

レーザラマン分光法によるガス噴流挙動高速計測技術の開発

市川 祐嗣, 荻田 将一, 杉本 幸代, 朝日 一平
四国総合研究所 (〒761-0192 香川県高松市屋島西町 2109 番地 8)

Development of High-Speed Gas Measuring System by Laser Raman Spectroscopy

Yuji ICHIKAWA, Masakazu OGITA, Sachiyo SUGIMOTO, and Ippei ASAHI

Shikoku Research Institute, 2109-8 Yashima Nishi Machi, Takamatsu, Kagawa 761-0192

Abstract: A new non-contact method to measure gas concentration at a specific point in a three-dimensional space was developed based on laser Raman spectroscopy. The laser wavelength is 355nm and the PRF is around 50 kHz. This method can be applied to measure gas concentration fluctuation in a gas jet flow by high special resolution. The results of an experiment in the laboratory showed that it can detect 500 ppm CO₂ gas. Another experiment showed that it can measure gas concentration distribution in a gas jet flow with high accuracy and the result gave good agreement with the value obtained by theoretical calculation. It could also be applied to detect high frequency component of gas concentration fluctuation in a gas jet flow, but the applicability is now under consideration and further study is needed.

Key Words: Laser, Raman, Non-contact, Gas Flow, High Frequency Measurement

1. はじめに

三次元空間内における特定の地点のガス濃度を計測する場合、現在の主流手法は、計測点に設置したプローブでガスを吸引し、FID等の検出器によって計測する手法であるが、吸引式のため計測点が不明瞭となること、プローブ自体がガスの流れに影響を及ぼしてしまうといった問題がある。また、既存技術によるガス濃度計測では数百 Hz 程度までの計測が限界であり、現状ではそれを超えるガス濃度変動の高周波成分を計測することは極めて困難である。そのため、主に研究開発の現場から、プローブ式に代わる新たなガス濃度計測手法が求められている。

上記のような背景を踏まえ、本報告では、大気中に設置したノズルから放出されるガス噴流の濃度分布および濃度変動を、高い空間分解能を以て計測することを目的として、レーザラマン分光法に基づくガス濃度非接触計測技術の開発を行った。その詳細およびガス計測試験の結果について報告する。

2. 装置構成

2.1 装置構成

計測装置は、光源レーザと検出器が独立したバイスタティックライダ形式を基に、励起レーザ光を水平に発振し、鉛直下方向への散乱光を検出する構成とした。装置構成を Fig.1 に示す。受光光学系に焦点をもたせた光学配置とし、観測領域を絞ることにより、ガス濃度計測における高い空間分解能を確保した。集光レンズには軽量化のためフレネルレンズを使用し、検出器類とともに光学レールに取り付け、アライメントを保ったまま計測装置全体を光学ステージで移動させることにより、計測点を三次元的に移動できる構成とした。レーザ波長は 355nm、パルス幅 15nm、パルスエネルギー 50μJ (@80kHz) である。高周波成分の計測への適用を視野に、高いパルスエネルギーで高繰り返し発振可能なレーザ (Spectra Physics 社製 Explorer One HP) を使用した。

2.2 検出器と受光光学系

検出器には光電子増倍管 (浜松ホトニクス社製 R12829) を使用した。2枚のフレネルレンズによって集光された散乱光は、凹レンズによって平行光となった後、ノッチフィルタによるレーザ波長のカット、バンドパスフィルタによる波長選択を経て凸レンズで集光され、光電子増倍管の光電面に入射する。光電変換された電気信号はデジタルオシロスコープ (Tektronix 社製 DPO70404C) で検出した。データの取得に当たっては、大量の波形を連続的に高速で取り込む必要があるため、オシロスコープのセグメントメモリ機能により記録した後、PC 上で処理した。

本報告では、CO₂ ガスを計測対象としたが、大気中での計測では、CO₂ のラマン散乱光と、近傍に生じる酸素のラマンスペクトル (375.8nm) を分離して計測する必要があるため、カスタム仕様のバンドパスフィルタ (CW373.5nm, FWHM1.48nm) を使用した。

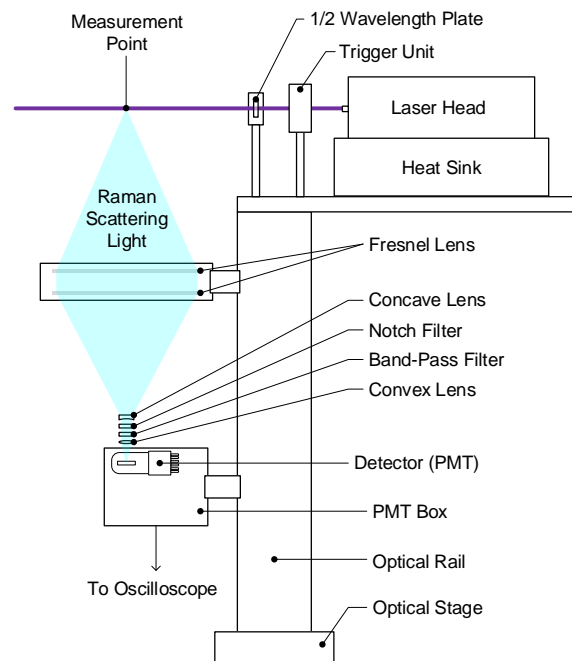


Fig.1. System Configuration.

3. ガス計測試験

3.1 基礎試験 (ガスセル)

既知濃度の CO₂ ガス(N₂ ベース)を封入したガスセルを使用し、ラボ内で基礎試験を行った。結果を Fig.2 に示す。CO₂ ガス 500ppm の検出が可能であり、ガス濃度と信号強度の間に線形の相関が成立することを確認した。

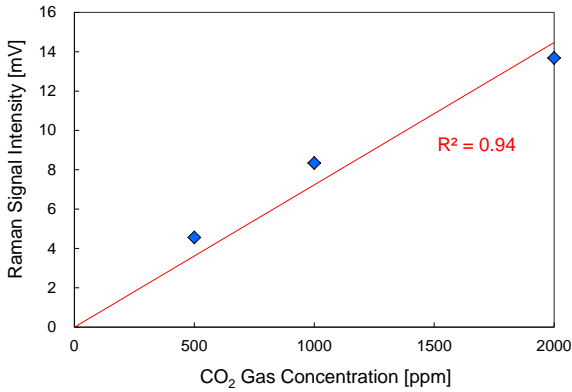


Fig.2. Results of a Gas Measurement Test in the Laboratory using a Gas Cell.

3.2 ガス噴流計測試験

大気中に水平に設置した内径 10mm のノズルから、レーザ光軸と受光光軸双方に直交する方向に向けて CO₂ ガスを放出し、放出口からの水平距離 25mm の位置でのガス濃度を計測した。ガスの流量は 100L/min とした。計測点の配置を Fig.3 に示す。

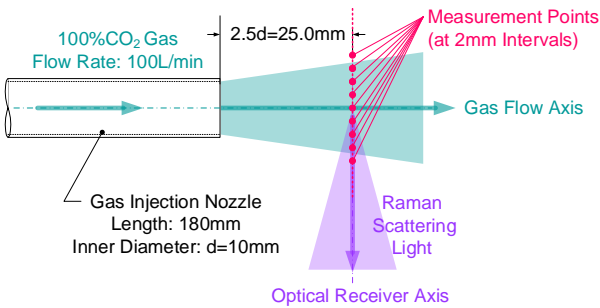


Fig.3. Measurement Points of the Gas Flow Measurement Test.

レーザの発振周波数を 50kHz とし、4 秒間連続して取得したデータの平均値から各計測点の平均ガス濃度を算出した。Fig.4 に、算出した平均ガス濃度分布と CFD 解析によるシミュレーション値との比較を示す。計測値とシミュレーション値はよく一致し、正確な濃度分布計測ができているものと考えられる。また、各点での濃度変動の大きさを評価するため、計測データの RMS 値を計算し、各点の平均濃度で割って規格化したものを Fig.5 に示す。放出口中心軸からの距離が大きくなるに従ってガス濃度の変動が大きくなっている。この傾向は噴流工学における定説と一致しており、各計測点でのガス濃度変動の総量について、正確に計測できていることが示唆される。

また、各点におけるガス濃度変動に対して、周波数解析を行い、濃度変動の高周波成分の検出の可否を検討した。50kHz の計測データを 5~50 デ

ータずつ平均し、1~10kHz の連続データを生成した後、FFT 処理して周波数成分ごとの強度分布を求めた。結果は、定説となっている傾向とは必ずしも一致しない点があり、検討を進めているところである。

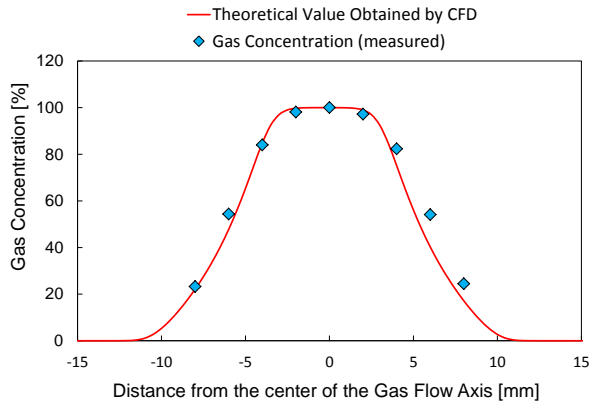


Fig.4. Results of the Average Gas Concentration Measurement Test.

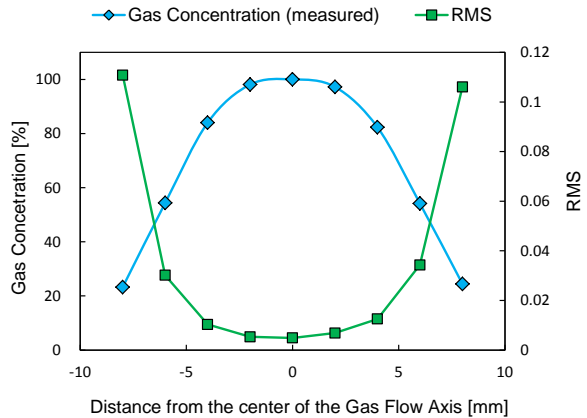


Fig.5. RMS of the Gas Concentration Fluctuation.

4. まとめ

500kHz まで発振可能な高繰り返し紫外パルスレーザを光源とし、90°方向へのラマン散乱光を高空間分解能で計測できるガス濃度計測装置を開発した。データ積算回数の多い定常的な濃度計測においては、計測結果とシミュレーション値はよく一致し、精度の高い計測ができていると考えられる。濃度変動の周波数解析結果(高周波成分の計測)に関しては、定説と異なる点があり、現在考察を進めている。今後は、結果の再解析、再実験等を実施し、本計測手法の有効性、計測結果の妥当性について、さらに検証を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 杉本 幸代 他：ラマン分光法による局所水素ガス濃度非接触計測技術の開発，電気学会論文誌 C, Vol.138, No.9 (2018)
- 2) 社河内 敏彦 「噴流工学」(森北出版，2004)