

走査型干渉計を用いた二波長高スペクトル分解ライダーの開発（その2）

神 慶孝¹、西澤 智明¹、杉本 伸夫¹、石井 昌憲²、青木 誠²、岡本 創³、佐藤 可織³

¹国立環境研究所（〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2）

²情報通信研究機構（〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1）

³九州大学応用力学研究所（〒816-8580 福岡県春日市春日公園 6-1）

Development of dual-wavelength high-spectral-resolution lidar with a scanning interferometer (Part 2)

Yoshitaka JIN¹, Tomoaki NISHIZAWA¹, Nobuo SUGIMOTO¹, Shoken Ishii², Makoto Aoki², Hajime Okamoto³, and Kaori Sato³

¹ National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506

² National Institute of Information and Communications Technology, 4-2-1 Nukui-kitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795

³ Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, 6-1 Kasuga Park, Kasuga, Fukuoka 816-8580

Abstract: A simple dual-wavelength high-spectral-resolution lidar (HSRL) is developed for validation of EarthCARE lidar products. A field-widened scanning Michelson interferometer is used as a high-resolution spectral filter at 355 and 532 nm. The interferometer is periodically scanned for the range of one fringe at the longer wavelength. The interference fringe position is monitored every scan for each wavelength using reference light taken from a portion of the transmitted laser and is used to correct phase shifts due to the laser wavelength drifts. Therefore, no wavelength controls are required for the laser or interferometer, and a simple multispectral HSRL system is feasible using the single interferometer. Results of test measurement show that particle backscatter is successfully retrieved both for 355 and 532 nm.

Key Words: High-spectral-resolution lidar, Aerosol, Cloud

1. はじめに

2021年に打ち上げを予定している EarthCARE 衛星では、4つのセンサー（大気ライダー、ドップラー雲レーダー、多波長イメージャー、広帯域放射収支計）によって全球の雲・エアロゾルを多角的に観測し、放射収支メカニズムを解明して気候変動予測の精度を向上させることを目指している¹。このミッションを成功させるためには、衛星観測プロダクトの確からしさを評価していくことが必要不可欠であり、地上検証は今後の重要なタスクとなる。

このような背景の中で、平成29年度の科学研究費助成事業基盤研究(S)課題の一つとして「次世代アクティブセンサ搭載衛星の複合解析による雲微物理特性・鉛直流解析研究(研究代表者：九大・岡本)」が採択された。この研究課題では、EarthCARE衛星の観測条件を模擬する次世代型地上観測システムを構築し、衛星解析アルゴリズムの検証と開発を行う。国立環境研究所は、EarthCAREに搭載される波長355nmの高スペクトル分解ライダー(HSRL)の検証を目的として、多視野角・多重散乱偏光ライダー、広視野HSRL、そして本稿で紹介する二波長HSRLを開発する。

HSRL手法は、大気分子からのレイリー散乱をエアロゾルからのミー散乱と分離して測定し、エアロゾルの消散係数と後方散乱係数を独立的に抽出する手法である。レイリー散乱はミー散乱よりも広いスペクトル幅を持つため、このスペクトルの違いを利用して分光する。実際には、干渉計や蒸気フィルターなどの狭帯域フィルターでミー散乱をブロックしてレイリー散乱信号を測定する。通常のHSRLシステムでは、ミー散乱をブ

ロックするため、レーザー波長ないしは分光フィルターを制御する。また、多波長システムの場合、測定波長毎に分光フィルターを使用するため、制御が複雑化する。本研究では、よりシンプルなシステムを目指し、1つの干渉計を用いて二波長(355nm、532nm)HSRLシステムを構築する。これを実現させるため、走査型マイケルソン干渉計を開発し、干渉計を周期的に掃引して測定する方式をとる²。

第35回レーザーセンシングシンポジウムでは、キーパーツとなる干渉計の設計に関する検討結果を示した³。本稿では、ライダーシステムの概要と試験観測結果について報告する。

2. ライダーシステム

図1にライダーシステムのブロック図を示す。光源として、Injection seeded Nd:YAGレーザー(Cutting Edge Optronics, Inc. Gigashot-L)を使用した。レーザーの繰り返し率は20Hz、パルスエネルギーは1064、532、355nmに対してそれぞれ90、70、120mJである。受信部には、210mm径のカセグレンタイプ(ドール・カーカム式)の望遠鏡(Takahashi Mewlon-210)を使用した。視野角は0.4mradとした。重なり関数を補正するために、2mradの視野角を持つ50mm径の屈折式望遠鏡も設置した。

大気散乱光はマルチモードファイバー(コア径400 μ m、NA0.12)で分光部に送られた。分光部では、走査型マイケルソン干渉計で355nmと532nmの受信光を分光し、干渉計の後ろでビームスプリッターを用いて2つの波長を分けた。マイケルソン干渉計では、二つの出力ビームを得るため、折

り返しミラーにルーフミラーを使用した。ルーフミラーはピエゾステージにマウントされ、フリンジスキャンのため周期的に前後に振動させた。ピエゾステージに印加する電圧は、ファンクションジェネレーターを使って制御され、印加電圧はルーフミラーの変位情報としてショット毎に記録された。

干渉計の片側のアームには、ガラスロッド（合成石英）を挿入した。これは、屈折率の異なる媒質を用いることで光路長差の角度依存性を補償する手法⁴⁾であり、角度広がりを持つ大気散乱光に対して干渉効率を格段に向上させる。角度依存性が最も小さくなる光路長差は、ガラスロッドの長さ L と屈折率で決定される。本研究では光路長差を125mmとするため、 $L=80\text{mm}$ のロッドを使用した。合成石英の屈折率は、波長355nmと532nmに対して1.476、1.461であるため、最適な干渉計の長さはほぼ同じ（約0.5mm程度の違い）である。

干渉計を1フリンジ以上周期的に掃引することで、スキャン信号に対する曲線フィッティングの解析が可能となる。干渉計を1フリンジ分だけ掃引するためには、光路長差を1波長分だけ変える必要があるため、掃引幅は波長によって異なる。本研究では長波長側（532nm）に掃引幅を合わせた。そのため、355nmでは1.5フリンジ分だけ掃引される。

干渉計の特性を連続的にモニターするため、送信レーザーの一部を参照光として使用した。参照光はファイバーケーブルで大気散乱光のファイバーと結合して分光部に送られた。参照光を測定するため、160MHzの高速A/D変換器（AVAL DATA ADO-1616-STD）を使用した。また、測定信号はショット毎に記録された。

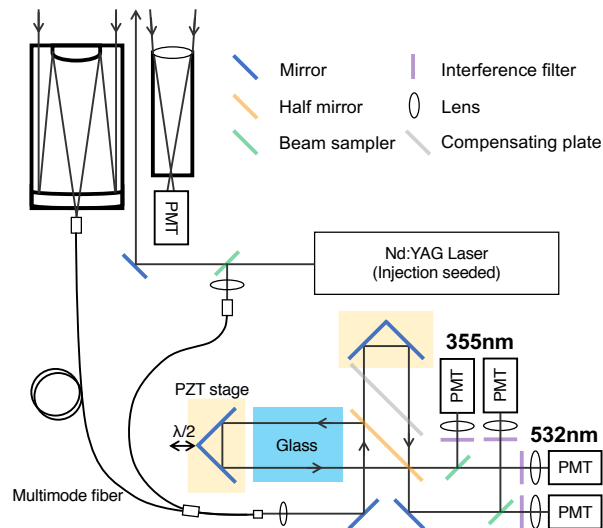


Fig. 1 Block diagram of a dual-wavelength HSRL with a scanning interferometer.

3. 実験結果

2019年3月22日から2日間、国立環境研究所構内において二波長HSRLの試験観測を実施した。各波長での測定信号の強度は、干渉計の掃引のため周期的に変化する。まず、参照光の信号を光路

長差の変位に対してプロットし、スキャン毎に正弦関数でフィッティングした。次に、フィッティング関数の位相を正規化することで、送信レーザーの波長ドリフトに伴う位相シフトを補正した。大気信号に対しても同様にフィッティング解析が行われ、位相補正をしてスキャンデータを積算した。ここでは5分間の積算を行った。

積算データに対してフィッティング解析を行い、スキャンデータの最小と最大の強度を推定した。最小値の意味するところは、ミー散乱を最も除去した時の信号強度であるが、この値にはレーザーのスペクトル広がり起因するミー散乱のバイアス（ないしはクロストーク）成分が含まれている。バイアス成分は、参照光に対する干渉計の最小透過率から推定できる。大気散乱の最小強度信号からバイアス成分を除去することで、レイリー散乱信号が得られた。

レイリー散乱信号の高度方向に対する傾きの情報から、エアロゾルの消散係数が抽出された。また、全体（ミー散乱+レイリー散乱）信号とレイリー散乱信号の比を取ることで、大気透過率の項を除去し、後方散乱係数を取り出した。図2に二波長に対して抽出された後方散乱係数の時間高度断面図を示す。大気下層のエアロゾルと雲の後方散乱係数を連続的に抽出することに成功した。試験観測の結果から、走査型干渉計を用いることでHSRLのシンプルなる多波長化が可能であることを実証した。

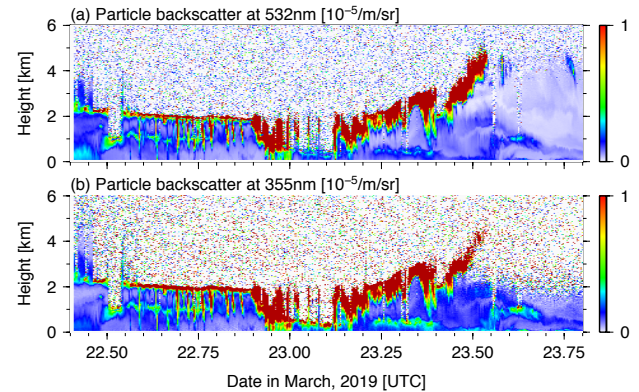


Fig. 2 Time-height cross section of particle backscatter (a) at 532 nm and (b) at 355 nm measured with a dual-wavelength HSRL in March 2019 at Tsukuba, Japan.

謝辞

本研究は、JSPS 科研費基盤研究(S) JP17H06139の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) A. J. Illingworth et al., *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **96**(8), 1311-1332, 2015.
- 2) Y. Jin et al., *Appl. Opt.*, **56**(21), 5990-5995, 2017.
- 3) 神ほか, 第35回レーザーセンシングシンポジウム予稿集, 94-97, 2017.
- 4) R. L. Hilliard and G. G. Shepherd, *J. Opt. Soc. Am.*, **56**(3), 1966.