

## 受動赤外分光による水素火炎可視化ウェアラブルデバイスの開発

㈱四国総合研究所 電子アグリ技術部 荻田 将一  
九州計測器(株)新事業推進室 田中 武海

キーワード： 水素火炎  
可視化  
遠隔計測  
保安  
AR

Key Words : Hydrogen flame  
Visualization  
Remote sensing  
Security  
AR

### Development of wearable device for visualization of hydrogen flame by passive infrared spectroscopy

Shikoku Research Institute, Inc., Electronics and Agricultural technology Department

Masakazu Ogita

Kyushu Keisokki Co.,Ltd., New business project team

Takemi Tanaka

### Abstract

Flames caused by hydrogen gas ignition are invisible. At sites where hydrogen gas is used, UV sensors are used to monitor the hydrogen flame, however it has been pointed out that the location of the hydrogen flame cannot be identified, or false positives is happening. From a safety standpoint, it is appropriate for the operator to be able to check the location of the hydrogen flame hands-free. Therefore, the authors developed a wearable device to visualize the hydrogen flame in a hands-free manner. This paper reports the details of the development.

## 1. 序論

「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」が示されたことから、既存の化石燃料から、CN-LNG、CN-LPG、アンモニアや水素等、脱炭素燃料を用いる取り組みが加速している。水素エネルギーを取り巻く環境は社会実装フェーズへと加速しており、FCVの普及促進や水素ステーションの実運用を中心に様々な施策が進められている。FCVは2020年度に4万台、2025年度に20万台程度の普及を、水素ステーションについては2020年度に160箇所、2025年度に320箇所程度の普及配備が目標として挙げられている<sup>1)</sup>。これに伴い、図1に示す通り、水素ステーション・スタンドの設置数の急増と共に、水素由来の事故件数も増加している。

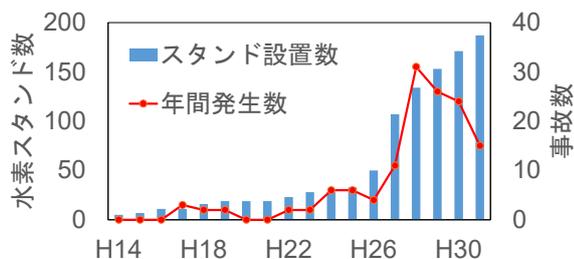


図1 水素スタンド設置数と事故件数の推移

現在までに水素エネルギー関連施設で発生した火災事案は少数であるものの<sup>2,3)</sup>、事故件数の増加を見据え、対策を講じておくことが急務であると考えられる。

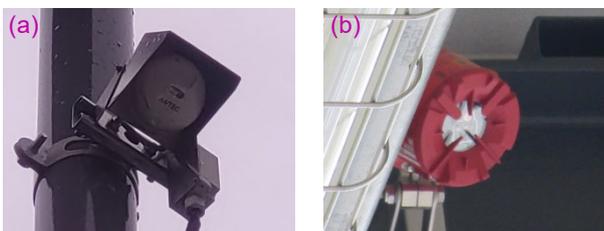


図2 現行の火炎検知装置の一例

(a) アンテナ製, (b) 新コスモス電機製

水素の安全利用に関しては高圧ガス保安法を軸として諸法令に定められている。重大事故の一つとして想定される漏えい水素への着火事故に関しては、水素火炎が目視できないことから、「水素火炎が発する紫外線を検知する方法により、常時、

水素火炎の発生を監視する」と規定され、現行はこれに準じた図2に示すような火炎検知装置((a)アンテナ製, (b)新コスモス電機製)の設置が義務付けられている<sup>4,5)</sup>。

しかし、現行の火炎検知装置は火炎の有無を判定して警報発報することを基本としており、水素火炎の領域を認識できないという課題がある。このため、水素火炎の位置の特定は巡視する作業員に依存している。このような原理的な課題が指摘されているものの、火炎検知装置以外の保全設備の拡充は十分に行われていないというのが実状である。

また、消火活動の現場を想定すると、単純に水素火炎を確認するだけでなく、可搬性があり、消火活動を行いながらハンズフリーで水素火炎の位置や規模を確認できる装置が望ましい。

これらの背景に鑑み、著者らがこれまでに開発した火炎可視化装置<sup>6,7)</sup>と、スマートデバイスを融合させた、肉眼で視認できない水素火炎をハンズフリーで可視化するウェアラブルデバイスの研究開発を行った。本稿では本装置の検出原理や装置の詳細について報告する。

## 2. 水素火炎の光学的特性

図3は昼間屋外と屋内(背景光がある場合とない場合)における燃焼中の水素火炎の視認性を比較した事例である。

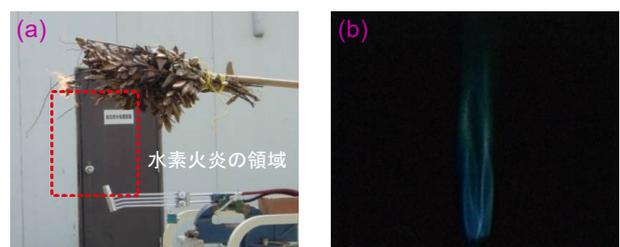


図3 水素火炎の視認性

(a) 昼間屋外, (b) 屋内暗室

図3(a)に示す通り昼間屋外の写真では、バーナから水素火炎が生じ、上部にかざされている筈に延焼しているが、水素火炎そのものは全く確認できない。図3(b)に示す通り、周囲に外乱光のない屋内暗室環境下では、僅かに青紫色の可視光の発光が確認できる。これは撮影に用いた CCD 検出器の分光感度特性が人間の可視領域より広いため、

確認できるものであり、実環境での視認は非常に困難である。

水素由来の火災現場では水素以外の可燃物が燃焼することにより炭化水素の火炎が発生するため、火災の規模をある程度想定することは可能であると考えられるが、火災の初期やパイプライン等水素以外の可燃物の少ない状況で水素火炎を早期発見することはやはり困難である。これは、消火活動の現場を想定すると、鎮火確認等で水素火炎の残火の有無を視認することが困難であることを示している。

一般に、燃焼は可燃物による光や熱の放出を伴う酸化反応であり、水素の場合も同様である。

図4に紫外から近赤外領域における水素火炎の発光スペクトル、及び地表における太陽光スペクトルを示す。

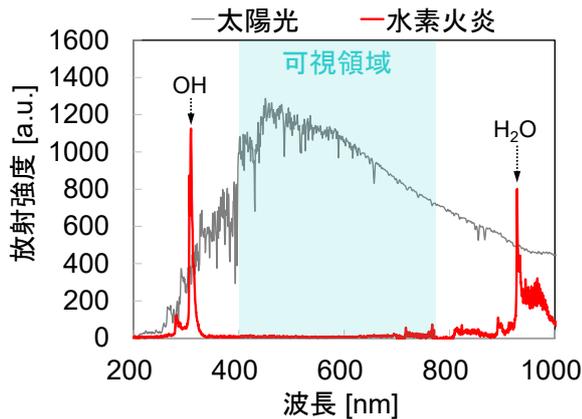


図4 紫外から近赤外領域における水素火炎の発光スペクトル、及び太陽光スペクトル

図4に示す通り、水素火炎の場合、燃料に炭素を含まないことから、可視領域に生じる炭素を含むラジカルの発光は生じない。このため、水素火炎は人間には視認できない<sup>8)</sup>。一方、紫外領域や近赤外領域にOHラジカルやH<sub>2</sub>Oの比較的急峻なピークをもつ発光が確認できる。

紫外域では278 nm～320 nmに発光があり、そのピーク波長は307 nm～309 nmである。これは水素火炎の比較的中心部に生じるOHラジカルの発光によるものである<sup>9,10)</sup>。紫外線を検知する方式の火災検知装置はこの波長域の光を捉えることで火炎の発生を判定している。

近赤外領域は925 nm～1000 nmに発光があり、

そのピーク波長は925 nm～950 nmである。これはOHラジカルの層を覆うように生じる水素の燃焼過程において生じる高温のH<sub>2</sub>Oの発光によるものである。更に長波長側の1.3 μm～1.4 μm付近にも発光があり、これを利用した検知手法も存在している。

高温の水蒸気が結露することにより生じる熱線は一般に赤外線と呼ばれる波長域の約8 μm～14 μm帯の電磁波であり、H<sub>2</sub>Oによる発光よりも更に広範囲の領域から発生する。この波長域を用いて火炎や高温・熱領域を可視化する装置がサーモカメラである。図5に水素火炎の模式図を示す。



図5 水素火炎の模式図

これらの水素火炎の燃焼由来の自発光を選択的に捉えることで水素火炎の可視化が可能となる。

### 3. 計測手法

#### 3.1 水素火炎の可視化手法

図4に示した通り、地表における太陽光スペクトルは広い波長域に存在しており<sup>11)</sup>、水素火炎の発光スペクトルの領域と重なっているため、単一波長のみで水素火炎の発生を判定する手法では誤検知が生じる可能性が高くなる。

また、太陽光の他に、突発的に観測視野内に生じる可能性のある各種ランプ光源やアーク溶接等の発光が外乱光となり誤検知の要因となる。

前述の水素火炎の光学的特性と外乱光の影響を踏まえ、著者らは水素火炎の紫外領域や赤外領域の発光を特殊なカメラで選択的に捉え、画像処理を施すことにより可視化する技術を確立し、想定する状況に応じた複数の火炎可視化装置を開発している。著者らがこれまでに開発した火炎可視化装置の内、現場に携帯して使用することを想定し開発した装置の外観、及び装置構成を図6に示す。

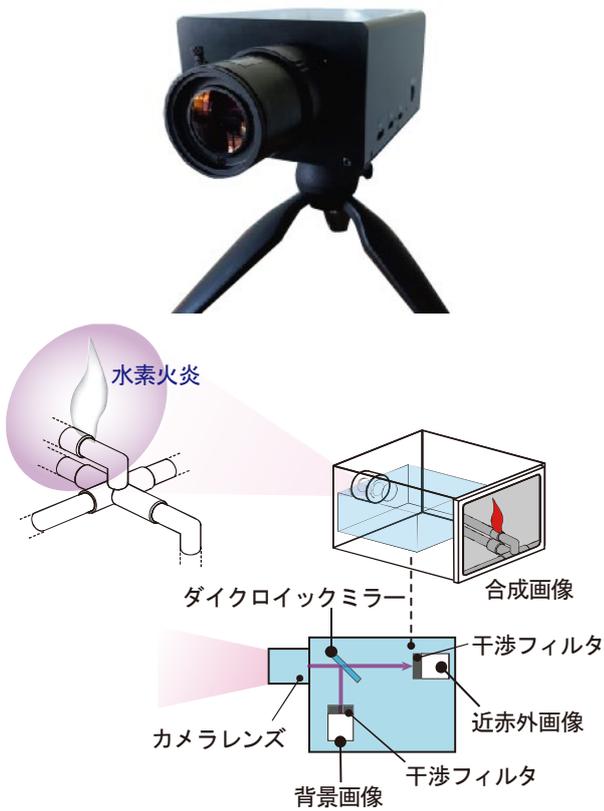


図6 火炎可視化装置の外観，及び装置構成

図6に示す装置は、水素火炎の近赤外領域の発光を捉える手法を適用しており、装置の小型化と低コスト化を目標に、画像処理と装置構成の簡素化を行ったものである。図7に火炎可視化装置の画像処理フローを示す。

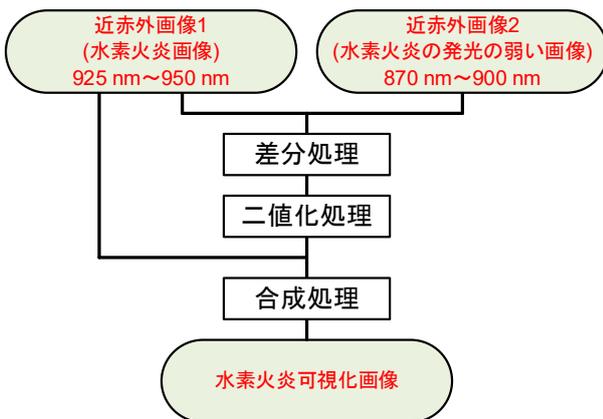


図7 火炎可視化装置の画像処理フロー

カメラレンズで捉えた光は特定の波長で光を分離させるダイクロミックミラーにより分配される。本装置では900 nmより長波長の光を透過し、短波

長の光を反射するダイクロミックミラーを配している。透過側は925 nm～950 nmの水素火炎の発光のピークを含む波長域の光(近赤外画像1)に、反射側はその近傍における背景画像となる870 nm～900 nmの水素火炎の発光の弱い波長域を含む光(近赤外画像2)となる。分配後の光は光学フィルタにより波長選択後、CMOS素子に導かれる。その後、画像を差分・二値化処理することで水素火炎の領域を抽出し、可視化画像を出力している。

現場で使用するウェアラブルデバイスは軽量・小型・安価な装置が要求される。これに鑑み、火炎可視化装置の各種手法の内、最も簡易な構成となる本手法を基に、研究開発を行った。

### 3.2 スマートデバイスの選定

本研究開発は火炎可視化装置とスマートデバイスを融合させたウェアラブルデバイスの開発であり、火炎可視化装置で取得した可視化情報をデバイスのモニタ上に投影するものである。図8にウェアラブルデバイスの製品イメージを示す。

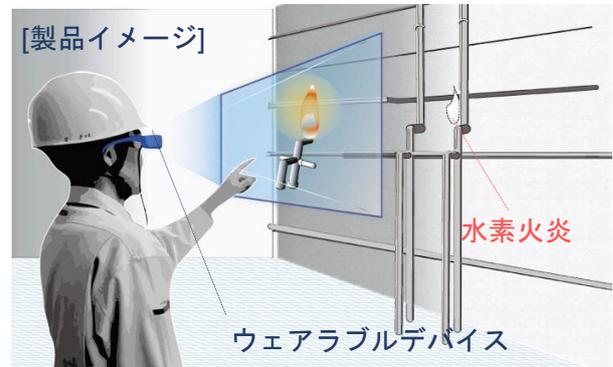


図8 ウェアラブルデバイスのイメージ図

図8に示す様に、装着した作業員がモニタを介して水素火炎の領域を視認できるようになるため、火炎の早期発見、初期対応の迅速化が可能となる。

また、モニタ上への温度や酸素濃度、位置の表示機能、監視室への通信機能等を付加することで、現場の状況が指揮系統や他の作業員と共有できる、作業指示情報を視覚的に共有できる等、副次的なメリットも生まれる。

本装置に適用した、現実の物質空間と仮想空間を融合させる技術は総称してXR (Cross Reality, Extended Reality)と呼ばれている。表1にXR技術に含まれる各技術の特徴を示す。

表 1 XR 技術に含まれる技術の特徴

種別	AR	MR	VR
	拡張現実	複合現実	仮想現実
体験する空間	デバイス上に拡張された現実世界	現実世界 + 仮想世界	仮想世界
現実の物体の視認	可能	可能	不可能
コンテンツへの接触	デバイス上で可能	可能	不可能
使用デバイスの例	スマートフォン ARグラス	MR グラス	VR グラス

拡張現実 (Augmented Reality: AR) は、現実世界に仮想世界を重ね合わせて体験できる技術のことであり、スマートフォンやヘッドマウントディスプレイを通して現実世界を見た時に、仮想のデータや画像を現実世界に重ねて表現する。XR 技術の中で最も普及している技術であり、産業用途では、製品や装置・設備の 3D CAD データをもとに、仮想空間で試作品を検証することに用いられている他、作業指示を表示し、点検業務支援を行うこと等に用いられている。

複合現実 (Mixed Reality: MR) は、AR と同様に現実世界に仮想世界を重ね合わせて体験できる技術であるが、現実世界の情報を反映しない AR と違い、現実世界の情報を用いて仮想世界と相互にリアルタイムで影響し合う複合的な空間を構築する技術である。建設業では現実世界に建築物の間取りの情報を重ね合わせ、出来形の確認を行うこと等に用いられている。

仮想現実 (Virtual Reality: VR) は、仮想世界を現実のように体験できる技術のことであり、ヘッドマウントディスプレイを通して視野内に 360° の仮想空間を表現する。体感型のゲームを始め、作業教育の教材として VR 研修等で用いられている。

この他に現在の世界と過去の情報を混同させ、実時間・実空間に存在しているかのように見せる代替現実 (Substitutional Reality: SR) と呼ばれる技術も存在している。近年、VR や AR を複合した技術等も登場していることから技術の明確な線引きは成されていない。

水素火炎をデバイスのモニタ上に表現する場合、

現実世界の情報が必要となるため、AR、もしくは MR 技術が適当であり、XR 技術を表現するためには、それぞれ専用のデバイスが必要となる。MR デバイスはそれ単体で数十万円程度の販売価格であり、AR デバイスと比較して大型で重量があるため、軽量・小型・安価な装置の開発は困難である。

また、スマートデバイスの表示方式は、透過ディスプレイ上に画像や映像を投影する光学シースルー方式や、装着者の視界を外界から完全に遮断し、前面に配したカメラの映像を非透過型ディスプレイに投影するビデオシースルー (ビデオパススルー) 方式が挙げられるが、ビデオシースルー方式はデバイスの電源喪失時に装着者の視界がブラックアウトするため、現場使用には適さないと判断し検討対象から除外した。

以上のことから、軽量・小型・安価な AR デバイスの調査を行ったところ、国内でモジュールタイプの AR ディスプレイ (以下、AR モジュール) を販売している Barintec 社を見出した。AR モジュールの外観を図 9 に示す。



図 9 Barintec 製 AR モジュールの外観

AR モジュールは導光板技術を用いた小型・軽量の AR デバイスであり、透過ディスプレイと画像形成部の基部からなる。他の AR デバイスと比較して大型の導光板を内蔵している。解像度は水平 1280 × 垂直 720 pixels, 視野角は 35° ~ 25°, 重量 26 g, 明るさは 1000 nits ~ 2000 nits という仕様である。現行のスマートフォン相当のピーク輝度を持っており、昼間屋外環境下でも十分な視認性を有している。また、装置は数万円程度で調達でき、大きなコストダウンが可能となる。

以上のことから、本研究開発では、AR デバイスとして AR モジュールを適用した。

#### 4. 装置開発

##### 4.1 ハードウェアの開発

図 10 に開発したウェアラブルデバイスの光学構成を示す。

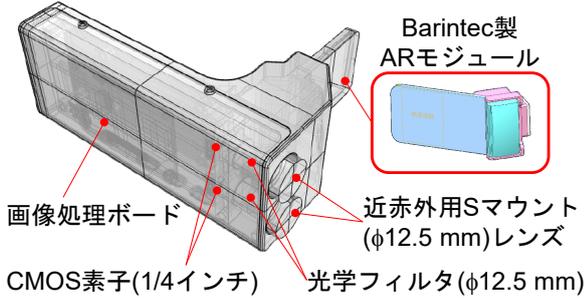


図 10 ウェアラブルデバイスの光学構成

AR モジュールの適用に伴い、ハードウェアは片眼に装着する方式とし小型化を図った。また、光学系に用いる光学フィルタやカメラレンズは既製品を適用することで、低コスト化を行った。

光学系は光軸を 2 つに独立させ水素火炎画像と背景画像を別々に取得する二眼式とした。これにより空間的にスペースが必要となるダイクロイックミラーが必要なくなり、従来の装置と比較して光学系の小型化につながった。

カメラレンズは直径φ12.5 mm の小径のカメラレンズ(ユニバース光学工業製 近赤外用 S マウントレンズ VH160D900)を適用した。伴って、波長選択を行う光学フィルタの直径もφ12.5 mm とした。それぞれ水素火炎画像側は(Andover 製 バンドパスフィルタ 930FS10-12.5)を、背景画像側は(Andover 製 バンドパスフィルタ 900FS10-12.5)を適用した。イメージセンサは 1/4 型、808 万画素の CMOS 素子(SONY 製 MX219)の赤外線カットフィルタが無いものを適用した。

CMOS 素子後段の画像処理回路で可視化処理後、装置内で有線接続された AR モジュールに水素火炎の可視化画像を表示する。図 11 に装置外観を、表 2 に装置仕様を示す。

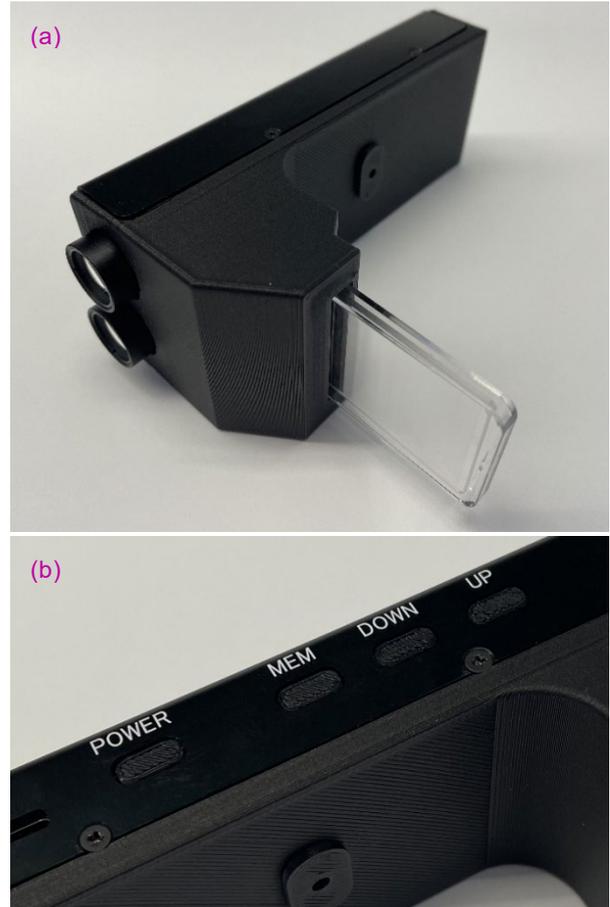


図 11 装置外観  
(a) 装置上面, (b) 装置底面

表 2 装置仕様

フレームレート	10 fps 以上
画像保存	内部メモリ, USBメモリ (USB-A)
電源	USB-C DC5 V
電流	平均 2 A
メモリ	4 GB
ストレージ	16 GB
外形寸法	135×96×55 mm
重量	190 g

装置の外形寸法はディスプレイ部を含めて 135×96×55 mm であり、重量は 190 g である。操作用のボタンはヘルメットを被って使用することを想定してスペースのない装置上面ではなく装置底面に配置した。また、オプションとして屋外使用時、太陽光の強い照り込みや反射があった場合に用いる、外付けの遮光バレルを製作した。遮光バレル装着時の外観を図 12 に、ヘルメットマウント時の装置外観を図 13 に示す。



図 12 遮光バレル装着時の装置外観



図 13 ヘルメットマウント時の装置外観

## 4.2 ソフトウェアの開発

ソフトウェアはハードウェアで取得した画像を水素火炎の可視化画像として出力する機能が求められる。本装置では2つの近赤外面像の合成処理を行う手法を用いる。CMOS素子で撮像した画像はR・G・Bの3つのチャンネルで出力される。差分・二値化処理を行うには輝度情報を持つグレースケール画像にする必要がある。グレースケール化には複数の計算方式があるが、本研究開発では式(1)を用いている。輝度値 $Y$ は、

$$Y = 0.299I_R + 0.587I_G + 0.114I_B \quad (1)$$

で表される。ここで $I_R, I_G, I_B$ はRGB値の赤、緑、青であり、変換後のグレースケール画像は0~255までの256段階の階調を持つ。

差分にて背景を除きたい場合、2つの画像の背景の輝度値を同等に補正する必要がある。本装置では、両画像の輝度の中央値を取得し、その比率

で一方の画像の輝度値の補正を行っている。装置ではこの補正值をゲイン値として示している。

差分後の画像は2つの画像の輝度差の情報を持つ。2つの画像は異なる波長の光を取得しているため、補正して差分を行っても背景の物体に輝度差が残る。背景に残った輝度差は水素火炎の可視化では誤検知の要因となるため、輝度値をある値で二値化処理することでこれを除している。装置ではこの値を閾値として示している。

両処理後、輝度値の残った領域を赤色に着色し、背景画像と重ねることで水素火炎の可視化画像を出力している。

また、水素火炎の可視化時、ソフトウェアには画像処理、各種設定・調整、データの保存等の機能が求められる。

以上の機能についてユーザビリティを考慮して、ソフトウェアの設計・開発を行った。図14にソフトウェアの画面構成を図15に比較のため可視カメラにて別途撮影した同等の画角の撮像環境画像を示す。



図 14 ソフトウェアの画面構成



図 15 撮像環境

図 14, 及び図 15 は画像前方のガストーチから水素ガスを放出し着火している。図 14 のように、抽出した水素火炎領域は赤色に着色された後、画面上に表示される。装置は右目片眼に装着しての使用を想定して開発を行った。視野の端の情報を視認する場合は大きく眼球移動をする必要があり、視認性の点で妥当ではないため、水素火炎の可視化画像は画面左側に配した。水素火炎の可視化画像のズームや、撮像、各種設定は、装置底部の操作作用のボタンにて行う。

## 5. 機能評価

開発した装置にて行った機能評価試験の試験状況を図 16 に、水素火炎の撮像結果を図 17 に、比較のため、可視カメラにて別途撮影した火炎の撮像結果と同等の画角の可視画像を図 18 に示す。



図 16 機能評価試験の状況



図 17 水素火炎の撮像結果



図 18 撮像結果と同等の画角の可視画像

機能評価試験は 3 月、昼間屋外環境下にて実施した。装置と水素火炎の着火位置は 10 m 離れた。水素ガスは  $\phi 2$  mm のノズルから放出し、火炎長が約 4 cm になるように流量を調整した。撮像方向は北向き、当日は微風であった。

図 18 の可視画像上では水素火炎が視認できないが、図 17 の装置の撮像結果では水素火炎の形状がはっきりと視認できている。収差による周辺光量の減少や背景のボケもなく非常に明瞭な水素火炎の撮像結果が得られた。

## 6. まとめ

著者らがこれまでに開発した火炎可視化装置と、スマートデバイスを融合させた、肉眼で視認できない水素火炎をハンズフリーで可視化するウェアラブルデバイスの研究開発を行い、開発した実機を用いて行った機能評価試験により、水素火炎の可視化機能を確認した。

今後は継続して研究開発を実施し、装置の装着性の向上や、ソフトウェアのユーザビリティの向上、改善点の抽出を行うと共に、現場で機能する安全製品の提供を目指し、より現場使用に即した製品の開発を行う予定である。

## 【謝辞】

本研究開発の一部は、福岡県水素グリーン成長戦略会議令和 4 年度製品開発支援事業として実施したものであり、ご協力いただいた関係各位に深く感謝の意を表します。

**【参考文献】**

- 1) 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議：  
「水素基本戦略」, pp.24-25 (2017).
- 2) 高圧ガス保安協会:「水素スタンドにおける事故の注意事項について」, pp.2-3 (2020).
- 3) 高圧ガス保安協会:「高圧ガス事故事例データベースにおける水素スタンド関連の高圧ガス事故（平成30年まで）」
- 4) 鈴木健吾:「各種ガスセンサと水素検知・警報システム」, 日本燃焼学会誌, Vol.61, No.195, pp.30-36 (2019).
- 5) 北口久雄:「水素用ガスセンサの現状と課題」, 水素エネルギーシステム, Vol.30, No.2, pp.35-40 (2005).
- 6) 三木啓史, 守家輔, 市川幸司, 二宮英樹, 関丈夫, 願下敏彦, 菅守叶, 武智啓, 「水素火炎・水素ガス可視化技術の開発」 水素エネルギーシステム, Vol.30, No.1, pp.53-58 (2005).
- 7) 福地哲生, 二宮英樹:「OH発光の差分画像計測による水素火炎の可視化」, 電気学会論文C, Vol.127, No.5, pp.692-698 (2007).
- 8) 新岡嵩, 河野通方, 佐藤順一:「燃焼現象の基礎」, オーム社, pp154-156
- 9) H. L. Barnes and H. S. Smith:「Flame Imaging System」U.S.Patent, No. 5,726,632 (1998).
- 10) 幸田清一郎, 田久保嘉隆:「火炎の分光学的計測とその応用」, 学会出版センター, pp113-118
- 11) ASTM G 173-03 Reference Spectra Derived from SMARTS v. 2. 9. 2.