

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：82101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00531

研究課題名(和文) 衛星観測温室効果ガスデータの検証・補正手法の高度化に関する研究

研究課題名(英文) Research for advancement in validation and correction methods of satellite-based greenhouse gases data

研究代表者

森野 勇 (Morino, Isamu)

国立研究開発法人国立環境研究所・地球環境研究センター・主任研究員

研究者番号：90321827

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：日本の温室効果ガス観測技術衛星(GOSAT)は、対流圏から大気上端までの温室効果ガスのカラム平均濃度を導出する世界初の専用衛星であり、9年以上の観測データが公開されている。GOSATにより、衛星を用いた短波長赤外スペクトルからの高精度温室効果ガス導出法、データ質検証法、大気輸送モデルの逆計算による地表面フラックス推定法が確立され、幅広い研究に道を開いた。より研究成果を得るためには、更なるGOSATデータの高精度化が必須で、導出手法の改良には大きな労力を要する。本研究は比較的短時間に高精度化が実現可能な、衛星データ検証・補正手法の高度化に関する研究を行った。

研究成果の概要(英文)：Japanese Greenhouse gas Observing SATellite (GOSAT) is the world's first satellite dedicated to deriving greenhouse gas column-averaged dry air mole fractions from the troposphere to the top of atmosphere and more than nine years observation data have been released to the public. GOSAT cut a path through a wide range of researches such as GHG retrieval method from short wavelength IR spectra measured by satellite, validation method of satellite GHG data, surface flux estimation method by inverse calculation of atmospheric transport model. Much better precision in the GOSAT data is essential for achieving more outcomes, but it takes large effort to improve the retrieval method. In this study, advancement of methods for validation and empirical bias correction, which was feasible in a short time, was made.

研究分野：大気分光學

キーワード：温室効果ガス 衛星観測 データ検証 データ補正

1. 研究開始当初の背景

主要な温室効果ガスである二酸化炭素 (CO₂) やメタン (CH₄) の全球分布とその変動特性等を明らかにすることを目的に、温室効果ガス観測技術衛星 (GOSAT, Greenhouse gases Observing SATellite) が2009年1月23日に打ち上げられ、継続して観測が行われており、これまで5年以上の観測データが蓄積されている。このGOSATプロジェクトは、環境省 (MOE)、宇宙航空研究開発機構 (JAXA)、国立環境研究所 (NIES) が共同で推進している。GOSATには、主観測装置であるTANSO-FTS (Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observation - Fourier Transform Spectrometer) と補助観測装置であるTANSO-CAI (Cloud and Aerosol Imager) が搭載され、TANSO-FTSにより地表面で反射された短波長赤外域 (SWIR, 0.76、1.6、2.0 μm 帯の3バンド) の太陽光と、地球大気や地表から放射される熱赤外光 (TIR, 5.56 ~ 14.3 μm の1バンド) を、波数分解能 0.27 cm⁻¹、地表面での瞬視視野直径約 10.5 km で観測し、それぞれ CO₂ や CH₄ のカラム平均濃度 (XCO₂、XCH₄、以後 GOSAT データ) と濃度高度分布を導出する。雲がある場合、これらを精度良く導出することは難しいため、現在雲のない領域のみを対象とした導出を行っている。全球大気輸送モデルの逆計算による亜大陸規模の地上フラックス推定や科学研究への利用のためには、高い精度のGOSAT データが必要で、GOSAT データの不確かさやその時間変化を明らかにする検証を継続して行うことは極めて重要であり、GOSAT プロジェクトとして検証を推進している。

GOSAT データの検証は、地上設置高分解能 FTS 観測網 (TCCON, Total Carbon Column Observing Network) [1] で取得された XCO₂ と XCH₄ (TCCON データ) [2]、及び航空機観測によって得られた濃度高度分布データをもとに計算された XCO₂ と XCH₄ [3, 4] を用いて実施している。NIES の現バージョン (改善された解析アルゴリズムを用いて処理された GOSAT データ、Ver. 02.xx) のデータ質は、TCCON サイト周辺における GOSAT データを、TCCON データを用いて評価した結果、GOSAT XCO₂ のバイアス ±ばらつきは -1.48 ± 2.09 ppm、GOSAT XCH₄ は -5.9 ± 12.6 ppb であることがわかっている [2]。国内外の他グループ (ACOS, SRON/KIT, University of Leicester, NIES PPDF 法) による GOSAT スペクトルからのカラム平均濃度導出結果にも同程度の不確かさがある。

GOSAT データは、地上フラックス推定、他衛星データやモデルデータとの比較だけでなく、炭素収支の季節変動の解釈、大規模な山火事や大都市による CO₂ や CH₄ の増加の検出等に、幅広く利用されるようになってきている。つまり、衛星を用いた短波長赤外スペクトルからの高精度温室効果ガス導出法、デ

ータ質検証法、大気輸送モデルの逆計算による地表面フラックス推定法の確立により、幅広い研究に道が開かれたと言える。

しかし、GOSAT は多くの税金が投入されているプロジェクトであり、より一層の国内外の社会・国民に研究成果を発信することが必須で、ようやくこれが可能となりつつある。よりインパクトがあり高品質な研究成果を効率的に得るためには、更なる GOSAT データの高精度化が必須である。特にバイアスの地域依存性が存在していることが問題となっている。これを導出手法の改良によって解決するには大きな労力を要する。一方、衛星データ検証・補正手法の問題点の洗い直しと高度化により、バイアスは限りなくゼロに減少させることが出来る可能性がある。

2. 研究の目的

本研究は、我々がこれまで行ってきた研究結果と文献を調査して、衛星データ検証・補正手法の問題点の洗い直しと高度化のための手法開発に関する研究を行い、比較的短時間に確実に GOSAT データのさらなる高精度化の実現を目指す。

3. 研究の方法

衛星データ検証・補正手法の問題点として、検証データと衛星データのデータ質、相関解析における衛星データと検証データの同期条件、相関解析では互いの精度が同程度であるために両方の重みを考慮しない解析では不十分である可能性があることなどが挙げられる。

本研究では、検証データ、特に TCCON データのデータ質の解析とデータスクリーニング法の開発、相関解析におけるデータセット同期方法と解析手法の改善、補正手法の改良を行う。次に、GOSAT データを用いてどの程度改善することが出来たのか確認を行う。更に、改善されたデータの詳細解析による特異現象の検出を試みる。研究の方法は具体的には下記の通りである。

(1) 検証及び衛星データのデータ質の解析とデータスクリーニング法の開発

GOSAT データは、検出器のプリアンプのゲインにより短波長赤外スペクトルのデータ質が異なること (衛星打上後に判明)、陸域と海域の観測で地表面 (水面) の反射特性が異なることから、データ質が全球で一様ではない。この要因を解析して特性を理解する。

検証データ、特に TCCON データのデータ質は CO₂ については幾分知られているものの [5, 6]、その他の温室効果ガスについては殆ど分かっていない。風向などの気象データを組み合わせた解析・要因分析を行い、Outlier として除外するか、誤差として考慮するべきか判断する。

(2) 相関解析におけるデータセット同期方

法と相関解析手法の改善

衛星データと検証データを同期する方法は、(2-a) 時空間による一致 (geophysical collocation) [7]、(2-b) 温位などの気象場に基づく一致 (meteorological collocation) [8]、(2-c) 輸送モデル計算値に基づく一致 (model data collocation) [9]、(2-d) 空間統計を用いた一致 (geostatistical collocation) [10] が行われている。空間代表性の妥当性、容易に実施出来るか等の功罪があるので、これを明らかにして、必要な機能を取り込む。Column averaging kernel (観測データの高度に対する感度の情報) も考慮する。

相関解析では、衛星データと検証データの精度が同程度である場合、互いの重みを考慮した相関解析 (York fit, [11]) を行うことが必要であることが分かっており、これを適用する。

(3) 補正手法の改良と GOSAT データを用いた検証・補正法の改善の確認

温室効果ガス導出時には、短波長赤外スペクトルの説明変数となる他の物理量を同時に導出しているが、この際、温室効果ガスと相関がないことが期待される物理量との間に擬似的な相関関係が生じてしまうことがある。

補正手法としては、これらの物理量との相関関係を調べ、その相関がないようにデータを補正する重回帰分析が用いられている [8]。この時、何を真値にするか検討を行う必要がある。これまでは(3-a) 南緯 30-45° の濃度高度勾配のない地域の地上データ [8]、(3-b) TCCON データ [9]、(3-c) 輸送モデル計算値等が行われている。それぞれの功罪を調査・検討し、総合的に機能を取り込む。(3-a) は、北半球に適用したときの誤差のリスクがあり、(3-b) の TCCON データは陸域のみに偏る問題、(3-c) の輸送モデル計算値はこれ自身の精度が問題となると考えられる。

衛星データと検証データの精度が同程度である場合、単回帰分析では互いの重みを考慮した解析 (York fit, [11]) の必要性が指摘されているが、文献を確認した限りは重回帰分析への適用例は存在しないので、重回帰分析への実現可能か理論的に検討し、実装する必要がある。誤差伝搬の機能も入れる。

更に、GOSAT データに適用し、精度が改善したかどうかを確認する。

なお、本研究では、フリーソフトでありデータの取り扱いが容易な python や、本研究分野で幅広く用いられている IDL を用いて検証解析・補正手法の開発を行う。

4. 研究成果

(1) 検証及び衛星データのデータ質の解析とデータスクリーニング法の開発

主要な検証データである TCCON データのデータ質を確認するために、複数のガス種の

時系列プロットを同時に表示できる作図ツールを開発し、outlier と現象の区別が容易に検討出来るようになった。日本周辺では、総観規模の変動とその地域の現象とを分離して理解できるケースを見いだすことが出来た。

(2) 相関解析におけるデータセット同期方法と相関解析手法の改善

これまで提唱された同期手法を用いた同期ツールを開発し、どの同期手法が有効であるか一目で把握出来るようになった。

CO₂ では輸送モデル計算値を用いた場合が、最もマッチアップ数を増加させることが出来ることが分かった。検証に用いる地点の大気の特徴、また検証に求められる精度によって手法を適切に選択する必要があることが分かった。

次に、衛星データと検証データの同期法の違いによる検証結果の比較を行った。異なる同期法による検証結果は大きく異なることが分かり、同じ空気塊であれば同期したデータセット数が最大となる同期法が最も良いことが分かった。

相関解析では、重みの有/無を変えて解析できるツールを開発した。現在の GOSAT データを用いた場合、相関解析結果には大きな差異が無かったことが分かった。

(3.1) 補正手法の改良と GOSAT データを用いた検証・補正法の改善の確認

データセットが変わる毎に、同時に導出される物理量との相関関係の洗い直しを行った。

GOSAT データのバージョンが複数存在する場合の補正を行い、その結果の検討を行った。次に、全 TCCON サイトを補正に使った場合、補正係数の決定精度が向上することも実証でき、XCH₄ は XCO₂ と同じ数の補正係数で補正できるようになり、補正前後で GOSAT データのバイアスがこれまでの結果と異なり明瞭に改善できたことが分かった。

更に、統一されたバージョンで処理された GOSAT データ (Ver. 02.72) を用いて CO₂ 及び CH₄ の経験的補正を行った。補正係数は、複数のバージョンが存在する場合と比較して幾分変化したが、補正結果は良好な結果、つまり、バイアスが改善され、バラツキも幾分良くなった。

(3.2) GOSAT の新規プロダクトである XH₂O データの検証・補正

2016 年 9 月から一般公開が始まった XH₂O の補正を初めて試みた。同時に導出される物理量との相関関係を調査し、パラメータの選択を行った。空間同期条件をかえて、補正前、経験的補正、高度補正、高度補正と経験的補正両方について比較したところ、空間同期条件を小さくした方が、バイアスが改善されていることが明らかとなったが、補正手法の組

み合わせによる違いは拮抗しており、高度補正のみが良い場合と両方を用いた場合が良い場合があった。結果としてH₂Oの補正でもCO₂と同程度の数と精度で補正係数の決定をすることができ、補正前後でGOSATデータのバイアスが明瞭に改善することが確認できた。

今回、XH₂Oが加わることにより、補正されたXCO₂、XCH₄、XH₂Oデータを用いて時空間解析することにより、温室効果ガス吸収・排出源に対し、より踏み込んだ人為起源と自然起源との区別ができる可能性が出てきたと考えられる。

<引用文献>

- [1] D. Wunch et al., *Philos. T. Roy. Soc. A*, 369, 2087-2112, doi:10.1098/rsta.2010.0240, 2011.
- [2] Y. Yoshida et al., *Atmos. Meas. Tech.*, 6, 1533-1547, doi:10.5194/amt-6-1533-2013, 2013.
- [3] M. Inoue et al., *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 9771-9788, doi:10.5194/acp-13-9771-2013, 2013.
- [4] M. Inoue et al., *Atmos. Meas. Tech.*, 7, 2987-3005, doi:10.5194/amt-7-2987-2014, 2014.
- [5] D. Wunch et al., *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 9447-9459, doi:10.5194/acp-13-9447-2013, 2013.
- [6] N. M. Deutscher et al., *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 9883-9901, doi:10.5194/acp-14-9883-2014, 2014.
- [7] I. Morino et al., *Atmos. Meas. Tech.*, 4, 1061-1076, doi:10.5194/amt-4-1061-2011, 2011.
- [8] D. Wunch et al., *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 12317-12337, doi:10.5194/acp-11-12317-2011, 2011.
- [9] S. Guerlet et al., *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 4887-4905, doi:10.1002/jgrd.50332, 2013.
- [10] H. Nguyen et al., *Atmos. Meas. Tech.*, 7, 2631-2644, doi:10.5194/amt-7-2631-2014, 2014.
- [11] D. York, *American Journal of Physics*, 72, 367-375, doi:10.1119/1.1632486, 2004.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1件)

M. Inoue, I. Morino, O. Uchino, T. Nakatsuru, Y. Yoshida, T. Yokota, D. Wunch, P. O. Wennberg, C. M. Roehl, D. W. T. Griffith, V. A. Velazco, N. M. Deutscher, T. Warneke, J. Notholt, J. Robinson, V. Sherlock, F. Hase, T.

Blumenstock, M. Rettinger, R. Sussmann, E. Kyrö, R. Kivi, K. Shiomi, S. Kawakami, M. De Mazière, S. G. Arnold, D. G. Feist, E. A. Barrow, J. Barney, M. Dubey, M. Schneider, L. Iraci, J. R. Podolske, P. Hillyard, T. Machida, Y. Sawa, K. Tsuboi, H. Matsueda, C. Sweeney, P. P. Tans, A. E. Andrews, S. C. Biraud, Y. Fukuyama, J. V. Pittman, E. A. Kort, T. Tanaka
Bias corrections of GOSAT SWIR XCO₂ and XCH₄ with TCCON data and their evaluation using aircraft measurement data
Atmos. Meas. Tech. (査読有), 9, 3491-3512, <https://doi.org/10.5194/amt-9-3491-2016>, 2016.

[学会発表](計 3件)

Tran Thi Ngoc Trieu, Isamu Morino, Hirofumi Ohyama, Osamu Uchino
Bias correction of GOSAT SWIR XH₂O using TCCON data
EGU General Assembly 2018
Vienna, Austria, 8-13 Apr. 2018
Takahiro Nakatsuru, Isamu Morino, Osamu Uchino, Yukio Yoshida, Makoto Inoue
Development of match-up tool of satellite and ground-based greenhouse gases data for GOSAT-2 data validation
2015 AGU Fall Meeting
San Francisco, California, USA, 14-18 Dec. 2015
中津留高広、森野勇、内野修、吉田幸生、井上誠、TCCON partners
GOSAT-2の検証に向けた衛星データと地上データのマッチアップツールの開発
第21回大気化学討論会
東京工業大学大岡山キャンパス 地球生命研究所新棟、2015年10月19~21日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森野 勇 (MORINO, Isamu)
国立研究開発法人国立環境研究所・地球環境研究センター・主任研究員
研究者番号：90321827

(2) 研究分担者

井上 誠 (INOUE, Makoto)
公立大学法人秋田県立大学・生物資源科学部・准教授
研究者番号：00599095

吉田 幸生 (YOSHIDA, Yukio)
国立研究開発法人国立環境研究所・地球環境研究センター・主任研究員
研究者番号：00414392