

TCCON観測点におけるGOSAT XCO₂データのバイアスに関する解析

Analysis of the Bias of GOSAT XCO₂ Data at TCCON Observation Sites

井口敬雄

Takao IGUCHI

Synopsis

To evaluate the bias of GOSAT XCO₂ data, differences between GOSAT and TCCON XCO₂ data (ΔXCO_2) were analyzed at three TCCON sites. ΔXCO_2 of GOSAT FTS SWIR L2 CO₂ Product V02.72 showed high correlation with the difference between retrieval and reference surface pressure (ΔP_s). As for V02.75, the bias-corrected version of V02.72, significant XCO₂ biases remain at two of three sites. These biases must be corrected in order to estimate carbon flux precisely by synthesis inversion method.

キーワード: 二酸化炭素, GOSAT (いぶき), TCCON, XCO₂, バイアス

Keywords: CO₂, GOSAT, TCCON, XCO₂, 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いる。増加の主要因は化石燃料の燃焼によるCO₂の放出であり、その半分近くが海洋や陸上生態系によって吸収されていると考えられている(IPCC, 2014)が、詳細な収支はまだ完全には解明されていない。特に陸上生態系はその活動が気候の影響に大きく左右されるため、そこからの炭素フラックスの分布と変動については不明な点が多い。

地球表面からのCO₂フラックスを推定する上で、CO₂観測濃度と大気輸送モデルを用いた逆転法は有効なアプローチの一つである(Gurney et al., 2004; 井口, 2015, 2016)。しかしCO₂の観測点は陸上の一部の国に集中しており、地球の表面を十分に網羅しているとは言いがたい。観測点の疎らな地域の存在が、この手法による推定の大きな誤差要因となっている。

この観測点の少なさをカバーし得るものとして期待されているのが人工衛星による観測値である。宇宙航空研究開発機構(JAXA)、環境省、国立環境研究所が共同で開発した温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」(GOSAT)は、CO₂やメタン(CH₄)その他の温室効果ガスを測定する。GOSATは2009年に打ち上げられて以来、10年にわたって観測を続けており、2018

年には2号機である「いぶき2号」(GOSAT-2)も打ち上げられた。

逆転法は精密なCO₂濃度観測値を必要とするが、衛星データには

[1] 気柱内の平均濃度(XCO₂値)として与えられるため、逆転法への適用には工夫が必要となる。

[2] データにバイアスが存在する。

という課題点がある。[1]については、Maksyutov et al. (2013)が逆転法に衛星データを適用する手法を開発している。[2]のバイアスについてもこれを克服できれば、たとえ従来の定点観測ほど精密な測定値でなくとも、観測地点の空白地帯の濃度を得られることにより、逆転法による炭素フラックスの推定値の精度は大幅に向上する事が期待できる。

衛星データのバイアスに関する先行研究では、統計的な手法によってその補正方法が求められている(Wunch et al., 2011a; Guerlet et al., 2013; Nguyen et al., 2014; Inoue et al., 2016)。Inoue et al.(2016)はTCCON XCO₂データをリファレンスとしてGOSAT XCO₂データのバイアスを統計的に解析し、データの補正を行っている。

本研究では、GOSAT XCO₂データの逆転法への利用を念頭に、バイアス補正の前と後それぞれのバイアスについて解析を行ってみた。

2. 使用データ

2.1 GOSATデータ

GOSATに搭載されているTANSO-FTSセンサは、地球大気を透過し地表面で反射した太陽からの短波長赤外光(SWIR)と、地球大気から放射される熱赤外光(TIR)を分光観測する(宇宙航空研究開発機構他, 2011)。本研究で用いたGOSAT FTS SWIR L2 CO₂プロダクトは、観測されたSWIRのCO₂吸収帯のスペクトルから導出されたリトリーバルXCO₂データおよびその関連データが含まれている。SWIR L2 CO₂プロダクトは複数のバージョンが公開されているが、今回はV02.72とV02.75の2つのバージョンを用いた。V02.75はV02.72に対し、Inoue et al. (2016)の手法による解析の結果に基づき、バイアス補正を行ったものである。

SWIR L2 CO₂プロダクトは、GOSAT Data Archive Service (GDAS)ホームページ(2018)より取得した。

2.2 TCCONデータ

TCCONプロジェクトは、地上に設置されたセンサを上空に向けてSWIRを分光観測し、GOSATデータと同様にXCO₂やCH₄などのカラム値を導出するものである(Wunch et al., 2011b)。

TCCONサイトのデータにも誤差やバイアスは存在すると思われるが、反射光ではなく直接入射光を測定している点、晴れた日に短いインターバルで連続的に観測が出来る点、XCO₂の導出に必要な地表面気圧などの大気データを直接観測できる点などで、衛星データに比べ誤差やバイアスは小さいと考えられ、衛星データの検証に用いられている。

TCCON観測点は現在27か所存在する(TCCON Wiki Homepage, 2018)が、今回はTsukuba(36.05N, 140.12E), Lamont(36.60N, 97.49W), Park Falls(45.95N, 90.27W)の3か所について、TCCON Data Archive Homepage (2018)よりGGG2014データをダウンロードし、解析を行った。

3. 解析手法

本研究では、GOSATとTCCONのXCO₂データの差 $\Delta XCO_2 = XCO_{2_GOSAT} - XCO_{2_TCCON}$ について、GOSAT XCO₂データのバイアスに影響を与えていると思われるパラメータとの相関を調べた。以下にその手法について述べる。

3.1 データの選別

ΔXCO_2 を求めるためには、地理的および時間的に

近いGOSAT XCO₂データとTCCON XCO₂データを選択する必要がある。本研究ではGOSAT FTS SWIR L2 CO₂データプロダクト(V02.75)リリースノート(NIES GOSAT Project, 2018)のマッチアップ条件に従い、以下の条件を全て満たすデータをTsukuba, Park Falls, Lamontの3つのTCCONサイトについて選別した。

- (1) GOSATデータのFTS視野内陸率が100%の陸域データである事。海域のデータについては、今回取得したデータのアルベドがmissing valueであったため使用しなかった。
- (2) TCCONサイトの位置に対し、GOSATデータのFTS視野中心の位置が観測ゲインがHならば緯度・経度がそれぞれ2度以内、ゲインがMならば5度以内である事。
- (3) GOSATデータのFTS視野内平均高度とTCCONサイトの標高差が2km以内である事。
- (4) GOSATデータの観測時刻に対して、TCCONデータの観測時刻が前後30分以内である事。尚、該当するTCCONデータが複数存在する場合はこれらを平均した。

3.2 重回帰分析

GOSAT FTS SWIR L2 CO₂ プロダクトV02.75は、全てのSWIR L2 CO₂ プロダクトV02.72とTCCONデータに対して3.1のマッチアップ条件によるデータ選別を行い、Inoue et al. (2016)の手法を基に ΔXCO_2 と主要なパラメータとの相関について重回帰分析を行い、その結果得られた重回帰方程式によってバイアス補正を行っている(NIES GOSAT Project, 2018)。この重回帰分析に用いられてパラメータは、

- (i) AOT(Aerosol Optical Thickness): エアロゾルの光学的厚さ
 - (ii) $\Delta P_s = P_{s_retrieval} - P_{s_reference}$: 地表面気圧のリトリーバル値と参照値の差
 - (iii) $Airmass = 1/\theta_{Z_solar} + 1/\theta_{Z_satellite}$: 太陽と衛星の天頂角から導出される光路長比
 - (iv) Albedo_O₂: O₂A吸収帯のアルベド
- の4つである。

本研究ではこれに倣い、Tsukuba, Lamont, Park Fallsの3つのTCCONサイト別に ΔXCO_2 と上記(i)~(iv)の4つのパラメータとの相関について重回帰分析を行った。尚、V02.75のリリースノート(NIES GOSAT Project, 2018)に倣い、TCCONデータの平均をとったデータの数に応じて重みを付けて重回帰分析を行っている。また、アルベドのリトリーバル値は一般向けデータでは公開されておらず、今回は参照アルベド値で代用した。次章ではその結果について示す。

4. 結果および考察

本章では、GOSAT FTS SWIR L2 CO₂ プロダクトのV02.72とV02.75のそれぞれについて、TCCON XCO₂データをリファレンスとしたバイアス ΔXCO_2 と、その重回帰分析の結果について述べる。

4.1 SWIR L2 CO₂ プロダクト (V02.72) (バイアス補正前) の解析結果

Fig. 1に、3.1の条件で選別されたXCO₂データ値および ΔXCO_2 のプロットを示す。Fig. 1の(a)はTsukubaにおけるGOSAT XCO₂データ (赤い*マーク) とTCCON XCO₂データ (GOSATデータの±30分以内に測定されたデータの平均値) (青い+マーク) をそのままプロットしたもので、(b)は ΔXCO_2 をプロットしたものである。同様に、(c)と(d)はLamontサイト、(e)と(f)はPark FallsにおけるXCO₂と ΔXCO_2 の値をプロットしたものである。(a)～(f)のNは、選択されたGOSATとTCCONデータの組み合わせの数である。(b)、(d)、(f)の”BIAS”は ΔXCO_2 の平均値、”STD”は ΔXCO_2 の自乗平均の平方根である。

Tsukubaでは、全期間を平均して1.19ppmの正のバイアスという結果が出たが、(b)の図を見ると、最初の2013年の半ばを境に、その前後でバイアスが急激に減少しているように見える。そこで2011年8月～2013年6月と、2013年7月～2018年6月の2つの期間に分けてバイアスの平均を取ったところ、前者は3.10ppm、後者は0.82ppmと大きな違いが出た。また、”STD”も3.69ppmから2.31ppmと大幅に小さくなっている。この変化の理由については、他の2つのサイトでは2013年半ばの前後で大きな変化が見られないため、現時点ではGOSATの仕様変更が原因とは考えにくい。TsukubaにおけるTCCON観測の仕様変更か、この地域における気候の変化が原因として考えられる。Lamontでは、Tsukubaとは逆に-1.45ppmと負のバイアスが見られた。CO₂濃度の季節変動の極小期にGOSATデータの値がTCCONに比べ著しく小さくなるケースが多々見られるのも特徴的である。Park Fallsに関しては選別されたデータ数の少なさを考慮する必要があるが、バイアス(-0.51ppm)は他の2サイトに比べて大幅に小さく、”STD”も3サイトの中で最も小さかった。

Fig. 2に、3.2の(i)～(iv)で示した4つのパラメータと ΔXCO_2 の関係をプロットした散布図と、重回帰分析の結果を示す。(a)～(d)はTsukubaにおける散布図で、x軸は(a)AOT、(b) ΔP_s 、(c)Airmass、(d)Albedo_O₂の値である。各図の右側にあるM.R.C.は重回帰係数、F-testは当該パラメータのみが無相関であるという帰無仮説のF検定値である。同様に(e)～(h)はLamont、

(i)～(l)はPark Fallsの散布図である。また、算出された重回帰係数はTable 1にもまとめてある。

Fig. 2の散布図では、3つのサイトのいずれも ΔP_s と ΔXCO_2 の間に明確に相関性が見て取れ、F検定値でも高い値を示した。ただし重回帰係数はサイトによって異なり、特にPark Fallsでは他の2サイトより小さめの負の相関を示した。その他の3つのパラメータについては、F検定値こそ有意な値を示したものの、サイトによって重回帰係数の正負が異なる等、明確で一貫性のある相関は認められなかった。この結果については、さらに詳細な解析が必要になるが、アルベドのリトリバル値ではなく、参照値を用いたことの影響も考えられる。次回はアルベドのリトリバル値を含む研究者向けデータを入手して改めて解析を行いたい。

4.2 SWIR L2 CO₂ プロダクト (V02.75) (バイアス補正後) の解析結果

バイアス補正後のV02.75プロダクトについて、Fig. 1と同様にXCO₂データ値および ΔXCO_2 をプロットした図をFig. 3に示す。

TsukubaではバイアスがV02.72の1.19ppmから1.06ppm、2013年7月以降のデータに限っても0.82ppmから0.68ppmと余り大きな改善は見られなかった。Lamontでは-1.45ppmから-0.68ppmと半分以下に改善されたものの、依然としてTsukubaと同程度のバイアスが残っている。Reuter et al.(2014)では0.1ppmのオーダーのバイアスでも逆転法による正確なフラックスの推定の支障となる事が指摘されている。Park Fallsについては-0.51ppmから0.04ppmと、ほぼバイアスが解消されたものの、他の2サイトで残っているバイアスは更なる補正が求められる。

次に、Fig. 2と同様に、V02.75プロダクトの ΔXCO_2 について、4つのパラメータによる重回帰分析を行った結果をFig. 4およびTable 1に示す。

Fig. 4では、Fig. 2で最も高い相関を示した ΔP_s の重相関係数がTsukubaとLamontでは大幅に小さくなり、良く補正されていることが示された。一方Park Fallsでは、相関は小さくなったものの正の重相関係数が残っており、他のパラメータの影響との相殺によって全体的なバイアスが解消されていることが分かる。他の3つのパラメータについては、3サイトに共通した相関の軽減は見られなかった。AOTはLamontとPark Fallsでは重相関係数の減少は半分に満たず、Tsukubaでは逆に増加した。AirmassはLamontでは元々重相関係数が小さく、Tsukuba、Park Fallsではほとんど変わらなかった。Albedo_O₂はLamontとPark Fallsでは改善が見られたが、Tsukubaでは逆に大きくなった。

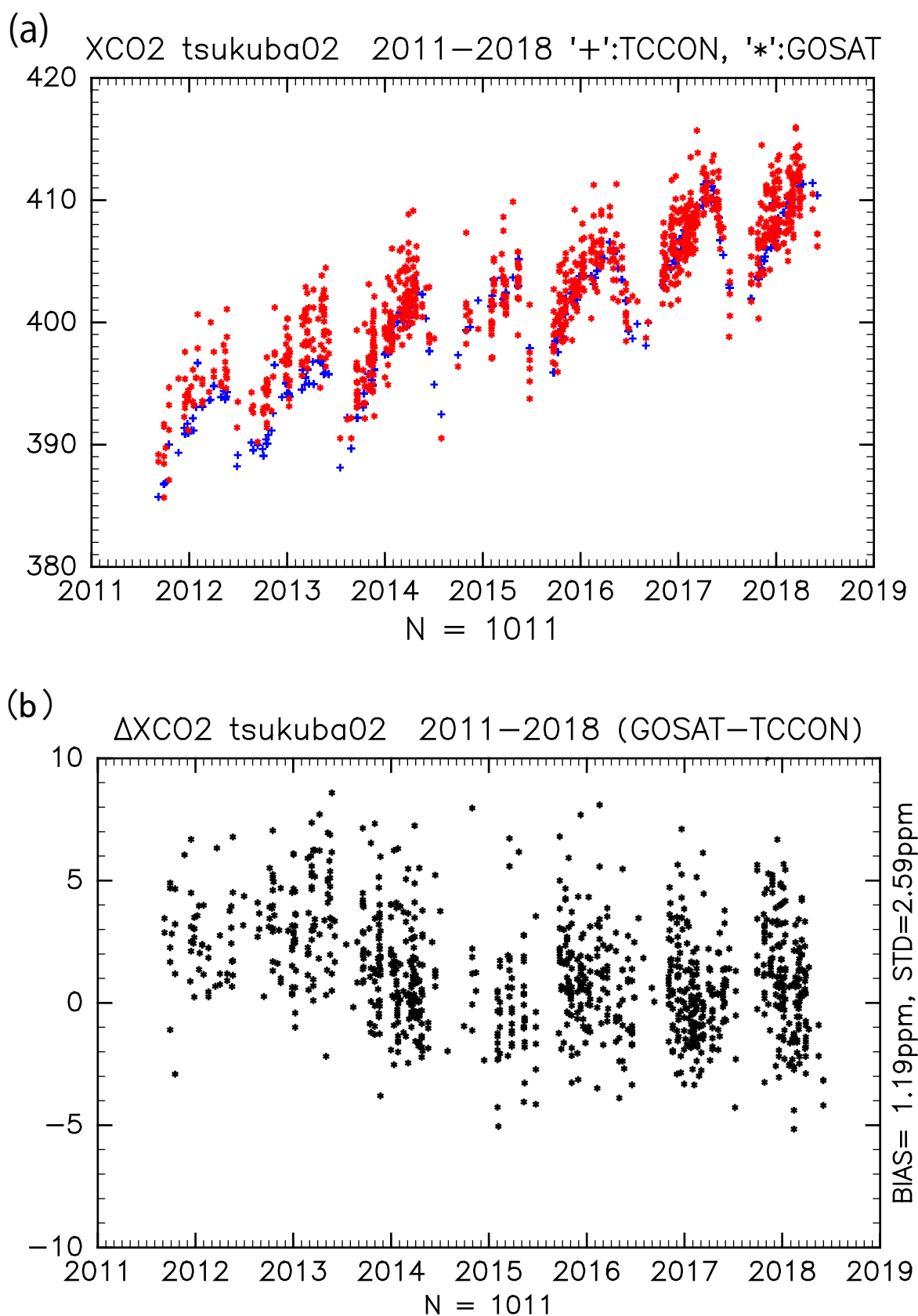


Fig 1 (a) XCO₂ of GOSAT FTS SWIR L2 CO₂ V02.72 product (the red '*' marks) and TCCON GGG2014 data (the blue '+' marks) at Tsukuba. N is number of plots of GOSAT and TCCON data respectively. (b) Δ XCO₂ (difference of XCO₂ between GOSAT and TCCON data) at Tsukuba. BIAS is average of Δ XCO₂, and STD is root mean square of Δ XCO₂.

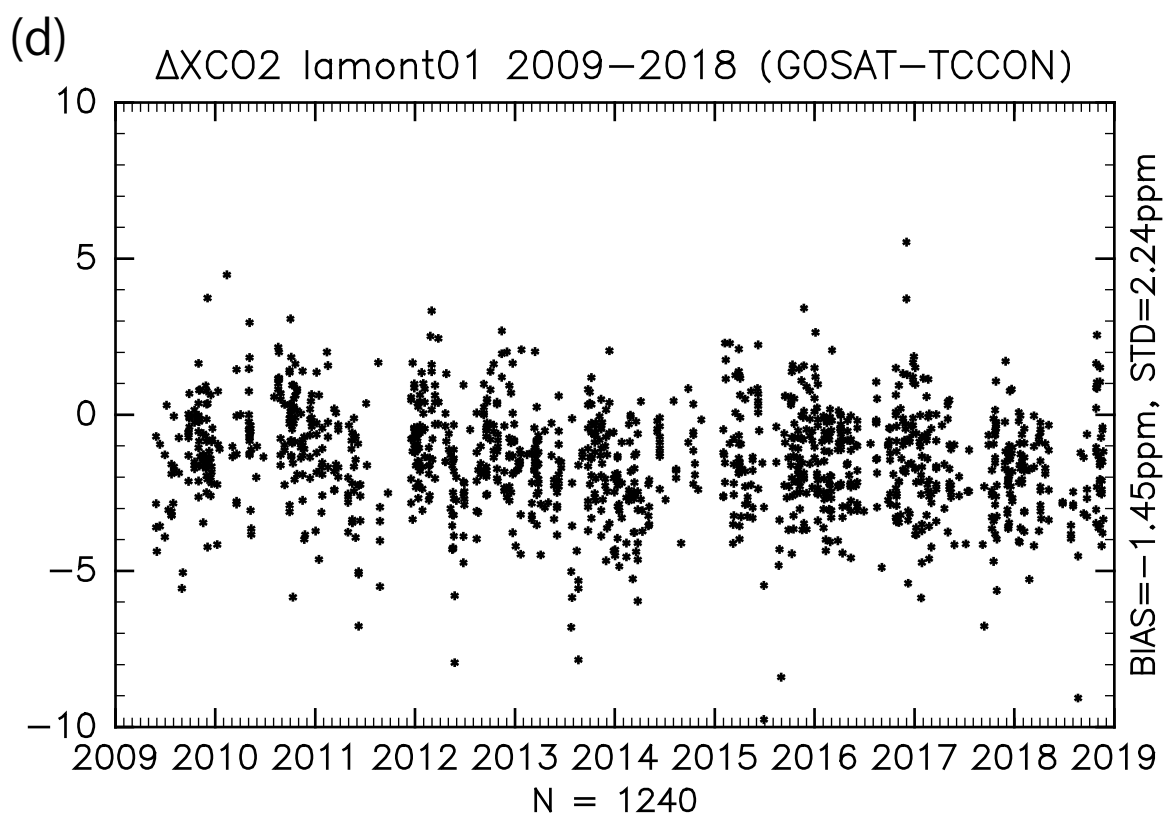
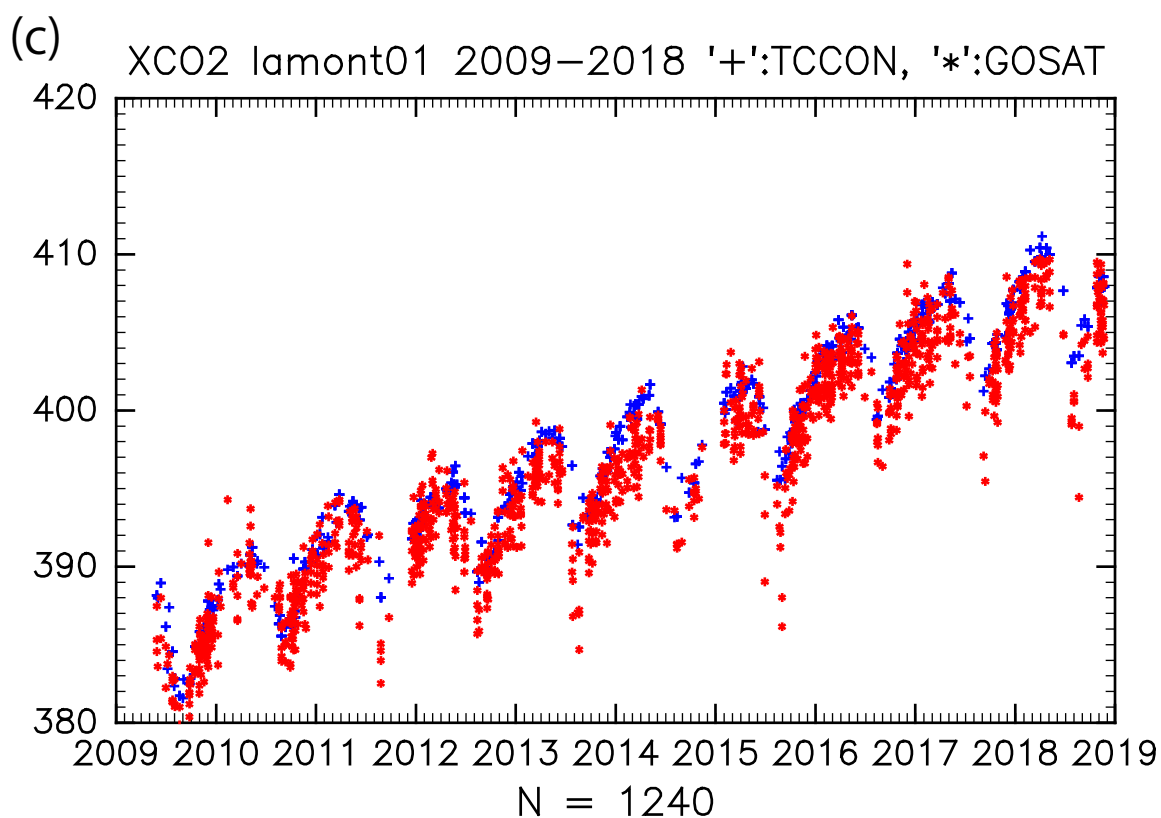


Fig. 1(continued) (c) XCO₂ and (d) Δ XCO₂ at Lamont, same as (a) and (b).

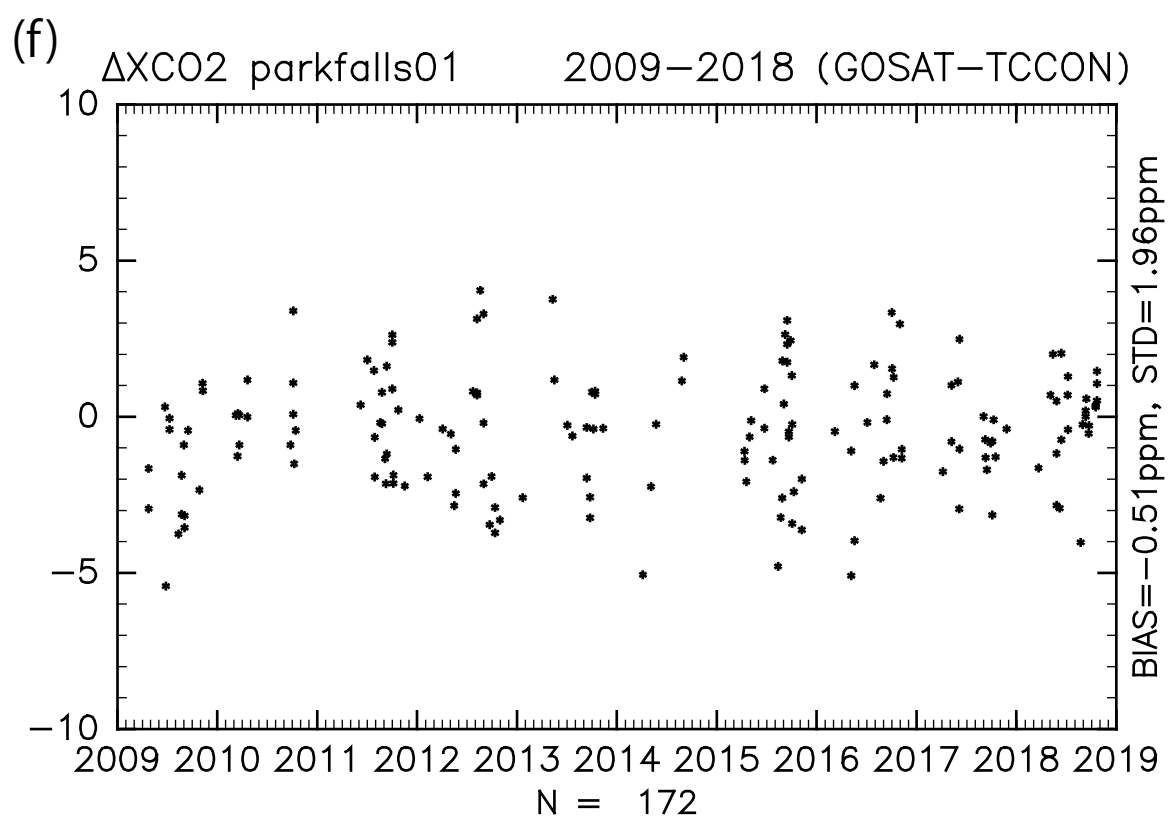
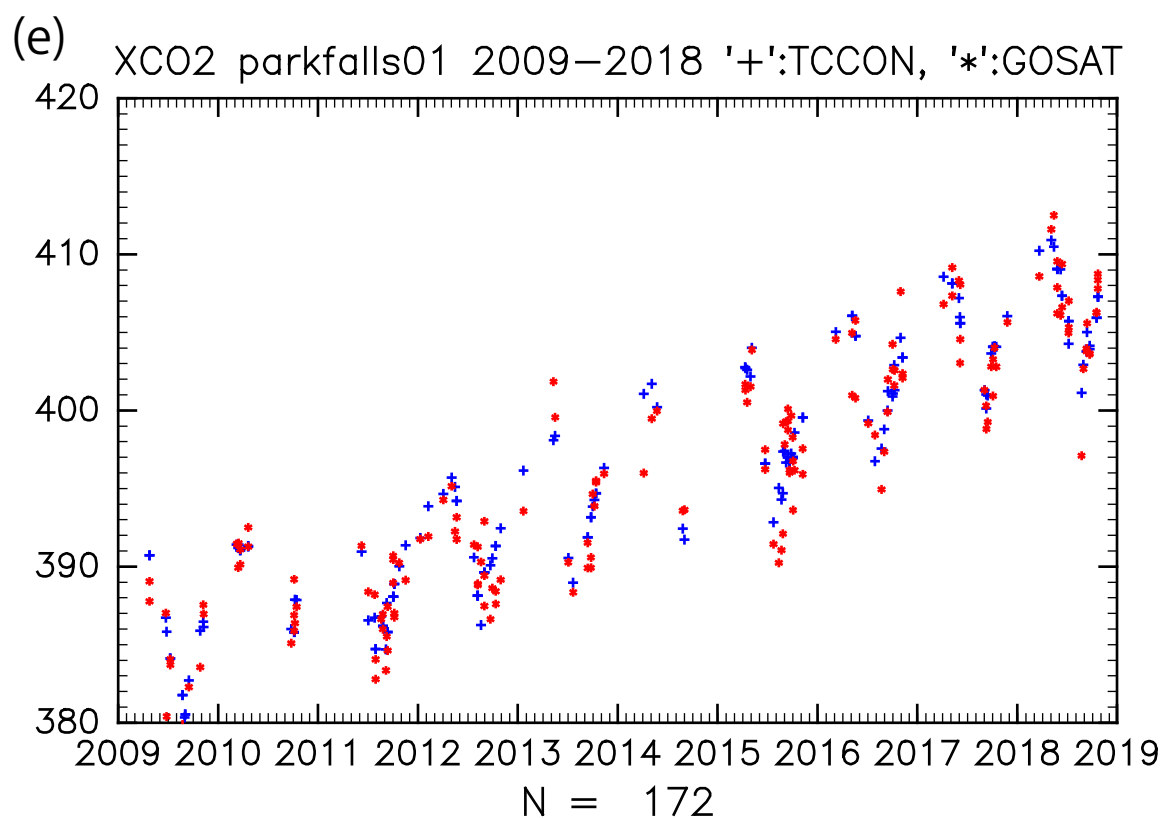


Fig. 1(continued) (e) XCO₂ and (f) Δ XCO₂ at Park Falls, same as (a) and (b).

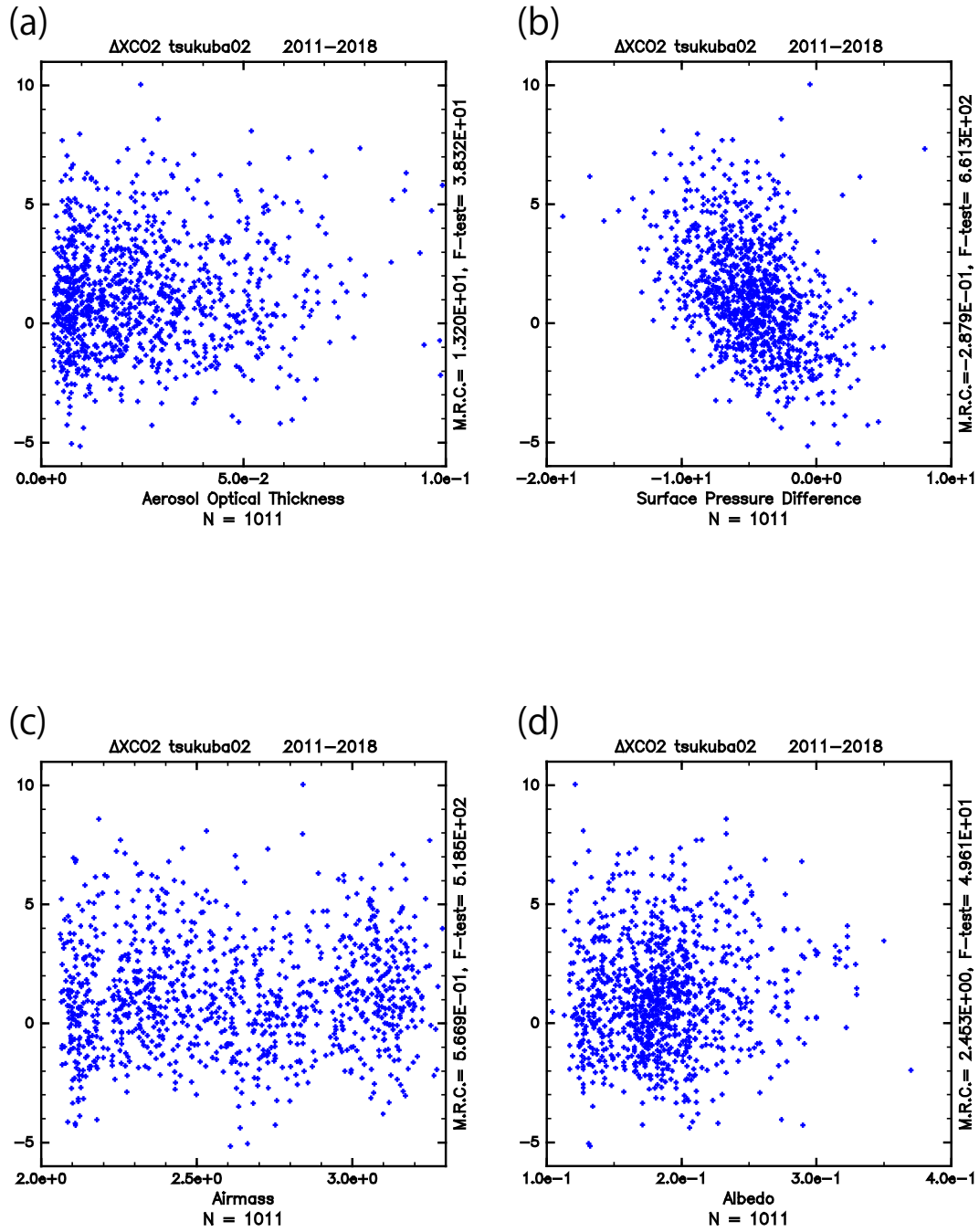


Fig. 2 Scatter diagram between ΔXCO_2 and (a) aerosol optical thickness, (b) surface pressure difference between retrieval and reference data, (c) airmass, and (d) O₂A-band albedo of GOSAT FTS SWIR L2 CO₂ V02.72 product at Tsukuba. Note that the albedo data used in this study is reference data. N is number of the plotted data. M.R.C. is multiple correlation coefficient of each parameter. F-test is value of the test of the null hypothesis that ΔXCO_2 does not have correlation with the parameter.

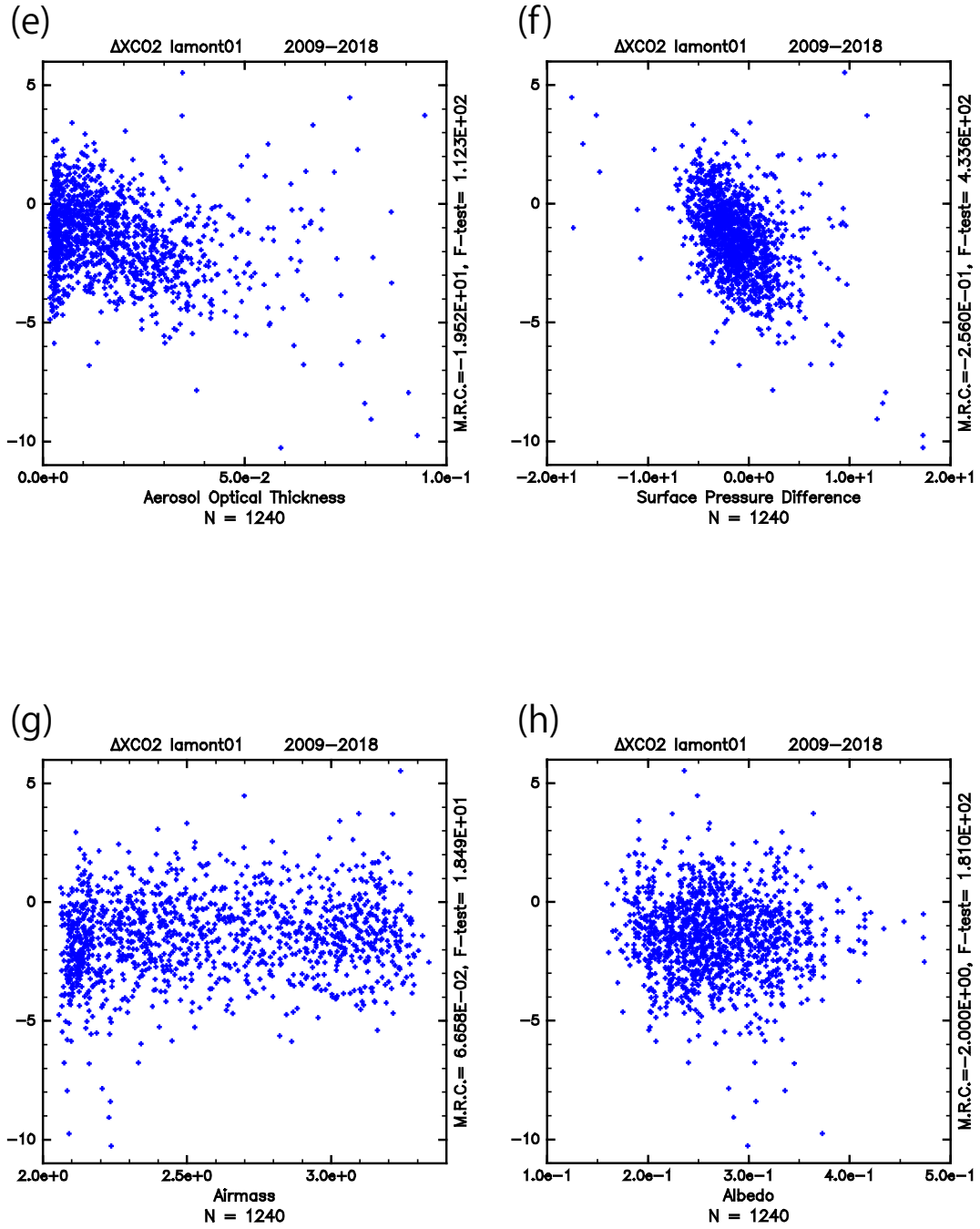


Fig. 2(continued) (e)~(h) Scatter diagram for Lamont, same as (a)~(d).

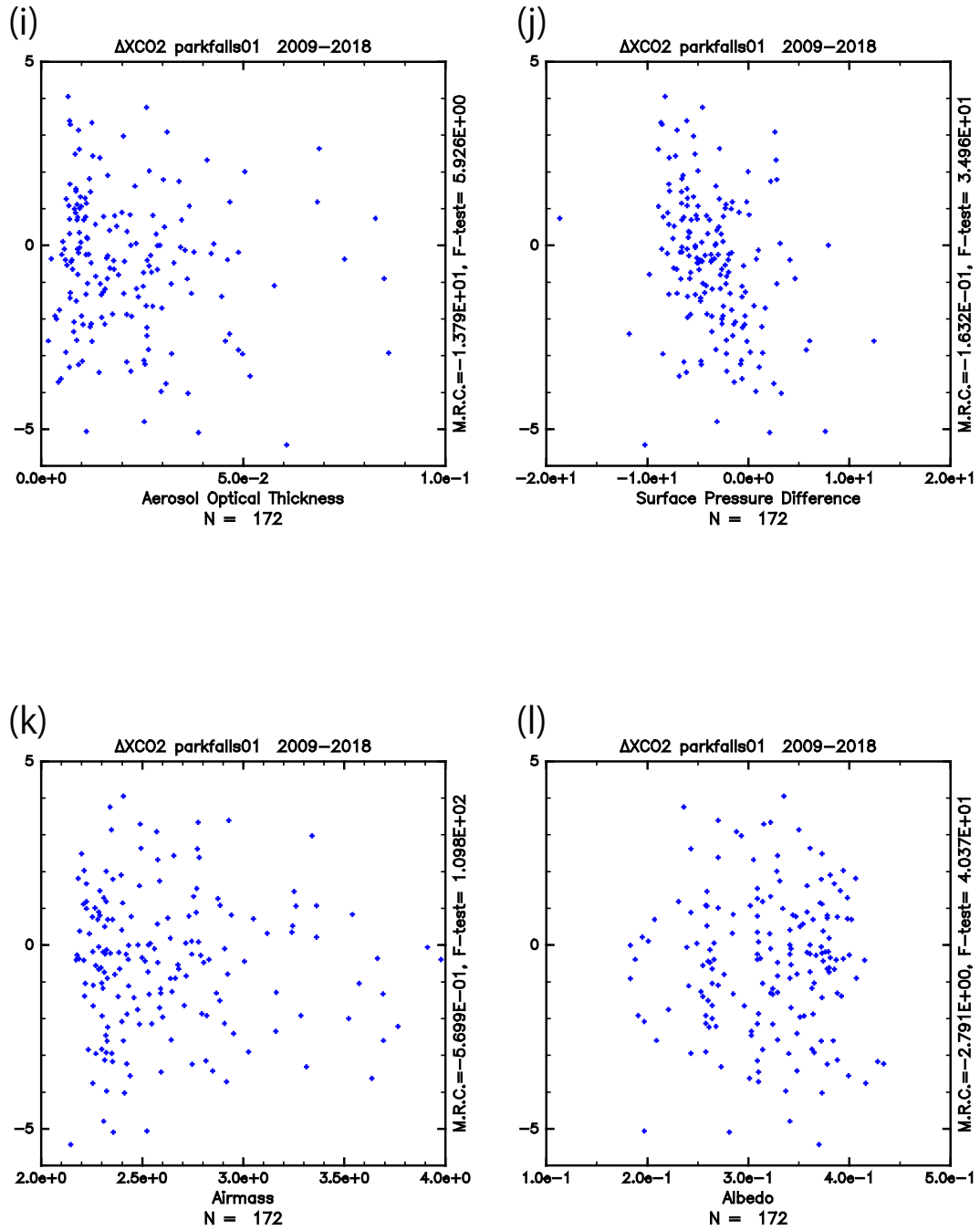


Fig. 2(continued) (i)~(l) Scatter diagram for Park Falls, same as (a)~(d).

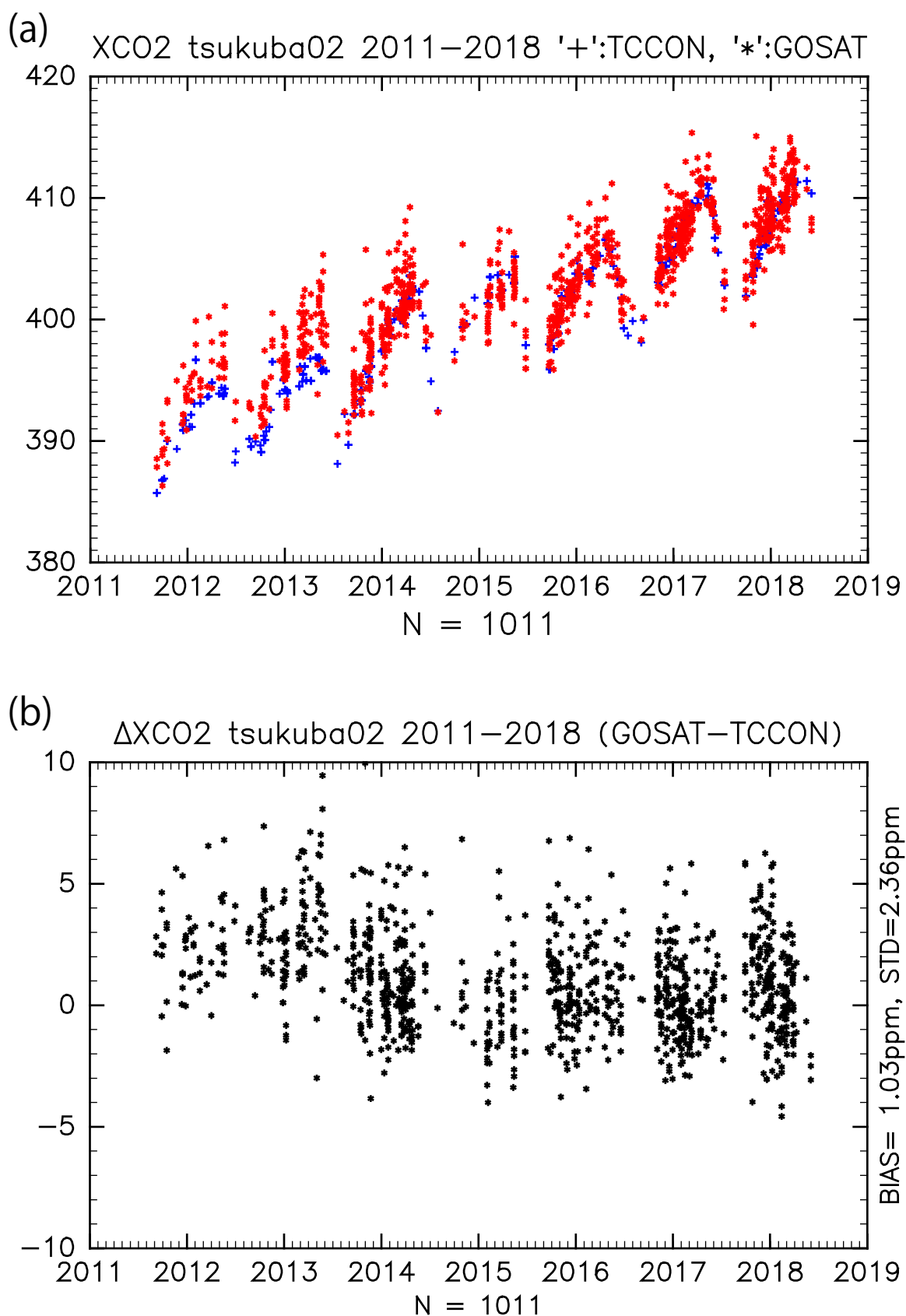


Fig 3 (a) XCO₂ of GOSAT FTS SWIR L2 CO₂ V02.75 product (the red '*' marks) and TCCON GGG2014 data (the blue '+' marks) at Tsukuba, same as Fig. 1(a). (b) Δ XCO₂ at Tsukuba, same as Fig. 1(b).

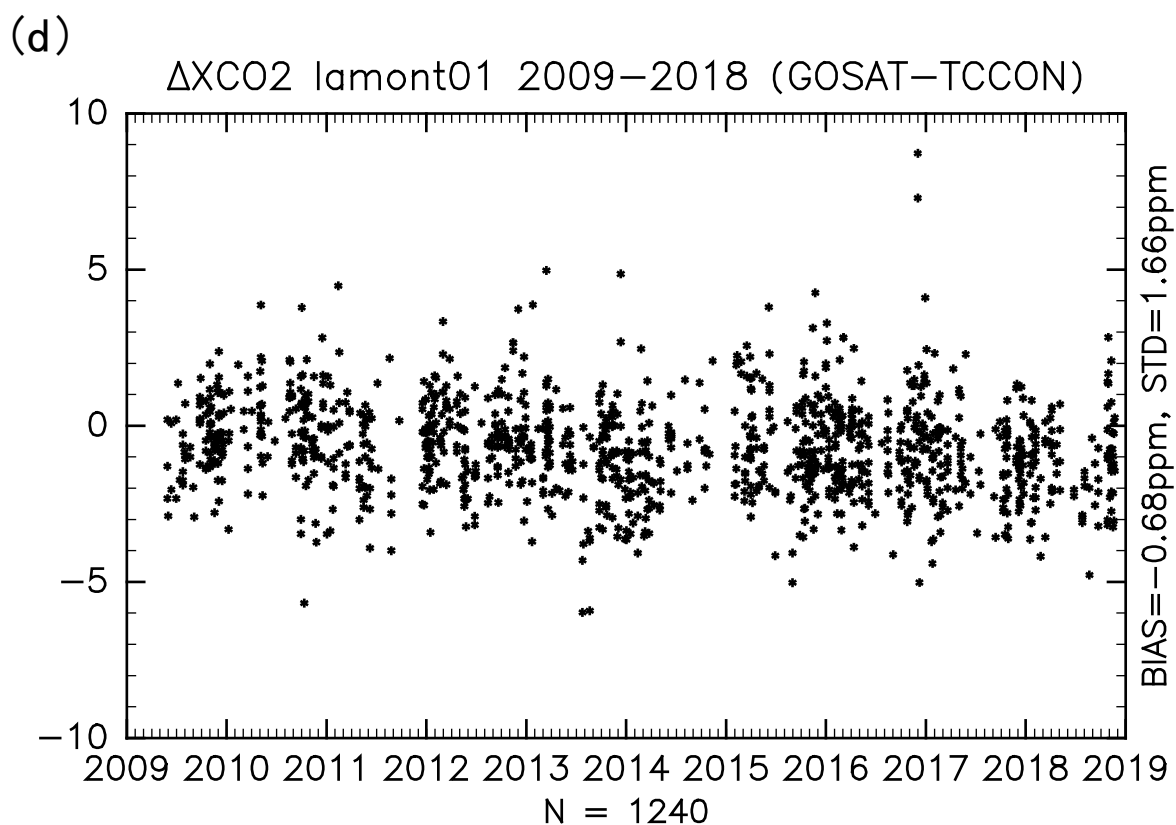
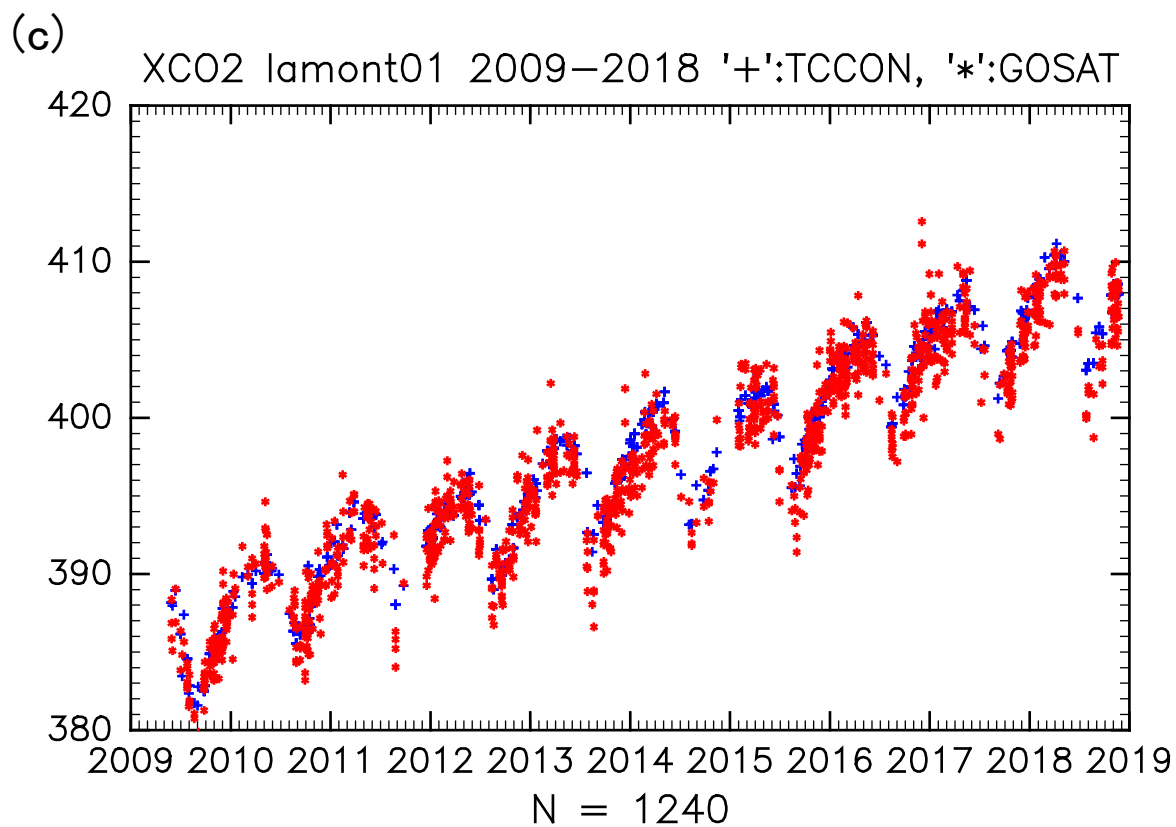


Fig. 3(continued) (c) XCO₂ and (d) Δ XCO₂ at Lamont, same as (a) and (b).

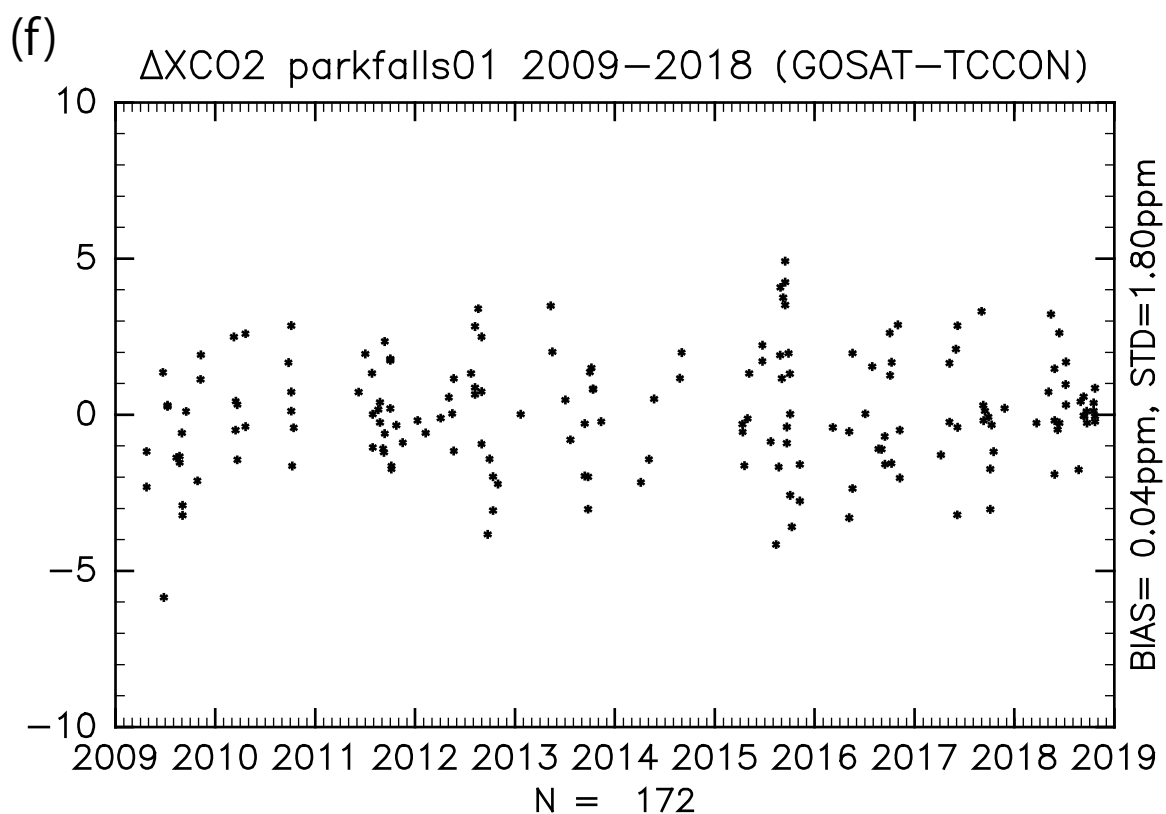
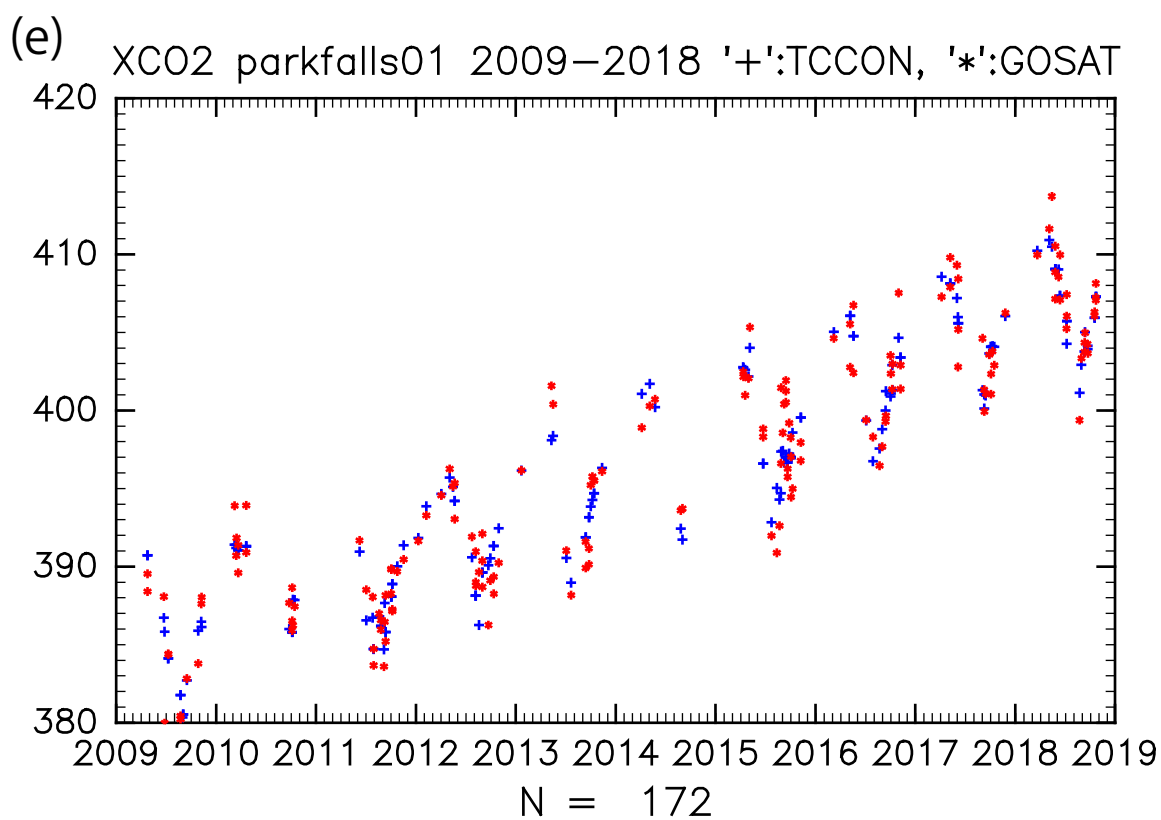


Fig. 3(continued) (e) XCO₂ and (f) Δ XCO₂ at Park Falls, same as (a) and (b).

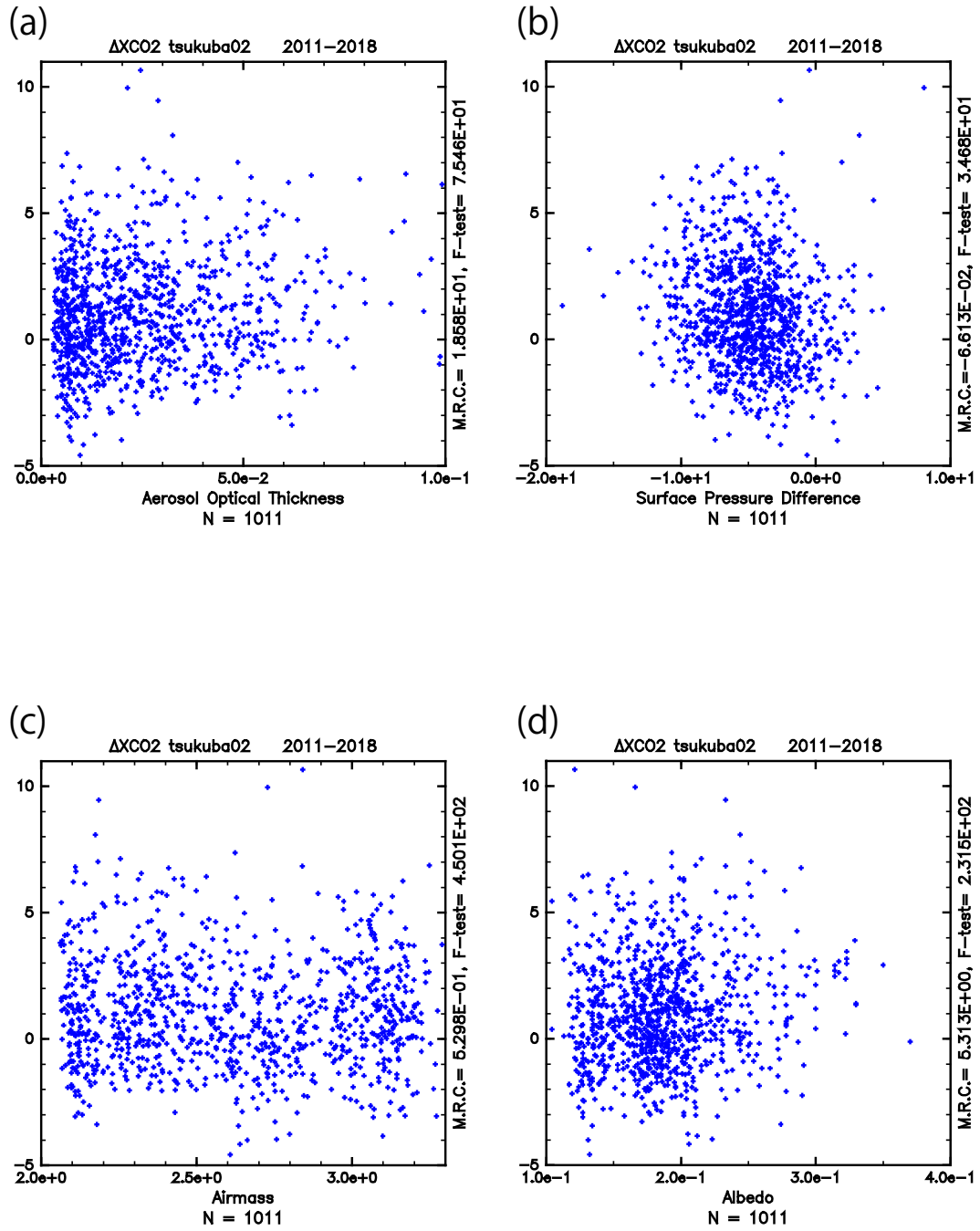


Fig. 4 Scatter diagram between ΔXCO_2 and (a) aerosol optical thickness, (b) surface pressure difference between retrieval and reference data, (c) airmass, and (d) O₂A-band albedo of GOSAT FTS SWIR L2 CO₂ V02.75 product at Tsukuba, same as Fig. 2 (a)~(d).

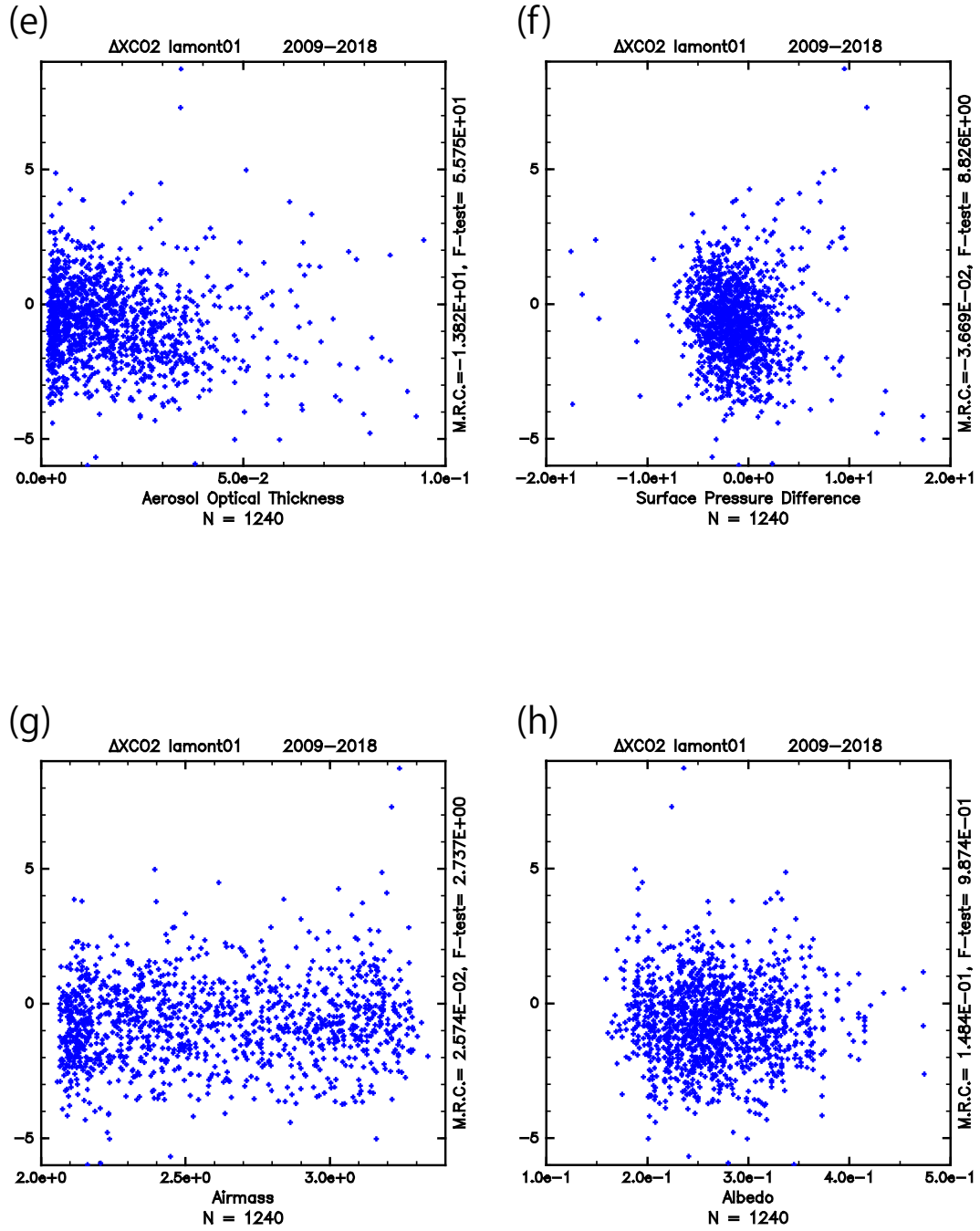


Fig. 4(continued) (e)~(h) Scatter diagram for Lamont, same as (a)~(d).

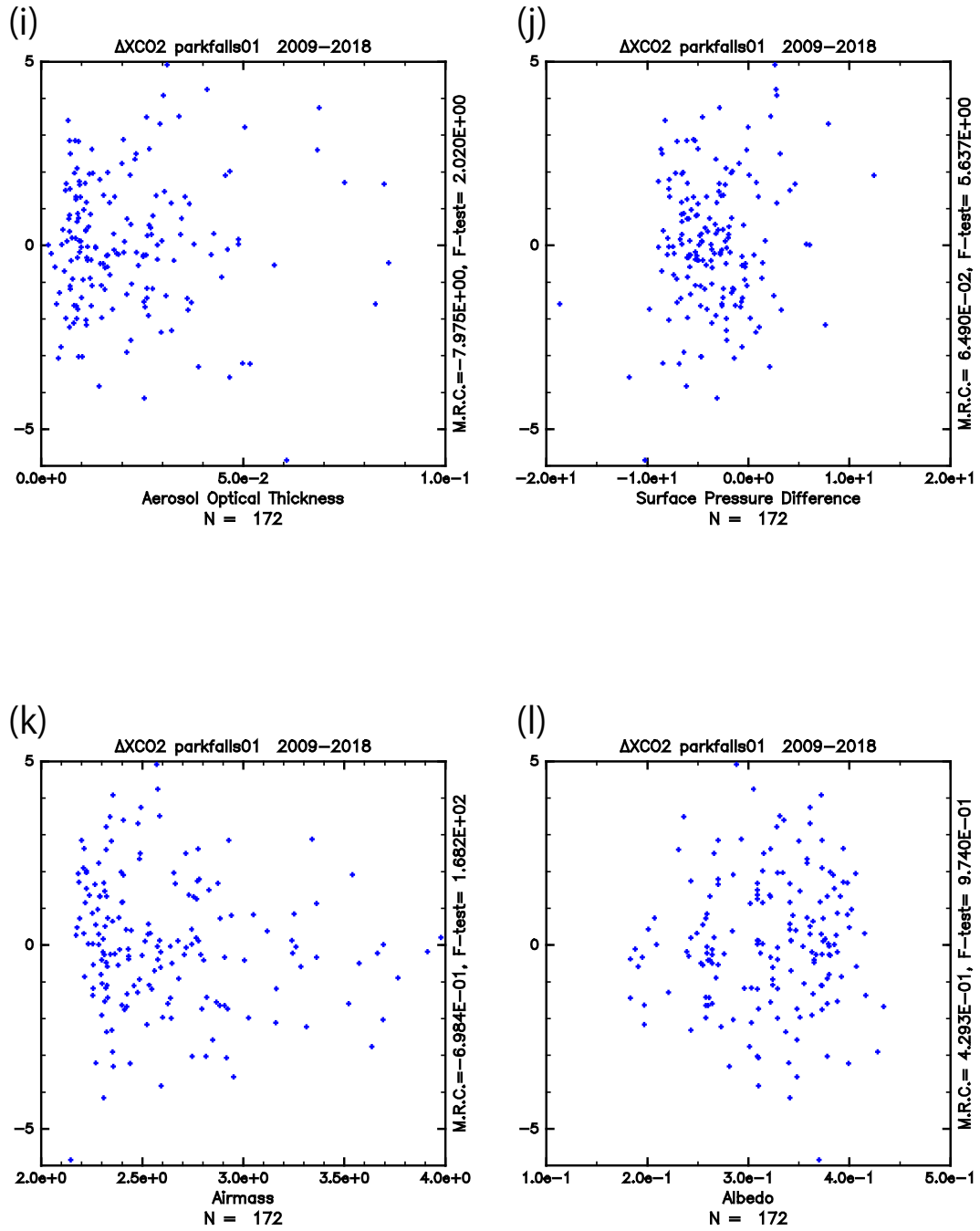


Fig. 4(continued) (i)~(l) Scatter diagram for Park Falls, same as (a)~(d).

Table 1 Multi correlation coefficients between parameters and ΔXCO_2 for (a) Tsukuba, (b) Lamont, and (c) Park Falls. Shown in parentheses is F-test. See also caption of Fig. 2.

(a) Tsukuba		
	V02.72	V02.75
AOT	13.20 (38.32)	18.58 (75.46)
ΔP_s	-0.288 (661.3)	-0.066 (34.68)
Airmass	0.567 (518.5)	0.530 (450.1)
Albedo_O ₂	2.453 (49.61)	5.313 (231.5)
(b) Lamont		
	V02.72	V02.75
AOT	-19.52 (112.3)	-13.82 (55.75)
ΔP_s	-0.256 (433.6)	-0.037 (8.826)
Airmass	0.067 (18.49)	0.026 (2.737)
Albedo_O ₂	-0.200 (181.0)	0.148 (0.987)
(c) Park Falls		
	V02.72	V02.75
AOT	-13.79 (5.926)	-7.975 (2.020)
ΔP_s	-0.163 (34.96)	0.065 (5.637)
Airmass	-0.570 (109.8)	-0.698 (168.2)
Albedo_O ₂	-2.791 (40.37)	0.429 (0.974)

5. まとめ

GOSAT FTS SWIR L2 CO₂プロダクト(V02.72)の解析では、選んだ3つのサイトで共通して ΔXCO_2 と ΔP_s の間に高い相関が認められ、V02.72のバイアス修正版であるV02.75ではこの相関については比較的良く補正されていた。しかし、他のパラメータについては、3サイトに共通する補正の効果は見られなかった。また、3つの内2つのサイトではV02.75でも依然として

無視できないバイアスが残っていることが分かった。今後は更に解析を進めてバイアスの原因を究明し、衛星データを逆転法に用いた際の推定フラックスの精度に重大な影響を与えないレベルまで、各サイトの ΔXCO_2 を補正する事を目指したい。

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

- 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 L2 CO₂ プロダクト (V02.75)の公開について, GOSAT Data Archive Service (GDAS)ホームページ.
- 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.
- 宇宙航空研究開発機構, 国立環境研究所, 環境省 (2011) : 地球観測データ利用ハンドブック (GOSAT/いぶき), GOSAT Data Archive Service (GDAS)ホームページ.
- GOSAT Data Archive Service Homepage (2018): <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.
- TCCON Data Archive Homepage (2018): <https://tccondata.org/>
- TCCON Wiki Homepage (2018): <https://tccon-wiki.caltech.edu/>
- 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. (2011a): 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.
- 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. (2011a): The Total Carbon Column Observing Network, *Phil. Trans. R. Soc. A*, 369, 2087–2112, doi:10.1098/rsta.2010.0240.

(論文受理日：2019年6月17日)