

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月 10日現在

機関番号：12301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22760123

研究課題名（和文） 不溶性2種混合流体の熱力学的特性を利用したキャビテーション抑制法の確立

研究課題名（英文） Development of Cavitation Suppression Using Thermal Characteristics of Insoluble Mixture Liquid

研究代表者

川島 久宜（KAWASHIMA HISANOBU）

群馬大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：50399531

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衝撃力を抑制することを目的に、冷媒液体を用いた実験を行った。実験は冷媒液滴から発泡する単一気泡の膨張・収縮運動と回流水槽を用いたキャビテーション流れを対象に高速度カメラを用いた可視化計測、衝撃力計測を行った。どちらの実験も冷媒を用いた場合では気泡の成長量、発生量は冷媒を用いない場合に比べ増加するが衝撃力は緩和した。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study is a high impulsive force suppression with refrigerant liquid on cavitation collapse motion. The visualization with a high-speed video camera and a measuring of impulsive force was performed for both experiments of a single bubble radial motion in varying pressure fields and cavitating flow. The impulsive force with refrigerant liquid was suppressed compared with the case without refrigerant it, though the bubble growth and amount of bubble generation in cavitating flow with refrigerant liquid was greater than that of without case.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：混相流，キャビテーション，気泡，冷媒，熱・物質輸送，可視化計測

1. 研究開始当初の背景

液体を作動流体とする流体機器は、性能向上のために高速化を要求されることがしばしばある。しかし、流体の加速は、液体の圧力低下にともなう減圧沸騰（キャビテーション）を生じさせ機器の性能低下を引き起こすことが知られている。キャビテーションの発生は、機器に作用する推力の低下をともなう

ため、発生を抑制することが第一に検討されるが、キャビテーションの崩壊時に発する強い衝撃力は、機器への振動、騒音、壊食などを引き起こすためこれを抑制することも重要な課題である。前者であるキャビテーションの発生は、水中にある不純物や、物体表面に付着した気泡核と密接な関連を持つことから、実用上、キャビテーションの発生を抑

制することは極めて難しい。一方、後者に対しては、衝撃力緩和のために微小気泡を注入する方法など幾つかの研究例は報告されているものの未だ解決策は模索中である。

2. 研究の目的

本研究ではキャビテーションの崩壊にともなう強い衝撃力を抑制することを目指して、液体中に水よりも蒸気圧力が高い冷媒液体を注入する方法を試みた。これまでの研究により、相変化をともなう気泡の運動に対する気液界面の熱・物質輸送の重要性は述べられているものの積極的に熱・物質輸送効果を利用した例は少ない。

本研究はこの冷媒注入による衝撃力抑制法を確立するため、(1)冷媒液滴を用いた単一球気泡に対する減圧実験、(2)キャビテーション流れに対する冷媒注入実験、の異なる2つの実験を行いその物理の解明を目指す。実験はともに高速度カメラを用いた可視化計測、崩壊圧力、衝撃力計測を実施した。なお衝撃力計測には、PVDF フィルムを用いたセンサを製作し計測を行った。

3. 研究の方法

(1)冷媒液滴から発泡する単一気泡の半径運動に関して：実験には上部を低圧部、下部には可視化部を兼ねたアクリル製高圧部とした衝撃波管を使用した。低圧部と高圧部は薄い隔膜を用いて遮断し、上部の低圧部内圧力を任意の圧力まで減圧する。一方、高圧部であるアクリル製水槽内には、底部から約5cm程度水を入れる。さらに水面上方から微小の冷媒液滴を滴下する。冷媒は水面に衝突した際に、冷媒液滴内部に微小な空気を捕捉し、その後、水中を落下する。冷媒液滴が可視化領域に達した際に、隔膜を瞬時に破膜することで、急激に減圧を行う。このとき、冷媒液滴内部に捕捉された空気気泡は急激に成長する。実験では気泡の周囲圧力を冷媒の蒸気圧近傍まで減圧した場合の気泡の成長・崩壊挙動に関して、高速度カメラを用いた可視化計測と崩壊圧力計測を実施した。

(2)冷媒液体注入によるキャビテーション流れの衝撃力抑制効果に関して：実験では可視化部を兼ねた縮流部を流路の一部に持つ回流水槽を使用する。流路内の速度は、インラインポンプの回転数をインバータで制御することで変化させた。冷媒液体は縮流部上流に設置した自動送り装置を用いて定量的に流路内に注入した。また、可視化部に設置した縮流部には、衝撃力を計測するために自作したPVDF フィルムを用いた衝撃力センサを配置することで、キャビテーション崩壊時の衝撃力計測を行った。ここでは、冷媒をキャビテーション流れに注入した場合、注入しない場合に対して、同時刻における高速度

カメラを用いた可視化計測と衝撃力計測を実施した。

4. 研究成果

(1)冷媒液滴から発泡する単一気泡の半径運動に関して：ここでは冷媒から発泡する単一気泡の半径運動を対象に可視化計測ならびに崩壊圧力計測を行う。

冷媒液滴を水中に滴下し、その周囲圧力を急激に減圧した場合、冷媒からの発泡は見られない。つまり、単一気泡の運動を実施するためには別途気泡核が必要になる。そこで、微小冷媒液滴を水面に落下する方法を用いた。この時の冷媒液滴が水面に衝突する際の挙動を図1に示す。冷媒液滴が水面に衝突すると、水面に大きな窪みを形成する。この時冷媒液体は窪み内部側壁と底部にある。その後、冷媒と空気が接する界面が時間と共に窪み中心方向に移動し、冷媒液体はその内部に微小な空気気泡を捕捉したまま水中を落下する。同様の実験を複数回実施したところ、落下させる冷媒液滴径が同程度であれば、冷媒液滴に捕捉される気泡の大きさは同等となった。本実験では、この冷媒に捕捉された空気気泡を核として、水中にある冷媒液滴の周囲圧力を急激に減圧する。

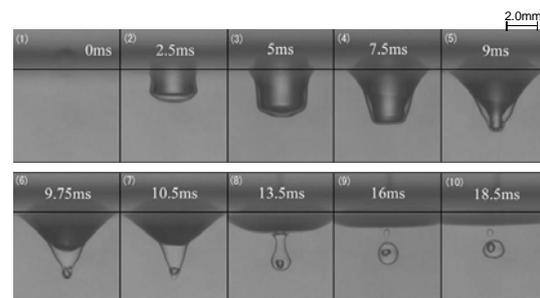


図1 冷媒液滴の水面衝突挙動

図2に単一気泡の膨張・崩壊運動における崩壊圧力の一例を示す。上段は水中に発生させた微小な空気気泡の周囲圧力を急激に減圧し、圧力回復した際に得られた崩壊圧力であり、下段は空気気泡を含む冷媒液滴に対して同様の実験を実施した際に得られた崩壊圧力である。水のみを用いた場合、崩壊圧力は1MPa程度まで達しているのに対して、冷媒から発泡した気泡が崩壊する場合には、100kPaにも達しておらず、崩壊圧力が大きく抑制されていることがわかる。この原因を明らかにするために高速度カメラによる可視化結果から両者の崩壊挙動の違いを調べた。水のみを用いた場合では比較的球形気泡を保ったまま収縮し、また収縮速度は速い。一方、冷媒を用いた場合では水のみを用いた場合に比べ格段に大きく成長するものの崩壊

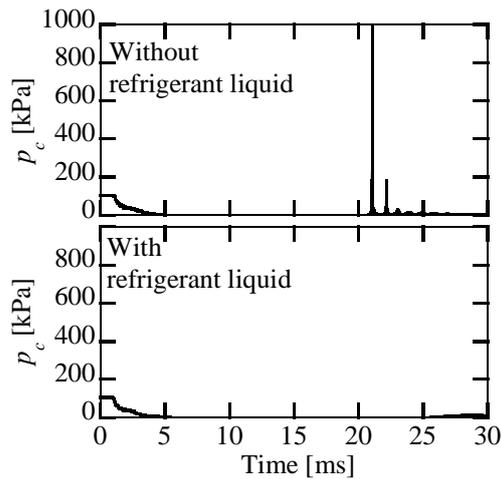


図 2 単一気泡の崩壊衝撃圧力

速度は水のみを用いた場合に比べて小さい。また、成長した気泡径が大きいため収縮時の界面不安定が顕著となり、崩壊時に直ぐに変形する。

可視化計測結果を用いて、気泡の膨張は相変化によるものと仮定することで蒸発量を求め、以下の式

$$\dot{M}_w = \frac{\alpha (p_{sv} - p_v)}{2.13204\alpha + 2(1 - \alpha)\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{2}{\mathfrak{R}_v T_{L,w}}}$$

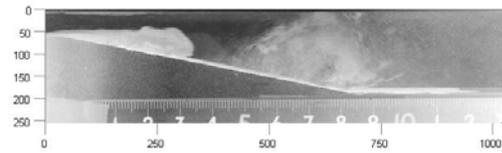
$$T_{L,w} = \frac{2\pi \dot{R}}{[p_{sv} - p_v]^2 \mathfrak{R}_v}$$

から気液界面における壁面温度を推定したところ、この系に関しては温度降下大きく、水の蒸発は著しく抑制されている可能性があることが示された。

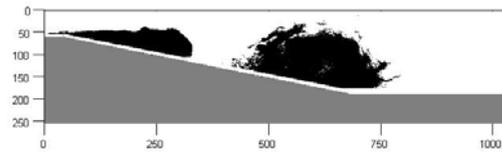
本実験で対象とする気泡の運動は、二種類の液体の相変化をとまなう運動となり、これらの影響を評価するためには気泡周囲圧力を精密に制御する必要がある。今回の実験では気泡の成長に関しては精密に周囲圧力を変化させることが可能であったが、崩壊に影響を及ぼす圧力回復については装置の制約からこれを制御することは難しく、水と冷媒のそれぞれの熱・物質輸送効果を分別するには至っておらず今後の課題となった。

(2) 冷媒液体注入によるキャビテーション流れの衝撃力抑制効果に関して：回流水槽に縮流部を設けることでキャビテーションを発生させ、冷媒液体を縮流部上流から注入する。キャビテーションは流路の最狭部で発生し、時間とともに下流方向へと成長する。その後、流路の拡大とともに圧力回復によ

り、成長したキャビテーションは収縮運動へと推移する。この収縮運動は上流方向に向かうリエントラントジェットが発生をとまなない、縮流部からキャビテーションを剥離させる。この一連の流れの様子を高速度カメラにより撮影する。



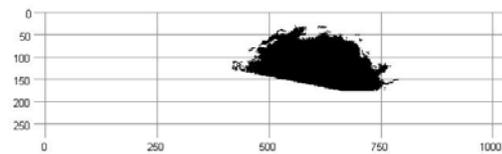
(a) 入力画像



(b) 二値化画像



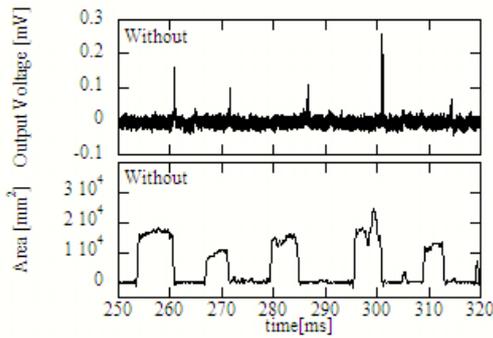
(c) キャビテーション成長部



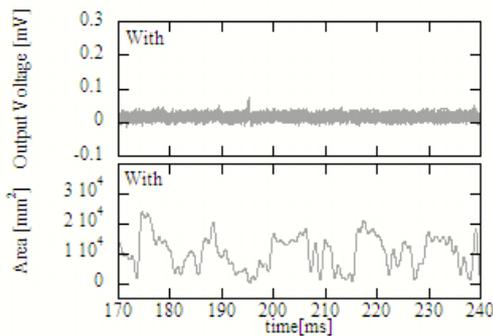
(d) キャビテーション崩壊部

図 3 画像処理結果

冷媒を注入すると、水のみを用いた場合に比べて縮流部で発生するキャビテーションの発生量が多くなる。本実験では、高速度カメラにより得られた画像を用いて、冷媒を注入した際の流れの変化を調べることが必要となる。そこで撮影された画像に対して、キャビテーションの挙動を解析する画像処理プログラムらの作成した。ここではキャビテーションの成長過程と、収縮過程を分別し、それぞれの運動を調べることを目指した。最も広く使用されている画像解析方法の一つとして二値化法が挙げられる。二値化法はある閾値を用いて背景と対象物とを分別するが、閾値の選定には十分注意が必要である。本実験では撮影された各画像に対して正規化したヒストグラムを利用して閾値を求めた。図 3 に画像処理結果の一例を示す。入力画像(図 3-a)に対して上述した二値化の閾値選定法を用いることによりキャビテーション流れにおける気相部を抽出し(図 3-b に



(a) 冷媒を注入していない場合



(b) 冷媒を注入した場合

図 4 冷媒非注入, 注入時における衝撃力計測結果と気泡崩壊部の挙動

おける黒色), その後キャビテーションの成長部(図 3-c)と崩壊部(図 3-d)をそれぞれ分別した。

図 4 に本実験により得られた冷媒液体を注入しない場合と注入した場合に対する衝撃力計測結果(上図)とキャビテーション崩壊挙動(下図)の時間変化を示す。冷媒を注入していない場合では衝撃力センサに強い出力が発生していることが確認できる。この衝撃力が発生している時刻は、キャビテーションが急激に収縮する位置と一致している。一方、冷媒を注入した場合ではキャビテーションの発生量は冷媒を注入した方が多いが、強い衝撃力が殆ど発生していない。特にキャビテーション崩壊挙動に注目すると、冷媒を注入しない場合は急激に面積変化が生じているが、冷媒を注入した場合は緩やかに収縮していることがわかる。冷媒を注入しない場合では、縮流部の後流における圧力回復により水は凝縮するためキャビテーションは急激に収縮運動し、強い衝撃力を発生する。一方、冷媒を注入した場合、圧力回復により水は凝縮をとまうがこの時の液体圧力は冷媒の飽和蒸気圧以下であるため、キャビテーションの収縮を抑制する作用となる。この結果、冷媒を注入した場合のキャビテーシ

ンの崩壊挙動は冷媒を注入していない場合比べて緩やかとなり、衝撃力が抑制されていると考えられる。

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)

- ① 川島久宜, 柴崎良太, 石間経章 (2011) "微小冷媒液滴の水面への衝突による微小気泡の混入," 可視化情報学会論文集, Vol. 31, No. 7, pp. 27-32, 査読有。

[学会発表] (計 9 件)

- ① Hashimoto, Y., Koike, Y., Kawashima, H., Ishima, T. (2012) "Multipoint Measurement of Impact Force with PVDF Film on Cavitating Flow," *4th Int. Conf. on Advance Micro-Device Eng.*, 2012. 12. 7, 桐生文化会館 (群馬県) Japan, Paper No. P65.
- ② NURUL SYAFIQA, Kumazawa, Y., Koike, Y., Kawashima, H., Ishima, T. (2012) "Influence of Collapse Pressure Control on Bubble Radial Motion," *8th Int. Symp. on Cavitation*, 2012. 8. 15, Novotel Clark Hotel (シンガポール, シンガポール), Paper No. 161.
- ③ Kawashima, H., Shibasaki, R., Ishima, T. (2011) "Visualization of Droplet Impingement on Liquid Surface", *3rd Int. Conf. on Advance Micro-Device Eng.*, 2011. 12. 9, 桐生文化会館 (群馬県), Paper No. P29.
- ④ Kawashima, H., Abe, H., Y. Kumazawa, S., NURUL, Ishima, T. (2011) "Visualization of the Cavitation with Refrigerant Liquid", *11th Int. Conf. on Fluid Control, Measurement, and Visualization*, 2011. 12. 6, National Taiwan Ocean University, (基隆, 台湾), Paper No. 068.
- ⑤ NURUL SYAFIQA BINTI SAMSUL BAHRIN, 小池裕平, 川島久宜, 石間経章 (2011) "不溶性液体注入によるキャビテーション流れの可視化," 可視化情報学会 全国講演会, 2011. 9. 27, 富山国際会議場, (富山県), Paper No. B103.
- ⑥ Kumazawa, Y., Shibasaki, R., Kawashima, H., Ishima, T. (2010) "A Bubble Radial Motion from a Refrigerant Droplet in Varying Pressure Fields", *14th. Int. Symp. on Flow. Vis.*, EXCO, 2010. 6. 21, (大邱, 韓国), Paper No. 3D2-208.
- ⑦ Kawashima, H., Moriyama, Y., Kumazawa,

Y., Ishima, T. (2010) "Reduction of Cavitation Damage by Refrigerant Injection", *14th. Int. Symp. on Flow. Vis.*, EXCO, 2010.6.21, (大邱, 韓国), Paper No. 1D4-263.

- ⑧ Kawashima, H., Kumazawa, Y., Kameda, M. (2010) "Radial Motion of a Spherical Cavitation Bubble in Varying Pressure Fields", *7th Int. Conf. on Mult. Flow*, Tampa Marriot Waterside Hotel and Marina, 2010.5.31, (タンパ, 米国), Paper No. 2.1.3.
- ⑨ 熊沢勇貴, 柴崎良太, 川島久宜, 石間経章 (2010) "不溶性冷媒液体を用いたキャビテーション抑制法の検討," 日本機械学会年次大会, 名古屋工業大学, 2010.9.8, (愛知県), Paper No. S0507-2-4.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川島 久宜 (KAWASHIMA HISANOBU)
群馬大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：50399531

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし