

平成30年6月15日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05782

研究課題名(和文) 気泡の崩壊圧力抑制に対する単一蒸気/不溶性冷媒気泡の膨張・収縮運動の動力学

研究課題名(英文) Dynamics of a vapor/refrigerant bubble to suppress collapse pressure

研究代表者

川島 久宜 (Kawashima, Hisanobu)

群馬大学・大学院理工学府・准教授

研究者番号：50399531

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：キャビテーションの崩壊にともなう強い圧力は、流体機械に対して振動、騒音や物体表面に損傷を与えることが知られている。本研究では、水中に不溶性冷媒液滴(HFE：ハイドロフルオロエーテル)を添加することで、キャビテーションの崩壊にともなう強い圧力を抑制について調べた。流体機械などに発生するキャビテーションは、複数の気泡が隣接して存在する。ここでは、キャビテーションによって発生した気泡について、単一気泡の半径運動に注目した。

本研究により、冷媒液滴を添加することで、気泡の成長は助長されるものの、その時の崩壊にともなう圧力は大幅に低減できることが分かった。

研究成果の概要(英文)：The pressure on a cavitation collapse motion causes a vibration, a noise, and erosion to a fluid machinery. In this study, the suppression of a pressure in cavitation collapse motion was investigated with injecting HFE (Hydrofluoroether) liquid which is a kind of refrigerant liquid. A single bubble radial motion as the simplest model for cavitation was used in this study and the thermal effect on the bubble radial motion was experimentally discussed. The bubble growth with injecting HFE became larger than that of without it. On the other hand, the thermal effect of HFE had influence on bubble motion and the pressure on bubble collapse motion was suppressed.

研究分野：流体工学

キーワード：混相流 気泡 可視化 熱・物質輸送

1. 研究開始当初の背景

流体機械が液体中で高速で移動するとき、液体中にキャピテーションと呼ばれる発泡現象が生じることが知られている。キャピテーションは、流体機械に振動、騒音、表面壊食を引き起こすことため、これを抑制する方法が長年調べられてきた。

キャピテーションは、液体中の圧力が飽和蒸気圧を下回ることで発泡する、減圧にともなう沸騰現象と理解することができる。一方、圧力が回復した際には、成長した気泡が急激に収縮運動へと転じ、崩壊に至る。この気泡の崩壊は強い圧力をともない、流体機械の性能低下を引き起こす要因となる。キャピテーションは、流体機械の駆動状態、液体の純度、物体の表面性状をはじめとした様々な要因に影響を受けるため、包括的な抑制方法を見出すことは容易ではないと言える。そこで、本研究では、気泡力学の知見から、気泡運動にともなう熱力学的効果を利用し、キャピテーションの特徴の一つである、崩壊にともなう圧力の低減に注目した。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的はキャピテーションの崩壊にともなう圧力の低減方法を見出すことにある。キャピテーションは、液体中の圧力低下により生じる発泡現象ととらえることができ、その運動には熱・物質輸送が大きく関与する。そこで、気液界面に生じる熱輸送を効果的に用いることで、気泡の崩壊にともなう圧力の低減方法を実験的に調べる。流体機械の作動流体として水が使用される場合が多く見られる。そこで、水よりも飽和蒸気圧の高い物性を持つ冷媒液体 (HFE) を水中に添加することで、崩壊時の冷媒液体の凝縮により生じる熱的效果を利用し、水中に発生したキャピテーションの崩壊挙動を緩和することで崩壊圧力の低減を狙う。

(2) 上述した実験では、水中に気泡核が必要となる。気泡核には水中に生成した単一空気気泡を気泡核として使用する。一方、HFE 液体を用いた実験では、水中にある HFE 液滴の内部に気泡核 (単一気泡) が必要となる。液滴内部に気泡を生成する方法については知見が乏しく、ここでは HFE 液体を水面上方から水面に対して滴下し、そのときに生じる気泡の形成について調べる。

3. 研究の方法

(1) 本研究は、キャピテーションの動力学を調べるために、最も簡素化されたモデルである単一気泡の運動に注目した。図 1 に実験に使用した実験装置概略図を示す。本装置は、上部に低圧部、下部に高圧部を持つ縦型衝撃波管を使用する。二つの管は薄い隔膜による遮断されている。低圧部内の気体は真空ポンプを用いて減圧可能である。高圧部は可視化部を兼ねた透明アクリル製容器を使用し、内

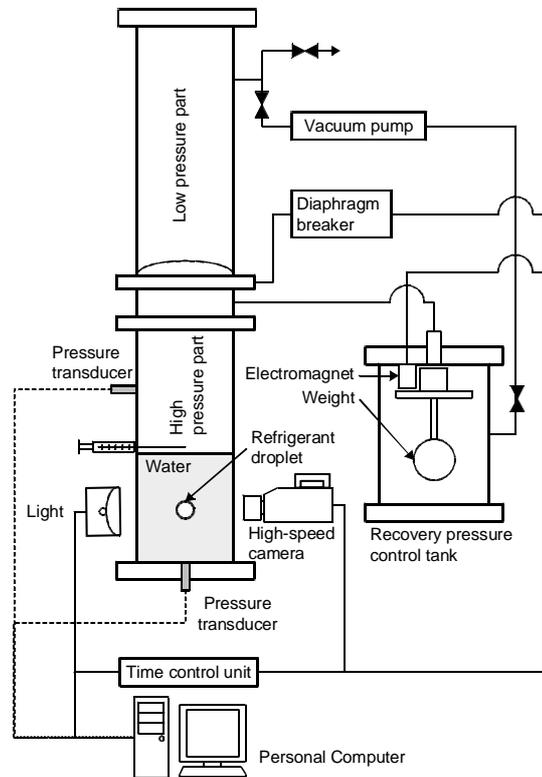


図 1 単一気泡の半径運動に使用した
実験装置概略図

部には水が封入されている。また、気泡の収縮を促すよう別途高圧容器を設け、配管により高圧部に接続されている。

本実験では、気泡核が必要となる。水中に発泡する空気気泡を実験に使用する場合は、単一の空気気泡を高圧部底部から発生させた。一方、冷媒液体を用いる場合では、高圧の水面上方から単一冷媒液滴を水面に向かって自由落下させた。

高圧部内の水中に単一気泡が生成されたことを確認した後に、高圧部と低圧部の間に設置された隔膜を電氣的に破膜することで気泡周囲の圧力を急激に減圧する。そのときの気泡の挙動を高速度カメラを用いて撮影した。また、低圧部と高圧部の圧力、さらに水中の圧力を圧力センサを用いて計測した。これらの機器の駆動は外部信号発生器を用いて制御した。

本実験では冷媒液体として、HFE (ハイドロフルオロエーテル) を使用した。HFE は常温では液体であり、水よりも高い飽和蒸気圧を有する。表 1 に実験に、使用した水と冷媒液体の代表的な物性を示し、実験条件を表 2 に示す。

ここで、Case 1 は気泡の周囲圧力 p_L が水の飽和蒸気圧 $p_{sv,H2O}$ より下回る場合。また、Case 1 は HFE を用いず、水中に生成した単一の空気気泡に対して減圧実験を行った。Case 2 は気泡の周囲圧力 p_L が水の飽和蒸気圧 $p_{sv,H2O}$ より低い場合であり、Case 2 は水中を

表 1 実験に使用した液体の熱物性

		Water	HFE
Density, ρ [kg/m ³]	Liquid	995	1380
	Gas	2.2×10^{-2}	1.56
Saturated vapor pressure, p_{sv} [kPa]		3.10	14.6
Latent heat, L [kJ/kg]		2420	126

表 2 実験条件

Test No.	Minimum pressure in liquid
Case 1	$p_{L,min} < p_{sv,H2O}$
Case 2	$p_{L,min} < p_{sv,H2O} < p_{sv,HFE}$

落下する HFE 液滴に対して減圧実験を行った。

(2) HFE 液体を用いた単一気泡に対する減圧実験では、水中にある HFE 液滴の内部に気泡核(単一気泡)が必要となる。単一液滴が水面に衝突する際に気泡を巻き込むことが Rain Drop として知られている。本実験では、HFE を用いた場合の単一気泡の生成に、この Rain Drop を利用することを考え、その特性を実験的に調べる。図 2 に本実験で使用した装置概略図を示す。本装置は、アクリル製水槽内に水を満たし、水面上方から単一の HFE 液滴を滴下した。液滴の水面衝突時における水面近傍の挙動に対して高速度カメラを用いて撮影した。また水面上方にレーザ光を設置し、液滴がレーザ光を横切る際の信号を利用して、高速度カメラの撮影開始時期を制御した。実験では、水面からの滴下高さを変更することで、液面衝突時の速度を変化させた。

4. 研究成果

(1) Case 1 と Case 2 における高速度カメラ撮影結果の一例を図 3 に示す。Case 1 では破膜後約 10 ms 後に急激な膨張挙動を行い、45 ms 以降収縮運動へ推移し、49 ms 後に崩壊していることが確認できる。一方、Case 2

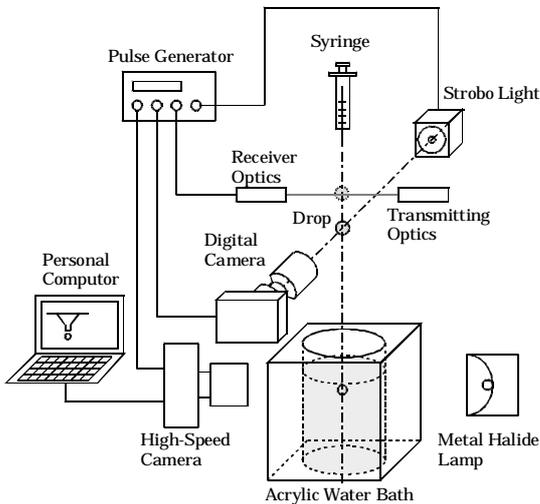
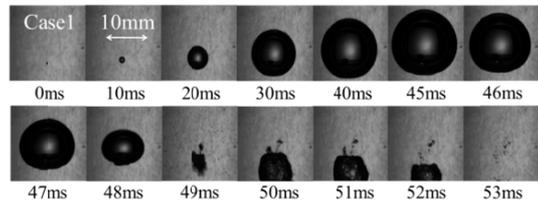
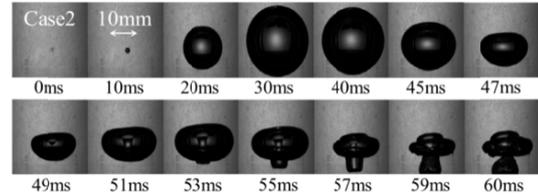


図 2 液滴の液面衝突実験に用いた装置概略図



(a) Case 1, 水中に発泡する空気気泡



(b) Case 2, HFE 液滴から発泡する気泡

図 3 減圧実験による気泡の半径運動の挙動

— Case 1 (Without HFE) — Case 2 (With HFE)

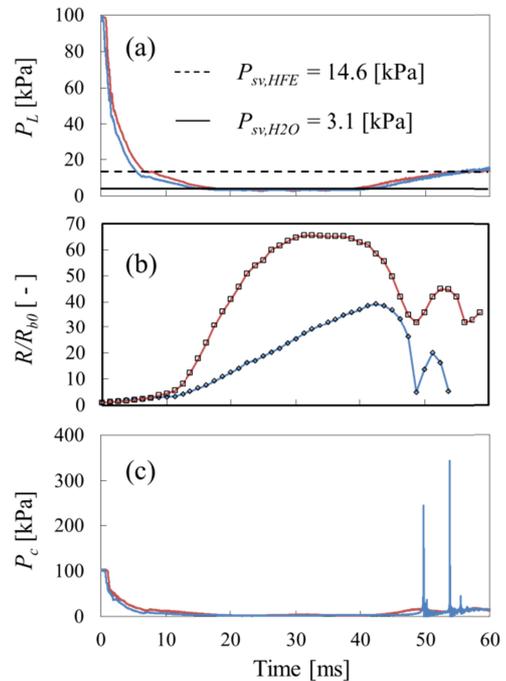


図 4 気泡運動における (a) 気泡の周囲圧力, (b) 気泡の半径運動, (c) 液体中の圧力

では Case 1 と同様に破膜後 10 ms 後に急激な膨張運動が確認でき、40 ms に収縮運動へと推移している。また、収縮運動は Case 1 に比べて緩慢であることが確認できる。

図 4 に図 3 における (a) 気泡に与えた圧力変化, (b) 初期気泡半径で正規化した気泡の半径運動, (c) 液体中の圧力の時間変化を示す。この実験では Case 1 と Case 2 では殆ど同じ圧力を気泡に与えていることが確認できる。そのときの気泡の半径運動は、HFE を用いた方 Case 2 の方が、Case 1 の水中に発

泡する空気気泡に比べ格段に大きい．さらに液体中の圧力を見ても，Case 1 では気泡の崩壊にともない急激な圧力上昇が生じているものの，HFE から気泡が発泡した場合には，気泡の収縮にともなう圧力は Case 1 に比べ格段に小さいことがわかる．

単一球形気泡の半径 (R) 運動に関する運動方程式は以下のように記述される．

$$R\dot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{1}{\rho_L} \left(p_B - p_L - 4\mu_L \frac{\dot{R}}{R} - \frac{2\sigma}{R} \right)$$

ここで p_B は気泡の内部圧力であり，気泡内部

$$p_B = p_{vw}(T_B) + p_g = p_v(T_\infty) - \rho_v \theta + p_g$$

の温度 (T_B) を関数とした蒸気圧力 (p_v) とガス圧力 (p_g) の総和として与える．ところで気泡の内部温度は通常既知では無いため，これを無限遠方温度 (T) を用いて表し，そ

$$\Sigma = \frac{(\rho_v L_v)^2}{\rho_L^2 c_{pL} T_\infty \alpha_L^{0.5}}$$

$$\theta = \Sigma(T_\infty) t^{0.5} \dot{R}$$

の補正項として Σ を付加し以下のように表す．

補正項 Σ は気泡の運動における気液界面に生じた相変化にともなう熱輸送効果を意味し，熱力学的パラメータ Σ を用いて以下のように与えられる (文献) ．

熱的パラメータ Σ は流体の熱物性値で与えられ，熱効果の補正値 Σ は気泡の半径運動が影響する．

図 5 に図 3 で示した気泡運動に対して算出した熱効果 Σ と飽和蒸気圧力で正規化した蒸気圧力の時間変化を示す．図の色は気泡の半径運動の過程を示した．図より，Case 1 では膨張過程，収縮過程に対して熱効果の時間的な変化は小さく，一方，Case 2 では Case 1 に比べて格段に大きい．このときの気泡内部の蒸気圧力の挙動を見ると，気泡の膨張過程では飽和蒸気圧力よりも小さく，逆に収縮過程では大きい．この結果は HFE 液体を用いた場合の気泡の半径運動にともなう熱効果は，気泡の成長，崩壊を抑制する効果として影響することを意味しており，HFE を用いた場合，気泡の収縮を緩和し，崩壊時の圧力を抑制する効果を得ることがわかる．

(2) HFE 液体を用いた気泡の半径運動に関する実験では，水中に単一気泡を生成する必要がある．図 6 に単一の HFE 液滴を水面に衝

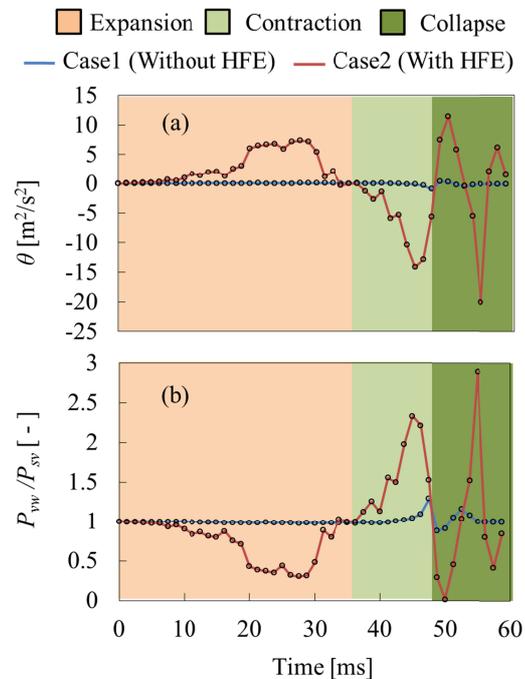


図 5 気泡運動における (a) 熱効果パラメータ，(b) 蒸気圧力

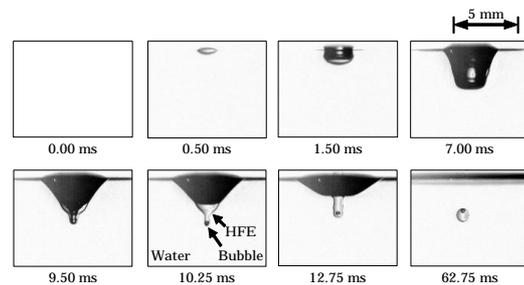


図 6 単一 HFE 液滴の液面衝突における液面近傍の様子

突させたときの水面近傍の可視化結果を示す．HFE 液滴を水面に衝突させると，水面に円錐状の窪みが形成される (7.00 ms)．HFE 液体を用いた場合，液滴衝突直後に窪みの気液界面に分布し，その後，窪みの底部に集まる (9.60 ms)．この窪みは衝突直後では水中方向へと進行し，やがて窪みは横方向に広がりながら水面に向かって移動する．このとき窪みの底部には突起状の HFE 液体が確認できる (10.26 s) ある．さらに時間が経過すると，窪み底部にある HFE 液体内部に単一の気泡が生成され (12.76 ms)，気泡を含む単一の HFE 液滴が水中内に生成される (62.76 ms) ．

図 7 に単一液滴を水面に滴下した際の気泡の混入条件について，フルード数 Fr とウェーバ数 We で整理した結果を示す．図には水 - HFE 液体の他に液滴と液面が同種類の液体を使用した場合 (水 - 水，HFE - HFE，Oil -

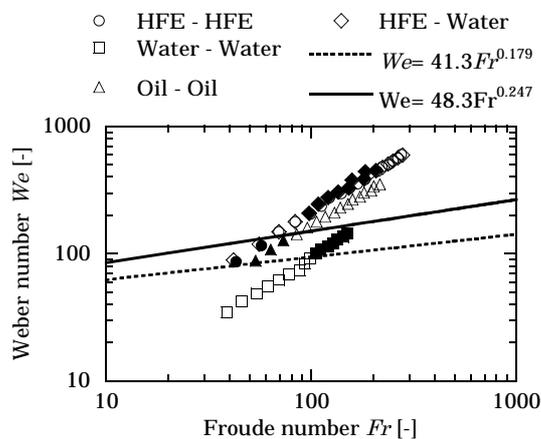


図 7 単一液滴の液面衝突における気泡混入条件

oil) の結果についても示している。また、図中の実線と破線は理論的に得られた気泡混入の臨界値である。図中の記号中、黒塗りは液滴の液面衝突において、水中に気泡が生成された結果であり、白抜は気泡の生成が確認されなかった結果である。液体と液面が同種類の液体を用いた場合、気泡の生成は理論から得られた結果と一致、一方、液滴と液面が異なる液体を用いた場合（水 - HFE）、既存の理論とは異なる範囲で水中に気泡が発生することがわかる。

<引用文献>

Brennen C.E.: Hydrodynamics of Pumps, Oxford University Press, (1994).

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

川島 久宜, 藤島 駿, 小川 宗一郎, 石間 経章, 単一液滴の液面衝突時に混入する気泡の可視化, 可視化情報学会論文集, 査読有, Vol.36, No.5, 2017, 24-31
DOI:
<https://doi.org/10.3154/tvsj.36.24>

[学会発表](計6件)

佐々木 優希, 鋼球の水面衝突による鋼球背後の気泡形成, 可視化情報学会全国講演会, 2016
Kawashima, H., Bubble entrainment behavior during drop impingement onto liquid surface, 9th International Conference on Multiphase Flow 2016, 2016
小川 宗一郎, HFE7200 液滴から発泡する単一気泡運動の実験的研究, 平成 26 年度衝撃波シンポジウム, 2015

Ogawa, S., Thermodynamic Effects to Radial Motion of a Single Multi Component Vapor Bubble, The First Pacific Rim Thermal Engineering Conference, 2016

川島 久宜, 液滴の液面衝突に形成される微小気泡の可視化, 可視化情報学会全国講演会, 2015

小川 宗一郎, 共沸系単一気泡の崩壊圧力抑制に関する実験的研究, 可視化情報学会全国講演会, 2015

6. 研究組織

(1)研究代表者

川島 久宜 (KAWASHIMA, Hisanobu)
群馬大学・大学院理工学府・准教授
研究者番号: 5 0 3 9 9 5 3 1

(2)研究協力者

石間 経章 (ISHIMA, Tsuneaki)