

令和 2 年 4 月 19 日現在

機関番号：57601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14596

研究課題名(和文) 気泡力学に基づく高速超純水中でのキャビテーション初生素過程の解明

研究課題名(英文) Investigation of elementary processes of cavitation inception in high-speed ultrapure water based on bubble dynamics

研究代表者

藤川 俊秀 (FUJIKAWA, Toshihide)

都城工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号：10777668

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、高速で流れる水あるいは油類中に置かれた円柱表面近傍での流れのはく離、局所的張力発生、気泡核生成、気泡の離脱・成長、流れの中での気泡の並進運動、すなわち「初生素過程」を実験、理論解析、計算流体力学により解明することを目的となされたものである。実験では、はく離点と張力発生の位置、そこでの圧力・流速を明らかにできる非循環型キャビテーショントンネルを開発し、はく離点近傍での張力発生と気泡生成に着目してCFD解析と実験を行った。さらに、静止水や油類中で、張力解除時の気泡半径および大気圧解放後の最大気泡半径を近似的に求めることができる気泡力学に基づくモデル方程式を導出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高速超純水用小型キャビテーショントンネルは、水中に不純物や浮遊気泡を含まない状態で張力により気泡核を発生させることができ、当該分野では最初の装置である。非平衡蒸発と気泡の並進運動を考慮した気泡力学の基礎方程式をCFD解析で得られた流れ場で解いた研究はこれまでなされたことがない。気泡核発生、成長、離脱、並進運動を観測し、初生に至るまでの素過程を実験及び理論の両面から解明する。初生に及ぼす溶存空気及び水温の影響を明らかにする。初生素過程の解明をとおして、実際の流体機器内での初生機構及びキャビテーション流れのモデル化に指針を与えることができる。

研究成果の概要(英文)：Elementary processes of cavitation inception were investigated near a circular cylinder installed in high-speed water and oils. The non-circulation type of cavitation tunnel was constructed so that experimental conditions suitable for the inception study could be realized in the tunnel; (i) several cavitation nuclei are formed at a separation point on the cylinder due to tension; (ii) cavitation occurs only one time in each run, and (iii) size of solid particles and air contents in liquids can be controlled. We classified cavitation patterns into three types, by which the experimental conditions were found. Occurrence of tension in water behind the cylinder was clarified by CFD. Furthermore, the growth of a bubble in still liquids were theoretically investigated to forecast a radius attained during the negative pressure and, after that, a maximum radius attained under the successive atmospheric pressure.

研究分野：流体工学

キーワード：高速超純水用小型キャビテーショントンネル キャビテーション流れのCFD解析 張力 気泡力学 初生理論 核生成

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究は、二次元流路の中に流れと直角に置かれた円柱と流路壁の間の隙間(のど部)を超純水が 50m/s 程度の流速で過ぎる際に、のど部下流の円柱表面で局所的に発生する張力による気泡核生成、その後の成長、離脱、並進運動を経て、キャビテーション初生に至るまでの過程、すなわち「初生の素過程」を実験と理論の両面から解明することを最終的な目的としている。

実験では、気泡核が生成後、初生に至る過程を顕微鏡付き高速ビデオカメラにより観測する。対照実験として、水道水中での初生の素過程を観測する。理論解析では、実験条件の下で、ナビエ・ストークス方程式系の CFD 解析により円柱表面での流れのはく離点近傍での張力発生機構を明らかにする。さらに気泡壁での非平衡蒸発及び気泡の並進運動を考慮した気泡力学の基礎方程式を CFD 解析により得られた流れ場で解くことにより、気泡の成長、離脱、並進運動を追跡し、これらを実験による観測結果と比較して「初生の素過程」を解明する。

2. 研究の目的

本研究の目的は、高速水中の局所的な張力下で発生するキャビテーションについて、その初生機構と条件を実験と理論解析により解明することである。初生とは、液圧や気泡核サイズなどの間である条件が満たされたとき、気泡核が際限なく成長する現象をいう。図 1 に示す非循環型キャビテーションタンネル内の二次元流路の中で、流れと直角に置かれた円柱と流路壁の隙間(のど部)を水が流速 50m/s の時、はく離点 S で理論上約 1.4MPa の張力が発生する。流れは乱流である。本研究では、

- (1) 流れのはく離と張力発生、
 - (2) はく離点(図 1, 右側の図の S 点)近傍での気泡核の生成・成長・離脱、
 - (3) 離脱後の成長をとまらぬ気泡の並進運動を経て初生に至る過程、
- を対象とする。

キャビテーション気泡初生の機構と条件を研究するためには、水中の固形物や浮遊気泡を除去でき、水温、空気含有度を調節、はく離点近傍での流速・圧力、はく離と張力発生を正確に制御できる実験装置を用いなければならない。さらに、初生条件を明らかにするためには、3次元非定常ナビエ・ストークス方程式を解いて乱流場を解析し、この中で気泡力学により気泡の成長と並進運動を扱う必要がある。このため、本研究では、非循環型キャビテーションタンネルによりキャビテーション初生の実験を行うとともに計算流体力学(CFD)及び気泡力学により理論解析を行う。本タンネルは、タンネル観測部で発生したキャビテーション気泡が再び観測部に戻らないように非循環型として設計されており、当該分野では初の試みである。

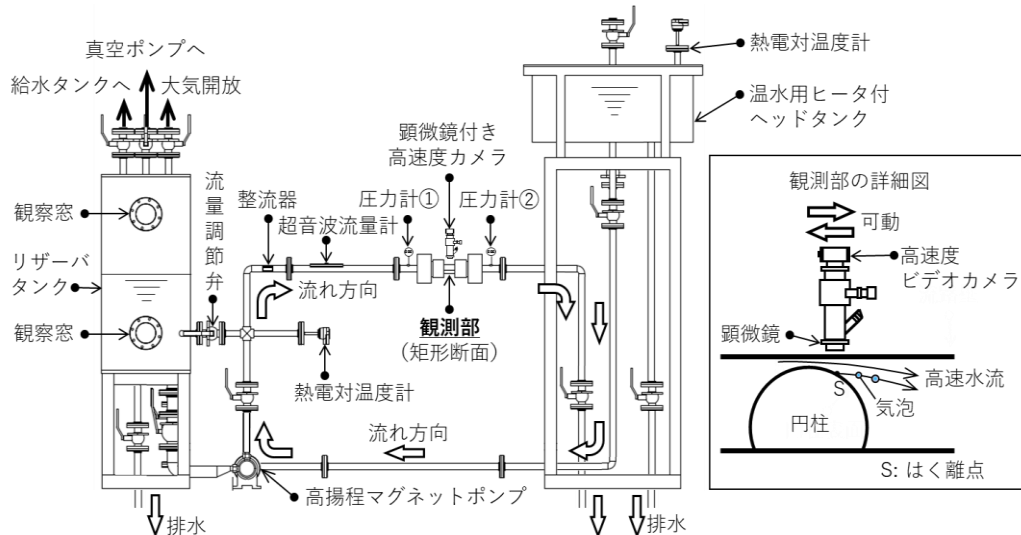


図 1. 実験装置概略図(観測部での流れの持続時間=約 15 分、のど部の隙間幅=0.8 mm、のど部でのレイノルズ数 $Re=4 \times 10^4$ 、はく離点 S ではく離が周期的に発生)

3. 研究の方法

[I. 実験]

図 1 に示す非循環型キャビテーションタンネルは平成 31 年(令和元年)3 月に都城高専流体力学実験室に設置完了し、現在、実験を進めている。本装置は、試料水が循環しないためにタンネル内で発生したキャビテーション気泡が再び観測部に戻らず、水温、空気含有度、流速及び圧力を調節できるという特徴を有しており、試料水中で一度だけキャビテーションが発生するように設計されている。このため現象の再現性に優れている。

タンネル内の二次元流路の中で、流れと直角に置かれた円柱と流路壁の隙間(のど部)を水が 50m/s 程度の流速で通過する状況で、流路壁の隙間下流のはく離点近傍で発生する張力(1.4MPa 程度)下で、張力発生と単一気泡生成の関係に着目して実験を行う。のど部でのレイノルズ数は 4×10^4 で、流れは乱流である。実験は高純度純水、水道水で行う。1.4MPa の張力下の静止水中で

は半径 $1\mu\text{m}$ 以上の気泡核が初生することが理論的に分かっているため、水道水を用いる場合、フィルターのメッシュを様々に変えて浮遊固形物のサイズを調節する。実験では、

- (1) はく離点 S 近傍で発生する単一気泡核、
- (2) 気泡核の初期半径、
- (3) 気泡核状態から成長した気泡のはく離点からの離脱、
- (4) 気泡の並進運動、

を顕微鏡付き高速カメラ（百万コマ/秒）により観測し、II. 理論解析と対比して初生条件（張力、気泡核の初期半径、高純度純水と水道水の違い）を明らかにする。

【II. 理論解析】

気泡力学を組み込んだ CFD 解析により初期の気泡核の大きさをパラメータとして、気泡核の成長と位置を追跡し、観測結果と比較して気泡核の初期の大きさを推定する方法を採る。CFD 解析では 3 次元非定常ナビエ・ストークス方程式を解いて乱流場を解析し、この場の中で気泡力学の基礎方程式（Rayleigh-Plesset 方程式と並進運動の方程式）を解く。具体的には、

- (1) 円柱表面近傍での流れのはく離、
- (2) はく離点での単一気泡核の生成・成長・離脱、
- (3) その後の気泡の成長をとまなう 3 次元的な並進運動、
- (4) 並進運動を経て気泡が初生に至る過程、

を解析、気泡の成長と並進運動の観測結果と対比して初生条件（張力、気泡核の初期半径）を調べる。この場合、気泡は観測部の液体の体積と比較して無視できる体積を占めるため流れは液単相とする。

4. 研究成果

【I. 実験】非循環型キャビテーションタンネルの性能試験と流動様式の分類

図 2 はキャビテーションが発生するレイノルズ数 Re とキャビテーション数 σ の関係を示したものである。レイノルズ数 Re およびキャビテーション数 σ はそれぞれ次式で定義した¹⁾。

$$Re = \frac{DU_{th}}{\nu} \quad (1),$$

$$\sigma = \frac{p_{up} - p_v(T_l)}{\frac{1}{2}\rho(U_{th}^2 - U_{up}^2)} \quad (2),$$

ここで D はのど部隙間 ($=0.75\text{mm}$)、 U_{th} はのど部での断面平均流速、 ν は動粘性係数、 p_{up} は観測部上流側の圧力、 $p_v(T_l)$ は水温 T_l の影響を考慮した水の飽和蒸気圧、 ρ は密度、 U_{up} は観測部上流側の断面平均流速である。図中の○印は $0.1\mu\text{m}$ 以上の固形物や浮遊気泡を除去した水道水、●印は $1.0\mu\text{m}$ 以上の固形物や浮遊気泡を除去した水道水の場合の結果で、それぞれの場合について右側にキャビテーションの様相の写真を示してある。例えば、写真①の場合、 $0.1\mu\text{m}$ のフィルターでろ過した水は $1.0\mu\text{m}$ のフィルターの場合よりも高い Re 数でキャビテーションが発生しており、水中の固形物や浮遊気泡が小さいためにキャビテーションが発生しにくいことがわかる。

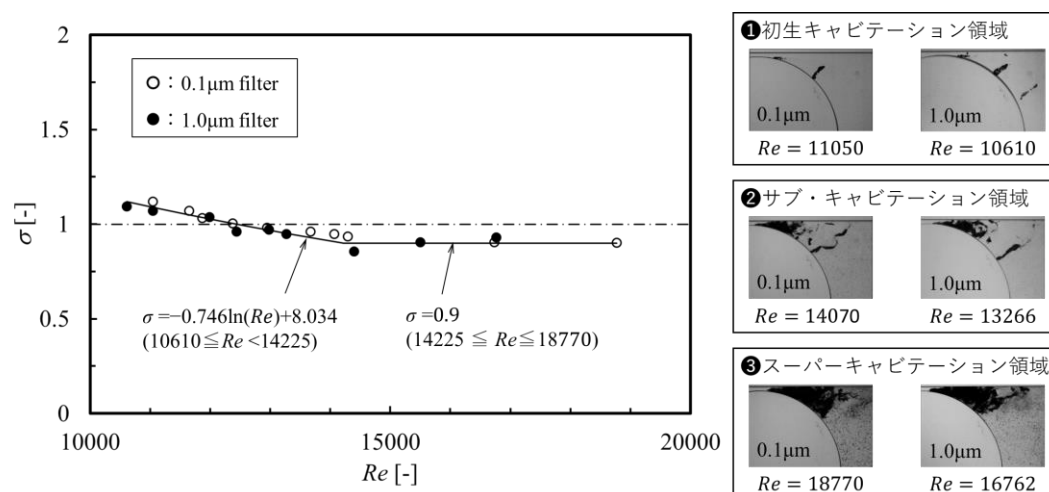


図 2. レイノルズ数 Re およびキャビテーション数 σ の関係とキャビテーションの様相

本装置で観測したキャビテーションの様相は、レイノルズ数 Re およびキャビテーション数 σ により以下の 3 つのパターンに分類でき、液体中に含まれる固形物や浮遊気泡の大きさが気泡の生成に影響を及ぼしていることが明らかになった。

キャビテーションの3つのパターン

- ① 初生キャビテーション領域 : $10610 \leq Re < 13250$ (キャビテーションが発生し始めた段階)
- ② サブ・キャビテーション領域 : $13250 \leq Re < 16700$
- ③ スーパーキャビテーション領域 : $16700 \leq Re \leq 18770$

図中の○印と●印を実験式で整理したものが図中の実線で、この式により $\pm 8.0\%$ の不確かさでキャビテーション数 σ を予測できる。写真の①は実線の左端近くのキャビテーションの様子で、はく離点近傍（どちらの写真も最左端の黒い箇所（気泡））で発生したキャビテーションが円柱方面に沿って移動している様子がわかる。今後、発生位置を特定し、そこでの流れの速度・圧力をCFDで解明、気泡の成長・並進運動の詳細を観測と理論で解明する予定である。キャビテーション初生の研究は、今後、①の $10610 \leq Re < 13250$ (初生キャビテーション領域) を対象としていくべきであることがわかる。

【II. 理論解析】有限時間持続する張力下とその後の大気圧下でのキャビテーション初生のパラメータ分類と予測法²⁾

気泡力学の基礎方程式である Rayleigh-Plesset 式に基づくモデル方程式により、単一球形微細気泡核を含む液体が張力にさらされたとき、この気泡核がキャビテーション初生に至る条件を検討したものである。先行研究および著者らの CFD 解析によると、二次元流路内に流れと垂直に円柱が置かれた状況で、円柱表面と流路内壁の隙間（のど部）の流速が 50 m/s の場合、のど部下流の円柱表面近傍で -1.4MPa の張力が働く。微細な気泡核がある強さの張力下で、どのくらいの時間で目に見える大きさにまで成長するかについて定量的に評価する理論は Hsieh³⁾により提案されたが、この理論は、真空気泡を対象にしている上、次の3項目について検討されていなかった：①モデル方程式の Rayleigh-Plesset 方程式との比較、②モデル方程式の近似手法の妥当性、③液体が張力解除後に大気圧になった場合の気泡の最大到達半径。

本論文では、Hsieh の理論に上記3項目を考慮し、さらに気泡核内に蒸気と非凝縮性気体が含まれる場合に理論を拡張することにより粘性項と張力項、粘性項と非凝縮性気体圧項、粘性項と表面張力項の比で定義された3つのパラメータを導入して、初生の予測法を提示した。この方法により、対象とする条件により3つのパラメータを数値的に評価して、モデル方程式を気泡半径と気泡の膨張収縮速度からなる相平面上で扱い、Rayleigh-Plesset 方程式を解くことなく気泡核のある時刻における大きさを予測可能となった。現実にキャビテーションが問題となっている液体水素、液体酸素、水、オリーブオイル、グリセリンに対して、これら液体の張力下及び張力解除後に大気圧に戻った時の到達気泡最大半径を正確に予測できることを示した。

今後、本研究によって明らかにされた実験条件の下で初生実験および理論解析を行い、歴史的に未解明状態にあるキャビテーション初生を研究していく計画である。

<引用文献>

- 1) 加藤洋治 編著: キャビテーション — 基礎と最近の進歩 —, 森北出版, (2017).
- 2) 藤川俊秀, 江頭 竜, 矢口久雄, 藤川重雄: 有限時間持続する張力下とその後の大気圧下でのキャビテーション初生のパラメータ分類と予測法, ターボ機械協会, **47** (2), 116-124 (2019).
- 3) Hsieh, D. Y., Bubble Growth in a Viscous Liquid Due to a Transient Pulse, J. Basic Eng., Trans. ASME, **92**, 815-818 (1970).

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 藤川俊秀, 江頭 竜, 矢口久雄, 藤川重雄	4. 巻 47
2. 論文標題 有限時間持続する張力下とその後の大気圧下でのキャピテーション初生のパラメータ分類と予測法	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ターボ機械	6. 最初と最後の頁 116-124
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4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 田中雅人, 江頭 竜, 藤川俊秀, 藤川重雄
2. 発表標題 大振幅振動圧力場で非平衡蒸発・凝縮を伴う水蒸気泡の膨張・収縮の気泡力学解析
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第72期総会・講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤川俊秀, 江頭 竜, 矢口久雄, 藤川重雄
2. 発表標題 有限時間持続する負圧下でのキャピテーション初生のパラメータ分類と予測法
3. 学会等名 日本学術会議第19回キャピテーションシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柳田佳輝, 藤川俊秀, 中村祐二
2. 発表標題 単一液相内の気泡生成に関する統一理論に向けた諸検討
3. 学会等名 先進的技術に関するシンポジウム (SAT2017 in Toyohashi, 豊橋技術科学大学)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤川俊秀
2. 発表標題 キャビテーショントンネル製作の進捗状況
3. 学会等名 第3回キャビテーション初生に関する研究会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

先進的技術に関するシンポジウム (SAT2017 in Toyohashi, 豊橋技術科学大学)
<https://www.kousen.tut.ac.jp/research/project/h29>

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