

いぶき(GOSAT)7年間の観測から得られたこと

久世暁彦 塩見慶 須藤洋志 川上修司(JAXA)

Akihiko KUZE, Kei SHIOMI, Hiroshi SUTO, and Shuji KAWAKAMI (JAXA)

1. はじめに

温室効果ガス観測技術衛星(Greenhouse gases Observing SATellite (GOSAT))には二酸化炭素(CO_2)やメタン(CH_4)などを観測する温室効果ガス観測センサ Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observation (TANSO)が搭載されている(Kuze et al., 2009). 軌道上および代替校正により機器性能を維持し、データ処理アルゴリズムを改良し、観測 8 年目を迎えている。日本の地球観測衛星としては長寿命衛星の一つとなった。軌道に乗せるまでが主な開発と思ってきたが、経験不足もあって、軌道上運用にもそれなりの物語があるので書き留めておきたい。

2. 2ppm の壁

GOSAT は、太陽散乱光を細かく分光しても高い SNR を得ることを優先させ、高いスループットの特性を持つフーリエ干渉計を採用し、当初のサクセスクライテリアである観測精度 1% (4ppm)精度を打上後早期に達成した。しかし、 CO_2 の年変化は 1~ 2ppm の変動しかなく、季節変化も数 ppm 程度であり、衛星からの CO_2 観測の有効性を示すには、太陽光の散乱光路長を導出する処理などのアルゴリズムの向上を必要とし、打上後 2 年後から 2ppm をきるようになったのを境に衛星データを使った国際的な研究が開花することになる(Butz et al., 2011). 0.1°C の精度がない体温計が売れないように、計測器には乗り越えなければいけない壁がある。

3. 非線形との戦い

666km の軌道上から温室効果ガスの気柱量を遠隔観測で高精度を実現するには、観測対象より濃度が桁違いに安定している酸素(O_2)を観測し、観測光の光路を正確にもとめないといけない。 O_2A 帯は 760nm にあり、 $1.6\mu\text{m}$ や $2.0\mu\text{m}$ にある CO_2 、 CH_4 の吸収帯と同一視野で観測していることが GOSAT の売りである。FTIR と呼ばれるように干渉させやすい長波長の観測には適しているが、短波長への拡張は、光学部品の選定、温度制御まで工夫を要した。

打上後もレベル1処理は、一言で行ってしまえば軌道上で取得したインタフェログラムに逆フーリエ変換を行い、分光放射輝度データを提供することである。FTS で変調後の光をビームスプリッタで分離し、バンドパスフィルタで必要な波長だけ切り出しても、多重化しているので 16ビット AD 変換を必要とするほど広いダイナミックレンジが必要となる。主に非線形補正のために 10 回以上のバージョンアップを行った。検出器、アナログ回路の増幅・位相、AD 変換に含まれる線形性について、実験

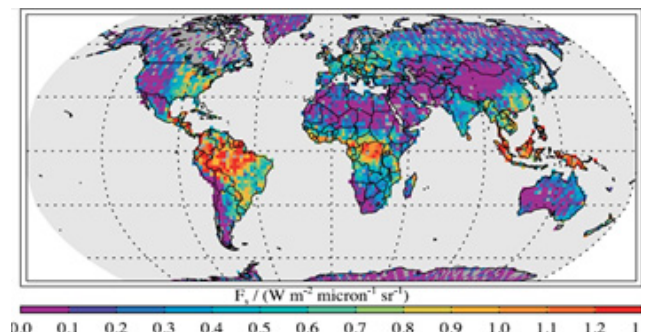
室で再評価し、処理に反映させた。(Kuze et al, 2016).

フーリエ干渉計は線形を前提とした観測手法であるが、ほぼすべての箇所に非線形は内在している。

4. スペクトル質を極めて得られたこと

GOSAT は太陽反射光を観測する衛星搭載センサとしては世界最高の分光分解能をもち、太陽のフランクフォーファー線と地球 O_2 の吸収線を分離できる。フランクフォーファー線の深さが光合成蛍光を行っているところでは見かけ上変化することを利用するという、言われてみれば容易なアルゴリズムで、世界で初めて宇宙よりクロロフィル蛍光を観測した。当初は得られるとも思っていなかった副産物で新しい植生観測の道を広げた。同時期に複数のチームが競って解析をすすめる躍動感も目の当たりにした。(Jointer et al., 2011 and Frankenberg et al., 2011). 一見観測誤差のようにみえるものからもよくデータを見ることで重要な情報が得られた。その後、GOSAT よりも分解能が低い既存のセンサのデータからも導出できることがわかり、面的な観測に弱い GOSAT は主役の座を奪われつつあり、改めて新しい金脈の寿命の厳しさも知ることになる。

蛍光成分を導出することで、地表面気圧導出そして CO_2 精度も向上した。打ち上げ前にも、実験室分子分光など地球の物理や化学以外を取り込まないと精度があがらないことはわかっていたが、生物までの教養が必要になるとは思わなかった。



第1図 GOSAT で捉えた光合成にともなう植物蛍光
(Frankenberg et al., 2011)

5. 後期利用段階

2014 年 1 月 60 か月の設計寿命を超えた GOSAT であるが今では還暦を過ぎてまだまだ現役である。しかし、還暦後の後期利用段階にはいつてからは、いずれも機構系に関する3つの事故(太陽電池パドル片翼回転停止・ポインティング静定不安定・冷凍機一時停止)が発生した。一時観測を停止しなければならなくなったがものであるが、極力冗長系を採用する GOSAT

の設計方針が功を奏し、現在は機能・性能を維持し、搭載センサはフル運用を続けている。ポインティング機構は完全 2 系統を有しており、共通の挙動から、微小揺動運等における潤滑・軸受の摩擦変化、真空中と酸素を含む大気のカーブル芯線の屈曲運動の特性差など、長寿ならではの知見も得られた。フライト品に先立ち製作した EM を再稼働し、軌道上事象を再現させることもできた。打ち上げ前の十分な試験が必要であることは言うまでもないが、EM を使った復習からも学ぶところが大きい。

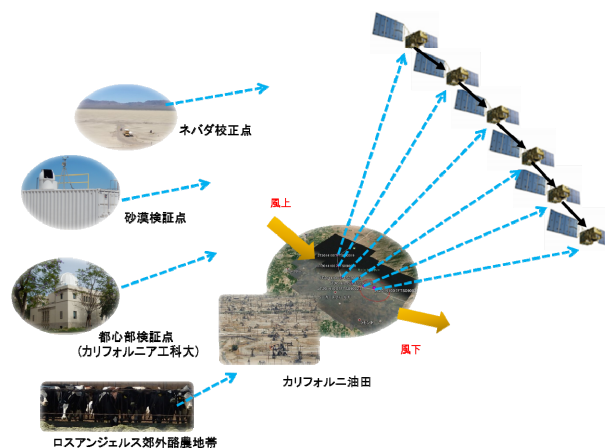
6. 他流試合

観測がうまくいかない場合、機器のせいにしたくなるものであるが、同じスペクトルを用い複数のグループが競うようになると機器と処理アルゴリズムの要因が明確になる。また回折格子型の OCO-2 と同時観測をすることで、観測手法によらず共通する残差から太陽データベースの見直すこともできた。(Toon, et al., 2015)

米国ジェット推進研究所(JPL)の Orbital Carbon Observatory (OCO)プロジェクトとはプロジェクト立ち上げ時より、当初疑問の声もあった衛星からの衛星 CO₂ 観測の有効性を実証するため、校正・検証・処理アルゴリズム・データベースの広範囲で協力を進めている。まず打ち上げ前より双方の放射計を JPL およびつくば宇宙センターそれぞれに持ち込み、共通の輝度光源で値付けを行った。ネバダの砂漠での代替校正キャンペーン、高高度飛行航空機や小型ジェットによる鉛直分布観測による検証を行っている(Kataoka et al., 2014 and Kuze et al., 2014)。衛星の遠隔観測は放射伝達後の大気圏外分光放射輝度を観測するため、放射伝達過程の再現できないものは観測でない。ネバダのサイトでは、観測波長域における放射伝達に影響する物理量は成層圏オゾン、エアロソルの高度分布以外はほぼすべて同時観測し、観測と理論の整合性を高めた。

2 つのプロジェクトは同時に進行したため、JPL では半世紀前の設備大事に使っていることや、世界にオープンな隔週テレコンを実施するサイエンスチーム、豊富な人材に飽き足らず世界から集める人的リソースへの貪欲さなど、今でも多くのことを学んでいる。

まる。改めて FTS 観測を行う GOSAT の特徴はなにか、見直す必要がある。高い分光分解能が得られる FTS 特徴を活かし、鉛直方向に2層の情報を得る試みもなされている(Kulawik et al., 2015)。FTS のもう一つの長所である多重化の長所を活かして同時観測されている太陽散乱光の 2 直線偏光、地表面および地球大気からの熱放射などまだまだデータを利用つくしているのとはいえない。先験値および観測値のエラーはともにランダムであるという前提の Levenberg-Marquardt 法が広く使われているが1万以上の分光スペクトルをとっていても導出できる物理量の種類は限られており、何を仮定し、何を解くかの見極めが重要である。系統誤差をつぶしていくことは地道な過程であるがつぶしていかないと解析の土俵にものぼれない。どうしてもとりきれない微小な分光感度校正誤差や分光放射率、偏光感度補正など分光構造をもつものは、自由度を犠牲にしても、系統誤差を観測データ毎に推定する必要もでてくる。ランダムなノイズが支配的な理想的な観測への道のりは未だ厳しい。きちんと帯をとり、皮をむいてからでないとおいしいミックスジュースはできない

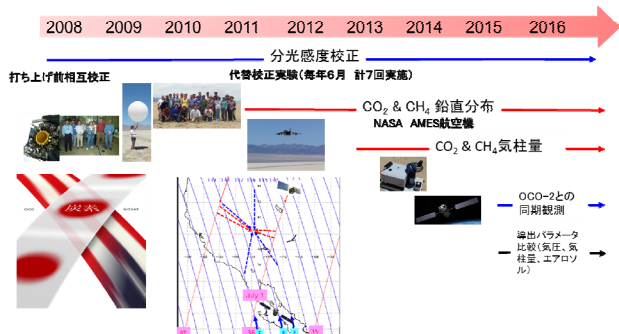


第3図 2軸ポインティング機構を活用した TANSO-FTS 特定点観測例(米国西海岸)

8. 老体に鞭打って 2 軸ポインティング機構の活用

当初格子点状に観測し CO₂, CH₄ の気注量観測精度をあげることが目的であったが、解析精度が上がってくると次にはどの点を観測すればより有効な情報が得られるかが重要となってくる。衛星温室効果ガス観測では、単に濃度を導出するだけでなく排出源別に排出量を算出し、有効な削減策に結びつけて真価が発揮できる。

ビッグデータや同化の時代であっても軌道上で観測し、地上にデータ転送できるデータ点数には制限があり、地球上のどの点を観測すれば、最大の情報が得られるか、最適な観測パターンはなにか、どの方向から見ればもっとも精度よく観測できるかまだ取り組むべき課題は多い。輸送モデルにも誤差があるので、排出源や近傍を観測できれば排出量の導出精度は向上するであろうし、単純な格子でなく偏在する排出源にあわせた吸排出量の区切りも必要であろう。CO₂ の吸収の過程は未知なことが多く、サンプリングの最適化は手探り状態である。機構



第2図 10年にスケールのOCOとの宇宙からの温室効果ガス観測に対する取組

7. GOSAT の取り柄はなにか

GOSAT は太陽反射光の高分光分解能観測の先鞭をつけたが、その後、観測点数で大幅に勝る回折格子型イメージング分光計 OCO-2 による CO₂ 観測が実現し、TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI)により CH₄ 観測も今年より始

系は信頼性の確立に時間を要したが、打ち上げ後も観測から得られる情報を高めることができる。日々地上で立案し、迅速な2軸ポインティング機構でカスタム観測ができる GOSAT の特徴を発揮できるのはこれからである。

軌道上でも問題はあってもほしくないと思ってきたが、実際に発生し、なんとか要因を解明するために地上エンジニアリングモデル(EM)を再稼働により再現したり、対処のための処理アルゴリズム改良により、結果的に、より安定精度を向上し、角度範囲を拡張させたポインティングや、系統誤差の低減など前にすすむことも出来た。頂上がはっきりみえる富士山というよりは、立ち止まりながらまだ見えぬ頂を目指している感がある。

9. まとめ

2009年2月7日に初画像を取得以来、10か国以上の国の研究者がデータを競うように使うようになった。スペクトルの質を高め、軌道上での機器の特性変化の補正のためには処理アルゴリズムのバージョンアップが欠かせないが、長期データの均質度を保ち、増えるユーザの継続利用を考慮しながら行うため、打ち上げ当初は年2回であったものが、年1回、2年毎となりつつある。

1日2万点近くの観測点のスペクトルを取得するが、観測点の選択の最適化はまだ手探り状態である。1万色近いスペクトルから情報を十分に引き出しているとも言いがたい。

衛星温室効果ガス観測の精度を上げ、知見を深めるには、単に機器の性能、運用、データ処理にとどまらず、太陽スペクトル・分子分光・大気輸送・統計処理など総合力が必要で、さらに光合成などまで広範囲に及ぶようになった国内の研究者層・関連する研究領域の広がりを期待する。

衛星観測は単一機器で長期に地球全体の観測ができることであり、1日でも質の高いデータを取得し続けるべく、そのためには留まって機器の老化を見守るのではなく、データ解析や観測パターンの最適化により円熟味を増すようにしたい。観測の構想から数えると20年になるが紙面では上げられないほど多くの方々の力によって元気に観測を続けている。

参考文献

- 1) Butz, A., Guerlet, S., Hasekamp, O., Schepers, D., Galli, A., Aben, I., Frankenberg, C., Hartmann, J.-M., Tran, H., Kuze, A., Keppel-Aleks, G., Toon, G., Wunch, D., Wennberg, P., Deutscher, N., Griffith, D., Macatangay, R., Messerschmidt, J., Notholt, J., and Warneke, T.: Toward accurate CO₂ and CH₄ observations from GOSAT, *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L14812, doi: 10.1029/2011GL047888, 2011.
- 2) Frankenberg, C., Fisher, J. B., Worden, J., Badgley, G., Saatchi, S. S., Lee, J.-E., Toon, G. C., Butz, A., Jung, M., Kuze, A., and Yokota, T.: New global observations of the terrestrial carbon cycle from GOSAT: Patterns of plant fluorescence with gross primary productivity, *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L17706, doi: 10.1029/2011GL048738, 2011.
- 3) Joiner, J., Yoshida, Y., Vasilkov, A. P., Yoshida, Y., Corp, L.

- A., and Middleton, E. M.: First observations of global and seasonal terrestrial chlorophyll fluorescence from space, *Biogeosci.* **8**, 637–651, doi: 10.5194/bg-8-637-2011, 2011.
- 4) Kataoka, F., Knuteson, R. O., Kuze, A., Suto, H., Shiomi, K., Harada, M., Garms, E. M., Roman, J., Tobin, D. C., Taylor, J., Revercomb, H. E., Sekio, N., Higuchi, R., and Mitomi, Y.: TIR Spectral radiance calibration of the GOSAT satellite borne TANSO-FTS with the aircraft-based S-HIS and the ground based S-AERI at the Railroad Valley Desert playa, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, **52**, 89–105, doi:10.1109/TGRS.2012.2236561, 2014.
- 5) Kulawik, S., O'Dell, C., Payne, V., Biraud, S., Deng, F., Jones, D., Tanaka, T., Iraci, L.: Lower Tropospheric CO₂ from ACOS GOSAT, AGU Fall meeting, San Francisco, 2015.
- 6) Kuze, A., Suto, H., Nakajima, M., and Hamazaki, T.: Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring, *Appl. Opt.*, **48**, 6716–6733, 2009.
- 7) Kuze, A., Suto, H., Shiomi, K., Urabe, T., Nakajima, M., Yoshida, J., Kawashima, T., Yamamoto, Y., and Kataoka, F.: Level 1 algorithms for TANSO on GOSAT: Processing and on-orbit calibration, *Atmos. Meas. Tech.*, **5**, 2959–3018, 2012.
- 8) Kuze, A., Taylor, T. E., Kataoka, F., Bruegge, C. J., Crisp, D., Harada, M., Helmlinger, M., Inoue, M., Kawakami, S., Kikuchi, N., Mitomi, Y., Murooka, J., Naito, M., O'Brien, D. M., O'Dell, C. W., Ohyama, H., Pollock, H., Schwandner, F. M., Shiomi, K., Suto, H., Takeda, T., Tanaka, T., Urabe, T., Yokota, T., and Yoshida, Y.: Long term vicarious calibration of GOSAT sensors; techniques for error reduction and new estimates of degradation factors, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **52**, 3991–4004, doi: 10.1109/TGRS.2013.2278696, 2014.
- 9) Kuze, A., Suto, H., Shiomi, K., Kawakami, S., Tanaka, M., Ueda, Y., Deguchi, A., Yoshida, J., Yamamoto, Y., Kataoka, F., Taylor, T. E., and Buijs, H.: Update on GOSAT TANSO-FTS performance, operations, and data products after more than six years in space, *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, doi: 10.5194/amt-2015-333, in review, 2016.
- 10) Toon, G. C., Blavier, J. F., Sen, B., Kleinboehl, A., Boesch, H., Sung, K., Nair, Frankenberg, and C., Aaron, S.: Improved solar reference spectrum, Pasadena, International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space, 2015.