

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K01318

研究課題名(和文) ロケットエンジン燃焼解析手法を活用した液体水素の爆発安全性評価技術の構築

研究課題名(英文) Development of explosion safety evaluation technology for liquid hydrogen using rocket engine combustion simulation method

研究代表者

大門 優 (Daimon, Yu)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・主任研究開発員

研究者番号：90415901

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では液体水素が大量漏洩した際の爆発メカニズム(着火、火炎伝播現象)の解明と、その予測技術の確立を行う。特に着火メカニズム解明のため、3種類の基礎試験を実施する。基礎試験では気泡収縮メカニズムに着目し、温度差起因の相変化および衝撃波による圧縮模擬による着火試験を実施する。これにより、過去の研究では机上検討のみであった着火メカニズムの推定を基礎試験で実証することが可能となり、重要物理現象の特定から液体水素漏洩時の爆発威力の予測や威力を低減する貯蔵・輸送方法の検討へと発展させることが可能となる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

3種類の基礎試験を通して、最終的に着火を確認することはできなかったが、各物理現象に要する時間、着火に必要な条件、重要物理現象を識別することができた。これらは安全工学上学術的に価値があるだけでなく、今後実施する大規模実験を安全、確実に実行する上で非常に重要である。また、本研究で解明する爆発メカニズムは、液体水素が液体酸素へ吹き込まれる状況だけではなく、液体水素が海水など別の液体に吹き込まれ、且つ予混合ガスが存在する状況にも共通して起きることがわかった。つまり、液体水素の大量漏洩が生じうる状況の爆発安全評価にも資することができる。

研究成果の概要(英文)：This study aims to elucidate the explosion mechanism (ignition and flame propagation phenomena) of a massive leak of liquid hydrogen and to establish prediction techniques. In particular, three types of basic tests are proposed to clarify the ignition mechanism. In the basic tests, we will focus on the bubble contraction mechanism and conduct ignition tests by simulating the phase change caused by temperature difference and compression by shock waves. This enables the estimation of the ignition mechanism to be verified in the basic tests, which has only been studied on a theoretical basis in past research. This will make it possible to identify important physical phenomena, predict the explosion power of a liquid hydrogen leak, and study storage and transportation methods to reduce the power.

研究分野：熱流体力学

キーワード：液体水素 着火 極低温流体

1. 研究開始当初の背景

クリーンエネルギー分野において世界をリードする我が国にとって、水素社会の根幹をなす水素製造・貯蔵/輸送・供給/利用を安全に実行する技術の確立は必須である。安全性の観点で、最も被害が大きいハザードは爆発・爆轟である。このため、貯蔵形態の候補である高圧水素ガスの着火・火炎伝播現象は盛んに研究され、試験や数値解析により爆発限界や爆発威力の予測技術が確立されつつある。一方、近年は貯蔵・運用が効率的な液体水素がキャリアの有力候補となり、この着火・火炎伝播現象の調査が求められている。液体水素は高圧水素ガスよりも20倍の密度を持つため、潜在的な爆発威力は圧倒的に大きい、その爆発メカニズム(着火・火炎伝播現象)の研究例は非常に少ない。本研究の目的は大量の液体水素が漏洩した際の爆発メカニズムを予測する技術の構築である。

液体水素の燃焼・爆発の知見と技術が最も蓄積されるのは、ロケット等の宇宙輸送分野である。ロケットはエンジンで燃焼させ推進力を得るための大量の液体水素と液体酸素を貯蔵する。打ち上げ失敗シーンで見られるように、落下したロケットからは液体水素と液体酸素が漏洩し、直後に凄まじい爆発が生じる。この爆発威力と影響範囲を予測するため、宇宙開発事業団(後にJAXA)とアメリカ航空宇宙局(NASA)が液体水素・酸素タンクの落下試験を実施した。直列に配置されたタンクは地面落下直後に隔壁が破壊され、大量の液体水素と液体酸素が漏洩した。漏洩開始から着火までが短時間、つまり可燃性の水素酸素予混合ガスが生成される時間が短いほど、爆発威力を抑制できることがわかった。ここで課題は着火に至るメカニズムが未解明であるため未だ制御はできないことである。タンク同士が衝突する付近で最初の閃光が観察されたが、漏洩した水素・酸素混合ガスは低温のため、通常は点火源無しに着火に至ることはない。また、あるケースにおいては、衝突後着火までに長い時間が経過した後に爆発が発生し、大きな爆発威力が発生した。この着火が遅れるケースのメカニズムは未解明であった。近年、低温混合ガスでも自着火に至る有力なメカニズムをOsipovら[1]が図1および下記のように提言した。

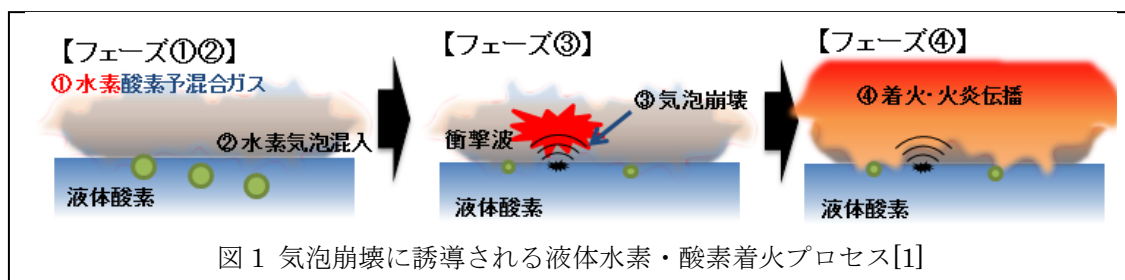
【フェーズ①】液体水素・酸素ともに漏洩するが、飽和温度の違いにより液体水素は即座に蒸発し、液体酸素の液溜り付近に滞留する。

【フェーズ②】急速膨張した水素蒸気は液体酸素内部へ吹き込まれ、多数の水素気泡が液体酸素内に生じる。

【フェーズ③】水素気泡は水素飽和温度に近い液体酸素に比べて低温である。この温度差によって、水素気泡内の圧力が低下し、気泡が収縮する。最終的に気泡崩壊に至る。

【フェーズ④】気泡崩壊が液面付近で生じることで、衝撃波と共に高温・高圧ガスが噴き出し、液体酸素外部の低温予混合ガスを着火する。条件によっては気泡内で着火が起こる。

Osipovらは上記仮説を1次元解析により示しているが、基礎試験や高忠実な解析を用いた実証はできていない。



2. 研究の目的

本研究では、Osipovらが提言したフェーズ③④を気泡崩壊試験、着火試験など現象を切り分けた基礎試験で実証すると共に、液体水素・酸素の熱流動と詳細化学反応を連成した解析技術を確立することを目的とする。過去の研究[1]を参考に、3章(1)、4章(1)で述べる液体窒素気泡収縮試験(基礎試験①)にて着火現象が観察されると予想していたが、着火には至らなかった。そこで、着火に必要なエネルギーを得る方法として、水撃による気泡収縮試験(基礎試験②)、レーザーキャビテーションによる気泡収縮試験(基礎試験③)を新たに考案し基礎試験を実施した。

3. 研究の方法

液体水素が外部からの着火源なしに着火するメカニズムを実証するため、気泡崩壊試験および着火試験(基礎試験①-③)を実施した。

(1) 基礎試験①：液体窒素内気泡収縮試験

Osipovらが提言した着火プロセスの内、フェーズ③における温度差起因の気泡崩壊を再現するため、図2のような可視化装置を作成した。可視化水槽には液体窒素充填用配管、非燃焼試験用の酸素・ヘリウム予混合気充填用配管、燃焼試験用の水素・酸素予混合気充填用配管が挿入さ

れている。まず、液体窒素を水槽に入れ圧力と温度を調整することで酸素に対するサブクール度を調整する。その後、配管から入れた気泡を高速カメラ（FASTCAM SA-X2）で撮影することで、気泡収縮の様子および着火の様子を観測した。燃焼試験用の水素・酸素予混合気は、水を電気分解することで生成された。

表1に試験条件を示す。可視化水槽の窒素温度および圧力を調整することで、酸素に対するサブクール度を変化させている。また、気体種を変化させることで、サブクール度に対する気泡収縮の様子を観測した。

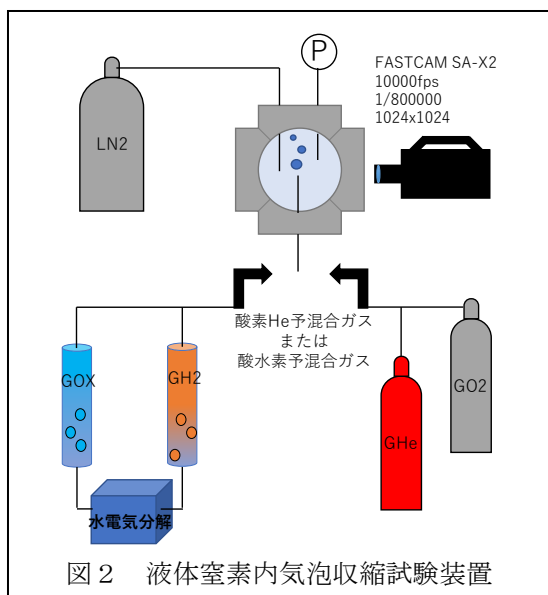
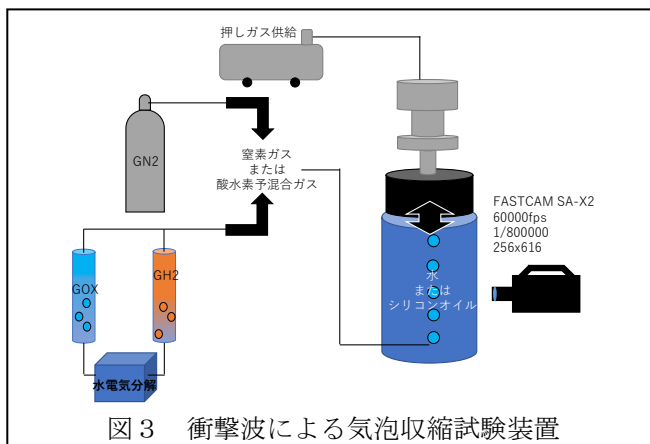


表1 液体窒素内気泡収縮試験条件

No.	窒素圧力	窒素液温度	酸素飽和温度	酸素サブクール度	気体	
1	0.22	80.6	89.2	8.6	ヘリウム	
2	0.12	83.0	84.8	1.8	酸素	
3	0.21	81.7	88.7	7	酸素	
4	0.28	80.7	91.0	10.3	酸素	
5	0.11	82.0	85.0	3	酸素	ヘリウム
6	0.21	82.5	88.5	6	酸素	ヘリウム
7	0.4	85.5	94.3	8.8	酸素	ヘリウム
8	0.28	87.7	90.8	3.1	酸素	水素
9	0.22	83.7	88.8	5.1	酸素	水素
10	0.32	82.0	92.0	10	酸素	水素

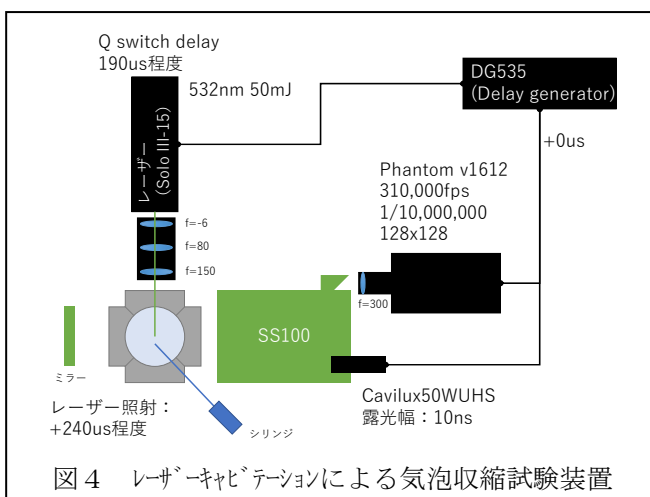
(2) 基礎試験②：ハンマーに誘起された衝撃波による気泡収縮

気泡収縮方法として、ハンマーにより誘起される水撃（水中衝撃波）発生装置を考案した。図3のように水またはシリコンオイルの中に、非燃焼試験の場合には窒素ガスを、燃焼試験の場合には水素・酸素予混合気を気泡として生成させ、上から粉体バイブレータ（ハンマー）で水面に衝撃を加えた。ハンマーによる衝撃で水中に衝撃波を発生させ、収縮する気泡を高速カメラ（FASTCAM SA-X2）で撮影することで気泡収縮の様子および着火の様子を観測した。シリコンオイルは水よりも表面張力が小さく、液体酸素のそれに近い。



(3) 基礎試験③：レーザーキャビテーションに誘起された衝撃波による気泡収縮

気泡近傍で衝撃波を発生させるために、レーザーキャビテーションを利用することを考案した。図4に試験装置概要を示す。可視化水槽の中に水を充填し、外側からシリンジにて気泡（空気）を注入する。レーザー（Solo III-15）により水槽の中にキャビテーションを発生させ、その崩壊と衝撃波伝播の様子を、高速カメラ（Phantom v1612）、シュリーレン装置（SS100）、レーザー光源（Cavilux50WUHS）で可視化した。カメラの撮影とレーザー照射は Delay generator で操作した。



4. 研究成果

(1) 基礎試験①：液体窒素内気泡収縮試験結果と考察

図5は表1の条件で実施した可視化結果を示している。まず極低温における気泡収縮現象を理解するために、液体窒素の中にヘリウム気泡と酸素気泡をそれぞれ単独で注入した No.1-4 を議論する。酸素の飽和蒸気温度は窒素の飽和蒸気温度より少し高く、ヘリウムの飽和温度は窒素と比較してかなり低い。そこで図5(1)に示すように、ヘリウムは液体窒素の中でも相変化は起こらず、気泡はほぼそのままの大きさで上昇する。次に図5(2)-(4)に示すように液体窒素の圧力を上げ温度を下げること、酸素飽和温度を高くしていった。これにより酸素のサブクール度が上昇し、より液化しやすくなることになる。図に示すように、サブクール度を上昇させることで、気泡が消えて行くことがわかる。図5(5)-(7)は酸素・ヘリウムの予混合気を注入している。酸素のみ注入した図5(2)-(4)同様、酸素は上昇するにつれて気泡は小さくなりその影響はサブクール度が高いほど顕著である。少し見えにくい、小さな気泡が上部まで残っておりこれがヘリウムであると予想される。このように、サブクール度がある程度存在する場合には酸素は液体窒素内で液化し、気泡は収縮する。もしこの気泡内の圧力温度が上昇すれば、着火する可能性がある。そこで最後に、図5(8)-(10)に示すように、水の電気分解で生成された酸素・水素予混合気を注入した。酸素・ヘリウム予混合気の結果と同様に酸素は液化するが、飽和蒸気温度が低い水素は気泡として存在している。酸素が液化する間、着火による閃光や燃焼ガス発生による気泡の膨張は観察されることはなかった。

このように Osipov が提唱した温度差による気泡収縮では衝撃波やジェットが発生したようには見えず、酸素・水素予混合気泡内およびジェットによる着火は観察されなかった。安全上の問題から大量の予混合気を用意することはできなかったが、この仮説の可能性は低いと考え、別の方法で衝撃波を発生させることを考えた。

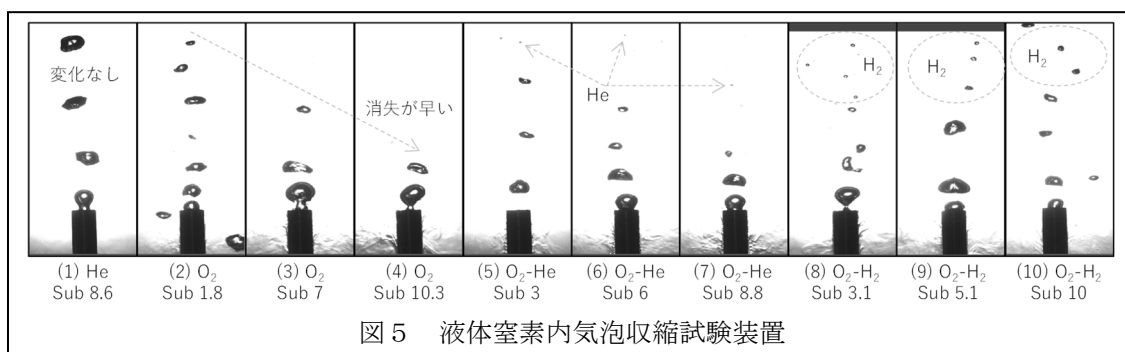


図5 液体窒素内気泡収縮試験装置

(2) 基礎試験②：ハンマーに誘起された衝撃波による気泡収縮試験結果と考察

水中衝撃波が構造部材の落下や大量の液体酸素が落下することにより発生すると仮定し、基礎試験②ではハンマーにより衝撃波を発生させた。図6は水の中に衝撃波を発生させた際の窒素気泡の収縮状況である。衝撃波発生時を時刻0としており、その後急激に気泡が変形している様子が見て取れる。図7では液体酸素に表面張力が近いシリコンオイルの中に衝撃波を発生させ、窒素気泡の様子を観察した。水の場合と比較して初期気泡の大きさが小さいのはシリコンオイルの表面張力の影響である。どちらのケースでも気泡は衝撃波通過後わずかに小さくなったようにも見えるが、主に中心にジェットが発生することで気泡が大きく変形している。このジェットによる変形は一般的な衝撃波・気泡干渉[2]において観察されるものである。次に、気泡を酸素・水素予混合気に変更し同様の試験を行った。気泡の変形の様子は窒素気泡の場合とほぼ同等であり、着火現象を観察することはなかった。

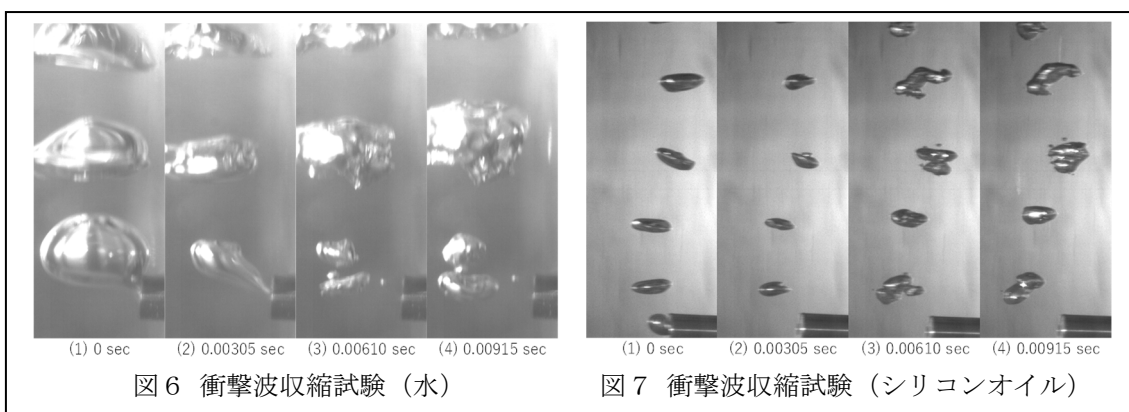


図6 衝撃波収縮試験 (水)

図7 衝撃波収縮試験 (シリコンオイル)

このように液面に衝撃を加えることで水撃を発生する方法では気泡収縮を十分に発生させることはできないと判断し、より確実に衝撃波を発生させることができるレーザーキャビテーションを利用することにした。

(3) 基礎試験③：レーザーキャビテーションに誘起された衝撃波による気泡収縮試験結果と考察

Osipov による仮説にて、キャビテーション後の着火可能性（フェーズ④）を検証するために、水中にレーザーキャビテーションを発生させ他の気泡に対する気泡収縮の影響を高速カメラとシュリーレン装置で観測した。図8は気泡の直径を初期直径で無次元化した、気泡直径の時間履歴である。レーザー照射後約 $50\mu\text{s}$ から気泡直径の変化が始まり、その後は収縮膨張を繰り返している。

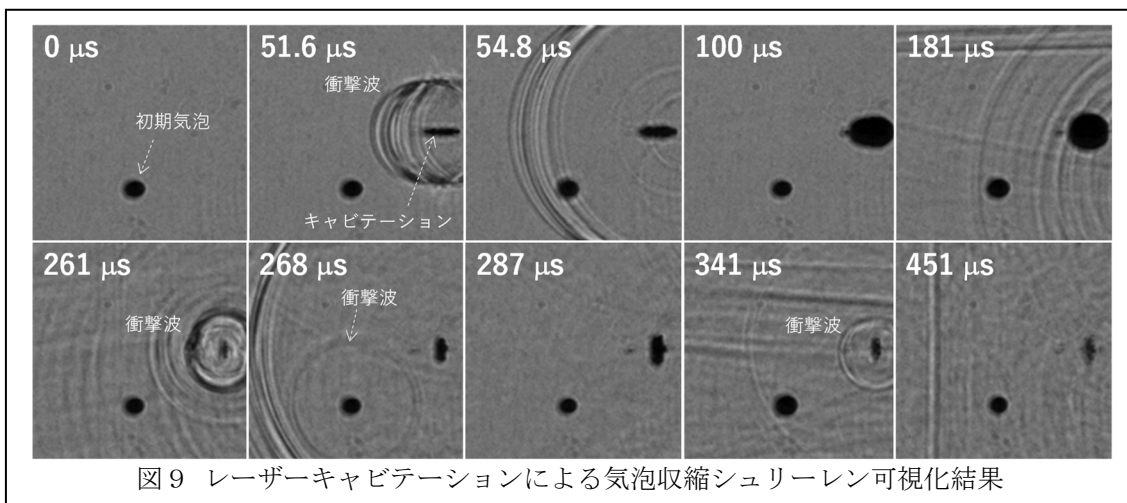
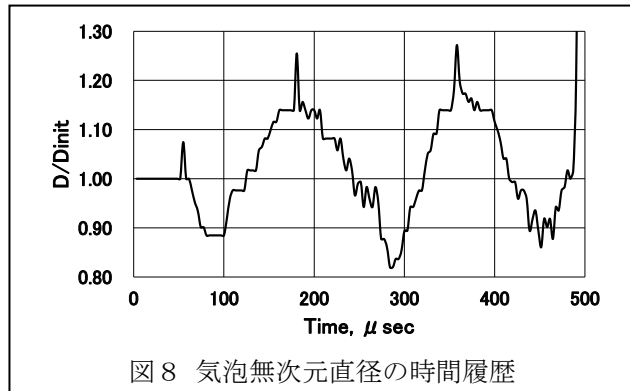


図9はシュリーレン可視化結果を示している。 $0\mu\text{s}$ に見える黒い円形が初期に設定している気泡である。 $51.6\mu\text{s}$ の右側に見えるのがキャビテーション気泡収縮による衝撃波である。集光が十分ではないため、気泡は横に長く、また複数の衝撃波が発生している。 $54.8\mu\text{s}$ にて衝撃波が気泡に到達している。その後気泡は収縮し $100\mu\text{s}$ で最小となる。この段階では、キャビテーションも徐々に大きくなっている。 $261\mu\text{s}$ でキャビテーション気泡が収縮し2度目の衝撃波が発生している。 $268\mu\text{s}$ では気泡に到達した衝撃波が気泡にて反射し、気泡を中心とした衝撃波が見える。 $287\mu\text{s}$ で気泡は2度目の最小直径となり、その後徐々に膨張していく。 $341\mu\text{s}$ にてキャビテーションから3度目の衝撃波が発生しているのがわかる。以上のように、キャビテーション気泡が振動しながら崩壊していく過程において衝撃波が複数発生し、隣接する気泡の収縮に影響を及ぼしている。上記ケースの最小無次元直径は 0.82 であったが、合計18ケースを実施したところで最小無次元直径は 0.66 であった。この気泡変化に対して断熱圧縮を仮定すると、大気圧、常温の気泡は、 5.5 気圧、 500K まで圧縮される。水素酸素等量比の詳細化学反応モデルを用いた0次元着火解析ではこの条件で着火までは至らなかったため（着火まで1000秒以上かかるため計算打ち切り）、着火試験は実施しなかった。また、着火するためには、最小無次元直径が 0.4 程度まで圧縮される必要があることもわかった。

以上のように、基礎試験①-③において着火を確認することはできなかったが以下重要な知見を得た。1) 酸素の温度差起因による気泡収縮では着火しなかった。2) キャビテーション崩壊起因の衝撃波による着火は、気泡を無次元直径 0.4 程度まで圧縮する条件が必要であった。実機の現象と異なる点は、推薬量や壁面の存在であると考えており、今後の研究課題として整理した。

[1] Osipov, V., et al., "Explosion Hazard from a Propellant-Tank Breach in Liquid Hydrogen-Oxygen Rockets," JOURNAL OF SPACECRAFT AND ROCKETS, Vol. 50, No. 4, 2013.

[2] Quirk, J., J., and Karni, S., "On the Dynamics of a Shock-bubble Interaction," J. Fluid Mech., Vol. 318, pp. 129-163, 1996.

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Hiroaki Kobayashi, Daiki Muto, Yu Daimon, Yutaka Umemura, Yuichiro Takesaki, Yusuke Maru, Tsuyoshi Yagishita, Satoshi Nonaka, Kota Miyanabe	4. 巻 45
2. 論文標題 Experimental study on cryo-compressed hydrogen ignition and flame	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy	6. 最初と最後の頁 5098-5109
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijhydene.2019.12.091	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2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 小林弘明, 大門優, 藤本圭一郎, 谷洋海, 丸祐介, 竹崎悠一郎
2. 発表標題 気泡崩壊現象による水素着火の可能性に関する検討
3. 学会等名 2019年度機械学会年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂本勇樹, 小林弘明, 大門優
2. 発表標題 気泡崩壊が誘発する水素着火現象に関する検討
3. 学会等名 日本機械学会第99期流体工学部門講演会
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	藤本 圭一郎 (Fujimoto Keiichiro) (20446602)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・研究開発員 (82645)	

6. 研究組織（つづき）

	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	谷 洋海 (Tani Hiroumi) (80633784)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・研究開発員 (82645)	

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