

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03922

研究課題名(和文) マイクロインデューサに発生する液体水素キャビテーションの可視化とPIV計測

研究課題名(英文) Visualization of hydrogen cavitation on a micro inducer

研究代表者

伊藤 優 (Ito, Yu)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・特任准教授

研究者番号：10323817

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：理論解析と数値解析に基づき供試マイクロインデューサを設計し、装置を組み立てた。JAXAから貸与されたロケット用インデューサと比較するため、水を用いた予備試験を実施し、翼端クリアランスとインデューサ直径の比のスケール効果に関する実験データを取得した。次に、水素試験用の改良型装置を設計し、その組み立てを開始した。しかし、メカニカルシールが市販で対応できなかったため、メーカーと共同開発した。本補助金で整備した装置を活用し、今後も、液体水素キャビテーションの可視化やPIV計測の実験に挑戦する予定である。

本補助金により、初年度からの累計で、国際誌5誌、国内誌1誌、国際会議4回、国内会議5回発表した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

再生可能エネルギー由来水素の利活用が期待される中、高いエネルギー密度とエネルギー取出時のクリーンさから液体水素の貯蔵・輸送技術高度化のニーズが高まっている。現状、液体水素インフラは黎明期の流体機械として効率やコンパクト性を犠牲として信頼性を優先した設計が行われている。なぜなら経験知のみに依存する開発においては実験的検証データが乏しく数値解析等を利用した革新的な設計の裏付けを欠くからである。本補助金により、液体水素での使用を想定したポンプ実験的検証データを取得することが可能となった。本装置を今後も活用し水素インフラの効率やコンパクト性向上に寄与することにより、カーボンニュートラルの実現に貢献する。

研究成果の概要(英文)：Based on theoretical analyses and numerical analyses, a test microinducer was designed and a test apparatus was assembled. Preliminary tests using water were conducted to compare the pump performance with a large rocket inducer borrowed from JAXA. Experimental data on the scale effect of the ratio of the blade tip clearance / the inducer diameter were obtained. Next, an improved apparatus for hydrogen tests was designed and its assembling was started. However, a mechanical seal was not available on the market, so it was developed together with the manufacturer. I and my colleagues are going to be challenging the visualization of liquid hydrogen cavitation and the tests of PIV measurement with the apparatus prepared by this subsidy.

With this subsidy, I have presented at 5 international journals, 1 domestic journal, 4 international conferences, and 5 domestic conferences as the cumulative total from the first year.

研究分野：流体工学 熱工学 航空宇宙工学

キーワード：キャビテーション 回転機械 可視化試験 極低温流体

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

自動車や航空機の電動化が進行している。蓄電池は質量が蓄電容量にほぼ比例するため近距離用では軽量となる。一方、燃料電池は出力で燃料電池質量が決まり、総発電容量は保有燃料の質量で決まるため中長距離用では逆に軽量となる。その水素源は、現在、70MPaの高圧水素が主流だが、液体水素の利用により更なるエネルギー密度の向上を見込める。自動車や航空機の液体水素燃料用ポンプは高寿命化、低振動化、耐キャビテーション性を考慮すると非接触の外径20mm程度のマイクロインデューサ(軸流螺旋ポンプ)が望ましい。実用化済みのロケット用に比べて小径化に伴う翼端隙間/インデューサ直径の比が大きくなる負のスケール効果、液体水素の大きな圧縮性、強い熱力学的効果のため、マイクロインデューサに発生する液体水素キャビテーションは、ロケット用とも、液体窒素キャビテーションとも、水キャビテーションとも異なる流場と特性を持つことが予測される。その解明には光学的計測が有効である。1969年にNASAのBallらが唯一可視化を行ったが得られた画像は不鮮明でその流場は十分に解明されなかった。その後、インデューサに発生する液体水素キャビテーションの光学的計測例は無い。この学術的、工学的に需要がありつつも未解明なインデューサに発生する液体水素キャビテーションの流場と特性は、解明が強く求められている。

### 2. 研究の目的

本研究の最終目的は、インデューサに発生する液体水素キャビテーションの特性の解明である。

- (1)キャビテーションの熱力学的効果が、水素>窒素>水となる物理的理由を考察する。
- (2)インデューサに発生するキャビテーションに及ぼす熱力学的効果を定量的に評価する。
- (3)インデューサに発生するキャビテーションに及ぼす圧縮性の効果を定量的に評価する。
- (4)キャビテーションに及ぼすキャビテーションの構成要素(気泡)/インデューサ直径の比の効果を定量的に評価する。
- (5)キャビテーションに及ぼす翼端隙間/インデューサ直径の比の効果を定量的に評価する。
- (6)キャビテーション発生を伴う液体水素用インデューサの設計指針を考察する。

### 3. 研究の方法

#### (1)液体水素キャビテーションの可視化技術の確立

液体水素(三重点温度13.8K~臨界点温度33.0K)は低温であるため、材料の選定(耐低温脆性および耐水素脆性)、回転軸からの熱伝導による熱侵入対策、外部容器からの輻射による熱侵入対策(輻射シールド)、ベアリングの凍結対策(固体潤滑またはベアリングの常温維持)、可視化窓の除霜などの技術的な課題を克服する。

軸受けやバルブの可動部から漏れ出る水素ガスは可燃性であるため、水素対応品・防爆対応品の使用、または、窒素ガスパージによる水素可燃域の回避などの対策を施す。

#### (2)供試マイクロインデューサの作成

HIロケットの第二段用ロケットエンジンLE-5の液体酸素用ターボポンプインデューサ開発の際の試作品の内の1つ(直径65.3mm)をJAXAより貸与されており、本インデューサ(以下区別するためインデューサAと称する)を用いたキャビテーション可視化装置を現有している。インデューサAの形状は3次元レーザ計測および接触計測により既に3D-CADデータ化されている。本研究では後述する以降の比較研究を行うため、インデューサAと相似のマイクロインデューサB(直径20mm)を作成する。

#### (3)翼端隙間/インデューサ直径の比のスケール効果の解明

現有する試験装置では、インデューサA(直径65.3mm)を翼端隙間0.5mmで設置しており、液体窒素および水の試験が可能である。そこで、新造した試験装置にインデューサB(直径20mm)を翼端隙間0.5mmで設置し、液体窒素および水の試験を行う。

試験は、流量係数一定条件の下でキャビテーション数(=入口圧力)を徐々に低下させキャビテーションブレイクダウン(=キャビテーション発生によりポンプ吐出が喪失する現象)に至る過程を高速度映像、PIV、圧力・温度計測を用いて試験する。

インデューサAとBの結果を比較し、翼端隙間が一定の条件で、翼端隙間/インデューサ直径の比が、キャビテーションブレイクダウン過程に及ぼすスケール効果を解明する。

#### (4)キャビテーション要素(気泡)サイズ/インデューサ直径の比のスケール効果の解明

インデューサA(直径65.3mm・翼端隙間0.5mm)に対し、インデューサB(直径20mm)を翼端隙間0.15mmで設置し、翼端隙間を含めた流路の相似性を確立し、液体窒素および水の試験を行う。

インデューサAとBのキャビテーションブレイクダウン過程を比較し、流路形状が相似の条件で、キャビテーション要素(気泡)サイズ/インデューサ直径の比が、キャビテーションブレイクダウン過程に及ぼすスケール効果を解明する。

#### (5)熱力学的効果、および、翼端隙間の効果の解明

インデューサBを翼端隙間0.5mmと0.15mmで設置し、液体水素の試験を行う。

両試験結果を、同翼端隙間の および の液体窒素、水の試験と比較し、同一流路形状において、各流体の熱力学的効果の強さ(液体窒素>水)が、キャビテーションブレイクダウン過程に及ぼす効果を解明する。

流体(液体窒素、水)間で、翼端隙間の異なる2つの試験結果を比較し、翼端隙間が、キャビテーションブレイクダウン過程に及ぼす効果を解明する。

(6)圧縮性の効果の解明

インデューサBを用い、1500、3000、6000rpmの液体水素、液体窒素、水の試験を行う。

回転数ごとに、各流体の試験結果を比較し、圧縮性の大きさ(液体水素>液体窒素>水)が、キャビテーションブレイクダウン過程に及ぼす効果を解明する。

#### 4. 研究成果

理論解析と数値解析に基づき供試マイクロインデューサを設計し、装置を組み立てた。JAXA から貸与されたロケット用インデューサと比較するため、水を用いた予備試験を実施し、翼端クリアランスとインデューサ直径の比のスケール効果に関する実験データを取得した。次に、水素試験用の改良型装置を設計し、その組み立てを開始した。しかし、メカニカルシールが市販で対応できなかったため、メーカーと共同開発した。本補助金で整備した装置を活用し、今後も引き続き、液体水素キャビテーションの可視化やPIV計測の実験に挑戦し続ける予定である。

本補助金の成果を、初年度からの累計で、国際ジャーナルで5編の論文を、国内ジャーナルで1編の論文を出版した。また、4回国際会議、5回国内学会で発表を行った。以下に、詳細を示す。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Yu Ito	4. 巻 143
2. 論文標題 The World's First Test Facility That Enables the Experimental Visualization of Cavitation on a Rotating Inducer in Both Cryogenic and Ordinary Fluids	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Fluids Engineering	6. 最初と最後の頁 121105
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/1.4051849	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 伊藤優, 木村校優, 安藤智子, 東城宗熙	4. 巻 49
2. 論文標題 船用プロペラに生じるキャビテーション騒音の気泡質量分布(BMD)モデルを用いた数値解析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ターボ機械	6. 最初と最後の頁 677-689
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 -
1. 著者名 Yuqiao Zhang, Xiaodong Ren, Yan Wang, Xuesong Li, Yu Ito, and Chunwei Gu	4. 巻 233
2. 論文標題 Investigation of the cavitation model in an inducer for water and liquid nitrogen	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science	6. 最初と最後の頁 1989-1996
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1177/0954406219869980	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 該当する
1. 著者名 Yu Ito, Yuhei Sato, and Takao Nagasaki	4. 巻 142
2. 論文標題 Theoretical Analyses of the Number of Backflow Vortices on an Axial Pump or Compressor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ASME Journal of Fluids Engineering	6. 最初と最後の頁 31103
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/1.4045859	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Ito Y, Zheng X, and Nagasaki T	4. 巻 240
2. 論文標題 Numerical simulation using the bubble size distribution model of cryogenic cavitation around an axial helical inducer	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IOP Conference Series: Earth Environment Science	6. 最初と最後の頁 62015
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1755-1315/240/6/062015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 岩崎瞭介, 姫野武洋, 伊藤優, 渡辺紀徳, 谷和磨, 石井良, 梅村悠
2. 発表標題 サブグリッドでの気泡成長を考慮した界面捕獲法による単独翼キャピテーションの数値解析
3. 学会等名 第61回航空原動機・宇宙推進講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Ito
2. 発表標題 The world's first facility that enables the visualization of cavitation on a rotating inducer in both cryogenic and ordinary fluids
3. 学会等名 The 18th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yu Ito, Yuhei Sato, and Takao Nagasaki
2. 発表標題 Theoretical Analyses of the Number of Backflow Vortices On an Axial Pump Or Compressor
3. 学会等名 ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2019, San Francisco, USA (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤優, 湯川拓弥, 長崎孝夫, 渡辺紀徳
2. 発表標題 キャビテーションブレイクダウン性能のスケール効果
3. 学会等名 第83回ターボ機械協会総会講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ito Y, Sato Y, Nagasaki T
2. 発表標題 Theoretical Analyses of the Number of Backflow Vortices on an Axial Pump or Compressor
3. 学会等名 AJKFLUIDS 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ito Y, Zheng X, and Nagasaki T
2. 発表標題 Numerical simulation using the bubble size distribution model of cryogenic cavitation around an axial helical inducer
3. 学会等名 29th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤優, 鄭暁, 長崎孝夫
2. 発表標題 気泡径分布を用いた極低温キャビテーションの数学モデル(ターボ機械への適用)
3. 学会等名 日本機械学会流体工学部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤悠平, 伊藤優, 長崎孝夫
2. 発表標題 レイリープレセット方程式と伝熱方程式を連成させた気泡径分布を用いた極低温キャピテーションの数学モデル(インデューサに発生するキャピテーションへの適用)
3. 学会等名 キャピテーションに関するシンポジウム(第19回)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 東城宗熙, 伊藤優, 長崎孝夫
2. 発表標題 極低温回転機械に適したキャピテーションの数学モデルを用いた2次元翼周りキャピテーションの数値解析
3. 学会等名 日本航空宇宙学会航空原動機・宇宙推進講演会
4. 発表年 2019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

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