

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

キャビテーション現象の可視観察

渡邊 光男, 長谷川 敏, 島垣 満, 橋本 知之
中村 憲明, 永浦 克司, 吉田 義樹

2007年3月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

キャビテーション現象の可視観察

Observation of Rotating Cavitation in Rocket Turbopump Inducers

渡邊 光男^{*1}, 長谷川 敏^{*1}, 島垣 満^{*1}, 橋本 知之^{*1}

中村 憲明^{*2}, 永浦 克司^{*3}, 吉田 義樹^{*1}

Mitsuo WATANABE^{*1}, Satoshi HASEGAWA^{*1}, Mitsuru SHIMAGAKI^{*1} Tomoyuki HASHIMOTO^{*1}

Noriaki NAKAMURA^{*2}, Katsuji NAGAURA^{*3} and Yoshiki YOSHIDA^{*1}

* 1 総合技術研究本部 ロケットエンジン技術センター

Rocket Engine Technology Center, Institute of Aerospace Technology

* 2 科学技術振興機構

Japan Science and Technology Agency

* 3 航空宇宙技術振興財団

Foundation for Promotion of Japanese Aerospace Technology

2007年3月

March 2007

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

キャビテーション現象の可視観察*

渡邊 光男^{*1}, 長谷川 敏^{*1}, 島垣 満^{*1}, 橋本 知之^{*1}
中村 憲明^{*2}, 永浦 克司^{*3}, 吉田 義樹^{*1}

Observation of Rotating Cavitation in Rocket Turbopump Inducers*

Mitsuo WATANABE^{*1}, Satoshi HASEGAWA^{*1}, Mitsuru SHIMAGAKI^{*1} Tomoyuki HASHIMOTO^{*1}
Noriaki NAKAMURA^{*2}, Katsuji NAGaura^{*3} and Yoshiki YOSHIDA^{*1}

Abstract

Different forms of oscillating cavitation (rotating cavitation, attached cavitation and low cycle oscillations) were very common and posed serious problem for liquid rocket engine turbopumps. In this study, visual observations of these phenomena were made using a high speed camera. The following results were obtained;

- Backward traveling rotating cavitation was identified experimentally for the first time.
- The low cycle oscillations have a relationship with rotating cavitation.
- A forward traveling rotating cavitation dissimilar to conventional rotating cavitation was found at lower cavitation number.

Keywords: Cavitation, High-speed Camera, Rocket, Turbopump Inducer

概 要

高速回転／高流量のロケット用インデューサでは、旋回キャビテーションによる過大な軸振動が問題となった。このキャビテーションによる不安定現象を解明するために、キャビテーションタンネル試験設備において実機インデューサケーシング形状を模擬した透明ケーシングと高速度カメラを用いて、インデューサに発生するキャビテーションの可視化観察を行った。この可視化において、従来から知られている定常非対称キャビテーション（回転同期）よりもキャビテーション係数が高い領域に発生する前回りモード（回転速度の1.1～1.3倍程度で旋回する）の旋回キャビテーション（回転非同期）のほか、逆回りモードの旋回キャビテーションや低周波モード、さらにキャビテーション係数の低い領域においても前回りモードの旋回キャビテーションが観察された。

1. 緒言

我が国独自の技術による大型宇宙輸送系としてH-IIロケットが自主開発され、現在H-II Aに引き継がれ実用衛星の打ち上げに運用されている。同ロケットの第一段推進系として、LE-7エンジン^{(1)～(3)}が開発され、その過程において液酸ターボポンプ^{(4)～(7)}に回転速度よりもわずかに速い（回転速度の約1.1～1.3倍）回転非同期による軸振動が増大して問題となった。回転同期、

回転非同期による過大な軸振動はインデューサ翼に不均一に発生するキャビテーションが要因であることが判明しているが、このキャビテーションに起因する振動は液水ターボポンプ（H-IIロケット8号機の事故では、旋回キャビテーションによりインデューサの疲労破壊が原因とされた）⁽⁸⁾でも問題となり、また現行のLE-7Aターボポンプにおいても課題となっている。

このキャビテーションによる不安定現象を解明するため、キャビテーションタンネル試験設備において実機

* 平成18年8月18日受付 (received 18 August 2006)

*1 総合技術研究本部 ロケットエンジン技術センター
(Rocket Engine Technology Center, Institute of Aerospace Technology)

*2 科学技術振興機構 (Japan Science and Technology Agency)

*3 航空宇宙技術振興財団 (Foundation for Promotion of Japanese Aerospace Technology)

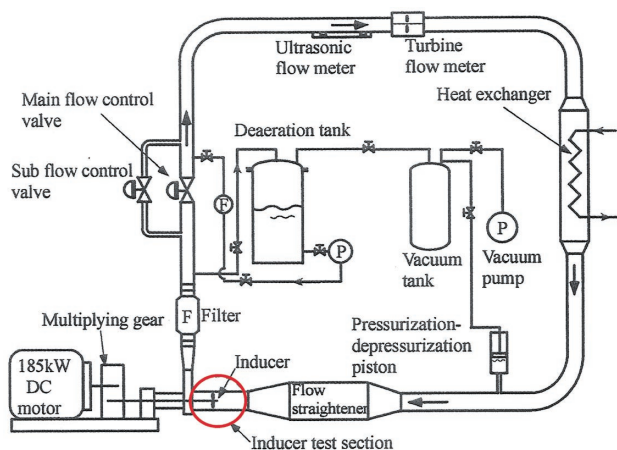


図1.1 キャビテーション試験設備

ケーシングを模擬した透明ケーシングと高速度カメラを用いて、インデューサに発生するキャビテーションの可視化観察を行った。この可視化において、従来から知られている定常非対称キャビテーションよりもキャビテーション係数が高い領域に発生する前回りモード（回転速度の1.1～1.3倍程度で回転する）の旋回キャビテーションのほか、逆回りモードの旋回キャビテーションや低周波モード、さらにキャビテーション係数の低い領域においても前回りモードの旋回キャビテーションが観察された。これらのキャビテーションに起因すると推定される振動について、可視化によりその検証を行ったので報告する。

記号の説明

N	: 定常回転数 (rpm)
Q	: 実験流量 (l/s)
Qd	: 設計流量 (l/s)
Q/Qd	: 実験流量比
σ	: キャビテーション係数 $= (P_s - P_v) / (1/2 \times \rho W_1^2)$
P_s	: インデューサ入口静圧 (Pa・G)
P_v	: 飽和蒸気圧 (Pa・G)
ρ	: 流体密度 (kg/m ³)
W_1	: インデューサ入口相対速度 (m/s)
ω	: キャビティの旋回周波数 (Hz)
Ω	: 軸の回転周波数 (Hz)
Din	: インデューサ直径 (mm)

2. 試験設備と試験方法

試験は、図1.1に示すJAXA・角田宇宙センターに設置されている、キャビテーションタンネル試験設備⁽⁹⁾を用いて行った。本設備は、脱気した純水を作動流体とする回流式水槽である。インデューサは直流モータにより

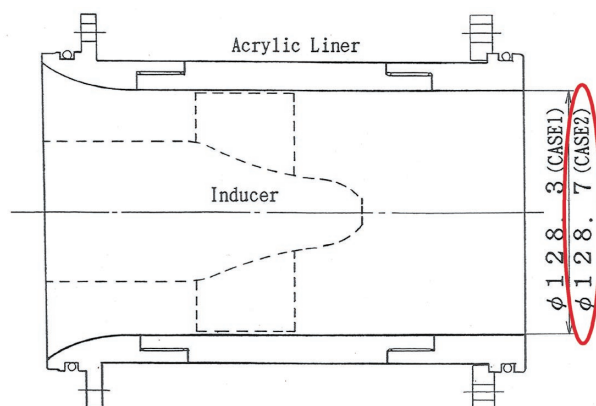


図1.2 ケーシング概略図

駆動され、上流側には任意に入口圧力を加圧・減圧設定できる圧力調整装置が設置されている。インデューサ下流には流量制御弁、超音波流量計及びタービン流量計が設置され、さらにその下流に設置された熱交換器によりタンネル内の水の温度はほぼ一定に保たれている。インデューサケーシングはアクリル製透明管とし、インデューサに発生するキャビテーションを外部より高速度カメラ及びビデオカメラで観察できる仕様とした。また、駆動軸に設置した変位計とインデューサ入口、出口に設置した変動圧力センサにより、各キャビテーション係数における変動成分を測定し、FFT解析を行うことでキャビテーション現象の発生状況を調べた。

図1.2にケーシングの概略図を示した。試験にはCASE2のケーシング（φ128.7ストレート）を使用し、このときのインデューサチップ隙間は0.65mmとなっている。インデューサの入口、出口部に設置した変動圧力センサと、軸振動を測定する軸変位計の取付け位置の概略を図1.3に示している。軸変位計は軸中央からそれぞれ左右45度の位置に2個取り付けられている。変動圧力センサはフラッシュダイアフラム型で±0.3%～±0.5% RO（非直線性）以内の精度である。変位計は、渦電流式の非接触型センサをJAXAの変位計校正装置で校正して使用しており、±0.1% F.S（直線性）以内の精度となっている。

この変位計校正装置は、筆者らの長年のターボポンプ研究・開発の経験を生かした特注品（ダイナックス（株）製）であり、常温及び低温（液体窒素）において校正することが出来る。図1.4に装置外観を示す。

図1.5にキャビテーションタンネルの高速度撮影風景を示す。高速度カメラによる可視観察には、16mmフィルム用E-10（（株）ナック製）を用い、7,000コマ/秒で撮影した。光源には6kwの連続光源を、画像解析装置には16mmフィルム用フィルムモーションアナライザを用いた。図2.1に試験に用いた研究用3枚羽根インデュー

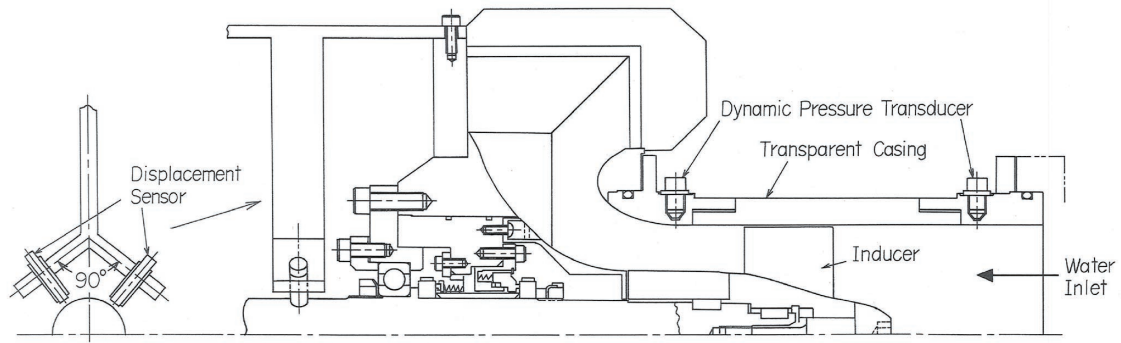


図1.3 変動圧力センサと軸変位計の取付け位置

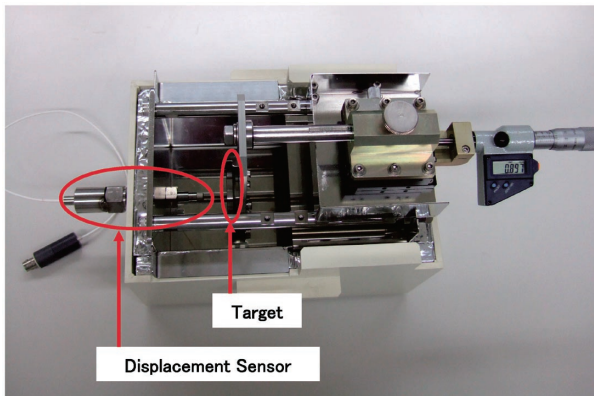


図1.4 変位計校正装置

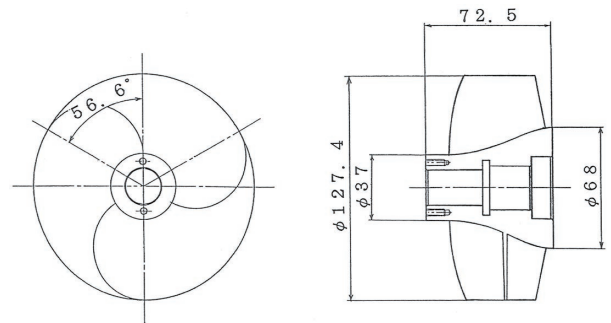


図2.1 3枚羽根インデューサ概略図

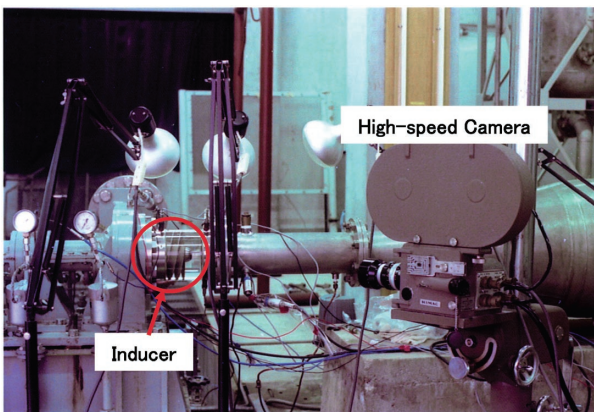


図1.5 キャビテーションタンネル高速度撮影風景

ーサの概略図を示し、図2.2にはインデューサの外観写真を示した。表1にはその主要設計諸元を示す。

試験方法は、各回転数（ $N=7,000\text{rpm} \sim 10,000\text{rpm}$ ）、流量比（ $Q/Q_d=0.8 \sim 1.2$ ）をパラメータとし、インデューサ入口圧力を徐々に低下（ $390\text{KPa} \cdot G \sim 70\text{KPa} \cdot G$ ）させた吸込性能試験を行い、キャビテーション係数を低下させることにより生じる不安定現象の発生領域を捉えた。

3. 試験結果

3.1 キャビテーションによる不安定現象の発生域

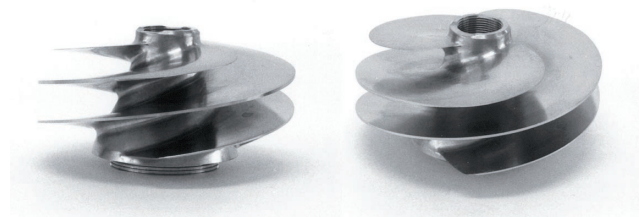


図2.2 3枚羽根インデューサ外観

表1 インデューサ主要設計諸元

Inlet flow coefficient	0.0775
Outlet flow coefficient	0.094
Inlet tip diameter, mm	127.4
Inlet hub ratio	0.3
Outlet tip diameter, mm	127.4
Outlet hub ratio	0.5
Inlet tip blade angle, deg	7.25
Outlet tip blade angle, deg	9.25
Tip solidity	2.7
Leading-edge sweep	sweptback

旋回キャビテーションに代表されるキャビテーションに起因する不安定現象^{(5) (6)}は、軸系の振動を増加させ、インデューサ翼の疲労破壊や軸受荷重の増大による軸受け温度の上昇などを引き起こし、多大な影響を与えている。図3は回転数を一定（ $N=7,000\text{rpm}$ ）とし、流量比（ Q/Q_d ）とキャビテーション係数（ σ ）をパラ

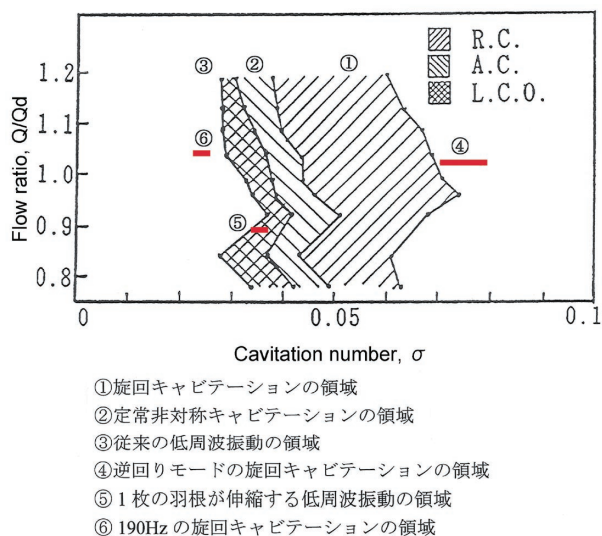


図3 キャビテーションの発生領域

メータにして、キャビテーションによる不安定現象の発生した領域を示す。ケーシングは現象解明のために、エンジンの作動範囲において旋回キャビテーションが発生した形状のもので、現在の旋回キャビテーション抑制型のケーシングとは異なっている。

①～⑤は $N=7,000\text{rpm}$ 、⑥は $N=10,000\text{rpm}$ の試験である。キャビテーションは回転数には影響されず、キャビテーション係数 σ にのみ依存することから、同一図上に示している。この図からキャビテーション係数のある領域では、流量比 $Q/Q_d=0.8\sim 1.2$ の全ての流量条件下で旋回キャビテーション($\omega/\Omega=1.1\sim 1.3$)①と共に、キャビティの伸縮がなく定常的に2枚の羽根で長く、1枚の羽根が短い定常非対称キャビテーション(羽根に固着したキャビテーション)②の発生することが確認された。この定常非対称キャビテーションは、旋回速度比(キャビティの旋回周波数/軸の回転周波数) $\omega/\Omega=1.0$ の

回転同期の旋回キャビテーションと考えられている。

さらにキャビテーション係数 σ が低下すると、定常非対称キャビテーション②の領域を抜け、サージを伴う低周波振動(周波数 10Hz ($\omega/\Omega=0.1$)程度)③の領域に移ることを示している。この③の領域では、低流領域 $Q/Q_d=0.9$ に3枚の羽根の内、2枚の羽根上のキャビテーションはあまり変化せず、1枚の羽根上に発生するキャビテーションが伸縮する低周波振動($\omega/\Omega=0.1$)⑤が観察された。

これまで確認されている前回りモードの旋回キャビテーションとは異なり、低周波振動の領域よりキャビテーション係数 σ が更に低い領域で発生する、旋回キャビテーション($\omega/\Omega=1.14$)⑥も観察された。また新たに狭い領域ではあるが、キャビテーション係数 σ が高い、設計流量付近に逆回りのモードの旋回キャビテーション($\omega/\Omega=1.4$)④が観察された。

本報告では、インデューサに発生するこれらのキャビテーション現象の内、これまでに明らかにされていない④、⑤、⑥の現象について、個々に高速度カメラにより可視化解析を行った。

3.2 逆回りモードの旋回キャビテーションの観察

図4に逆回りモードの旋回キャビテーションが観察された試験における、インデューサ入口変動圧力のFFT解析結果を示す。ここで σ が 0.084 から 0.072 にかけて現れている、 $\omega_{c1}:159\text{Hz}$ ($\omega/\Omega=1.4$)の振動が逆回りモードの旋回キャビテーションによる振動(図3の④)である。この逆回りモードは設計流量附近の僅かな領域に現れる現象である。また、 $\sigma=0.072\sim 0.044$ にかけて現れている $\omega_{c2}:138\text{Hz}$ ($\omega/\Omega=1.2$)の振動は前回りモードの旋回キャビテーション(図3の①)であり、さらに σ の低下と共に現れる $\omega_s:117\text{Hz}$ ($\omega/\Omega=1.0$)の振動が回転同期の定常非対称キャビテーション(図3の②)

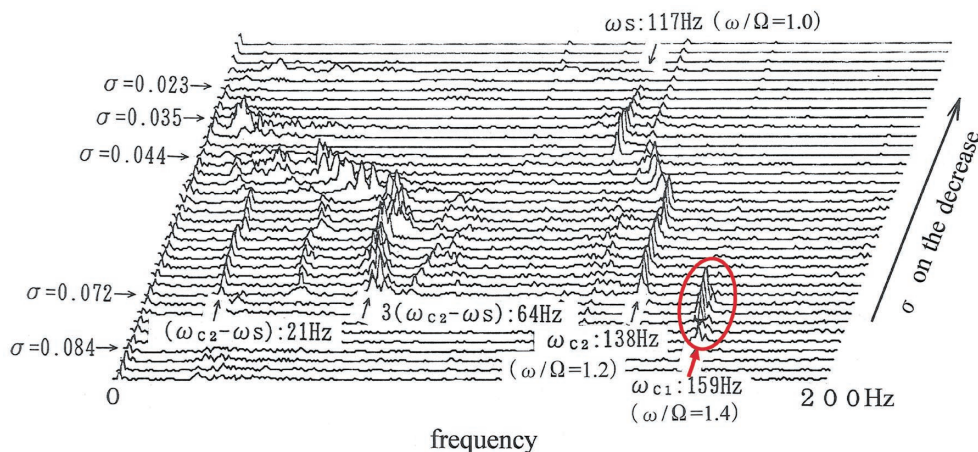


図4 インデューサ入口変動圧の周波数解析(逆回りモードの旋回キャビテーション)

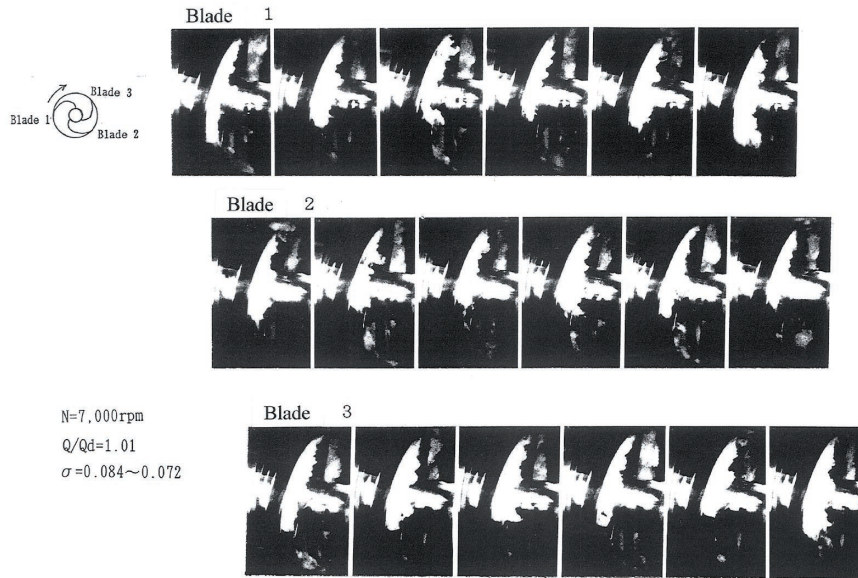


図5 3枚羽根の高速度撮影画像

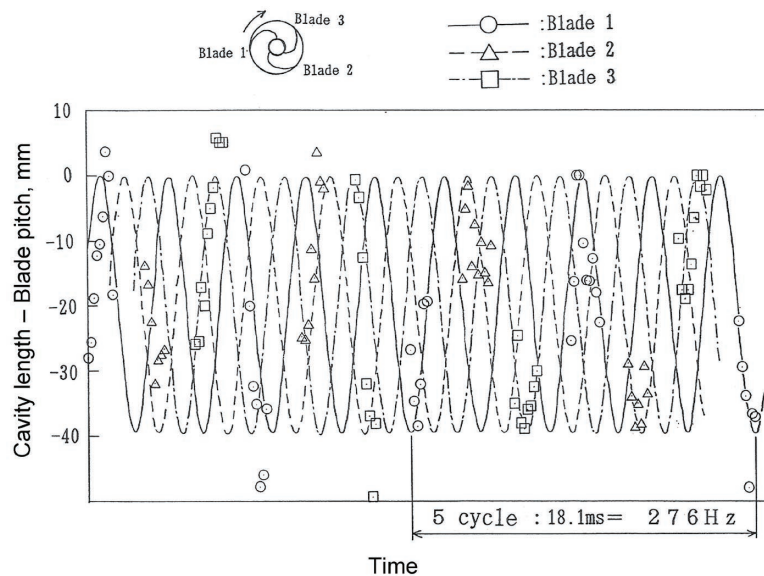


図6 3枚の羽根に発生したキャビティの画像解析

である。図はインデューサの吸込性能を取得するための試験結果を示しており、時間の経過と共に（図中の上部に向かい）キャビテーション係数 σ は徐々に小さくなっている。

図5は逆回りモードの旋回キャビテーションを高速度カメラで捉えた画像である。図6は図5の画像のそれぞれ3枚の羽根のキャビティ長さを時間軸に示した。解析ではキャビティの消滅する部分が必ずしも明確でない写真が含まれるため、若干の誤差が含まれている。しかしながら、求められた羽根1枚毎のキャビティの伸縮の周波数は276Hz ($\omega/\Omega=2.4$) と、逆回りモードを仮定した場合の旋回キャビテーションのセルと翼回転の

速度の相対速度に相当する周波数 ($\omega_{cl} + \omega_s$) と良く一致した。更にキャビティの伸縮は羽根番号1→2→3→1の順番で移行しているのが確認でき、キャビティが羽根の回転方向と逆方向に旋回していることを示している。従って、二つの画像解析結果から、逆回りモードの旋回キャビテーション現象が実験的に確認されたものと考ええる。

3.3 キャビテーションによる低周波振動の観察

図7にインデューサ出口の変動圧力をFFT解析した結果を示す。旋回キャビテーション（図3の①，②，④，⑥）とは異なるおよそ11Hz ($\omega/\Omega=0.1$) の低周波の振

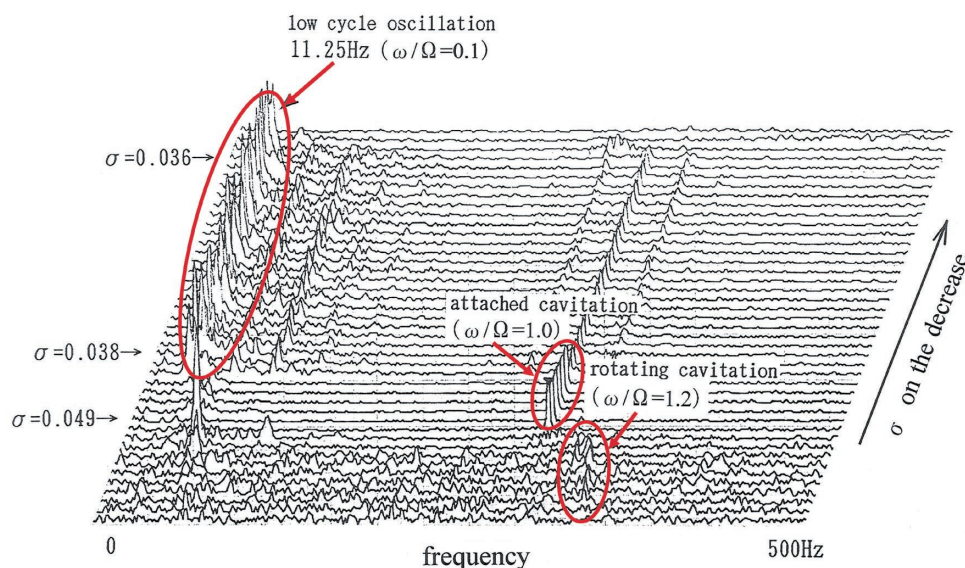


図7 インデューサ出口変動圧の周波数解析（低周波振動）

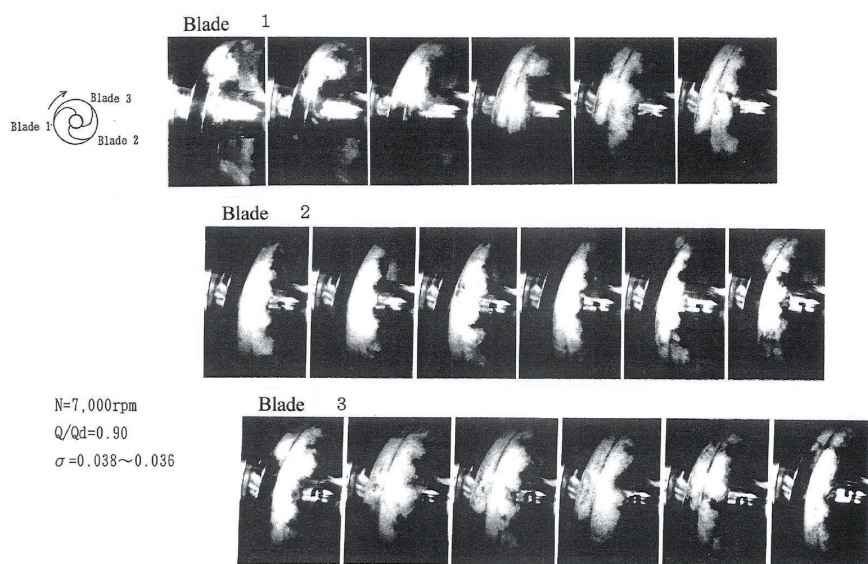


図8 3枚羽根の高速度撮影画像

動（図3の⑤）がインデューサ出口変動圧力にあらわれた。流量比は $Q/Q_d = 0.9$ で設計流量よりかなり低い状態にある。解析結果から、キャビテーション係数（ $\sigma = 0.038 \sim 0.036$ ）の低い領域において大きな振幅を伴った振動であることが読みとれる。図8はこの低周波振動の様子を高速度カメラで撮影した画像である。従来知られている低周波振動（キャビテーションサージ）は、吸込性能曲線の負の勾配を持つ近傍で生じ系全体を不安定にする。上條ら⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾は、その3枚の羽根上のキャビティが同位相で伸縮を繰り返す現象であることを示し、キャビテーションに誘発されたシステム振動であると結論している。この低周波振動もまた発生範囲（ $\sigma = 0.038 \sim 0.036$ ）では文献（9）に示されるように、局所的に右

上がりの勾配が存在し得ることを示している。したがってこの場合もサージに起因する流量変動が起こっているものと推察される。

しかし画像解析の結果では、2枚の羽根上に生じている長いキャビティはほとんど変化せず、1枚の羽根上のキャビティだけが伸縮しているのが確認された。またインデューサ入口側の変動圧力にその成分は現れていないことから、従来のキャビテーションサージとは異なる現象と考えられる。図9は伸縮のみられる1枚の羽根上に生じたキャビティのみを解析して示した。出口変動圧力のFFT解析結果と、この画像解析から求めた振動周波数は良く一致する結果が得られた。

この11Hz（ $\omega/\Omega = 0.1$ ）の低周波振動は、ターボポン

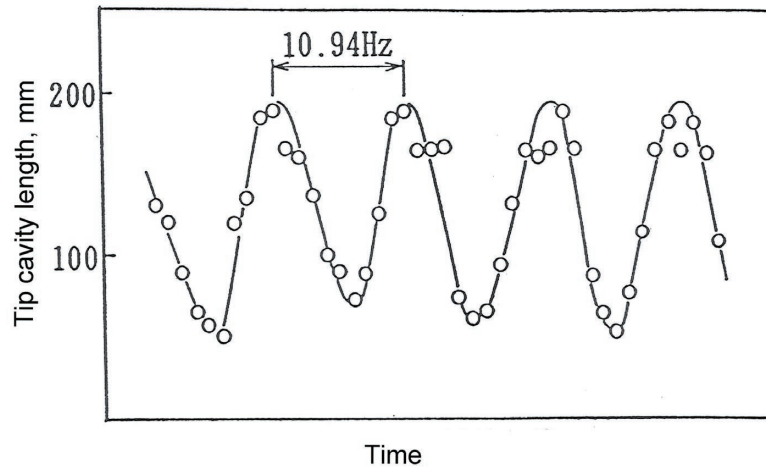


図9 1枚の羽根に発生したキャビティの画像解析

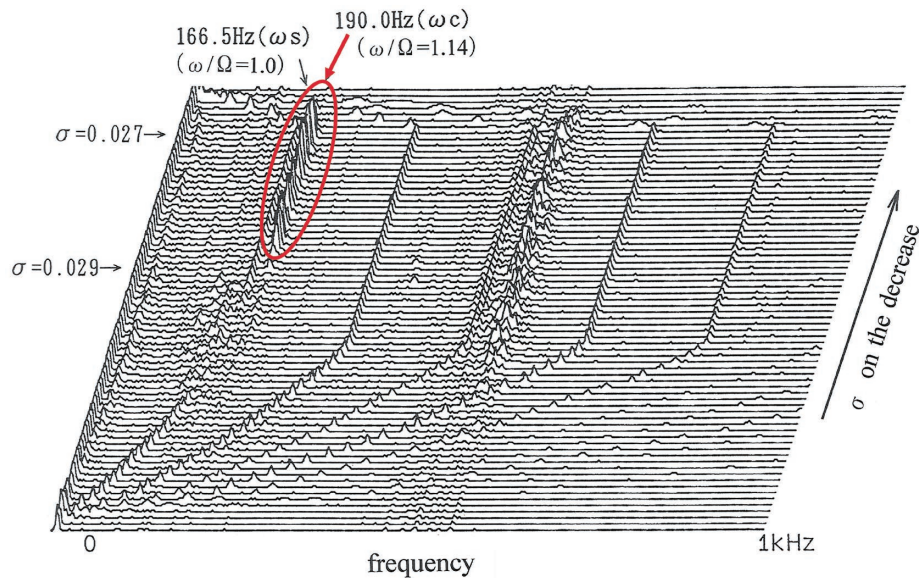


図10 インデューサ軸振動の周波数解析 (190Hzの旋回キャビテーション)

プの運転範囲において旋回キャビテーションが発生する初期型のケーシングのみで発生し、旋回キャビテーションの発生領域を高流量側（流量比 $Q/Q_d=1.1$ 以上）に遷移させた改良型ケーシングではこの振動は全く観られなかった。

これらの結果をふまれば、この低周波振動は定常非対称キャビテーションに生じる短いキャビティの伸縮が引き起こした、キャビテーション振動であると考えることができる。また、キャビテーション係数 σ の低下と共に、旋回キャビテーション（ $\omega/\Omega=1.2$ ）→定常非対称キャビテーション（ $\omega/\Omega=1.0$ ）→低周波振動（ $\omega/\Omega=0.1$ ）の順に発生過程をたどっており、この振動もまた旋回キャビテーションの延長上にある不安定現象と考えることができる。

3.4 低 σ の旋回キャビテーションの観察

図10は軸振動に発生した、190Hz（ $\omega/\Omega=1.14$ ）の振動（図3の⑥）についてのFFT解析結果を示す。回転数 $N=10,000\text{rpm}$ 、インデューサ流量は設計値より若干高い $Q/Q_d=1.04$ である。166.5Hz（ $\omega/\Omega=1.0$ ）の振動（ ω_s ）は回転同期成分である。この $\sigma=0.029\sim0.027$ にかけて現れている190Hz（ $\omega/\Omega=1.14$ ）の振動（ ω_c ）は定常非対称キャビテーションの領域（図3の②）よりも低いキャビテーション係数の領域で観察されたことから、従来より知られている旋回キャビテーション（図3の①）とは異なる現象ではないかと考えられる。

図11はこの振動が発生している領域のキャビテーションの変化を高速度カメラで撮影した画像である。図12は前回りモードであると仮定し、キャビティの旋回方向を決定するために図11の画像解析を行い、190Hz（ ω

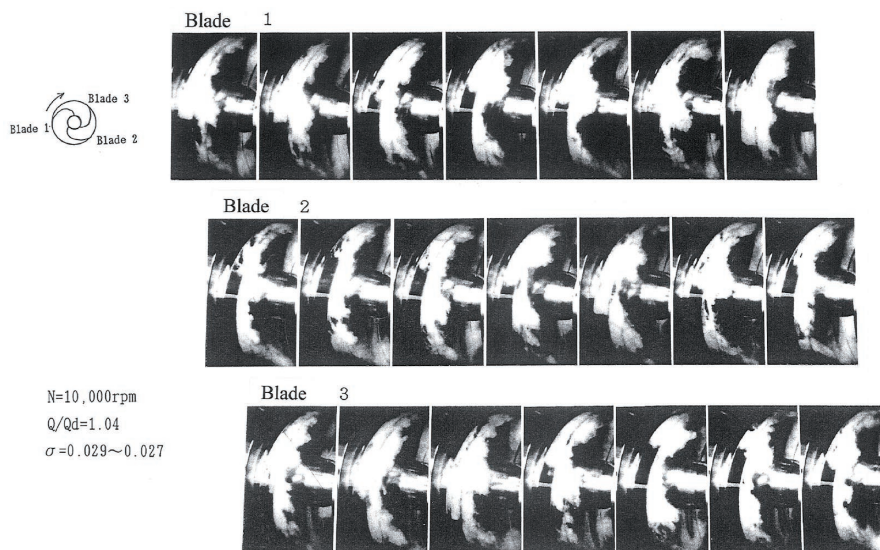


図11 3枚羽根の高速度撮影画像

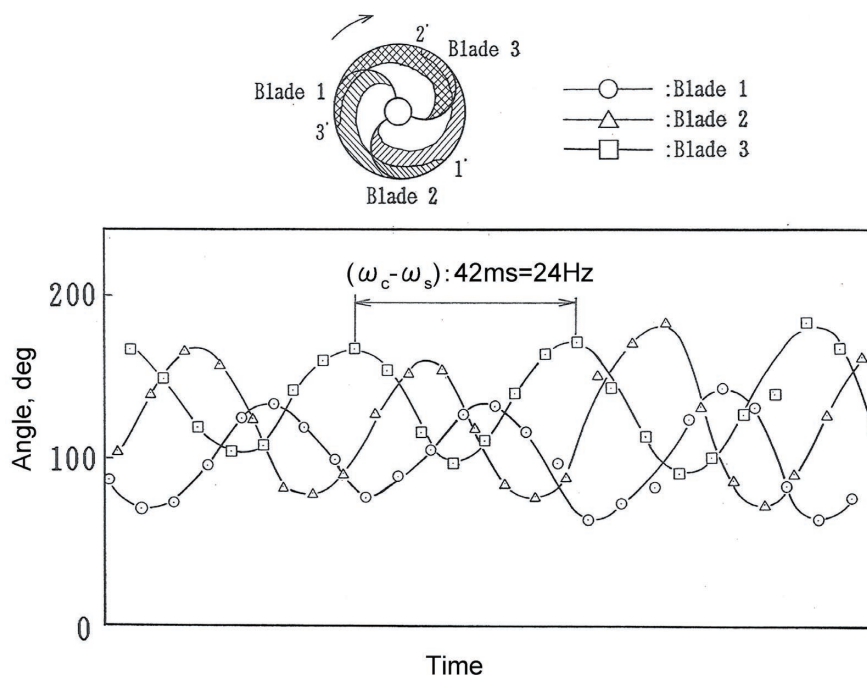


図12 3枚の羽根に発生したキャビティの画像解析

$\omega/\Omega=1.14$ ($\omega/\Omega=0.1$) の振動が発生しているときのキャビティ長さを時間軸に示したものである。この解析では、3枚の羽根上に生じているキャビティの長さが全て半周を超えて次の羽根のキャビティと重なるため、1枚毎の羽根上から生じているキャビティを測定することは困難であった。そこで、3枚目の羽根のキャビティの消滅点から1の羽根のキャビティの消滅点を差し引いた $3'-1'$ の長さ（角度）を1とし、 $1'-2'$ を2、 $2'-3'$ を3のキャビティとして表した。画像解析から得られた羽根1枚毎のキャビティ長さの伸縮している周波数 ($\omega_c - \omega_s$)

24Hzは、FFT解析結果と良く一致する結果が得られた。また、キャビティの伸縮は羽根番号1→3→2→1の順番で移行しており、この現象は前回りモードの巡回キャビテーションであることが確認された。

4. おわりに

可視化観察により、次の結論を得た。

- ①理論的に存在が指摘されていた、逆回りモードの巡回キャビテーションによる振動が確認された。高速度撮影の画像解析の結果、羽根の回転方向と逆方向にキャ

ビティの伸縮を伴って旋回する現象であることが判明した。

- ②ここに示した低周波振動も、定常非対称キャビテーション同様に旋回キャビテーションにより誘発された不安定現象であるものと考えられる。
- ③従来より知られていた定常非対称キャビテーションよりもキャビテーション係数の高い領域に発生する前回りモードの旋回キャビテーションの他、キャビテーション係数が低い領域にも前回りモードの旋回キャビテーションが発生しうることが確認された。

5. 参考文献

- (1) Kanmuri,A.,et.al.; Start Transient Analysis of LOX/LH2 Rocket Engine(LE-7), Proceedings of 16th ISTS, 1988.
- (2) 上條謙二郎他1名.; LE-7液酸ポンプインデューサの試作研究, 日本機械学会論文集, 57-544B, 1991.
- (3) Kamijo, K., et.al.; Hydraulic and Mechanical Performance of LE-7 LOX Pump Inducer, AIAA Journal of Propulsion and Power, Vol9, No.6, 1993.
- (4) Tsujimoto, Y., et.al.; A Theoretical Analysis of Rotating Cavitation in Inducer, ASME Journal of Fluids Engineering, Vol.115, No.1, 1993.
- (5) 吉田 誠他3名.; LE-7液酸ターボポンプの回転非同振動, 日本機械学会流体工学部門講演会, 1994.
- (6) 橋本知之他3名.; ロケットターボポンプインデューサに発生するキャビテーションによる不安定現象, 日本機械学会論文集, 63-607B, 1997.
- (7) 渡邊光男他6名.; ロケットポンプ用インデューサのキャビテーション振動について, 第49回宇宙科学技術連合講演会, 2005.
- (8) 今野 彰他1名.; LE-7エンジンターボポンプと8号失敗の原因. ターボ機械. Vol.29, No.3, 2001.
- (9) 渡邊光男他4名.; ロケット用ターボポンプのインデューサに発生する旋回キャビテーションの観察(その1) ケーシング形状による影響, 日本機械学会第73期全国大会, 1995.
- (10) Kamijo, K., et.al.; A Visual Observation of Cavitating Inducer Instability, NAL TR-959T, 1980.
- (11) Kamijo, K., et.al.; An Experimental Investigation of Cavitating Inducer Instability, ASME Paper, 77-WA/FE-14, 1977.

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-06-035

発行 平成19年3月30日

編集・発行 宇宙航空研究開発機構

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1

URL: <http://www.jaxa.jp/>

印刷・製本 株式会社 実業公報社

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記にお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター

〒305-8505 茨城県つくば市千現2-1-1

TEL : 029-868-2079 FAX : 029-868-2956

©2007 宇宙航空研究開発機構

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等加工することを禁じます。

