

GOSAT衛星観測とTCCON地上観測による CO₂カラム濃度データの差異に関する検証

Verification of the Difference between GOSAT and TCCON CO₂ Column Amount Data

井口敬雄

Takao IGUCHI

Synopsis

The difference between GOSAT and TCCON XCO₂ data (Δ XCO₂) was verified. The result shows that bias-corrected version of GOSAT XCO₂ data still contains bias at each TCCON observation station which is large enough to cause a serious error to the estimate of carbon flux when the data is used in the synthesis inversion method. The root mean square of Δ XCO₂ shows a significant correlation with the root mean square of the difference of the height between GOSAT data and TCCON station. This correlation may have the potential to further correct the bias of GOSAT XCO₂ data.

キーワード: 二酸化炭素, 衛星, いぶき, バイアス

Keywords: CO₂, XCO₂, GOSAT, TCCON, bias

1. はじめに

大気中における二酸化炭素(CO₂)の濃度は増加の一途を辿っており, その温室効果は地球規模の気候変動をもたらすと予測され注目を集めている。

大気中CO₂増加の主要因は人間活動による化石燃料の燃焼であるが, それによって放出されるCO₂量の内, 大気中に残留して蓄積されているのは平均して約半分ほどである。残りは海洋や陸上生態系(植生)によって吸収されていると考えられている(IPCC, 2014)が, その詳細についてはまだ不明な点が多い。特に植生はその活動が気候の影響を受けやすいため, 大気との炭素交換は年々変動が大きく評価が難しいとされている。陸上生態系からのCO₂フラックスを正確に把握する事は大気との炭素交換のプロセスを正しく理解し, さらには将来の大気中CO₂濃度を予測することにもつながる課題である。

地表面からのCO₂フラックスを推定する有力なアプローチの一つに逆転法がある(Gurney et al., 2004; 井口, 2015, 2016)。この手法では大気輸送モデルによるCO₂濃度分布のシミュレーション結果が観測値に最も近くなるようなフラックス分布を逆解析によ

って推定するが, 正確な推定のためにはCO₂濃度の精密な測定を行う観測点が地球表面上を十分な密度で網羅していることが望ましい。しかし現実には観測点の疎らな領域が存在しており, フラックス推定誤差の要因となっている。

この問題点をカバーするものとして注目されるのが, 衛星観測から導出されたCO₂濃度データである。このデータは気柱内の濃度(XCO₂)として導出され, また地上の定点観測に比べて精度は劣るが, 観測点の空白地域における濃度データが得られることにより, これを用いる事により逆転法によるフラックス推定精度の向上が期待される(Maksyutov et al., 2013)。しかし, このデータにはバイアスが存在しており, それが推定精度向上の障害となっている。衛星観測によるXCO₂データのバイアス補正についてはこれまでも研究が行われており(Wunch et al., 2011; Guerlet et al., 2013; Nguyen et al., 2014; Inoue et al., 2016), 環境省, 国立環境研究所, 宇宙航空研究開発機構によるGOSAT (Greenhouse gases Observing SATellite, 温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」)プロジェクトでは, Inoue et al. (2016)を基にした手法により, バイアス補正されたXCO₂データを公開してい

る。GOSAT XCO₂データのバイアス評価はTCCON(Total Carbon Column Observing Network)地上観測によるXCO₂データを基準としており、バイアスの解析と補正は全てのTCCON観測点におけるデータをひとまとめにして行われている。井口(2019)は3か所のTCCON観測点についてV02.75データの解析を行ったところ、内2か所については依然として大きなバイアスが残っていることが判った。

本研究では、GOSAT衛星観測およびTCCON地上観測によるXCO₂データの差異について、すべてのTCCON観測点について調べ、更なる補正の可能性について検討する。

2. 使用データ

2.1 GOSAT XCO₂データ

GOSATはTANSO-FTS(温室効果ガス観測センサ)を搭載しており、LT13:00付近の太陽同期準回帰起動を周回しながら、地球表面で反射した太陽からの短波長赤外光を測定しており、その吸収スペクトルからCO₂気柱量(XCO₂)が導出されている。

導出されたXCO₂データ(FTS SWIR レベル2プロダクト)はGOSAT Data Archive Service(GDAS)のサイトで公開されており、本研究では、V02.72とV02.75の2つのバージョンを取得して解析を行った。

V02.75はV02.72にバイアス補正を行ったバージョン

で、Inoue et al. (2016)を基とする補正方法の詳細はV02.75リリースノート(GOSATプロジェクト, 2018)に記されている。

2.2 TCCON XCO₂データ

TCCONプロジェクトでは、衛星とは逆に、地上に設置されたセンサを上空に向けて入射する太陽短波長赤外光を測定し、XCO₂を導出する。

反射光ではなく入射光を測定するので地表面アルベドの影響を受けず大気による吸収・散乱の影響も少ない、定点観測なのでより正確な地表面気圧の値を得る事が出来る等の点において、地上観測は衛星観測よりもバイアスの要因がずっと少なく、TCCON XCO₂データは衛星観測によるXCO₂データのバイアス評価の基準として用いられている。

本研究では、TCCON Data Archiveのサイトより、GGG2014データセットをダウンロードして、GOSAT XCO₂データの評価に用いた。なおデータセットに含まれている観測点の数は34である(Fig. 1参照)。

3. 解析手法

本研究では、GOSATとTCCONのXCO₂データの比較を行うため、V02.75リリースノート(GOSATプロジェクト, 2018)のマッチアップ条件に倣い、以下の基準によりデータの選別を行った。



Fig. 1 Location map of TCCON observation stations.
(TCCON Data Archive Homepage; <https://tccnadata.org/>)

まずGOSATデータについては

- FTS視野内陸率が100%の陸域データ
- TCCON観測点に対して、ゲインHなら $\pm 2^\circ$ 以内、ゲインMなら $\pm 5^\circ$ 以内
- 視野内平均高度のTCCON観測点の標高との標高差が2km以内

を満たすデータを選択した。なお、海域データについては、アルベド（リファレンス値）が欠損値となっているため今回は使用しなかった。

次にTCCONデータについては、上記の選択されたGOSATデータに対し、前後30分以内のデータを平均して用いた。

こうして選別されたGOSATおよびTCCONのXCO₂データについて、TCCON観測点毎に解析を行った。その結果を次章に記す。

4. 結果と考察

全TCCON観測点について、前章で述べたマッチアップ条件を満たすデータの選別を行った。その結果、選別されたデータ数が非常に少ない観測点や、データ期間が1年に満たない観測点については除外し、19の観測点について、GOSAT XCO₂とTCCON XCO₂の差(Δ XCO₂)の解析を行った。

4.1 TCCON観測点毎の Δ XCO₂について

TCCON観測点毎に選別されたXCO₂データの一例として、Fig. 2に、Lamont (36.6°N, 97.5°W) における(a) GOSAT XCO₂ (V02.72, 赤い*マーカー)とTCCON XCO₂ (青い+マーカー)、(b) Δ XCO₂ (V02.72)、(c) GOSAT XCO₂ (V02.75, 赤い*マーカー)とTCCON XCO₂ (青い+マーカー)および(d) Δ XCO₂ (V02.75)の時系列プロットを示す。Fig. 2(b)(d)の右側に表記されたAVG.は Δ XCO₂の平均値 $\overline{\Delta$ XCO₂であり、統計上のバイアスに相当する。またRMSは Δ XCO₂の二乗平均平方根 $\sqrt{(\Delta$ XCO₂)²であり、TCCON XCO₂を基準にしたGOSAT XCO₂のばらつきの大きさを示す。 Δ XCO₂の標準偏差ではないことに注意されたい。GOSAT XCO₂のバイアスは地上気圧のリトリバル値とリファレンス値の差 Δ P_Sと相関が高いことが知られている(Inoue et al., 2016)が、TCCON観測点毎の解析でもそれは確認でき、V02.75では良く補正されている(井口, 2019)。しかしながら、Fig. 2(d)に見られるように、依然として大きなバイアスが残っている。

Table 1に、19のTCCON観測点について求めた、 Δ XCO₂の平均値と二乗平均平方根を示す。V02.75については、V02.72と比較して絶対値が小さくなった値は青文字、逆に大きくなった値は赤文字で記して

ある。Table 1によると、19の内8つの観測点では逆にバイアスが大きくなっているという結果が出た。また、補正によりバイアスが小さくなった観測点でも、最大で1ppmを超えるバイアスが依然として残っていた。0.1ppmオーダーのバイアスでも逆転法によるフラックスの推定に重大な影響を及ぼすという指摘(Reuter et al., 2014)もあり、フラックス推定精度の向上の為にはTCCON観測点毎のこれだけのバイアスは今後さらに補正される必要がある。

4.2 Δ XCO₂と地理的要素との相関について

次に、Table 1で示した19のTCCON観測点における Δ XCO₂の平均値と二乗平均平方根について、緯度(GOSAT XCO₂データの緯度を平均したもの)と高度差(GOSAT XCO₂データの視野内平均高度とTCCON観測点の高度の差の二乗平均平方根)との相関を調べた。Fig. 3はそれぞれ、(a) Δ XCO₂の平均値と緯度、(b) Δ XCO₂の平均値と高度差、(c) Δ XCO₂の二乗平均平方根と緯度、(d) Δ XCO₂の二乗平均平方根と高度差の関係を示す散布図である。

Fig. 3(a)では、南半球の3地点では負のバイアスを示し、北半球では負から正まで幅広い値を示した。全体としては正の相関がみられるが、北半球の観測点だけに限れば相関は不明瞭になる。TCCON観測についても従来のCO₂濃度の定点観測と同様に、現状では南半球や低緯度の観測点が少ない。

Fig. 3(b)(c)のプロット図については、高い相関は認められなかった。

最後のFig. 3(d)については、GOSAT XCO₂データとTCCON観測点との高度差と、 Δ XCO₂との間に比較的高い相関が認められた。具体的にどのような因果関係があるのかはまだ現時点では不明だが、今後詳しく調べてみる必要がある。

5. まとめ

GOSAT衛星観測に基づくXCO₂データ(V02.72)とそのバイアス補正版(V02.75)について、TCCON地上観測に基づくXCO₂データを基準としたバイアスの評価を行った結果、バイアス補正版でもTCCON観測点毎では依然として大きなバイアスが残っていることが分かった。衛星データを逆転法に導入する事によるフラックスの推定精度を上げるためにはこのバイアスをさらに補正する必要がある。一方、GOSAT XCO₂とTCCON XCO₂データの差異(Δ XCO₂)について、その二乗平均平方根とデータの高度差との間に相関が見られた。両者の間の因果関係が明らかになれば、バイアスの更なる補正につながる可能性があるのだからさらに調査を進めていきたい。

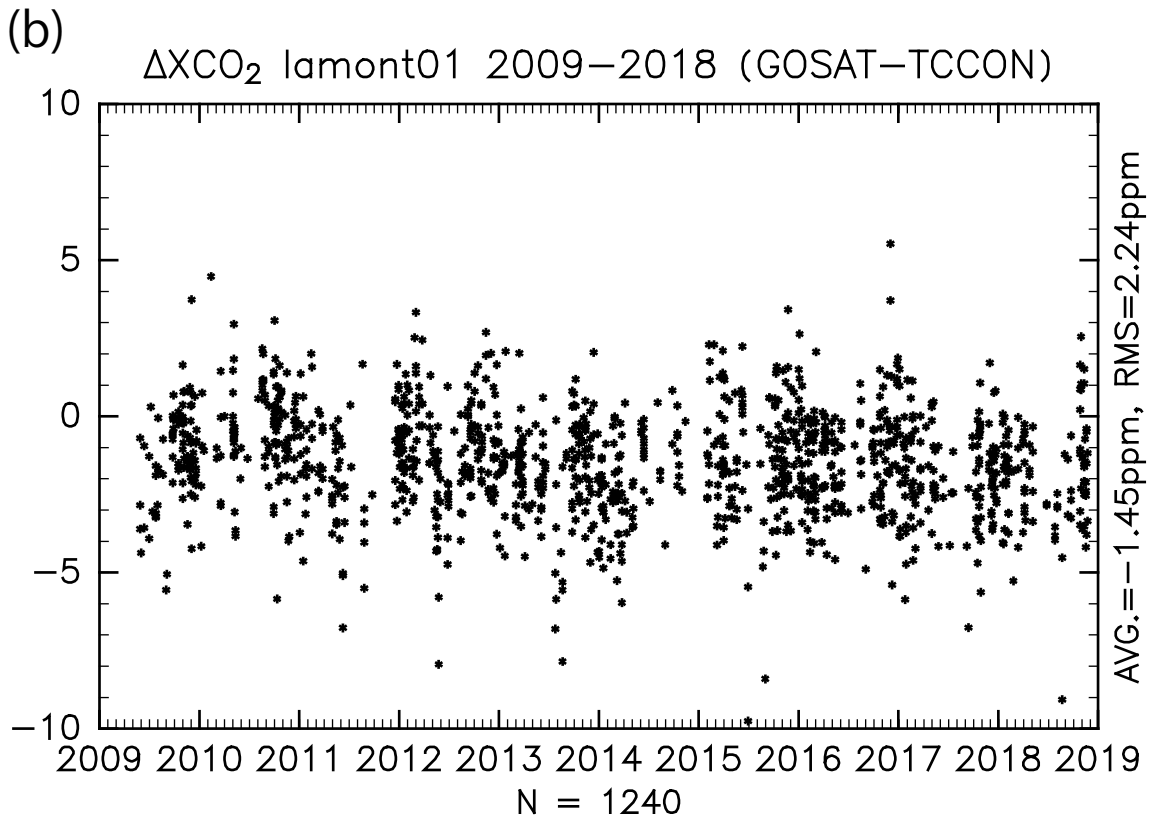
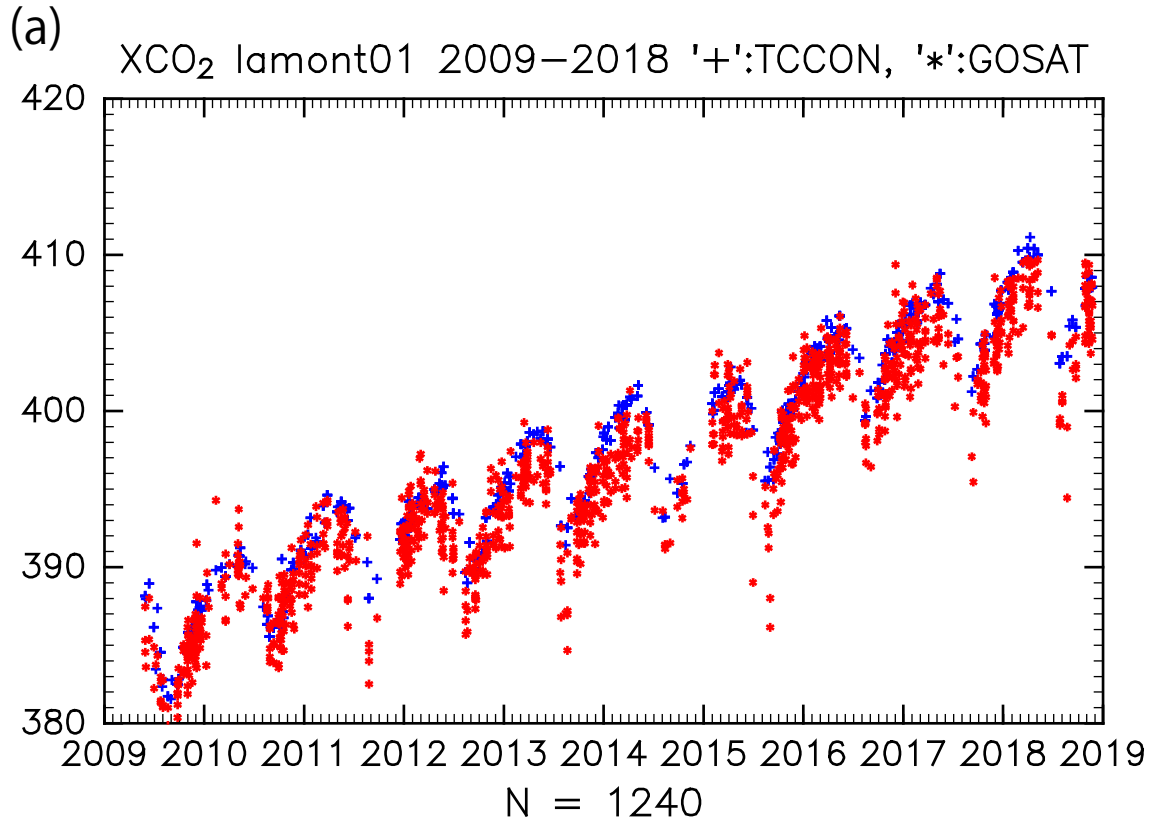


Fig. 2 (a) XCO₂ of GOSAT FTS SWIR L2 CO₂ V02.72 product (the red '*' marks) and TCCON GGG2014 data (the blue '+' marks) at Lamont. N is number of plots. (b) Δ XCO₂ (difference between GOSAT and TCCON XCO₂ data) at Lamont. "AVG." is average of Δ XCO₂, and "RMS" is root mean square of Δ XCO₂.

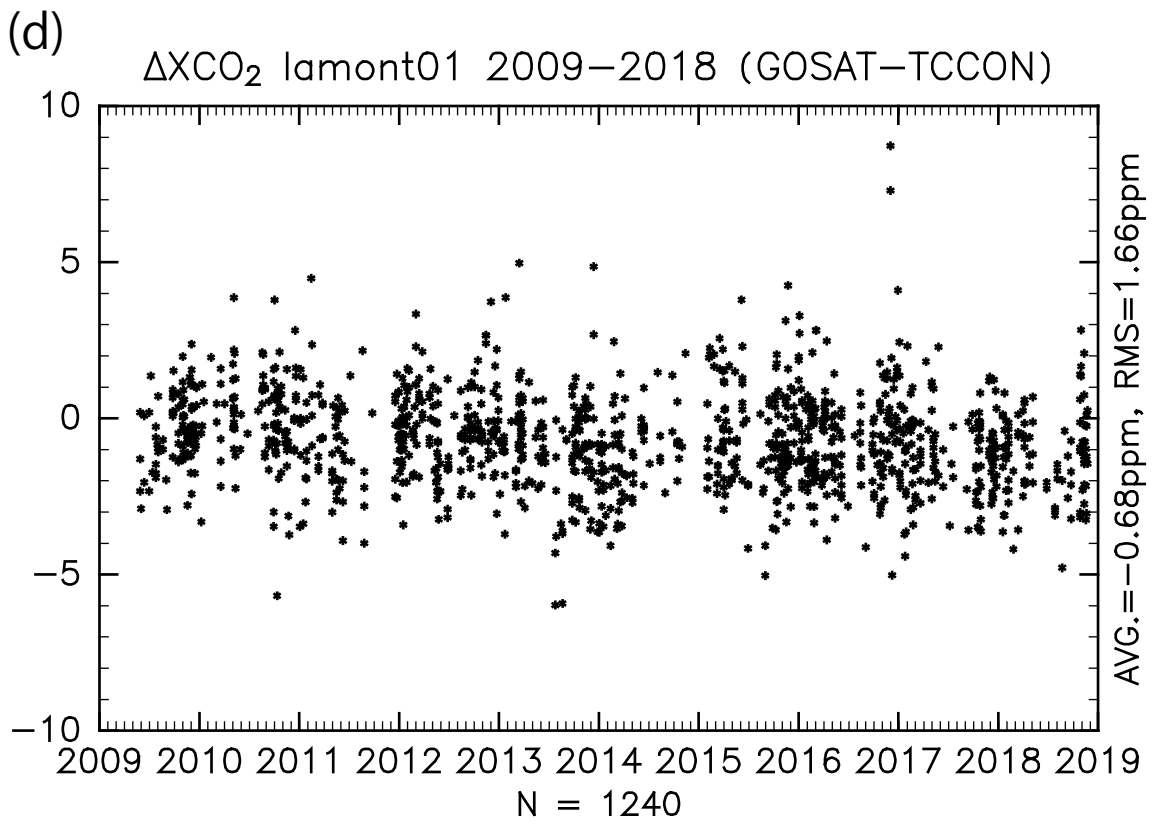
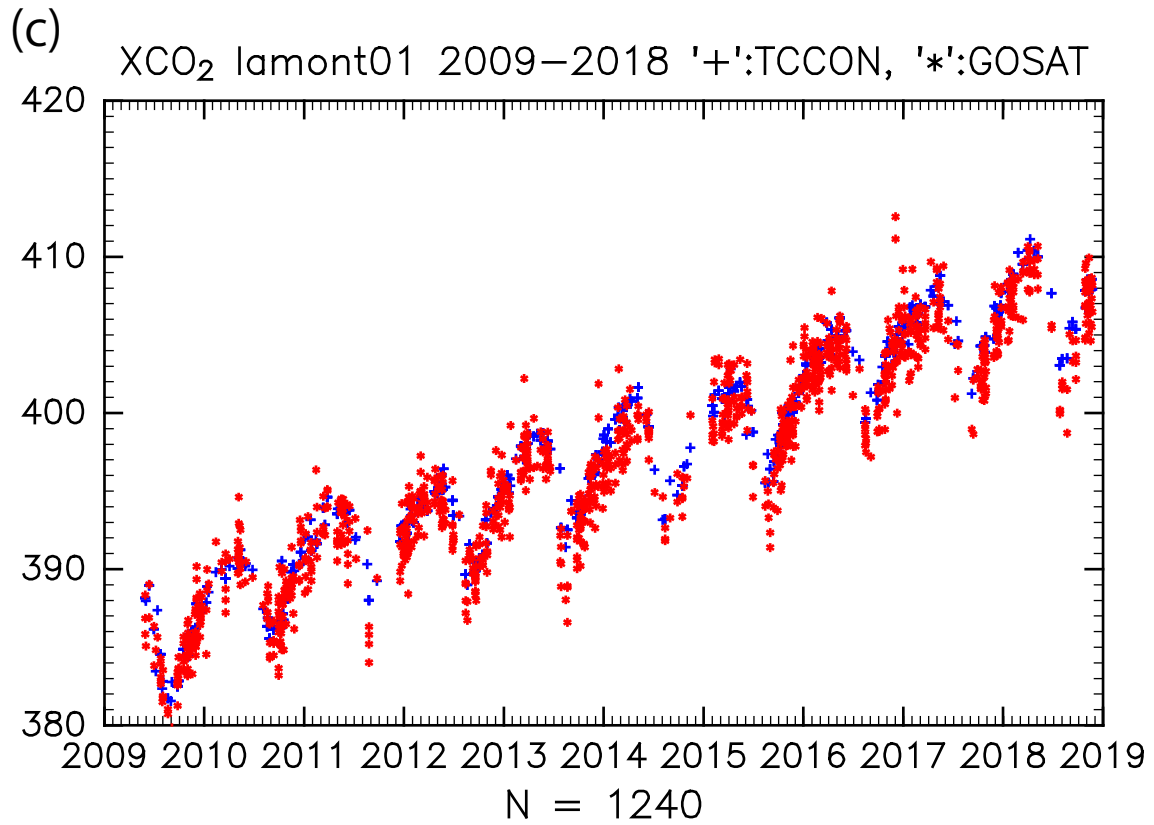


Fig. 2 (c) XCO₂ of GOSAT V02.75 product and TCCON GGG2014 data and (d) Δ XCO₂ at Lamont, same as (a) and (b).

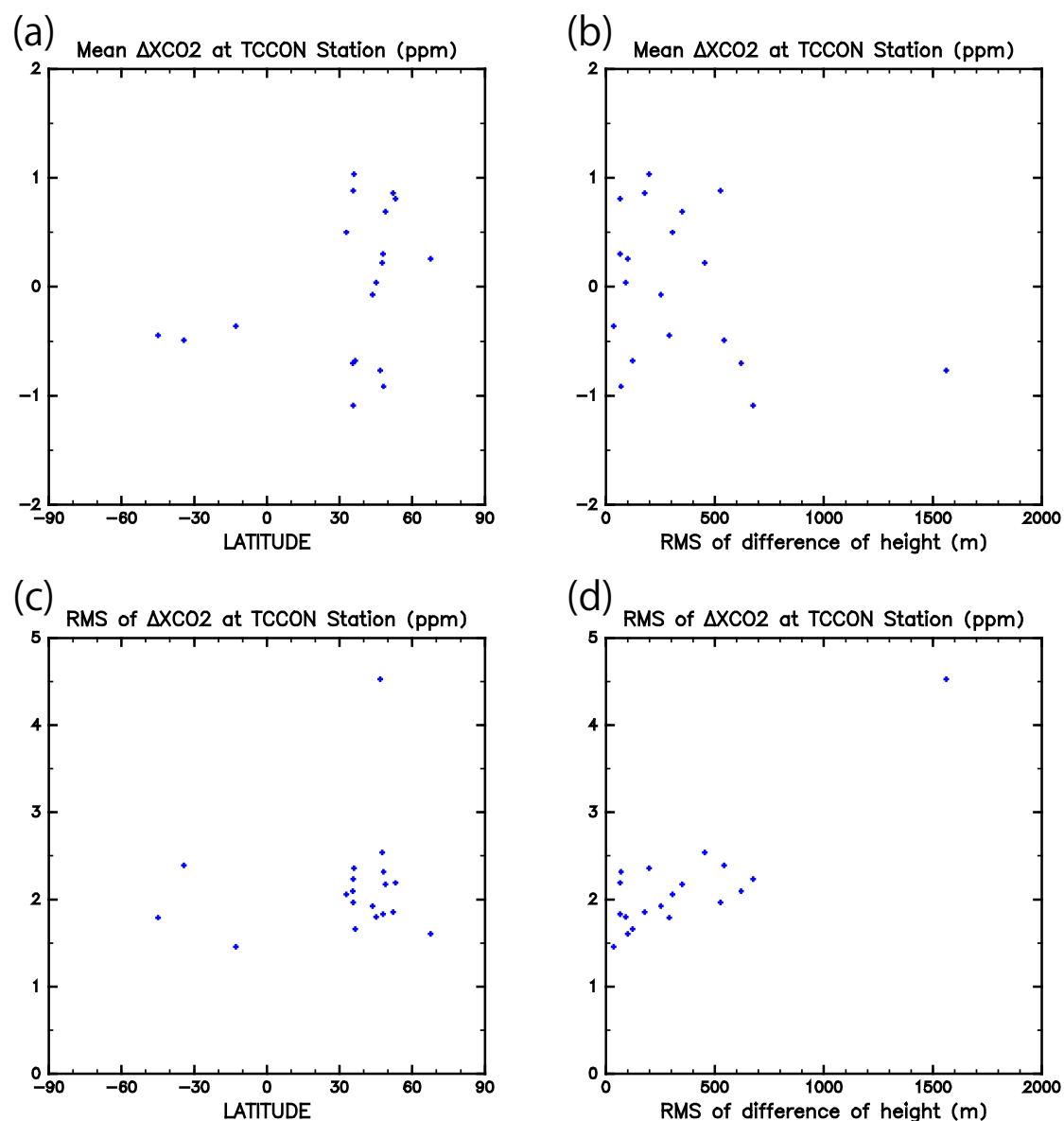


Fig. 3 Scatter diagram of (a) mean ΔXCO_2 vs. latitude, (b) mean ΔXCO_2 vs. root mean square of difference of height, (c) root mean square of ΔXCO_2 vs. latitude, and (d) root mean square of ΔXCO_2 vs. root mean square of difference of height. The ΔXCO_2 is the difference between GOSAT V02.75 XCO_2 data and TCCON GGG2014 XCO_2 data. The latitude is the mean value of the latitude of GOSAT XCO_2 data. The difference of height is the difference between the height of the GOSAT XCO_2 data and the height of the TCCON observation station.

Table 1 Average and root mean square values of the difference between GOSAT XCO₂ data and TCCON XCO₂ data at TCCON observation stations. As for GOSAT V02.75, the red value is larger than the V02.72 value, and the blue value is smaller.

TCCON Station	GOSAT V02.72		GOSAT V02.75	
	$\overline{\Delta XCO_2}$	$\sqrt{(\Delta XCO_2)^2}$	$\overline{\Delta XCO_2}$	$\sqrt{(\Delta XCO_2)^2}$
Bremen, Germany	0.736	2.044	0.858	1.854
Pasadena, USA	-0.246	2.126	-1.090	2.235
Darwin, Australia	-0.647	1.663	-0.360	1.458
Edwards, USA	1.797	2.620	0.882	1.966
Garmish, Germany	-0.077	2.732	0.219	2.540
Karlsruhe, Germany	0.316	2.204	0.690	2.175
Lamont, USA	-1.447	2.241	-0.680	1.660
Lauder, New Zealand	-1.365	2.450	-0.447	1.792
Orléans, France	-0.244	1.875	0.300	1.833
Paris, France	-1.249	2.485	-0.914	2.315
Park Falls, USA	-0.510	1.959	0.039	1.799
Rikubetsu, Japan	-0.351	2.136	-0.073	1.924
Saga, Japan	0.533	2.370	0.499	2.057
Sodankyla, Finland	0.121	1.652	0.256	1.604
Tsukuba, Japan	1.187	2.585	1.032	2.360
Wollongong, Australia	-0.921	2.634	-0.492	2.392
Zugspitze, Germany	-0.786	4.751	-0.767	4.527
Bialystok, Poland	0.335	2.171	0.808	2.190
Jet Propulsion Laboratory, USA	-0.228	2.245	-0.701	2.097

謝 辞

本研究に用いたGOSAT L2 XCO₂ (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た。TCCONデータは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た。本論文のプロット図は、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た。本研究は、日本学術振興会「国際的な活躍が期待できる研究者の育成事業」の助成を受けたものである。以上の機関に感謝する。

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.

井口敬雄（2019）：TCCON観測点におけるGOSAT XCO₂データのバイアスに関する解析，京都大学防災研究所年報，第62号B, pp. 362-378.

NIES GOSATプロジェクト（2018）：一般ユーザ向けバイアス補正済FTS SWIRレベル2 CO₂プロダクト（V02.75）の公開について，

<https://data2.gosat.nies.go.jp/>.

Guerlet, S., Basu, S., Butz, A., Krol, M., Hahne, P., Houweling, S., Hasekamp, O. P., and Aben, I. (2013): Reduced carbon uptake during the 2010 Northern Hemisphere summer from GOSAT, Geophys. Res. Lett., 40, 2378–2383, doi:10.1002/

- grl.50402.
- 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.
- 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.
- Maksyutov, S., Takagi, H., Valsala, V. K., Saito, M., Oda, T., Saeki, T., Belikov, D. A., Saito, R., Ito, A., Yoshida, Y., Morino, I., Uchino, O., Andres, R. J., and Yokota, T. (2013): Regional CO₂ flux estimates for 2009-2010 on GOSAT and ground-based CO₂ observations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 9351-9373, doi:10.5194/acp-13-9351-2013.
- Nguyen, H., Osterman, G., Wunch, D., O'Dell, C., Mandrake, L., Wennberg, P., Fisher, B., and Castano, R. (2014): A method for collocating satellite XCO₂ data to ground-based data and its application to ACOS-GOSAT and TCCON, *Atmos. Meas. Tech.*, 7, 2631–2644, doi:10.5194/amt-7-2631-2014,.
- 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., Wennberg, P. O., Toon, G. C., Connor, B. J., Fisher, B., Osterman, G. B., Frankenberg, C., Mandrake, L., O'Dell, C., Ahonen, P., Biraud, S. C., Castano, R., Cressie, N., Crisp, D., Deutscher, N. M., Eldering, A., Fisher, M. L., Griffith, D. W. T., Gunson, M., Heikkinen, P., Keppel-Aleks, G., Kyrö, E., Lindenmaier, R., Macatangay, R., Mendonca, J., Messerschmidt, J., Miller, C. E., Morino, I., Notholt, J., Oyafuso, F. A., Rettinger, M., Robinson, J., Roehl, C. M., Salawitch, R. J., Sherlock, V., Strong, K., Sussmann, R., Tanaka, T., Thompson, D. R., Uchino, O., Warneke, T., and Wofsy, S. C. (2011): A method for evaluating bias in global measurements of CO₂ total columns from space, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 12317–12337, doi:10.5194/acp-11-12317-2011.

(論文受理日：2020年8月31日)