

ラマン散乱を用いた光学式ガスセンサの基礎検討

Fundamental study of optical gas sensor using Raman scattering

杉本幸代, 二宮英樹, 朝日一平, 八重嶋早枝子 (四国総合研究所)

Sachiyo Sugimoto, Hideki Ninomiya, Ippei Asahi, Saeko Yaeshima (Shikoku Research Institute Inc.)

Abstract

Miniaturization of an optical gas sensor using Raman scattering was examined. Nd:YAG laser light of wavelength 355nm was irradiated through a gas cell, and forward and backward Raman scattering from the gas cell were measured. The signal intensity when forward and backward Raman scattering from H₂ gas were measured simultaneously was about three times of the signal intensity when only backward Raman scattering was measured. A fiber collimator of aperture 5.5 mm was used to collect Raman scattering from CH₄ gas at a distance of 120 mm from the center of the gas cell. The signal intensity representing the sum of forward and backward Raman scattering was proportional to the concentration of CH₄ gas. The measurement lower limit of CH₄ gas was estimated to be 0.3% for a signal-to-noise ratio (S/N) of 2.

1. はじめに

ガスセンサは有毒ガスや可燃性ガスなどの危険ガスを検知し、それらによる事故を防止するためのものとして、必要不可欠である。既に、ガス種に応じた様々な接触式センサが市販化されており、光吸収やラマン効果などを利用した、遠隔検知が可能な非接触式センサも開発されている。しかしながら、これらの非接触式センサは装置の大きさによる制限から、配管などが入り組んだ場所や狭い隙間などにおける設置が困難である。本研究では、ラマン効果を利用したガス濃度計測装置⁽¹⁾⁽²⁾を小型化したときの受光可能なラマン散乱光強度を見積もり、小型の光学的ガスセンサ実現の可能性を検討した。

2. 測定原理

ラマン効果を用いるガスセンサは、ガスにレーザ光を照射したときに発生するラマン散乱光を測定し、ガス種の特長と濃度計測を行う。ラマン散乱波長はレーザ波長 λ に対し分子固有の値となる。従って、狭帯域の干渉フィルターを用いて各分子に対応するラマン散乱光を選択的に受光することでガス種を特定できる。また、ラマン散乱光強度は気体分子密度に比例するため、ラマン散乱光強度を測定することでガス濃度を求められる。

ラマン散乱光は極めて微弱であることから、装置の小型化にはラマン散乱光の発生と受光を効率的に行う必要がある。ラマン散乱断面積 σ は λ^{-4} に比例するため、短波長の光源を用いた方が計測に有利である。ここでは、レーザの取り回しや光学部品入手の容易さを考慮し、光源としてNd:YAGレーザの第3高調波($\lambda=355\text{nm}$)を用いた。また、ラマン散乱光は指向性を有し、レーザ光の進行方向に対し前方と後方に強く発生する。従って、対象ガスを通じたレーザを後方に反射させ再びガスを通わせることにより、前方および後方ラマン散乱光の双方を捉える手法を検討した。

3. 実験と結果

〈3・1〉 前方および後方散乱光の同時受光 半導体レーザ励起Nd:YAGレーザの第3高調波(波長 355nm, 繰返し 20Hz, パルス幅 5ns)を穴あきミラーを通して対象ガス(水素, 酸素, メタン)が充填された光路長 5cmのガスセルに照射した。実験装置構成をFig.1に示す。対象ガスからのラマン散乱光を穴あきミラーのアルミ面で反射させ受光系に導入した。ガスセルへのレーザ照射エネルギーは 100 μJ である。受光素子は光電子増倍管であり、受光素子の前方にはレーザ光を遮光するエッジフィルタ(355nmにおける透過率 $<10^{-6}$, 各ガスのラマン散乱波長における透過率 95%)と干渉フィルタを配置し、各ガスのラマン散乱光を選択的に受光した。

次にガスセルのレーザ光出射側にアルミ凹面ミラーを配置し、レーザ光と前方散乱光を後方に反射させ、後方散乱光と前方散乱光を同時に測定した。ガス密度は充填圧力により調整し、対象ガス濃度をガス密度より大気圧換算して算出した。

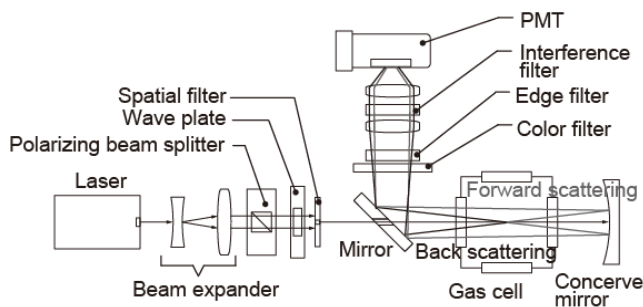


Fig.1 Experimental configuration of measurement of forward and backward Raman scattering

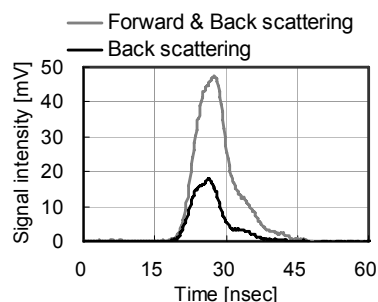


Fig.2 Signal intensity of forward and backward Raman scattering from H_2 gas (concentration is 100%)

実験により得られた水素ガスのラマン散乱光信号を Fig.2 に示す。ガスセル内の水素ガス濃度は 100%である。前方及び後方散乱光を同時に受光した場合、後方散乱光のみを受光した場合と比較して 3 倍程度強い信号が得られた。信号強度より本実験における水素ガス濃度測定下限は、S/N 比を 2 とした場合、0.8%と見積もられる。

〈3・2〉ファイバコリメータによる受光 受光部の小型化のために、ファイバコリメータ (FC) を用いてラマン散乱光を受光素子へ転送した。実験装置構成を Fig.3 に示す。光源として半導体レーザ励起 Nd:YAG レーザ第 3 高調波 (波長 355nm, 繰返し 40Hz, パルス幅 5ns) を使用した。ガスセル位置での照射エネルギーは $100\mu J$ とした。対象ガスが充填されたガスセルにレーザ光を照射し、対象ガスからのラマン散乱光を開口径 5.5mm の FC を取り付けた光ファイバにて集光し光電子増倍管に導入した。FC をガスセルのレーザ光入射側及び出射側に配置し、ガスセルの中心から 120mm の距離を確保しつつレーザ光軸から角度 θ 方向に対するラマン散乱信号強度を測定した。ガス密度はガスセル内の充填圧力により制御した。

まず、ガスセルのレーザ入射側に FC を配置して後方ラマン散乱光散乱強度を測定し、次にレーザ出射窓に前述のエッジフィルタを配置しレーザ光を後方に反射させ、レーザ出射側のラマン散乱光 (前方散乱光と後方散乱光の和) 強度を測定した。出射側において角度 5° の方向から測定したメタンガスのラマン散乱信号を Fig.4 に示す。ガスセル内のメタン濃度とラマン散乱信号の比例関係が確認できた。また、本実験における検出可能なメタンガス濃度測定下限は S/N 比を 2 とした場合、0.3%と見積もられる。

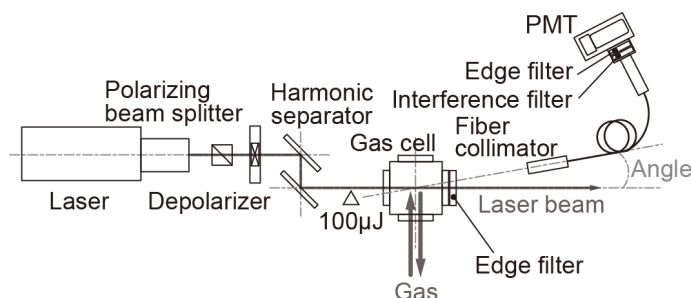


Fig.3 Experimental configuration of measurement of forward and backward Raman scattering using fiber collimator

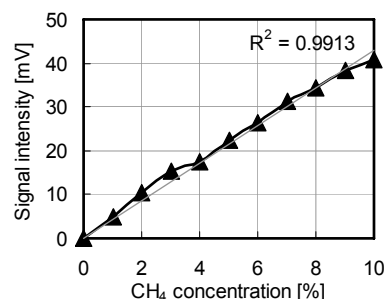


Fig.4 Comparison of CH_4 concentration and Raman scattering signal intensity ($\theta=5^\circ$)

4. まとめと考察

ガスセルに封入した対象ガスにレーザ光を照射し、前方及び後方ラマン散乱光信号を測定した。水素ガスの場合、前方および後方ラマン散乱を同時に受光したときの信号強度は、後方ラマン散乱光のみを捉える場合よりも 3 倍程度強いことが分かった。測定下限は 0.8%と見積もられた。また、メタンガスに関して、前方および後方ラマン散乱を同時に受光したときの信号強度は濃度に比例することを確認し、測定下限は 0.3%と見積もられた。

前方ラマン散乱光をより正確に測定するには、受光素子に入るレーザ光の迷光を抑制することが課題である。今後、レーザ光の影響を抑制するために受光系の最適化を検討する。

参考文献

- (1) 二宮英樹・朝日一平・杉本幸代・島本有造:「ラマン散乱効果を利用した水素ガス濃度遠隔計測技術の開発」, 電気学会論文誌 C, Vol.129, No.7, pp.1181-1185(2009)
- (2) 朝日一平・二宮英樹・杉本幸代:「低出力レーザによる水素ガス濃度遠隔計測」, 電気学会論文誌 C, Vol.130, No.7, pp1145-1150(2010)