

# 航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1382

ロケットポンプ用インデューサに発生する  
キャビテーションの観察  
(その2 逆回り旋回キャビテーション)

長谷川 敏・渡邊 光男・橋本 知之  
渡辺 義明・山田 仁

1999年3月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

## 目 次

1 . はじめに .....	2
2 . 試験装置と試験方法 .....	2
2 . 1 供試インデューサ .....	2
2 . 2 試験装置 .....	2
2 . 3 試験方法 .....	3
3 . 試験結果 .....	4
3 . 1 軸変位の位相差解析 .....	5
3 . 2 干渉成分の分析 .....	7
3 . 3 高速度カメラによる画像解析 .....	7
4 . むすび .....	9
5 . 参考文献 .....	9

# ロケットポンプ用インデューサに発生する キャビテーションの観察\*

## (その2 逆回り旋回キャビテーション)

長谷川 敏\*<sup>1</sup> 渡邊 光男\*<sup>1</sup> 橋本 知之\*<sup>1</sup>  
渡辺 義明\*<sup>1</sup> 山田 仁\*<sup>1</sup>

### Observation of the Cavitation in Rocket Turbopump Inducer. 2nd Report Backward-Travelling Rotating Cavitation.

Satoshi HASEGAWA Mitsuo WATANABE Tomoyuki HASHIMOTO  
Yoshiaki WATANABE Hitoshi YAMADA

#### ABSTRACT

During the development of a liquid oxygen turbopump for the LE-7 engine of the H-II rocket, super synchronous vibrations (1.0 ~ 1.3w) in the inducer were frequently observed. From research on the vibration performance of the inducer, it was concluded that shaft vibrations of this type were caused by rotating cavitation in the inducer, and it was also demonstrated that a moderately increased diameter of the pump inlet was most effective in suppressing these shaft vibrations. In the light of previous theoretical analysis, it was predicted that rotating cavitation had two unstable modes, a forward rotating cavitation and a backward rotating cavitation, which had not hitherto been observed in experiments. In the suction performance test of the inducer using the cavitation tunnel, a shaft vibration of higher frequency than the forward rotating cavitation were observed. From a study using a high-speed photograph analyzer and the spectrum analysis of the shaft vibration, it was concluded that the vibration was caused by the backward rotating cavitation. This paper provides details on the occurrence of backward rotating cavitation in the inducer and its performance.

**Key words:** Rocket, H-II, Turbopump, Inducer, Rotating Cavitation

#### 概 要

我が国のLE-7エンジン用液酸ターボポンプの開発時に液体酸素ターボポンプの回転非同期振動と旋回キャビテーションとの間に密接な関係があることが見いだされた。この旋回キャビテーションに伴う回転非同期振動はインデューサライナの設計変更により抑制が可能となった。これに伴って旋回キャビテーションの理論的な取り扱いも可能となった。また、各国の高性能ロケット用ターボポンプにおいても旋回キャビテーション現象が報告

\* 受付け 平成10年5月7日受付 (received 7 may 1998)

\* 1 角田宇宙推進技術研究センターロケット推進研究部 (Kakuda Research Center, Rocket Propulsion Research Division)

され、旋回キャピテーションはロケット用ターボポンプのインデューサに共通の問題であることが明らかとなった。この旋回キャピテーションに関してキャピテーションタンネルを用いた試験を実施してきた中で、理論的に存在が指摘されていた羽根車の回転の逆回りモードと考えられる旋回キャピテーションによる振動が観察された。この現象は高速度カメラの画像解析および軸振動などの解析により、逆回りモードであることが確認された。本研究は、この逆回りモードの旋回キャピテーションの発生の確認およびその挙動について述べるものである。

## 1. はじめに

ロケットポンプのインデューサに発生する旋回キャピテーションはLE-7エンジン用液体酸素ターボポンプの開発において初めて問題とされた。この現象は液体酸素ターボポンプの回転非同期振動として現れ、前報にその特性を詳細に述べた。その後LE-7液体水素ターボポンプや各国の高性能ロケット用ターボポンプにおいても次々に同様の現象が確認され、旋回キャピテーションはロケットポンプのインデューサに共通する問題であることが改めて明らかになった。この旋回キャピテーションについては辻本らにより理論解析が行われ、旋回キャピテーションは、流量の減少に伴いキャピティ体積が減少する性質が原因で起こることが示された。このインデューサの不安定性に関する理論解析は、実験的に確認されている軸の回転方向に軸よりも早い旋回速度（軸回転速度の1.0～1.3倍程度）で旋回する前回りモードの旋回キャピテーションの特徴をよく表している。しかし、この解析結果によれば前回りモードのほかに、軸の回転方向と逆方向に旋回する逆回りモードが存在する可能性があること、また前回りモードよりも逆回りモードのほうが現象として現れる領域が広いことが示されている。しかし、理論的に現象が現れやすいにもかかわらず、筆者らの知る限りではまだ逆回りモードの旋回キャピテーションが確認されたという報告は見られない。辻本らは一つの可能性として、解析モデルにキャピティ伸縮の時間遅れを考慮した場合、逆回りモードより前回りモードが起こりやすくなることを示している。筆者らは、前回りモードの旋回キャピテーションに関する観察を行ってきた中で、逆回りモードの旋回キャピテーションと思われる軸振動を観察した。高速度カメラのフィルム画像からキャピティ長さの伸縮を解析し、この振動が逆回り旋回キャピテーションによるものであることが確認されたので、前回りモードの場合と対比させながら逆回りモードの旋回キャピテーションの観察結果について報告する。

## 2. 試験装置と試験方法

### 2.1 供試インデューサ

本試験に用いた3枚羽根のインデューサは、LE-7液酸

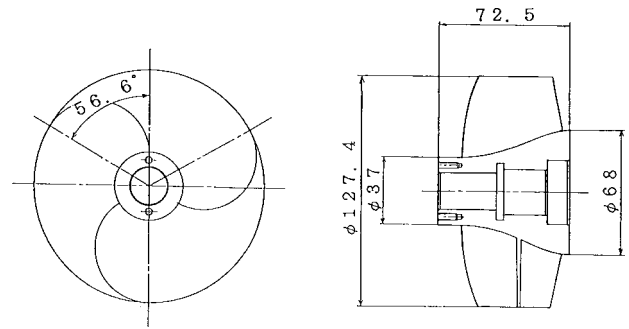


図1 3枚羽インデューサ

表1 インデューサの主要設計諸元

入口流量係数	0.0775
出口流量係数	0.094
入口チップ係	: (mm) 127.4
入口ボス比	0.3
出口チップ係	: (mm) 127.4
出口ボス比	0.5
入口チップ角度（翼先端）: (度)	7.25
出口チップ角度（翼先端）: (度)	9.25
チップソリディティ	2.7
後退翼巻角度	: (度) 56.6

ターボポンプインデューサの開発基礎試験用として製作されたものである。試験はキャピテーションタンネルを用いたため設備の制約上、インデューサの実機の外径149.7 mmから127.4 mmにスケールダウンしている。従って外径、ハブ径は異なるがその他の設計諸元は実機ターボポンプインデューサとほぼ同一仕様となっている。インデューサは耐熱鋼(A-286製)を機械加工したものである。インデューサの概略形状を図1に、主要設計諸元を表1に示した。

### 2.2 試験装置

試験は図2に試験設備概略図を、図3に試験部概要を示す、航技研・角田宇宙推進技術研究センターに設置されているキャピテーションタンネル試験設備を用いて行った。この設備は作動流体に水を用いる閉ループの回流水槽である。水は中央に設置された脱気タンクにより

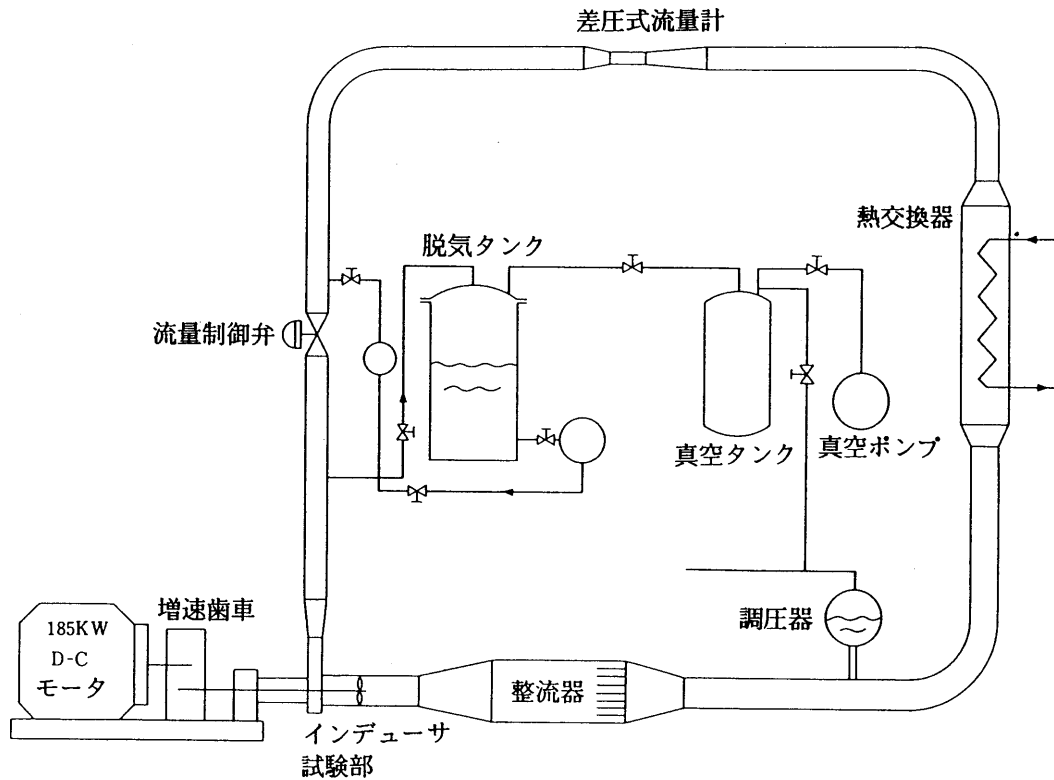


図2 キャピテーショントンネル試験装置

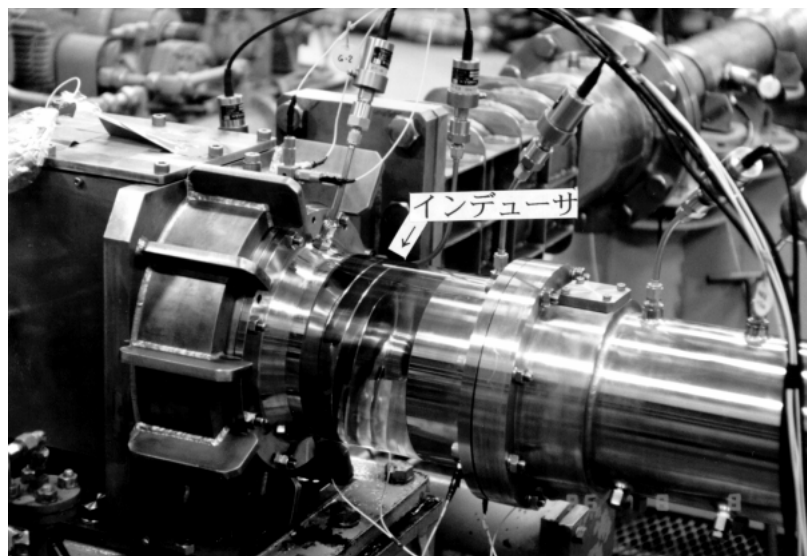


図3 インデューサ試験部

十分に脱気された後、水槽内に供給される。供試インデューサは直流電気モータによって駆動され、供試部上流のシリンダピストンを併設した圧力調整装置により加圧，減圧を行うことで入口圧力を任意に設定できる。供試部の下流にはインデューサ流量を任意に設定できる流量制御弁があり，設定された流量はベンチュリー流量計により計測される。また本設備には熱交換器があり，試験中の作動流体の温度はほぼ一定に保たれる。

### 2.3 試験方法

試験は7,000 rpmにて行われた。まず，回転数，流量を一定に保ち，入口圧力を徐々に低下させることによってキャピテーション係数を変化させ，インデューサ入口圧力，出口圧力，流量，回転数，温度などのデータを取得した。これらの計測出力はA/D変換器によってデジタル量に変換され，解析装置のメモリーに保存される。また図4，図5に示すようにインデューサ入口より約20

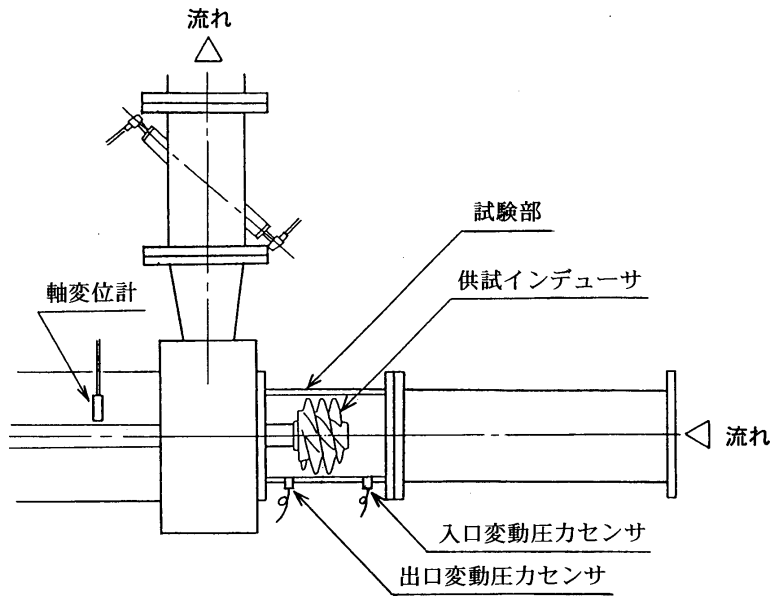


図4 センサの設備取付位置

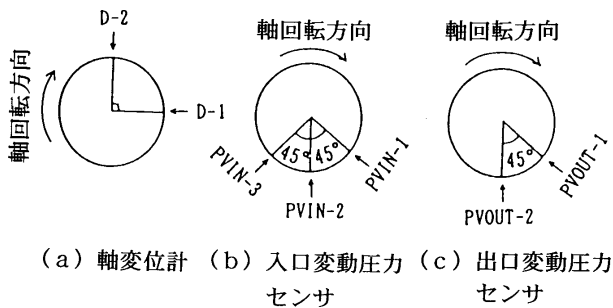


図5 センサ取付位置

mm上流に位相を45°ずつずらして3箇所と、インデューサ出口より15mm下流に位相を45°ずらして2箇所にフラッシュマウントされた振動圧力センサにより、インデューサ入口、出口の圧力変動を測定した。また、軸受

後方に位相を90°ずらして2箇所に設置された渦電流式の変位センサにより、軸振動を測定した。これらのデータはFMデータレコーダに記録され試験後にFFTアナライザによって周波数解析された。また試験中、回転数測定用の電磁ピックアップからのパルス信号により、ストロボを回転数に同期させてインデューサの回転を見掛け上静止させ、キャビティ形状の変化をモニタ監視した。

高速度カメラによる撮影は、上記の試験の結果を参考に流量、入口圧力を設定して行った。高速度撮影には連続光源を用い、100ftの16mmフィルムで毎秒約7,000コマで撮影を行った。

3. 試験結果

図6に逆回りモードの巡回キャビテーションが観察さ

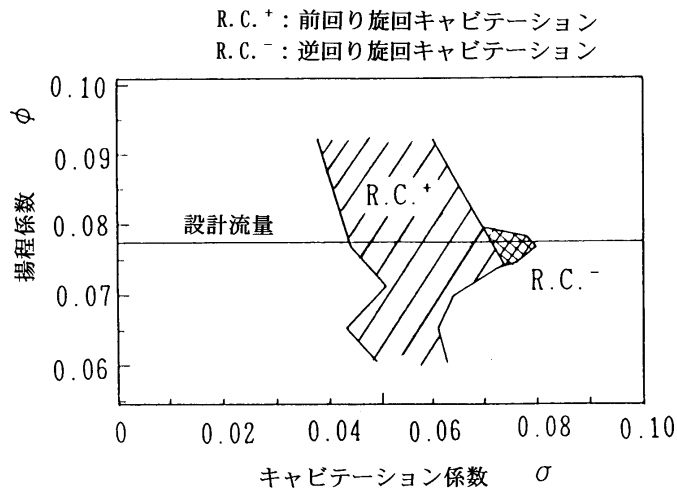


図6 逆回りモード巡回キャビテーションの発生領域

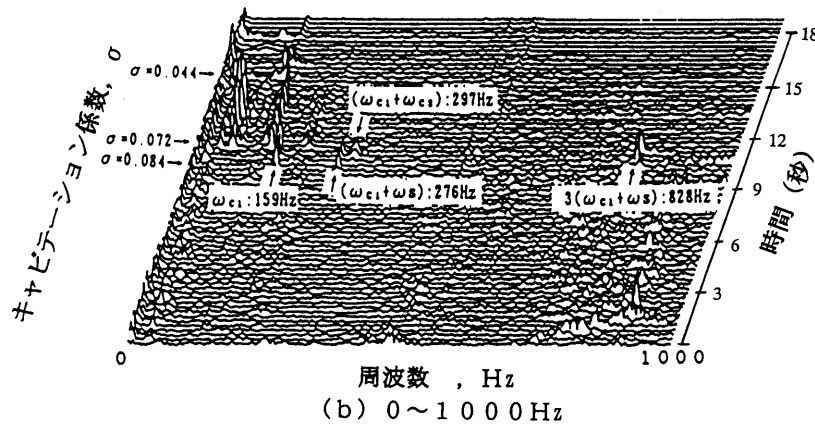
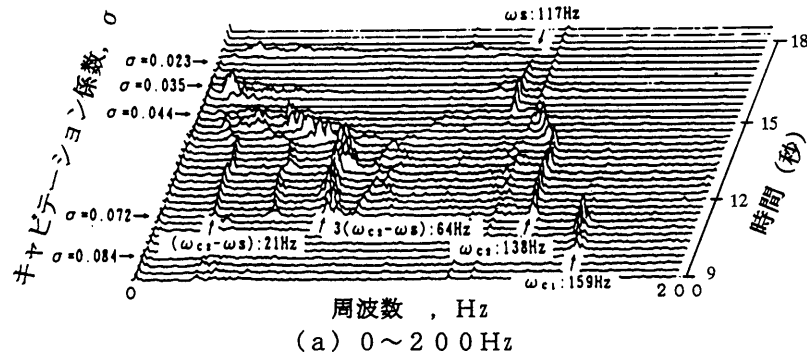


図7 入口圧振動周波数解析結果

表2 旋回キャピテーションの発生域

キャピテーション係数 (s)	周波数 (Hz)	旋回キャピテーションモード
0.084 ~ 0.072	159	逆回り
0.072 ~ 0.044	138	前回り

N = 7,000 rpm, 回転同期  $\omega_s = 117$  Hz

れた領域を、図7に代表的な試験での入口圧力変動についてのFFT解析結果を示す。図7(a)は周波数0~200 Hzまでの解析結果を示し、図7(b)は0~1,000 Hzまでの解析結果を示したものである。ともに試験時間の経過とともにキャピテーション係数  $s$  は減少している。表2に旋回キャピテーションの発生する領域を周波数別に示した。ここで、図7(a)の  $s$  が0.084から0.072にかけて現れている、159 Hzの変動成分が逆回りモードの旋回キャピテーションによる圧力変動  $\omega_{c1}$  である。また、 $s$  が0.072から0.044にかけて現れている、138 Hzから回転同期成分 ( $\omega_s$ : 117 Hz) に  $s$  の低下とともに接近している変動成分は、前回りモードの旋回キャピテーションによる  $\omega_{c2}$  である。この二つの変動成分については、軸振動の位相差解析、入口圧力変動のFFT解析による干渉成分、および高速度カメラ撮影画像からのキャピティ長さ変動の解析によって各々が逆回りモードおよび前回りモードの

旋回キャピテーションによるものであることが確認された。以下、両者を対比させながら観察結果を報告する。

### 3.1 軸変位の位相差解析

軸振動は軸の回転方向に位相をずらして設置された二つの変位センサによって観察された。従ってこの二つのセンサ間の振動の位相差を解析することによってその振動の伝播していく方向を決定することが可能である。センサは図5(a)に示すようにD-1センサはD-2センサに対し軸の回転方向に90°位相をずらして設置されている。したがって、軸の回転方向に進んでいる振動に対してはD-1センサを基準にD-2センサでは90°位相が進むことが、軸回転と逆に進んでいる軸振動に対しては逆に90°位相遅れることが予想される。そこで、逆回りモードと考えられる159 Hzの振動と前回りモードと考えられる138 Hzの振動に対して、D-1センサを基準としてD-2センサの位相差をFFT解析により求めた。図8に軸変位計D-1センサに対するD-2センサの位相差を解析した結果を示す。位相差の(-)側は遅れていることを意味し、(+)側は進んでいることを示している。その結果、159 Hzの振動に対してD-2センサでは69.9°位相が遅れていることが、138 Hzの振動に対しては逆に70.3°位相が進んでいることが示された。これらの絶対値

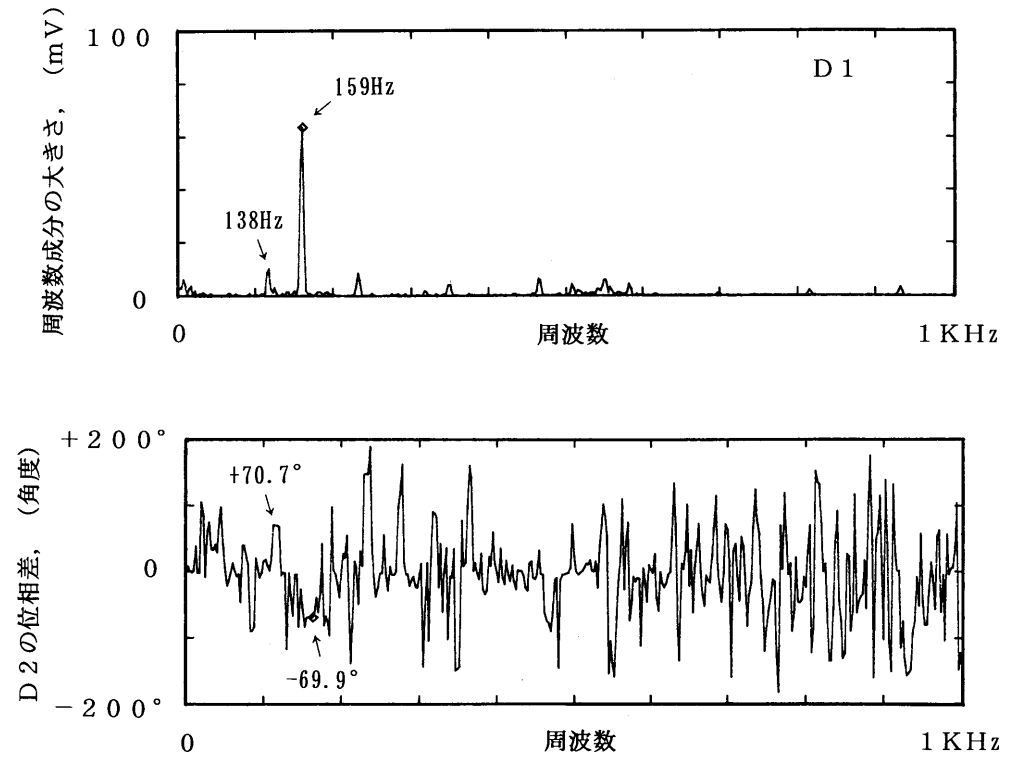


図8 軸変位計の位相差

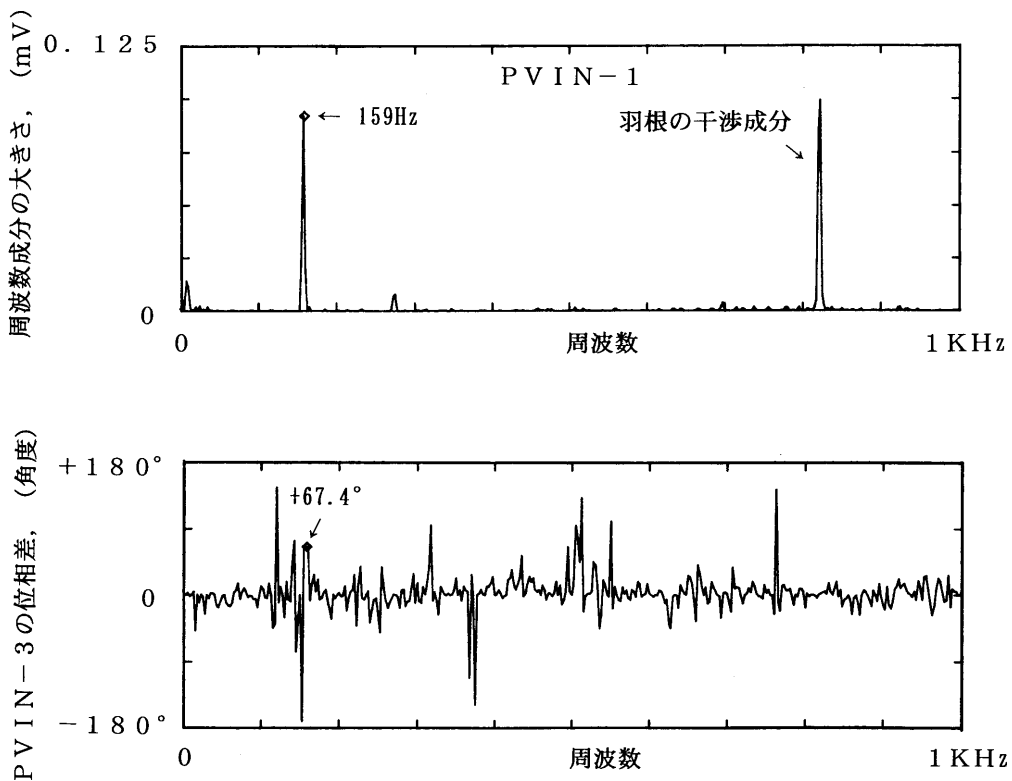


図9 入口変動圧の位相差

にはノイズの影響と思われる誤差が含まれ、理論値の $90^\circ$ より小さい値を示しているものの、符号から考えれば、 $159\text{ Hz}$ の振動は回転方向と逆方向に伝播している現象で

あり、また $138\text{ Hz}$ の振動は軸の回転方向と同じ方向に伝播している現象であることを示している。また図9に入口変動圧力PVIN-1に対し回転方向に $90^\circ$ 進んだ位置に



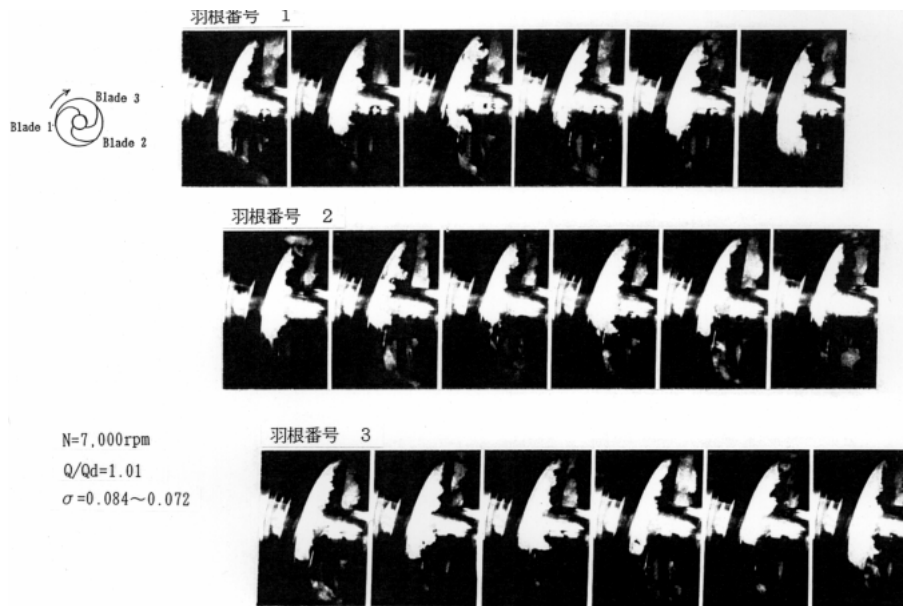


図10 逆回りモードの旋回キャピテーションの変化

ある PVIN - 3 の位相差解析結果を示す。解析結果は PVIN - 3 が PVIN - 1 に対し  $67.4^\circ$  位相が進んでいることを意味し、図 8 の軸振動の位相差解析結果と同様に 159 Hz の振動は羽根の回転方向と逆方向に旋回する現象であると推定される。

### 3.2 干渉成分の分析

前回りモードの旋回キャピテーションが発生したときに、旋回キャピテーションによる変動成分のほかに、さまざまな干渉による変動成分が観察されることが明らかになっている。たとえば、図 7 ( a ) で前回りの旋回キャピテーション ( 138 Hz ) が観察されたときに、同時に 21 Hz や 64 Hz の変動成分が観察されている。この成分は旋回キャピテーションの周波数  $w_{c2}$  と回転同期振動による周波数 (  $w_s$  : 117 Hz ) のとの関係からそれぞれ (  $w_{c2} - w_s$  )、および 3 (  $w_{c2} - w_s$  ) で表され、これらは旋回キャピテーションのセルと羽根との干渉による成分 ( 係数の 3 は羽根枚数 ) を表していると考えられる。従って相対速度が「差」で表されるということは、セルが羽根の回転方向と同じ方向に旋回していることを示している。図 7 ( b ) では、逆回りモードと考えられる 159 Hz の変動成分  $w_{c1}$  に対し、276, 828 Hz に干渉成分が観察された。これは同様な関係で表せば、それぞれ (  $w_{c1} + w_s$  )、あるいは 3 (  $w_{c1} + w_s$  ) で表される。この場合、相対速度は「和」によって表され、このことは 159 Hz の変動成分のセル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。また、159 Hz の変動から 138 Hz の変動に切り替わる境界付近 (  $s = 0.072$  付近 ) では両者の干渉成分 (  $w_{c1} + w_{c2}$  : 297 Hz ) も観察されている。この場合も相対速度成分が「和」

で示され、両者のセルが互いに逆方向に旋回していることを示している。

### 3.3 高速度カメラによる画像解析

以上の結果から、周波数 159 Hz の振動が羽根の回転方向と逆方向に旋回する現象であることは確認された。しかし理論解析によれば、旋回キャピテーションは流量が減少するに従ってキャピティ体積が減少する性質に起因するとされている。即ち、局所的な入口圧力および流量の変動に伴ってキャピティ体積が変動することが解析の前提条件になっているということである。図 10 は 159 Hz の逆回りモードの旋回キャピテーションが起きているときの 3 枚の羽根上のキャピティ形状の変化を、羽根 1 / 3 回転毎 ( 羽根一枚毎 ) に高速度撮影し、羽根毎に時系列で整理したものである。図はそれぞれ 1 枚の羽根上のキャピティの変化と、羽根番号 1 2 3 1 の順での連続的なキャピティの変化を示しているが、この可視化観察結果だけでは逆回りモードかあるいは前回りモードなのかの判定は困難である。そこで図 11 に図 10 に示した映像をもとに、キャピティ長さを翼間隔 L ( 羽根チップ部の円周方向長さの 1 / 3 ) を基準として解析したものを示した。これは 3 枚の羽根が透視管のある位置に来たときのキャピティ長さの変化を読みとったものであり、すなわちケーシングの 1 点で眺めたキャピティ長さの変動を観察したものである。キャピティ長さの変動は、159 Hz の変動を仮定した予想曲線とよく一致しており、解析を行った高速度撮影の画像はこの 159 Hz の振動を捉えているものと推定される。

画像解析結果からキャピテーション振動の回転方向を

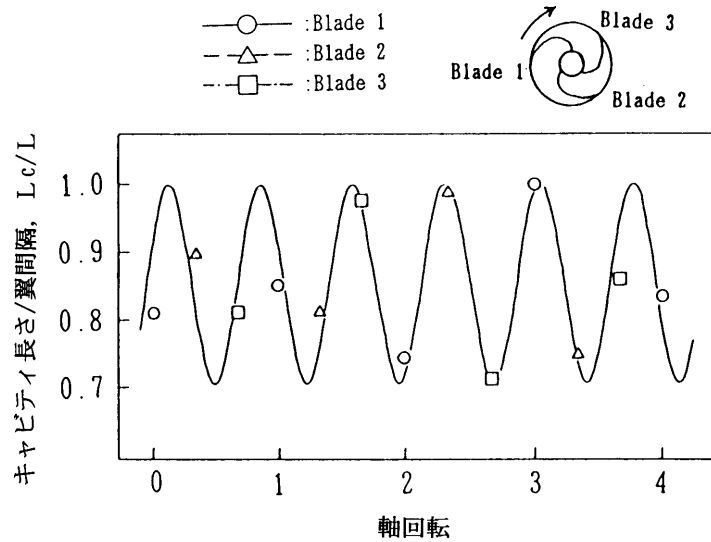
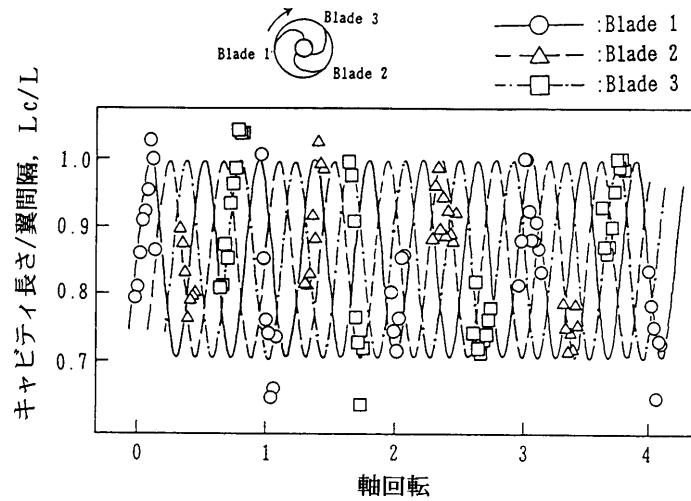
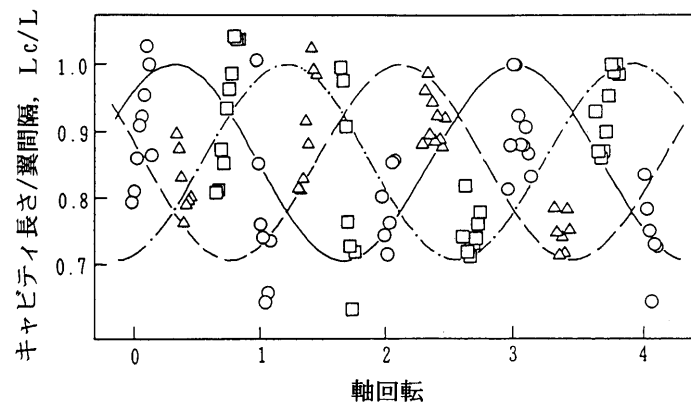


図 11 キャビティ長さの変動（ケーシングの 1 点で観察した場合）



(a) 逆回り旋回キャビテーション発生時



(b) 前回り旋回キャビテーション発生時

図 12 キャビティ長さの変動

決定するため、キャビティ長さの変動を高速画像の 1 コマ毎に細かく観察した結果を図 12 に示す。図 12 ( a )

には 159 Hz の振動が逆回りに旋回していて、それぞれの振動がサイン波形をしていると仮定して描いた各羽根上

のキャピティ変動の予想曲線を、図12(b)には前回りに旋回して、それぞれの振動はサイン波形をしていると仮定した予想曲線を重ねて描いた。逆回りの仮定では個々の予想曲線は $(w_{cl} + w_s)$ : 275 Hzの周波数で、羽根番号1 2 3 1の順でそれぞれ位相が120°遅れる。また、前回りモードの仮定では、予想曲線は $(w_{cl} - w_s)$ : 42 Hzの周波数で、1 3 2 1の順でそれぞれ位相が120°遅れる。予想曲線の逆回りモードと前回りモードのキャピティの変化率を比べた場合、羽根に対する旋回キャピテーションのセルの相対速度の違いから、逆回りのほうが変化率は大きい。図12(a)と図12(b)の比較から、キャピティの変化率は逆回りのモードの仮定に極めてよく一致している。

以上の結果はセル数を一つと仮定して求められた旋回速度および旋回方向であるが、セル数を複数と考えると図11および図12を同時に満たす振動パターンは以下の三とおりが考えられる。

159 Hz : 逆回り : セル数 1

509 Hz : 前回り : セル数 2

191 Hz : 前回り : セル数 4

しかし、上記 , については図7に示す入口圧力振動に対応する振動成分が現れていないことから、この画像解析結果は , すなわち 159 Hz の逆回り旋回キャピテーションであると判断される。

#### 4 . むすび

本試験を通じ、次の結論を得た。

理論的に存在が指摘されていた逆回りモードの旋回キャピテーションによる振動が観察された。軸振動の位相差解析、干渉成分の分析および高速度カメラ画像によるキャピティの長さの変化の解析結果のいずれから、この現象がインデューサ翼の旋回方向と逆方向にキャピティの伸縮を伴って旋回する現象であることが示され、この現象が逆回りモードの旋回キャピテーションによる振動であることが確認された。

最後に本研究に関して、大阪大学基礎工学部辻本良信教授から有益な御助言を頂いた。付記して感謝の意を表す。また、東北大学流体科学研究所上條謙二郎教授から御指導を頂いた。深甚なる謝意を表す。実験を行うにあたり、コスモテック 亀井航君の助力を得た。ここに改めて感謝の意を表す。

#### 5 . 参考文献

- 1) 上條謙二郎, 吉田誠; 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), pp.33-38.
- 2) Yamada, H. et.al.; Suppression of Non-Vibrations in the LE-7 Liquid Hydrogen Turbopump, ISROMAC-7, (1998).
- 3) Ryan, R. S. et.al.; The Space Shuttle Main Engine Liquid Oxygen Pump High-Synchronous Vibration Issue, The Problem, The Resolution Approach, Solution, AIAA, 94-3153, (1994).
- 4) Goirand, B. et.al.; Experimental Investigations of Radial Loads induced by Partial Cavitation with a Liquid Hydrogen Inducer, IMechE, C453/056, (1992), 263-269.
- 5) 橋本知之, 渡邊光男, 吉田 誠, 谷口浩文, 佐々木宏; LE-7 液水ターボポンプにおける回転非同期振動の抑制, 日本機械学会流体工学部門講演論文集, No. 940-53, (1994), pp.33-34.
- 6) 辻本良信, 吉田義樹, 上條謙二郎; インデューサの旋回キャピテーションの解析, 日本機械学会論文集, 58-551 B, (1992), 2052-2059.
- 7) Tsujimoto, Y. et.al.; A Nonlinear Calculation of Rotating Cavitation in Inducers, Proc, ASME Cavitat. Multiphase Flow Forum, FED-194, (1994), 53-58.
- 8) 渡邊光男, 橋本知之, 渡辺義明, 長谷川敏, 山田仁; 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ピテーションの観察(その1)ケーシング形状による影響, 航技研報告 TR-1325, (1997).

---

## 航空宇宙技術研究所報告 1382号

平成 11 年 3 月 発行

発行所 科学技術庁航空宇宙技術研究所  
東京都調布市深大寺東町7丁目44番地1  
電話 (0422) 40-3075 ㊦ 182-8522  
印刷所 株式会社 東京プレス  
東京都板橋区桜川 2 - 27 - 12

---

禁無断複写転載

本書(誌)からの複写, 転載を希望される場合は, 研究支援課資料係にご連絡ください。

Printed in Japan