

GOSAT SWIRデータとTCCONデータにおける CO₂カラム濃度値(XCO₂)の比較

Comparison of CO₂ Column Fractions between GOSAT SWIR Data and TCCON Data

井口敬雄

Takao IGUCHI

Synopsis

To investigate the bias of GOSAT column CO₂ fraction (XCO₂) retrieval data (SWIR), the data was compared with TCCON data. The time series of daily averaged XCO₂ of both data sets showed differences and suggested the existence of the bias of GOSAT data. But the characteristics of the discrepancies vary with TCCON stations. In the time series of the specific station, the characteristics of the discrepancies changes year by year. Correlations between the difference of XCO₂ between GOSAT and TCCON data (Δ XCO₂) and four parameters are also verified. Among the parameters, the difference of surface pressure between retrieval data and a priori data showed higher correlation with Δ XCO₂.

キーワード: CO₂, GOSAT, TCCON, バイアス

Keywords: CO₂, GOSAT, TCCON, bias

1. はじめに

陸上生態系は海洋とともにCO₂の主要な吸収源であり、化石燃料の燃焼による大気中CO₂濃度の上昇を緩和していると考えられている(IPCC, 2014)が、その実態については分かっていないことが多い。陸上生態系と大気間のCO₂フラックスについて、その年間量の領域別分布、領域ごとの季節変動、年々変動および長期トレンドといった詳細を明らかにすることは、陸上生態系の活動と気候の変動との関係についての理解を深め、ひいては将来の大気中CO₂濃度の予測を向上させることにも繋がるのが期待される。

地表面からのCO₂フラックスを推定する方法の一つに逆転法(Synthesis Inversion Method)がある(井口, 2015, 2016)。これは大気輸送モデルを用いたシミュレーションの結果が、観測値に尤も近くなるような地表面フラックスを逆解析によって求める手法であるが、観測点の数が少なく、さらに先進国に集中しているため、観測点が疎らな領域や空白地域が存在していることが推定誤差の大きな原因となっていた

(Bruhwiler et al., 2011)。

この観測点が少ないという問題点を補うものとして期待されるのが衛星によるCO₂濃度観測データである。地上の定点観測と比べ、一か所で連続した観測はできない、測定の精密さで劣る、気柱(カラム)内の濃度という形でしかデータが得られないという欠点はあるものの、観測点の空白地域や疎らな領域をカバーできるのは大きな魅力であり、推定誤差の低減が期待できる(Chevallier et al., 2007)。

ただ、衛星観測データにはもう一つ、バイアスが存在するという大きな問題点が残されている。バイアスを残したままのデータを用いて推定を行うことは重大な誤差の要因となる(Chevallier et al., 2007)。そのため、Inoue et al.(2016)その他の研究では、統計的な手法を用いてバイアスの修正を試みている。Reuter他(2014)は、0.2~0.3ppm程度のバイアスでも正確なフラックスの推定が妨げられるが、これ以下のレベルまでバイアスの除去を行うのは大変に困難であるとしている。

本論文では、衛星による観測データから導出され

たCO₂カラム濃度値(XCO₂)のバイアスを確認するため、GOSAT SWIR XCO₂データとTCCONデータの比較および、両者の差と関連パラメータとの相関解析を行った結果について紹介する。

2. 使用データ

2.1 GOSAT SWIR XCO₂データ

GOSAT(Greenhouse Gases Observing SATellite)は代表的な温室効果ガスであるCO₂、CH₄観測を主目的とし、2009年に打ち上げられた衛星である(NIES, 2017; JAXA, 2017)。

GOSATは太陽同期軌道を回りながら、地表面で反射される太陽光近赤外線(SWIR)および、地面や大気から放射される熱赤外線(TIR)のスペクトルを測定する。測定されたスペクトル吸収から逆解析の手法で導出されたリトリーバルがCO₂カラム濃度のデータである(Yoshida et al., 2011, 2013)。

本研究では、GOSAT Data Archive Service (GDAS)で提供されているリトリーバルプロダクトである、L2 CO₂カラム値(SWIR)データ(GDAS, 2017)を用いた。

2.2 TCCONデータ

TCCON(The Total Carbon Column Observing Network)は、地上に設置された温室効果ガスカラム濃度の観測ネットワークである。TCCON 観測点の分布をFig. 1に示す。上空に向けたセンサーで太陽光近赤外線のスペクトルを測定し、その吸収からCO₂、CH₄のカラム濃度を算出する(Wunch et al., 2010, 2011)。

カラム値を求める手法は基本的にはGOSATと同様であるが、観測点において晴れた日は連続的に短いインターバルで観測できる(GOSATだと、その場所の上空を通過するのは1日の内わずかな時間帯のみで、しかもその時雲の無い晴れた状態でなければデータが得られない)、カラム値の導出に必要な気圧などの地上データを観測によって正確に得られる(GOSATの場合、地上データはアプライオリのデータを用意する必要がある)等の利点があり、GOSATに比べてバイアスの要因が少ない。

本研究では、TCCON Data Archive サイト(ORNL, 2014)から取得したGGG2014データセットをリファレンスとして、GOSATデータとの比較を行った。尚、取得したGOSAT、TCCONのデータはどちらもバイアスの修正は行われていない。

3. データの比較および解析方法

本論文では、GOSATとTCCONのXCO₂データの比較および、両者の差と各種パラメータとの相関解析を行った。本章ではその手法について述べる。

3.1 GOSATとTCCONデータのXCO₂時系列比較

前章で述べた通り、GOSATとTCCONでは観測の形態が異なる。そのため、両者の時系列を比較するに当たっては以下のルールを定めた。

- (i) GOSATデータの内、観測地点の緯度および経度がTCCON観測点の±5.0°以内のGOSATデータ(ただし陸上のみ)を使用する。



Fig. 1 Map of TCCON stations. Adopted from “TCCON Data Archive” homepage (<http://tccon.ornl.gov/>)

- (ii) 同一日（現地時間）に観測されたGOSATデータは平均値をとる。
- (iii) 同一日（現地時間）に観測されたTCCONデータは平均値をとる。

3.2 ΔXCO_2 とパラメータとの相関解析

Inoue et al. (2016)は、GOSAT XCO_2 データのバイアス（TCCON XCO_2 データとの差）について、(a)エアロゾルの光学的厚さ、(b) リトリーバル地上気圧とア priori地上気圧の差、(c)太陽および衛星の天頂角によって変化する光路の大気質量、(d)アルベド、の4つのパラメータの影響が大きいと指摘している。

そこで、Inoue et al. (2016)に従い、以下の条件を満たすデータについて、GOSAT と TCCON の XCO_2 データとの差(ΔXCO_2)と上記の4つのパラメータとの相関を調べた。

- (i) GOSATデータは、観測地点の緯度および経度がTCCON観測点の $\pm 5.0^\circ$ 以内にあるもの（ただし陸上のみ）を選ぶ。
- (ii) (i)を満たすGOSATデータに対して、観測時刻が前後30分以内の最寄りのTCCON観測点におけるデータを平均する。

また、(a)エアロゾル光学的厚さは XCO_2 の導出に主に用いられる $1.6 \mu m$ のリトリーバル値を、(c)大気

質量は Inoue et al.(2016)に従い、太陽の天頂角 θ と衛星の天頂角 ϕ を用いて $airmass = (1/\cos \theta) + (1/\cos \phi)$ の値を用いた。(d)アルベドも Inoue et al.(2016)に従って O_2-A バンドのアルベドの値を用いた。

4. 結果

4.1 GOSATとTCCONデータの XCO_2 時系列比較

TCCON観測点の中から、Tsukuba（日）、Lamont（米中部）、Park Falls（米北東部）の比較結果について紹介する。LamontとPark FallsはTCCON観測点の中では比較的Tsukubaに緯度が近く、内陸に位置する。三つの観測点の中ではTsukubaの観測が最も遅く2011年に始まっているので、2011～2015年のデータについてプロットする。

4.1.1 Tsukuba

Fig. 2に、TsukubaにおけるTCCONデータ（青の+印）とGOSATデータ（赤の*印）のプロットを示す。

2012-13年、2013-14年の濃度上昇期（植物の光合成活動が弱くなる秋から春まで）において、明らかにGOSATのデータが高いことがわかる。それが2014-15年は両者の差が小さくなり（依然としてGOSATの方が高いが）、2015-16年には逆にGOSATの方が低くな

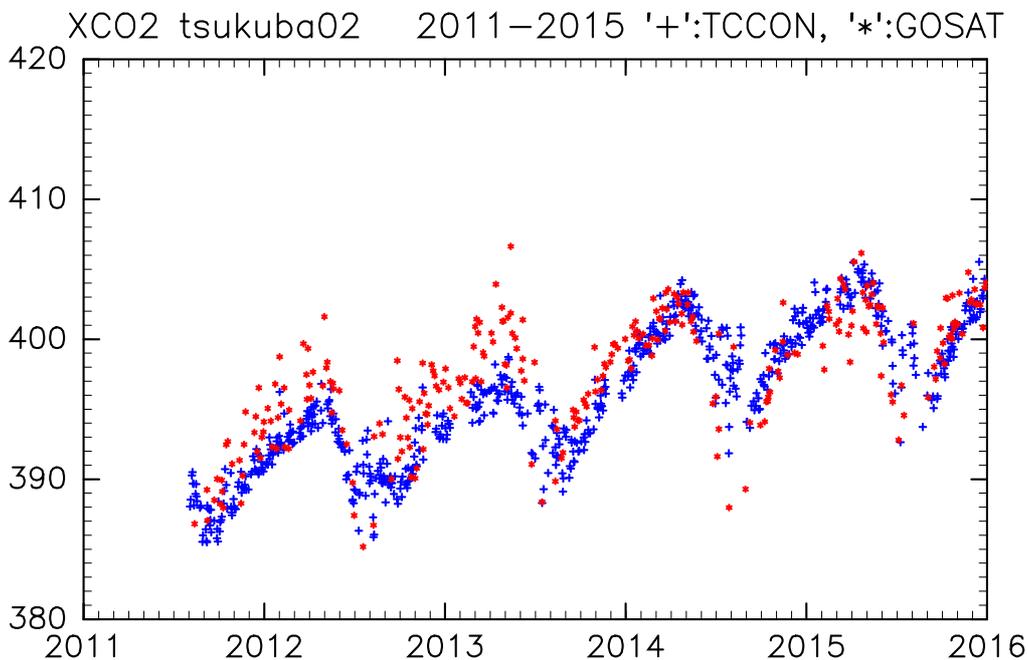


Fig. 2 Plot of GOSAT(*) and TCCON(+) XCO_2 data at Tsukuba (36.05N, 140.12E). GOSAT data is within $\pm 5.0^\circ$ of the station. The plot data is daily mean.

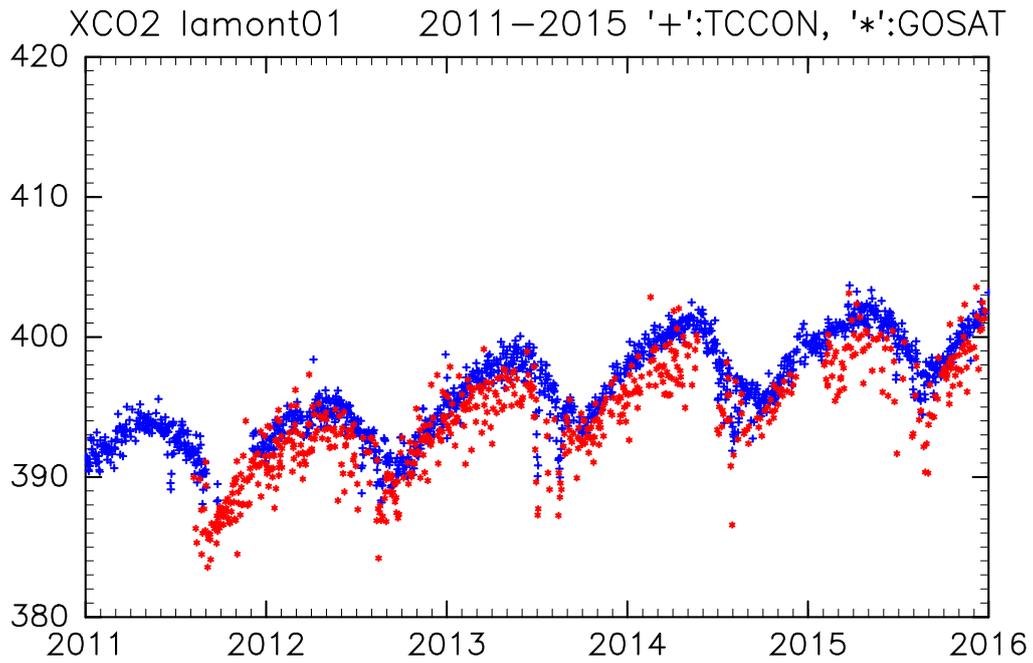


Fig. 3 Same as Fig. 2 at Lamont (36.6N, 97.49W).

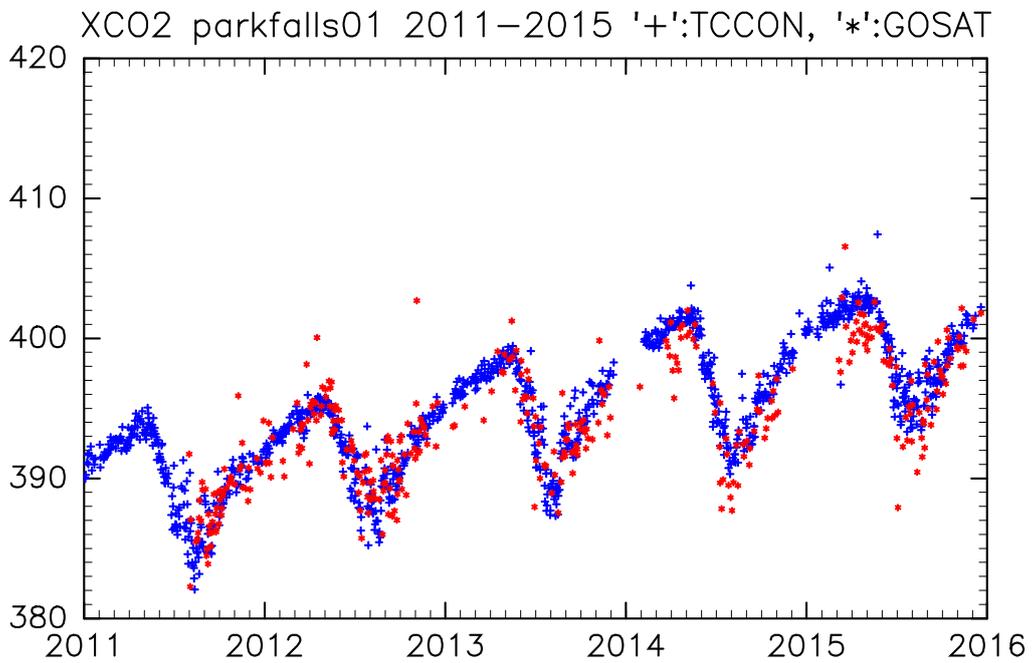


Fig. 4 Same as Fig. 2 at Park Falls (45.94N, 90.27W).

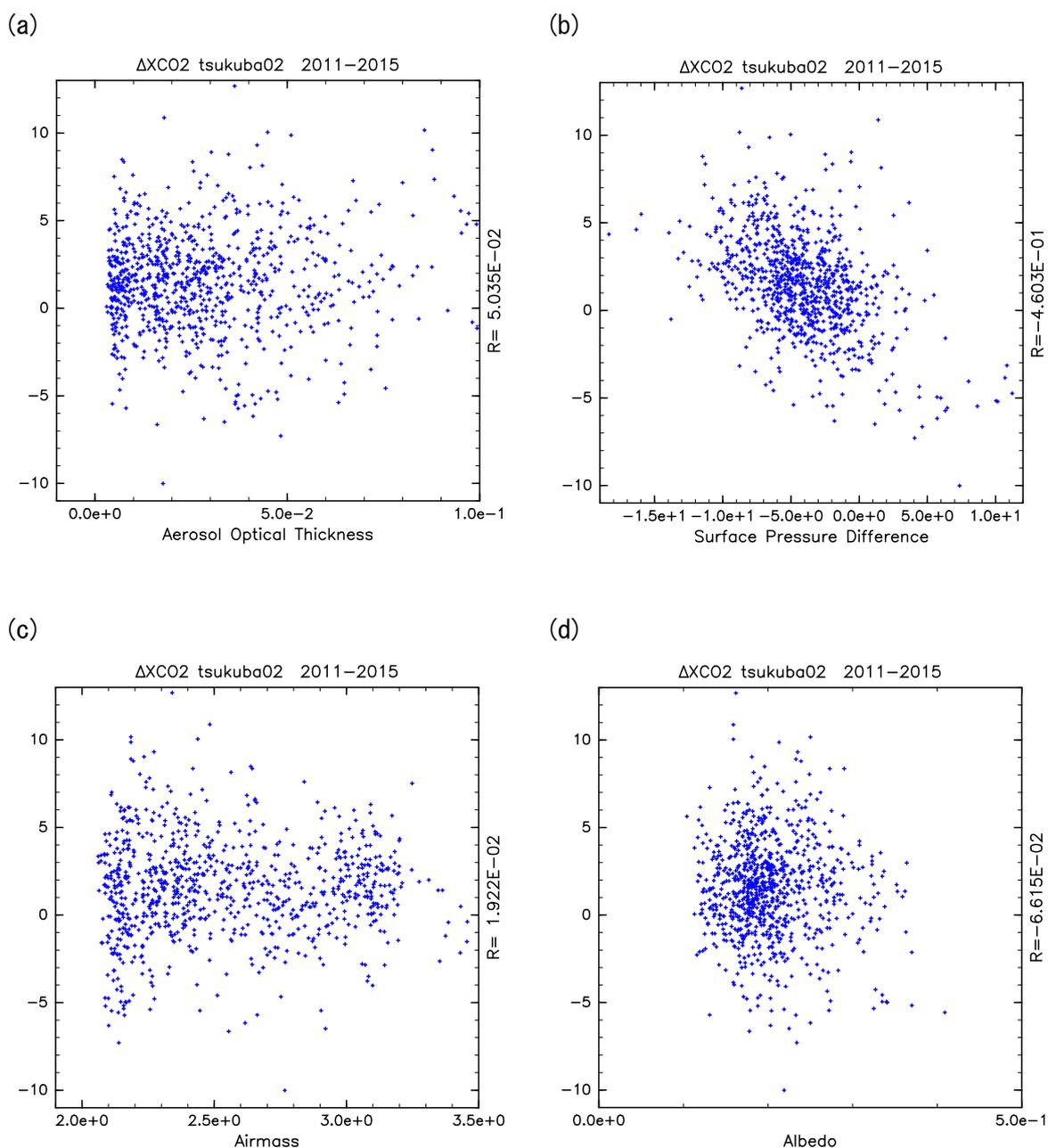


Fig. 5 Scatter diagram between ΔXCO_2 (difference of XCO_2 between GOSAT and TCCON data) and (a) retrieved aerosol thickness, (b) the difference between the retrieved and a priori surface pressure, (c) airmass, and (d) surface albedo for the O_2 A-band at Tsukuba (36.05N, 140.12E). GOSAT data is within $\pm 5.0^\circ$ of the station. To calculate ΔXCO_2 , TCCON data is averaged for 60 minutes around the time of each GOSAT data. On the right side of each diagram, correlation coefficient is shown.

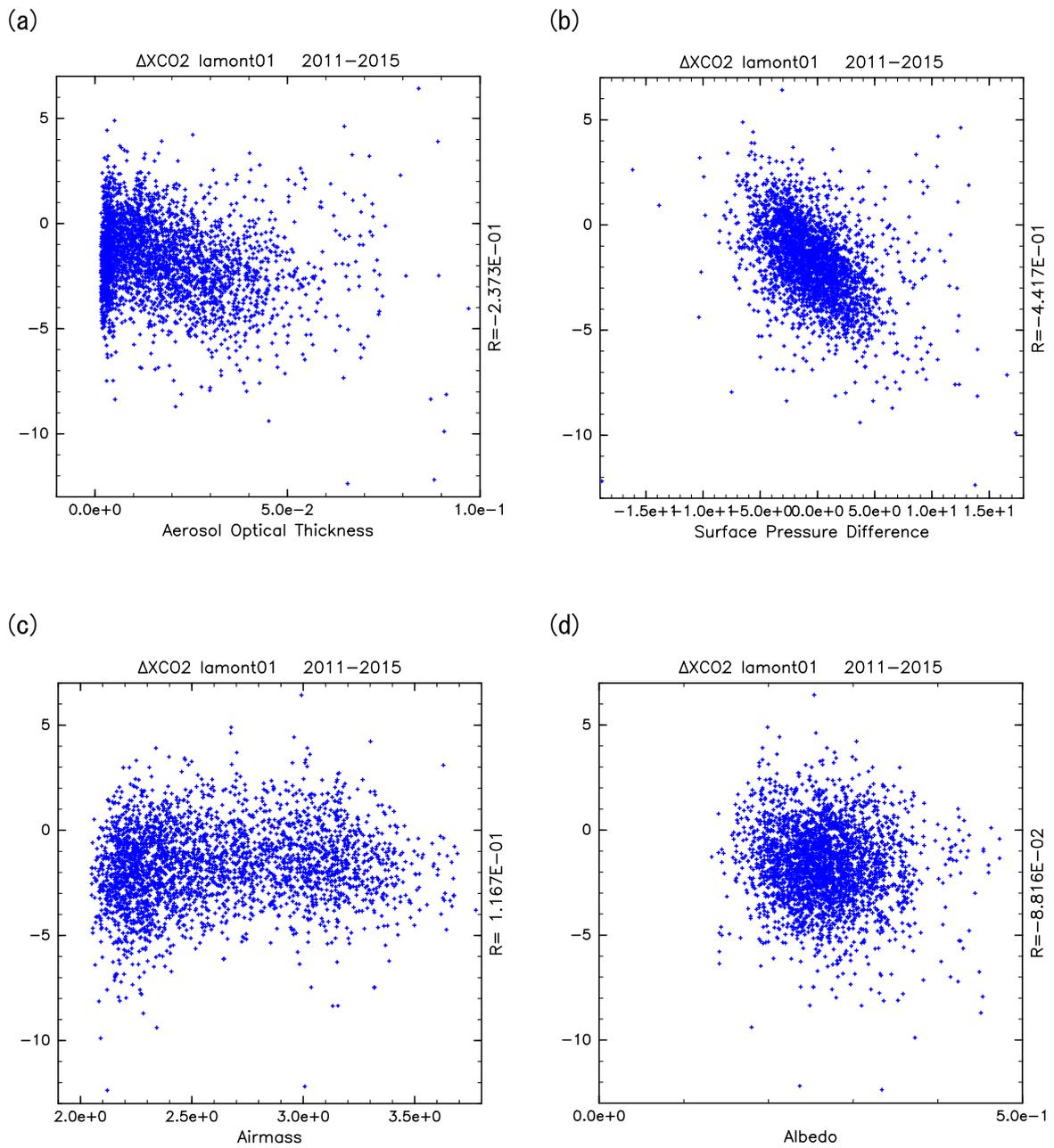


Fig. 6 Same as Fig. 5 at Lamont (36.6N, 97.49W).

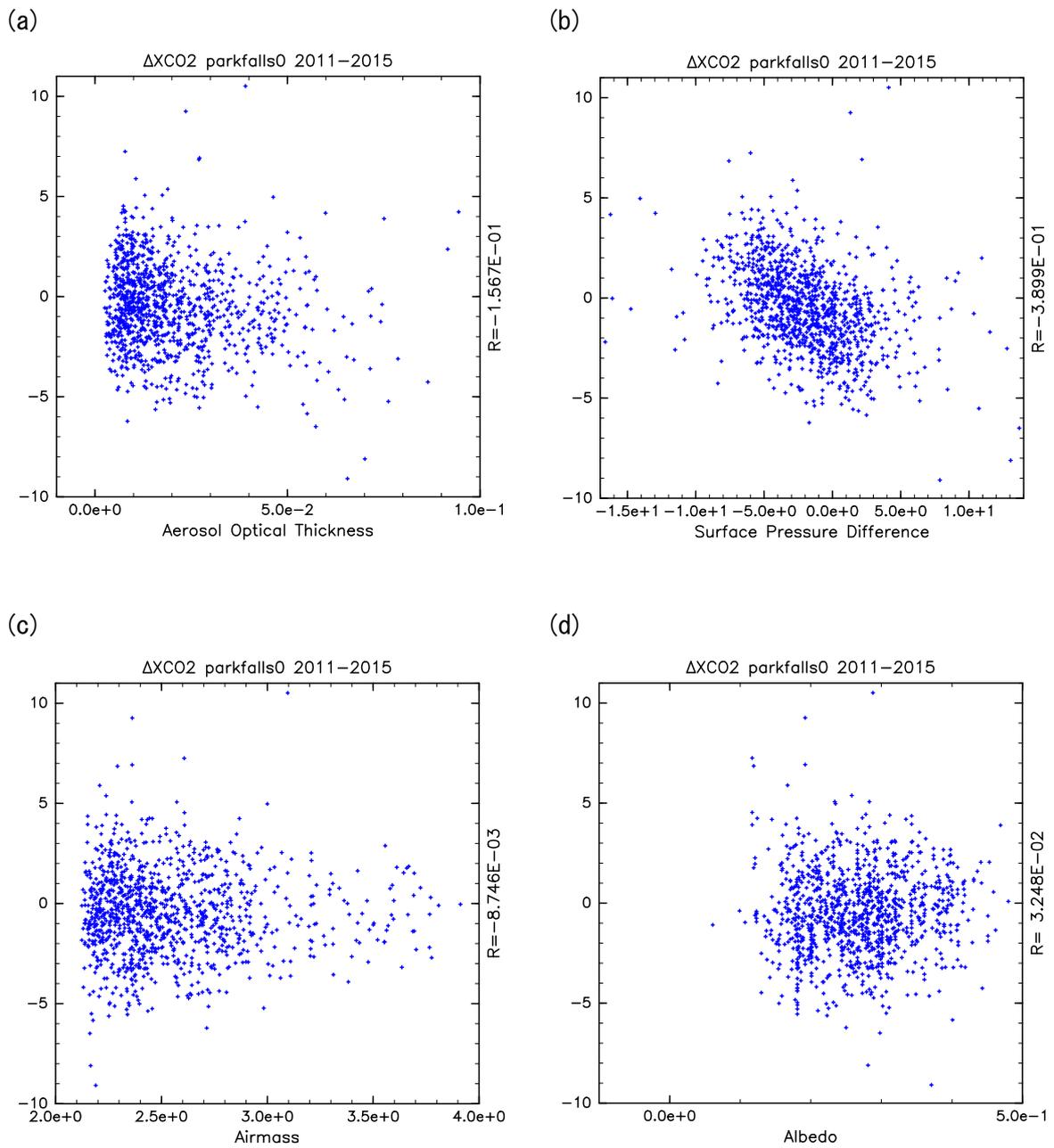


Fig. 7 Same as Fig. 5 at Park Falls (45.94N, 90.27W).

っている。2016年は部分的にしかプロットされていないが、再びGOSATの方が高くなっているように見える。濃度の減少期（春と夏）は雲が多いせいか、GOSATのデータが少なくTCCONとの明確な差は判別できなかった。

4.1.2 Lamont

Lamont(Fig. 3)では、プロット期間全体を通してGOSATデータの値の方がTCCONよりも低いという結果が示されている。こちらの方は、TsukubaやPark Fallsのように、年によって両データの濃度の大小が入れ替わったり、差が大きく変化するような変動は見られなかった。

4.1.3 Park Falls

Park Falls(Fig. 4)では、Tsukuba, Lamontに比べ、GOSATのデータ数が少ないが、プロットされた分で判断すると、GOSATとTCCONの差は前出の二つの観測点に比べて小さいようである。ただ、2013年の冬以降は、GOSATがTCCONに比べて濃度が低くなる傾向が見られる。

4.2 ΔXCO_2 とパラメータとの相関解析

Fig. 5~Fig. 7に、それぞれTsukuba, Lamont, Park Fallにて観測された ΔXCO_2 を縦軸に、(a)エアロゾルの光学的厚さ、(b)リトリーバル地上気圧とアプリアリ地上気圧の差(ΔP_S)、(c)太陽および衛星の天頂角によって変化する光路の大気質量、(d)アルベドを横軸にした散布図を示す。各図の右側には相関係数を示してある。

Fig. 5~Fig. 7では、いずれの観測点においても、(b)の ΔP_S と ΔXCO_2 の間に明確な相関が見られた。これはInoue et al.(2016)でも同様の結果が示されている。次いで、(a)のエアロゾルの光学的厚さに対しては、Lamont, Park Falls, Tsukubaの順に相関係数が高かったが、統計的に有意とは認められなかった。その他のパラメータについては相関が認められなかった。

5. まとめと今後の課題

全体の傾向として、GOSATデータの方がTCCONデータよりもばらつきが大きいですが、それでも両者の間には明確な差が確認され、バイアスの存在を示す結果となっている。

ただ、両者の違いの季節変動等の特性は、TCCON観測点によって異なり、また同一のTCCON観測点においても、年によって変動が見られる。

GOSATデータとTCCONデータの XCO_2 の差と、関

連するパラメータとの相関については、地上気圧データのリトリーバルとアプリアリの差とのみ有意な相関が認められた。次いで、エアロゾルの光学的厚さとの間に高い相関係数が示されたが、TCCON観測点による差も大きかった。

従来の研究では、統計的な解析に基づくバイアスの補正方法が示され、効果を上げているが、Reuter他(2014)が主張するような、逆転法によるフラックス推定のために求められる精度にはまだ達してはいない。また、衛星データ全体としてのバイアスは大きく解消されても、個々の観測点のデータについてはバイアスが残る可能性がある。

今後は、バイアスとパラメータとの関係についてより詳細に解析を進め、 XCO_2 の導出過程も含めてバイアスの成因を明らかにすることにより、より精密にバイアスを取り除く方法を見つけられないか、探っていきたい。

謝 辞

本研究に用いたGOSAT L2 XCO_2 (SWIR)データは、国立環境研究所のGOSATプロジェクトが運営するGOSAT Data Archive Service (GDAS)のサーバーよりダウンロードし取得しました。TCCONデータおよびFig. 1のTCCONサイトマップはOak Ridge National Laboratoryが運営するThe TCCON Data Archiveのホームページよりダウンロードし取得しました。本論文のFig. 2~7は、地球流体電脳倶楽部の地球流体電脳ライブラリを用いて作成しました。以上の機関の方々に感謝いたします。

参考文献

- 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, 京都大学防災研究所年報, 第58号B, pp. 137-145.
- 井口敬雄 (2016) : 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, 京都大学防災研究所年報, 第59号B, pp. 159-167.
- Bruhwiller, L. M. P., Michalak, A. M., and Tans, P. P. (2011): Spatial and temporal resolution of carbon flux estimates for 1983–2002, *Biogeosciences*, 8, 1309–1331, doi:10.5194/bg-8-1309-2011.
- Chevallier, F., Bréon, F. M., and Rayner, P. J. (2007): Contribution of the Orbiting Carbon Observatory to the estimation of CO_2 sources and sinks: Theoretical study in a variational data assimilation framework, *J. Geophys. Res.*, 112, D09307, doi:10.1029/2006JD007375.

- GDAS (2017): GDASホームページ,
https://data2.gosat.nies.go.jp/index_ja.html
- Inoue, M., Morino, I., Uchino, O., Nakatsuru, T., Yoshida, Y., Yokota, T., Wunch, D., Wennberg, P. O., Roehl, C. M., Griffith, D. W. T., Velazco, V. A., Deutscher, N. M., Warneke, T., Notholt, J., Robinson, J., Sherlock, V., Hase, F., Blumenstock, T., Rettinger, M., Sussmann, R., Kyrö, E., Kivi, R., Shiomi, K., Kawakami, S., De Mazière, M., Arnold, S. G., Feist, D. G., Barrow, E. A., Barney, J., Dubey, J. M., Schneider, M., Iraci, L. T., Podolske, J. R., Hillyard, P. W., Machida, T., Sawa, Y., Tsuboi, K., Matsueda, H., Sweeney, C., Tans, P. P., Andrews, A. E., Biraud, S. C., Fukuyama, Y., Pittman, J. V., Kort, E. A., and Tanaka, T. (2016): Bias corrections of GOSAT SWIR XCO₂ and XCH₄ with TCCON data and their evaluation using aircraft measurement data, *Atmos. Meas. Tech.*, 9, 3491–3512, doi:10.5194/amt-9-3491-2016
- IPCC (2014): *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, UK.
- JAXA (2017): いぶき(GOSAT)ホームページ:
<http://www.satnavi.jaxa.jp/project/gosat/>
- NIES (2017): NIES GOSAT Project Homepage,
<http://www.gosat.nies.go.jp/>
- Reuter, M., M. Buchwitz, M. Hilker, J. Heymann, O. Schneising, D. Pillai, H. Bovensmann, J. P. Burrows, H. Bösch, R. Parker, A. Butz, O. Hasekamp, C.W. O'Dell, Y. Yoshida, C. Gerbig, T. Nehrkorn, N. M. Deutscher, T. Warneke, J. Notholt, F. Hase, R. Kivi, R. Sussmann, T. Machida, H. Matsueda, and Y. Sawa (2014): Satellite-inferred European carbon sink larger than expected, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 13739–13753, doi:10.5194/acp-14-13739-2014.
- Wunch, D., Toon, G. C., Blavier, J.-F. L., Washenfelder, R. A., Notholt, J., Connor, B. J., Griffith, D. W. T., Sherlock, V., and Wennberg, P. O. (2011): The Total Carbon Column Observing Network, *Phil. Trans. R. Soc. A*, 369, 2087–2112, doi:10.1098/rsta.2010.0240.
- Wunch, D., Toon, G. C., Sherlock, V., Deutscher, N. M., Liu, X., Feist, D. G., and Wennberg, P. O. (2015): The Total Carbon Column Observing Network's GGG2014 Data Version. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA doi:10.14291/tcon.ggg2014. documentation.R0/1221662.
- Yoshida, Y., Ota, Y., Eguchi, N., Kikuchi, N., Nobuta, K., Tran, H., Morino, I., and Yokota, T. (2011): Retrieval algorithm for CO₂ and CH₄ column abundances from short-wavelength infrared spectral observations by the Greenhouse gases observing satellite, *Atmos. Meas. Tech.*, 4, 717–734, doi:10.5194/amt-4-717-2011.
- Yoshida, Y., Kikuchi, N., Morino, I., Uchino, O., Oshchepkov, S., Bril, A., Saeki, T., Schutgens, N., Toon, G. C., Wunch, D., Roehl, C. M., Wennberg, P. O., Griffith, D. W. T., Deutscher, N. M., Warneke, T., Notholt, J., Robinson, J., Sherlock, V., Connor, B., Rettinger, M., Sussmann, R., Ahonen, P., Heikkinen, P., Kyrö, E., Mendonca, J., Strong, K., Hase, F., Dohe, S., and Yokota, T. (2013): Improvement of the retrieval algorithm for GOSAT SWIR XCO₂ and XCH₄ and their validation using TCCON data, *Atmos. Meas. Tech.*, 6, 1533–1547, doi:10.5194/amt-6-1533-2013.

(論文受理日 : 2017年6月13日)