

令和 4 年 5 月 30 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02388

研究課題名(和文) 化学物質の空間分布情報をセンシングする光ファイバシステムの構築

研究課題名(英文) Development of a fiber-optic sensor system for distributed chemical sensing

研究代表者

岡崎 慎司 (Okazaki, Shinji)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：50293171

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,200,000円

研究成果の概要(和文)：光ファイバケーブル自体を水素感応膜で修飾したライン型光ファイバ水素センサデバイスの開発を行った。まず、白金触媒担持酸化タングステン膜の水素曝露時の光学的応答特性を明確化するとともにこれを固定化してエバネッセント波吸収型センサデバイスを実現するための作製技術の最適化を行った。一方、グレーティング型センサデバイスを実現するために白金担持シリカの水素曝露時の熱的応答特性を明確化するとともに、これを固定化した多点センサデバイスの開発に成功した。さらに、宇宙ロケットエンジンの燃焼試験時の水素漏洩検知にフィールド適用し、環境温度の急激な変動にも影響を受けず、漏洩した水素を捉えられることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

水素は次世代エネルギーキャリアとして注目を集めているが、爆発危険性を有するため、信頼性の高い漏洩検知技術が必要不可欠である。本研究では、光ファイバケーブル自体を水素感応膜で修飾した分布型光ファイバ水素センサデバイスを提案し、水素感応物質である白金触媒担持酸化タングステン及びシリカ膜の水素応答特性の明確化、作製技術の最適化、及び光ファイバへの固定化技術の確立に資する多くの知見を得た。空間的に広い範囲を容易にモニタリング可能で、かつ高信頼性と低コストを両立した新しい広域水素漏洩監視システムの技術的基盤の確立と安全な水素社会の構築に大いに貢献できるものと期待される。

研究成果の概要(英文)：A line-type optical fiber hydrogen sensor device in which the optical fiber cable itself is modified with a hydrogen sensitive film was developed. As a first step, the optical response characteristics of the platinum-loaded tungsten oxide film upon exposure to hydrogen gas were clarified and the fabrication technique was optimized to realize an evanescent wave absorption type sensor device by immobilizing this film onto fiber-core surface. On the other hand, in order to realize a fiber Bragg grating type sensor device, the thermal response characteristics of platinum-loaded silica to hydrogen gas were evaluated and succeeded in developing a multi-point sensor device by fixing small column which is packed with platinum-loaded silica powder onto FBG temperature sensor device. Furthermore, it was applied to the field combustion tests of space rocket engines, and it was shown that leaked hydrogen can be captured without being affected by sudden fluctuations in environmental temperature.

研究分野：化学センサ

キーワード：光ファイバ水素センサ デバイス エバネッセント波吸収型 ファイバグレーティング型 白金担持酸化タングステン 白金担持シリカ

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

水素は次世代エネルギーキャリアとして注目を集めている。しかし、爆発危険性を有するため、大型貯蔵設備やパイプライン等を対象に広い領域をモニタリング可能な低コスト・高信頼性のセンサシステムが必要とされている。現在実用化されている水素センサは、接触燃焼式あるいは半導体式が主流である。これらは、触媒を担持したアルミナや金属半導体を焼結した微小なビーズ状デバイスを数百度に加熱して使用するため、スポット計測型のセンサデバイスである。従って、空間的に広い領域の水素漏洩をきめ細かく監視するためには数多くのデバイスが必要となるため、システムの肥大化や高コスト化を招くことになる(図1)。さらに、電気的手法を用いるため、爆発危険性のある水素などを計測対象とする場合は防爆構造にしなければならないことも大きな欠点となっている。さて、化学物質の空間的な分布を捉えることは一般的には容易ではないが、漏えいしたガス成分が適当な波長領域に強い吸収を有するような化学成分であれば、空間的濃度分布は赤外を含む光学カメラ等によって捉えることが可能であり、近年その技術は大きく進展している。しかし、水素のように吸収を持たない化学成分の分布を3次元にかつ簡便に実時間計測することは、依然として難度が極めて高く、空間的に広い範囲のガス漏洩検知を高信頼性が簡便・安価に構築できるような新しい技術によるブレークスルーが求められている。

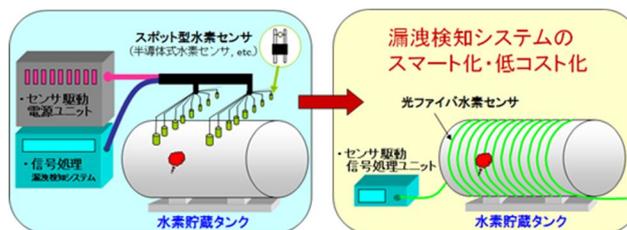


図1 分布型水素センサデバイスを用いた広域水素漏洩検知システム

2. 研究の目的

本研究では、空間的に広い範囲を容易かつ低コストでモニタリング可能な高信頼性水素漏洩監視システムを、光ファイバケーブル自体を水素感応膜で修飾したライン型光ファイバ水素センサデバイスにより実現する。そのために白金触媒担持酸化タングステン及びシリカ膜の作製及び固定化技術等を駆使して、光ファイバのコア及びクラッド外周に水素感応膜を形成させた高感度かつ耐環境性の高い堅牢なエバネッセント型及びグレーティング型センサデバイスを開発する。さらに、宇宙ロケット用液体水素燃料タンク・配管システムの漏洩検知という極めて高い性能が求められるフィールドに適用し、実適用性に関する先導的な知見を得る。

3. 研究の方法

これまで研究代表者が培ってきた白金担持酸化タングステン及び白金担持シリカ膜作製技術を土台とし、その高度化・実適用性向上を目指した評価・検討を行うとともに、図2に示した構造のセンサデバイスの開発を行った。エバネッセント波吸収型センサデバイスは図2(a)の構造に示したとおり、水素感応膜を固定化した部分全てが検知部となり、配管など長い領域全体を監視する場合に威力を発揮する。一方、光ファイバグレーティング型センサデバイスは図2(b)のようにコア内に周期的高屈折率領域が形成された領域が検知部となり、フランジ部等、リスクの高い領域をターゲットとした高感度検知が可能である。これらのセンサデバイスを1本の光ファイバケーブル上に複数直列配置したセンサシステムを構築し、時間及び波長領域での測定システムによって得られる情報を解析することで空間的濃度分布計測の可能性を実証する。さらに最終段階として、1本の光ファイバケーブルに水素センサデバイスを複数配置した多点型水素センサシステムを構築し、JAXA 能代試験場で実施される液体水素を使用したロケット性能評価試験に組み込む形でのフィールド実証試験を行うことでセンサシステムの有用性を示す。

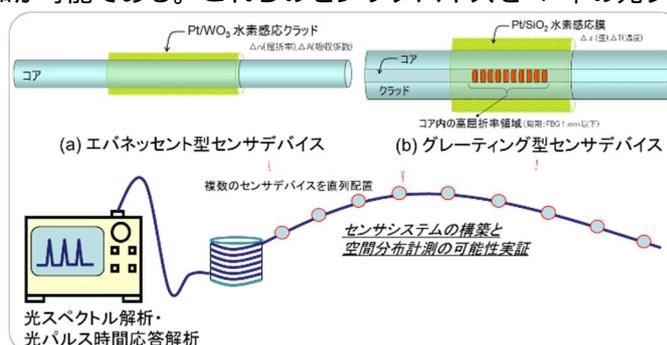


図2 分布型光ファイバ水素センサシステムを構築・実証するためのアプローチ

4. 研究成果

水素と選択的に反応して光学特性が変化する白金触媒担持酸化タングステン(Pt/WO_3)膜及び水素の接触燃焼反応による大きな反応熱を発生させることができる白金担持シリカ(Pt/SiO_2)膜の詳細な特性評価を行った。まず、エバネッセント型センサの水素感応物質となる白金担持酸化タングステン膜の製膜性向上を目指して、ゾルゲル法の作製プロセスにおいて界面活性剤を中心とした様々な添加物を加え、その光学特性変化及び水素感応特性を、190nm から 2700nm までの広い波長範囲で測定した。0.5 M の Na_2WO_4 溶液を H^+ 型陽イオン樹脂によってイオン交換処理したものにヘキサクロロ白金酸、エタノール、純水および所定量の界面活性剤 Surfynol 465 を混

合した溶液を前駆体溶液とした。これを石英ガラス基板上にスピンコートした後、空气中で2時間乾燥した後、500 にて1時間焼成することで得られた白金担持酸化タングステン膜の分光特性および水素応答特性を評価した。水素曝露前の光学スペクトルを図3(a)に示した。なお、図中のs-500, s-200, s-50, s-5, s-0で示したプロットは前駆体溶液の界面活性剤濃度(13, 5.4, 1.4, 0.14, 0%)に対応する。また、前駆体溶液に界面活性剤やヘキサクロロ白金酸を添加せずに作製したサンプルをs-WO₃、石英ガラスのみの参照スペクトルをs-SiO₂と表示した。作製したサンプルは空気雰囲気下では800~2700nmの広範な領域で高い透過率を有していることがスペクトルより確認できる。なお、サンプルs-0及びs-WO₃については溶液滴下後に2分間放置後にスピンコートしたため、波長200nmの吸光度が増加したが、これは膜厚増加による影響と考えられる。一方、UV領域における吸光度増加については薄膜中に分散されたPt微粒子の影響も大きいと考えられる。また、Ptを含まないサンプルs-WO₃では波長800nmにおいて、5価と6価タングステンの原子間遷移吸収によるものと考えられるブロードな吸収が認められた。次に、純水素曝露を行った場合のサンプルs-200のスペクトル変化挙動を図3(b)に示す。波長範囲約500~2690nmで水素曝露した際にタングステンブロンズの形成による顕著な吸光度の上昇がみられた。なお、着色前と空気復帰後のスペクトルは完全に一致しており、ヒステリシスは観察されなかった。なお、データでは示していないが、1300nmにおける吸光度変化量を比較したところ、サンプルs-500以外はほぼ同程度であったが、s-500については大きく減少した。空気雰囲気下と水素曝露後の透過率の変化量を ΔT^* と定義して、ガスクロミック特性の水素濃度依存性を調べた結果を図3(c)に示す。界面活性剤濃度は2桁の範囲で変化させたが、すべてのサンプルにおいて良好な水素応答が観察された。水素濃度には対数的相関関係がみられ、低濃度域では変化量が大きく、高濃度域で飽和傾向を示し、相関係数はs-5~500では約0.9、サンプルs-0では0.8であった。なお、バックグラウンドのノイズを考慮してSN比=3とした検出下限はサンプルs-200において0.09 vol.%であった。透過率減少量に関しては、サンプル0, 5, 50, 200では大きな差が見られなかったが、サンプル500は変化量が大きく低下した。このことから、界面活性剤を5%以上添加すると酸化タングステン薄膜のガスクロミック性能が低下するものと考えられる。

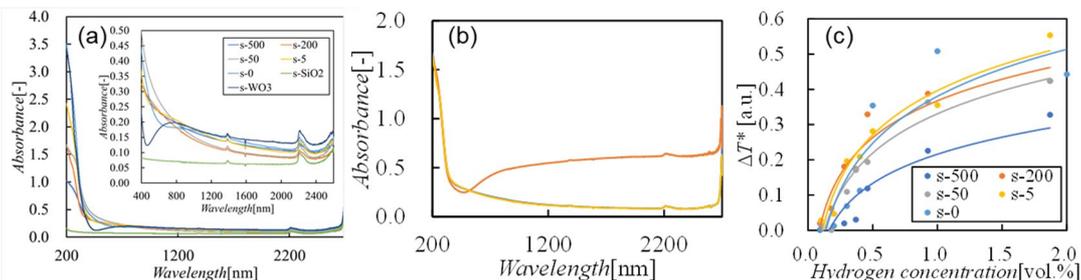


図3 白金担持酸化タングステン膜の分光感度及び水素応答特性

次に、様々な雰囲気下での水素曝露による透過率時間変化(図4)を比較すると、湿潤空気雰囲気以外では良好な水素応答が観察された。アルゴン雰囲気では乾燥と湿潤雰囲気で透過率変化量の差が見られないのに対し、空気雰囲気では乾燥雰囲気での応答は良好なもの、湿潤空気での透過率変化量は大きく減少した。このことから、空気雰囲気下ではガスクロミック挙動の低下に水分が著しく影響を与えていると考えられる。アルゴン雰囲気下で応答速度を比較すると、湿潤雰囲気の方が乾燥雰囲気よりも1.6~6.4倍ほど90%応答速度が速かった。従って、アルゴン雰囲気では水分の影響でガスクロミック反応が加速されるものと考えられる。なお、データは示していないが、その他の界面活性剤の添加効果も調べた結果、臭化ヘキサデシルトリメチルアンモニウムは350における焼成条件で復帰特性良好な水素応答特性が得られた。一方、ポリオキシエチレンラウリルエーテルの場合は350、500における焼成条件ともに応答性を示さなかった。おそらく触媒毒としての作用があるものと考えられる。最後に、ドデシルベンゼンスルホン酸ナトリウムの場合は、500における焼成条件では水素応答性を示さなかったが、350における焼成条件

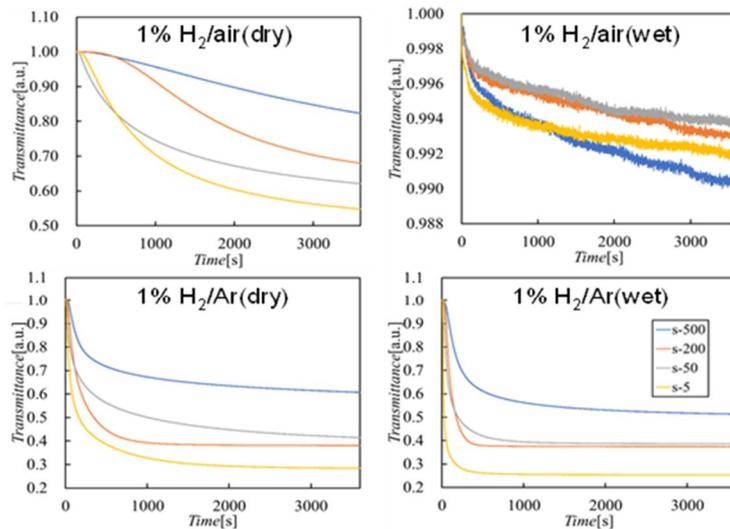


図4 様々な雰囲気下における水素応答特性

では良好な水素応答性を示し、低温焼成により光ファイバにダメージを与えず、水素感応膜を固定化できる可能性が示唆された。

次に光ファイバへの固定化について検討した。エバネッセント波吸収型のセンサデバイスを実現するためには、光ファイバに沿って、そのコア上に水素感応膜を連続的に固定化する必要がある。そこで、石英コアにフロロアクリレートクラッドが被覆された光ファイバを選択し、熱分解や溶剤によるクラッド除去を試みた。その結果、エタノールアミンを用いることでクラッドを容易に除去できることが分かった。次に、水素感応膜を石英コア部に固定化した検出長 50 cm のセンサデバイスを試作したところ、光損失が約 3 dB で、1 vol.% の水素に対しても良好な応答特性が得られた。さらに、シリカ膜をセンサデバイスに積層した結果、水素応答性には大きな影響を及ぼさずセンサ保護被覆として有望であることが分かった。

光ファイバグレーティング型センサの開発においては、センサ部に固定化する水素感応物質として、フュームドシリカを白金担体とする触媒粉末の作製方法の最適化と水素応答特性を評価した。図 5(a) に様々な粒径のシリカで作成した水素感応触媒粉末をガラス管に充填し、空気雰囲気下 1 vol% 水素に曝露した場合に水素の接触燃焼反応による発熱で生じる温度上昇値の経時変化挙動を示す。粒径が 7 nm のフュームドシリカを使用した白金担持シリカの活性は非常に高く、1 vol% 水素に曝露することで約 35 の温度変化が得られた。粉末と充填したガラス管の熱容量が大きいため、90% 応答時間は 300 s 程度であるが、触媒量やセンサ構造を工夫することで実際のセンサデバイスの応答特性についてはさらに高速化することが可能である。次に、粒径の異なる担体を用いた場合、粒径が 7 nm のシリカと 200 ~ 300 nm のシリカでは表面積がおおよそ 2 : 1 であるが、温度上昇量もおおよそそれに対応した比率になっていることがわかる。これは担体の表面積が大きくなることで分散された白金触媒自体の表面積も大きくなり、これに比例して反応速度が大きくなったと考えられる。さらに粒径 500 ~ 1000 nm の一般的なシリカ粒子を用いた場合は、温度上昇量がさらに小さくなった。なお、白金の担持効果を明確化するための模擬実験として、乾燥・焼成プロセスを同一として白金とシリカを別々に作製し、それを粉砕混合したものを比較サンプルとして作製して、水素応答性を調べた。その結果、シリカ混合触媒は水素に対しほとんど発熱応答を示さないことが明らかとなった。従って、シリカに担持することで白金が微粒子として分散されて有効面積が増大するとともに担持によって得られるスピルオーバー効果により高い触媒性能を示すものと考えられる。なお、触媒を分散する溶媒として水以外にもエタノールを使用した実験も行った。しかし、その特性はほとんど同じであった。次に空気雰囲気下 0.1 ~ 4 vol% の水素曝露実験を行った (図 5(b))。爆発下限界濃度以下の水素濃度に対して良好な応答が得られていることがわかる。90% 応答時間は 300 s 程度であり、発熱応答、復帰応答ともに 15 分以内でおおよそ熱的な定常状態に達している。爆発下限界の 4 vol% では 129 の温度上昇、1/4 爆発下限界の 1 vol% では 39.8 の温度上昇が見られ、0.1 vol% でも 4.3 ではあるが確かな温度上昇が確認された。また、温度上昇量が大きいため、反応速度の温度依存性が強く現れることが想定されたが、各濃度における温度上昇度と水素濃度には高い直線関係が成立した。これは白金担持シリカ触媒上での水素の接触燃焼反応が水素濃度に対して一次反応であることを示しているが、表面反応速度が非常に速く、水素が表面上で完全燃焼をしているため、水素ガスの触媒表面への物質移動速度が支配因子になっているものと考えられる。なお、触媒特性のばらつきを評価するために同一のプロセスにより作製した 4 サンプルについて空気雰囲気下 1 vol% 水素に曝露してその温度上昇度を確認した結果、 38.4 ± 1.8 の温度上昇度の再現性があることを示した。最後に、水素応答触媒としての安定性を評価するため、繰り返し応答試験を行った。1 vol% 水素曝露を 15 分、空気曝露を 15 分行うサイクルを連続で 6 サイクル行った場合の粉末触媒の発熱応答を規格化してサイクル数との関係を調べたものを図 5(c) に示す。比較的再現性の高い発熱応答挙動を示しているものの、連続で水素曝露を行うと発熱量が徐々に低下することが確認された。これは各サイクルにおいて接触燃焼反応により生成した H_2O が結露も含めて充填層内に蓄積することにより、触媒表面層における物質移動の阻害あるいは吸着による反応阻害作用を及ぼしたことが考えられる。そこで、結露水や水蒸気を十分排除するために水素曝露後に 1 日放置して、その影響を減少させようとして同様の繰り返し水素曝露実験を行った。その結果、連続曝露では応答量が徐々に減少し、1 回の曝露で約 3% の温度上昇度の低下が確認されたのに対し、不連続曝露では温度上昇度の低下量はほとんど認められなかった。従って、触媒粉末の充填層への結露などはセンサ応答を阻害する要因として留意する必要があることが分かった。

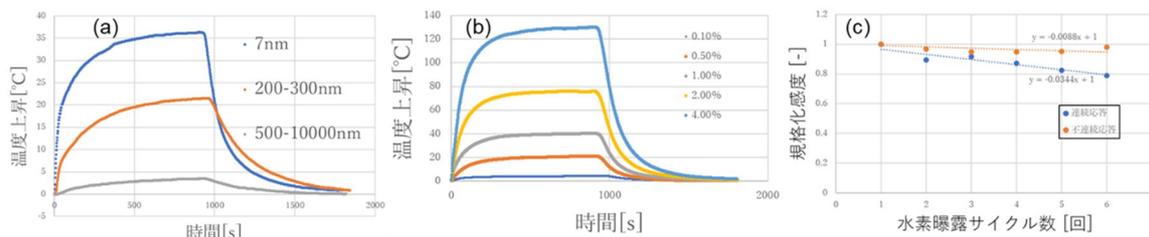
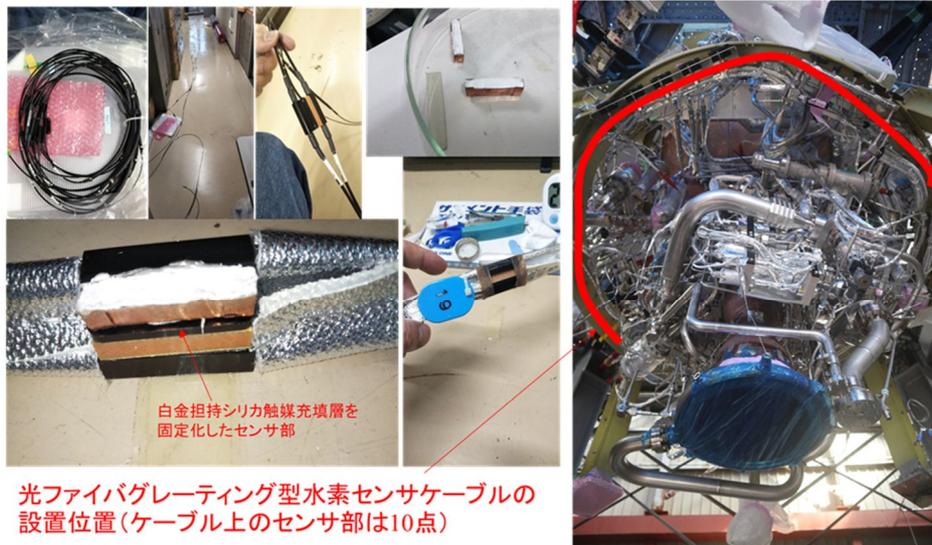


図5 白金担持酸化タンゲステン膜の分光感度及び水素応答特性

この触媒を光ファイバグレーティングに固定化する手法を確立し、光ファイバケーブルにセンサを直列に 10 箇所配置したライン型デバイスを実現した。当該センサを JAXA の試験研究用

小型実験機 (RV-X) に実装し、フィールドにおけるロケットエンジン燃焼試験時のセンサ動作特性を調べた。その結果、実際のロケットエンジン燃料配管システムには、エンジン燃焼試験時に部位により大きな温度分布が生じることが分かった。当初構想していた多点グレーティング型センサデバイスでは全体として環境温度補償用グレーティング素子を数箇所配置することを想定していたが、それだけでは十分ではなく、補償用温度センサと触媒燃焼式グレーティングセンサを部位ごとに一対としてフィールド適用することが高精度の水素漏洩検知・漏洩位置特定に必要なことが分かった。そこで、この点を考慮してデバイス設計・作製を行い、図6のような堅牢性の高い多点 (10点) 水素センサを実現して、フィールド試験を行った。



白金担持シリカ触媒充填層を固定化したセンサ部

光ファイバグレーティング型水素センサケーブルの設置位置(ケーブル上のセンサ部は10点)

図6 作製した多点型光ファイバグレーティングセンサとフィールドへの適用の様子

図7 にフィールドテストにおけるセンサの出力特性を示す。触媒を固定化した検知素子及び対となった温度補償素子自体の出力はフィールド試験中の大きな環境温度の変動により影響を受けていることが分かる。一方、検知素子と補償素子の差動出力(センサ出力)自体は環境温度の急激な変動による影響を抑制し、安定したベースラインが得られており、燃焼試験開始時の水素漏洩を選択的に検知することができた。さらに、このセンサシステムを実フィールドであるロケットエンジン配管部に設置して得られたフィールドデータを図8に示す。各部位に取り付けられたセンサが燃焼試験開始付近で応答しており、様々な部位における水素漏洩挙動を捉えているものと考えられる。今後、高信頼性と低コストを両立した新しい広域水素漏洩監視システムの技術的基盤の確立と安全な水素社会の構築に大いに貢献できるものと期待される。

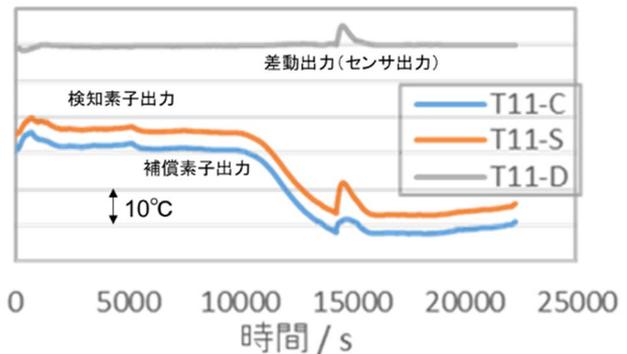


図7 センサの典型的な応答例 (環境温度変動が大きいフィールド環境下)

- 西/南西は注液開始時点から反応あり(T17, T18)
- 東は、着火後に反応 (T14)

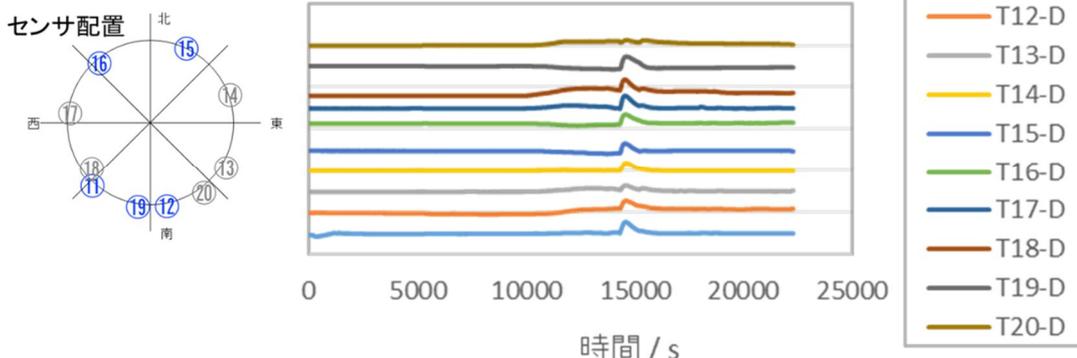


図8 ロケットエンジン燃焼試験に適用した場合の光ファイバグレーティング型水素センサの応答例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nishijima Yoshiaki, Enomoto Kenya, Okazaki Shinji, Arakawa Taro, Bal?ytis Armandas, Juodkazis Saulius	4. 巻 534
2. 論文標題 Pulsed laser deposition of Pt-WO3 of hydrogen sensors under atmospheric conditions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Surface Science	6. 最初と最後の頁 147568 ~ 147568
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.apsusc.2020.147568	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 荒川太郎、岡崎慎司、西島喜明	4. 巻 4
2. 論文標題 シリコン微小リング共振器の高感度センサへの応用	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 光アライアンス	6. 最初と最後の頁 14 ~ 19
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Matsuura Sosuke, Yamasaku Naoki, Nishijima Yoshiaki, Okazaki Shinji, Arakawa Taro	4. 巻 20
2. 論文標題 Characteristics of Highly Sensitive Hydrogen Sensor Based on Pt-WO3/Si Microring Resonator	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 96 ~ 96
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s20010096	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Beni Takaaki, Yamasaku Naoki, Kurotsu Takuma, To Naoki, Okazaki Shinji, Arakawa Taro, Bal?ytis Armandas, Seniutinas Gediminas, Juodkazis Saulius, Nishijima Yoshiaki	4. 巻 4
2. 論文標題 Metamaterial for Hydrogen Sensing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Sensors	6. 最初と最後の頁 2389 ~ 2394
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acssensors.9b00980	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 岡崎 慎司、坂本 麗、川田 博之
2. 発表標題 ゾルゲル法における添加物が白金担持酸化タングステン薄膜の水素ガスクロミック特性に及ぼす影響
3. 学会等名 電気化学会第88回大会（2021年3月22日（月）～24日（水）、オンライン開催） 2P01(一般講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋宏輔, 北本和也, 水谷忠均
2. 発表標題 熱膨張アクチュエータのための高精度計測・補正制御技術に関する研究
3. 学会等名 第64回宇宙科学技術連合講演会講演集, 3L08
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木健吾, 宮崎洋, 杠康成, 丸祐介, 八木下剛, 入門朋子
2. 発表標題 水素/酸素分圧比センサのガス検知特性の評価
3. 学会等名 J01106, 2020年度日本機械学会年次大会, オンライン
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 丸祐介, 鈴木健吾, 宮崎洋, 杠泰成, 八木下剛, 入門朋子
2. 発表標題 水素酸素濃度比センサによる水素燃料再使用ロケットにおける漏洩検知の試み
3. 学会等名 J01107, 2020年度日本機械学会年次大会, オンライン
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Okazaki, Y. Nishijima, T. Arai, Y. Maru, T. Mizutani
2. 発表標題 Development of fiber-optic hydrogen sensor devices
3. 学会等名 The 13th Asian conference on chemical sensors (ACCS) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松浦壮佑, 山作直貴, 西島喜明, 岡崎慎司, 荒川太郎
2. 発表標題 Pt-WO3膜とSiマイクロリング共振器を用いた水素ガスセンサー
3. 学会等名 第36回センサ・マイクロマシンと応用システムシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松浦壮佑, 山作直貴, 西島喜明, 岡崎慎司, 荒川太郎
2. 発表標題 Pt-WO3/Si微小リング共振器水素ガスセンサの温度特性評価
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sosuke Matsuura, Naoki Yamasaku, Yoshiaki Nishijima, Shinji Okazaki, and Taro Arakawa
2. 発表標題 Sensing Characteristics of Hydrogen Gas Sensor Based on Pt-WO3/Si Microring Resonator
3. 学会等名 The 8th International Symposium on Materials Science and Surface Technology (MSST) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 丸 祐介, 黒田 亮, 稲谷 芳文
2. 発表標題 パターン認識を用いた水素漏洩箇所同定の試み
3. 学会等名 日本機械学会年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木 健吾, 宮崎 洋, 杠 泰成, 丸 祐介
2. 発表標題 セリア厚膜型センサの真空中での極微量水素検知性能について
3. 学会等名 日本機械学会年次大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	水谷 忠均 (Mizutani Tadahito) (00401232)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・研究領域主幹 (82645)	
研究分担者	丸 祐介 (Maru Yusuke) (20524101)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授 (82645)	
研究分担者	西島 喜明 (Nishijima Yoshiaki) (60581452)	横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授 (12701)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------