

ラマンイメージングによる埋設導管の損傷に伴う水素拡散挙動の可視化

○朝日 一平¹, 杉本 幸代¹, 星野 礼香¹, 市川 祐嗣¹, 荻田 将一¹, 三木 啓史¹
寺田 敦彦², 上地 優², 日野 竜太郎²

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

² 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 of hydrogen diffusion behavior due to damage of buried pipe by Raman imaging

Ippei ASAH¹, Sachiyo SUGIMOTO¹, Ayako HOSHINO¹, Yuji ICHIKAWA¹, Masakazu OGITA¹
Hirofumi MIKI¹, Yu KAMIJI², Atsuhiko TERADA² and Ryutaro HINO²

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

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

Abstract: Experimental device which is simulated the hydrogen gas leak into the ground and into the atmosphere due to damage of the buried pipe was fabricated. Hydrogen gas that passed through the bead layer and leaked into the atmosphere was observed by Raman imaging and spatial gas distribution with respect to its concentration was estimated from the Raman scattering image. From the obtained results, the fundamental characteristics of hydrogen gas diffusion behavior were clarified. In addition, these measurement results were compared with the results of the simulation analysis. It was inspected that the spatial behavior of hydrogen gas could be visualized continually in each condition.

Key Words: Raman effect, Laser, Hydrogen gas, Visualization, Concentration distribution

1. 序 論

従来、水素エネルギー利用に向けた取組みは 30 年～50 年先の普及を見据えた緩やかな進展であったが、2020 年東京オリンピック・パラリンピックの開催決定に伴い、同大会選手村地区のエネルギー整備計画として、東京都がパイプラインの敷設による水素供給を計画するなど、情勢は一気に加速化している。これに伴い、水素エネルギー利用のためのより現実的な課題に関する調査、解決方法の創出が喫緊に求められている。

その中で、一般家庭等に向けた水素ガスのパイプライン供給において、災害等による埋設導管の損傷に伴う、地中及び大気中への水素ガス漏洩が懸念されている。この場合、素早く導管の損傷箇所を特定して水素漏洩を停止させると共に、導管の機能回復を図る措置を講じる必要があり、その前提として、地中及び大気中における水素拡散挙動の解明が重要な課題となっている。

著者らはこれまでに、ラマン散乱光を画像として捉える手法により、水素等の各種気体挙動の可視化及び空間濃度分布計測技術の開発を進めてきた¹⁾。本稿では、レーザを用いたラマンイメージングシステムと、埋設導管の損傷による水素ガス漏洩及び地中・大気中を模擬した実験装置を構築し、漏洩水素ガスの基本的な挙動を可視化すると共に、CFD シミュレーションによる再現性評価を行ったので報告する。

2. 実験装置構成

本実験では、水素分子を特定して可視化する必要があるため、各種光学的非接触計測手法の中でも、レーザラマン分光法の適用が最も有効である。実験装置構成を Fig.1 に示す。

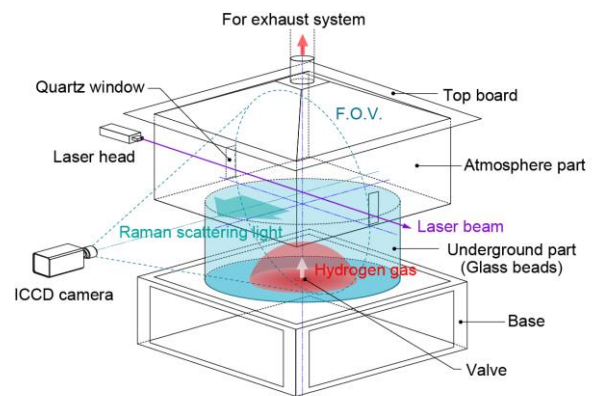


Fig.1 Experimental setup of visualization of hydrogen diffusion behavior.

本装置は、地中及び大気中模擬槽とラマンイメージングシステムにより構成される。地中及び大気中模擬槽は、ベース、地中模擬槽、大気中模擬槽、天板から構成される。ベース中央に埋設導管の損傷を模擬したピンホール等の放出口から地中模擬槽に水素ガスを供給するバルブを設置した。地中模擬槽は直径約 1m、高さ約 0.5m の円筒形であり、土壌を模擬する試料としてガラスビーズ(中心粒径 512 μ m など)を用いた。地中模擬槽上方に約 1.2 \times 1.2m \times 0.38m の大気中模擬槽を設置し、その側面に地中模擬槽と大気中模擬槽の境界付近にレーザ光を照射するための合成石英製光学窓を配置した。地中模擬槽は汎用のアクリル材、大気中模擬槽は容器外からのラマン散乱光の観測を可能とする紫外線透過アクリル材を用いて製作した。

ラマンイメージングシステムは、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。本実験では安全性を確保するため、大気中を窒素 100%の無酸素状態で模擬するため、水素と窒素の分離が必要である。同レーザにより励起した場合、両者のラマン散乱波長は 416nm, 386nm となり、干渉フィルタ等によって十分に分離できる。レーザ光は直径 6mm のビーム状に整形し、石英窓を介して大気中模擬槽内に放射した。バルブからの水素の放出に伴い、地中模擬槽を透過し、大気中模擬槽へと染み出した水素ガスは、レーザの照射によりラマン散乱を生じる。レーザ照射領域内における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)により撮像した。ここで、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。本装置では、ゲート幅の時間における気体の瞬間挙動を毎秒 30 回取得する。一方、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い。ここでは、パルス 30 ショットの取得画像を積算(サンプルレートを 1S/s)することで、ラマンイメージのコントラストを向上させた。この場合の水素検出限界は S/N 比を 2 として 0.4%である。なお、地中模擬槽における水素濃度分布は、窒素雰囲気でも動作する気体熱伝導式ガスセンサを多点配置することにより計測した。

3. 実験結果及びシミュレーションの再現性評価

Fig.2 は中心粒径 $\phi 1200\mu\text{m}$ のガラスビーズを地中模擬槽へ充填し、 $\phi 1.0\text{mm}$ のピンホールから、2.5kPa(大気開放状態における供給圧)で水素ガスを放出した場合における、大気中境界から上方 20mm の位置の水素ガス可視化事例である(a)。同図の輝度分布から水素ガス濃度空間分布の経時変化が得られる(b)。これらにより、放出口直上が先行して濃度が上昇し、正規分布状の形状を維持しつつ、徐々に領域が拡大する挙動が確認できる。

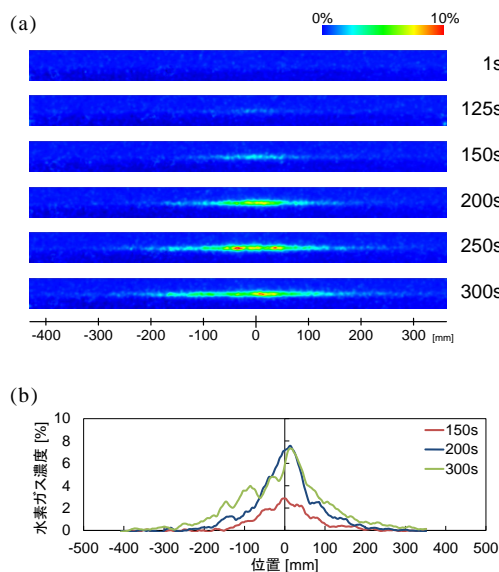


Fig.2 Visualization of hydrogen diffusion behavior in the atmosphere. ((a) Raman image, (b) Concentration distribution of hydrogen gas)

このように、従来のセンサの多点配置により濃度分布を計測する手法に対し、本手法では極めて高い空間分解能が実現でき、気体拡散挙動に物理的干渉を与えないため、本来の現象を観測することができる。

Fig.3 において、Fig.2(a)における中央 $5 \times 5\text{pixel}$ の水素濃度の平均値の時間変化を CFD シミュレーションによる計算結果と比較した。

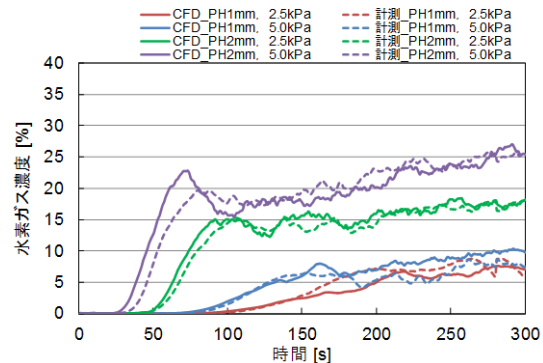


Fig.3 Comparison of experimental results and simulation results.

解析には ANSYS 社の汎用流体解析コード FLUENT を用いた。透気係数及び有効拡散係数は、実験において得られたデータを反映し、シミュレーションを行った。パラメータは、流量、圧力、放出口径、土壌試料粒径であり、それぞれ実験データを反映した。グラフは、放出条件を変更した場合における実験及びシミュレーション結果の比較を挙げており、破線が実験結果、実線がシミュレーション結果を示している。Fig.3 により、定性的、定量的な観点から極めて良好な再現性が得られることが確認できた。

4. 結論

埋設導管の損傷に伴う地中及び大気中への水素漏洩を模擬する実験装置を製作し、ビーズ層を透過して大気中へと漏洩した水素ガスを、ラマンイメージングにより計測した。得られた結果から、水素ガス拡散挙動の基本的な特性が明らかとなり、併せて CFD 解析による良好な再現性を検証することができた。これにより、流体挙動の観測において、非接触且つ高い空間分解能で特定の分子を計測することができる本手法の有用性を示した。

謝 辞

本研究の一部は、平成 28 年度経済産業省委託事業「水素導管供給システムの安全性評価事業」の一環として行われたものである。

参考文献

- 1) IEEJ-C, Vol.131, No.7, pp.1309-1314 (2011)