

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：32641

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K13662

研究課題名（和文）固液連成界面における動的キャビテーション生成

研究課題名（英文）Dynamic cavitation inception on the solid-fluid interface with fluid-structure interaction

研究代表者

小島 朋久 (Kojima, Tomohisa)

中央大学・理工学部・助教

研究者番号：70802734

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000 円

研究成果の概要（和文）：流体機械の寿命評価においてキャビテーションの発生予測は極めて重要である。本研究では固体の破壊力学におけるき裂の生成と進展のアナロジーを圧力波動の伝播に伴うキャビテーション気泡の生成と波面伝播に適用することで、動的キャビテーション波面発生を予測する新しい学理を創出することを目指している。固液連成界面上の気泡核へ圧力波を伝播させる実験を行い、気泡が成長する臨界圧力を求めた。次に Griffith のエネルギー平衡の導出過程を参考にして、圧力変動に起因して流体が圧縮されることにより流体自体に蓄えられるエネルギーを考慮することにより、キャビテーション生成を精度良く予測する指標を導出できる可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の研究におけるキャビテーションの発生モデルでは流体中に存在する微小な気泡核の分布量によってキャビテーション発生圧力が定義されていたが、流体中に気泡核が存在していてもキャビテーションが発生しない事例が確認されている。本研究では流体中のキャビテーション発生に固体の破壊力学におけるき裂の進展のアナロジーを適用することを検討し、キャビテーション発生を精度よく予測する新しい理論を創出できる可能性を示した。本研究成果は動的キャビテーション波面の生成を積極的に制御する新技術の創出によって流体機械の長寿命化に資するものであり、また固体と流体の「破壊」を統一して扱える新しい学理の発展に資するものである。

研究成果の概要（英文）：Prediction of cavitation inception is extremely important for the lifetime evaluation of fluid machinery. In this study, an analogy between crack growth in fracture mechanics of solids and growth of cavitation bubble in a fluid is considered with the intention of applying it to the inception and propagation of cavitation wavefront under pressure wave propagation to propose a new theory for predicting the generation of dynamic cavitation wavefront. Experiments were conducted in which pressure waves were propagated to a bubble nucleus at a solid-fluid interface, then, the critical pressure for the bubble growth was determined. Referring Griffith's energy equilibrium derivation process showed that it is possible to derive an indicator that accurately predicts cavitation generation by considering the energy stored in the fluid itself due to compression caused by pressure fluctuations.

研究分野：機械材料・材料力学

キーワード：キャビテーション 波動伝播 アナロジー 破壊 界面 衝撃 破壊力学 流体構造連成

1. 研究開始当初の背景

流体機械の寿命評価においてキャビテーションの発生予測は極めて重要である。キャビテーション発生は流体中に分布する微小な気泡核が要因となることが知られているが、固液連成界面近傍で気泡核が存在していてもキャビテーションが発生・成長しない事例が確認されるなど、正確な発生予測モデルの構築は困難である。一方、固体に関しては破壊力学の学問体系が確立されており、固体内にき裂が存在していたとしても周囲の拘束の影響などによりき裂が進展しない条件が理論的に定義されている。弾性体固体と流体は連続体として力学的に統一して取り扱うことが可能であり、弾性体力学と流体力学には多くの数学的アナロジーがあることが知られている。同様に現在予測困難な流体中におけるキャビテーションの発生に固体の破壊力学を拡張して適用することでより正確なモデル化へ貢献できると考えた。

2. 研究の目的

固液連成界面を起点とする動的キャビテーション生成を予測する力学モデルの構築を行う。流体におけるキャビテーション生成に固体の破壊力学におけるき裂の進展のアナロジーを適用することで固体のじん性に相当する液体の材料物性を定義し、キャビテーション生成を予測する新しい理論モデルを構築することを目的として研究を行う。固体と流体の変形が連続体力学として統一的に理論体系化されているように、固体と流体の「破壊」とその進展に対しても統一して扱える学理を構築することを目指す。

3. 研究の方法

固液連成界面を起点とするキャビテーション波面生成を観察・測定するために、固体丸棒と水を充満した円管を用いて、一次元的に固体側から伝播する応力波が固液連成界面を通過し圧力波として管内水中に伝播する実験系を構築する(図1)。円管の材質を透明なポリカーボネートにすることでハイスピードカメラにより固液連成界面近傍の流れ場とキャビテーション発生を観察する。実験装置は地面に垂直に設置して、注射器により空気を注入し、浮力により固液界面にあらかじめ単一の気泡核を配置する。界面活性剤を用いて流体の表面張力を変化させ、圧力波の伝播に伴う気泡核の成長や振動の様子をハイスピードカメラで測定する。実験結果を基に、固体の破壊力学におけるき裂進展の理論とのアナロジーを考慮して、固液連成界面を起点とする気泡核成長の力学モデルを構築する。

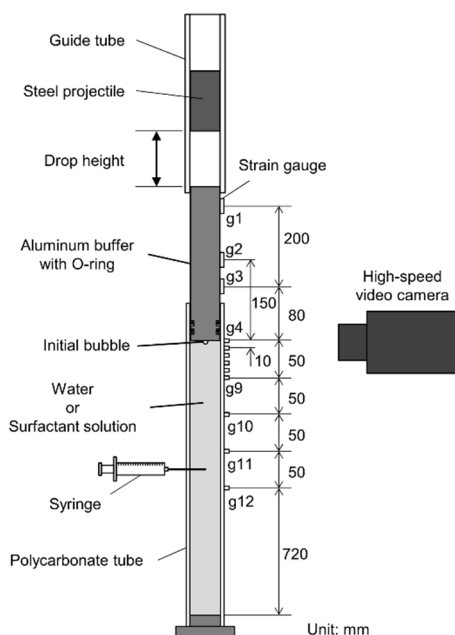


図1 圧力波伝播に伴う気泡の生成・成長測定実験

4. 研究成果

4.1 圧力波の伝播による気泡核の成長観察

構築した実験系を用いて固液連成界面に設置した気泡核へ圧力波を伝播させ、気泡核の成長を観察した。まず気泡核が収縮した後に、膨張と収縮を繰り返しながら成長する様子が観察された(図2)。このような気泡核の成長は、バッファ内部を伝播する応力波が固液界面を透過して流体中に圧力波として伝播することに起因している。飛翔体とバッファの衝突により圧縮応力波が発生し、固液界面を透過して流体中に圧力波として伝播するだけでなく、発生した圧縮応力波が飛翔体やバッファの端面で反射することにより引張波も発生し、流体中に圧力波として繰り返し伝播する。結果として、まず圧縮波の伝播により気泡核が収縮し、直後に引張波が伝播することで気泡核が成長した。

本研究ではキャビテーションの生成に着目しているため、気泡核が圧縮された後に成長を始める瞬間の挙動に着目した。ハイスピードカメラにより撮影したフレーム画像をMATLABにて解析

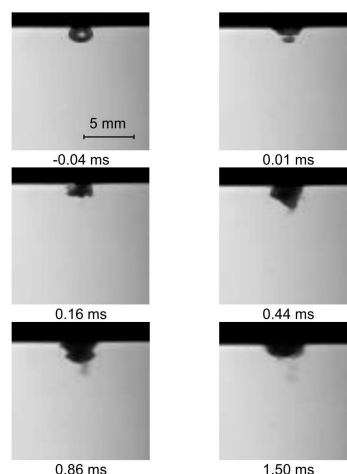


図2 圧力波伝播に伴う気泡の成長 (アルミニウム-0.005%界面活性剤水溶液界面)

することにより、気泡核先端位置の時刻歴を抽出した。抽出した時刻歴を微分することで気泡核の膨張/収縮速度を求め、成長を開始する瞬間(速度が0になる瞬間)における気泡核半径を得た。

次に固液界面に設置された気泡核周りの力のつり合いに関する理論解析を行い、固液連成界面に設置した気泡核の、流体と接している表面が球形形状であると仮定して(図3)、気液、固液界面エネルギーの影響を含めた圧力のつり合い方程式を導出した。導出した式と実験により得られた気泡核半径の測定値から、気泡が成長する臨界圧力を得た。実験時には最初に圧縮波が伝播するため圧縮された状態から気泡が成長を始める。気泡内部の蒸気圧変化を考慮して初期圧力の値を補正することで、大気圧下における臨界圧力を得た。

また円管内の水に界面活性剤を添加することで固液界面における界面エネルギーの平衡を変化させ、固液連成界面を起点とするキャビテーション生成量を変化させることに成功した。さらに固体の運動エネルギーと流体に与えられたエネルギーの保存を考慮することにより、固液連成界面におけるキャビテーション生成量を定量的に評価できることを示した。

4.2 キャビテーションしきい値による臨界圧力評価

導出した圧力のつり合い方程式を発展させ、流体を非圧縮性であると仮定して、一般的にキャビテーション生成の評価に使用される Blake のキャビテーションしきい値を参考にして、固液界面における気泡核が膨張する圧力の臨界しきい値を導出した(図4)。しかし導出した理論式によるしきい値は実験結果から得られた臨界圧力を精度良く予測できなかった。実験時にハイスピード撮影された気泡核の運動と後述する数値解析の結果より、固体の破壊力学における Griffith のエネルギー平衡の導出過程のように、圧力変動に起因して流体が圧縮されることにより流体自体に蓄えられるエネルギーを理論に含め、導出した式を修正する必要があることが示唆された。

4.3 固体の破壊力学とのアナロジーの導入

キャビテーション気泡核の成長と固体の破壊力学におけるき裂進展との間にアナロジーがあるか確認するために、Griffith のエネルギー理論におけるき裂成長の条件を参考にして以下の指標を提案した。

$$p_{in,c} \sqrt{2R} = \sqrt{\frac{2\gamma K}{\pi}} \quad (1)$$

ここで $p_{in,c}$ は気泡が成長する臨界圧力、 R は気泡半径、 γ は界面エネルギー、 K は体積弾性率である。式(1)の左辺を実験結果から求め、右辺の理論値と比較したところ、非常に良い一致を示した(図5)。このことから Griffith のエネルギー平衡の導出過程を参考にして、圧力変動に起因して流体が圧縮されることにより流体自体に蓄えられるエネルギーを理論に含めることにより、キャビテーション生成を精度良く予測する指標を導出できることが示唆された。キャビテーション気泡の成長には表面エネルギーだけでなく、気泡内部の蒸気による圧力変動も影響する。内部に気泡を有する流体が圧力波動の伝播に伴う高速な圧力変動により圧縮される際に蓄えるエネルギーを、固体の弾性論における内部に内圧を受ける球かを有しかつ外圧を受ける弾性固体の3次元弾性変形を参考にして導出できる可能性を示した。

4.3 数値解析への実装

周囲境界の影響を無視できるほど十分に大きい水槽の中に気泡を生成し、水中火花放電により圧力波動を発生させ気泡に向けて伝播させる実験装置を構築し、圧力波の伝播に伴う気泡の運

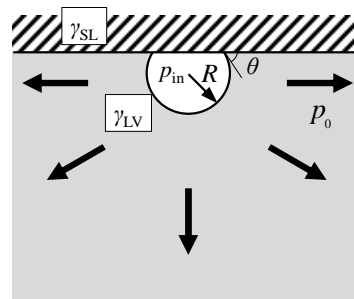


図3 周囲圧力変動を受ける固液界面における気泡核の模式図

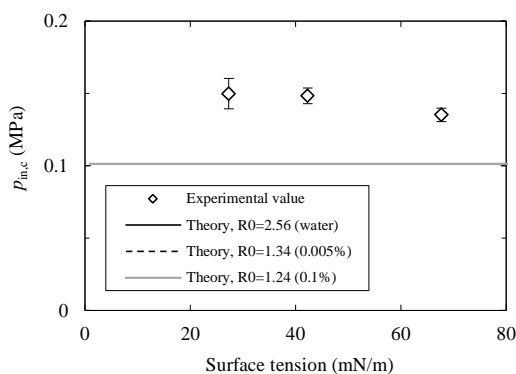


図4 Blake しきい値による評価

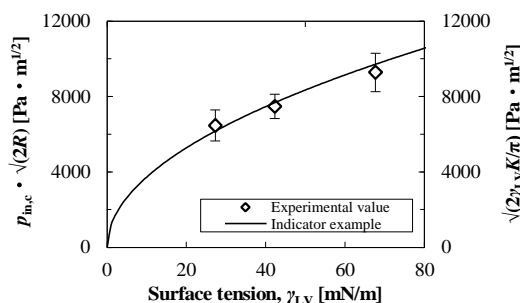


図5 気泡成長の臨界圧力と破壊力学を参考にした指標例の比較

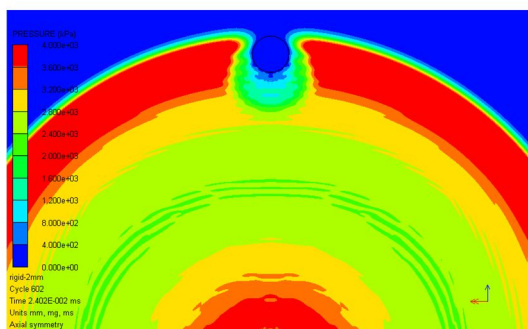


図6 固液界面近傍の気泡への圧力波伝播解析

動を明らかにするとともに、ANSYS Autodyn を使用して固液連成界面近傍に存在する気泡に圧力波が入射した際の気泡の運動を再現可能な数値解析モデルを構築した(図 6)。構築した数値解析モデルによる解析結果から、圧力波の伝播に伴って不均一に変化する気泡周囲の圧力変動を詳細に明らかにした。

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 TomohisaKojima, Kazuaki Inaba	4. 巻 183
2. 論文標題 Numerical analysis of wave propagation across Solid-Fluid interface with Fluid-Structure interaction in circular tube	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Pressure Vessels and Piping	6. 最初と最後の頁 104099
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijpvp.2020.104099	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7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 小島 朋久, 因幡 和晃
2. 発表標題 固液連成界面におけるキャビテーション生成の評価
3. 学会等名 日本機械学会 材料力学部門 若手シンポジウム 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 辻 知章, 小島 朋久
2. 発表標題 静水圧を受ける応力発光体の発光強度減衰曲線
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2019材料力学カンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小島 朋久, 因幡 和晃
2. 発表標題 固液連成界面における動的キャビテーション生成が波動伝播に及ぼす影響
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2019材料力学カンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomohisa KOJIMA, Kazuaki INABA, Tomoaki TSUJI, Kikuo KISHIMOTO
2. 発表標題 Observation of cavitation inception at the solid-fluid interface in fluid-structure interaction
3. 学会等名 The 6th Joint-Symposium on Mechanics of Advanced Materials & Structures (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoaki TSUJI, Tomohisa KOJIMA
2. 発表標題 Stress measurement in the fluid by using Phosphorescence Light Intensity
3. 学会等名 The 6th Joint-Symposium on Mechanics of Advanced Materials & Structures (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kojima Tomohisa, Inaba Kazuaki, Takada Yuto, Triawan Farid
2. 発表標題 Effect of Solid Surface Wettability on the Formation of Cavitating Wave Front with Fluid-Structure Interaction
3. 学会等名 The 10th International Symposium on Cavitation (CAV2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kojima Tomohisa, Inaba Kazuaki, Takada Yuto
2. 発表標題 A Study for Theoretical Modeling of Cavitation Inducement From the Solid-Fluid Interface With Fluid-Structure Interaction
3. 学会等名 ASME 2018 Pressure Vessels and Piping Conference (PVP2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

中央大学精密機械工学科2019年同窓会での講演 2019年9月28日
所属機関ホームページ <https://researchers.chuo-u.ac.jp/Profiles/42/0004199/profile.html>

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