

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420112

研究課題名(和文) 単独翼と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動特性に関する研究

研究課題名(英文) Dynamic Characteristics of Cavitation in Single Hydrofoils and a Turbopump Inducer

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) 3,900,000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動特性を明らかにすることを目的として、単独翼に生じる翼面キャビテーションの動特性を主に実験で調べた。平板翼、NACA0015翼、Clark-Y11.8%翼では、圧力変動や迎え角変動に対して、キャビティは大きな位相遅れなく応答することがわかった。また、キャビティの体積は、この翼形の順に小さく、また、このために変動量が小さくなることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：Dynamic characteristics of blade surface cavitation in single hydrofoils was examined mainly in experiment to clarify dynamic characteristics of cavitation in turbopump inducers for rocket engines. In cases of a flat plate, NACA0015, Clark-Y11.8% hydrofoils, the cavity responded to fluctuations of pressure and an angle of attack with almost no phase delay. In the order of a flat plate, NACA0015, Clark-Y11.8% hydrofoils, the size of the cavity was smaller. Therefore, the amount of fluctuation of the cavity volume was smaller in that order of hydrofoils. These outcomes were first findings in the world and have a large impact on the improvement of a reliability of high speed turbopumps such as inducers for rocket engines.

研究分野：流体工学

キーワード：インデューサ キャビテーション 動特性 単独翼

1. 研究開始当初の背景

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。圧力変動や流量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。このキャビティの動特性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。

2. 研究の目的

基本的なキャビテーションの動特性を明らかにすることを目的として、単独翼に生じる翼端渦キャビテーションの動特性を解明する。

また、インデューサに生じるキャビテーションの動特性や、キャビテーション不安定現象と動特性の関係を明らかにするための準備として、実験装置と数値シミュレーションの環境を整える。

以上の活動を通じて、より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)の実現と発展に寄与する。

3. 研究の方法

(1)単独翼に対する実験と数値シミュレーション

インデューサの動翼を単独翼で模擬する場合、単独翼に生じるキャビテーションの動特性の計測には、圧力変動に加えて、翼に迎え角変動を与える必要がある。そこで、単独翼試験部の上流側で、自作の流体加振器により圧力変動を与えた。また、自作の装置で単独翼に迎え角変動を与えた。

単独翼として、当初予定していたインデューサの翼を模擬した平板翼と、より一般的な翼型である NACA0015 翼に加えて、Clark-Y11.7%翼を採用した。

キャビティが自励振動を起こさないよう、キャビティ長が翼弦長の 40%程度以下となるように、キャビテーション数 $\sigma (= (p_s - p_v) / (0.5 \rho U^2))$ を設定して実験を実施した。ここで、 p_s は入口圧力、 p_v は飽和蒸気圧、 ρ は流体の密度、 U は試験部の平均流速である。加振周波数は、2~10Hz の範囲で、1Hz 刻みで変化させた。

また、実験結果の妥当性の検証を行うことを目的の一つとして、実験と同様の条件を与えた場合のキャビテーション流れの数値シミュレーションも行った。

さらに、高速度ビデオカメラによりキャビテーションの撮影を行い、実験とシミュレーションの結果の妥当性を評価した。

(2)インデューサに対する実験と数値シミュレーション

著者らが設計した旋回止めを有する周方向溝付きケーシングによるキャビテーション不安定現象の抑制メカニズムを明らかに

するために、LDV と数値シミュレーションで、非キャビテーション時の流れを調べた。

また、将来の動特性の解明のために、このケーシングに対するキャビテーション流れの数値シミュレーションを実施した。

4. 研究成果

(1)単独翼に対する実験と数値シミュレーション

キャビティの動特性を表す、圧力、迎え角変動に対するキャビティ体積の変化率は、それぞれキャビテーションコンプライアンス、マスフローゲインファクタと呼ばれる。これらをそれぞれ K 、 M と表す。

これらの動特性の計測は困難で、世界的に見ても、ほとんど例が無い。特に、単独翼のキャビテーションの動特性の計測例は皆無であり、以下に示す(a)~(e)の知見は、大変貴重なものである。これらの成果は、信頼性の高いロケットエンジンの実現に大きく寄与する。

(a)平板翼の動特性

K の大きさは、加振周波数によらず、おおよそ一定である。また、 K の大きさは、キャビテーション数の増加にともなって減少する。これは、キャビテーション数が大きいとキャビティが小さく、一定の圧力振幅で加振しても、キャビティ体積の変動量が小さくなるためであると考えられる。 K の位相は、加振周波数の増加に対してわずかに減少する傾向にあるが、キャビテーション数によらず、 $-10^\circ \sim -30^\circ$ の範囲でおおよそ一定となる。

M の大きさは、加振周波数の増加に伴って徐々に減少し、また、キャビテーション数の増加に伴って減少する。これはキャビテーション数が大きいと、キャビティが小さく、キャビティ体積の変動量が減ることによると考えられる。 M の位相は、 $-30^\circ \sim 0^\circ$ であり、加振周波数が増加するに従って増加する。 M の位相に対するキャビテーション数の影響は明確には見られなかった。

以上のことから、圧力変動や迎え角変動に対して、キャビティは大きな位相遅れなく応答することが分かった。

以上の成果の詳細は、雑誌論文の 1、学会発表の文献の 4 に掲載されているので、 K 、 M の具体的な数値等が必要な場合には、これらをご覧ください。なお、本成果は、高く評価され、学会発表の文献の 4 は、Best Paper Award を受賞した。

(b)NACA0015 翼の動特性

K の大きさは、キャビテーション数の増加に伴い小さくなっていく。これは、キャビテーション数の増加に伴い、キャビティ長が小さくなり、キャビティの体積の変動量が減少することによる。また、加振周波数の増加に

伴い、低周波数域では減少するが、高周波数域ではほとんど変化しない。これは、キャビティが準定常的に応答できたためと考えられる。

K の位相遅れは、8Hz 以上の範囲では、キャビテーション数が高くなるほど小さくなる。これは、キャビテーション数が高いほど、キャビティ体積が小さく、圧力変動に対して応答しやすくなる為である。また、加振周波数が高くなるにつれて、 K の位相遅れが大きくなる傾向にある。

M の大きさは、キャビテーション数の増加に伴い、小さくなる。これは、高キャビテーション数では、キャビティが小さいことによる。また、全体的な傾向として、加振周波数が高くなるにつれて小さくなる。これは、クラウドキャビティとシートキャビティが準定常的に応答できなくなったことによる。

M の位相には、キャビテーション数の影響はあまり見られない。 M の位相の分布は、6Hz 付近に最大の位相遅れを持つ下に凸の放物線状となる。これには、シートキャビティとともに放出されたクラウドキャビティの応答性が関与していると考えられる。

(c) Clark-Y 11.7% 翼の動特性

K の大きさは、加振周波数が増加するとわずかに減少し、キャビテーション数の増加に伴って、大きく減少する。 K の位相は、加振周波数の増加に伴い、小さくなる。 K の位相は、キャビテーション数の影響は明確には見られなかった。

M の大きさは、加振周波数の増加に伴って、わずかに減少し、キャビテーション数の増加とともに減少する。 M の位相は、6Hz まで $-10^\circ \sim 10^\circ$ と準定常的である。6Hz から 10Hz へと周波数が増加すると、位相が大きくなる傾向にある。 M の位相に対するキャビテーション数の影響はみられるものの、これには明確な特徴はみられなかった。

(d) 単独翼に生じる翼面キャビテーションの動特性について

K と M の大きさは、翼面キャビテーションの体積が小さくなる、平板翼、NACA0015 翼、Clark-Y 11.7% 翼の順に減少する。また、 K と M の大きさは、加振周波数に対して、それぞれの翼で、おおよそ一定である。

K と M の位相は、おおむね $-30 \sim 10^\circ$ の範囲で推移しており、大きな位相遅れはない。ただし、クラウドキャビティの放出が頻繁な NACA0015 翼の場合は、6~8Hz の場合に限って、 $-50^\circ \sim -40^\circ$ と比較的大きい位相遅れが生じる。

(e) 数値シミュレーションによる単独翼の動特性

数値計算では、 K 、 M の大きさを過小評価し、また加振周波数に対する位相の応答の詳細を捉えられないが、位相の範囲を概ね予測

可能である。

なお、上に示した(a)、(c)~(e)の成果の詳細は、豊島の「単独翼に生じる翼面キャビテーションの動特性」、2017年3月、大阪大学修士論文、(b)の詳細は、松田拓也、「NACA0015 翼に生じる翼面キャビテーションの動特性」、2017年3月、大阪大学特別研究に記されている。 K 、 M の具体的な数値等が必要な場合には、これらをご参照いただきたい。

(2) インデューサに対する実験と数値シミュレーション

LDV の結果から、旋回止めを設けると、周方向溝の上流端近傍の周方向流速が大きく減少し、ほぼ 0 となることがわかった。これより、旋回止めは、旋回と逆流を抑制することで、逆流渦を防止する効果をもつことがわかった。

キャビテーション発生時の非定常のキャビテーション流れの数値シミュレーション結果が実験結果とよく一致していたことから、動特性の数値シミュレーションのための準備が完了した。

なお、(2)で示した成果は、学会発表の文献 2、3、6 に記されているので、必要であればこれらをご覧いただきたい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

1. Masakazu Toyoshima, Kimiya Sakaguchi, Kota Tsubouchi, Hironori Horiguchi, Kazuyasu Sugiyama, "Dynamic Response of Blade Surface Cavitation", International Journal of Fluid Machinery and Systems, Vol. 9, No. 2, April-June 2016, pp.160-168. 査読有り

〔学会発表〕(計 7 件)

1. 豊島正和、堀口祐憲、杉山和靖、「単独翼に生じる翼面キャビテーションの動特性」、キャビテーションに関するシンポジウム(第 18 回)九州大学(福岡県・福岡市)、2016 年 12 月、pp.1-6
2. 堀口祐憲、坪内孝太、沼直樹、豊島正和、杉山和靖、「ケーシングトリートメントによるインデューサのキャビテーション不安定の抑制」、日本機械学会流体工学部門講演会、山口大学(山口県・宇部市)、No.0907、2016 年 11 月、pp.1_3
3. 沼直樹、坪内孝太、豊島正和、堀口祐憲、杉山和靖、「ケーシングトリートメントによるインデューサのキャビテーション不安定現象の抑制とそのメカニズム」、日本機械学会関西学生会卒業研究発表講演会、12P12、電気通信大学(大阪府・寝

- 屋川市) 2016年3月、pp.12_11
4. Masakazu Toyoshima, Kimiya Sakaguchi, Kota Tsubouchi, Hironori Horiguchi, Kazuyasu Sugiyama, "Dynamic Response of Blade Surface Cavitation", The 13th Asian International Conference on Fluid Machinery, AICFM13-118, Tokyo (Japan), September 7-10, 2015, pp.1-9
 5. 豊島正和、阪口季望矢、坪内孝太、堀口祐憲、杉山和靖、「平板翼に生じるキャビテーションの動特性に関する研究」、日本機械学会 関西学生会卒業研究発表講演会、11P11、京都大学(京都府・京都市)、2015年3月、pp.11_11
 6. 坪内孝太、阪口季望矢、堀口祐憲、杉山和靖、「インデューサに生じるキャビテーション不安定現象の旋回止め付周方向溝による抑制に関する研究」、キャビテーションに関するシンポジウム(第17回)、東京大学生産技術研究所(東京都・目黒区)、2014年11月20、21日、pp.1-7
 7. 阪口季望矢、坪内孝太、芦田拓也、堀口祐憲、杉山和靖、「平板翼に生じるキャビテーションの動特性に関する研究」、キャビテーションに関するシンポジウム(第17回)、東京大学生産技術研究所(東京都・目黒区)、2014年11月20、21日、pp.1-7

大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授
研究者番号：60314837

(2)研究分担者
()

研究者番号：

(3)連携研究者
()

研究者番号：

(4)研究協力者
()

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

堀口 祐憲 (HORIGUCHI, Hironori)