

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05020

研究課題名(和文)キャビテーション着火仮説の検証

研究課題名(英文)Validation of the cavitation ignition hypothesis

研究代表者

小林 弘明 (Kobayashi, Hiroaki)

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・教授

研究者番号：50353420

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)：本研究は、流体中で発生するキャビテーションが「着火源」となって火災事故の原因になっているという仮説を検証することを目的とする。キャビテーションは、水の入ったコップの落下など身近な現象として頻繁に発生しており、既存の解析研究では、気泡崩壊の過程でマイクロな超高温領域が瞬間的に生成することが指摘されていた。これまで静電気が着火源であると推定されていた液体酸素システムの火災事例とキャビテーションの関係进行调查するため本研究では、落下衝撃によるキャビテーション発生装置を開発し、キャビテーションによる高圧および高温の発生現象を計測することに成功することで、現象解明に向けた有力な手掛かりを得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

キャビテーションが、既存の着火源(裸火、火花、静電気、高温、摩擦)には含まれない新たな着火源として定義されれば、火災事故の防止に寄与するとともに、安全工学や流体力学を横断する新たな学術分野の創出につながることを期待される。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to propose and test the hypothesis that cavitation generated in fluids is an "ignition source" and a cause of fire accidents. Cavitation frequently occurs as a familiar phenomenon, such as the falling of a glass of water, and analytical studies of cavitation have indicated that microscopic ultra-high temperature regions are instantaneously generated in the process of bubble collapse. Cases of fires in liquid oxygen systems, which were previously presumed to be ignited by static electricity, can in fact be assumed to be caused by cavitation in liquid oxygen. In this study, we developed a device to generate cavitation by drop impact and succeeded in measuring the generation of high pressure and high temperature due to cavitation, thereby providing a promising clue toward elucidating the phenomenon.

研究分野：Space propulsion

キーワード：Cavitation Liquid Oxygen

1. 研究開始当初の背景

船舶のスクリューやポンプ入口に生じるキャビテーションは、流体機械の性能低下や損傷を引き起こす現象として古くから知られており、研究例も非常に多い。流体の圧力が瞬間的に飽和蒸気圧を下回ると、気泡がごく短時間発生してすぐに消滅するキャビテーション現象を起こす。気泡が消滅する過程でマイクロジェットや微小な液中衝撃波が発生し、流体に接触する表面が損傷を受ける場合がある。逆に積極的に利用するのが超音波洗浄器や針なし注射である。また、水の入ったガラスビンを 10cm 程度の高さから落下させたり、ビンの入口を手で叩いたりするだけでも瞬間的にキャビテーションが発生し、確率的にビン破壊する現象(Beer bottle trick) があり、これについての研究が多数報告されている[1]。キャビテーションの発生有無は、流体の飽和蒸気圧と落下距離によって決まるが、流体中の気泡核の存在にも大きく影響を受けるため単純に整理することは難しい。また、超音波加湿器は、超音波洗浄機と同様に流体に超音波を照射することでミストを生成するもので、キャビテーションが原理であるともされるが、完全には解明されていない。液体中の気泡挙動を記述する Rayleigh-Plesset 方程式を用いて解析すると、気泡崩壊時の内部温度は数 1,000K 以上にも到達するとされる[2]。しかしながらミクロな現象である気泡崩壊時の温度を計測することは大変難しく、十分な検証はされていない。

本研究で明らかにしたい問いは、「キャビテーションは着火源か否か？」である。解析上のキャビテーションは、局所的・瞬間的な高温を生成する点で火花と類似すると言えるが、実際の火災事象においてキャビテーションが「着火源」として特定された事例はない。一方、申請者らの周辺において、キャビテーションを関連付けうる着火事例が浮かび上がってきた。

H-IIB ロケット移動発射台の火災 (2019)

H-IIB の打上げ準備作業中、移動発射台の開口部で火災発生が確認され、打上げが中止となった。火災発生箇所は、液体酸素の排液があたり続ける部分で、低温防止のため断熱材施工がされていた。原因究明の結果、液体酸素が断熱材の中に入り込み、静電気を着火源として火災が発生したという推定シナリオが報告されているが、実際に静電気で着火することは再現できていない。

液化水素ローディングシステム緊急分離時の火災 (2017 年)

液体水素の船陸間移送配管を緊急分離するシステムの開発試験を実施中、分離時に大気中に放出される少量の水素が着火する事例が複数回生じた。分離直後の継手表面温度は 20K と極低温であり、しばらく周囲の空気が液化されて滴下し続ける状態となる。火災は液体空気が衝突する表面を起点とすることが判明し、液体空気の滴下を防止する機構を取り付けた後、火災の発生はなくなった[3]。

これら最近の火災事象では、いずれも液体酸素ないし液体酸素を含む液体空気が滴下し、衝突する表面付近で着火するという現象になっている。事例 と同様に事例 でも当初は静電気着火が原因であると推定され、徹底的な静電気対策が施されたが、それでも火災が発生したこと、滴下した液体空気が溜まる部分で最初の閃光が確認 (図 1) されていることから、液体空気中のキャビテーションが着火源ではないか、という推定をしているが、現象解明はできていない。

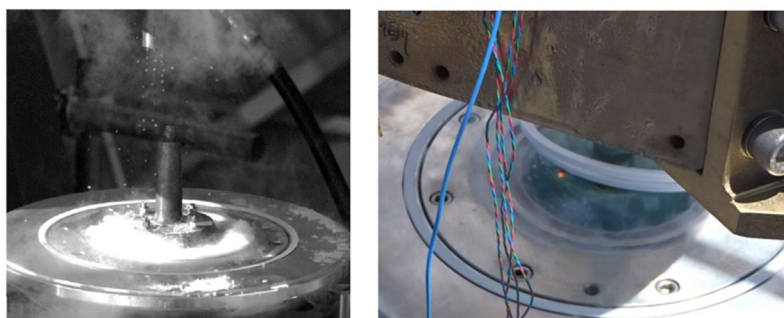


図 1 左：緊急離脱機構分離直後の液体空気滴下、右：着火時の輝点

[1] Jesse Daily, Jonathon Pendlebury, Ken Langley, Randy Hurd, Scott Thomson, and Tadd Truscott, Catastrophic cracking courtesy of quiescent cavitation, Physics of Fluids 26, 091107 (2014)

[2] Michael P. Brenner, Sascha Hilgenfeldt, and Detlef Lohse, Single-bubble sonoluminescence, Rev. Mod. Phys. 74, 425 – Published 13 May (2002)

[3] 小林 弘明, 大門 優, 藤本 圭一郎, 谷 洋海, 丸 祐介, 竹崎 悠一郎, 気泡崩壊現象による水素着火の可能性に関する検討, J01211, 2019 年度日本機械学会年次大会 (2019)

2. 研究の目的

本研究の目的は、液体酸素中で発生するキャビテーションと着火現象の関係を明らかにすることである。これまでの事故事例を参照すると、高圧酸素システムにおける火災は、急なバルブ開閉等による断熱圧縮（高温）が主な原因とされる一方、液体酸素システムにおける火災の原因は明確に特定できず、「静電気等」とあいまいに記載されていることが多い。このため、液体酸素システムでは、使用できる材料を ASTM D2512 に基づく液体酸素適合性試験で難燃性を確認したものに限定することで安全を担保している。ASTM D2512 は、液体酸素中に浸漬した試験対象材料に対し 98J の落下衝撃を与えて燃焼の有無を確認する試験であるが、これは NASA の様々な事故事例をもとに経験的に定められたもので、実際のところ発火メカニズムは十分に理解されていないのが現状である。ASTM D2512 は、液体酸素中のサンプルに落下衝撃を与える試験であるが、液体酸素自体にも衝撃が加わることから、当然キャビテーション現象も発生していると考えられ、これが着火源となっている可能性がある。

3. 研究の方法

本研究では図 2 に示す実験装置を用い、液体を一部満たした容器に重りを衝突させ、容器を急加速させることでキャビテーションを発生させる。液体を満した容器と重りはレールによって 1 直線上に配置されている。容器下部には圧力計・加速度計が取り付けられ、容器自体は画用紙に乗せることで静止している。重りを容器に衝突させると、容器は急加速され、その後画用紙は破れ、加速された容器は下に配置されたブロックに衝突し停止する。おもり高さ h_m ・液位 h_w ・容器の底面角 のパラメータを変化させ、キャビテーション発生時に生じる圧力・加速度を測定する。ここではブロックと重り底面までの距離を重り高さ h_m とする。また同時に高速カメラ (CHU-30B, 1000fps) でキャビテーション発生時の様子を観察する。本実験において、圧力計には KYOWA 社 PHL-A5MP-B(測定範囲 5MPa 以下, 固有振動数 122kHz), 加速度計には KYOWA 社 ASH-A-500(測定範囲 $\pm 4903\text{m/s}^2$ 以下)を用いた。

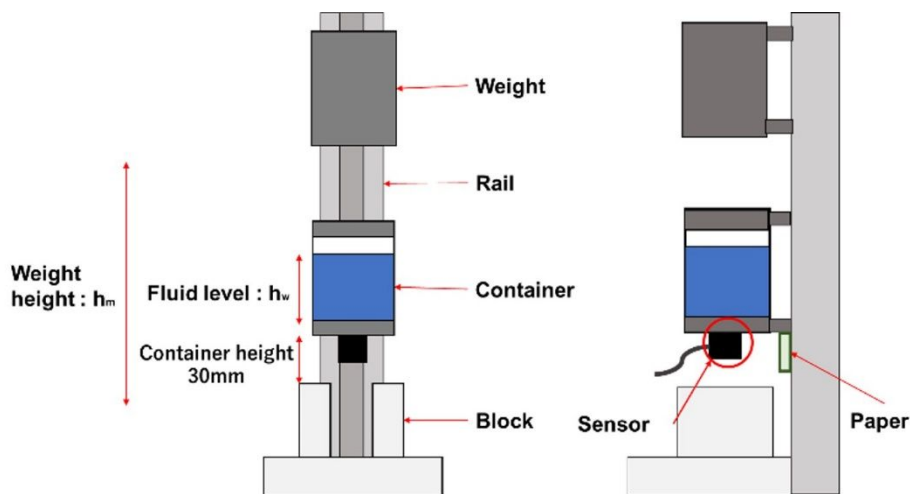


図 2 キャビテーション発生装置

4. 研究成果

キャビテーション発生時に容器底面の圧力がどのような挙動を示すか調べた。図 3 は水温 20℃, おもり高さ 600 mm, 液位 60 mm, 容器高さ 30 mm, 底面角 90 度(平らな状態)の条件で 3 回実験を行った時の圧力変化・加速度変化のグラフである。ともに重りが容器に衝突した時刻を 0ms としている。この時のサンプリング周期は 5 μs である。おもりが容器に衝突してから約 2 ms 間は圧力が下降し -100 kPa 程度となっている。これは、容器底部に気泡が発生し、真空に近い状態になっているからである。この状態では気泡の圧力はほぼ蒸気圧に等しいと考えられる。その直後に圧力は瞬間的に上昇し 2000 kPa 程度になる。衝突により急加速された容器の底面でキャビテーションが発生し、容器底面を気泡が覆い圧力が低下したのち、上部の大気圧との差圧により液が下方に加速され底部に衝突、気泡が瞬間的に消滅することで高圧が発生したと考えられる。この時に高圧が発生する現象は配管システムでバルブが急に閉じられたときに発生する水撃現象(water hammer)と類似している。続いて時刻 20~25msec で二度目の圧力上昇が生じ、その後は圧力の増減はみられなかった。この二度目の圧力上昇は容器がブロックに衝突する時刻で発生しており、容器の急減速が原因で圧縮波が発生したと考えられる。

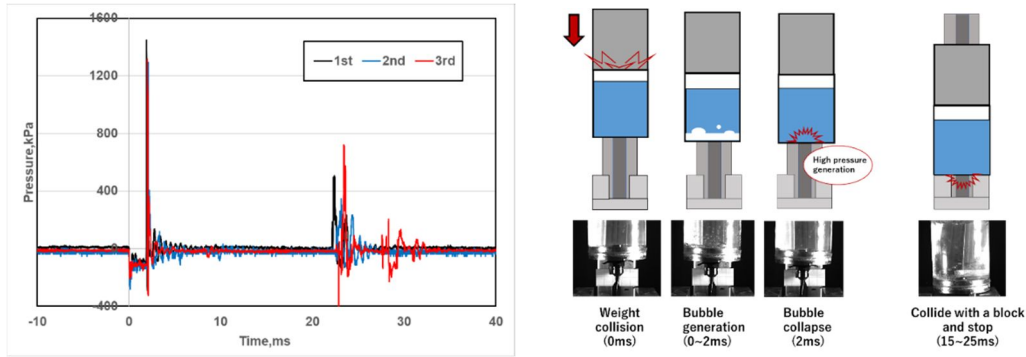


図3 キャビテーションによる圧力上昇の計測

図4のように容器底面に極細熱電対(0.1mm)を挿入しキャビテーション発生時に生じる温度の計測を実施した。本実験では気泡が崩壊するときに断熱圧縮により温度上昇することが予測される。しかし、実験結果から圧力上昇が生じている時刻と温度上昇の時刻には差がある。これは熱電対の先端で気泡の崩壊が生じるとは限らないこと、圧力センサと熱電対の位置に違いがありその点における圧力上昇のタイミングが異なったことが原因として考えられる。本実験では従来予測されていた数 1,000K には及ばないものの、400K 程度と高温を観測することができた。

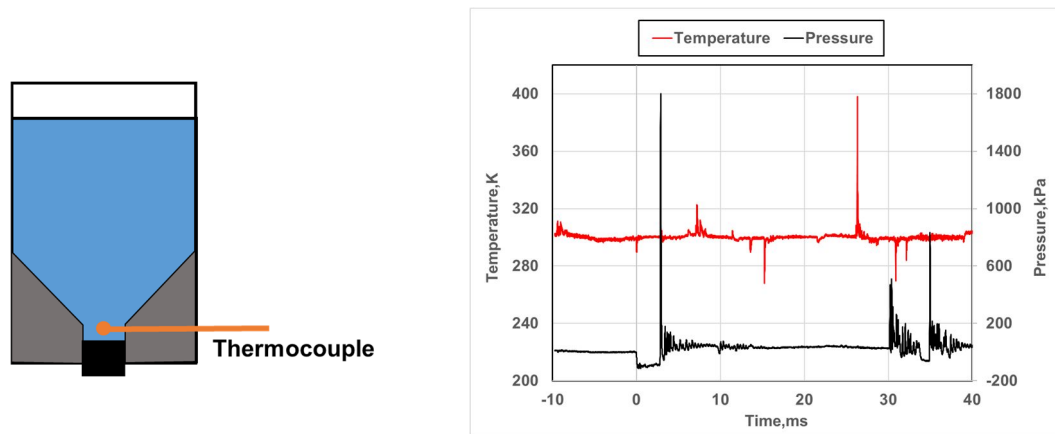


図4 キャビテーションによる温度上昇の計測

おもりの落下衝撃を容器に加えることによりキャビテーションを発生させた。条件を変え、容器底面の圧力と温度の計測を実施し、キャビテーションにより 2MPa と 400K 程度の圧力と温度が計測された。一連の実験でどの条件が高压を引き起こすために必要な要因かを調べた。その結果、気泡発生から崩壊までの時間と液位の値が発生する圧力の値に影響し、容器形状については底面角を付けることで高压を発生させられることが分かった。おもり高さ、液位、容器形状などの条件を変えることによってより高温高压の発生が期待される。

2021 年度に、能代ロケット実験場において本研究とは別に実施された大規模水素サプライチェーン向け分離継手の分離試験において、液体空気の滴下による水素着火現象を再観測し、映像記録に成功した。2022 年度にも分離試験を実施したが、この時は着火が発生しなかったため、実大スケールでの現象観測を行うことはできなかった。

[1] 辻野到磨, 吹場活佳, 小林弘明, 坂本勇樹, キャビテーションによる水素着火の可能性に関する検討, 第 64 回宇宙科学連合講演会, 2F17, 2021 年 11 月 10 日

[2] 辻野到磨, 吹場活佳, 小林弘明, 坂本勇樹, 急加速によるキャビテーションに対する諸因子の影響, 2021 年度衝撃波シンポジウム, 1C3-2, 2022 年 3 月 9 日, オンライン

[3] 小林弘明, 液体ロケット技術をベースとした液体水素の安全利用技術, Explosion 31, p177-179, 2021

[4] 坂本 勇樹, 小林 弘明, 大門 優, 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, 日本機械学会 第 100 期流体工学部門講演会 2022 年 11 月

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 小林弘明	4. 巻 31
2. 論文標題 液体ロケット技術をベースとした液体水素の安全利用技術	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Explosion	6. 最初と最後の頁 177-179
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 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0件

〔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	吹場 活佳 (Fukiba Katsuyoshi) (50435814)	静岡大学・工学部・准教授 (13801)	

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