

令和 5 年 5 月 7 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14675

研究課題名（和文）極低温液体中の気泡崩壊が誘発する爆発現象の解明

研究課題名（英文）Investigation of Explosion Phenomena Induced by Bubble Collapse in Cryogenic fluids

研究代表者

坂本 勇樹（SAKAMOTO, Yuki）

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・助教

研究者番号：50845774

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：大気環境下で液体水素送液配管が瞬時に切り離され、水素が外部に放出されると同時に、液体水素温度の物質表面が露出し液体空気が生成される場合、特定の条件下において爆発現象を誘発することが確認されている。本研究では液体空気の落下に伴い、液体空気中の気泡が断熱圧縮された時の局所的な高温場が爆発現象を誘起していると推定し、実験的に現象解明に取り組んだ。液体窒素中にヘリウムガスを導入すると同時に、液中に設置したアルミターゲットにレーザーを照射しキャビテーションおよび圧力波を発生させることで、水素酸素混合気の着火温度程度までヘリウムガス気泡を収縮可能な見込みを得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

水素社会実現には大規模水素サプライチェーン構築が必須であり、密度の面で有利である液体水素による運搬・貯蔵に対するニーズがますます高まっている。本研究では、特定の条件下で液体水素が大気に漏洩した際の着火・爆発する現象のメカニズム解明に取り組んだ。これまでの実験結果では、爆発現象の再現には至っていないものの、液体窒素とヘリウムガスを用いた試験から、圧力波により極低温流体中の気泡内部温度が着火温度程度まで上昇する収縮が得られる可能性が示されており、本研究は液体水素のさらなる安全利用に資する。

研究成果の概要（英文）：An explosion may occur under certain conditions even at cryogenic temperatures when the liquid hydrogen supplying pipe is disconnected instantly. In this situation, hydrogen is released into the atmosphere, the cryogenic flange surface is exposed and liquefied air is generated. The applicant assume the explosion is caused by the local high-temperature bubbles in liquefied air which compressed adiabatically and attempted to clarify the phenomenon experimentally. In this experiment, helium gas is injected into liquid nitrogen and simultaneously generates a pressure wave by laser-induced cavitation. The result shows a possibility that a helium gas bubble located in liquid nitrogen can be compressed to the ignition temperature of the hydrogen-oxygen mixture.

研究分野：熱工学

キーワード：キャビテーション 気泡崩壊 レーザー 水素 液体水素

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

究極のクリーンエネルギーとも呼ばれる水素は、将来の中心的エネルギー源として期待されている。水素の貯蔵・輸送は、大きく「高圧ガス水素の形態を用いる方法」と「液体水素の形態を用いる方法」に分けられる。取り扱いの容易さの観点から、高圧ガスとしての利活用がこれまで進められてきた。一方で、水素社会の実現へ向けた大規模水素サプライチェーン構築に向けては、エネルギー密度の観点から液体水素の需要がさらに高まっており、液体水素輸送貯蔵機器の大型化や、液体水素受入基地機器開発などが進められている。ただし、液体水素は -253 の極低温流体であること、取り扱いを誤ると爆発の危険を有することから、水素社会の実現には、水素の製造・貯蔵・輸送・利用にかかわる安全性のさらなる向上が不可欠である。

水素と同じく極低温流体に分類され、すでに社会実装されている燃料に液化天然ガス (LNG, -160) があるが、LNG と液体水素の最大の違いは、主に窒素と酸素から構成される空気の液化温度 (-196 / -183) や固化温度 (-210 / -219) よりも低温である点である。したがって、液体水素が漏洩すると、高濃度の液体酸素が生成・混合し、爆発に至る可能性がある。実際に液体水素が大気に漏洩することで、着火・爆発に至った事例がある^{[1][2]}。ただし、いずれも明確な着火源 (火花・静電気等) はなく、水素と酸素の可燃性混合気は自然発火温度は 500 以上であることから、液体水素や液体酸素といった極低温流体が起点となり爆発に至るとは通常考えづらい。JAXA が実施した液体水素送液システムの緊急離脱機構作動試験の例^[2]では、静電気対策や材料適合性等については十分に対策されているにも関わらず着火する現象が確認された。本現象については、切り離し上面からの液体空気が滴下されないよう受け皿を用意することで、着火事象が生じなくなることが確認されている。しかしながら、自着火温度以下の極低温流体内での自着火に至る詳細現象そのものの解明には至っていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、極低温液体中の気泡崩壊が誘発する爆発現象メカニズムの解明である。NASA が実施した液体水素/液体酸素衝突試験 (HOVI 試験)^[1]や JAXA が実施した液体水素送液システムの緊急離脱機構作動試験 (ERS 試験)^[2]は、明確な着火源なしに、着火爆発に至ることが確認されている。水素-酸素混合気は自然発火温度は 500 以上であり、 -150 以下の液体空気下での自着火現象が生じるには、何らかの局所的なエネルギー上昇があるはずである。NASA の Osipov らは、ロケットの燃料タンクが衝突し液体水素・液体酸素が漏洩した際の爆発現象を対象として、極低温混合ガスの自着火・爆発現象について、気泡運動論に基づく 1 次元解析から、着火・爆発要因に対して仮説を提言している。しかしながら、Osipov の研究では実験的に仮説を立証するに至っていない。また、ERS 試験のように、液体水素が流動していた配管が大気環境に露出し、液体空気が徐々に生成されることで着火に至る現象は、Osipov らが提言する着火メカニズムだけでは説明に不十分であると考えられる。

申請者は、極低温状態にある可燃性混合物が着火に至る原因として、液体空気界面付近での気泡生成・崩壊によって、気泡内部に局所的な高温場が形成されることが有力な要因であると考え、実験的に仮説の実証に取り組んだ。

3. 研究の方法

本研究は単一気泡の理論運動解析および、実験的手法によって進めた。図 1 に本助成金を用いて構築した極低温流体用気泡崩壊可視化試験装置の概要を示す。極低温環境下での気泡崩壊現象を観察するために、真空チャンバー中に、液体窒素を溜められる小型の容器を設置し、容器中のアルミ製ターゲットにレーザーを集光することで、レーザー励起気泡を発生させ、この時に隣接する気泡の運動を高速度カメラによって観察した。なお、安全性の観点から可燃性混合気は用いず、外部から注気する際はヘリウムガスを用いることとした。

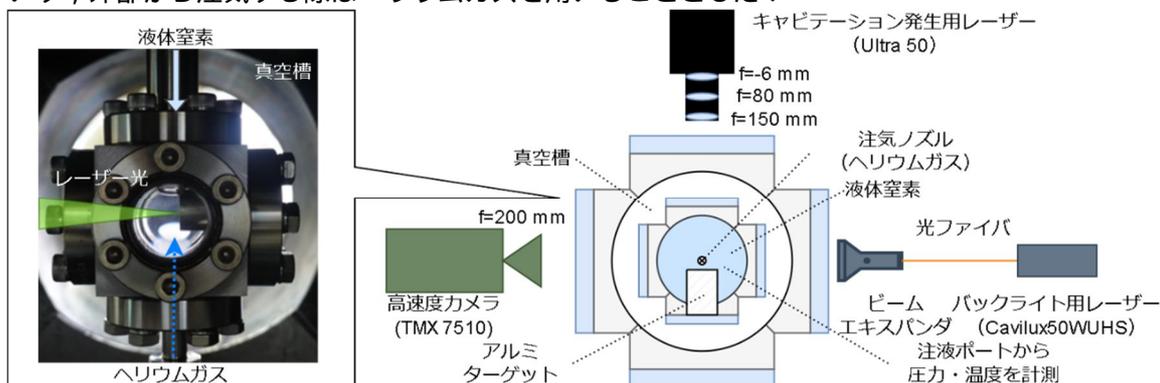


図 1 極低温流体用気泡崩壊可視化試験装置

4. 研究成果

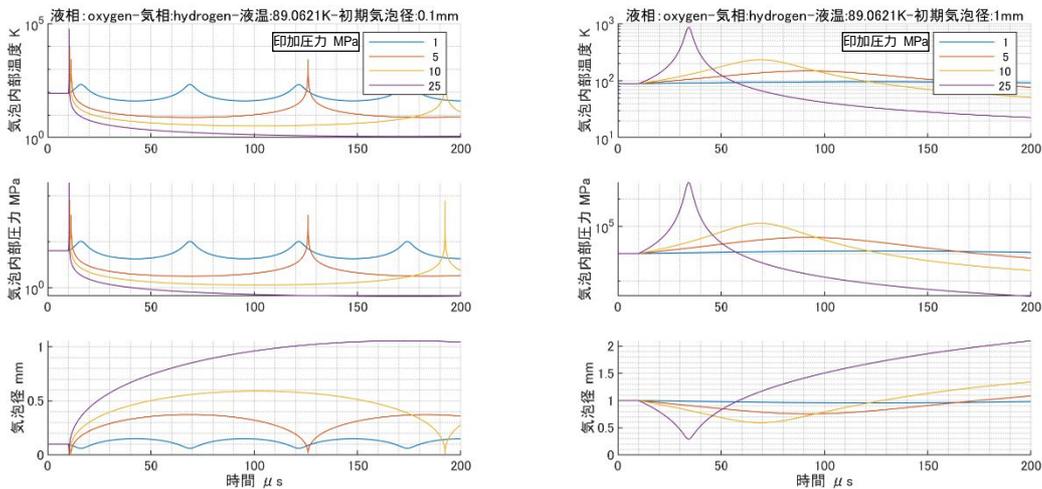
理論解析

単一気泡のダイナミクスを表す Rayleigh–Plesset 方程式をもとに極低温流体中に配置された微小気泡に、外部圧力が加わった際の運動を解析した。Rayleigh–Plesset 方程式において、無限遠温度と気泡表面温度が等しく、内部圧力は断熱仮定で変化すると仮定した場合次式が得られる^[3]。ここで、 p 、 T 、 t 、 R 、 S 、 ρ_L はそれぞれ圧力、温度、時間、気泡半径、表面張力、密度、動粘性係数を、添え字 G 、 L 、 o はそれぞれ無限遠、気体、液体、初期状態を示す。

$$\frac{p_V(T) - p(t)}{\rho_L} + \frac{p_{Go} \left(\frac{R_o}{R}\right)^{3k}}{\rho_L} = R\ddot{R} + \frac{3}{2}(\dot{R})^2 + \frac{4v_L\dot{R}}{R} + \frac{2S}{\rho_L R}$$

本研究では、MATLAB ODE ソルバーを用いて上式を解いた。流体物性はオープンソースの冷媒熱物性データベース CoolProp を用いて評価した。

一例として、液体酸素中に気体水素を配置した際の解析結果を図2に示す。無限遠圧力は 0.1 MPa、液体温度は飽和温度に対して 1 K のサブクール度を有する、気泡内部温度は液体温度と等しいとした。初期気泡径は 0.1 mm、1 mm としており、外部からの圧力は 10 μ s ~ 10.2 μ s の間に、パルス的に 1, 5, 10, 25 MPa 印加されるとした。本結果から明らかなように、初期気泡径が小さいほど、気泡にかかる外圧が大きいほど、気泡は収縮し、気泡内部温度もそれに伴って上昇することがわかる。本結果を参考に、実験では初期気泡径はなるべく小さくするべくノズル径は 0.1 mm とし、印加圧力をなるべく大きく取れるよう固体表面にレーザーを集光することにした。



(a) 初期気泡径 0.1 mm の場合

(b) 初期気泡径 1.0 mm の場合

図2 理論解析結果

実験結果

前述の通り、可視化窓付きの真空二重容器に液体酸素を溜め、圧力・温度を制御し、アルミ製のターゲットにレーザーを集光することで、気泡を発生させた。この際、飽和圧力下で発生するガスがターゲット近傍に隣接する条件、外部から注気したヘリウムガスがターゲット近傍に隣接する条件で試験を実施した。この条件では、飽和状態で自然に生成される気泡を対象としたが生成される気泡はいずれも比較的大きく、レーザー誘起気泡によって気泡内部温度が着火温度を超えるような収縮は確認できなかった。

この条件での試験結果を図3に示す。撮影フレームレートは 450000fps で、画素数は 128 × 256 とした。なお、本実験形態ではノズルから注気した気泡はランダムに運動し、任意の位置に配置できないことから、空間分解能よりも広範囲の撮影を優先している。図3において、上段は取得した生画像を、中段に注目する気泡の拡大図を、下段に元画像を3倍に拡大後に大津の2値化を行った結果を示す。今回の試験では空間分解能を十分に確保できておらず、定量化が困難ではあるものの、いくつかの手法で気泡径を見積もったところ、ヘリウム気泡が 1/2.5 ~ 1/6.5 程度に収縮していることが分かった。気泡が真球であり、断熱変化が仮定できる場合気泡内部温度は次式であらわされる。

$$T = T_0 \left(\frac{R_0}{R}\right)^{3(\gamma-1)}$$

ここで初期温度を $T_0=84.4$ K、ヘリウムの比熱比を 1.67 とすると、気泡径が 1/2.5 に収縮した場合は 532K、1/6.5 に収縮した場合は 3633K に達することがわかる。なお、参考値として気泡が水素と酸素の混合気であり、比熱比が 1.4 とすると、気泡径が 1/6.5 まで収縮した場合 798 K となる。以上の結果から、空間分解能を向上した、より詳細な気泡運動の観察は必要ではあるものの、外部で発生した衝撃圧により、極低温流体中の水素-酸素混合気が自着火温度に達する可能性が示された。

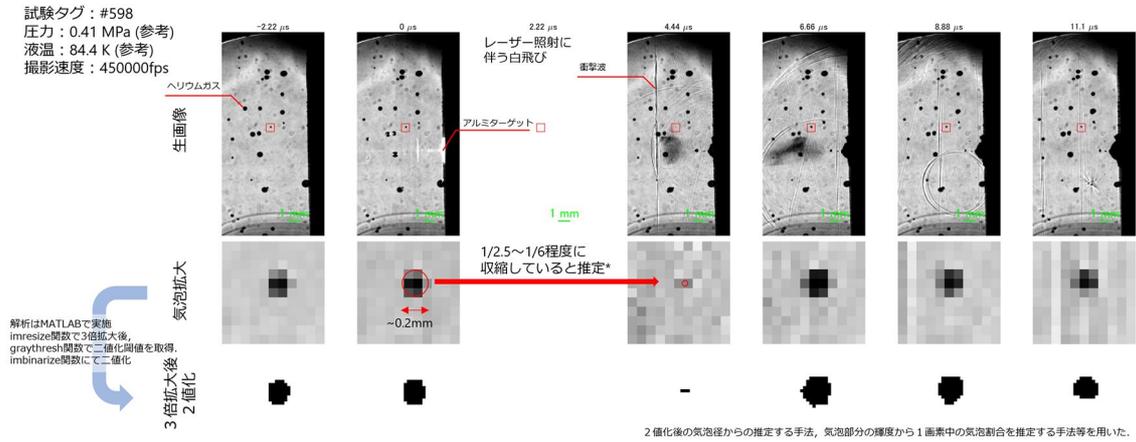


図3 液体窒素中におけるヘリウム気泡収縮運動

参考文献

- [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] 小林弘明, "液化水素用ローディングシステム開発とルール整備-液化水素用ローディングシステム開発とルール整備-", 戦略的イノベーション創造プログラム, 2019
- [3] Brennen, C. Cavitation and bubble dynamics, vol. 44, Oxford University Press, USA. 1995

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔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 坂本 勇樹 , 小林 弘明 , 大門 優
2. 発表標題 キャビテーションが誘発する可燃性混合気着火に関する検討
3. 学会等名 日本機械学会 第 100 期流体工学部門講演会
4. 発表年 2022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
---------------------------	-----------------------	----

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