

# GOSAT-2 プロダクト検証用ライダーの開発

内野修<sup>1,2</sup>, 泉敏治<sup>2</sup>, 酒井哲<sup>2</sup>, 永井智広<sup>2</sup>, 森野勇<sup>1</sup>

<sup>1</sup>国立環境研究所 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

<sup>2</sup>気象研究所 (〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1)

## Development of a lidar for GOSAT-2 product validation

Osamu UCHINO<sup>1,2</sup>, Toshiharu IZUMI<sup>2</sup>, Tetsu SAKAI<sup>2</sup>, Tomohiro NAGAI<sup>2</sup>, and Isamu MORINO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506

<sup>2</sup>Meteorological Research Institute, 1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki 305-0052

**Abstract:** We developed a Mie lidar for the product validation of the Greenhouse gases Observing SATellite-2 (GOSAT-2) which will be launched in early 2018. The Mie lidar is consisted of a Nd:YAG laser and 35-cm diameter telescope, and can measure the vertical distributions of backscattering ratio, depolarization ratio and wavelength exponent of tropospheric and stratospheric aerosols and cirrus clouds at two wavelengths of 1064 nm and 532 nm. Lidar ratio at 532 nm can be estimated from N<sub>2</sub> Raman channel. Water vapor can be measured up to 4-5 km altitude in the nighttime by adding H<sub>2</sub>O Raman channel. Preliminary observational data will be presented with the characteristics of the Mie lidar system.

**Key Words:** Lidar, GOSAT-2, aerosol, cirrus

### 1. はじめに

環境省 (MOE), 国立環境研究所 (NIES), 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の三者は共同で大気中の CO<sub>2</sub> や CH<sub>4</sub> の乾燥空気に対するカラム平均濃度 (XCO<sub>2</sub> や XCH<sub>4</sub>) 等を地球規模で観測する温室効果ガス観測技術衛星 (GOSAT, いぶき) を開発し, 2009 年 1 月に種子島から打ち上げた<sup>1)</sup>. これまで故障等により短期間のデータの欠損が生じているものの 7 年以上のデータが蓄積されている. それらのデータは検証<sup>2)</sup>やアルゴリズムの改良などによりデータ質の向上が図られ<sup>3)</sup>, 公募研究者や一般にデータが公開されるとともに, データ解析やモデル比較等によって様々な現象検出に関する科学論文<sup>4)</sup>や報道発表が行われている.

ところで, GOSAT 搭載のフーリエ変換分光器 (TANSO-FTS SWIR) で観測される太陽短波長赤外光の地上や海上の反射スペクトルデータから算出される XCO<sub>2</sub> や XCH<sub>4</sub> は, エアロゾルや巻雲の光学的厚さや存在高度が適切に考慮出来ない場合誤差を生じることがある<sup>5)</sup>. そのため, GOSAT プロダクトの検証を行うための主測器である TCCON (Total Carbon Column Observing Network) FTS<sup>6)</sup>と一緒に, 2 波長偏光ライダーをニュージーランドの Lauder (45.0S, 169.7E), 佐賀 (33.2N, 130.3E), 陸別 (43.5N, 143.8E) に設置して GOSAT の通過時間帯を中心に観測を継続している. つくばでは気象研究所の 2 波長偏光ライダーのデータを利用している. なお, つくばと陸別には NIES が, Lauder にはニュージーランド国

立大気水圏研究所 (NIWA) が, 佐賀には JAXA が TCCON FTS を設置している.

GOSAT の成功を受けて, 三者は GOSAT-2 の開発を進めており, 2018 年初期頃打ち上げを予定している. TANSO-FTS-2 の SWIR では CO の観測バンドを追加し, 雲の判別やエアロゾルの観測に用いる CAI (Cloud and Aerosol Imager) もバンド数を増やすことにしている.

GOSAT-2 プロダクト検証の強化に向けて新しくコンテナ搭載の TCCON FTS システムを開発し, フィリピンの Burgos (18.5N, 120.6E) に新しい TCCON サイトを設置するプロジェクトを進めている. このコンテナ (幅約 2280 mm, 長さ約 7060 mm, 高さ約 2470 mm) に搭載できる GOSAT-2 プロダクト検証用のライダーを新たに開発したので, その構成や性能などについて報告する.

### 2. GOSAT-2 プロダクト検証用ライダーの構成

#### 2.1 レーザー送信部

使用する Nd:YAG レーザーは Quantel 社製の Q-smart 450 である. レーザーの繰り返し周波数は 10 Hz, 2 波長同時発信の時, 波長 1064 nm における出力は 180 mJ/pulse, パルス幅 6 ns, ビーム広がり角 0.5 mrad, また, 波長 532 nm における出力は最大 210 mJ/pulse, パルス幅 5 ns, ビーム広がり角 0.35 mrad である. また, 532 nm におけるレーザーの偏光比 S/P=0.5% である.

このレーザーのすぐ後に  $\lambda/2$  の波長板を入れて偏光面を回転できるようにしている. その後に

5 倍のビームエクパンダーを置いて、2 波長のビーム広がり角を 0.1 mrad になるように調整した。

レーザー送信部は、入射角 45 度で 2 波長の反射率がほぼ 100% に近い誘多膜ミラー 3 枚を用いて受信望遠鏡に近いところから上空に打ち上げる近距離光軸合わせ (Near Alignment) と、1 枚のミラーにより光電子増倍管 (Photomultiplier PMT, Hamamatsu 製 R3236) やアバランシェフォトダイオード (Avalanche Photodiode APD, Licel 製 APD-3.0) からの Signal Induce Noise (SIN) をできるだけ抑えて観測できる遠距離光軸合わせ (Far Alignment) の両方ができるようにした。

## 2.2 受信部

受信部は高度 40 km までの信号が得られるように口径 356 mm, 焦点距離 2845 mm の Meade 製 F8 Advanced Coma-Free の望遠鏡を使用することにした。この望遠鏡の真下に分光部が置けるように、架台の上に望遠鏡を設置することにした。分光部の光学素子による受信光のけられがないようにするためには、受信視野は 1.3 mrad 以下にする必要がある。観測では 1.0 mrad を使用することにした。

## 2.3 分光部

望遠鏡で受信された光は視野絞りを通過した後、超広帯域誘多膜平面ミラーにより 90 度折り曲げられた後、焦点距離 200 mm のアクロマートレンズにより平行ビームとなる。そのビームは、まず入射角 45 度のダイクロイックミラーにより 532 nm の光を反射させると同時に、607 nm (窒素分子からのラマン散乱波長) と 1064 nm の光を透過させる。反射された 532 nm の光は偏光ビームスプリッター (PBS) によりレーザー光の偏光方向と垂直な S 成分と平行な P 成分に分けられ、さらに P 成分は部分反射ミラー (反射率 3%, 透過率 97%) により低高度観測用  $P_{\text{near}}$  と高高度観測用  $P_{\text{far}}$  に分けられる。なお、偏光解消度  $D$  は P 成分と S 成分のライダー受信信号強度から  $D=S/(P+S) \times 100\%$  と定義される。

透過した 607 nm と 1064 nm の光は近距離光軸合わせの場合、ダイクロイックミラーにより 607 nm と 1064 nm に分けられる。遠距離光軸合わせの場合 1064 nm だけがハーフミラーによって二分される。このようにして分けられた各波長の受信光は、Barr 製の狭帯域の干渉フィルター (Interference Filter IF), ND (Neutral Density) フィルター、色ガラスフィルターなどを通過した後レンズにより PMT や APD の検出部に集光される。

## 2.4 検出部

波長 532 nm の検出には Hamamatsu 製の PMT R3235-01 を使用した。また、 $P_{\text{far}}$  には近距離からの強い信号による PMT のアンダーシュートを防ぐために Digital Delay/Pulse Generator (Stanford

Research Systems 製 DG645) を用いてゲートをかけている。波長 1064 nm で成層圏のエアロゾルを観測する時には、遠距離光軸合わせで PMT R3236 を使用した。この PMT はヘッドオン型光電子増倍管用電子冷却器 (Hamamatsu 製 C10372) を用いて零下 30 度に冷却して熱雑音を抑えている。C10372 はサーモエレクトリック チラー (Thermotek 製 T255P) による水冷が必要である。また、窒素分子からのラマン散乱の検出には Hamamatsu 製 PMT R3237-01MOD を同じく零下 30 度に冷却して使用する。1064 nm のアナログ観測用のみの APD は近・遠距離光軸合わせの両方に用いた。各 PMT には 2 台のベンチトップ型高圧電源 (Hamamatsu 製 C9727-01) により -2000 V を、APD には Licel 供給の高圧電源により +330 V の電圧をかけて使用した。

以上述べてきたレーザー送信部、受信部、分光部、検出部は光学台 (Kinetic Systems 製 5108-48-60-31) の上に設置して振動によるライダーの送・受信の光軸がずれないようにした。

## 2.5 信号・データ処理部、制御部

R3235-01 の信号処理にはトランジェントレコーダー (Licel 製 TR20-16bit) を用いた。また、R3236 と R3237-01MOD および APD の信号処理には Licel 製 TR20-16bit-AP を利用していたが、2016 年 3 月に新しい TR20-16bit が一台追加された後は R3236 と R3237-01MOD の信号処理は TR20-16bit で行うことにした。TR20-16bit または TR20-16bit-AP はそれぞれ 16 bit で 20 MHz のアナログ・デジタル変換 (AD) と 250 MHz のフォトンカウンティング (PC) を同時または別々に行うことが可能である。最小距離分解能は 7.5 m である。なお、トランジェントレコーダーへのトリガーにはフォトダイオードを用いている。

データ処理部はノートパソコン (Dell 製) と計測ソフトウェア Labview 等から構成され、1 分毎 (レーザーショット数 600) の AD と PC の信号が表示されるとともに、パソコン内のハードディスクに逐次観測データが保存される。また、解析ソフトを使用することにより総ショット数に対する各波長の AD と PC の受信信号の表示や後方散乱比  $R$ , 偏光解消度  $D$  などの予備解析が可能である。

制御部は DG645 から構成され、DG645 からの電気パルスによりレーザーのフラッシュランプや Q スイッチ、 $P_{\text{far}}$  のゲート時間などを制御している。

## 2.6 観測窓

観測は水平から 15 度傾けたテンボックス (TEMPAX 幅 500 mm, 長さ 600 mm, 厚さ 10.2 mm) と呼ばれる熱膨張係数の小さいガラス窓を通して行われる。テンボックスを 15 度傾けたのは雨が降った後雨水がたまらないようにするた

めである。テナボックスの両面には無反射コーティングを施している。また、観測窓が霜などで曇らないようにヒーターで温められるようにしている。この観測窓を通してレーザーの大気中への発射と大気からの散乱光の受信が行われる。さらに、このガラス窓は、太陽の直達光がライダーの送受信部に直接入らないように、遮光板つきアルミ製フードで取り囲まれている。

この観測窓は、ライダーを設置する予定のフィリピンの Burgos で、1年中太陽の直達光がライダーの送受信部に直接入らないようにするために、天頂から北の方向に 30 度傾けてライダー観測ができるようになっていた。但し、飛行機がレーザーの送信方向やその付近を飛ぶ可能性がある場合には鉛直方向の観測に限ることになっている。

### 3. まとめ

Fig.1 に FTS と開発したライダーを搭載したコンテナの写真を示す。コンテナの屋根には FTS 用（紙面に向かって右側）とライダーの観測窓（左側）が鉛直向きに設置されている。

Fig.2 にコンテナ内の光学ベンチに設置したライダーを示す。手前右側にレーザーが、左側に PMT 冷却用の電源が見えている。また、奥右側の方にレーザーを鉛直に送信するための近・遠距離光軸合わせ用のアルミ製の黒い筒 2 本が見えている。左側に望遠鏡・分光部・検出部・冷却器を設置している。

Fig.3 にライダーのブロック図を、Table 1 に GOSAT-2 検証用ライダーの特性を示す。

これまで行った試験観測から、

- ・対流圏や成層圏のエアロゾルや対流圏の巻雲の後方散乱比  $R$ ・後方散乱係数  $BA$ ・消散係数  $EA$  の高度分布を、ライダー比  $S=EA/BA$  を仮定（通常 50 sr）して算出できる

- ・2 波長の  $BA$  から粒子の大小に関する波長指数  $\alpha$  ( $BA \propto \lambda^{-\alpha}$ ) の情報が得られる

- ・波長 532 nm で観測粒子が球形か非球形かを判別するための偏光解消度  $D$ 、また  $R$  が 1.2 程度以上の場合には粒子の偏光解消度  $D_p$  を算出できる

また、

- ・ $N_2$  ラマン散乱 (607 nm) を利用して粒子のライダー比  $S=EA/BA$  の観測もエアロゾルが濃い場合には可能である

さらに、水蒸気ラマンのチャンネルを付加し、 $N_2$  ラマンと同時受信した場合、

- ・夜間高度 4~5 km 付近までの水蒸気混合比の高

度分布を取得できる

ことが分かった。講演では、今回開発したライダーについて、これらの試験観測結果も含めて紹介する。

### 参考文献

- 1) A. Kuze et al.: Appl. Opt. 48(2009)6716.
- 2) I. Morino et al.: Atmos. Meas. Tech. 4(2011)1061.
- 3) Y. Yoshida et al.: Atmos. Meas. Tech. 6(2013)1533.
- 4) 例えば M. Ishizawa et al: Atmos. Chem. Phys. in print
- 5) O. Uchino et al: Atmos. Chem. Phys. 12(2012)3394.
- 6) D. Wunch et al.: Atmos. Meas. Tech. 3(2010)1351.



Fig.1 A container includes Brucker FTS 125 HR and Mie lidar.



Fig.2 Mie lidar installed in the container.

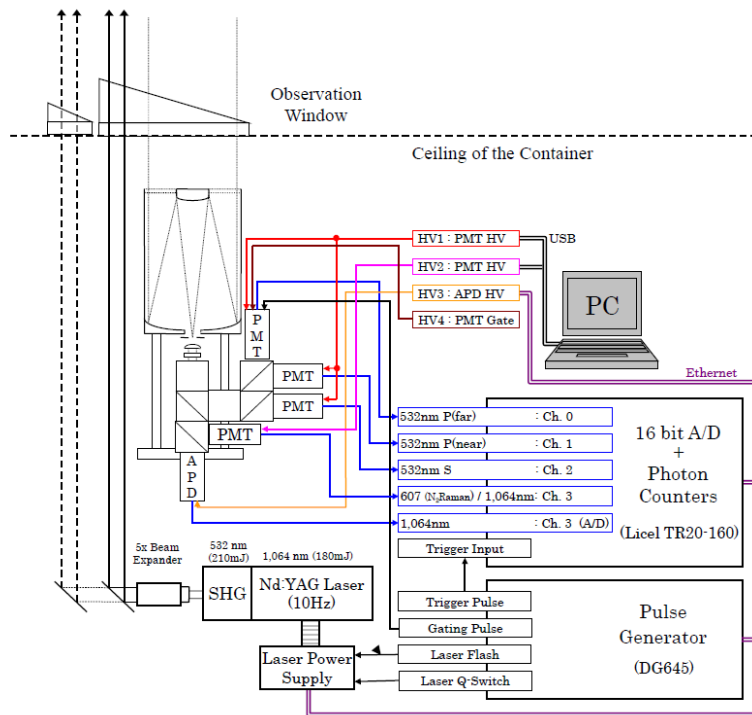


Fig.3 Block diagram of Mie lidar for the GOSAT-2 product validation.

Table 1 Characteristics of Mie lidar for the GOSAT-2 product validation

Transmitter				
Laser	Nd:YAG			
Wave length	532 nm			1064 nm
Pulse energy	210 mJ			180 mJ
Pulse repetition rate			10 Hz	
Pulse width	5 ns			6 ns
Beam divergence	0.1 mrad			0.1 mrad
Receiver				
Telescope type	Advanced Coma-Free			
Telescope diameter	356 mm (f=2845 mm)			
Field of view	1 mrad			
Wavelength	532 nm		1064 nm	607 nm
Polarization	P and S		None	None
Number of channels	3		1	1
Interference filter				
Bandwidth (FWHM)	0.32 nm		0.38 nm	0.25 nm
Transmission	0.60		0.72	0.74
Detectors	PMT(R3235-01)	APD(C30956EH)	PMT(R3236)	PMT (R3237-01MOD)
Quantum efficiency	8 %	68 %	0.02 %	6 %
Signal processing				
Time resolution	16 bit A/D + Photon counting			
Range resolution	1 min			
Range resolution	7.5 m			
Maximum Range	120 km			