

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760159

研究課題名(和文) 逆流再循環装置によるインデューサのキャビテーション不安定現象の防止に関する研究

研究課題名(英文) Suppression of Cavitation Instabilities in an Inducer by a Backflow Recirculator

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) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

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では、軸振動の原因となるキャビテーション不安定現象が生じ、これがロケットエンジンの開発過程で世界的に問題となっている。本研究ではこれを効果的に抑制する方法(ケーシングトリートメント)を見出した。また、キャビテーション不安定現象の発生メカニズムの解明に役立つ、キャビテーションの動特性の計測に取り組み、これを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In turbopump inducers for rocket engines, cavitation instabilities occur and cause shaft vibrations. We examined various types of casing treatments for suppressing the cavitation instabilities. The casing treatment which consisted of a circumferential groove with some ribs as a swirl breaker could suppress the cavitation instabilities effectively. The dynamic characteristics of cavitation, which relate to the occurrence of cavitation instabilities, were measured and clarified.

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：キャビテーション インデューサ ケーシングトリートメント 動特性

1. 研究開始当初の背景

ロケット用ターボポンプインデューサの開発過程で、キャビテーション不安定現象が世界的に問題となっている。

キャビテーション不安定現象は、翼端漏れ渦キャビテーションと隣接翼の干渉によって生じる低周波数の不安定現象と、逆流渦キャビテーションが翼と干渉することによって生じる高周波数の不安定現象の2種に大別できる。

低周波数の不安定現象は、インデューサ入口付近のケーシング壁面に周方向グループを設置することで抑制されることが、研究代表者らの研究グループにより、すでに明らかにされている。一方、高周波数の不安定現象を抑制する方法は未だ明らかになっていない。

また、キャビテーション不安定現象の発生には、キャビテーションの動特性が関係すると考えられている。これを明らかにすることは、キャビテーション不安定現象の深い理解につながるという学術的価値のみならず、精度の高い推進薬供給系の安定解析を可能にするという実用的な価値も大きいため、切望されている。

2. 研究の目的

上記の背景から、研究代表者らが見出した知見に基づき、翼端漏れ渦キャビテーションの隣接翼との干渉、ならびに逆流渦キャビテーションを防止することで、すべてのキャビテーション不安定現象の発生を防止する新しいデバイスを創出することを本研究の目的とした。

また、インデューサの動特性を明らかにすることも主な目的の1つとしている。

3. 研究の方法

(1)キャビテーション不安定現象の抑制に関する研究

まず、非キャビテーション流れやキャビテーション流れの数値シミュレーションにより、キャビテーション不安定現象の抑制に効果的なケーシングトリートメントの検討を行った。前述のように、翼端漏れ渦キャビテーションと隣接翼の干渉の防止、および逆流渦キャビテーションの発生の防止の観点から、ケーシングトリートメントの形状を検討した。数値シミュレーションには、市販の流れ解析ソフトである ANSYS CFX を用いた。乱流モデルとして SST モデルを用いた。

次に、最も抑制効果が高いと考えられるケーシングトリートメントを製作し、これに対して実験を行い、その効果を検証した。実験には、現有の閉ループ式のキャビテーションタンネルを用いた。インデューサは、H-II ロケットの LE-7 エンジン用の液体酸素ターボポンプインデューサに類似のものであり、その羽根はヘリカル形状で、羽根枚数は 3、翼端での弦節比が 1.91、直径は 149.8mm、設計

流量係数 $\phi_d (=u_z/U_t)$ は 0.078 である。ここで、 u_z はインデューサ入口の平均軸流速度、 U_t は翼端周速度である。作動流体は水で、真空ポンプを用いて系の圧力を調整した。キャビテーション数 $\sigma (= (p - p_v) / (0.5 \rho U_t^2))$ を 0.1 から約 0.01 程度まで変化させて実験を行った。ここで、 p はインデューサ入口付近の圧力、 p_v は飽和蒸気圧、 ρ は水の密度である。羽根車の回転数を 3000rpm とした。

(2)キャビテーションの動特性に関する研究

主に実験で動特性の評価に取り組んだ。キャビテーションの動特性は、圧力変動に対するキャビティ体積の変化率であるキャビテーションコンプライアンスと、流量変動に対するキャビティ体積の変化率であるマスフローゲインファクタで表される。これらの動特性の評価には、1 次独立な 2 つの流動条件下で、インデューサの上流側と下流側の圧力変動と流量変動を計測する必要がある。そこで、インデューサの上流側と下流側に自作の流体加振器を設置し、上流側で流体を加振する場合と下流側で流体を加振する場合の 2 つの条件下で計測を行った。

当初は、変動流量を自作の電磁流量計で計測していたが、SN 比が大きく、計測した変動流量の精度が十分でなかった。このため、最終的には、2 点間の変動圧力差から流体の慣性力を求め、これから流量を評価する方法を採用し、比較的精度の高い変動流量の計測が可能となった。

キャビテーション数の影響

設計流量時 ($\phi_d = 0.10$) に、 $\sigma = 0.10$ (1500rpm)、 0.05 (2000rpm)、 0.03 (2500rpm) に対して計測を行った。加振周波数を、3~12Hz の範囲内で、1Hz 刻みで変化させた。

$\sigma = 0.10$ では、翼端キャビティの長さがピッチの 50% 程度の等長キャビテーション、 $\sigma = 0.05$ では、旋回キャビテーションが発生している。また、 $\sigma = 0.03$ では、最も長いキャビティが翼後縁付近にまで達した非対称キャビテーションが生じている。

流量の影響

流量の影響を調べるために、 $\sigma = 0.10$ (1500rpm) に対して、 $\phi_d = 1.2$ 、 0.8 の場合に対しても実験を実施した。

4. 研究成果

(1)キャビテーション不安定現象の抑制に関する研究

逆流再循環装置を用いた場合

逆流再循環装置として、インデューサ入口部の翼端周辺から上流側へ向かって、ケーシング内に環状流路を設置した。この試みは、翼端漏れ渦や逆流を環状流路内に引き込んで、翼端渦キャビテーションと隣接翼の干渉

を防止し、また逆流渦キャピテーションの発生も防止することで、すべての周波数のキャピテーション不安定現象の抑制をねらったものである。

環状流路の高さなど、考えられる種々のパラメータを変更し、また旋回成分を取り除くための案内羽根を流路内に設置するなどして、キャピテーション不安定現象の抑制に最適な形状の探索を行ったが、流路内や流路出口近傍にキャピテーションが生じ、これに起因して流路内でキャピテーションサージのような流動不安定現象が生じることが判明した。以上の取り組みから、実機に適用可能な逆流再循環装置の形状を見出すことは、容易ではないことが明らかになった。

周方向グループと軸方向グループを組み合わせた場合

インデューサの入口近傍のケーシングに周方向グループを適用すると、一般的な低周波数のキャピテーション不安定現象を抑制できる。一方、逆流渦キャピテーションと羽根の干渉によって生じる高周波数のキャピテーション不安定現象の抑制には、逆流中の旋回成分を取り除いて逆流渦キャピテーションの発生を防止する必要がある。そこで、周方向グループの上流側に軸方向グループを設置し、逆流中の旋回流速の低減を試みた。種々の軸方向グループに対して、旋回流速の低減効果を調べたが、特に効果が高いと思われる形状を見いだせなかった。これより、周方向グループと軸方向グループの組み合わせも適切でないことがわかった。

周方向グループ内に旋回止めを設置した場合

周方向グループ内には、インデューサの回転方向の同方向の旋回流れが生じている。そこで、周方向グループ内に旋回止めを設置することで、この旋回流速を低減し、翼端渦によってグループ内から主流へ戻される流れの旋回流速を低減する試みを数値シミュレーションで行った。その結果、逆流の旋回流速が有意に低減できることを確認できた。これより、周方向グループ内に旋回止めを設けることで低吸込圧下での逆流渦キャピテーションの発生を抑制できると考えられた。

そこで、実際に周方向グループ内に旋回止めを設けたケーシングを製作し、流量 / Q が 0.9、0.95、1、1.05、1.1 の場合に対して吸込性能試験を実施した。

これより、低周波数のキャピテーション不安定現象に加えて、逆流渦キャピテーションと羽根が干渉することによって生じる高周波数のキャピテーション不安定現象を効果的に抑制できることがわかった。また、設計流量時に、周方向グループのみを設置した場合には、周方向グループが無い一般的な場合に対して、揚程が数%低下していたが、周方向グループ内に旋回止めを設置した場合に

は、その揚程低下も見られなかった。

このことから、旋回止め付きの周方向グループは、実機にも適用可能な性能を有するものと考えられる。現在、その抑制効果の詳細を、実験で調べている。

(2)キャピテーションの動特性に関する研究

動特性に関する研究で得られた結果をまとめると、以下の通りである。詳しい内容は、〔雑誌論文〕の掲載予定(2014年10月)の論文に記されているので、ご参照いただきたい。

圧力差を用いて変動流量を計測することが可能であった。しかし、上下流の計測点の間で、変動流量の振幅の差が見られた。これは計測点間に存在する何らかのコンプライアンスによるものと考えられる。

キャピテーションコンプライアンスの大きさは、低周波数を除き、加振周波数が増加すると減少する傾向を示した。また、キャピテーション数と流量係数が減少すると、キャピテーションコンプライアンスの大きさが増加した。

マスフローゲインファクタの大きさは、低周波数を除き、加振周波数の増加とともに増加する傾向を示した。また、キャピテーション数が減少するとマスフローゲインファクタの大きさが増加した。

キャピ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は、ともにほぼすべての周波数で準定常時の位相と比べて遅れており、また加振周波数が増加するにつれて遅れていく傾向を示した。

低周波数においては、データのばらつきが大きいので、キャピテーションコンプライアンスやマスフローゲインファクタの定量的評価には更なる精度の向上が必要である。

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3件)

芦田拓也、山本啓太、米澤宏一、堀口祐憲、川田裕、辻本良信、キャピテーション発生時のインデューサの動特性計測、ターボ機械、査読有、42巻、2014、掲載予定

米澤宏一、青野淳、姜東赫、堀口祐憲、川田裕、辻本良信、インデューサの動特性および非定常キャピテーション特性に関する数値解析、ターボ機械、査読有、40巻、2012、735-744

Koichi Yonezawa, Jun Aono, Donghyuk Kang, Hironori Horiguchi, Yutaka

Kawata, Yoshinobu Tsujimoto,
Numerical Evaluation of Dynamic
Transfer Matrix and Unsteady
Cavitation Characteristics of an
Inducer, International Journal of
Fluid Machinery and Systems, 査読有,
Vol.5, 2012, 126-133

[学会発表](計6件)

坪内孝太、阪口季望矢、芦田拓也、**堀口祐憲**、単独翼に生じるキャビテーションの動特性、日本機械学会関西学生会卒業研究発表講演会、2014年3月、大阪府立大学

芦田拓也、山本啓太、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時のインデューサの動特性計測、日本機械学会流体工学部門講演会、2013年11月、九州大学

芦田拓也、山本啓太、元山雄登、米澤宏一、**堀口祐憲**、川田裕、辻本良信、インデューサの動特性の計測に関する研究、日本機械学会関西支部第88期定時総会講演会、2013年3月、大阪工業大学

Koichi Yonezawa, Jun Aono, Donghyuk Kang, **Hironori Horiguchi**, Yutaka Kawata, Yoshinobu Tsujimoto, Numerical Evaluation of Dynamic Transfer Matrix and Unsteady Cavitation Characteristics of an Inducer, 5th International Symposium on Fluid Machinery and Fluids Engineering, October 24-26, 2012, Jeju, Korea

山本啓太、芦田拓也、青野淳、米澤宏一、**堀口祐憲**、川田裕、辻本良信、インデューサの動特性の計測および変動流量計測法に関する研究、第68回ターボ機械協会沖縄地方講演会、2012年9月20日、琉球大学

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年9月15日、宮崎大学

6. 研究組織

(1)研究代表者

堀口 祐憲 (HORIGUCHI, Hironori)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授
研究者番号：60314837