

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04269

研究課題名(和文) 実環境下におけるキャビテーションの予測の高度化：溶存気体効果の解明とモデリング

研究課題名(英文) Toward Improvement of Prediction of Cavitation under Real Fluid Flow Condition: Understanding of Dissolved Gas Effect and Its Modeling

研究代表者

渡邊 聡 (Watanabe, Satoshi)

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：50304738

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：ターボポンプに代表される水力機械のより一層の信頼性向上のため、実環境下におけるキャビテーション性能の予測の高精度化を目指し、その支配的実環境因子の一つである液中の溶存気体の効果に着目して、水力機械の内部流れとの類似性に基づいて選定した基礎的形狀の流動系を対象に、キャビティ内圧の直接計測、高速度カメラ観察、流れ場計測等を駆使して、キャビティ内圧の決定機構ならびに気液界面での物質伝達機構を含む溶存気体の輸送機構を調査した。さらに、現象の物理を忠実に考慮した溶存気体効果の数理モデルを構築し、実験との比較によりその妥当性・有用性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

キャビテーションの相似則の成否を左右する溶存気体の効果について多方面からの分析を行うことで、キャビティの内圧の決定機構ならびに気液界面での物質伝達機構の現象論的理解、機構論的理解を大きく増進したこと、溶存気体効果を物理的に正しく表現した新たな流体力学モデルを構築したことは、学術的に有意義である。また、これらの成果は、キャビテーションの予測精度向上に限らず、流体力学やトライボロジーなど分野間で異なる蒸気性・気体性キャビテーションの統一的理解、さらにはエネルギー、医療を始め様々な分野で見られる気液二相流に広く共通した課題解決にも繋がると考えられ、社会的な意義も有する。

研究成果の概要(英文)：Toward the enhancement of prediction accuracy of cavitation performance of hydraulic machinery under real fluid condition, which can enable us more reliable design and operation of machines, the present study has focused on one of the important real fluid factors against cavitation, that is a dissolved gas effect, and investigated the determination mechanism of internal pressure of cavity and the transport mechanism of dissolved gas including the mass transfer rate at cavity interface through direct pressure measurement, high-speed camera observation, flow measurement and etc. In addition, the numerical model of dissolved gas effect was proposed considering the actual physics behind the phenomena. Through the comparisons with experiments, the proposed model was well validated.

研究分野：流体工学

キーワード：キャビテーション 流体機械 溶存気体

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

キャビテーションは、液体の局所的な増速により圧力が飽和蒸気圧以下となり、微小気泡核を起点として液から蒸気への相変化が急激に生じる現象である。このことから、キャビテーションの流体力学的な相似則を表すパラメータとして、キャビテーション数 $\sigma = 2(p_{ref} - p_v) / \rho U_{ref}^2$ (p_{ref} : 代表圧力, p_v : 飽和蒸気圧, ρ : 液密度, U_{ref} : 代表速度) が容易に導かれる。ラボレベルの研究でよくされるような、溶存空気を事前に十分に取除いた水を用いた高レイノルズ数 (Re) 下の実験では、キャビテーション数 σ を用いた相似則が精度良く成立する。しかしながら、実液を用いる水力機械の実機においては、寸法効果 (Re 数効果) に加えて、液の空気含有量 (溶存空気量) が機器のキャビテーション性能に大きく影響を及ぼすことが経験的に知られている。例えば、ポンプの吸込み性能の相似則について見ると、JIS B 8327「模型によるポンプ性能試験方法」では、吸込み性能限界を表す限界 NPSH は周速の 2 乗に比例するとしている。一方、ISO-5198 では、限界 NPSH は周速の 1.3~2 乗に比例するとしており、指数についてはメーカーとユーザー間の協議により決定することを推奨している。指数が 2 よりずれる点については試験時と実機環境下における液中溶存空気量等の違いが指摘されているものの、物理的メカニズムに基づいた具体的決定方法は存在せず、適切な性能予測の妨げとなっている。この溶存気体の問題は、機器の吸込み性能のみならず、振動・騒音、不安定現象、気泡群崩壊による壊食においても顕在化すると考えられるため、解決すべき非常に重要な課題である。

2. 研究の目的

液中溶存気体の効果は、溶存気体がキャビティ内に析出することでキャビティの内圧が液の飽和蒸気圧よりも実際には高くなり、キャビテーション数 σ を用いた相似則を破綻させると考えられる。本研究ではこの仮説のもと、キャビテーションにおける気膜/気泡群 (キャビティ) 内の内圧の決定機構を学術的「問い」に据え、溶存気体効果の流体力学モデルを構築し、さらには実環境下での機器のキャビテーションの予測の高度化を目指す。このため、キャビテーション気泡の内圧の決定機構ならびに溶存気体効果の発現機構を実験的に解明することを、本研究の第一の目的とした。問題を単純化するため、水力機械の内部流れとの類似性に基づいて選定した基礎的形状 (二次元縮小拡大流路および翼形) の流動系を対象とし、気泡核数密度、溶存酸素量を条件に実験を行い、キャビティの内圧の決定機構ならびに気液界面での物質伝達機構を調査した。さらに、実環境下における機器の性能予測の飛躍的向上を目指し、現象の物理に根差した溶存気体効果の流体解析モデルを構築することを第二の目的とした。

3. 研究の方法

上記の二つの目的にあわせ、(1)キャビテーション気泡の内圧の決定機構ならびに気液界面での物質伝達機構の実験的解明、(2)現象の物理に根差した溶存気体効果の流体解析モデルの構築の二つのテーマを設定し、それぞれ以下の方法により実施した。なお、基礎的形状としては、二次元縮小拡大流路および翼形を対象とした。

(1) キャビテーション気泡の内圧の決定機構ならびに気液界面での物質伝達機構の実験的解明

二次元縮小拡大流路を対象とした実験は、20mm×20mm の矩形断面の試験部を有する小形のキャビテーションタンネルにスロート面積 20mm×5mm の流路を組み込み、水温一定条件のもと、複数の溶存酸素量条件および流速条件下において系の圧力を低下させてスロート部でキャビテーションを発生させ、キャビティ内圧力計測、キャビティの高速度カメラ観察、スロート上下流の気泡群計測を行った。

一方、翼形を対象とした実験では、200mm×81.5mm の矩形断面の試験部を有するキャビテーションタンネルに、翼弦長 100mm、スパン 81mm (翼端隙間 0.5mm) の Clark Y-11.7% 翼形を組み込み、液中気泡核数密度および溶存酸素量の監視のもと、複数の作動条件 (迎え角) のもとで、高速度カメラを用いたキャビテーション様相の観察、揚効力計測と高精度圧力センサを用いたキャビティの内圧の計測を行った。

(2) 現象の物理に根差した溶存気体効果の流体解析モデルの構築

溶存気体の効果については、過去には、液中より析出し気相として存在する不凝縮ガス気泡の効果として考慮したキャビテーションモデルなどが提案されているが、不凝縮ガス気泡の体積分率が一定で物理的根拠のない値が適用されるなど、モデルの正当性が不明で拡張性も低いものであった。本研究では、溶存気体の輸送現象が液中の乱流場での移流拡散現象であること、キャビティ内の気相は蒸気と析出気体で構成されること、気液界面における物質伝達によりキャビティ内の析出気体密度 (よって分圧) が支配されることなどの物理現象を重視し、液相・気相間のすべりを考慮しない均質媒体モデルであるものの、これらの現象の物理を忠実に考慮した流体解析モデルを提案した。本流体解析モデルを既存のキャビテーションモデルと整合する形でオープンソースの流体解析ソルバーである OpenFOAM に組み込み、その妥当性検証のため、

実験と同様(ただし二次元モデル)の二次元縮小拡大流路および翼形を対象として解析を行った。乱流モデルには、汎用性の高いRANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes Simulation)モデルである $k-\omega$ SSTモデルを主として用いた。

4. 研究成果

(1) キャビテーション気泡の内圧の決定機構ならびに気液界面での物質伝達機構の実験的説明

まず、高精度圧力センサを用いたキャビティの内圧の計測結果について述べると、二次元縮小拡大流路および翼形のいずれの場合も、キャビティ内の不凝縮ガスの分圧が0.1~1kPaのオーダーであること、溶存気体量(溶存酸素量 DO)に大きく依存しないこと、キャビテーション数 σ が低くキャビティが成長するほどその分圧が低くなるということが分かった。この0.1~1kPaのオーダーは溶存酸素量からヘンリーの法則より推定される溶存気体の質量平衡圧に比べてかなり低い。すなわち、キャビティの内圧は溶存気体の析出による内圧増加の効果とキャビティが膨張することによる減圧効果とのバランスで決定されるという重要な知見を得た。これは、過去の国内外の研究において単に高流速の条件ではキャビテーションに対して溶存気体の影響は大きくないとされていたことに対して、その物理的な解釈を与えるという点で大きな研究成果である。

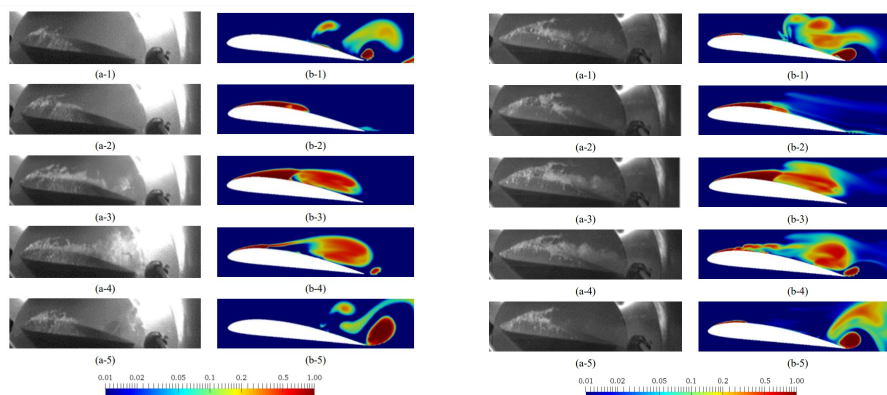
溶存気体効果によるキャビティ内圧の決定機構の解明には、気液界面における溶存気体の物質伝達量の解明、液中の溶存気体の輸送現象の解明が必要である。前者については、二次元縮小拡大流路を対象に、高速度カメラにより定量化したキャビティ前後の気泡群特性を用い、溶存気体の質量保存則を適用することで、キャビティの気液界面における溶存気体の物質伝達係数を推算できることを明らかにした。また、後者の液内における溶存気体の輸送現象については、気流の圧力計測手法である感圧塗料の原理を応用し、主要な溶存気体種である酸素の液中濃度を可視化計測する手法を提案した。これを溶存酸素濃度分布とキャビティ形状の同時観察を実現したシステムに高度化し、実際に複数の溶存酸素条件、圧力条件での計測を実施した。これにより、気液界面近傍における溶存酸素濃度勾配の実験推定の可能性を示した。

一方、翼形を用いた実験では、主流圧力の増減に伴うキャビテーションの成長・収縮のヒステリシスに着目し、翼表面圧のヒステリシスがキャビティの非定常挙動のヒステリシスと関係すること、流れがはく離し溶存気体効果が顕在化すると期待された高迎え角条件においても、キャビテーション発生時の翼形特有の周期的な大規模流動によるキャビティの排出効果により、キャビティ内の気体の分圧が質量平衡圧に対して非常に小さいことが分かった。

以上の実験により、これまで理解が不十分であったキャビテーション気泡の内圧の決定機構ならびに気液界面での物質伝達機構の現象論的理解、機構論的理解が大きく進展した。

(2) 現象の物理に根差した溶存気体効果の流体解析モデルの構築

本研究にて構築した溶存気体輸送モデルを実装した流体解析ソルバーを用いて、実験と同形状の二次元縮小拡大流路および翼形のRANS解析を実施した。その結果、いずれの場合も、キャビテーションの成長を定性的によく再現するとともに、溶存気体の析出効果により後流構造に明確に違いが現れることを明らかにした。また、実験と比較したところ、とくにパラメータをチューニングすることなく、実験との定性的一致をみた。一例を図1に示す。図から、本解析により実験と同様のキャビテーション形状が再現されているとともに、気体の析出による残存気泡群の性状もよく再現されていることが分かる。このことは、本研究で構築したモデルが溶存気体効果を物理的に正しく表現できることを示唆しており、有用なモデルであると考えられる。



(a) 溶存酸素量が少ない場合(20%程度) (b) 溶存酸素量が多い場合(80%程度)

図1 実験(左)と構築したモデルによるCFD解析(右)の結果の比較の一例

以上の成果を含め、補助事業期間全体を通じて本研究で設定した課題(1)(2)を十分に達成できた。今後は、本研究で構築した溶存気体効果の流体解析モデルを用いて流体機器実機におけるキャビテーション性能の予測精度の向上を図っていく予定である。

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 Keisuke Kobayashi, Yusuke Katayama, Satoshi Watanabe, Shin-ichi Tsuda	4. 巻 143
2. 論文標題 Experimental Investigation on Cavity Pressure Inside Sheet Cavitation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Fluids Engineering	6. 最初と最後の頁 121102
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/1.4051580	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6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Y. Matsuura, D. Tsuji, S. Watanabe, S. Tsuda
2. 発表標題 Effects of Dissolved Gas on Surface Pressure of a Hydrofoil under Cavitation Condition
3. 学会等名 The 16th Asian International Conference on Fluid Machinery, 2021 (AICFM16) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 弓場智己, 渡邊 聡, 津田伸一, 片山雄介
2. 発表標題 キャビテーション周りの溶存酸素濃度場の計測手法の検討
3. 学会等名 日本機械学会九州学生会第53回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 和知隼人, 比嘉良仁, 渡邊 聡, 津田伸一
2. 発表標題 液中溶存気体を考慮した均質媒体モデルによる二次元縮小拡大流路内のキャビテーション流れのCFD解析
3. 学会等名 日本機械学会九州学生会第53回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Kobayashi, Y. Katayama, S. Watanabe and S. Tsuda
2. 発表標題 Experimental investigation on cavity pressure inside sheet cavitation
3. 学会等名 18th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (ISROMAC2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 辻 大樹, 松浦康浩, 渡邊 聡, 津田伸一
2. 発表標題 キャビテーション発生下における単独翼の表面圧力 (溶存空気量と気泡核数密度の影響)
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第74期総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 飯田 諒, 津田伸一, 渡邊 聡
2. 発表標題 溶存気体と液の慣性を考慮した気泡力学モデルによる翼周りのキャビテーション流れの数値解析
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第74期総会・講演会
4. 発表年 2021年

〔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	津田 伸一 (Tsuda Shin-ichi) (00466244)	九州大学・工学研究院・准教授 (17102)	

6. 研究組織（つづき）

	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	片山 雄介 (Katayama Yusuke) (20778815)	九州大学・工学研究院・助教 (17102)	

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