

GOSAT プロダクト検証用可搬型ライダーの開発

Development of a mobile lidar for GOSAT product validation

内野修^{1,2)}, 永井智広²⁾, 中里真久²⁾, 酒井哲²⁾,
森野勇¹⁾, 横田達也¹⁾, 松永恒雄¹⁾, 佐藤勇城³⁾

Osamu Uchino^{1,2)}, Tomohiro Nagai²⁾, Masahisa Nakazato²⁾, Tetsu Sakai²⁾,
Isamu Morino¹⁾, Tatsuya Yokota¹⁾, Tsuneo Matunaga¹⁾, Yuuki Sato³⁾

¹⁾国立環境研究所 ²⁾気象研究所 ³⁾エフ・アイ・ティー

¹⁾National Institute for Environmental Studies, ²⁾ Meteorological Research Institute

³⁾F.I.T., Incorporated

Abstract

We developed a mobile lidar for the Greenhouse gases Observing SATellite (GOSAT) product validation. This system consists of a small type of Mie lidar and a differential-absorption lidar (DIAL). The Mie lidar measures vertical distributions and optical characteristics of aerosols and cirrus clouds at two wavelengths of 1064 nm and 532 nm. The DIAL observes tropospheric ozone profiles with Raman lasers of 276.2 nm, 287.2 nm and 299.1 nm which are generated by a Nd:YAG laser and a single Raman cell filled with pressurized CO₂ gas. Preliminary observational data will be presented with the system.

1. はじめに

大気中の CO₂ や CH₄ のカラム量などを観測する温室効果ガス観測技術衛星 (GOSAT、いぶき) は 2009 年 1 月に種子島から打ち上げられ観測を継続中である¹⁾。GOSAT に搭載のフーリエ変換分光器 (TANSO-FTS SWIR) で観測された太陽短波長赤外光の地上および海上反射スペクトルデータから算出される晴天域の CO₂ カラム量²⁾は、エアロゾルによりバイアスが生じ、その大きさはエアロゾルの光学的厚さのみでなく存在高度によっても大きく異なる。シミュレーションによると対流圏上部のダスト、火山灰、成層圏エアロゾル³⁾による誤差が顕著となっている⁴⁾。これは太陽光が地表に到達する前に高々度に存在するエアロゾルによって散乱されるため光路長が短くなり CO₂ カラム量の過小評価に繋がるためと考えられる。

そこでエアロゾルや薄い巻雲による影響を明らかにし、CO₂ や CH₄ のカラム量導出精度向上に資するために、GOSAT プロダクト検証用可搬型ライダーを新たに開発したので報告する。

2. GOSAT プロダクト検証用ライダーの構成

可搬型ライダーは、小型のミーライダーと対流圏オゾン観測用の DIAL から成り立っている。この二つのライダーがコンテナ (幅約 228 cm, 長さ約 683 cm, 高さ約 255 cm) の中に格納されている。

2-1 小型ミーライダー

Nd:YAG レーザー (Brilliant Eazy) の基本波 (波長 $\lambda_1=1064$ nm) と第 2 高調波 ($\lambda_2=532$ nm) (出力はそれぞれ 130 mJ, パルス幅約 5 ns, 繰り返し周波数 10 Hz) を、倍率 5 倍のビームエクspander を通してビーム広がり角を ~0.2 mrad にして、受信望遠鏡 (口径 30.5 cm, リッチー・クレチアン式) と同軸で観測窓を通して上空に打ち出す。

受信望遠鏡の視野を 1 mrad にして大気からの後方散乱光を受信し、ダイクロイックミラーで λ_1 と λ_2 に分離する。 λ_2 は偏光ビームスプリッターでレーザーの偏光面と平行な成分 P と垂直な成分 S に分離し、さらに P 成分をミラーにより透過率 T=97% と反射率 R=3% の二つに分け、それぞれ干渉フィルター (半値全幅 FWHM=0.5 nm, T=50%以上) を通して検出器に導く。

λ_1 と λ_2 の検出器はそれぞれ APD (Silicon, 直径 3 mm, ペルティエ冷却, プリアンプ付き) と PMT (R3234-01, 量子効率 Q.E=7%) である。T=97% 用の PMT には低層からの強い散乱信号によるノイズ

を抑えるため電氣的ゲート回路をかけている。夜間、窒素分子からのラマン散乱を受信し、エアロゾルの消散係数を測定するためのチャンネルも付加している (R3237-01, Q.E=~6%)。

信号処理にはトランジエントレコーダー (TR 20-160) を利用している。この小型ミーライダーにより、波長 532 及び 1064 nm におけるエアロゾル・雲の高度分布と光学特性 (偏光解消度、波長依存性) を観測する。

2-2 UV 領域の 3 波長のラマンレーザーを用いた対流圏オゾン DIAL

GOSAT TANSO-FTS TIR では、大気・地表面からの熱赤外放射 ($\lambda=5.6\sim 14.3\ \mu\text{m}$) を観測し CO_2 や CH_4 の高度分布を算出する。また、 $9.6\ \mu\text{m}$ バンドからオゾン全量や対流圏のオゾンカラム量が推定できる。対流圏オゾンは温室効果ガスであるとともに光化学スモッグの主要因である。このため、対流圏のオゾン分布などを観測するため UV 領域の 3 波長のラマンレーザーを用いたオゾン DIAL (差分吸収法ライダー) を開発した。

2-2-1 ラマンレーザー

送信部は Nd:YAG レーザー (YG981C) の第 4 高調波 ($\lambda_4=266\ \text{nm}$, 出力 130 mJ, パルス幅 8 ns, 繰り返し周波数 10 Hz) を、長さ約 2 m の CO_2 ガスラマンセル (ステンレス製、入射側の窓は焦点距離 1100 mm の合成石英の凸レンズ、出力側は厚さ 10 mm の合成石英板でいずれも無反射コーティング付 (以下 AR 付)、有効口径 18 mm) に入射することにより 3 波長のラマンレーザー ($S_1=276.2\ \text{nm}$, $S_2=287.2\ \text{nm}$, $S_3=299.1\ \text{nm}$) を発生させる⁵⁾。ラマンセルに封入する CO_2 ガスの封入圧力を変化させてそれぞれの出力の測定を行ったところ、266 nm の出力が 107 mJ の時、8 気圧で $S_1\sim S_3=7.5, 9.1, 8.4\ \text{mJ}$ 、11 気圧では $S_1\sim S_3=6.6, 8.8, 10.0\ \text{mJ}$ が得られた。現在、より高高度まで観測できるように 11 気圧を利用している。

ラマンレーザーは焦点距離 4290 mm (@285 nm) の平凸レンズ (AR 付) を用いてビームを約 4 倍に拡大してビーム広がり を約 0.1 mrad にした後、4 枚の全反射ミラー ($R\sim 98\%$) を用いて受信望遠鏡の二次鏡の上に取り付けた打ち上げ用ミラーにより観測窓 ($T\sim 96\%$) を通して上空に打ち上げる。

2-2-2 受信望遠鏡

望遠鏡はニュートン式で、有効口径 490 mm、焦点距離 1744 mm、面精度 $\lambda/10$ (RMS)、Al と SiO_2 のコーティングにより $R=87\%$ 、最小錯乱円 0.3 mm、重さ約 120 kg である。副鏡 (テンパックス フロート) の R も 87% である。望遠鏡はアルミボードの箱で遮光している。

2-2-3 分光・検出部

ラマンレーザーの 3 波長 $S_1\sim S_3$ を効率よく分離して PMT に導くために、当初、回折格子による分光を考えたがそれほど効率が良くないことが分かり、ダイクロイックミラー (DM) を利用することにした。しかし、入射角 45 度で反射・透過率を 50% にして 2 枚の DM で $S_1\sim S_3$ を分離する場合、 $S_2\sim S_3$ は $T=25\%$ となり大きな損失になる。

そこで、入射角 15 度で使用する特注の DM を用いることにした。 S_1 の R が 99% で $S_2\sim S_3$ の T が 95% のものと、 S_2 の R が 99% で S_3 の T が 95% の 2 枚の DM を作成することができ、効率のよい分光部を開発することができた。望遠鏡の視野絞りを通して DM へ導くための 45 度仕様のミラー (Al+MgF₂ コート) は $R=87\%$ である。また、DM とは別に分光部に使用した反射板の $R=97\%$ である。

干渉フィルター (IF) は、 $S_1\sim S_3$ の 2 波長間の差が 11~12 nm で小さいことから、IF の FWHM は 0.5 nm にすることにした。その結果 IF の $T=15\%$ 以上を期待したが、現在 $S_1\sim S_3$ における T はそれぞれ 9%, 10%, 16% となっている。3 波長の検出器は PMT (R3235-01, Q.E=18%) を使用している。

2-2-4 信号・データ処理部

各 PMT からの出力を、トランジエントレコーダー (TR 20-160) により、分解能 12 ビットでサンプリング周波数 20 MHz のアナログ・デジタル変換 (A/D) と最大計数率 250 MHz の光子カウンティング (PC) の同時処理を行っている。この TR は分解能 $\delta=7.5\ \text{m}$ 、ゲート数 16384 で高度 122.88 km までの信号を、最大 300 Hz で取得可能である。TR の出力をパソコンに取り込み生データとして保存している。

2-2-5 制御部

小型ミーライダーとオゾン DIAL のレーザーを繰り返し周波数 10 Hz で 50 ms ずらして交互に発射するとともに、PMT に適切なゲートをかけられるようにパソコンとデジタル遅延パルス発生器 (DG645)

を用いて制御している。

3. コンテナ

コンテナの床に光学ベンチ（幅 1219 mm，長さ 3200 mm，高さ 700 mm）を取り付け、その上に小型ミーライダー、オゾン DIAL のラマンレーザーや分光・検出部などを固定している。ニュートン式の望遠鏡は光学ベンチに矩形の穴を設けて、その中に入れて格納し光学ベンチに固定されている。信号・データ処理部や制御部、パソコンなどは 2 台のラックに納められている。

コンテナの屋上には水平から約 30 度傾けたガラス板を付けた観測窓が 2 個取り付けられている。1 個のガラス板は小型ミーライダー用で、有効径 400 mm のテンパックス フロート（厚さ 8 mm，透過波面精度 $\lambda/4$ ， $\lambda=350\sim1100$ nm で単層 AR コート付， $T=96\%$ ）を利用している。もう 1 個はオゾン DIAL 用で有効径 500 mm の合成石英板（厚さ 6 mm，透過波面精 $\lambda/4$ ，260~300 nm でマルチ AR 付， $T=95\sim97\%$ ）を使用している。2 個の観測窓とも太陽直達光が望遠鏡の上部に取り付けた打ち上げ用ミラーに当たり太陽熱により光軸がずれないように遮光用の箱の中に入っている（Fig.2）。

PMT の熱雑音やレーザーを安定に稼働させるためにコンテナの室温を ~ 22 度に保つようにエアコンを使用している。また、レーザーの冷却用にチラーを使用しているが、振動の問題などからチラー用の小屋を別に作りコンテナのすぐ側に置いている。可搬型ライダー用に電源（三相 200V，100A）、上水道、インターネットを新たに整備した。

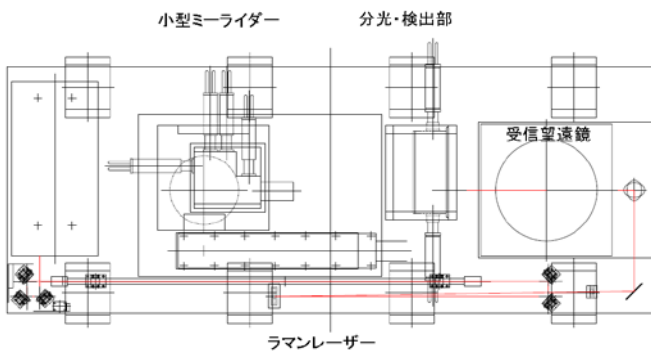


Fig.1 Schematic diagram of a mobile lidar for GOSAT product validation. It consists of a small type of Mie lidar and a DIAL for tropospheric ozone measurement.



Fig.2 A container (front) and a chiller (back) for the mobile lidar.

4. 予備的観測と解析例

現在、予備的観測を繰り返しながら可搬型ライダー全体の最適化を図っている。

4-1 対流圏エアロゾル

小型ミーライダーにより、エアロゾルや薄い巻雲の $\lambda 1$ と $\lambda 2$ の後方散乱比 BR と $\lambda 2$ における偏光解消度 δ の高度分布を距離分解能 $\Delta z=150$ m で導出している。Fig.3 に 2010 年 5 月 21 日の GOSAT が NIES 上空通過時に合わせて観測した BR と δ の高度分布を示す。

この図から、地表から高度 3 km までのエアロゾル層は、波長指数 α が 1.0~1.2、粒子の偏光解消度 δ_p が 15~20% であることから、非球形のダストが存在していたものと考えられる³⁾。一方、高度 3~11 km のエアロゾル層は、 α が 1.6~2.2、 δ_p が 5~20% であることから、球形の小さな硫酸粒子の中にダストが一部混合しているものと推定される。Fig.3 では高度 ~ 17 km 以上のエアロゾルの観測は昼間の背景光で難しくなっているが、夜間は高度 ~ 30 km までの成層圏エアロゾル層の観測が可能である。

4-2 対流圏オゾン

オゾン DIAL 解析では、まず 5 分間（600 ショット）の A/D・PC の積算信号から、 $\Delta z=120$ m の受信信号の高度分布を作成する。各データを 6 個足して 30 分毎のデータを作り、そのデータから $\Delta z=120$ m の連続する 9 個の信号を 3 次の多項式で近似して DIAL の式からオゾン分布を求めている^{5,6)}。Fig.4

に観測例を示す。高度 1 km から 7 km 付近までオゾン密度分布 ($1\sim 2 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$) が測定できていることが分かる。

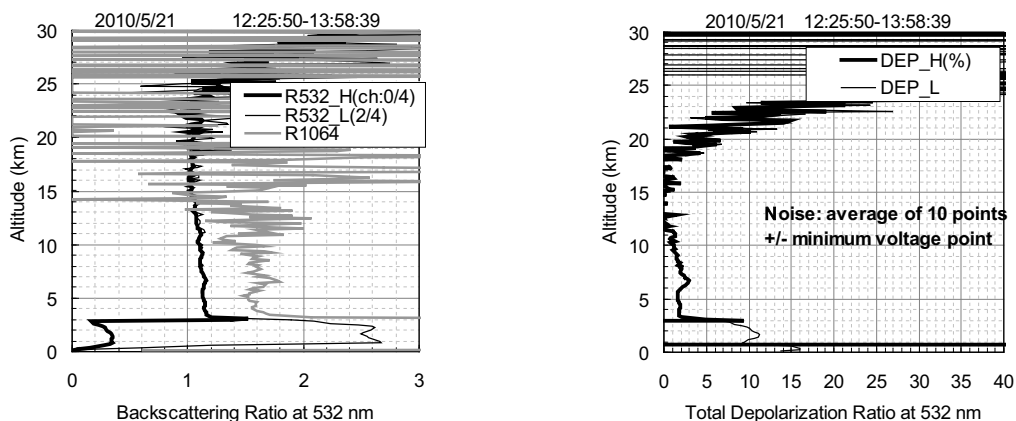


Fig.3 Vertical profiles of backscattering ratio BR at 1064 nm and 532 nm (left) and depolarization ratio δ at 532 nm (right).

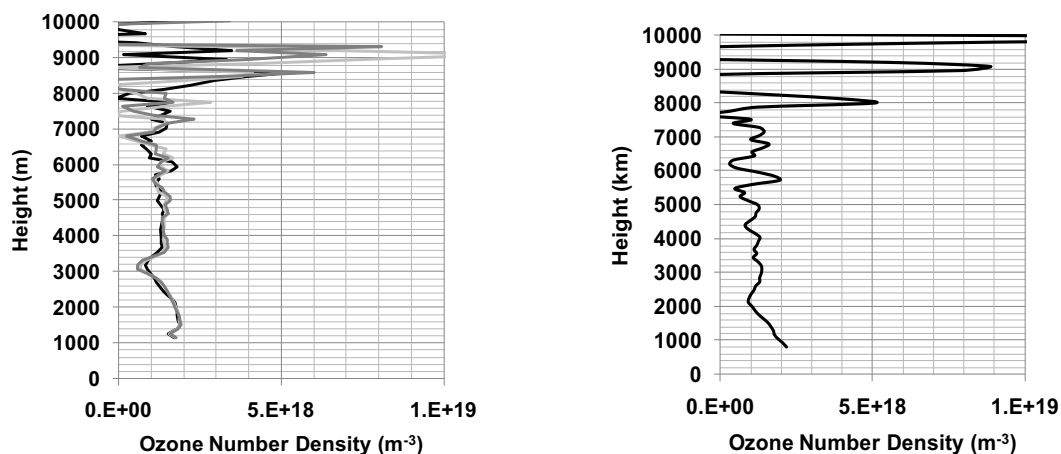


Fig.4 Tropospheric ozone profiles measured on 21 May 2010 with a DIAL.

Fig.5 Tropospheric ozone profile measured on 24 June 2010 with a DIAL

5. まとめ

2010年3月末に導入した GOSAT 検証用の可搬型ライダーは、対流圏・成層圏のエアロゾル・薄い巻雲および自由対流圏のオゾン分布が測定できていることが分かった。当面、NIES で GOSAT との同期観測を行いながら、1 km 以下のオゾン測定や小型ミーライダーの自動遠隔測定・データ取得などについて検討を進める予定である。

(謝辞)

本ライダー開発において、電源・水道・インターネットの整備では広部智恵子氏をはじめ NIES の多くの関係者のご協力を得た。また、エフ・アイ・ティー、新日本科学製作所、清原光学、河野ボデー製作所、ナカショウの関係者の努力に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Kuze et al., Appl. Opt., 48, 6716-6733, 2009.
- 2) Yokota et al., SOLA, 5, 160-163, 2009.
- 3) 内野他, 日本リモートセンシング学会誌, 30, 149-156, 2010.
- 4) 大田他, 日本リモートセンシング学会誌, 28, 152-160, 2008.
- 5) Nakazato et al., Appl. Opt. 46, 2269-2279, 2007.
- 6) Fujimoto, T., and O. Uchino, J. Meteor. Soc. Jpn, 72, 605-611, 1994.