

画像伝送手法による水素火炎の可視化技術

(株)四国総合研究所 電子技術部	三木 啓史
(株)四国総合研究所 電子技術部	星野 礼香
(株)四国総合研究所 電子技術部	荻田 将一
(株)四国総合研究所 電子技術部	市川 祐嗣
(株)四国総合研究所 電子技術部	杉本 幸代
(株)四国総合研究所 電子技術部	朝日 一平

キーワード : 水素火炎
発光
スペクトル
分光
イメージファイバ

Key Words : hydrogen flame
luminescence
spectral
spectrum
image fiber

Hydrogen Flame Visualization Technique Using an Image Transmission Method

Shikoku Research Institute, Inc., Electronics Technology Department
Hirofumi Miki, Ayako Hoshino, Masakazu Ogita, Yuji Ichikawa,
Sachiyo Sugimoto, and Ippei Asahi

Abstract

Because hydrogen flame cannot be seen in an ordinary condition, a flame detector that reacts to ultraviolet emitted from the center of hydrogen flame is provided at sites handling hydrogen. The detector is a sensor to detect the presence of flame and give an alarm. However, it cannot identify the position of fire occurrence or ignition, nor grasp the behavior of flame. In addition, because it reacts to all light components within the detection wavelength region, such as direct sunlight, reflected light and welding sparks, an error alarm (false detection, malfunction) often occurs, which is a big problem in operating and managing hydrogen stations.

Considering these conditions, we developed a method to visualize hydrogen flame. It takes images, using a dedicated camera, of strong light emissions in a specific wavelength region that was newly found by spectrometry of hydrogen flame, and visualizes hydrogen flame through image processing. In addition, we proposed that hydrogen flame judgment conditions be superposed to detect hydrogen flame with high reliability.

In order to transmit the images taken in the area where the occurrence of hydrogen flame is anticipated to a safe area, we also developed an image transmission technique composed of optical parts and an image fiber only.

1. はじめに

水素火炎は、可視光波長域に発光が無いため視認することができず、水素ステーションなどの水素ガスを扱う施設には、安全・保安装置として、紫外線検知管をセンサーとして用いる炎検知器が設置されている。

当該検知器は、火炎から発せられる紫外光に反応することによって水素火炎の有無を知る手段であり、火炎の挙動や着火位置などを把握することは出来ないため、着火位置の特定や火炎挙動の把握は、専らパトロール員による現地巡視に委ねられている。社会ニーズとして絶対的な安全性が求められている中、炎検知器が動作した際に、対象区域内にパトロール員が立ち入ることは、安全性確保の観点から大いに問題がある。しかも、紫外線検知管の検知波長域が広く、窓ガラスに反射した太陽光や溶接火花などにも反応するため、紫外センサーとしては正動作であっても、炎検知器としては誤動作である事例が多い。

このような実情に鑑み、著者らは、エネルギー供給事業者や水素インフラ事業者などと意見交換し、実用的な水素火炎検知器の具備すべき仕様の一つとして、5m 遠方の 2cm 程度の微小火炎検知であることを明らかにした。

本報告では、防爆区域内で捉えた水素火炎から発せられる近赤外光をイメージファイバ(マルチコア光ファイバ)で非防爆区域に伝送して撮像する、画像伝送手法による新たな水素火炎の可視化技術を紹介する。

2. 水素火炎の可視化

2.1 水素火炎の発光

水素火炎は極めて視認性が低く、昼間時に肉眼で火炎を捉えることは極めて困難であり、夜間、ごく僅かな青紫色の発光を確認することが出来るに過ぎない(図1)。



図1 水素火炎の視認性

この点が、一般的な炭化水素ガスの燃焼による火炎と異なる。通常、大気中で水素原子を含む可燃性ガスが燃焼する場合、OHラジカルの発光(紫外光)や高温水蒸気の発光(近赤外光)、高温水蒸気が冷却されて生成した結露の発光(遠赤外光)が観察される。水素火炎の視認が難しいのは、水素火炎には可視光域に発光が無いためである。OHラジカルの発光は火炎の中心部で強く、その周囲で高温水蒸気のみ発光が観察され、結露した水蒸気から遠赤外光(熱線)が放射される。

2.2 可視化手法

水素火炎から発せられる紫外光や近赤外光を、光学フィルターで選別して取り出すことによって水素火炎を検知することが出来る。また、燃焼で生じる高温水蒸気が火炎周辺の外気に曝されて結露して温度相応の輻射熱を発するため、この熱輻射を検知することにより、火炎近辺の温度分布を熱画像化することが出来る。一方、燃焼によって火炎から発せられる高温水蒸気が発光スペクトルが近赤外光波長領域にピーク値を有することに鑑みれば、外乱としての太陽光の発光が小さく、且つ高温水蒸気が発光スペクトルが強い波長域の光を選別して画像化することでも火炎の可視化は可能である。著者らは、専用のカメラを用いて水素火炎から発せられる各種波長の光を可視画像として捉え、これらの撮像画像を画像処理した後、背景画像(可視画像)に重ね合わせる手法の適用により、水素火炎を可視化している(図2)。

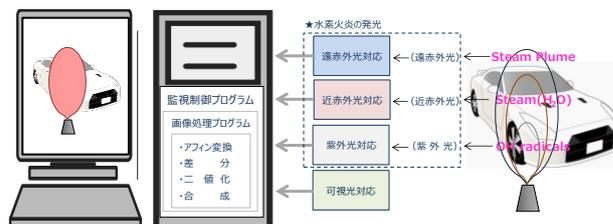


図2 水素火炎可視化の基本手法

2.3 撮像に適する波長領域

水素火炎の撮像に適した波長領域を見出すために水素火炎の分光測定を行い、概ね 1,350~1,500nm の近赤外光領域に高温水蒸気の強い自発光が存在することを見出した(図3)。これまで著者らは、紫外光(例えば 309nm)や近赤外光(例えば 950nm)などの水素火炎から発せら

れる特定波長の光と、当該特定波長に近接する波長域の光を撮像し、これらの撮像画像の差分画像を抽出することにより、水素火炎の可視化を実現していた。図3に示されるように、分光測定によって新たに見出した波長領域では、高温水蒸気の発光強度が大きいのにに対して太陽光の発光強度が小さいことを踏まえ、市販の近赤外光カメラを用いて5m遠方の水素火炎の撮像試験を実施した。その結果、適切な波長帯域の光学フィルターを用いれば、外乱としての太陽光の影響を排除するための撮像画像の差分処理が不要であることが明らかとなった。撮像試験の結果から、高温水蒸気の発する近赤外光を効果的に選別・抽出する光学フィルター仕様として、中心波長1,450nm、バンド幅50nm（半値幅25nm）を決定した。当該フィルターを用いることにより、高温水蒸気の自発光に起因する近赤外光の選別が可能であることを検証した。

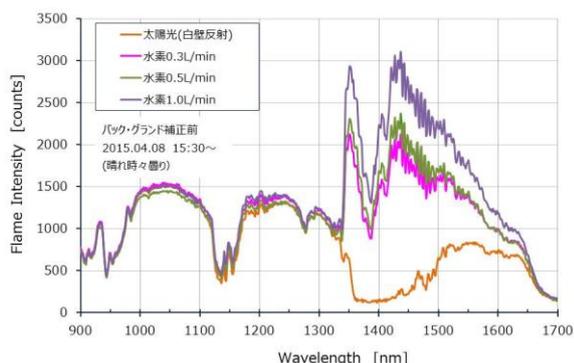


図3 水素火炎と太陽光のスペクトル特性

3. 水素火炎判定条件の重畳化

水素火炎は、可視光波長域に発光がないため通常の状態では視認できず、水素を含む可燃性ガスを取り扱う現場や施設には、保安装置として火炎の発光に含まれる微弱な紫外光に反応する炎検知器が設置されている。当該検知器は、検知対象の如何に関わらず検知波長域の全ての光に反応することから、紫外センサーとしては正動作であっても炎検知器としては誤動作である事例が多い。商用水素ステーションでは、誤検知・誤動作が水素ステーションの営業機会の損失を招来するため、水素ステーションの設置者・運営者から、誤検知・誤動作をしない高精度の炎検知技術が求められて

いる。このような事情に鑑み、高い信頼性を以て水素火炎を検知することができるよう、著者らは水素火炎判定条件の重畳化を提案している。つまり、高温水蒸気の自発光を近赤外光画像として捉える「画像判定」と、火炎から放射されるOHラジカル発光（紫外光）をセンサー信号として捉える「信号判定」の両判定条件を満たすことを以て水素火炎と判定する考え方である（図4）。図中の「火炎判定面積」とは、撮像画像を処理する過程で、白黒濃淡で表現された差分画像（グレースケール画像）を256の諧調数を以て二値化する際の、水素火炎可視化システムが水素火炎として認識する画素の総数がモニター画素数（480×640）に占める割合（%）である。現行のデータ処理方法では、条件を満たせば外乱光やノイズなどに起因する近赤外光も火炎として判定する画素に包含されるため、火炎判定面積を大きく設定することは外乱の影響を助長することにつながるため、適切な値を決定する必要がある。



図4 水素火炎判定条件の重畳化

4. 画像伝送手法

4.1 防爆対応

現行の高圧ガス保安法では、圧縮水素ステーションのディスペンサー周囲と蓄圧器は、水素火炎から発せられる紫外光を検知する手法を用いた水素火炎発生の常時監視を規定している。

ディスペンサー周囲や蓄圧器の近傍は、最も危険度の高い危険区域（ゾーン2）に該当するため、当該区域内に設置する電気機器類は、本質安全防爆や耐圧防爆などの防爆構造容器内に格納しなければならない。他方、微小な水素火炎を可視画像として確実に捉えるためには、可能な限り火炎発生の想定される近傍での監視が有効である。

これらの事情を熟考した結果、著者らは、防爆対応の不要な画像伝送方式を採用するに至った。

4.2 画像伝送方式

当該方式は、イメージファイバ（マルチコア光ファイバ）を介して、防爆区域の画像データを非

防爆区域に導く手法であり、集光部（対物レンズ）と画像伝送部（イメージファイバ）、撮像部（CCDカメラ）及び画像処理部（パソコン）の4つの部位から成る。集光部と画像伝送部は光学部品のみで構成されており、電子部品などは一切用いないため防爆対応が不要である。

(1) 集光部

水素火炎を可視化するために捉える光は、背景画像としての可視光と水素火炎から発する近赤外光であるが、波長帯域が大きく離れているため、微小な焦点距離差が生じる（図5）。対物レンズを設計する上で、この差を完全にゼロとすることが極めて困難であることに鑑み、対物レンズで集光した光を可視光と近赤外光の二波長に分光する手法を考案した（図6）。

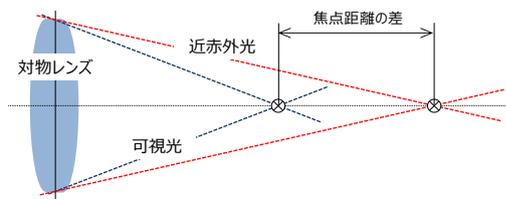


図5 焦点距離差

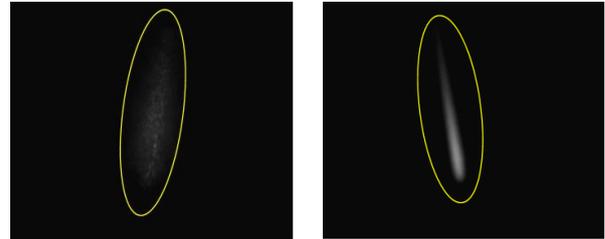


図6 集光部

(2) 画像伝送部

メーカー標準品である可視光対応のイメージファイバを用いて予備試験を行った結果、光量不足による近赤外光伝送画像のコントラストの低下が大きく、当該画像が不鮮明となる問題が顕在化した。イメージファイバは、各々のコアに入射した光が効率よく出口端まで伝送されることにより、画像伝送を可能とする。伝送する光の波長が長くなれば、コアから光が漏れて隣接するコアに結合され易くなり、コントラストの低下を招来する。そこで、新たなカスタム設計に基づいてコア

間隔を拡大させた近赤外光対応のイメージファイバを試作した。試作した近赤外光対応のイメージファイバは、コントラストの低下が改善されており、近赤外光波長域の光を効率よく撮像部まで導光できる見通しを得た（図7）。



(a) メーカー標準品 画素数 50,000
(b) カスタム設計品 画素数 20,000

図7 近赤外光伝送画像のコントラスト改善

(3) 撮像部

専用のイメージファイバで導光した可視光と近赤外光を、各種フィルターを介して CCD カメラで撮像する構成となっている（図8）。可視光カメラは勿論のこと、近赤外光カメラも分光感度特性が 950~1,700nm、撮像素子が InGaAs の市販品を用いている。先に述べたように中心波長が 1,450nm、バンド幅が 50nm の光学フィルター（BPF）により、1,425~1,475nm（波長選別帯域）の近赤外光を選別することができる。

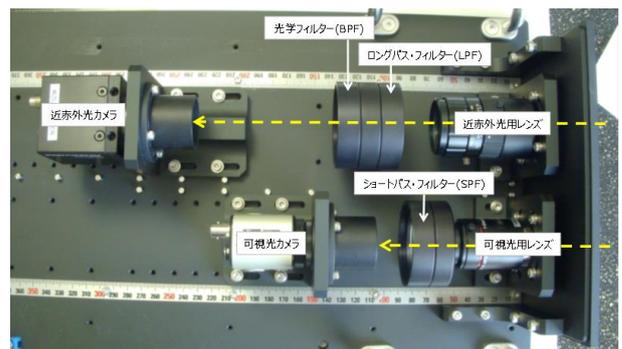


図8 撮像部

4.3 実用モデルシステムの試作

事前に、5m 遠方に位置する微小水素火炎を専用の CCD カメラで画像として捉え、画像処理した複数枚の撮像画像を重ね合わせる手法を用いて可視化する手法の有効性を検証している。この検証結果に基づき、光学部品とイメージファイバを

組み合わせる画像伝送方式の実用モデルシステムを設計・試作した（図9）。

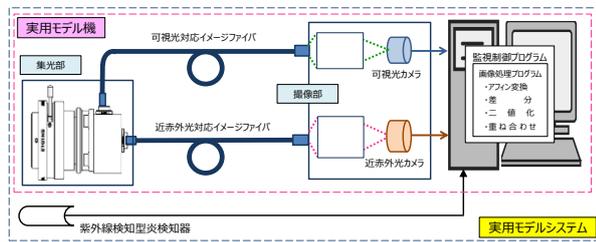


図9 実用モデルシステムの構成

5. 実用モデル機による試験

5.1 回転灯の分光特性

屋内条件の下、水素ステーションへの出入が想定される緊急車両などに搭載される回転灯（ランプ光源：ハロゲン、カバー色：紫・青・赤・緑・橙）と水素火炎の分光測定を実施した（図10）。回転灯は、ランプ光源の背面に配したリフレクターの反射光を前方に配光する方式であり、発光の大部分を分光器に集光することが出来るのに対して、水素火炎の発光が四方八方に発散することを勘案し、分光器のシャッター開放時間を、水素火炎に対しては300ms、回転灯に対しては8msに設定した。発光強度はシャッター開放時間に比例すると考えてよい。なお、測定データの傾向を読み解くために、3項移動平均を以て測定データの平滑化を図った。

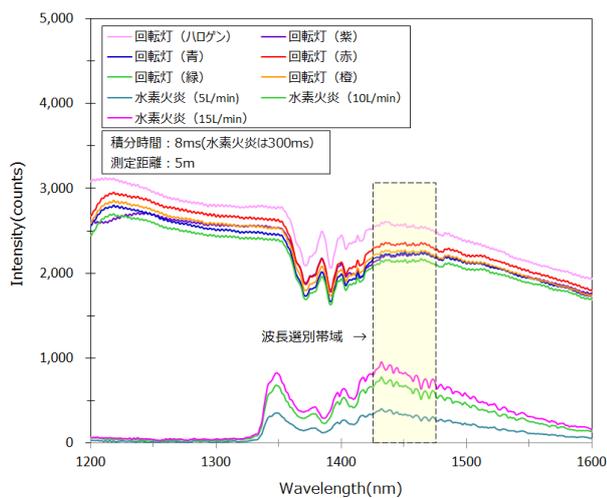


図10 回転灯の分光特性例

分光器の積分時間を勘案すれば、波長選別帯域の水素火炎の発光強度は回転灯の発光に比べて

非常に小さく、回転灯の発光が水素火炎の発光を画像として捉える際の外乱となり得る。特に、回転灯と水素火炎が対物レンズの集光軸上に一直線に並ぶ場合には、近赤外光画像で両者を区別することが難しく、誤検知の発生が懸念される。

5.2 水素火炎の撮像

(1) 屋内条件下での撮像

実用モデル機を用いて屋内条件下の5m遠方の微小水素火炎を撮像した（図11）。イメージファイバの画素数は、可視光用が100,000pix、近赤外光用が20,000pixで、条長は何れも3mである。図中の“火炎表示閾値、とは、白黒の濃淡で表示される差分画像（グレースケール画像）を256の諧調数を以て二値化した際の、実用モデル機が水素火炎として判定する最小画素値であり、画素値0が黒、画素値256が白となる。当該閾値が小さいほど、水素火炎として捉える領域が大きく、同じ大きさの火炎を撮像した場合、閾値が小さいほど火炎の可視化画像は大きい。発光強度の小さい微小水素火炎を画像化するには、当該閾値を小さく設定するほど有利である。火炎表示閾値が4の場合に比べて、同閾値が40の場合の撮像画像領域が一回り小さいのはこのためである。何れに

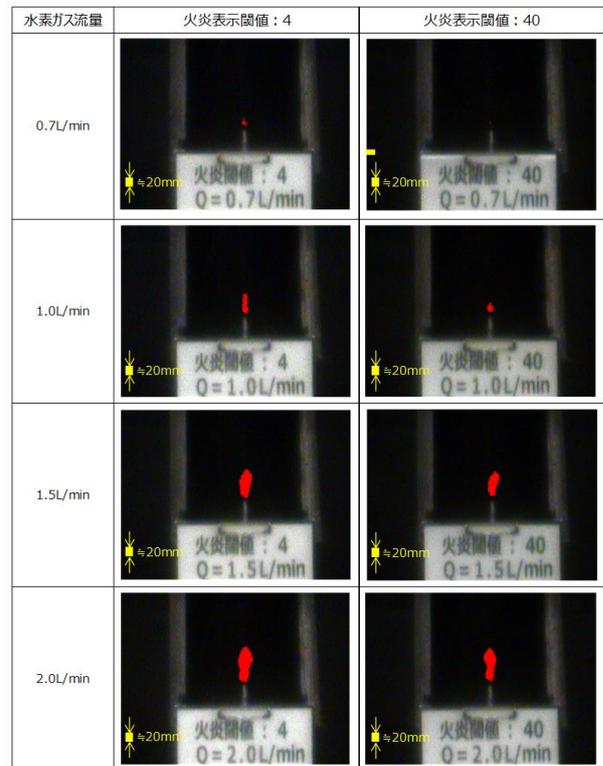


図11 水素火炎の撮像画像（屋内撮像）

せよ、実用モデル機を用いて、5m の離隔距離を以て 2cm ほどの微小水素火炎の撮像、つまり水素火炎の可視化が可能であることを検証することができた。

(2) 屋外条件下での撮像

5m の離隔距離を以て、風除けのための防風カバーで囲まれた火口から発生する水素火炎を実用モデル機で撮像した（図 1 2、1 3）。イメージファイバの条長を 1m に変更した以外、光学系の仕様は先の屋内撮像条件と同じである。火炎表示閾値が 5 や 10 のように閾値が余りにも小さい場合には、太陽光など外乱光の影響が顕著となるため、撮像環境に応じた適切な閾値の決定が重要である。この撮像結果のみを以て最適とは言えないが、5m の離隔距離を以て 2cm 程度の微小水素火炎を検知するためには、火炎表示閾値として、ひとまず 40 が妥当であると判断した。

流量 (火炎高)	水素火炎可視画像		
	火炎表示閾値5	火炎表示閾値10	火炎表示閾値15
0.7L/min (≒20mm)			
1.0L/min (≒25mm)	外乱光（太陽光の反射）の影響が大きいため撮像せず。	外乱光（太陽光の反射）の影響が大きいため撮像せず。	
1.5L/min (≒50mm)	外乱光（太陽光の反射）の影響が大きいため撮像せず。	外乱光（太陽光の反射）の影響が大きいため撮像せず。	
2.0L/min (≒65mm)	外乱光（太陽光の反射）の影響が大きいため撮像せず。	外乱光（太陽光の反射）の影響が大きいため撮像せず。	

図 1 2 水素火炎の撮像画像（屋外撮像）

(3) 妥当性の実証

開発技術の妥当性を検証・評価するために、当社構内の一角に実用モデルシステムと市販の紫外線検知型炎検知器を設置し、平成 29 年 6 月から同年 10 月までの 138 日間に亘るフィールドでの実証試験を行った。実用モデルシステムでは、合計 316 回の画像判定に基づく水素火炎検知が

流量 (火炎高)	水素火炎可視画像		
	火炎表示閾値20	火炎表示閾値30	火炎表示閾値40
0.7L/min (≒20mm)			
1.0L/min (≒25mm)			
1.5L/min (≒50mm)			
2.0L/min (≒65mm)			

図 1 3 水素火炎の撮像画像（屋外撮像）

あったものの、何れの場合とも同時に紫外線は検知されていなかった。この結果、誤検知回数は、炎検知器の 80 回に対して実用モデルシステムではゼロであったことから（図 4 参照）、開発技術の妥当性が実証されたと言って過言ではない。

6. まとめ

光学部品とイメージファイバのみで構成される「画像伝送方式」を提案し、水素火炎の分光測定によって新たに見出した特定波長領域の強い発光を専用のカメラで撮像する手法を用いることにより、高い信頼性を以て、遠方から微小水素火炎を可視化する技術を完成させた。

【謝辞】

本研究開発の一部は、平成 26～29 年度 NEDO 水素利用技術研究開発事業の一環として行われたものである。ここに、ご協力を戴いた関係各位に謹んで感謝の意を表する。

【参考文献】

- 1) 燃焼現象の基礎 (株式会社オーム社、新高嵩・河野通方・佐藤順一共著)
- 2) 火炎の分光学的計測とその応用 (株式会社学会出版センター、幸田清一郎・田久保嘉隆共著)