

対流圏～成層圏観測のためのインドネシア TMU ライダーの現状

柴田 泰邦¹, 阿保 真¹, 長澤 親生¹

¹東京都立大学 (〒191-0064 東京都日野市旭が丘 6-6)

Advancements in Troposphere and Stratosphere Observations by Indonesian TMU Lidar

Yasukuni SHIBATA¹, Makoto ABO¹, and Chikao NAGASAWA¹

¹Tokyo Metropolitan Univ., 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

Abstract: At the Kototabang Lidar Observatory (0.2S, 100.3E) in Indonesia, various lidar observations have been conducted since 2004, with a focus on long-term observations of clouds and aerosols in the troposphere and stratosphere using the Mie lidars. The data acquisition system was revamped using commercially available USB oscilloscopes and self-developed Matlab-based software, enabling simultaneous measurements of analog and photon count data from February 2023. We challenge in acquiring effective lidar data for observations of frequent occurrences of tropospheric cirrus and mid-level clouds, and those of enhancements of the stratospheric aerosol caused by the large volcanic eruptions. Therefore, we devised a method to automatically control the laser pulse repetition rate using NOAA's Outgoing Longwave Radiation (OLR) data and a rain sensor to maintain the long-term observations. For instance, when clear conditions are expected based on OLR data, we increase the pulse repetition rate to improve the signal-to-noise ratio. Conversely, if rain is detected at Indonesian TMU lidar site, the lidar observations are not operated automatically. This presentation introduces the new data acquisition system and the OLR-based laser pulse repetition control system.

Key Words: Lidar, data acquisition, USB oscilloscope, repetition rate control

1. はじめに

我々はインドネシア赤道直下のコトタバングにあるライダー観測所 (0.2S, 100.3E) において、各種ライダー観測を行っている¹⁾。特にミーライダーによる対流圏および成層圏の雲・エアロゾル観測は2004年から長期にわたって行っているのが特徴である。観測当初からデータ取得システムは、1台のADコンバータとオリジナルのソフトウェアで昼夜の対流圏アナログ観測を、2台のパルスカウンタとオリジナルのソフトウェアで夜間の対流圏および成層圏のフォトンカウント観測を実施していた。COVID-19の影響で2020年から3年ほど渡航できない期間があったが、その間に耐用年数を過ぎ、最新のWindows OSに対応できなくなったデータ取得システムの更新作業に取り掛かった。新しいデータ取得システムは、市販のUSBオシロスコープを使い、アナログ・フォトンカウントの両方のデータ取得に同時対応できるMatlabベースのソフトウェアを独自に開発した。2023年2月に渡航を再開し、対流圏～成層圏（昼夜アナログ・夜間フォトンカウント）と成層圏の偏光（夜間フォトンカウント）を2台のUSBオシロスコープでそれぞれ観測する体制に更新した。

赤道直下にあるライダー観測所はシーラスや中層雲が発生しやすく、また、スコールが多いため、成層圏エアロゾル観測において有効なデータの取得率はそれほど高くない。つまり、レーザ光の無駄打ちが相当数ある。そこで、NOAAが公開している外向き長波長放射量 (Outgoing Longwave Radiation; OLR)を利用して、パルス繰り返し周波数を自動制御し、レーザの寿命を延ばす取り組みを新たに検討している。

本講演では、USBオシロスコープを利用した新しいデータ取得システムと、OLRデータを利用したレーザパルス繰り返し周波数の自動制御システムについて紹介する。

2. 新しいライダーデータ取得システム

Fig.1に2023年2月まで使用していたライダーシステムの概要と、更新したライダーシステムの概要をそれぞれ示す。観測当初から、対流圏のアナログ観測は、12 bit AD変換器 (タートル工業 TUSB-0212ADM)を用い、Visual Cで作成したオリジナルソフトウェアで行っていた。対流圏および成層圏のフォトンカウント観測は、それぞれ専用のパルスカウンタ (Sigma Space AMCS-USB)を用い、Visual Cで作成したオリジナルソフトウェアで行っていた。観測データは現地のLinuxデータサーバに保存され、インターネット回線を通じて日本からダウンロードしていた。これらの装置のドライバソフトが最新のWindows OSに未

対応となったため、データ取得システムを更新した。

新しいシステムは市販の 4ch USB オシロスコープ (Picoscope 5444D) を利用する。Matlab から Picoscope オシロスコープ用の Windows 版ソフト開発キット (SDK) が配布されているので、PMT 信号取得、信号処理、データ保存は Windows 用の Matlab で開発したオリジナルソフトによって実行される。パルストリガごとに 14 bit, 62.5 MS/s (サンプリング間隔 16 ns、距離分解能 2.4 m 相当) で PMT 信号を取得する。アナログ観測の場合、10 bin 分の移動平均をとることで距離分解能 24 m のデータにダウンサンプリングしてメモリに一時保存する。フォトンカウント観測の場合、設定した閾値電圧を超える立ち上がり波形を検出してパルスカウントし、10 bin 分を足し合わせて距離分解能 24 m のフォトン数としてメモリに一時保存する。チャンネルごとにアナログ処理とフォトンカウント処理を選択できるので、1 台の USB オシロスコープでアナログとフォトンカウントの両モードでの観測が可能である。指定したパルス積算回数に達すると、メモリ上の各パルスデータをアナログ観測は平均処理、フォトンカウント観測は総和処理し、4ch 分を一つのファイルとしてデータサーバに保存する。観測中は 4ch 分のライダー信号のグラフを表示させ、2 秒ごとに更新している。

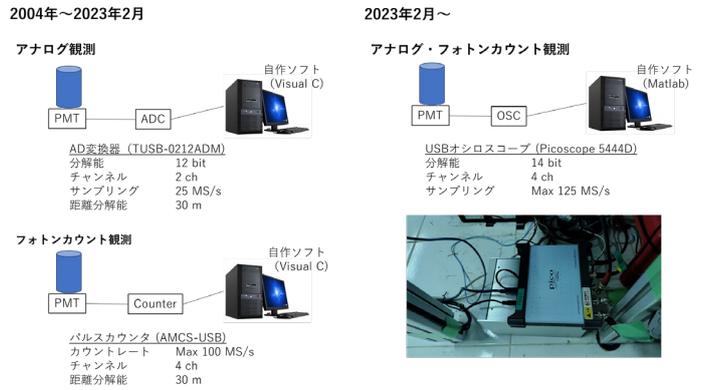


Fig.1 Comparing the data acquisition system used until February 2023 with the updated data acquisition system for the TMU lidar.

3. インドネシア TMU ライダシステム

Fig.2 に 2023 年 2 月に更新したインドネシアの TMU ライダシステムの概略図を示す。1 台の Nd:YAG レーザ (Bigsky Ultra) から 1064 nm と 532 nm を大気へ出射する。口径 40 cm の望遠鏡は成層圏の偏光観測用、口径 35 cm 望遠鏡は対流圏～成層圏観測用、口径 5 cm 望遠鏡は大気境界層付近に広がる森林火災起源の煙霧観測用にそれぞれ利用する。口径 40cm 望遠鏡で受光された 532 nm の散乱光は、偏光ビームスプリッター (PBS) で水平・垂直成分に分けられ、さらに 90:10 のビームスプリッター (BS) で分けられ、それぞれ TTL 出力の PMT に入射する。偏光成分を観測することにより、火山の噴煙と雲の識別が可能である。BS を挿入している理由は、シーラスからの信号が飽和しないよう、散乱光を弱めたチャンネルを用いるためである。計 4ch の信号は 2 章で示した 4ch USB オシロスコープに入力し、データ処理される。

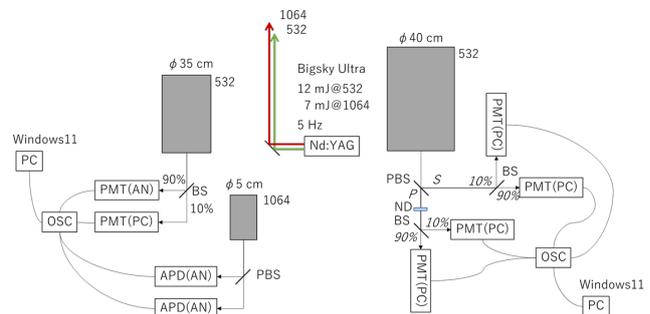


Fig.2 Block diagram of Indonesian TMU lidar system updated in February 2023.

口径 35cm 望遠鏡で受光された 532 nm の散乱光は BS で 90:10 に分けられ、アナログ用の PMT とフォトンカウント用の PMT にそれぞれ入射する。フォトンカウント用の PMT は TTL 出力タイプを使用している。口径 5 cm 望遠鏡で受光された 1064 nm の散乱光は、PBS で水平・垂直成分に分けられ APD に入射する。観測所は標高 865 m の高地にあるため霧が発生しやすく、煙霧と霧の識別のため偏光観測を行っている。口径 35cm 望遠鏡と口径 5cm 望遠鏡で取得される計 4ch の信号は別の 4ch USB オシロスコープに入力し、データ処理される。Fig. 3 に観測中のオリジナルソフト画面の例を示す。35 cm 望遠鏡で取得したライダー信号がチャンネルごとに表示されている (左上: 532 nm アナログ、右上: 532 nm フォトンカウント、下段: 1064 nm 偏光チャンネル)。

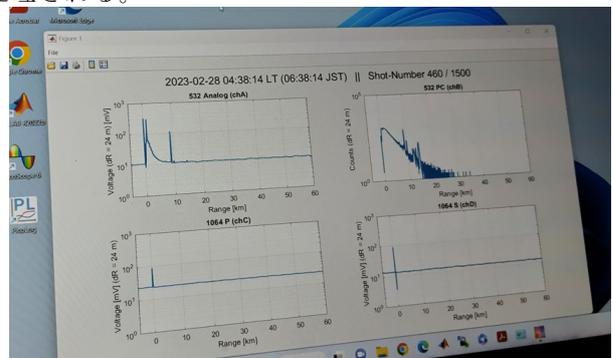


Fig.3 Example of the live screen of the lidar observation software developed specifically for the 35cm telescope.

4. レーザトリガ周波数の自動制御

赤道直下にあるライダー観測所はシーラスや中層雲が発生しやすく、また、スクールが多いため、成層圏エアロゾル観測において有効なデータの取得率はそれほど高くない。現在のライダー観測は 5 Hz のパルス繰り返しで行っているが、出来るだけ無駄打ちを避けたい。そこで、NOAA が公開している外向き長波長放射量 (Outgoing Longwave Radiation; OLR)²⁾ を利用して、パルス繰り返し周波数を自動制御し、SN 向上とレーザの寿命を延ばす取り組みを新たに検討している。OLR は赤外放射、熱放射とも呼ばれ、熱帯減の対流活動の指標として、気候系の監視において有効なデータである。Fig.4 に NOAA が公開している 10N-10S における過去 1 年分の OLR Anomaly 平均値の時間-経度図を示す (一部加工)。OLR Anomaly は対象領域の OLR 平均値からの差で、OLR Anomaly がプラスだと晴天、マイナスだと曇りや雨天であると推定できる。Kototabang のライダー観測所がある 100E では、2022 年 7 月から 2023 年 2 月まで OLR Anomaly がマイナスの期間が続いていたが、2 月以降はプラスの期間が多いことが分かる。Fig.5 に 2023 年 2 月 25 日から約 4 か月間の 5S~5N, 100E での OLR Anomaly の過去 3 日分平均値とライダー観測日 (○と×) の関係を示す。○は高度 30 km での誤差が 10%以内、×は誤差が 10%以上あった日を示す (印のない日は、観測中断)。この図から、OLR Anomaly がプラスの期間は概ね高度 30 km まで高い SN でライダー観測ができていたことが分かる。このことから毎日 1 回 OLR データを NOAA のデータベースから取得し、OLR Anomaly > 20 であればパルス繰り返しを 10 Hz、OLR Anomaly > 0 で 5 Hz、OLR Anomaly < 0 で 1 Hz (煙霧観測用に) とする案を検討している。さらに、現地に雨センサーを設置し、雨が降ればパルス繰り返しを 0 Hz (レーザ発振停止) にすることも併せて検討している。開発環境はインターネット回線の利用、レーザトリガ信号出力、雨センサー信号入力の各機能を備えた Raspberry Pi 4 をベースに試作中である。

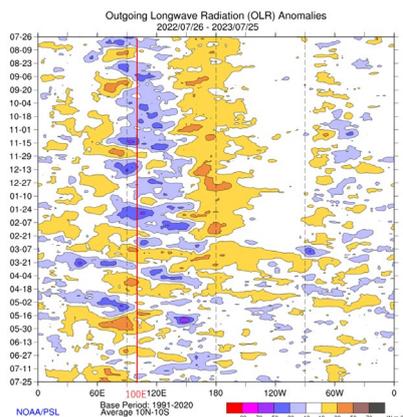


Fig.4 Example of the time-longitude OLR anomalies averaged in 10N-10S.

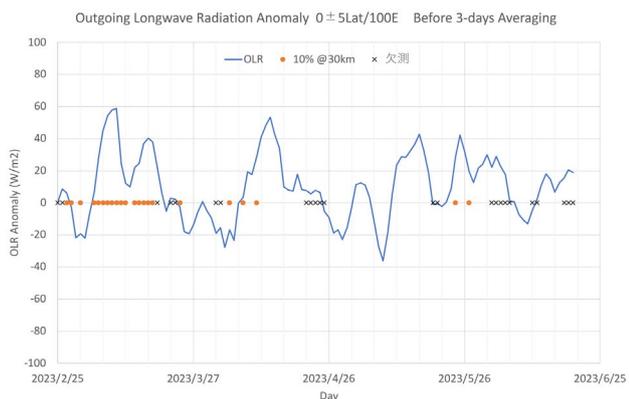


Fig.5 Average OLR anomalies for the before 3 days at 5N-5S / 100E, and days of lidar observations (○: error within 10% at 30 km altitude, ×: error above 10% at 30 km altitude, Blank: interruption).

5. まとめ

インドネシアのライダー観測所に設置した新しいライダーデータ取得システムと、レーザパルス繰り返し周波数の自動制御システムの開発状況を紹介します。従来のデータ取得システムは古くなり、COVID-19 の影響で更新が遅れていたが、2023 年 2 月に渡航を再開し、USB オシロスコープを利用したアナログ・フotonカウンタ兼用の新システムに更新した。また、成層圏エアロゾル観測において OLR を利用してパルス繰り返し周波数を制御する手法を考案した。分厚いシーラスが出現したときや雨天時での無駄打ちを避けつつ、データの取得率の向上と SN の改善が期待される。これにより、赤道直下の特殊な気象条件下でも効果的な観測が可能となる。さらに、雨センサーを組み合わせてレーザ発振を停止する仕組みも検討中である。この新たなシステムと制御手法の導入により、ライダー観測の効率化とデータ品質の向上が期待される。

参考文献

- 1) M. Abo, Y. Shibata, C. Nagasawa, EPJ Web of Conferences. Vol. 176. EDP Sciences, 2018.
- 2) アメリカ海洋大気庁, 外向き長波放射量 (<https://psl.noaa.gov/map/clim/olr.shtml>)