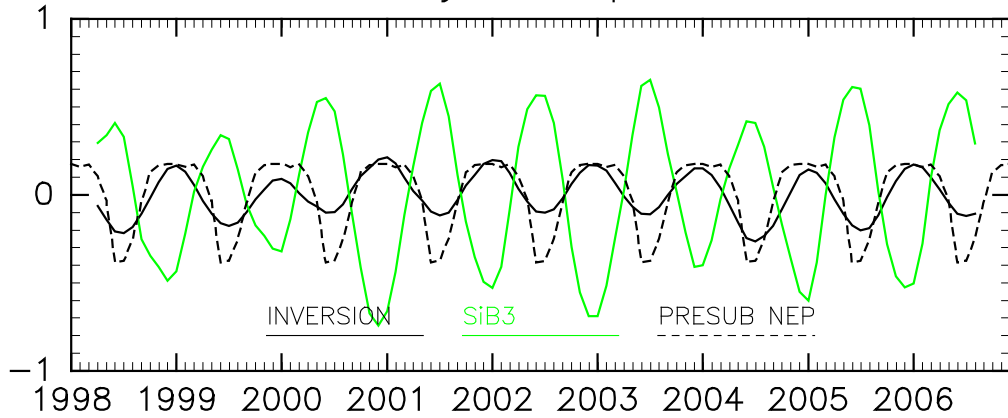
(1) 全球であった。(d) 南米温帯も比較的位相が合っているが、逆転法の方は徐々に振幅が小さく、判別しづらくなっている。一方の SiB3 は季節変動が小さくなっておらず、その違いが興味のあるところである。次に位相に明確なずれが認められるのが(c) 南米熱帯、(e) アフリカ北部、(f) アフリカ南部、(h) アジア温帯、さらに逆位相といっても良いのが(b) 北米温帯、(i) 熱帯アジアである。この内(b) 北米温帯については、北半球中緯度における植生活動の実態から、このようなフラックスの位相は考えにくく、何かしらデータに誤りがある可能性が高い。(j) オーストラリアについては逆転法の振幅が非常に小さく、SiB3 との比較ができなかった。

また、逆転法により推定されたフラックスは事前推定フラックスに大きく影響を受けている可能性が指摘されている(Dargaville et al., 2002, 2006)が、本研究では(c) 南米熱帯、(d) 南米温帯、(e) アフリカ北部、(f) アフリカ南部で事前推定と逆転法結果との間に位相のずれが見られた。これらの地域での SiB3 の位相は事前推定値に近い場合((c) 南米熱帯、(f) アフリカ南部)もあれば逆転法結果に近い場合((d) 南米温帯)、どちらも合わない場合((e) アフリカ北部)のいずれのケースも有った。振幅については、逆転法結果の振幅は事前推定の振幅から大きく変わることはなかった(ただし Fig. 3 の逆転法結果は移動平均値であり振幅は小さくなっている。元のフラックス値については井口(2015)を参照)。

(a) Carbon Flux Anomaly : Boreal North America



(b) Carbon Flux Anomaly : Temperate North America



(c) Carbon Flux Anomaly : Tropical America

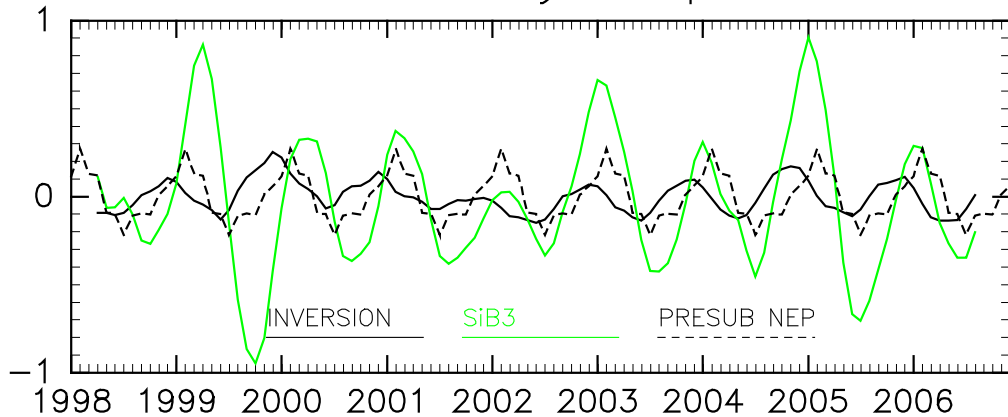


Fig. 3 6-months simple moving average (SMA) of monthly regional carbon flux estimated by TransCom inversion method (the solid black line) and SiB3 biosphere model (the solid green line). The dotted black line is presubscribed NEP flux of TransCom inversion method (not SMA). The regions are TransCom land regions showed in the left side of Fig. 1.

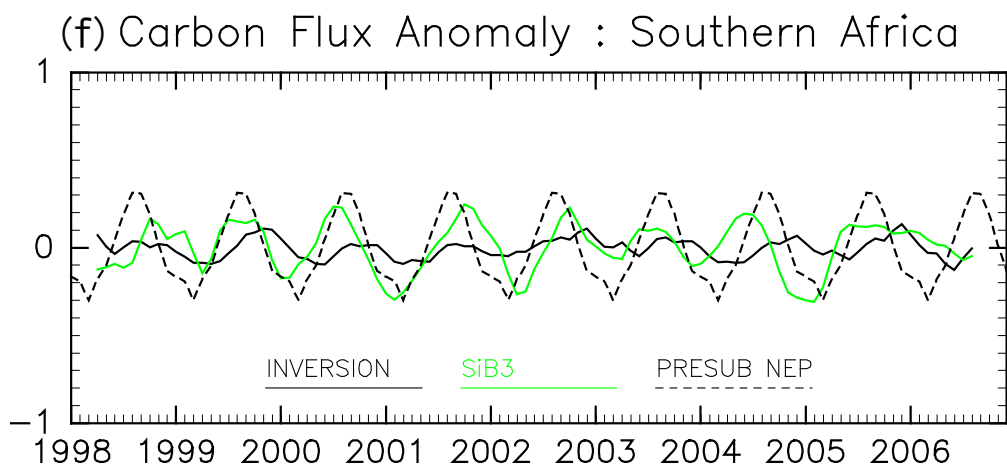
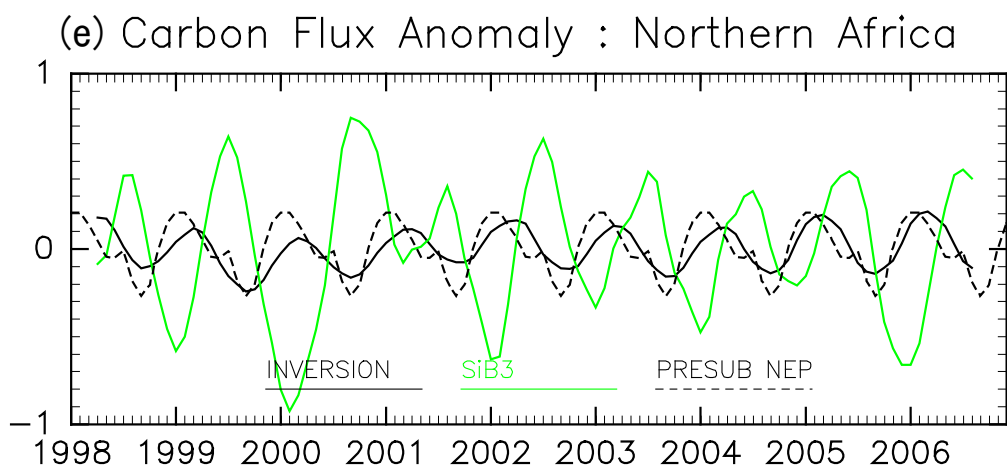
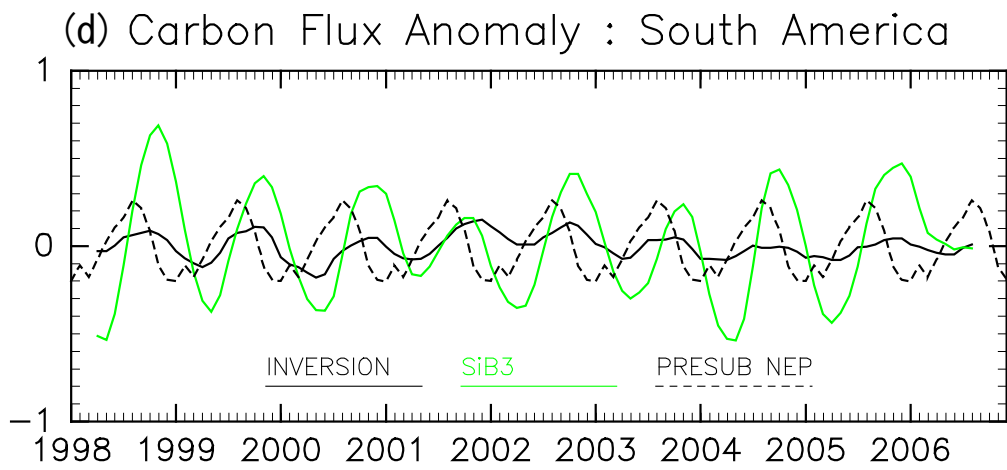


Fig. 3(continued)

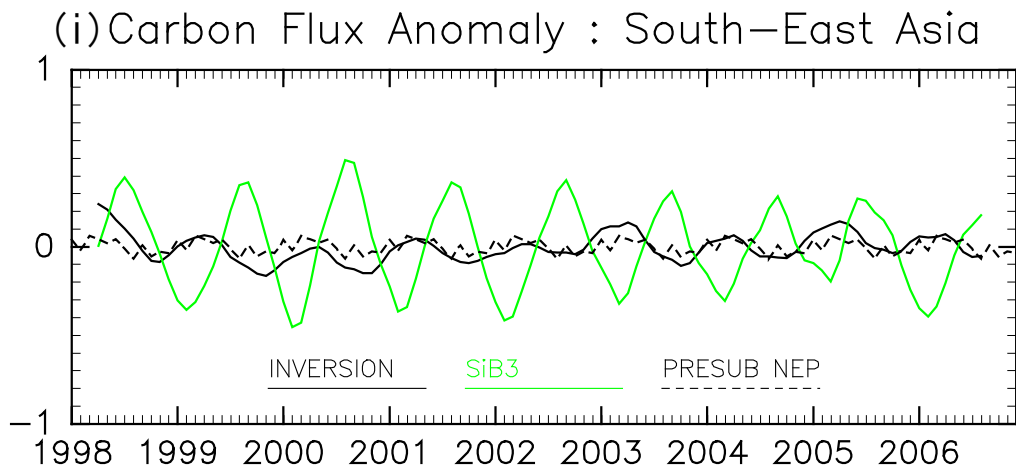
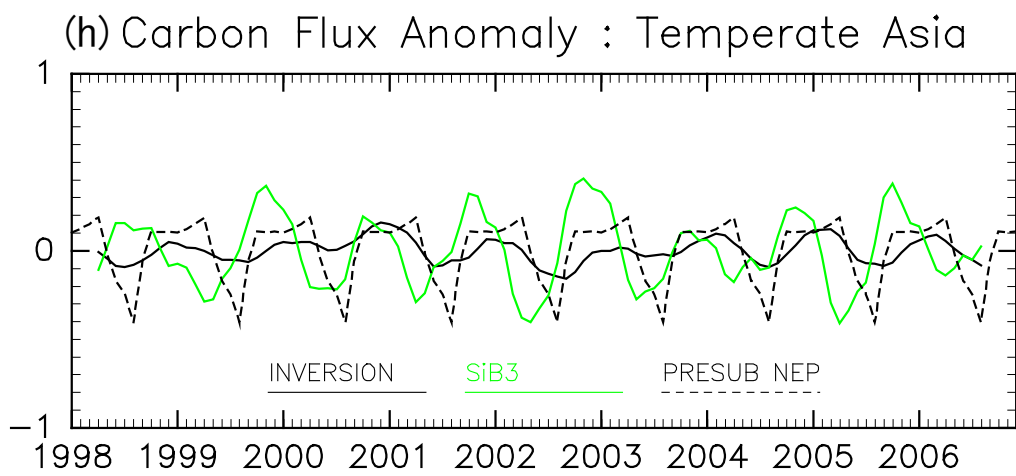
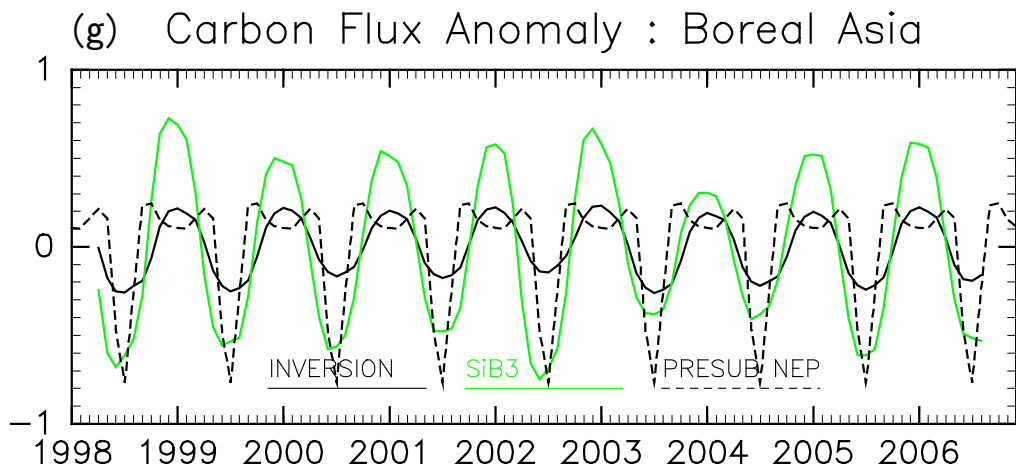


Fig. 3(continued)

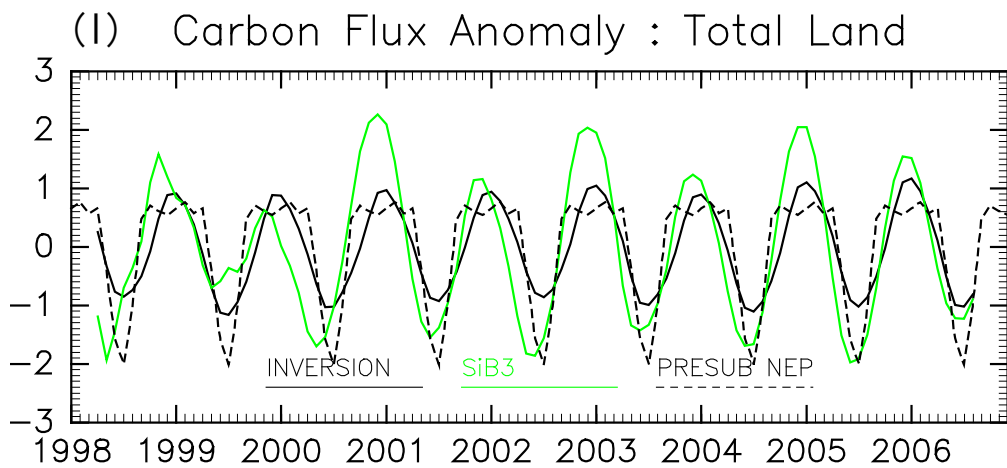
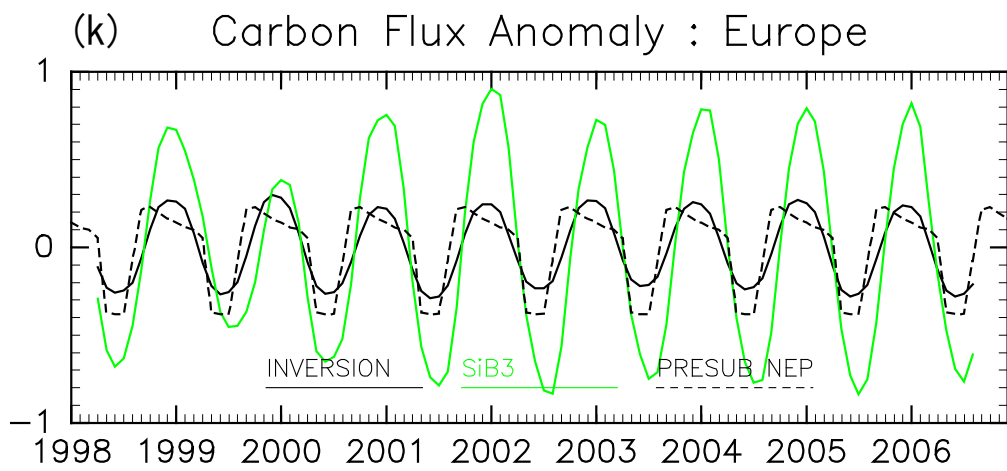
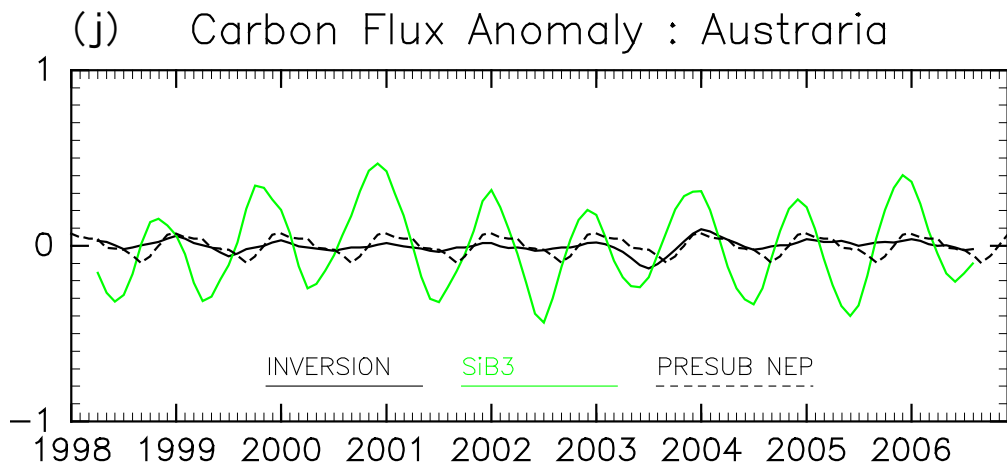


Fig. 3(continued)

4.3 北半球中高緯度からのフラックスの重要性について

陸上生態系による CO₂ 吸収において、北半球高緯度はこれまで重要な役割を果たしてきたと考えられてきた(McGuire et al., 2009; Hayes et al., 2011). Fig. 4 に、北半球中高緯度の領域 ((a)北米寒帯, (b)北米温帯, (g)アジア寒帯, (k)ヨーロッパ) における年間フラックスの合計 (青線) と、全球合計の年間フラックス (黒線) のプロットを示す. これら 4 つの領域は逆転法においていずれもフラックスが明確な季節変動を示し, (b)北米温帯を除けば位相も良く合っている. さらにその合計吸収量は全球合計した陸上生態系の吸収量の大部分を占めていることを Fig. 4 は示している.

その中で例外的なのは 1998 年の年間フラックス値である. 北半球中高緯度の合計フラックスが 2GtC を超える吸収なのに対し, 全球合計はやや放出となっている. この年は強いエルニーニョの観測された年であるが, このように北半球中高緯度以外の領域から強いフラックスが出た年は推定誤差が大きくなる可能性がある. この年については今後更に詳細に調べていきたい.

5. まとめ

逆転法および陸上生態系モデルを用いたフラックスの推定値について解析を進めた結果, 季節変動について領域毎の詳細な振幅や位相の違いが見られた. また, 大気中CO₂収支における北半球中高緯度の陸上生態系の重要性が示されたが, エルニーニョの年には他の領域が重要な影響を及ぼすことも明らかになった. 今後は他の大気輸送モデルを用いた逆転法の結果や, 他の陸上生態系による炭素フラックスとの比較を行うとともに, エルニーニョのような特異な気象の年のフラックス推定値についての詳細な調査を行っていきたい. こうした研究によって推定誤差が大きくなる領域, 時期やその要因を明らかにして行くことが誤差の減少につながると期待される.

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.

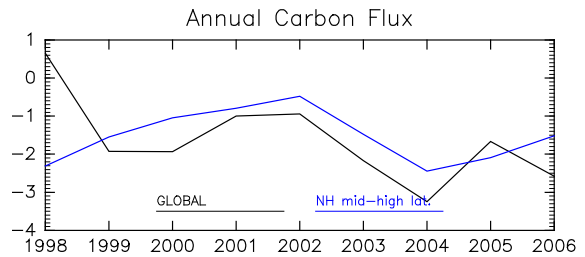


Fig. 4 Sum of carbon flux from Northern Hemisphere mid-high latitude regions (blue line) and global total land carbon flux (black line).

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. 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(2015): 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, 防災研究所年報, 第58号B, pp. 137-145.
- 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.
- Baker, I.T., Denning, A.S., Prihodko, L., Schaefer, K.,

- Berry, J.A., Collatz, G.J., Suits, N.S., Stockli, R., Philpott, 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. J., P. P. Tans, L. S. Waterman, K. W. Thoning, D. R. Kitzis, K. A. Masarie, and N. Zhang (1994), Evidence for interannual variability of the carbon cycle from the National Oceanic and Atmospheric Administration/Climate Monitoring and Diagnostics Global Air Sampling Network, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 99, No. D11, pp. 22,831-22,855.
- Dargaville, R., A. D. McGuire, and P. Rayner (2002), Estimates of largescale fluxes in high latitudes from terrestrial biosphere models and an inversion of atmospheric CO₂ measurements, *Clim. Change*, 55, 273–285, doi:10.1023/A:1020295321582.
- Dargaville, R., D. Baker, C. Rödenbeck, P. Rayner, and P. Ciais (2006), Estimating high latitude carbon fluxes with inversions of atmospheric CO₂, *Mitig. Adapt. Strategies Global Change*, 11(4), 769–782, doi:10.1007/s11027-005-9018-1.
- 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 inter-comparison: 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., 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 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>
- 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 : 2016年6月13日)