

2 波長マルチスタティックライダによる

ロケット打上時の水ミスト粒径計測

吉富 泰助¹, 澤田 敦司¹, 更江 渉¹, 服部 昭人¹, 杉本 伸夫², 西澤 智明², 神 慶孝²,
岡本 創³, 佐藤 可織³

¹宇宙航空研究開発機構 (〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1)

²国立環境研究所 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

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)

Measurement of particle size of water mist generated by rocket launch using a two-wavelength multi-static lidar

Taisuke YOSHITOMI¹, Atsushi SAWADA¹, Wataru SARAE¹, Akito HATTORI², Nobuo SUGIMOTO²,
Tomoaki NISHIZAWA², Yoshitaka JIN², Hajime OKAMOTO³, and Kaori SATO³

¹Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki, 305-8505

²National Institute for Environmental Studies (NIES), 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki, 305-8506

³Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu univ. (RIAM), 6-1 Kasuga-koen, Kasuga, Fukuoka, 816-8580

Abstract: A multi-static lidar was developed for measuring particle size of water mist generated during rocket launch. Water mist in the order of micrometer is thought to be effective for reducing the acoustic noise down to the level harmless to rocket instruments, however its contribution or efficiency is unknown since its *in-situ* droplet size has not been measured. The lidar consists of a two-wavelength laser transmitter and three pairs of receivers set at scattering angles at 180, 178 and 177 degrees. The size parameter of water mist was determined from the scattered signals at 1064 nm and 532 nm at 178 and 177 degree scattering angles. The method was tested with commercial water mist generator nozzles and applied to the measurement at the Tanegashima Space Center, H-IIA/B rocket launch site.

Key Words: Multi-static Lidar, Rocket, Mist, Acoustic noise

1. はじめに

ロケット打ち上げ時に発生する轟音は、搭載する衛星をはじめとした電子部品に振動の形で悪影響を与える。日本を含む各国のロケット発射場には注水・散水設備があり、噴煙からの設備保護だけでなく、ロケット排気への注水による排気エネルギーの低減、水幕による発射台等からの反射音響等低減により機体の音響環境を緩和させている。ロケット排気と注水が副次的に発生させる水ミスト群も音響低減に寄与していると考えられているが、その粒径が音の吸収に有効とされる数 μm オーダーであるかはこれまで明らかでなかった。現在開発中の H3 ロケットにおいては、現行基幹ロケット (H-IIA/B) より排気パワーが増大することにより音響環境も厳しくなると予想される一方、注水設備の増強コストは低減する必要がある。そのため、打上時に発生する水ミストの粒径分布を実測し、その音響低減効果を定量的に把握しなくてはならない。

粒径計測手法としては雲粒子カウンターのよう、その場計測手法もあるが、水粒子の密度が高いこと・ロケット近傍という過酷な環境下であることから現実的ではなく、ライダによる遠隔計測を採用した。通常の後方散乱ライダでは 10 μm 程度の水粒子に対して波長依存性がほとんどないため、多波長を用いても粒径を計測することは困難である。そこで、粒径による位相関数 (散乱強度の散乱角依存性) の違いを利用するバイスタティック (マルチスタティック) ライダを利用した。製作したライダの基本的な原理は、以前に水雲の粒径計測に用いられた手法と同様である (Sugimoto et al., 2001)。ロケット打ち上げ時の計測では、水ミストと同時に固体ロケットブースタ (SRB, Solid Rocket Booster) からの噴煙が同時に計測され、これには非球形と考えられるアルミナ粒子が含まれる。そこで、散乱角 180 度における波長 532 nm の偏光解消度を測定して噴煙と水ミストを識別した。粒径計測では偏光を利用せず、2 つの散乱角 (178 度と 177 度) における 1064 nm

と 532 nm の散乱強度の比を測定し、粒径分布を仮定した理論として粒径を推定することとした。本報告では、ライダ装置と粒径推定手法・ミスト発生器を用いた実験・射場での H-IIA ロケット 30 号機打ち上げ時の実験（予備実験）について報告する。

2. マルチスタティックライダと粒径推定手法

2.1 装置の構成

製作したマルチスタティックライダのブロック図を Fig. 1 に示す。

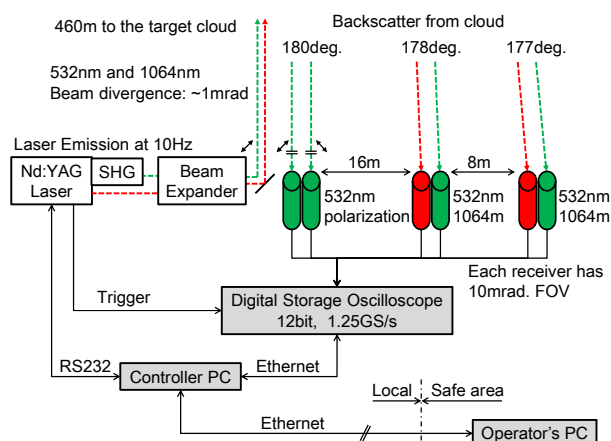


Fig. 1. Block diagram of the multi-static lidar.

光源として、Nd:YAG レーザ (Quantel CFR200 または Ultra50) の基本波 1064 nm と第二高調波 532 nm を用いた。パルス繰り返し数は 10 Hz とし、偏波面が散乱面と 45 度の方向になるようにレーザを 45 度回転してマウントしている。散乱角 180 度においては 532 nm の偏光消滅度を測定し、散乱角 178 度と 177 度においては 532 nm と 1064 nm の散乱光の全偏光成分の強度を測定する。各受信望遠鏡は独立に干渉フィルタ・集光レンズおよび検出器を持ち、180 度の偏光チャンネルにはさらに偏光板を持つ。受信望遠鏡は口径 50 mm・焦点距離 100 mm (または 50 mm) であるが、計測時は散乱光強度に応じた絞りを置いて口径を制限した。各望遠鏡は独立の雲台に設置し、独立にアライメントを取った。検出器は 1064 nm, 532 nm とともに口径 1 mm のアバランシェフォトダイオード (浜松ホトニクス) を用いている。データの収集記録には 12 bit の高速デジタルオシロスコープ (Teledyne LeCroy HDO6000/8000 シリーズまたは横河 DLM2000/4000 シリーズ) を 2 台 (または 3 台) 準備し、メモリ分割機能を用いて 6 チャンネルの 1 ショット毎の信号を全て記録した。ロケット打ち上げ時の計測時間は約 1 分とし、計測終了後にデータを PC に回収した。

2.2 粒径の推定

180 度, 178 度, 177 度における各波長の信号強度が粒径分布を仮定した理論と整合するように、水滴のモード径を求める。Fig.2 は、雲の粒径分布として一般的であると考えられるガンマ分布 (Dirmendjian, 1969) の粒径分布を仮定し、178 度における 1064nm/532nm 強度比と 177 度における 1064nm/532nm 強度比をモード径毎にプロットしたものである。

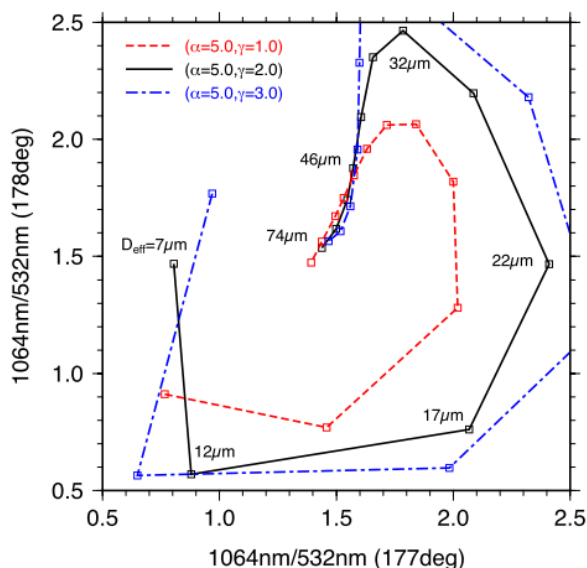


Fig. 2. A method for determining mode radius in a scatter plot of the wavelength ratios at 178 and 177 scattering angles.

このような散布図に測定値をプロットすることによってモード径を推定することができる。いくつかの分布関数に対して理論値をプロットして測定と比較することによって妥当な分布関数とモード径を推定でき、また角度比と波長比などの散布図でも同様の推定が可能である。本来はできるだけ多次元の散布図を用いたアルゴリズムが望まれる。

3. 水ミスト発生器を用いた実験

マルチスタティックライダによる水滴の粒径計測手法を検証するために、市販のミスト発生ノズルを用いた計測実験を行った。実験は国立環境研構内で行い、約 100 m 離れたミストを 180 度, 178 度, 176 度の散乱角で受信した。ミスト発生ノズルには、公称粒径 7-9 μm と 20-30 μm の 2 種類を用いた。Fig. 3 に散乱角 178 度と 176 度の波長比に対する散布図を示す。青と緑で示したデータは粒径 7-9 μm のミスト発生ノズルに対するもので、赤とオレンジは粒径 20-30 μm のミスト発生ノズルに対するものである。Fig. 3 に見られるようにそれぞれ分かれて分布しており、マルチスタティックライダにより粒径計測が可能であることを示している。

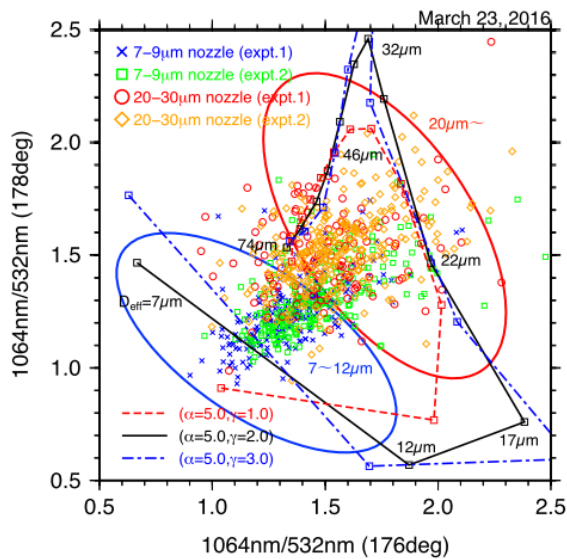


Fig. 3. Scatter plot of the wavelength ratios at 178 and 176 scattering angles for the water mist generated with the nozzles. Blue and green indicate the data for the 7-9 μm mist generator nozzle, and red and orange indicate those for the 20-30 μm nozzle.

4. H-IIA ロケット打上げ時の予備実験

4.1 現地での計測

2016年2月17日 H-IIA ロケット 30 号機打ち上げ時に種子島の射場で水ミスト計測の実験を行った。マルチスタティックライダーによる最初の実験であり試験的なものであったが、

- 散乱角 180 度における 532 nm の偏光解消度
- 散乱角 177 度における 2 波長の散乱強度の計測に成功した. Fig.4 に示すように全ての装置はロケットから約 460 m 離れた大型ロケット組立棟屋上に設置し、打ち上げ当日は装置にアクセスできなくなるため、LAN 経由で遠隔操作した。

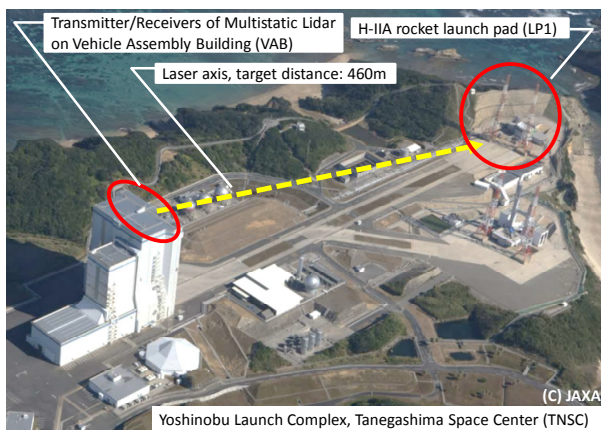


Fig. 4. Lidar system was installed at the rooftop of Vehicle Assembly Building and aligned to H-IIA rocket launch pad.

Fig. 5 に H-IIA 30 号機打ち上げ時の写真とレーザおよび後方散乱光のイメージを示す。



Fig. 5.

Estimated laser axis and Backscatters are illustrated on the side view of H-IIA F30 launch. Backscattered signals were detected only from approx. 20 m depth of cloud due to its denseness.

4.2 粒径の推定

Fig.6 にメインエンジン点火を時刻 0 とした時間・距離表示の下記計測結果を示す。

- 散乱角 180 度における 532 nm の散乱強度
- 散乱角 180 度における 532 nm の偏光解消度
- 散乱角 177 度における波長比
- 532 nm の 177 度と 180 度の強度比

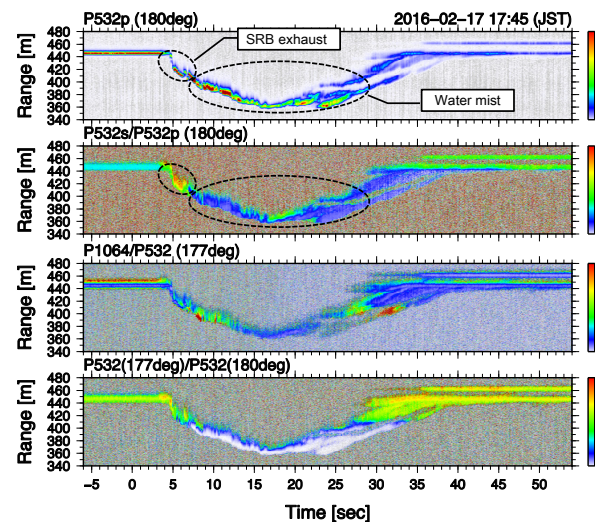


Fig. 6. Time-range indications of signal intensity at 532 nm at 180 deg. scattering angle, depolarization ratio of 532 nm at 180 deg., the ratio of the intensities at 1064 nm to 532 nm at 177 deg., and the ratio of the intensities at 177 deg. to 180 deg. at 532 nm. The origin of time axis is the ignition of the main engine.

メインエンジン点火の約4秒後から固体ロケットブースタ(SRB)からの偏光解消度の大きい噴煙が観測され、約7秒後から水ミストが観測され始めている。メインエンジン点火からSRB点火まで変化が見られないのは、映像でもわかるようにその時間帯はエンジン排気のすべてがロケット直下に設けられた煙道に流れるためである。ミストを含む噴煙は10秒間の間に100 m程度ライダー側に広がってきていることがわかる。噴煙および水ミストによるライダー信号の減衰は非常に大きく、Klett法により求めた消散係数は、固体ロケットの噴煙で最大200 /km程度、水ミストで最大150 /km程度であった。これは普通の水雲に比べても非常に大きな値である。

今回の実験で測定された4つのパラメータから、散乱角180度における後方散乱強度と180度の偏光解消度の散布図をプロットした(Fig. 7)。図左では532 nmの散乱角177度と180度の比を、図右では177度における波長比をカラースケールで表示した。また両方の図中に、偏光解消度およびガンマ分布を仮定した理論と比較することによって判別した定性的な粒子の分類結果も示し、図下には時間距離分布との対応を示している。水ミストの消散係数は非常に大きく、噴煙の外側しか計測できないが、定性的にはミストが広がるに従って粒径が大きくなり、最も広がった状態で粒径が最大になった後は、ミストが消滅するのに従って粒径が小さくなっているように見える。プロファイルの詳細を見ると、ミストの外側の方が粒径が大きいような傾向も見られる。これは、内部の温度が高く外側で凝結が進んでいるものと考えられる。

5. おわりに

マルチスタティックライダーにより水ミストの粒径計測が可能であることを検証し、射場における予備実験でも良好な結果を得た。この手法の問題点のひとつは、測定パラメータの数に応じて決定できる粒径パラメータが限られるため、解析において現実的な粒径分布関数を仮定する必要があることである。また、ライダーで捉えられるのは噴煙の外側20 m程度のみで、内部をみることができない。水ミスト発生の最適化のためには、水ミストの生成、輸送、成長、消滅のモデルが必要である。今後、計測・解析手法、利用手法ともにさらに研究を進める計画である。

謝 辞

計測実験にご協力いただいた三菱重工業株式会社の皆様、JAXA 種子島宇宙センターの皆様、機器製作にお力添えいただいた鈴木 聡太郎氏にこの場をお借りして御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Deirmendjian (1969): Electromagnetic Radiation Scattering by Spherical Polydispersed Particles (Elsevier, New York).
- 2) Sugimoto, N., I. Matsui and A. Shimizu (2001): Measurement of Water Cloud Particle Size with a Dual-Polarization Pulsed Bistatic Lidar, Optical Review Vol. 8, No. 6, 476-479.

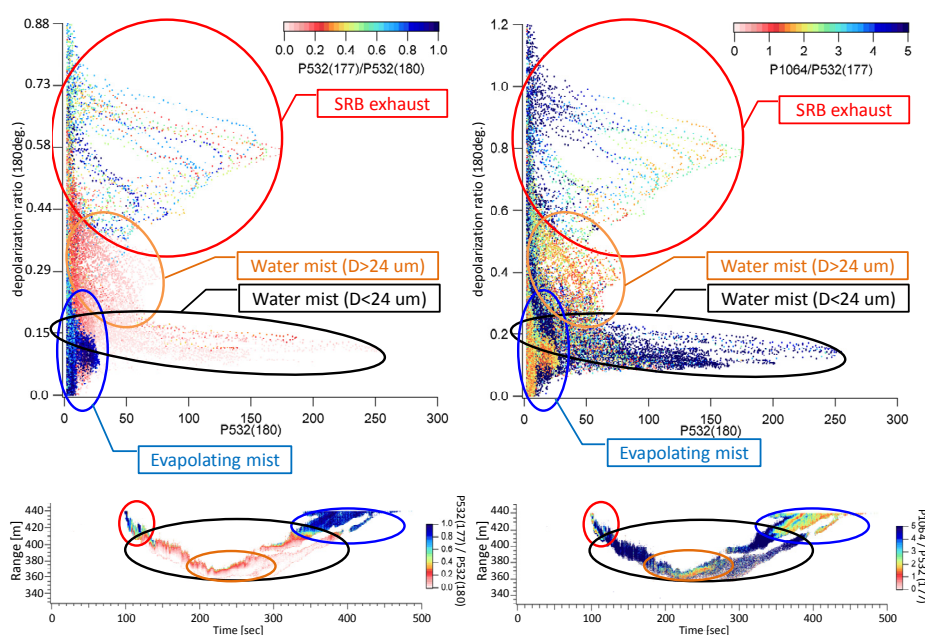


Fig. 7. Scatter plot of the depolarization ratio and the backscattering intensity at 532 nm. The ratio of intensities of 177 deg. to 180 deg. is indicated in color scale in the left panel, and the ratio of 1064 nm to 532 nm at 177 deg. is indicated in the right panel. Time-range plots are also shown in the lower panels. Qualitative particle classification using the depolarization ratio, the angular ratio, and the color ratio indicated in the figures.