

エアロゾル成分計測用ライダーの開発

Development of a lidar for measurement of aerosol constituent

藤井 隆¹, 後藤直彦¹, 杉山精博², 三木 恵¹, 名雪琢弥¹, 西川久美子³, 中島一久², 根本孝七^{1,3}

¹電力中央研究所, ²総合研究大学院大学, ³東京工業大学

Takashi Fujii¹, Naohiko Goto¹, Kiyohiro Sugiyama², Megumu Miki¹, Takuya Nayuki¹, Kumiko Nishikawa³,
Kazuhisa Nakajima², Koshichi Nemoto^{1,3}

¹Central Research Institute of Electric Power Industry, ²The Graduate University for Advanced Studies,

³Tokyo Institute of Technology

Abstract: We demonstrated experimentally the detection and identification of NaCl particles in the air by laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) using plasma filaments generated by femtosecond terawatt laser pulses. Laser pulses with 70 fs and 2 TW were irradiated onto NaCl particles, and fluorescence of Na was observed by *in-situ* measurements. These results show the possibility of the measurement of aerosol constituent using the plasma filaments. We also developed a receiver composed of a 30cm Newtonian telescope, a bundle fiber, a spectrometer, and an ICCD camera for the lidar measurement of aerosol constituent.

1. はじめに

エアロゾル成分の空間分布計測により、酸性雨の原因解明等大気科学分野において重要な知見を得ることが可能である。また、近年ではバイオテロの危険性が高まっており、大気中浮遊物質の遠隔成分計測の必要性が高まっている。さらに、海塩粒子は碍子の汚損による大規模停電や農作物への被害等をもたらすため、その影響予測のために海塩粒子飛散の予測プログラムが開発されている[1]。この予測プログラムの精度を高めるためには、実際に大気中に浮遊する海塩粒子の空間分布計測が必要である。

ライダーを用いたエアロゾル計測としては、消散係数、粒径分布、形状等様々な計測が行われてきたが、エアロゾルの成分計測は不可能であった。近年、チタンサファイアレーザーをベースとした超短パルス高強度レーザーが発達し、ライダーにおいても様々な適用が試みられてきた[2-4]。超短パルスレーザーをエアロゾルに照射すると、その高いピークパワーのために多光子吸収が生じる。この現象を利用して、バイオエアロゾル成分のライダー計測に関する報告もなされている[4,5]。

一方、超短パルスレーザーを大気中に伝播させると、高い非線形効果によりフィラメントと呼ばれるレーザービームが絞られたまま伝播する現象が生じる[6]。フィラメントの内部にはプラズマが生成しているため、このプラズマの発光スペクトルを観測すれば、レーザー誘起ブレイクダウン分光 (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy; LIBS) によりエアロゾルの成分を高感度で計測できる可能性がある。今回、超短パルスレーザーにより生成したフィラメントを用いて、海塩粒子の空間分布のライダー計測に関する可能性を検討したので報告する。

2. フィラメントを用いた海塩粒子中の Na 発光計測

2.1. 実験系

超短パルスレーザーを用いた海塩粒子のライダー計測の予備実験として、超短パルスレーザーを用いて海塩粒子を模擬したエアロゾル中の Na の発光計測を行った。図 1 に実験系を示す。超音波加湿器を用いて飽和食塩水 (150g/500ml) を微粒化し、人工的な海塩粒子を生成した。レーザーを用いた粒径測定装置 (Oxford lasers; VisiSizer)

で測定したところエアロゾルの粒径は $10\ \mu\text{m}$ 以下であった。生成した海塩粒子を内径 20cm、長さ 5m の円筒中に噴霧した。使用したレーザーはチャープパルス増幅のフェムト秒チタンサファイアレーザー (THALES laser, Alpha 10/US-20TW) である。パルスエネルギー 130mJ、パルス幅 70fs、ピーク出力 2TW、パルス繰り返し 10Hz のレーザー光を焦点距離 20m の凹面ミラーを用いて集光し、海塩粒子に照射した。集光後約 18m の位置において、レーザー光進行方向に対して後方に 23 度の角度で設置した光ファイバーを用いて、海塩粒子の発光を焦点距離 460mm の分光器 (Jobin Yvon 社製 HR460) に導光した。分光したスペクトルは ICCD カメラ (Andor 社製 DH734-18F-03) で受光した。実験に用いた光ファイバー、分光器、ICCD カメラの仕様は第 3 節に詳しく示す。

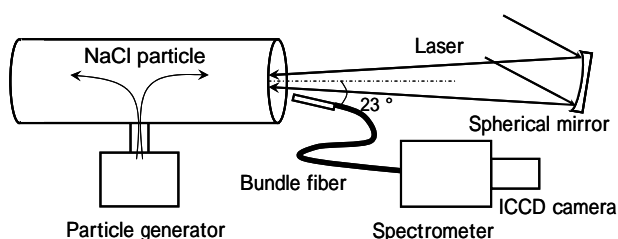


Fig. 1. Experimental setup for the measurement of Na fluorescence from NaCl particles irradiated with plasma filaments generated by femtosecond laser pulses.

2.2. 実験結果

図 2 に海塩粒子発光計測地点におけるレーザービーム断面と生成したマルチフィラメントの様子を示す。レーザービーム中に観察される多数の輝点がフィラメントである。図 3 は水蒸気を充満した円筒中に入射するレーザー光を斜め横から撮影したものである。多数ショット重ね撮りしているにも関わらず、一本一本のフィラメントが伝播する様子観察されている。これは、フィラメントがレーザービーム断面において常にほぼ同じ位置に生成していることを示している。

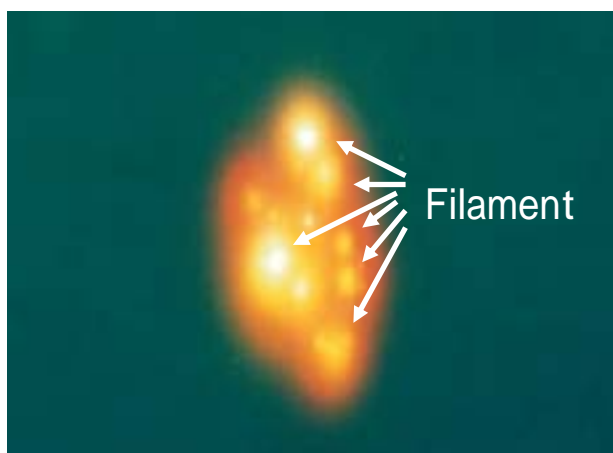


Fig. 2. Laser beam profile showing multiple filaments at the measurement point for Na fluorescence.

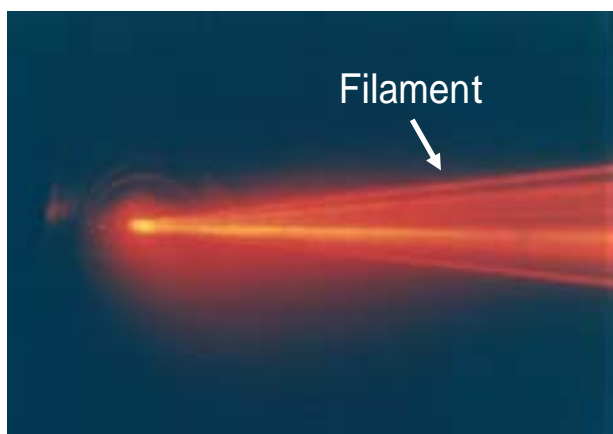


Fig. 3. Propagation of multiple filaments around the measurement point for Na fluorescence.

海塩粒子にフィラメントを照射したときの分光測定結果を図 4 (a) に示す。計測時における ICCD カメラのゲート幅は 20ns とした。レーザービームの照射タイミングには約 10ns のジッターがある。まず、分光器の中心波長を 800nm に設定し、チタンサファイアレーザーの基本波および自己位相変調により発生する白色光が最も強く観測される ICCD カメラのゲートタイミングを見出した。そのタイミングからのゲート遅れ時間が 20ns、40ns、120ns の時の分光スペクトルを図 4(a) に示す。また、参照スペクトルとして食塩を溶解したアルコールランプの発光スペクトルを図 4(b) に示す。Na の D_1 、 D_2 線が明瞭に観察されている。

図 4(a)より、海塩粒子にフィラメントを照射した場合遅れ時間が 20ns の時に Na の発光が明瞭に観測されている。遅れ時間が 40ns になると Na の発光はほとんど観測されなくなり、遅れ時間が 120ns の時には全く観測されていない。遅れ時間が 20ns の時に長波長側の信号強度が徐々に上昇していくのは白色光発生のためであり、遅れ時間の増大と共に白色光強度も弱くなっていることが分かる。

以上の結果より、フィラメント中に生成したプラズマの発光スペクトルを測定することにより海塩粒子の同定が可能であることが示された。

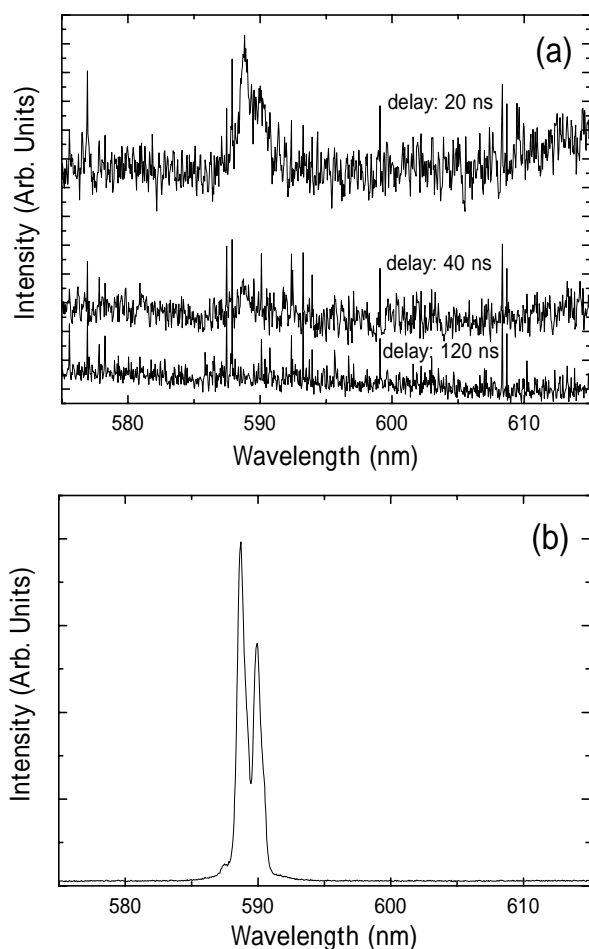


Fig. 4. Spectroscopic measurement results of Na fluorescence from (a) NaCl particles irradiated with plasma filaments generated by femtosecond laser pulses with delay time of 20, 40, and 120 ns from laser irradiation, and (b) alcohol lamp containing NaCl.

3. ライダー受光装置の製作

上記の結果を元に、海塩粒子等のエアロゾル成分の遠隔計測を目的としたライダー受光装置を製作した。製作したライダー受光装置の緒元を表 1 に示す。望遠鏡は主鏡直径 12.5 インチ、焦点距離 1.5m のニュートン型である。集光された光はバンドルファイバーを通して分光器に入射される。分光器への入射効率を上げるため、バンドルファイバーの入射側の形状は直径 3.37mm の円形とし、出射側は 400 μm \times 20mm のスリット形状とした。バンドルファイバーの入射位置を調整することにより、最短で 15m の近距離からの光をファイバーに結合することが可能である。バンドルファイバーからの出射光は焦点距離 460mm の分光器により分光され、ICCD カメラにより受光される。バンドルファイバー、分光器、ICCD カメラは 2 節で述べた実験に使用したものと同一である。

Table 1. Specifications of lidar receiver for the measurement of aerosol constituent.

Telescope	
Type	Newtonian
Primary mirror diameter	12.5 inch
Focusing length	1.5 m
Bundle fiber	
Input size	3.37 mm
Output size	400 μm \times 20 mm
Each fiber core diameter	210 μm
Numerical aperture	0.37
Length	3 m
Spectrometer	
Focusing length	460 mm
Grating size	76 \times 76 mm
Aperture ratio	f/5.3
ICCD camera	
Quantum efficiency at 589nm	10 %
Dark current	2.4 e ⁻ /p/s
CCD format	1024 \times 1024
Pixel size	13 μm

4. まとめ

超短パルスレーザーにより生成するフィラメントを用いた、大気中浮遊海塩粒子のライダー計測に関して検討した。パルスエネルギー130mJ、パルス幅70fs、ピーク出力2TW、パルス繰り返し10Hzのレーザー光を用いてフィラメントを生成した。このフィラメントを海塩粒子を模擬したエアロゾルに照射し、Na 発光スペクトルの *in-situ* 計測に成功した。これにより、フィラメントを用いた LIBS による、海塩粒子等エアロゾル成分の計測の可能性が示された。さらにこの結果を元に、大気中エアロゾル成分計測用ライダー受光装置を製作した。

参考文献

- [1] 加藤央之, 和田浩治, 高橋毅, 「塩分飛散予測手法の高度化(その1) - エジェクタ式気中塩分計の性能評価と簡易型塩分飛散予測モデルの改良 - 」, 電中研研究報告 T03019, 2004 年.
- [2] P. Rairoux, H. Schillinger, S. Niedermeier, M. Rodriguez, F. Ronnerberger, R. Sauerbrey, B. Stein, D. Waite, C. Wedekind, H. Wille, L. Woeste, C. Ziener, “Remote sensing of the atmosphere using ultrashort laser pulses”, *Appl. Phys. B*, Vol. 71, pp. 573-580, 2000.
- [3] M. C. Galvez, M. Fujita, N. Inoue, R. Moriki, Y. Izawa, and C. Yamanaka, “Three-wavelength backscatter measurement of clouds and aerosols using a white light lidar system”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 41, pp. L284-L286, 2002.
- [4] J. Kasparian, M. Rodriguez, G. Mejean, J. Yu, E. Salmon, H. Wille, R. Bourayou, S. Frey, Y.-B. Andre, A. Mysyrowicz, R. Sauerbrey, J.-P. Wolf, and L. Woeste, “White-light filaments for atmospheric analysis”, *Science*, Vol. 301, pp. 61-64, 2003.
- [5] G. Mejean, J. Kasparian, J. Yu, S. Frey, E. Salmon, J.-P. Wolf, “Remote detection and identification of biological aerosols using a femtosecond terawatt lidar system”, *Appl. Phys. B*, Vol. 78, pp. 535-537, 2004.
- [6] A. Braun, G. Korn, X. Liu, D. Du, J. Squier, and G.

Mourou, “Self-channeling of high-peak-power femtosecond laser pulses in air”, *Opt. Lett.*, Vol. 20, pp. 73-75, 1995.