

ラマン効果による管内気体挙動の可視化と空間濃度分布計測

朝日 一平¹, 杉本 幸代¹, 星野 礼香¹, 花房 敏行¹, 三木 啓史¹
上地 優², 寺田 敦彦², 日野 竜太郎²

¹株式会社四国総合研究所 (〒761-0192 香川県高松市屋島西町 2109 番地 8)

²国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 (〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002 番地)

Visualization and concentration distribution measurement of gas behavior in pipeline by Raman effect

Ippei ASAHI¹, Sachiyo SUGIMOTO¹, Ayako HOSHINO¹, Toshiyuki HANAFUSA¹, Hirofumi MIKI¹, Yu KAMIJI², Atsuhiko TERADA² and Ryutarō HINO²

¹Shikoku Research Institute Inc., 2109-8 Yashima-nishimachi, Takamatsu-shi, Kagawa 761-0192

²Japan Atomic Energy Agency (JAEA), 4002 Narita-cho, Oarai, Higashi-Ibaraki, Ibaraki 311-1393

Abstract: The diffusion behavior of hydrogen was observed by irradiation by laser beam of wavelength 355nm and imaging of Raman scattering from hydrogen gas using a gated ICCD camera. The concentration of hydrogen gas was obtained from the radiant intensity of each pixel of Raman scattering image. In this study, the behavior of hydrogen displacement in gas pipeline ware analyzed.

Key Words: Raman effect, Laser, Gas behavior, Visualization, Concentration distribution

1. 序 論

水素エネルギー利用に向けた取組みは、東京オリンピック・パラリンピックの開催決定に伴い、より現実的な課題に関する調査や研究開発を中心として加速度的に推進されている。その中で、一般家庭等に向けた水素配管供給を想定し、これまで都市ガス供給に用いられてきた従来の運用方法の適用によるリスクを把握するために、配管内における水素挙動の解明が必要とされている。流体挙動の解明は、多くの場合、実験による物理量の計測と CFD シミュレーションの両者により実現される。物理量として濃度に注目すると、実験はガスセンサによる局所的な濃度計測に依り、得られた値をもってシミュレーションの再現性が評価される。しかし、ガスセンサの配置は必然的に流体の挙動に影響を及ぼし、その上で、空間的に分散した計測点から得られたデータ群とシミュレーション結果を比較・評価することは容易ではない。一方、レーザによる非接触計測技術を適用することにより、流体の挙動に全く干渉することなく、空間濃度分布を得ることができる。

著者らはこれまでに、ラマン効果を用いて気体挙動の可視化及び空間濃度分布計測が可能であることを示した¹⁾。同手法を応用し、石英を用いた模擬配管と、その内部にレーザ光を照射し、石英管の外部からラマン散乱光を撮像する実験装置を開発し、配管内における水素置換挙動の可視化及び空間濃度分布計測を行った。本報告では、

その装置構成及び実験結果について述べる。

2. 実験装置構成

本実験は、配管内における大気成分からの窒素パージや窒素状態からの水素置換挙動を観測する必要があるため、酸素、窒素、水素をそれぞれ分離して検出する必要がある。また、構造物内部の挙動を観測するため、レーザ光の反射等の外乱光からこれらの挙動の指標となる光が十分に分離されなければならない。したがって、レーザの照射に伴い気体分子から生じるラマン散乱光を捉える手法の適用が有効である。Fig.1 に実験装置構成を示す。

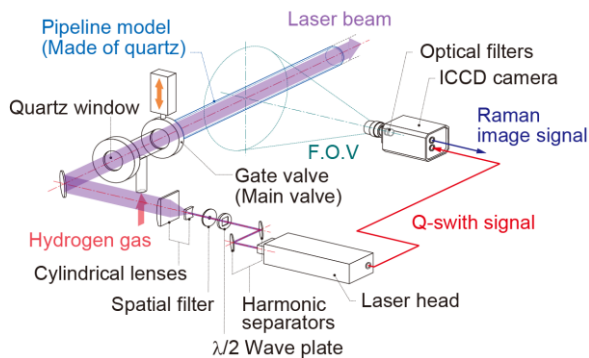


Fig.1 Experimental configuration of Raman imaging system.

光源に、フラッシュランプ励起 Nd:YAG レーザ (波長 355nm, パルスエネルギー 90mJ, パルス幅 7ns, 発振周波数 30Hz)を用いた。酸素, 窒素, 水素のラマン散乱波長はそれぞれ 375nm, 386nm, 416nm となる²⁾。パルスレーザー光は各種光学素子により、基本波及び2倍波成分の除去と偏波面の調整を行い、高さ 21mm 幅 6mm のシート状に整形した後、模擬配管端部に配置した石英窓を介して配管内部に導入した。模擬配管は、主に鋼管部品により構成されるガス導入部と観測部となる石英管及び排気部により構成される。ガス導入部と石英管の間に高速開閉駆動が可能なゲートバルブ (VAT 社製 DN40(1_{1/2}")CF-F, 以下メインバルブ)を配置した。水素置換挙動を観測する場合を例にとると、メインバルブを介し上流側へ水素, 下流側へ窒素を充填し、メインバルブを開放することで石英管内に所定の条件下で水素が供給される。メインバルブの開放に伴い、レーザー光は導入部から石英管内へ放射される。石英管内の気体分子により生じたラマン散乱光の輝度分布を、波長選択フィルタを内蔵した ICCD カメラ (ゲート幅 10ns)により配管外部から撮像した。

ラマン散乱光は極めて微弱であるため、レーザー光により石英管等から生じる僅かな蛍光でも強力な外乱光となる。本装置では、ICCD カメラのゲートのタイミングをラマン散乱の発生時間と一致させることによって蛍光の影響を除去した。本装置は、気体の 10ns 間における瞬間挙動を毎秒 30 回取得する。しかし、1 ショットの画像におけるラマン散乱光の輝度分布は比較的弱く、極低濃度域において十分な S/N が得られない。この場合、一般的には一定量の画像データを積算し、輝度のコントラストを向上させる方法がとられるが、取得された画像は瞬間挙動とは異なる結果となる。本装置では、メインバルブ開放の信号をトリガとして、ガス導入弁の開放、レーザー光の放射、ICCD カメラの撮像開始のそれぞれのタイミングを ms 以下の精度で同期制御する時限機能を付加した。これらにより再現性の高い実験装置を構築し、同一条件で取得した複数の可視化画像を重ね合わせることで、検出限界を数千 ppm オーダとする瞬間挙動の可視化を実現した。

3. 実験結果

Fig.2 は水平方向に配置した直管内において、メインバルブの上流側に水素, 下流側に窒素をいづれも大気圧で充填し、バルブの開放により両ガスを接続した際の境界層における水素拡散挙動を可視化した事例である。画像の彩度は水素濃度を示しており、本画像から窒素分子と十分に分離して可視化されていることがわかる。窒素層への水素の進行は、初期に顕著であり、また配管の上方が先行している様子が確認できる。これらの挙

動は水素と窒素の比重差や分子拡散による特徴的な挙動であり、これらの状況が本装置を用いた可視化によってより直接的に確認することができることがわかる。

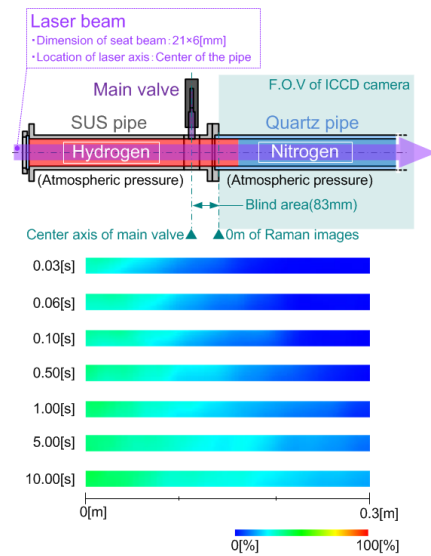


Fig.2 Visualization example of the hydrogen diffusion behavior in the gas pipeline.

4. 結論

気体分子から生じるラマン散乱光を画像として捉える手法を用いて、配管を模擬した石英製の構造体内部における気体挙動を可視化する装置を開発し、得られた可視化画像から、管内ガス濃度空間分布の継時変化が計測できることを示した。発表では、濃度分布計測手法や実験結果事例及び、実験結果を用いた CFD シミュレーションの再現性評価事例等について報告する。

本手法は、開放空間におけるガス噴流等への適用はもとより、他の形状の構造体や様々な分子種への応用が可能であるため、今後、より高度な流体挙動可視化技術への展開を進めていく予定である。

謝辞

本研究の一部は、平成 26, 27 年度経済産業省委託事業「水素ネットワーク構築導管保安技術調査」の一環として行われたものであり、関係者各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 朝日一平 他: 電気学会論文誌 C, Vol.131, No.7, pp.1309-1314 (2011)
- 2) R. M. Measures : Laser Remote Sensing, John Wiley and Sons, New York, p.108 (1984)