

ラマン効果を用いた水素ガスの可視化

Visualization of Hydrogen gas Using Raman Effect

福地哲生（電力中央研究所），二宮英樹，八重嶋早枝子，福田和秀（四国総合研究所）

Tetsuo Fukuchi (Central Research Institute of Electric Power Industry)

Hideki Ninomiya, Saeko Yaeshima, Kazuhide Fukuta (Shikoku Research Institute Inc.)

Hydrogen gas was visualized by imaging of Raman backscattering from the hydrogen gas. Hydrogen gas was leaked into open air at a rate of 15 liter/min, and the spatial region containing the leakage region was irradiated by laser light of wavelength 266 nm. Raman backscattering from hydrogen gas was detected by a high-sensitivity CCD camera with an image intensifier. The image intensifier was gated with a width of 50 ns in order to reduce the effect of background noise. Hydrogen gas could be imaged up to a distance of 8 m, although the signal-to-noise ratio decreased substantially beyond 5 m. Calculations showed that, by applying the same technique using a telescope of diameter 25 cm, hydrogen gas can be detected up to a distance of 30 m, which is sufficient for leakage monitoring in hydrogen fueling stations.

1. 序 論

近い将来における水素エネルギーの普及に備え、水素供給ステーション等の安全対策として漏洩水素ガス検知技術の開発が求められている。水素ガスは無色・透明であり近紫外域から赤外域において吸収をもたないため、大気中ガス成分測定に従来用いられている差分吸収分光法、レーザ誘起蛍光法などは適用できない。

本研究は水素ガスにレーザを照射した時に発生するラマン散乱光を観測して漏洩水素ガスを可視化することを目的とする。これまでに Nd:YAG レーザ（第4高調波、波長 266nm、出力 3mJ）を用いて、屋内実験において濃度 1% の水素ガスを可視化できること、屋外実験において流量 15liter/min で大気解放した水素ガスを 1.2m の離隔距離から可視化できることを示した[1,2]。しかし、引火性の強い水素ガスの検知には 8m 程度の離隔距離が必要であるため、ここでは離隔距離向上についての検討を行った。また、屋外においては太陽光や照明光などの背景光のほか、レーザの反射光、レーザ照射によって発生する蛍光などの外乱光の影響を抑制する方策が必要である。

2. 実験装置

水素ガスにレーザ光を照射し、後方ラマン散乱光を可視化する装置を製作した。後方ラマン散乱光は紫外カメラレンズによって集光し、ゲート付きイメージンシファイアを備えた CCD カメラ (ICCD カメラ) によって画像化する。ICCD カメラの前方には中心波長 299.1nm、半値全幅 1.5nm の干渉フィルタが設置されており、水素ガスからのラマン散乱光を選択的に透過させるとともにレーザ波長における迷光、大気中窒素・酸素によるラマン散乱光などを遮断している。光源には Nd:YAG レーザ（第4高調波、波長 266nm、出力 3mJ、繰り返し 20Hz）を使用している。イメージンシファイアのゲート幅の最小値は 50ns である。

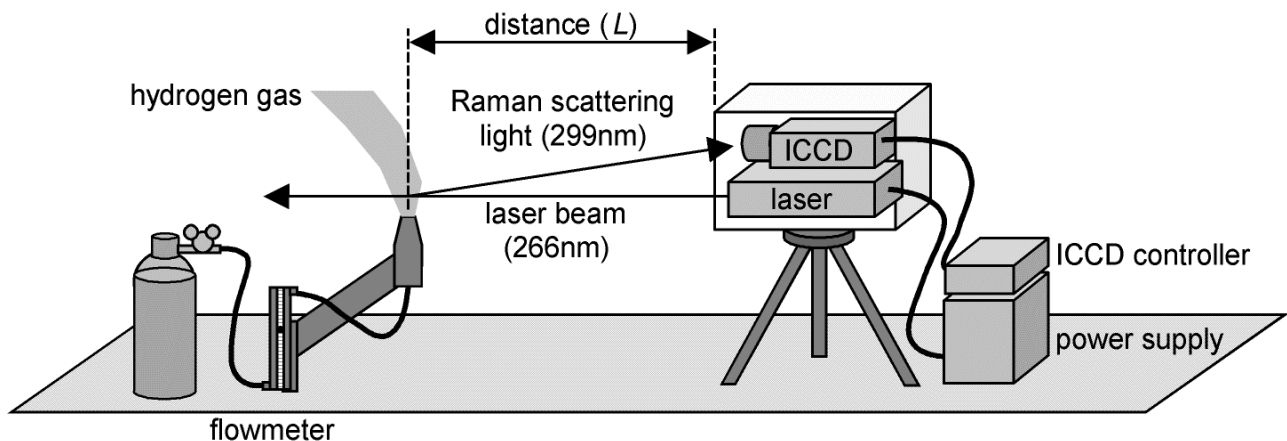


Fig. 1 Experimental setup for visualizing hydrogen gas

3. 実験結果

水素ガスを流量 15liter/min において大気放出し、可視化実験を行った。実験配置図を Fig. 1 に示す。ICCD カメラのゲート幅は 50ns、レーザのパルスエネルギーは 2.0mJ とし、繰り返し 20Hz において 500 回の積算で水素ガスからの後方ラマン散乱光の画像を得た。水素ガスの放出点をレーザおよび受光系から $L=5\text{m}$ 離れた場合に得られた後方ラマン散乱光の画像の一例を Fig. 2 に示す。また、放出点までの距離 L を変えた場合の後方ラマン散乱光および背景光のピクセル毎の強度の最大値を Fig. 3 に示す。ここでは画像の映り具合を最適化するために測定距離毎に紫外レンズの焦点距離および ICCD カメラのゲート開始時間（レーザ照射に対する時間遅延）を調整した。Fig. 3 から、 $L<5\text{m}$ の場合は水素ガスからの後方ラマン散乱信号（Signal）と背景光などによる外乱（Noise）の差が十分にあるため、水素ガスを可視化できていることが分かる。しかし、 $L>5\text{m}$ の場合は Signal と Noise の差が急激に減少し、水素ガスを可視化することが難しくなる。

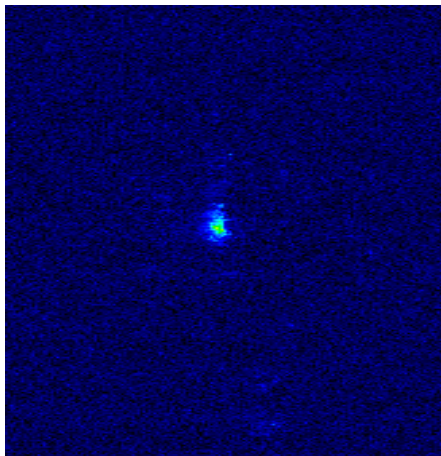


Fig. 2. Image of Raman scattering light, obtained at distance $L = 5\text{m}$

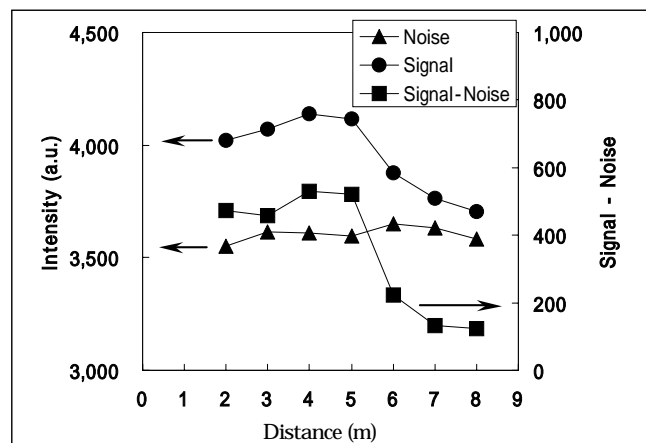


Fig. 3. Intensity of Raman scattering light and noise as a function of distance L

4. 測定距離向上に関する考察

パルスエネルギー P_0 のレーザ光を水素ガスに照射した場合、受光されるエネルギーは $P = P_0 k S (\Delta L / L^2) \beta \exp[-(\alpha_0 + \alpha_r)L]$ で与えられる。ここで k は受光系の光学的効率、 S は受光面積、 ΔL は空間分解能、 L は測定距離、 β は後方ラマン散乱係数、 α_0, α_r はそれぞれレーザ波長とラマン散乱波長における消散係数である。ここで、装置に依存する因子は $h = P_0 S k$ である。上記の実験結果では $P_0 = 2\text{mJ}$ 、受光径 $d = 2.5\text{cm}$ で $L = 5\text{m}$ において可視化が実現できたが、水素供給ステーションの水素ガス漏洩監視への適用においては $L = 8\text{m}$ 以上、最大 $L = 30\text{m}$ 程度の測定距離が必要である。後方ラマン散乱光の強度が $1/L^2$ で減衰すると仮定すると $L = 5\text{m}$ の場合に比べて $L = 30\text{m}$ において後方ラマン散乱光強度は $1/36$ 倍となる。また、照射レーザ光のビーム広がり角は 1mrad 程度であるため、 $L = 30\text{m}$ において単位面積に照射されるレーザエネルギーは $L = 5\text{m}$ の場合の $1/36$ となる。よって、 $L = 5\text{m}$ の場合と同じ信号強度を $L = 30\text{m}$ において得るには h を $36^2 = 1.3 \times 10^3$ 倍にする必要がある。光学的効率 k を一定とした場合、受光径 $d = 2.5\text{cm}$ のレンズの代わりに受光径 $d = 25\text{cm}$ の望遠鏡を用いることで S を 100 倍とし、レーザエネルギーを 2mJ から 30mJ に向上することで P_0 を 15 倍とし、 h を 1500 倍にすることによりこの条件は満たされると考えられる。

5. 結論

水素ガスからの後方ラマン散乱光を画像化し、水素ガスを可視化する手法を開発した。実用化には、ラマン散乱光の検出を確実にするための外乱光の低減などの課題があり、誤動作の無い検出技術の開発を図る計画である。なお、本研究は（株）四国総合研究所が「地域新規産業創造技術開発費補助事業」（経済産業省）として平成 16 年度から実施している。

参考文献

- [1] 武智啓：燃料電池 Vol.4, pp.57-61 (2004)
- [2] 三木啓史, 守家 輔, 市川幸司, 二宮英樹, 願化俊彦, 菅 守叶, 武智 啓：第 24 回 HESS 大会予稿集 (2004)