

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月30日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360083

研究課題名（和文） インデューサのキャビテーション不安定現象の周方向グルーブを用いた防止法の研究

研究課題名（英文） Suppression of Cavitation Instabilities in Inducer by Circumferential Groove

研究代表者

辻本 良信（TSUJIMOTO YOSHINOBU）

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：50112024

研究成果の概要（和文）：ロケット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不安定現象を防止するために、インデューサ前縁近傍のケーシングに周方向溝を設けた。これより、効果的にキャビテーション不安定現象を防止できることが明らかになった。また、高周波数のキャビテーション不安定現象は逆流渦キャビティとインデューサの干渉によって生じることが明らかになった。さらに、数値計算でインデューサの動特性を明らかにし、また実験でも動特性をある程度の精度で計測できるまでに至った。

研究成果の概要（英文）：A circumferential groove was adopted in the casing near the leading edge of the inducer to suppress cavitation instabilities in turbopump inducers for rocket engines. The circumferential groove could suppress the cavitation instabilities effectively. It was found that the cavitation instabilities with higher frequencies were generated by the interference of backflow vortex cavitation with the blades of the inducer. The dynamic characteristics of the inducer were estimated by computation and experiment.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
2010年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
2011年度	2,600,000	780,000	3,380,000
総計	14,100,000	4,230,000	18,330,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：流体機械、インデューサ、キャビテーション、ケーシングトリートメント、周方向溝、動特性

1. 研究開始当初の背景

ロケットエンジン用ターボポンプインデューサには、キャビテーションに起因する流れの不安定現象が発生することがある。これは振動の原因となるため、キャビテーション不安定現象を防止する技術の開発に加えて、その基本的な性質を明らかにすることが、ロ

ケットエンジンの開発過程で最重要課題となっている。

キャビテーション不安定現象の発生原因は、隣接翼に発生するキャビティが翼の前縁と干渉するためであることが明らかになっている。キャビテーション不安定現象を防止するために、多くの防止法が検討されてきた

が、不安定現象を完全に防止できる方法は見出されていない。特定の変動モードを防止できても他のモードが現れてしまうという状況にあり、より効果的な防止法の提案が望まれている。

また、キャビテーション不安定現象の発生は、入口圧力に対するキャビティ体積の変化率や流量に対するキャビティ体積の変化率といった動特性と関連することが知られている。前者はキャビテーションコンプライアンス、後者はマスフローゲインファクタと呼ばれるパラメータで表現される。30年以上前にカリフォルニア工科大学で動特性が計測されたが、当時は高周波数のキャビテーション不安定現象の存在が知られておらず、これとの関係や周波数依存性は未だ明らかでない。このため、これらを明らかにすることが学術的な観点からも望まれている。

2. 研究の目的

周方向溝の、キャビテーション不安定現象の抑制効果を明らかにすること、ならびに最適な周方向溝の提案を行うことを目的としている。

また、キャビテーション不安定現象とインデューサの動特性の関係を明らかにすることも目的の一つとしている。

3. 研究の方法

周方向溝の最適形状を見出すために、まずはキャビテーション流れ解析を行った。

翼端漏れ渦を溝の中に捕えることによって、キャビティと隣接翼前縁の干渉を防止することを周方向溝の設計指針とした。キャビティにより発生する擾乱領域が隣接翼の入射角に及ぼす影響を調べるなどの独自の手法により、翼端漏れ渦キャビティと隣接翼前縁の干渉が防止されることを確認し、最適形状を見出した。

次に、実験により、周方向溝がキャビテーション不安定現象を防止できることを実証した。

さらに、キャビテーション不安定現象とインデューサの動特性の関係を明らかにするために、数値計算で動特性を評価し、また実験でそれらの計測にも取り組んだ。

4. 研究成果

(1) 周方向溝

図1、表1にインデューサの形状と諸元を示す。インデューサ周辺の試験部の断面図を図2に示している。

インデューサに生じるキャビテーション不安定現象を抑制するために、羽根車入口付近のケーシング壁面に、周方向溝を設けることにした。翼端漏れ渦キャビティを溝の中に

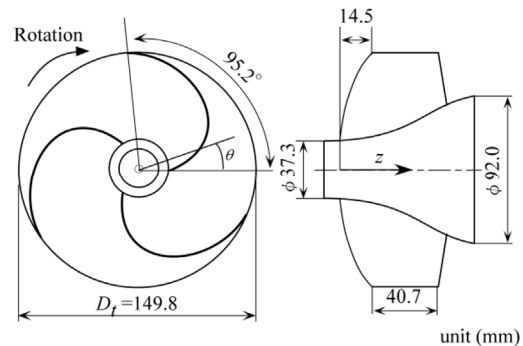


図1 インデューサの形状

表1 インデューサ諸元

Number of blades	3
Tip diameter (mm), D_t	149.8
Tip clearance (mm)	0.5
Sweep angle (deg)	95.2
Inlet tip blade angle (deg)	7.5
Outlet tip blade angle (deg)	9.0
Hub / Tip ratio at inlet	0.25
Hub / Tip ratio at outlet	0.51
Solidity at tip	1.91
Design flow coefficient, ϕ_d	0.078

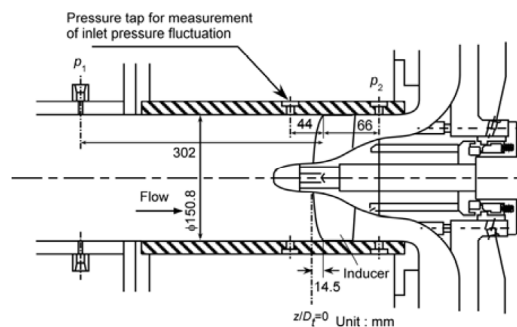


図2 試験部

捕え、翼端漏れ渦キャビティと隣接翼の干渉を防止することによりキャビテーション不安定現象を抑制できるかどうかを調べた。

まずは、数種の周方向溝に対してCFDによる流れ解析を実施し、その中で最適と思われる周方向溝(図3)の形状を見出し、これに対して実験を実施した。溝がある場合とない場合のキャビティの形状を図4に示す。インデューサの入口圧力の無次元値であるキャビテーション数 σ ($\equiv (p_1 - p_v) / (0.5\rho U_t^2)$)が0.08の結果である。ここで p_1 は入口圧力、 p_v は飽和蒸気圧、 ρ は流体の密度、 U_t は翼端の周速度である。これより、ケーシングに溝を設けた場合には、溝にキャビティが導かれ、また逆流渦キャビティが縮小していること

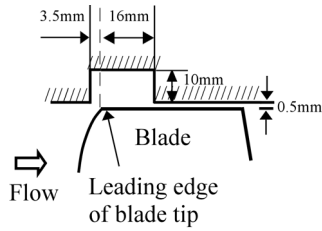
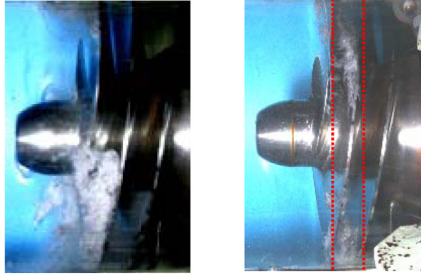


図3 周方向溝の形状



(a)溝なし (b)溝あり

図4 キャビティの形状
(設計流量、 $\sigma=0.08$)

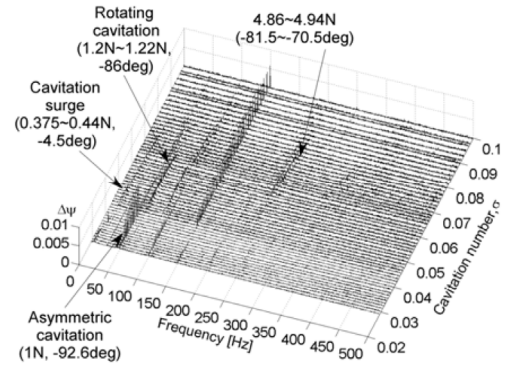
がわかる。

インデューサの上流で計測した圧力変動のスペクトルを図5に示す。設計流量時の結果である。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、比較的周波数が小さいキャビテーション不安定現象が、溝によって効果的に抑制されていることがわかる。

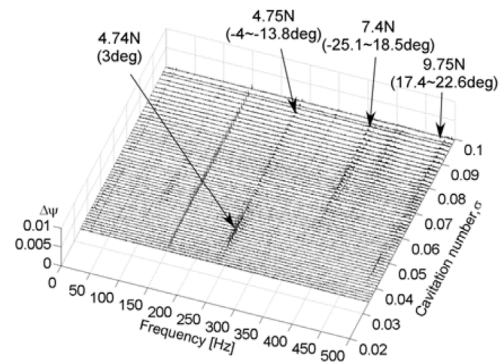
他の流量でも、適用した周方向溝により、翼端漏れ渦キャビティを捕えることができ、旋回キャビテーション、非対称キャビテーション、およびキャビテーションサージを完全に抑制することができた。これより、周方向溝は、一般的な低周波数のキャビテーション不安定現象の抑制に非常に有効であることが明らかになった。

図6に、実験と計算から得られた性能曲線を示す。溝により、特に低流量側で圧力係数が低下している。設計点 $\phi(=v_z/U_1)=0.078$ の圧力係数 $\psi_s(=(p_2-p_1)/(\rho U_1^2))$ の低下量は約3%と小さく、容認できる範囲である。ここで、 v_z は、ハブでの翼前縁軸方向位置における平均軸流速度、 p_1 、 p_2 は、入口、出口の圧力である。

周方向溝の適用により、図5に示すように、高周波数の圧力変動が顕在化した。動静翼干渉によって生じる回転圧力場に関する理論における静翼を逆流渦に置き換えることで、高周波数の圧力変動の原因を検討した結果、本圧力変動は逆流渦と動翼の干渉によって生じたものであることが明らかになった。これまでに、数種のインデューサで、ある運転条件において高周波数のキャビテーション不安定現象が観察されている。それらが逆流



(a)溝なし



(b)溝あり

図5 圧力変動スペクトル (設計流量)

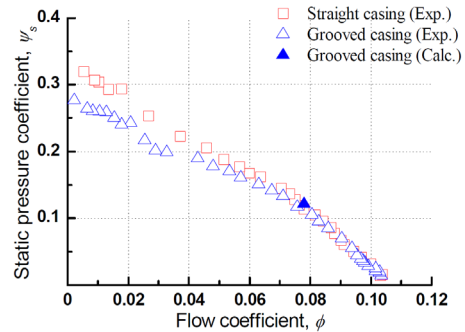


図6 ポンプ性能

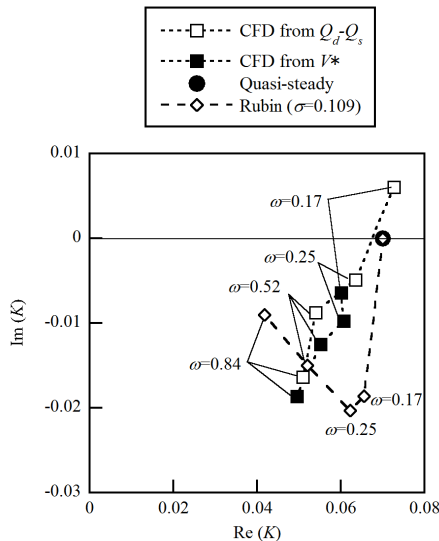
渦と動翼の干渉によって生じている可能性が高く、本成果はキャビテーション不安定現象をよりよく理解するために非常に有益な成果である。

(2)動特性

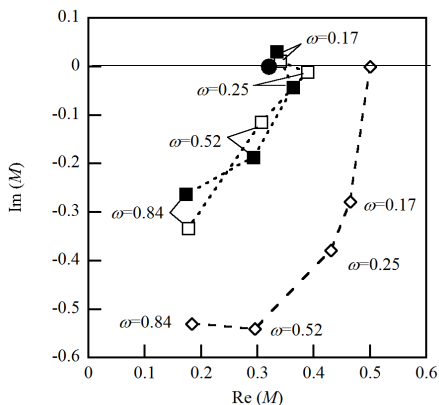
本研究では、数値計算による動特性の評価とともに、動特性の計測システムの構築とその計測にも取り組んだ。

① 数値計算

数値計算では、キャビテーション発生下の非定常流れ計算を実施し、動特性の算出を行



(a) キャビテーションコンプライアンス



(b) マスフローゲインファクタ

図7 キャビテーションコンプライアンスと
マスフローゲインファクタ
(設計流量、 $\sigma=0.1$)

った。キャビテーション数が 0.1 と比較的大きい条件での計算であり、逆流渦キャビテーションが発生しない状況であるため、周期境界条件を用いた計算を実施した。

図7に、キャビテーションコンプライアンスとマスフローゲインファクタを示す。周波数が増加するとキャビテーションコンプライアンスとマスフローゲインファクタの位相が遅れることが分かった。これは、1982年に **Brennen** らにより計測された実験結果から求めた場合の結果 (**Rubin** の結果) と定性的に一致していることから、計算結果の妥当性が示された。

② 実験

動特性を計測するためには、一次独立な 2 つの流動条件を実現する必要がある。そこで、

流体加振器を設計、製作し、インデューサの上流側へ設置した。また、精度の高い圧力変換器を導入することで、微小な変動圧力の計測を可能とし、再現性のある変動圧力データを取得できるように工夫した。また、変動流量を、電磁流量計ではなく、変動圧力差から算出するようにした。これより、SN比が高い良質の信号から、精度の高い変動流量を算出できるようになった。

以上の改良によって、飛躍的に信頼性が向上したデータの取得が可能となった。一方、わずかな変動流量を計測できるようになったことで、インデューサを挟んだ上流と下流で、変動流量が最大で約 20% ずれるという問題が顕在化した。現在その原因の究明と問題の解決に取り組んでいる。

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 5 件)

- ① 姜東赫、有元悠祐、米澤宏一、堀口祐憲、川田裕、Chinill Hah、辻本良信、インデューサに生じるキャビテーション不安定現象の周方向溝による抑制と高周波数圧力変動の原因に関する考察、ターボ機械、39 巻、6 号、(2010)、365-367
- ② Donghyuk Kang、Yusuke Arimoto、Koichi Yonezawa、Hironori Horiguchi、Yutaka Kawata、Chunill Hah、and Yoshinobu Tsujimoto、Suppression of Cavitation Instabilities in an Inducer by Circumferential Groove and Explanation of Higher Frequency Components, International Journal of Fluid Machinery and Systems, Vol.3, No.2, (2010), 137-149 (https://www.jstage.jst.go.jp/article/ijfms/2/3/2_3_206/pdf)
- ③ 姜東赫、渡邊俊文、米澤宏一、堀口祐憲、川田裕、辻本良信、キャビテーション不安定現象を抑制するインデューサインペラ形状に関する研究、ターボ機械、37 巻、12 号、(2009)、749-762

〔学会発表〕(計 9 件)

- ① 青野淳、有元悠祐、山本啓太、米澤宏一、堀口祐憲、川田裕、辻本良信、ロケット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動特性に関する研究、第 66 回ターボ機械協会 宮崎講演会、(2011)、1-6
- ② 青野淳、姜東赫、米澤宏一、堀口祐憲、川田裕、辻本良信、キャビテーション発生下におけるインデューサの動的特性の数値解析、キャビテーションに関するシンポジウム (第 15 回)、(2010)、1-4

6. 研究組織

(1) 研究代表者

辻本 良信 (TSUJIMOTO YOSHINOBU)

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：50112024

(2) 研究分担者

川田 裕 (KAWATA YUTAKA)

大阪工業大学・工学部・教授

研究者番号：70440930

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

米澤 宏一 (YONEZAWA KOUICHI)

大阪大学・基礎工学研究科・助教

研究者番号：00362640