

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06157

研究課題名（和文）ターボポンプインデューサと翼端渦キャビテーションの動特性の解明

研究課題名（英文）Dynamic Characteristics of an Inducer and a Tip Vortex Cavitation

研究代表者

堀口 祐憲 (Horiguchi, Hironori)

大阪大学・基礎工学研究科・准教授

研究者番号：60314837

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：ロケットエンジン用ターボポンプインデューサに生じるキャビテーションの、圧力変動や流量変動に対する応答性を調べた。圧力変動に対して、ほとんど遅れることなく応答することがわかった。また、流量変動に対して、90度程度の位相遅れを持って応答することが明らかになった。さらに、キャビテーションによる不安定流動現象が発生するケーシングを用いた場合には、2次元流れ解析の結果に基づいて導出した流れ場の不安定性を表す指標が、より高い不安定性を示した。このことから、3次元流れにおいても、この指標によって、キャビテーションの安定性を定性的に判断し得ることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ロケットエンジンでは、ターボポンプインデューサで生じるキャビテーションが原因となって流量変動が生じる場合がある。圧力や流量の変動に対するキャビティ体積の変化率、すなわち動特性がその発生に大きな影響を持つため、これを明らかにすることが、信頼性の高いロケットエンジン（ターボポンプ - 推進薬供給系）の実現のために必要とされている。これまでよく知られていなかったキャビテーションの動特性を明らかにした点に、本研究の学術的な意義がある。また、これにより、ターボポンプシステムの安定性解析の精度が大きく向上するため、社会的な意義も極めて大きい。

研究成果の概要（英文）：We investigated the responsiveness of cavitation generated in a turbopump inducer for rocket engines to pressure fluctuations and flow rate fluctuations. It was found that it responds to pressure fluctuations with almost no delay. In addition, it was clarified that it responds to the flow rate fluctuation with a phase delay of about 90 degrees. Furthermore, the index showing the instability of the flow field, which was derived based on the results of the two-dimensional flow analysis, showed higher instability when a casing in which unstable flow phenomena due to cavitation occurred was used. From this result, it was found that this index could qualitatively show the stability of cavitation even in the three-dimensional flow.

研究分野：流体工学、流体機械

キーワード：キャビテーション インデューサ 単独翼 動特性 ケーシングトリートメント

## 1. 研究開始当初の背景

液体燃料ロケットでは、燃料供給系の流量変動、推力変動、および構造振動が連成した、POGOと呼ばれる不安定現象が生じることがある。POGOの発生を予測するためには、燃料を供給するターボポンプの上流と下流における変動流量と変動圧力の関係、すなわち動特性を把握する必要がある。また、ターボポンプのインデューサに生じるキャビテーションの動特性を表すキャビテーションコンプライアンス(圧力変動に対するキャビティ体積の変化率)とマスフローゲインファクタ(流量変動に対するキャビティ体積の変化率)は、POGOの予測に加えて、キャビテーションサージや旋回キャビテーションといったキャビテーション不安定現象の発生原因を理解する上でも重要なパラメータとなっている。

## 2. 研究の目的

- (1) ターボポンプのインデューサに生じるキャビテーションの動特性の解明
- (2) キャビテーション不安定現象と動特性の関係の解明

## 3. 研究の方法

主に実験で動特性の解明に取り組んだ。ターボポンプのインデューサに生じるキャビテーションを研究の対象とした。インデューサの上流側と下流側に、自作のピストン式の流体加振器を設置し、これにより圧力変動と流量変動を発生させた。これらの変動を与えた場合のキャビティの変動体積を計測し、動特性を評価した。上流と下流の変動流量からキャビティの変動体積を算出した。計測条件など、具体的な内容を以下に記す。

- (1) キャビテーション不安定現象が発生する、内壁が円筒形状の一般的なストレートケーシングを用いて、動特性に与えるキャビテーション数(入口圧力の無次元数)と流量の影響を調べた。
- (2) また、不安定現象が抑制される場合の動特性を明らかにするために、ほぼすべての不安定現象を抑制する効果を持つ、旋回止めを有する周方向溝付きケーシングを用いて、動特性を調べた。
- (3) 不安定現象と動特性の関係を明らかにするために、不安定現象が生じる場合と生じない場合の動特性の比較、ならびに上記の2種のケーシングを用いた場合の動特性の比較を行った。

## 4. 研究成果

キャビテーションの動特性を表すキャビテーションコンプライアンス(圧力変動に対するキャビティ体積の変化率)とマスフローゲインファクタ(流量変動に対するキャビティ体積の変化率)を、それぞれ  $K$ 、 $M$  として、得られた具体的な結論を以下に示す。

### (1) ストレートケーシングの動特性

キャビテーション数、流量係数の減少に伴い、 $K$ 、 $M$ の大きさが増加した。これは、キャビテーション数、流量係数の減少に伴い、キャビティ体積が増加するためであると考えられる。加振周波数の増加に伴い、 $K$ の大きさは減少し、 $M$ の大きさは増加した。 $K$ の大きさの減少の原因は、加振周波数の増加に伴い、キャビティ体積の変動する周期が減少するためであると考えられる。

$K$ の位相は、キャビテーション数や加振周波数によらず、 $-30^\circ \sim 0^\circ$ であった。これより、圧力変動に対してキャビティはほとんど遅れずに応答することがわかった。また、キャビテーション不安定現象が発生するような低キャビテーション数では、周波数の増加に伴って、 $K$ の位相が増加する傾向がみられた。これより、不安定現象が動特性に影響し得ることが明らかになった。

$M$ の位相は、設計流量係数では、 $-90^\circ$ 程度、それ以外の流量係数では、 $-100^\circ$ であった。これより、流量変動に対して、キャビティは4分の1周期程度遅れて応答することがわかった。

### (2) 旋回止めを有する周方向溝付きケーシングの動特性

ストレートケーシングの場合と同様に、キャビテーション数の減少に伴い、 $K$ と $M$ の大きさは増加した。また、加振周波数の増加に対して、ストレートケーシングを用いた場合と同様

に、 $K$ の大きさは減少し、 $M$ の大きさは増加した。  
ストレートケーシングの場合と同様に、 $K$ の位相は、キャピテーション数や加振周波数によらず、 $-30^\circ \sim 0^\circ$ であった。  
 $M$ の位相は、キャピテーション数や加振周波数によらず、ストレートケーシングの場合と比べて $10^\circ$ 程度遅れ、 $-95^\circ \sim -115^\circ$ であった。ストレートケーシングの場合と異なり、翼端漏れ渦キャビティが、翼端から離れてケーシングの周方向溝の中に生じる。このように、少し離れた場所に生じているために、時間遅れが生じたものと考えられる。

### (3) 不安定現象と動特性の関係

ストレートケーシングの結果から、キャピテーション不安定現象が発生するような低キャピテーション数では、周波数の増加に伴って、 $K$ の位相が増加する傾向がみられた。不安定現象が抑制される旋回止めを有する周方向溝付きケーシングでは、ストレートケーシングの場合と比べて、 $M$ の位相が $10^\circ$ 程度遅れ、 $-95^\circ \sim -115^\circ$ となる。これは、翼端渦キャビティが発生する位置が、ストレートケーシングの場合に比べて翼端から離れるためであると考えられる。

2次元解析の結果に基づいて導出した流れ場の不安定性を表す指標は、不安定現象の有無によらず、すべて不安定を示すものとなった。また、不安定現象が生じる場合に、必ずしも強い不安定性を示さなかった。このことから、2次元解析で検討の対象にされていた翼面キャビティでなく、翼端漏れ渦キャビティと逆流渦キャビティが顕著な3次元流れでは、不安定現象の発生の判別には、より適切な指標が必要となることが分かった。

その一方で、不安定現象が抑制されるケーシングの場合には、ストレートケーシングの場合に比べて、2次元解析の結果に基づいて導出した流れ場の不安定性を表す指標が、有意に不安定性が低いことを示していた。このことから、インデューサに生じるキャビティや発生位置が大きく異なる場合には、流れ場の安定性の定性的な検討に、この指標が役立つことがわかった。

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 1件）

1. 著者名 Takuya Ashida, Keita Yamamoto, Koichi Yonezawa, Hironori Horiguchi, Yutaka Kawata, Yoshinobu Tsujimoto	4. 巻 10
2. 論文標題 Measurement of Dynamic Characteristics of an Inducer in Cavitating Conditions	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 International Journal of Fluid Machinery and Systems	6. 最初と最後の頁 307-717
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	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 堀口祐憲, 豊島正和, 松田拓也, 杉山和靖
2. 発表標題 種々の単独翼に生じる翼面キャビテーションの動特性
3. 学会等名 日本機械学会 第96期流体工学部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森本有太, 杉浦隆文, 堀口祐憲, 杉山和靖
2. 発表標題 インデューサに生じるキャビテーションの動特性に与える吸込圧力と流量の影響
3. 学会等名 日本航空宇宙学会 第55回中部・関西支部合同秋期大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 堀口祐憲
2. 発表標題 キャビテーション発生時のインデューサの動特性
3. 学会等名 2018九州北部ANSYS-CFXコンソーシアムミーティング
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hironori Horiguchi, Masakazu Toyoshima, Takuya Matsuda, Kazuyasu Sugiyama
2. 発表標題 Dynamic Characteristics of Blade Surface Cavitation on Various Types of Hydrofoils
3. 学会等名 The ASME-JSME-KSME 2019 Joint Fluids Engineering Conference (AJKFLUIDS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuta Morimoto, Takafumi Sugiura, Hironori Horiguchi, Kazuyasu Sugiyama
2. 発表標題 The Effect of Suction Pressure and Flow Rate on the Dynamic Characteristics of a Cavitating Inducer
3. 学会等名 The ASME-JSME-KSME 2019 Joint Fluids Engineering Conference (AJKFLUIDS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森本有太, 堀口祐憲, 杉山和靖
2. 発表標題 インデューサに生じるキャビテーション不安定現象と動特性
3. 学会等名 第82回ターボ機械協会(岡山)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
---------	---------------------------	-----------------------	----