

3. GOSAT および GOSAT-2による CO₂観測

横 田 達 也*

1. はじめに

温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」(Greenhouse gases Observing SATellite, GOSAT) は2009年1月23日に打ち上げられ、2014年の1月で衛星の定常運用期間である5年を迎える。観測データは2009年6月から現在まで、ほぼ連続的に取得されている。

GOSAT プロジェクトは環境省・宇宙航空研究開発機構(JAXA)・国立環境研究所(NIES)(以下、「三者」とよぶ)が、各役割分担のもとに共同で推進するプロジェクトである。人工衛星から全球のCO₂を科学研究に利用できる程度の精度で観測することは困難であった。しかし、センサ技術とデータ解析手法の進歩により、CO₂濃度の南北変動や季節変動を検知できる1%精度を達成できるようになった。

また、GOSAT-2計画も三者により開始された。環境省ではGOSATと同じ地球環境局・研究調査室が、JAXAではGOSAT-2プリプロジェクトが、NIESではGOSAT-2プロジェクトチームが担当している。

ここでは、これまで「いぶき」が観測した全球CO₂の概要や、その観測データから得られたCO₂の吸収・排出に関する代表的な成果、そしてGOSAT-2による改良点の概要について紹介する。

2. 衛星センサとデータプロダクト

「いぶき」には、2つの主要センサであるTANSO(Thermal And Near-infrared Sensor for carbon Observation) - FTS(Fourier Transform Spectrometer)とTANSO-CAI(Cloud and Aerosol Imager)とが搭載されている。前者は可視・近赤外

と熱赤外の波長域の分光器であり、後者はFTSの視野内に雲があるかどうかを判断するための(加えて、エアロゾルの補正研究を目的とした)画像センサである。

NIESでは、JAXAから受け取るレベル1プロダクトから高次プロダクトを生成し、そのデータ質を検証したプロダクトを「標準プロダクト」として登録研究者と一般ユーザに提供している。一方、未検証のプロダクトは「研究プロダクト」と称し、登録研究者に提供している。

3. 「いぶき」によるCO₂濃度の観測結果

視野内に雲がない観測地点で、入射信号の状態(SN比)の良い(輝度が適当な)FTSの短波長赤外(SWIR)バンドの観測データから解析されたCO₂濃度データは、CO₂カラム量またはカラム平均濃度として提供されている。カラム量とは、地表面の単位面積上の鉛直の大気(気柱)中に含まれる気体分子の総数で、カラム平均濃度とは、乾燥空気の分子総数に対する対象ガスのカラム量の比のことである。CO₂のカラム平均濃度を「XCO₂」と表すことにする。

GOSATのデータプロダクトには、生データから高次処理に進む段階に応じて「データレベル」が設定されている。FTSのスペクトルデータは「レベル1」、XCO₂などのガス濃度データは「レベル2」である。また、それぞれのデータプロダクトには、処理アルゴリズムの改訂や参照データの変更によって「データバージョン」が設定される。GOSATのTANSO-FTS SWIRから最新の導出アルゴリズムに基づいて得られるXCO₂は、バージョン2である。細かくは、基となるスペクトルデータ(レベル1データ)のバージョンによって、V02.00, V02.10, V02.11, V02.20, V02.21などのバージョン番号が付与されて

* 独立行政法人国立環境研究所。

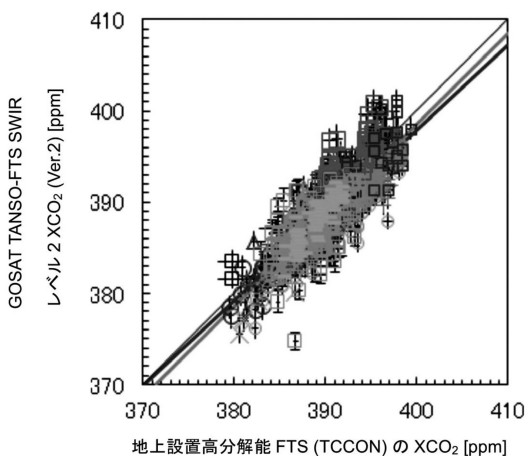
yoko@nies.go.jp

© 2014 日本気象学会

いる。レベル1のV150.151に対応してレベル2はV02.11で全期間のデータが処理されたが、2013年5月以降はレベル1データがV160.160またはV161.160にバージョンアップされたため、レベル2データもV02.20またはV02.21として公開されている。

「いぶき」の観測データの解析結果のデータ質を評価するために、「いぶき」の観測とほぼ同期して得られた航空機観測データや、地上設置高分解能FTSの観測ネットワーク（Total Carbon Column Observing Network; TCCON）のデータとの比較検証（第1図）がなされている。

Yoshida *et al.* (2013) によると、TCCON データを用いた検証解析の結果、GOSAT の SWIR レベル2 データ (Ver.2) の、バイアスは -1.48 ppm、ばらつきは 2.09 ppm であると報告されている。第1図にあるように、対象の大气中の CO_2 濃度はおよそ 390 ppm であると考えると、このバイアスとばらつきは、濃度に対してそれぞれ約 0.4% と 0.5% 程度の大きさであることがわかる。つまり、現在はGOSATから 1% 以下の程度の精度で CO_2 濃度を測定できると言える。ただし、これはTCCONサイトとの比較検証であって、TCCONサイトの無い赤道域や高緯度地域で同様のバイアスとばらつきがあるかどうかはわからない。また、厳密にはサイトや観測時期（季節）によってバイアスやばらつきにも変化が見られる場合がある。したがって、この検証結果は、あくまでも全体



第1図 TCCON データを用いたGOSATによるTANSO-FTS SWIR レベル2 (Ver.2)の検証結果。

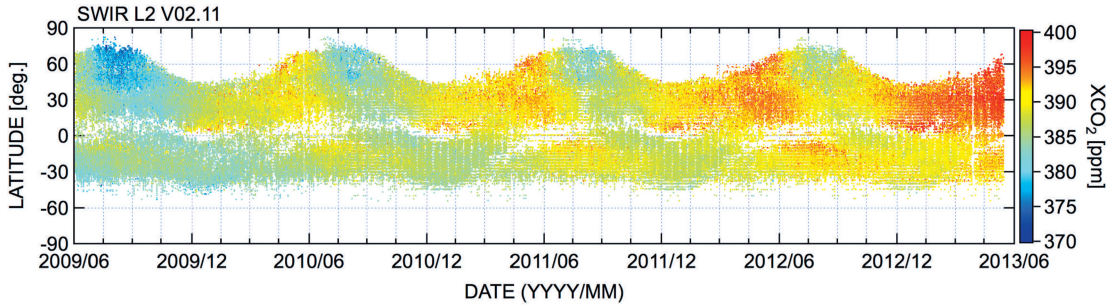
のデータ質の様子を「バイアスとばらつき」という二つの代表的なパラメータで近似的に表現したものであって、厳密にはバイアスには季節依存性や緯度依存性がある可能性がある。これらへの対処は今後の課題である。

「いぶき」によってこれまでに観測された XCO_2 の緯度分布の変化の様子を第2図に示す。全球分布の季節の変化の様子を示す代表例として、第3図に(a) 2009年7月(夏)、(b) 2009年10月(秋)、(c) 2010年1月(冬)、(d) 2010年4月(春) (カッコは北半球の季節)を示す。これらの図から、「いぶき」が観測できる領域は季節によって変化し、北半球の高緯度は、その夏にしか測定できないこと、赤道域周辺は常に雲に覆われていることが多く、年間を通じて濃度データを取得しにくいことがわかる。

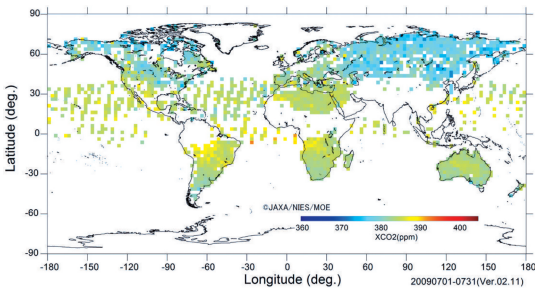
第3図をみると、観測される領域は雲の分布の状況の季節による変化や、太陽緯度に基づく信号の強さの変化によって、時期（季節）によって大きく変化するものの、北米中低緯度の領域とオーストラリアでは、年間を通じてどの時期も CO_2 データが取得されることがわかる。そこで、この二つの領域について、領域内 XCO_2 の月平均値の月別変化をグラフに表してみた（第4図）。

第4図からは、以下のことがわかる。(1) 北半球の中低緯度にある北米の領域では、人間の社会活動による CO_2 の排出や森林火災及び夏季の植生による光合成などによって、その月平均値は $8\sim 9$ ppmの変動幅で季節変化をする。この変動幅は、地表面における CO_2 濃度の変動幅の約半分程度である。(2) 北米の濃度変化は、2009年から2010年にかけての増加量が他の年における年間増加量に比べて大きい。(3) 南半球に位置するオーストラリアの領域では、季節が北半球と逆転するため、北半球とは逆位相で若干の季節変化を伴って年々の濃度上昇が見られる。その季節変動の振幅は極めて小さい。(4) これら二つの領域内の CO_2 カラム平均濃度月平均値の年間増加量は、いずれも約 $1.9\sim 2.0$ ppm程度である。なお、これら(1)~(4)は、これまでNOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) やWDCGG (World Data Centre for Greenhouse Gases) など地上観測に基づく測定結果から得られた知見に概ね整合している。

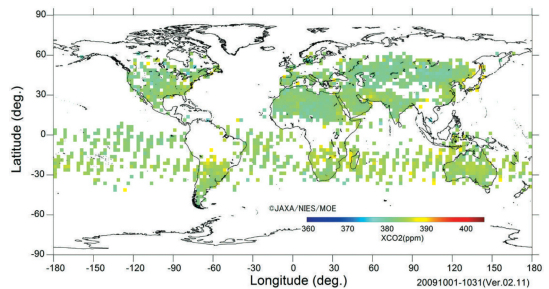
上記の(2)については、「いぶき」の観測から見られる2010年の北半球夏におけるヨーロッパとユーラシアの炭素吸収の低下」をテーマとしてGuerlet *et al.*



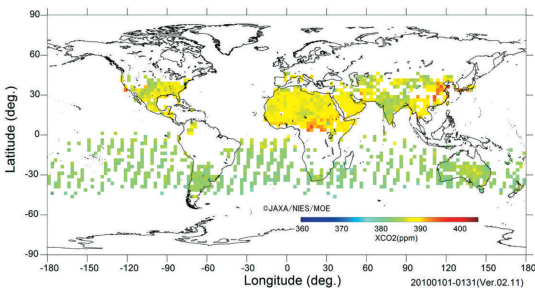
第2図 FTS SWIR レベル2 (V02.11)の2009年6月～2013年5月の XCO₂データ。縦軸は「緯度 (中央が赤道, 上が北半球, 下が南半球)」。色が濃いほど低濃度または高濃度 (バイアス補正はしていない)。北半球の冬に高濃度となり, 夏に低濃度となる季節変化と, 年々濃度が高くなる様子が捉えられている。



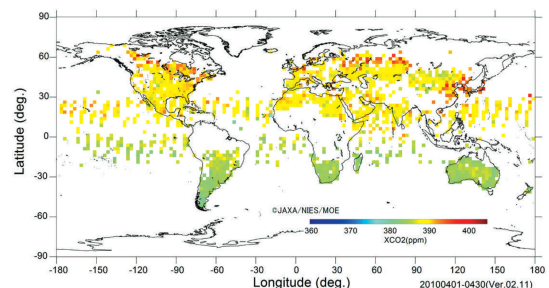
(a) XCO₂ 2.5度メッシュ月平均マップ (2009年7月)。



(b) XCO₂ 2.5度メッシュ月平均マップ (2009年10月)。



(c) XCO₂ 2.5度メッシュ月平均マップ (2010年1月)。



(d) XCO₂ 2.5度メッシュ月平均マップ (2010年4月)。

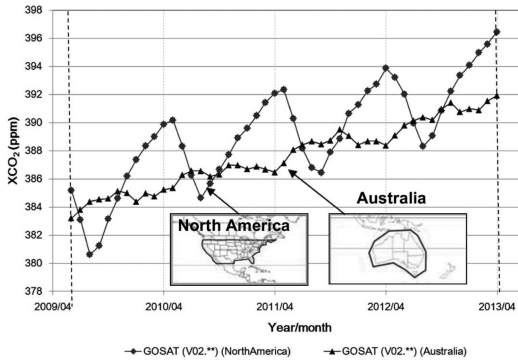
第3図 二酸化炭素カラム平均濃度の2.5度メッシュ月平均マップの代表例 (2009年7月～2010年4月)。

(2013) が論文として報告している。

なお, GOSAT プロジェクトでは, 国内外の研究者に対して研究公募を行い, これまでに100件を超える応募を採択した。その研究課題の中には, 「いぶき」が CO₂の大規模排出源と想定される地点を狙って測定し, その周囲の濃度との差が有意に検知されるかどうかの研究や, 火山の火口付近の CO₂濃度の測定値を解析する研究も進められている。前者の課題については, Kort *et al.* (2012) が, 「いぶき」による米国ロサンゼルス都市域 (盆地の形状であるため冬に CO₂が溜まりやすい) の CO₂濃度とその周辺の砂漠地

域の濃度との差 (3.2 ± 1.5 ppm) は, インベントリモデルに基づく単純なモデル結果による濃度差の3.8 ppm 程度に一致することなどを論文で報告している。

「いぶき」の観測スペクトルデータ (レベル1データ) から CO₂やメタン濃度を導出するための研究は, 日本 (NIES) だけでなく, 世界の主要な研究所や大学でも実施しており, 一部その結果は公表されている。例えば, 米国 NASA (National Aeronautics and Space Administration) の ACOS (Atmospheric CO₂ Observation from Space), オランダ SRON (Netherlands Institute for Space



第4図 TANSO-FTS SWIR レベル2 (V02.** データによる、北米とオーストラリアの各領域における二酸化炭素カラム平均濃度の月平均値とその推移。(◆:北米, ▲:オーストラリア, グラフは各月平均値を直線で連結したもの、検証作業で求められている -1.48 ppmのバイアス補正は施していない)。

Research) /ドイツKIT (Karlsruhe Institute of Technology), 英国 Leicester 大学, ドイツ・プレーメン大学などが, それぞれ独立に解析手法を開発している。これらのチームとは解析結果や情報を交換しながら, それぞれの解析手法の改良研究を進めている。

4. CO₂のネット吸収・排出量の推定

「いぶき」の FTS SWIR レベル2 プロダクト (XCO₂) と地上観測に基づく CO₂ 濃度データとを用いて, 全球を64に分割した地域における CO₂ の月ごとの正味の吸収排出量 (レベル4A プロダクト) を推定することができる (Maksyutov *et al.* 2013)。

地上観測に基づく CO₂ 濃度データに「いぶき」の XCO₂ を加えることで, 各地域の推定の不確かさが低減した。

5. GOSAT-2による CO₂ 観測計画

GOSAT-2 プロジェクトの推進体制は, 基本的にはこれまでの GOSAT を踏襲し, 三者で実施する予定である。三者では, 2017年度中 (予想として2018年の早期) における GOSAT-2 の打ち上げを目標にしている。GOSAT のこれまでの経験を基に, GOSAT-2 では有効な観測データの数とデータ質を高めるためにセンサの改良が計画されている。例えば, 軌道上で晴天域を選択して観測するインテリジェントポイントング機能や, 温室効果ガス濃度導出の際の妨害因子とな

るエアロゾルに関する情報をより多くの領域で取得するために TANSO-CAI を2基搭載して, 前方視と後方視を行うなどの改良が計画されている。

また, これまでの CO₂, メタン, 水蒸気の測定のほかに, FTS に一酸化炭素 (CO) 測定用のバンド (2.3 μm 帯) を追加した。CO を CO₂ と同時に観測することにより, CO₂ の発生が, 森林火災等の自然起源によるものか火災を伴わない燃料消費等の人為起源によるものかの識別ができるようになる。

6. おわりに

GOSAT の標準観測点は, 衛星の進行方向に垂直の方向に5点 (観測地点間の距離は約160 km) または3点 (観測地点間の距離は約260 km) である。したがって, GOSAT はそれほど空間的に密な測定を行っているとは言えない。しかも気体濃度を算出できるのは, 雲のない条件下であり, 地域によっては高頻度で多くの濃度データを取得できるわけではない。大気中 CO₂ の挙動の把握や, より空間的に密な炭素収支推定, 炭素循環研究を進めるには GOSAT の観測データだけでは不十分であろう。しかし, そのような制限を考慮しても, これまで観測できなかった地点の濃度データをそれなりの頻度と精度で観測できるというメリットは大きい。種々の観測手段によって取得されるデータのそれぞれの欠点を補い合せて全体の科学研究を進める。これが複合データを利用した地球科学を進める今後の一つの方向と言えよう。

謝辞

本報告は, 国立環境研究所 GOSAT プロジェクト及び GOSAT-2 プロジェクトチームのメンバーによる研究, JAXA GOSAT ミッションチーム, JAXA/EORC 関係者, そして GOSAT 公募研究の成果の一端を紹介したものである。ここに関係諸氏に感謝の意を表する。

参考文献

- Guerlet, S., S. Basu, A. Butz, M. Krol, P. Hahne, S. Houweling, O.P. Hasekamp and I. Aben, 2013: Reduced carbon uptake during the 2010 Northern Hemisphere summer from GOSAT. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 2378-2383, doi:10.1002/grl.50402.
- Kort, E. A., C. Frankenberg, C. E. Miller and T. Oda, 2012: Space-based observations of megacity carbon

- dioxide. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L17806, doi:10.1029/2012GL052738.
- Maksyutov, S., H. Takagi, V. K. Valsala, M. Saito, T. Oda, T. Saeki, D. A. Belikov, R. Saito, A. Ito, Y. Yoshida, I. Morino, O. Uchino, R. J. Andres and T. Yokota, 2013: Regional CO₂ flux estimates for 2009–2010 based on GOSAT and ground-based CO₂ observations. *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 9351–9373.
- Yoshida, Y., N. Kikuchi, I. Morino, O. Uchino, S. Oshchepkov, A. Bril, T. Saeki, N. Schutgens, G. C. Toon, D. Wunch, C. M. Roehl, P. O. Wennberg, D. W. T. Griffith, N. M. Deutscher, T. Warneke, J. Notholt, J. Robinson, V. Sherlock, B. Connor, M. Rettinger, R. Sussmann, P. Ahonen, P. Heikkinen, E. Kyrö, J. Mendonca, K. Strong, F. Hase, S. Dohe and T. Yokota, 2013: Improvement of the retrieval algorithm for GOSAT SWIR XCO₂ and XCH₄ and their validation using TCCON data. *Atmos. Meas. Tech.*, **6**, 1533–1547.
-