

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2021

課題番号：20K21042

研究課題名（和文）高圧ロケット燃焼における気液混相拡散火炎のレーザー誘起蛍光計測の研究

研究課題名（英文）Laser-induced fluorescence measurement of gas-liquid multiphase diffusion flames in high-pressure rocket combustion

研究代表者

小林 秀昭（Kobayashi, Hideaki）

東北大学・流体科学研究所・教授

研究者番号：30170343

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：ロケット燃焼を想定した高温高圧環境下の気液混相水素燃焼OH-平面レーザー誘起蛍光計測の技術開発を行った。5.0 MPaまでの環境でガスH<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>拡散火炎を形成してOH(2,2)蛍光バンド計測を実施しS/N比が4を上回る鮮明な火炎構造を取得できた。3.0 MPaにおける気液混相ガス水素/液体酸素燃焼では、OH(2,2)蛍光バンド計測を適用しS/N比が2程度で火炎構造観察が可能となった。酸素濃度60%まで酸素富化した0.5 MPaまでのメタン/酸素/窒素予混合気の燃焼実験では、OH(2,0)バンド励起および双方向LIF手法を組み合わせることでOH濃度定量計測を実施し、数値解析結果と良好な一致を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ロケット推進系の高性能化、低コスト化に向けて技術開発が続けられているが、ロケット燃焼環境は100気圧、3000Kを超えるような超高压高温環境であり、現象解明と燃焼数値解析の検証に活用できる計測技術が乏しい。計測技術の中でも平面レーザー誘起蛍光法は、火炎の断面に対してラジカル濃度分布を計測できることから、燃焼数値解析の検証に適しているものの、高圧下でS/Nが大きく低下する課題があった。本研究の成果はその適用範囲を大きく拡張しロケット燃焼技術の開発に貢献することが期待される。

研究成果の概要（英文）：OH planer-laser-induced fluorescence measurement for gas-liquid multiphase hydrogen combustion at high pressure and high temperature applicable for rocket combustion was developed. OH(2,2) fluorescence band measurements were performed for gas H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> diffusion flames at up to 5.0 MPa, and a clear flame structure with S/N ratio greater than 4 was obtained. OH(2,2) fluorescence band measurement was also applied to the gas-liquid multiphase hydrogen/liquid oxygen combustion at 3.0 MPa, and the flame structure could be observed with S/N ratio of about 2. In combustion experiments of methane/oxygen/nitrogen premixed flames up to 0.5 MPa with oxygen enrichment up to 60%, OH(2,0) band excitation and bi-directional LIF technique were combined for quantitative measurement of OH concentration, and good agreement was obtained with numerical analysis.

研究分野：航空宇宙工学，燃焼工学

キーワード：OH-PLIF ロケット燃焼 水素燃焼 高圧燃焼 気液混相燃焼

1. 研究開始当初の背景

火炎構造は燃焼特性や火炎の安定性を理解するうえで重要な因子である。これまで、火炎構造を観察するために様々な計測手法が利用されてきた。代表的な手法には、流体の屈折率の違いを応用したシュリーレン法や、特定の化学種の発光領域を撮影する自発光計測などが挙げられる。しかし、これらを利用して得られた火炎構造は撮影方向に対して積分されるため、火炎の内部構造は取得できない。これに対し、OH平面レーザー誘起蛍光(OH-PLIF)計測は火炎の断面構造を取得できる代表的な計測手法であるが、10 MPaを超えるようなロケット燃焼条件などの超高压環境下では計測 S/N 比が著しく低下するため、その適用実績は乏しい。

2. 研究の目的

本研究では、ロケット燃焼を想定した高压環境における気液混相水素燃焼の基礎現象の解明に向けた OH-PLIF レーザー分光計測技術の開発を行うことを目的とする。高压ロケット燃焼は実験自体が困難であることや極限環境下における非接触計測技術が未発達であることからその現象が十分に解明されておらず、数値解析研究の検証データも限られている。OH-PLIF 計測により取得できる瞬時火炎断面の情報は、他の計測手法で得ることは困難であり、高压燃焼器の設計に有益な基礎データとなる。

3. 研究の方法

本研究では、ガス水素(GH<sub>2</sub>)/ガス酸素(GO<sub>2</sub>)同軸拡散火炎および GH<sub>2</sub>/液体酸素(LO<sub>x</sub>)同軸拡散火炎を対象とする。GH<sub>2</sub>/GO<sub>2</sub>燃焼および GH<sub>2</sub>/LO<sub>x</sub>燃焼に用いた実験装置を図1に示す。図1aのガス燃焼に使用する供試体はリセスの無い設計であり、火炎基部を計測することができる。容器には光学計測用の石英ガラスが3面に取り付けられている。ガス燃焼の雰囲気圧力は1~5 MPaとした。容器内の加圧には窒素を利用した。GH<sub>2</sub>およびGO<sub>2</sub>の質量流量比(O/F)は8になるよう流量条件を設定した。図1bのGH<sub>2</sub>/LO<sub>x</sub>燃焼に使用する供試体には火炎を安定化する目的で5.3 mmのリセスが設けられている。また、LO<sub>x</sub>ポスト内径は5.3 mm、外径は6.3 mmおよび水素噴射口外径は8.8 mmである。スロートは直径16 mmであり、燃焼圧力3 MPaにおいて実験を実施した。計測窓は4面取り付けられており、それぞれの可視化範囲は23 mm×16 mmである。

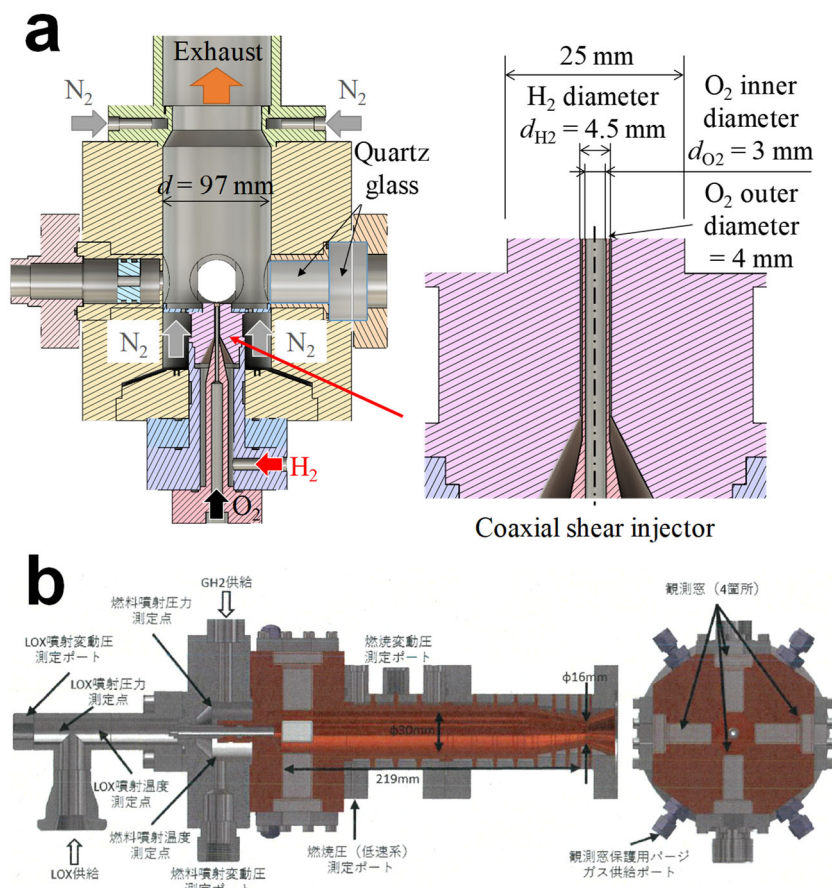


図1 (a) GH<sub>2</sub>/GO<sub>2</sub>燃焼用の高压試験設備. (b) GH<sub>2</sub>/LO<sub>x</sub>燃焼用の高压試験設備

OH-PLIF 計測に使用した光源は、Nd:YAG レーザー (Spectra Physics, PRO-250DR-KI) および色素レーザー (Sirah, Precision Scan) の組み合わせである。発振周波数は 10 Hz であり、最終的なレーザー波長は OH(2,0)バンド励起 (263 nm 付近) の任意のブランチに調整することができる。レーザーエネルギーは約 15 mJ/pulse であり、シリンダリカルレンズを用いてそれぞれの実験に適したレーザーシート長を形成することができる。蛍光の検出には、ICCD カメラ (Andor, USB-iStar), UV レンズ (Nikon, UV-105 mm F4.5) および光学フィルターから構成される受光システムを用いた。ICCD の計測周期は 10 Hz およびゲート幅は 20 ns である。取得される PLIF 画像の空間分解能は 50  $\mu\text{m}$  前後である。図 2 に使用した光学フィルターの性能を示す。図中には各種 OH の発光スペクトルが示されている。光学フィルターは半値幅が 10 nm であり、それぞれのピーク波長 (290 nm, 320 nm) の透過率は概ね 70% である。

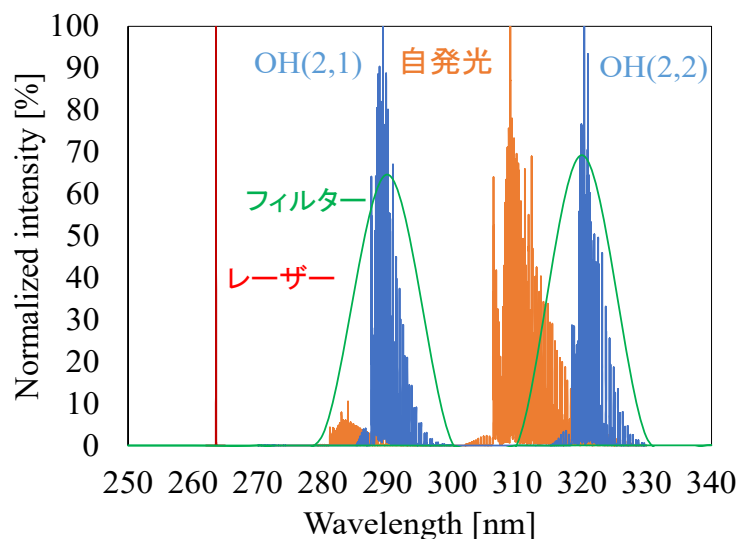


図 2 光学フィルターの性能および OH の発光スペクトル

本研究では、水素( $\text{H}_2$ )/空気(Air)予混合火炎およびメタン( $\text{CH}_4$ )/酸素( $\text{O}_2$ )/窒素( $\text{N}_2$ )予混合火炎を対象とした燃焼実験を実施した。それぞれの火炎を形成するために使用した準一次元バーナーを図 3 に示す。図 3a はマッキーナバーナーと呼ばれる校正用バーナーであり、 $\text{H}_2$ /Air 予混合火炎に使用した。焼結金属の直径が 60 mm であり、外周の焼結金属からはシールドガスとして  $\text{N}_2$  を流した。流量条件は先行研究[1]を参考にし、 $\text{H}_2$  を 21.1 L/min で一定として空気流量を調整することで当量比を 0.7 から 1.0 まで変化させた。冷却水は 16 $^\circ\text{C}$  に設定し、1 L/min 流した。図 3b は  $\text{CH}_4$ / $\text{O}_2$ / $\text{N}_2$  混合火炎で使用する高圧燃焼用の多細孔バーナー[2]である。圧力条件は 0.1~0.5 MPa とした。本試験の予混合火炎は酸素富化火炎であり、 $\text{O}_2$  および  $\text{N}_2$  の体積流量比を 3:2 に設定した。当量比は  $\text{CH}_4$  の流量を変化させることで当量比を 0.6 から 1.0 まで調整した。冷却水は 20 $^\circ\text{C}$  に設定し、2.5 L/min 流した。

予混合火炎を対象とした OH-PLIF には、Nd:YAG レーザー (Lotis 社, LS-2174N) および色素レーザー (LiopTEC 社, Liopstar-E & LSEH) の組合せを使用した。発振周波数は 10 Hz およびレーザーエネルギーは 6 mJ/pulse である。ICCD カメラとレンズ系は上記と同一のものを使用した。光学フィルターは透過率の改善されたものを使用しており、ピーク波長 290 nm の透過率は約 80 程度であり、半値幅は 11 nm である。

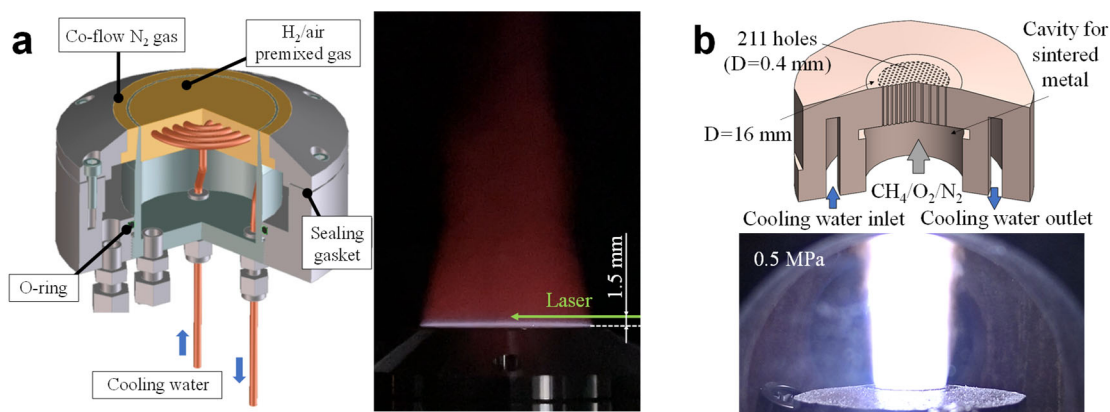


図 3 (a)マッキーナバーナーの概略図, (b)多細孔バーナーの概略図

#### 4. 研究成果

図4に  $\text{GH}_2/\text{GO}_2$  燃焼試験で取得された単発の OH-PLIF 画像を示す. 各圧力において OH の蛍光分布は鮮明に撮影されており, ロケット燃焼特有の強烈な自発光の干渉はほとんど無いことが確認できる. 励起線は  $\text{Q}_1(9)$  枝を使用した. 本研究では, 火炎基部を高さ 3 mm までとした. この領域では火炎が比較的安定する層流部であるため, 反応帯の指標として使用した. 反応帯は噴射流量が大きい条件ほど薄くなり, 圧力が高い条件ほど厚くなる傾向を示した. 反応帯の厚みは火炎基部の安定性に関わる指標[3]として挙げられており, 酸素管のリップ幅より厚い場合, 火炎は不安定化する. 本研究の全条件では反応帯がリップ幅より薄かったため, 火炎は噴射器に安定化していた. しかし, 5 MPa の低流量条件では反応帯の厚みがリップ幅に近づいており, 低圧条件と比較して保炎位置にばらつきが生じた. よって, 流速比を一定として噴射流量を変化させた場合, 高流量ほど火炎の安定化に繋がると考えられる.

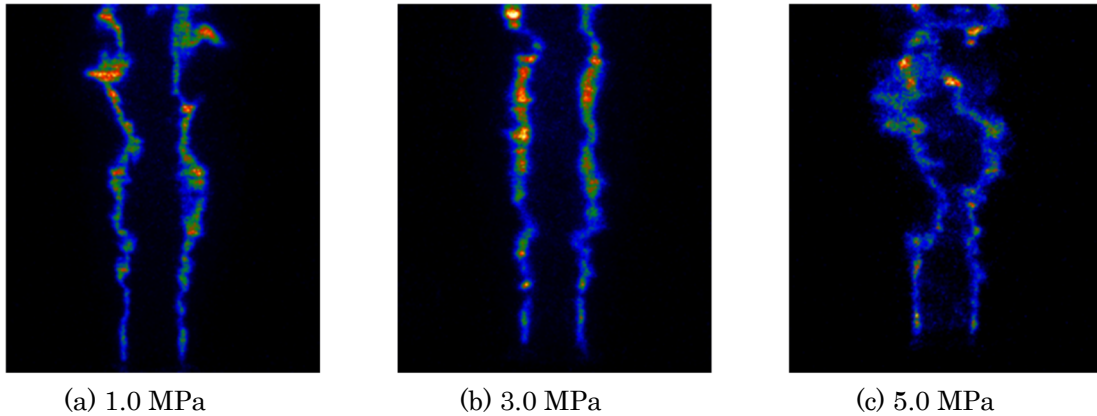


図4 各圧力における OH-PLIF 計測結果

図5に OH(2,1)バンド蛍光および OH(2,2)バンド蛍光を撮影した PLIF 画像を示す. 従来, 高圧ロケット燃焼の撮影には OH(2,1)バンド蛍光が適していると考えられていた[4,5]. しかし,  $\text{GH}_2/\text{LO}_x$  燃焼では液相が計測領域に存在することによって, 強烈な散乱光が生じ, 計測 S/N 比が著しく低下することが判明した. 散乱光の主な原因はミー散乱および液体酸素由来のラマン散乱であると考えられる. これらを回避する手段として, レーザー波長(約 263 nm)および液体酸素のラマン散乱(約 274 nm)から OH の蛍光スペクトルが十分離れている OH(2,2)バンド蛍光(320 nm)が適していると推測された. 図5は従来の OH(2,1)バンド蛍光と OH(2,2)バンド蛍光の S/N 比を比較するために撮影されたが, OH(2,2)バンド蛍光の計測も超高压燃焼において十分使用可能であることが示された.

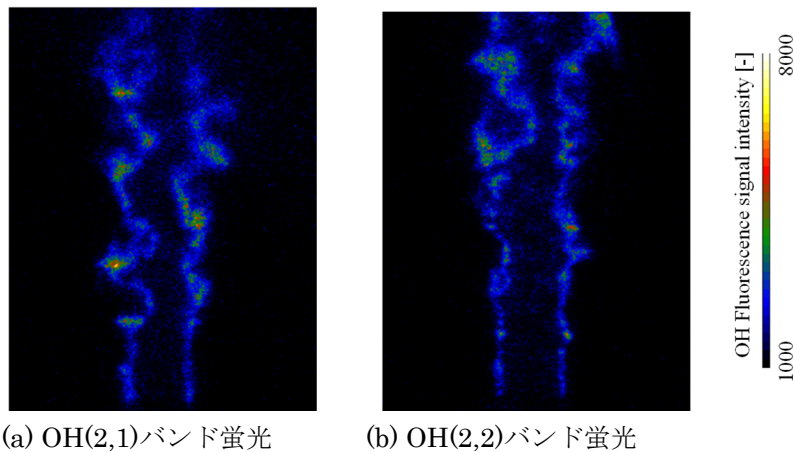
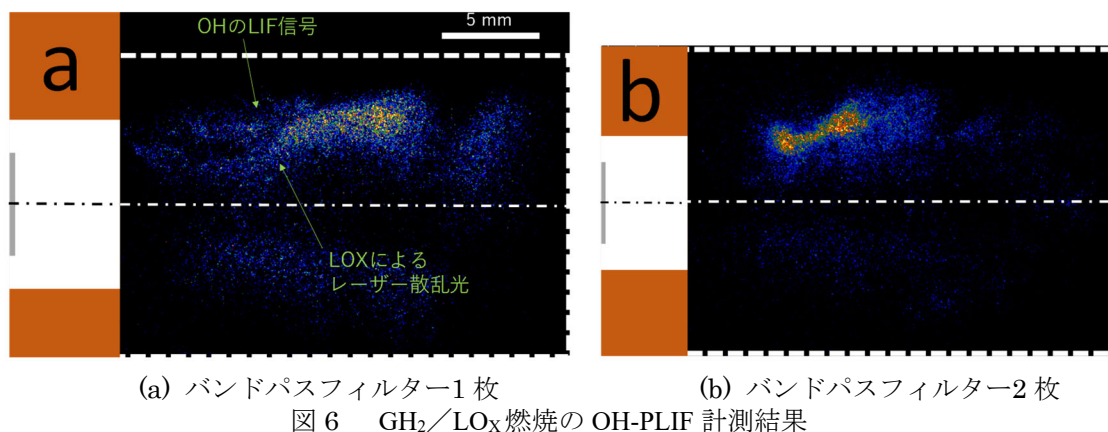


図5 異なる OH 蛍光バンドの PLIF 画像. 圧力条件は 3.0 MPa

図6に  $\text{GH}_2/\text{LO}_x$  燃焼の OH-PLIF 計測結果を示す. 励起線は  $\text{Q}_1(6)$  枝を使用した. 撮影したスペクトルは OH(2,2)バンド蛍光である. 図6aは, 半値幅 10 nm および中心波長 320 nm のバンドパスフィルター1枚を組み込んだ光学フィルター系を使用した PLIF 画像である. 図中に示されるように, OH の蛍光信号および  $\text{LO}_x$  の界面において生じる散乱光のノイズが両方映り込んでいる. 図6bはバンドパスフィルターおよびカットオフ波長 305 nm のハイパスフィルターをそれぞれ1枚ずつ追加して撮影された PLIF 画像である. 信号強度を上げるため, レーザーシート幅も狭められている. 図中には  $\text{LO}_x$  の界面において生じる散乱光の干渉はほとんど確認されず, OH の蛍光信号のみの取得に成功したと考えられる. 今回の試験で取得された PLIF 画像は撮影領域が限られたものの, 本研究において提案した OH(2,2)バンド蛍光を使用する OH-PLIF は高圧  $\text{GH}_2/\text{LO}_x$  燃焼条件に対して, 有効な計測手法であることが示された. 今後は光学フィルターの最適化とレーザー光学系の調整により鮮明・撮影領域の広い計測が可能であると考えられる.



本研究では、高圧ロケット燃焼条件におけるOH濃度の定量計測を可能とする手法として、OH(2,0)バンド励起双方向LIF手法を提案した。当手法は超高压燃焼に適したOH(2,0)バンド励起手法およびクエンチング項を無視できる双方向LIFを組み合わせた点において新規性が認められる。本手法を検証するため、まず大気圧のマッキーバーナーを対象としたOH濃度計測を実施した。図7にマッキーバーナーを使用した実験で取得されたOH濃度の計測結果および数値計算結果を示す。計測位置はバーナー表面から高さ1.5 mmである。エラーバー(標準偏差)が比較的大きい要因としては、OH(2,0)励起の吸収強度が小さいことおよびOH濃度が小さいことが挙げられるが、高圧燃焼ではOH濃度が高くなるためエラーバーは小さくなると推測される。図7に示される実験結果のエラーバーの範囲内に数値計算結果が収まっている。実験の代表値と数値計算結果の差異は20%程度であり、比較的良好一致を示していることが確認できる。また、OH濃度の当量比依存性も実験と数値計算結果が定性的に一致を示しており、当手法を用いたOH濃度の推定が十分可能であることが示された。

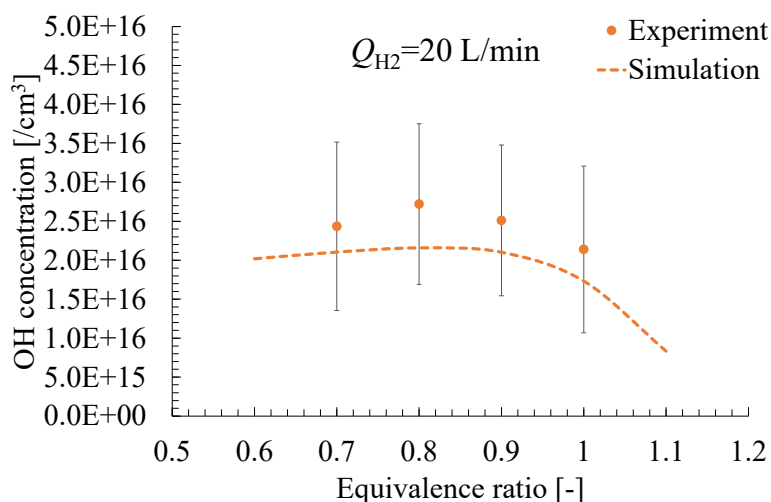


図7 マッキーバーナーのOH濃度計測結果および数値計算結果の比較

<参考文献>

- [1] S. Prucker, W. Meier, W. Stricker, A flat flame burner as calibration source for combustion research: temperatures and species concentrations of premixed H<sub>2</sub>/air flames, *Rev. Sci. Instrum.* 65 (1994) 2908-2911.
- [2] K. Takeuchi, Y. Nunome, S. Tomioka, T. Tomita, T. Kudo, A. Hayakawa, H. Kobayashi, Development of a water-cooled multi-hole calibration burner for optical measurements of flames with high pressures and temperatures, *J. Therm. Sci. Technol.* 13 (2018) JTST0001.
- [3] G. Singla, P. Scoufflaire, C. Rolon, S. Candel, Planar laser-induced fluorescence of OH in high-pressure cryogenic LO<sub>x</sub>/GH<sub>2</sub> jet flames, *Combust. Flame* 144 (2006) 151-169.
- [4] K. Takeuchi, Y. Nunome, S. Tomioka, T. Tomita, T. Kudo, A. Hayakawa, H. Kobayashi, Application of OH(2,0) band excitation planar laser-induced fluorescence to high-pressure H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> jet diffusion flames for rocket combustion, *Trans. Jpn Soc. Aeronaut. Space Sci.* 60 (2017) 116-123.
- [5] Y. Higuchi, K. Takeuchi, Y. Nunome, S. Tomioka, K. Sakaki, T. Kudo, A. Hayakawa, H. Kobayashi, OH planar laser-induced fluorescence measurement for H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> jet diffusion flames in rocket combustion condition up to 7.0 MPa, *J. Therm. Sci. Technol.* 14 (2019) JTST0018.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 1. Yasuhiro Higuchi, Yoshio Nunome, Sadatake Tomioka, Takeo Tomita, Taku Kudo, Akihiro Hayakawa and Hideaki Kobayashi
2. 発表標題 Towards the application of OH (2,0) PLIF to high-pressure mixed phase combustion
3. 学会等名 The17th International Conference on Flow Dynamics, (2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 2. 樋口 靖浩, 布目 佳央, 富岡 定毅, 富田 健夫, 工藤 琢, 早川 晃弘, 小林 秀昭
2. 発表標題 GH2/GO2シングルエレメント同軸噴射機における火炎基部のOH-PLIF計測
3. 学会等名 第58回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 3. Yasuhiro Higuchi, Yoshio Nunome, Sadatake Tomioka, Takeo Tomita, Taku Kudo, Akihiro Hayakawa and Hideaki Kobayashi
2. 発表標題 A quantitative measurement of OH and flame temperature for a calibration burner operated at high-pressure and high-temperature
3. 学会等名 38th International Symposium on Combustion, (2021) (国際学会)
4. 発表年 2021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	早川 晃弘  (Hayakawa Akihiro)  (90709156)	東北大学・流体科学研究所・准教授    (11301)	

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
---------	---------