

補助事業番号 2020M-138

補助事業名 2020年度 高性能ロケットエンジン開発のための翼端渦キャビテーション
の非定常応答性の解明 補助事業

補助事業者名 大阪大学 大学院基礎工学研究科 堀口祐憲

1 研究の概要

ロケットエンジンの主要な構成要素であるターボポンプは、インデューサ部で常にキャビテーションが発生した状態で運転される。圧力変動や流量変動に対するキャビテーションの非定常応答性がシステムの安定性を決めるため、ロケットエンジン開発において、キャビテーションの非定常応答性を把握することが世界的に重要な課題となっている。

インデューサでは、翼面キャビテーションと、翼端隙間の流れに起因した翼端渦キャビテーションと呼ばれるキャビテーションが同程度に生じる。本研究では、流量変動に対する翼端渦キャビテーションの応答性の解明に実験で取り組んだ。

インデューサの翼を平板翼で模擬し、また、回転するインデューサに流入する流体の流量変動を模擬するために、平板翼に迎え角変動を与えた。高速度ビデオカメラによる平板翼に生じる翼端渦キャビテーションの観察と、PIVによる翼端部の流れ場の観察により、流量変動に対する翼端渦キャビテーションの応答性を明らかにした。

2 研究の目的と背景

インデューサのキャビテーションは、圧力変動に対してほぼ時間遅れなく応答するが、流量変動に対して4分の1周期遅れて応答することが、本補助事業者により明らかにされた(2019)。インデューサでは、翼面キャビテーションと、翼端隙間の流れに起因した翼端渦キャビテーションと呼ばれるキャビテーションが同程度に生じる。流量変動に対して、翼面キャビテーションはほとんど位相遅れなく応答することが、本補助事業者により明らかにされているが(2016)、翼端渦キャビテーションの応答性は未だ不明である。そこで、本事業では、これを実験で明らかにすることを目的とした。

流量変動に対して、翼端渦キャビテーションが遅れて応答することによって、インデューサのキャビテーションの、流量変動に対する位相遅れが生じると予想される。得られた知見は、ロケットエンジン用ターボポンプや汎用ポンプの高信頼性化に大きく寄与する。

3 研究内容

単独翼試験用のタンネル(図1)、およびPIVによる流れ場計測に必要な光学系システム(図1、2)を整備し、実験を実施するための環境を整えた。その後、高速度ビデオカメラによる翼端渦キャビテーションの観察と、PIVによる翼端隙間近傍の流れ場の計測を行い、流量変動に対する翼端渦キャビテーションの応答性を調べた。実験の詳細と、実験で得られた具体的な成果を以下に記す。

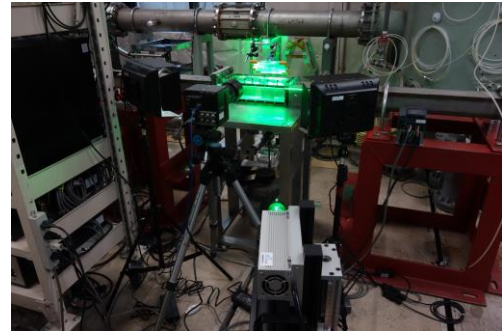
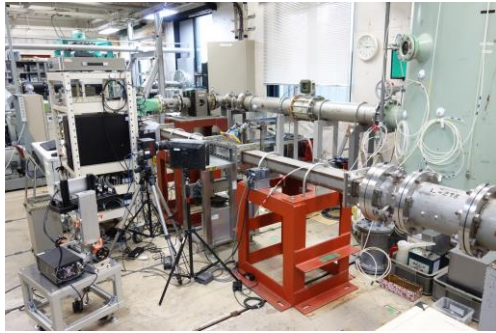


図1 単独翼用キャビテーションタンネル 図2 流れ場計測のためのPIVシステム

まず、本事業によって導入した高速度ビデオカメラにより、迎え角変動を与えた平板翼に生じる翼端渦キャビテーションを観察した。平板翼の翼弦長と翼高さはともに70mm、翼端隙間は1.5mmである。主流の流速 U が4m/s、入口圧力の無次元数であるキャビテーション数 σ が0.675の場合の翼端渦キャビテーションの様子を図3に示す。図3(a)は、迎え角 α を 2° 、 2.5° 、 1.5° に設定した場合の結果で、図3(b)は、迎え角の最大値と最小値が $2^\circ \pm 0.5^\circ$ になるように、16Hzで迎え角を正弦波状に変動させた場合の結果である。図3(b)には、時刻が経過する順に、上から下に並べて結果を表示している。図3より、迎え角を時間的に変動させない場合と変動させた場合のキャビティの長さが大きく異なることがわかる。16Hzの場合には、キャビティ長は、 $\alpha=2.5^\circ$ で最大とならず、その時刻から4分の1周期から2分の1周期遅れた、 $\alpha=2.0^\circ$ から 1.5° の間で最大となる。

図4にキャビティ長の時間変化を示す。横軸は時刻(T は周期)、縦軸はキャビティ長 L を翼の長さ C で割った値である。図中の実線は、FFTによって加振周波数成分を取り出した結果である。この振幅と迎え角変動に対する位相を図5に示す。これより、迎え角変動の周波数 f の増加に伴って、キャビティ長の振幅が減少し、位相が遅れることがわかる。また、位相には、周波数の増加に伴って -180° に漸近する傾向がみられる。

この位相遅れの原因を明らかにするために、非キャビテーション状態で、翼端隙間を含む断

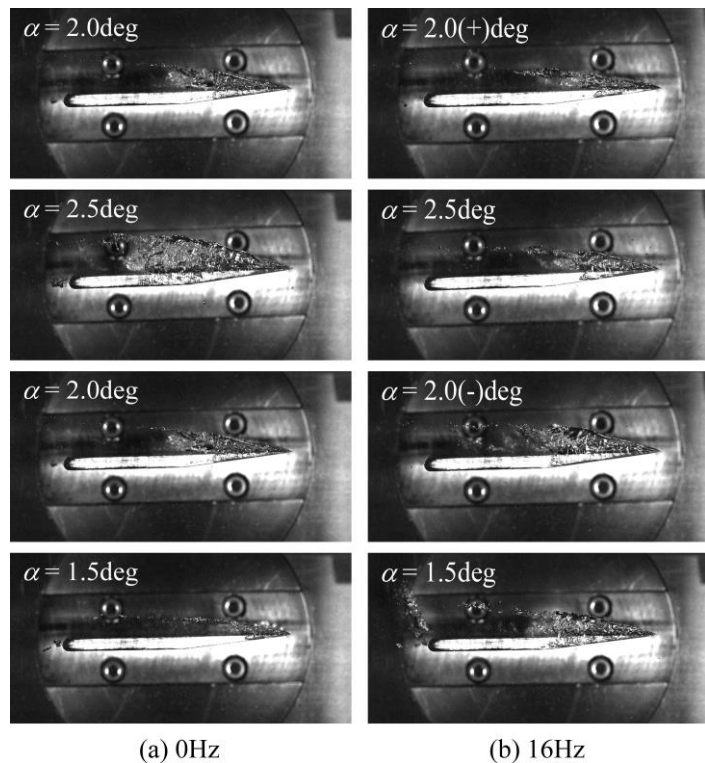


図3 翼端渦キャビテーション. $\sigma=0.675$, $U=4\text{m/s}$.

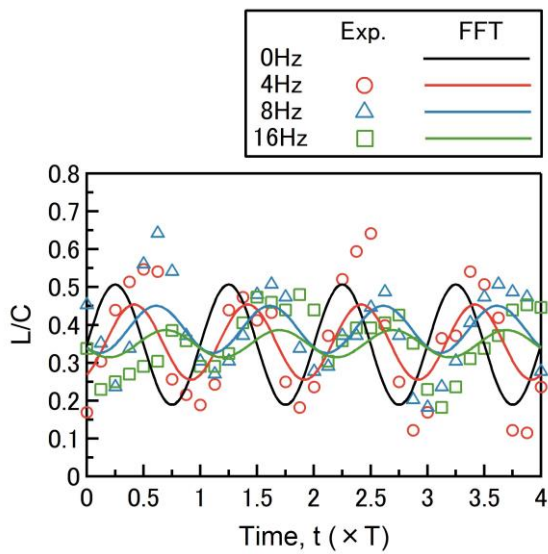


図4 キャビティ長の時間変化
($\sigma=0.675$, $U=4\text{m/s}$)

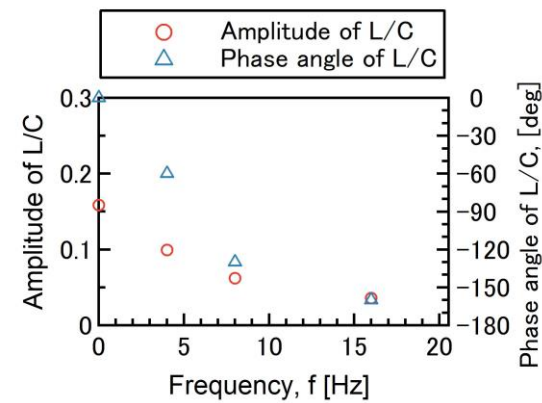
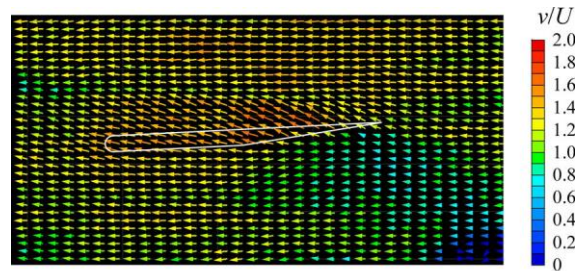
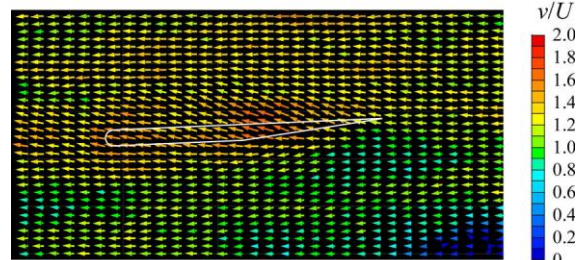


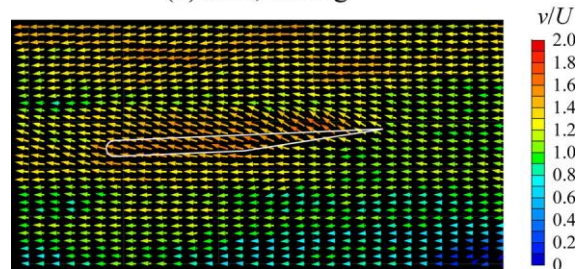
図5 キャビティ長の振幅と位相
($\sigma=0.675$, $U=4\text{m/s}$)



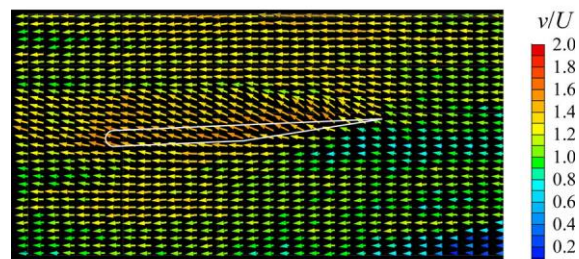
(a) 0Hz, 2.0deg



(b) 0Hz, 1.5deg



(c) 8Hz, 1.5deg



(d) 16Hz, 1.5deg

図6 翼端隙間断面内の流れ
(非キャビテーション状態, $U=4\text{m/s}$)

の流れ場を、渡村友昭助教の協力を得ながら、PIVにより計測した。結果を図6に示す。図6 (a)、(b) は、迎え角変動の周波数が0Hzで、それぞれ迎え角が 2° と 1.5° の結果であり、(c)、(d) はそれぞれ8Hz、16Hzで加振した場合の、迎え角が 1.5° ($t=1.75T$) の時の結果である。図6 (d) に示すように、16Hzの場合には、翼前縁付近を横切る流れの、翼に対する角度と流速が、図6 (b) に示す0Hzのもの比べて、大きくなっていることがわかる。迎え角が 2.5° から 1.5° へ減少する途中の 2° では、翼先端の移動速度が最大となり、翼先端から見た動的な迎え角が最大となる。このため、 2° で翼面圧力差が最大となり、そこから位相が 90° (4分の1周期) 遅れて、迎え角が 1.5° になった辺りで流れが発達したと考えられる。その結果として、図4に示したように、16Hzでは

迎え角変動に対して位相が 270° （4分の3周期）遅れた、迎え角が 1.5° になった辺り（ $t=0.75T, 1.75T, 2.75T, 3.75T$ 付近）でキャビティ長が最大となったと考えられる。

これらの結果を実機インデューサに適用すると、以下のように解釈できる。流量変動の周波数が1Hzといった極めて小さい場合には、準定常状態となるため、位相はおよそ 0° に近くなるが、周波数の増加に伴って位相が遅れ、5Hz程度になると 90° 遅れる。周波数がより大きくなると、動的な流れの迎え角が最大となる時点から 90° 遅れるため、迎え角変動に対するキャビティ変動の位相は再び 0° に漸近する。このような傾向は、実機インデューサの動特性に見られることから、実機インデューサのキャビテーションの位相変化は、主に翼端渦キャビテーションによるものと考えられる。

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本研究により得られた知見はロケット用ターボポンプの設計に直接的に活用され、これにより信頼性の高いターボポンプが近い将来に実現すると期待される。また、作動点を大きく変えながら運用する必要がある有人飛行ロケット用のターボポンプの開発にも活用される。

翼端渦キャビテーションは汎用のターボポンプでも生じる。このため、本研究により得られた知見は、キャビテーションの非定常応答性が考慮された高性能ターボポンプの実現につながる。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

過去12年にわたって、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を行ってきた。インデューサには翼面キャビテーションと翼端渦キャビテーションが生じるため、これらの動特性が、キャビテーション発生時のインデューサの動特性（2019）を決める。翼面キャビテーションは、流量、圧力変動に対して大きな位相遅れなく応答することをすでに明らかにしている（2016）。本研究で翼端渦キャビテーションの動特性が明らかになったことで、キャビテーション発生時のインデューサの基本的な動特性が解明されたといえる。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

なし

※1 コロナ禍により、研究の開始時期に4カ月ほどの大幅な遅れが生じたため、全体のスケジュールも遅れがちとなった。このため、今後、順次成果を発表する。直近では、2021年11月にオンラインで開催される、日本機械学会流体力学部門講演会にて成果を発表する。

※2 また、本事業で導入した高速度ビデオカメラの運用の練習を兼ねて、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観察を行った結果、報告例が極めて限られている非定常現象の詳細を明らかにすることができた。この成果を、現在、雑誌、「ターボ機械」、ASME（アメリカ機械学会）の“Journal of Fluids Engineering”へ投稿する準備

をしている。

7 補助事業に係る成果物

(1) 補助事業により作成したもの

なし

(2) (1) 以外で当事業において作成したもの

なし

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名：大阪大学（オオサカダイガク）

住 所：〒560-8531

大阪府豊中市待兼山町1-3

担 当 者：准教授 堀口祐憲（ホリグチヒロノリ）

担 当 部 署：大学院基礎工学研究科（ダイガクインキソコウガクケンキュウカ）

E - m a i l : horiguti@me.es.osaka-u.ac.jp

U R L : http://flow.me.es.osaka-u.ac.jp/horiguchi/index_j.html