

水素火炎・水素ガス可視化技術の開発

三木啓史・守家 輔・市川幸司・二宮英樹・関 丈夫・願化敏彦・菅 守叶・武智 啓
株式会社四国総合研究所

761-0192 香川県高松市屋島西町 2109-8

Development of Hydrogen flame/gas Visualization System

Hirofumi MIKI, Tashuku MORIYA, Koji ICHIKAWA, Hideki NINOMIYA, Takeo SEKI,
Toshihiko GANKE, Moriyashu KAN and Akira TAKECHI
Shikoku Research Institute Inc.

2109-8 Yashima-nishimachi Takamatsu, Kagawa 761-0192

In order to keep the safe operation of a hydrogen infrastructure, we have developed the method that pinpoints the exact location of hydrogen flame and gas. This method creates a visible imaging of a hydrogen flame and gas combining the technologies of an amplification of ultraviolet light and its conversion into visible light, utilization of laser and image processing.

Keyword : Visualization, Hydrogen flame, Hydrogen gas, Raman scattering,

1. 緒 言

地球環境問題への対応として、世界各国で政府主導による水素エネルギーの導入・普及施策が推進されている。特に、水素エネルギー利用技術として短期的に市場導入の期待される燃料電池自動車に重点が置かれ、水素供給ステーションの整備が急がれている。このため、水素エネルギーの普及にとって水素インフラの安全な運用・管理技術が極めて重要である。

当社は、平成 13 年度末の運開時から今日に至るまで、(財)エンジニアリング振興協会殿と太陽日酸(株)殿のご指導の下、水電解型水素供給ステーションの運用・管理業務を担当した[1]。我々は、この運用・管理業務を通じて水素着火時や水素ガス漏洩時の安全・確実な現地サイトの確認方法の必要性を痛感し、この度、水素火炎ならびに水素ガスを可視化する技術を開発した。

2. 水素火炎の可視化技術

2.1 原理

2005 年 4 月 25 日受理

当該技術は、水素ガスに着火した場合に、遠方から安全・確実に出火場所や火炎位置を特定・把握することを目的としており、下記に示す 3 つの技術を組み合わせている[2]。

(1)水素火炎の可視画像化技術

光学バンドパスフィルターを用いて水素火炎の発光スペクトルの中からスペクトル強度の大きい紫外光のみを取り出し、これを光電子増倍管で増幅して CCD カメラで電気信号に変換することにより太陽光線下では肉眼には殆ど透明にしか見えない水素火炎を紫外画像化する。

(2)火炎周囲の高温領域の可視画像化技術

水素ガスの燃焼によって生じる火炎周囲の高温蒸気、ならびに火炎によって熱せられた配管や壁などから発せられる黒体放射の赤外光を赤外光対応のサーモカメラで選別・集光することにより、火炎周囲の高温領域を赤外画像(熱画像)として捉える。

(3)複数画像の重ね合わせ技術

可視光対応の CCD カメラで撮影した背景画像と、上述の紫外/赤外画像の 3 枚の画像をパソコン上で画像処理し、モニター上に重ね合わせて表示させる。画像処理プログラムは、紫外画像と赤外画像の重な

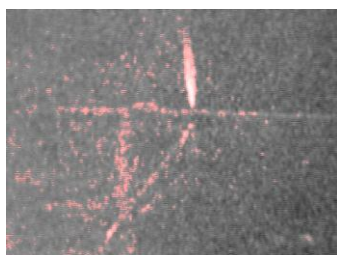
り部分の面積が閾値以上となった場合のみを水素火炎と判定しており、従来技術のように誤動作する可能性は極めて低い。このため、水素火炎の検出信号をトリガーとした警報発報や消防機関への通報、散水・閉弁などの一次対応システム構築が可能である。

2.2 機能検証

プロトタイプを設計・製作し、フィールドにて機能検証を行った。その結果を図1に示す。太陽光線



(a)背景画像



(b)紫外画像



(c)赤外画像



(d)水素火炎の可視画像

図1 水素火炎可視化実験の結果例

の影響を勘案して、水素火炎の発光スペクトルの中から太陽光線の影響の少ない波長域における特定波長の紫外光のみを選別しているのにも関わらず、図1(b)に示すように、天候によっては太陽光線中の紫外光と水素火炎からの紫外光の区別が難しい場合がある。このため、この紫外画像と図1(c)に示す赤外画像の重なり部分を以て水素火炎と判断する画像処理ロジックを採用している。

図1は、水素火炎から撮像装置までの距離が約1.5mの結果であるが、その距離を10m刻みに30mまで離れた場合についても実験した。その結果、離隔距離の増加と共にモニター上の水素火炎の画素数が急激に減少するが、離隔距離30mの場合でも十分に火炎検出が可能であることを確認した。

3. 水素ガスの可視化技術

3.1 原理

物質に光を照射すると、入射光と波長のズレた光が散乱する。表1に示すように、そのズレの大きさは物質固有であり、散乱光（ラマン散乱光）の波長は物質固有値だけ入射光からシフトする[3]。当社の開発した水素ガス可視化技術は、このラマン散乱光を可視画像化する技術である[4]。

表1 ラマン散乱波長

分子	ラマンシフト(cm^{-1})	レーザー波長355nmの場合のラマン散乱波長(nm)	レーザー波長266nmの場合のラマン散乱波長(nm)
CO ₂	1388	373.4	276.2
O ₂	1556	375.8	277.5
CO	2145	384.3	282.1
N ₂	2331	387.0	283.6
H ₂ S	2611	391.3	285.9
CH ₄	2914	396.0	288.4
NH ₃	3334	402.7	291.9
H ₂ O	3652	407.9	294.6
H ₂	4160	416.5	299.1

【出典元：(財)電中研】

図2に開発したシステムの概念を示す。当該システムは、監視対象空間に照射したレーザー光に起因する水素ガスからのラマン散乱光を紫外光対応の高感度 CCD カメラで撮像して水素ガスを画像化し、

別の可視光対応 CCD カメラで撮像した背景画像と重ね合わせるにより、水素ガスの位置を特定するシステムである。表 1 に示すように、ラマン散乱波長は照射レーザーの波長と異なるため、高感度 CCD カメラにラマン散乱光波長に透過中心を有する光学バンドパスフィルターを用いることにより、照射レーザー光を遮断している。更に、太陽光や照射レーザー光などの外乱の影響を低減するため、今回のシステムでは、電気信号によって ON/OFF 動作を行ってレーザーをパルス状に照射し、この照射レーザーパルスに同期させて水素ガスからのラマン散乱光を検出している。

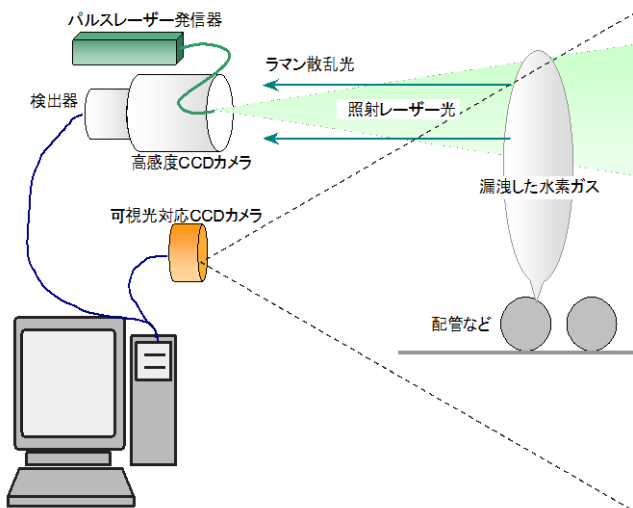


図 2 水素ガス可視化システムの概念

3.2 実験的裏付け

適用技術の妥当性を検証・評価するため、水素ガスと窒素ガスの混合ガスが充満した密閉容器の小窓に向けて Nd:YAG レーザーの第 4 高調波 (波長:266nm) を照射する実験を行った。

図 3 は、水素ガスと窒素ガスを 50vol% : 50vol% の比率で混合したガスに 2.8mJ/P の出力強度を有するレーザーを照射した場合のラマン散乱波長の測定結果で、先の表 1 に示される水素ガスと窒素ガスのラマン散乱波長が得られた。

図 4 には、照射レーザーの出力と水素ガスのラマン散乱信号強度の関係を示す。レーザー出力の増加と共に飽和傾向が観察されるものの、概ね直線関係が認められる。

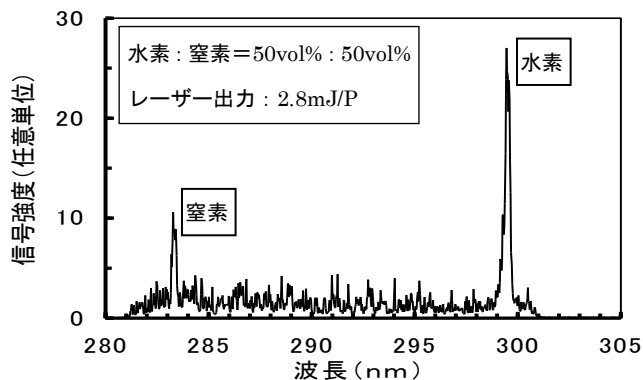


図 3 混合ガスのラマン散乱波長

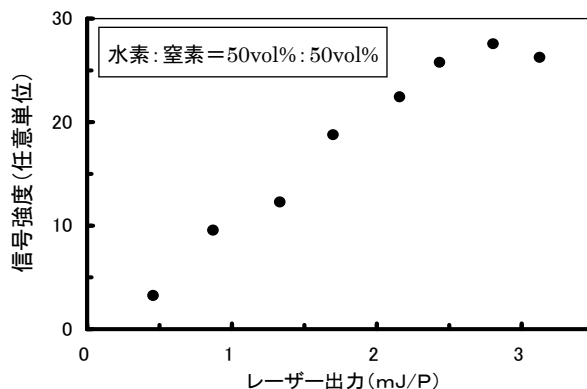


図 4 レーザー出力とラマン散乱信号強度

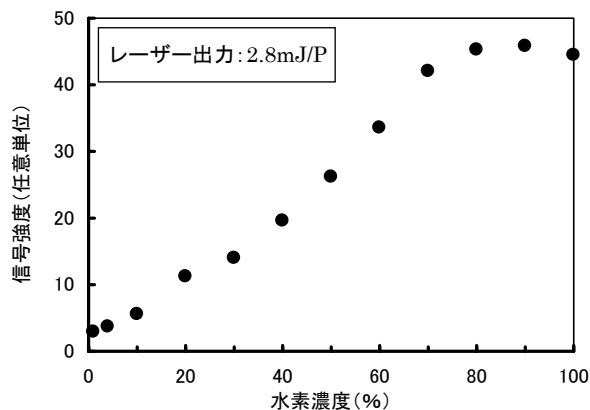


図 5 水素ガス濃度とラマン散乱信号強度

図 5 には、水素ガス濃度とラマン散乱強度信号の関係を示す。水素濃度は 1%, 4%, 10%, これ以降は 10%刻みで 100%まで変化させた。従って、図中のデータは、最左端より水素濃度が 1%, 4%, 10%, であり、最右端が水素濃度 100%の結果である。この結果から、当該実験システムが水素ガス検知器の機能として必要な「爆発下限界濃

度 (=4%) の 1/4 以下で動作する、を満足する装置であると言える。更に、図 4 と同様にほぼ直線性が認められることから、計測したラマン散乱信号強度から逆に漏洩水素ガス濃度の推定が可能である。しかし、レーザー光の放射安全上の理由により、照射可能なレーザー強度に制約があることに加えて、一般にラマン散乱信号強度は弱く、特に低水素濃度時の信号は非常に微弱であることから、実用に際してはイメージインテンシファイヤーにて信号強度を数万倍に増幅させるなどの対応が必要である。

3.3 機能検証

実験的な裏付けを得ることによって適用技術の妥当性と有効性を確認することができたため、機能モデルを設計・試作し、フィールドにて機能検証試験を行った。試作した機能モデルは、レーザーヘッドを回転台上に据え付けてレーザービームを水平方向に走査させ、次に垂直方向に一段ずらせて引き続き水平逆方向に走査させる制御を行わせている。このため、30m 離れた対象空間の 1m 四方の領域を走査し終えるのに約 80 秒(水平走査 20 秒/回×4 回)を要す。

機能検証試験では、レーザーヘッドから 1.2m 離れた位置のバーナーノズルから放出 (約 25L/min) させた水素ガスを機能モデルを用いて撮像・可視画像化させた。

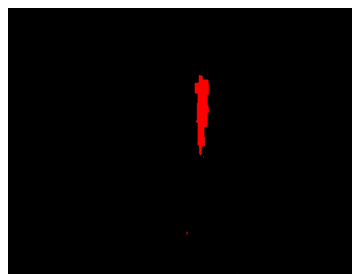
図 6 にその結果を示す。試験には、出力強度が 3.0mJ/P の Nd:YAG レーザーの第 4 高調波 (波長 : 266nm) を用いたが、先に述べたように、フィールドでレーザーを使用するに当たっては、安全上、試験で用いたレーザー出力の 1/10 程度の強度で運用する必要がある。実験室レベルの試験では、0.3mJ/P のレーザー照射にて水素ガス濃度 1%を検知し、画像化することに成功した。

4. 反ストークスラマン散乱

ラマン散乱光を可視画像化する方法では、危険度の低い微弱なレーザーを照射するため、ラマン散乱光信号 (Signal) に対する太陽光などの外乱信号 (Noise) の影響が大きくなる。そこで、レーザーの照射タイミングとラマン散乱光の受光タイミングを同



(a)背景画像



(b)紫外画像



(c)水素ガスの可視画像

図 6 水素ガス可視化実験

期させることに加え、ラマン散乱光信号の取り込みの時間ゲートを短くするほか、光学バンドパスフィルターの透過波長幅を小さくするなどの対策を講じることによりラマン散乱光信号と外乱光信号との比 (=S/N) を高めている。しかし、レーザーを照射してラマン散乱光を受光する場合、照射レーザー光の反射波の他に監視対象空間内の壁材や配管、水・油膜などによる照射レーザー光に起因した蛍光が発生し、水素ガス検知が阻害される。材質によってはこの蛍光スペクトルは水素のラマン信号よりも強いため、抜本的な蛍光対策が必要となる。

一方、対象ガスに対して、励起用のレーザー光とストークス光 (長波長側にシフトする散乱光) に相当するレーザー光を同時に照射すれば、反ストークス光 (短波長側にシフトする散乱光) が増強される現象がある [5]。そこで、この現象を定量的に評価するために図 7 に示す小規模な実験システムを用いて基礎実験を行った。

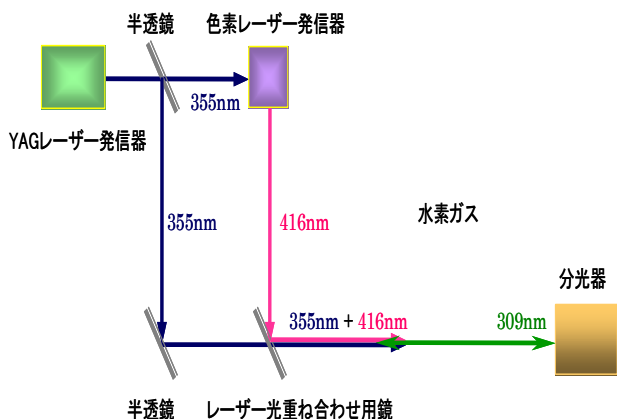


図7 反ストークスラマン散乱光に係る実験システム

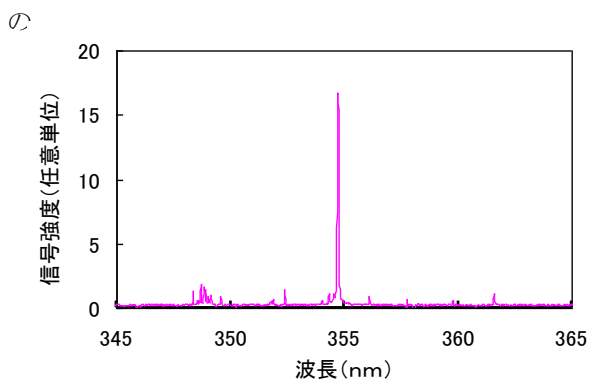
その結果, 図8, 図9に示すように, Nd:YAG レーザーの第3高調波(波長:355nm)と当該高調波で発振させたレーザー光(波長:416nm)を同時に水素ガスに照射することにより, 水素火炎中のOH基の発光スペクトルのピーク波長(309nm)と完全に一致する波長を有するラマン散乱光が検出されることを確認した[6].

当該技術を用いることにより, 照射レーザーに起因した蛍光の影響を受けない水素火炎/ガス可視化装置の一体化などシステムのコンパクト化やコスト低減が可能となる。

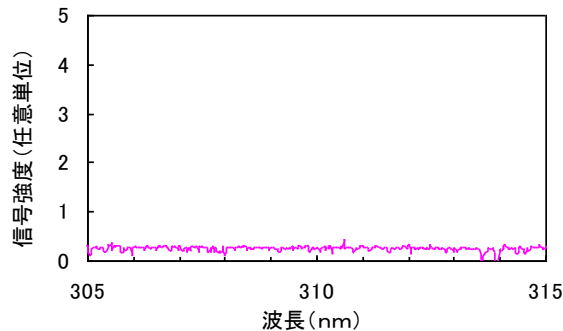
5. 結言

水素火炎可視化技術は, ほぼ実用レベルにまで到達した感触を得ており, 実運用している水素供給ステーションなどでの実証運用を通して長期耐久性の検証と開発技術の妥当性評価, 付加価値を高めるための新たな追加機能の検討などを行って, 市場公開したいと考えている。

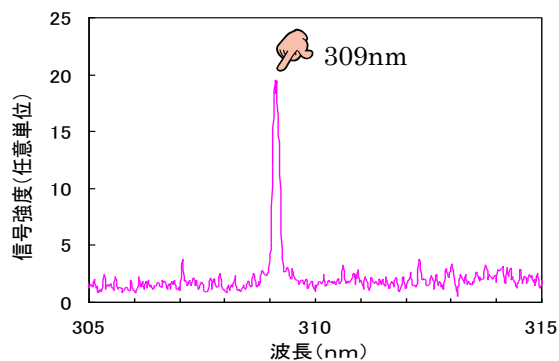
一方, 水素ガスの可視化技術については, 漸く最初の障壁を乗り越えた段階と考えている。当該技術が実用システムとして市場に受け入れられるためには, 危険度の低い微弱なレーザーの適用や低コスト化・コンパクト化を図るなど, 解決すべき問題が散在している。現在, 30m先の漏洩水素ガスの可視化を可能とするシステムへの改良を実施している他, レーザービーム・スキャナーの適用による可視化の高速化を目指している。今後, 水素火炎可視化と水素ガス可視化の何れにも対応可能なシステム



(a)355nm のレーザー照射の場合



(b) 416nm のレーザー照射の場合



(c)315nm と 416nm のレーザーを重ね合わせて照射した場合

図8 反ストークスラマン散乱光に係る実験的裏付け

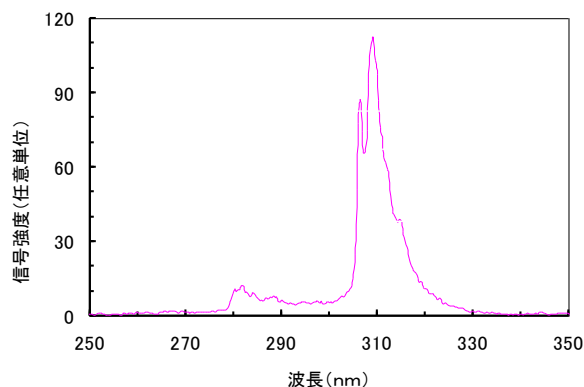


図9 水素火炎の発光スペクトル

の開発も進める予定である。

本研究は「地域新規産業創造技術開発費補助（経済産業省創設）」事業として平成16年度から実施している。

参考文献

1. 例えば, 平成14年度成果報告書 (NEDO WE-NET 0207, 公開用 51102289-0-1.pdf)
2. 二宮ほか3名, 公開特許公報, 特開 2004-294423
3. 福地ほか2名, 電力中央研究所報告 T01050, 平成14年4月
4. 二宮ほか4名, 国際公開公報, WO 2004/079350
5. 濱口宏夫・平川暁子, ラマン分光法, 日本分光学会, (2002), P15-28
6. 二宮ほか3名, 国際公開公報, WO 2005/015183