

逆流渦キャビテーションによって生じる軸振動現象について

Observation of Shaft Vibration Caused by the Clouds of Cavitation in Backflow Vortices

橋本知之・島垣満・長谷川敏・渡邊光男・中村憲明・永浦克司・吉田義樹

角田宇宙センター，ロケットエンジン技術センター，ターボポンプセクション

Tomoyuki HASHIMOTO, Mitsuru SHIMAGAKI, Satoshi HASEGAWA, Mitsuo WATANABE,
Noriaki NAKAMURA, Katsuji NAGAURA and Yoshiki YOSHIDA

Kakuda Space Center, Rocket Engine Technology Center, Turbopump System Section

Abstract

The component of shaft vibration, which rotates 2.5 times faster than shaft rotation, was observed during a Lox turbopump test. From the spectrum analyses of dynamic pressure around the inducer, the shaft vibration was assumed to be caused by the clouds of cavitation in backflow vortices. In this study, some visual observations around inducer were conducted and discussed about relationship of the shaft vibration and the clouds of cavitation in backflow vortices.

1. はじめに

ロケット用ターボポンプのインデューサには様々なキャビテーション不安定現象が発生する。例えば、キャビテーションのパターンが回転に非同期で旋回する、旋回キャビテーション、旋回キャビテーションの1種である回転同期旋回キャビテーションなどが有名である。これらのキャビテーション不安定現象が発生すると、インデューサ入口部の圧力分布が不均一となり、過大な軸振動が観察され、そのことが大きな問題となっている。近年、ロケット用ターボポンプのインデューサでもキャビテーションサージの問題点が指摘されている。このキャビテーション不安定現象が発生した場合、エンジンシステム全体に作動点変化による不安定が伝播し、エンジン加速度に多大な変動を与えることが危惧されている。これらのキャビテーション不安定現象は、設計の段階でその発生を予測することは難しく、インデューサを設計、製作した後その発生状態を確認することが必要である。そのためフライトに影響を与えそうな不安定現象が観察された場合、速やかにその解決策を講じる必要がある。

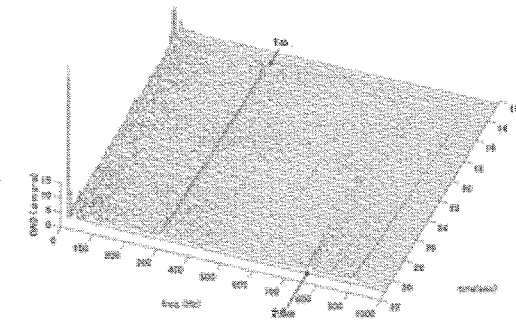
筆者らはこれまで新規に開発されたロケットターボポンプインデューサの性能確認試験に従事してきた。発生した不安定現象に対する対策を速やかに行なうためには、その不安定現象の性質、特徴、発生原因を把握しておくことは非常に重要である。このため、ロケットインデューサに生じるキャビテーション現象の基礎的な研究も平行して行なってきた。本報告では、これらの研究/開発援助活動の一例として、ロケット用ターボポンプの試験中に観察された

軸振動現象の解明を行なった事例について紹介させて頂く。

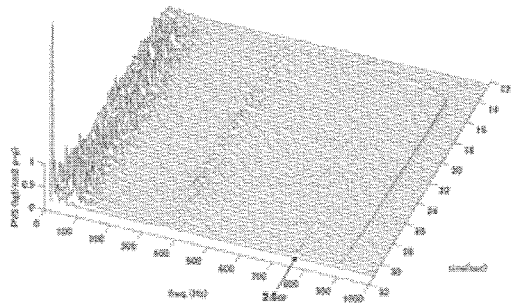
2. 現象の推定

この軸振動現象は、ターボポンプ試験及びインデューサ単体水試験において観察された。Fig.1はターボポンプ試験において観察された例で、(a)が軸振動、(b)がインデューサ出口変動圧力、(c)がインデューサ入口変動圧力をFFT解析した結果である。Fig.1(a)に示されるように、この軸振動現象はインデューサ翼の回転周波数 ω_s に対して約2.5倍の周波数を持つ。インデューサ単体水試験で測定された結果から推定すると、この軸振動現象はインデューサ翼の回転方向と逆方向に、翼の回転速度の約2.5倍で回転していることが明らかになった。また、Fig.1(b)に示すインデューサ出口の圧力変動についても同様であった。これらの結果から、逆回り旋回キャビテーションである可能性が推定された。

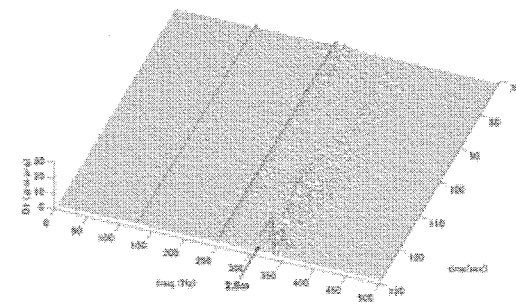
一方で、この現象は従来観察されている旋回キャビテーションとは異なる特徴を持っていた。Fig.1(c)に示すインデューサ入口部の変動圧力では翼回転速度の約2.5倍の変動成分は殆んど観察されず、翼回転速度の約0.5倍の変動成分が観察された。インデューサ単体水試験で観察された結果から推定すると、この変動圧力成分は4つのセルが翼の回転方向に翼の回転速度の約0.125倍でそれぞれが回転している現象であると考えられた。この特徴は従来インデューサ入口部で発生する旋回キャビテーションとは異なっている。また、Fig.1(d)に吸い込み性能曲線と軸振動現象の発生領域を示した。図に示されるよ



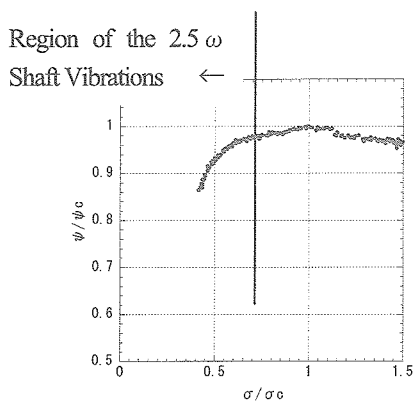
(a) Shaft Vibration



(b) Pressure Fluctuations at Inducer Outlet



(c) Pressure Fluctuations at Inducer Inlet



(d) Suction Performance

Fig.1 Observation of the Fluctuations observed with 2.5ω Shaft Vibrations

うにこの軸振動現象はインデューサのブレードダウン（揚程の低下点）点付近以降で発生しており、従来の回転非同期旋回キャビテーションの発生領域（ $1.5 < \sigma / \sigma_c < 2.5$ ）や回転同期旋回キャビテーションの発生領域（ $1.0 < \sigma / \sigma_c < 1.5$ ）に比べかなり低い領域で発生している。

これらの観察結果から、この軸振動現象は、①インデューサ出口部を1セルで翼の回転方向と逆方向に翼回転速度の約2.5倍で旋回する現象、②インデューサ入口部を4セルで翼の回転方向に翼回転速度の約0.125倍で旋回する現象、のどちらかが発生原因であると推定できる。

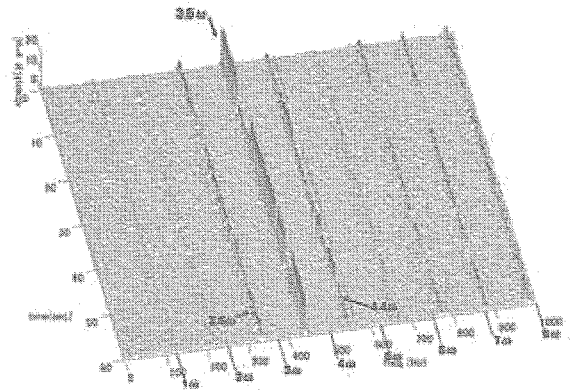


Fig.2 FFT Analysis of the Strain Fluctuations on the Blade

この軸振動現象の発生原因を明らかにするため、インデューサ翼に歪ゲージを取り付け、この軸振動現象発生時の翼面歪の観察を行なった。結果を Fig.2 に示す。図に示されるように、翼面の変動歪観察結果からは翼回転周波数の約3.5倍の周波数を持つ変動成分が観察されることが明らかとなった。これを先の現象の仮定と合わせて評価すると以下のような結果となる。

①インデューサ出口部を1セルで翼の回転方向と逆方向に翼回転速度の約2.5倍で旋回する現象であると仮定すると、翼上では変動成分は翼の回転方向と逆方向に、翼回転速度の約3.5倍の速度で旋回していることになり、変動歪観察結果と一致する。

②インデューサ入口部を4セルで翼の回転方向に翼回転速度の約0.125倍で旋回する現象であると仮定すると、翼上では変動成分は4つのそれぞれのセルが0.875倍の速度で翼の回転方向と逆方向に旋回していることになる。即ち翼上では変動成分が翼回転周波数の3.5倍の周波数で翼の回転方向と逆方向に移動するのが観察されることになり、変動歪観察結果と一致する。

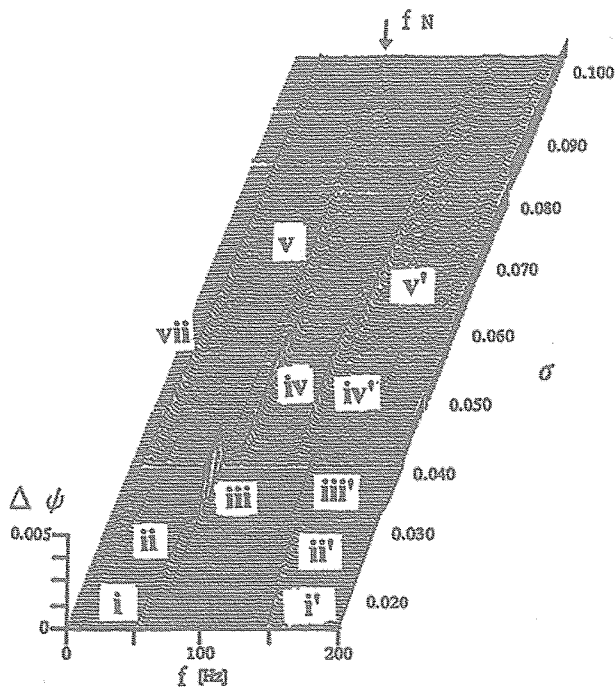


Fig.3 Observation of Cavity Fluctuations
by Y. Tujimoto et al⁽⁷⁾

即ち、変動歪観察結果からは①の現象が起きているのか、②の現象が起きているのか特定することは出来ない。その一方で、この軸振動現象と類似の現象が Tujimoto らにより観察されている。その観察結果を Fig.3 に示す。Tujimoto らはこの観察の考察の中で、類似の現象はインデューサ入口部に発生する逆流渦キャビテーションによる変動成分であり、5セルで翼の回転方向に翼の回転速度の 0.16 倍で旋回している現象であると述べている。この観察結果は今回推定した軸振動の発生原因②とセル数は異なるものの、旋回速度、旋回方向、発生するキャビテーション係数など共通点は多い。

これらの事実から、この軸振動現象がインデューサの入口部を4セルで翼の回転方向に翼の回転速度のおよそ 0.125 倍で旋回する、逆流渦キャビテーションによって発生する軸振動ではないか、という推定を立て、その関係を調べるため可視化試験を行った。

3. 可視化試験結果

Fig.4 は高速度ビデオから得られた可視化画像である。図にはいくつかのキャビテーションの塊が見られる。これらは逆流渦キャビテーションであり、高キャビテーション係数では渦芯に細い帯状に観察される逆流渦キャビテーションが圧力の低下に従い、幅を広げ、このようなキャビティ塊として観察されている。Fig.5 はこの軸振動現象が現れている時の高速度ビデオ画像を抜き出したものである。この画像取得時のインデューサ回転速度は 6000rpm であり、

回転周波数は 100Hz である。また、この時インデューサ出口圧変動及び軸振動では翼回転速度の約 2.3 倍 (227Hz)、インデューサ入口変動圧力では翼回転周波数の約 0.7 倍 (76Hz) の変動成分が観察されている。キャビティ塊の個数は例えば図(a)、(c)、(e)などを見ると軸対象になっており、明確に 4 つであることを示している。ここで、(a)、(c)などはキャビティ塊がちょうど観察位置から軸上 (正面) に来たタイミングを捉えた画像であり、(a)から(c)まではちょうど1塊分移動した状態を表わしている。ちなみに(b)は(a)と(c)の中間秒時の画像であり、概ねキャビティ塊の境が正面に来ている。即ち (i) は(a)のキャビティ塊がちょうど1周した状態を表わしている。画像を取得した秒時から、このキャビティ塊はおよそ 18.2Hz で軸上を1周していることが解る。上記で述べた様に、周上には4つのキャビティ塊があるため、その一つ一つはおよそ 73Hz で1周することになり、観察されたインデューサ入口部での変動圧力の周波数に極めて近い。

Fig.5 の(b)、(d)、(f)などを見ると、キャビティ塊の境界にはキャビテーションの薄くなった状態が存在していることが認められる。これは4セルのキャビテーション塊がインデューサの翼内部でも存在していることを示している。即ち、4つのキャビティ塊(4セルの逆流渦キャビテーション)を3枚の翼が通過している様子が解る。通常、高キャビテーション係数では逆流渦キャビテーションはインデューサの入口上流に伸び、翼内部に入り込むことはない。しかし、充分に入口圧の低い状態(インデューサのブレークダウン状態)では、インデューサ翼にかかる翼負荷は極端にインデューサ翼後方に移動している。そのため、逆流渦もインデューサ翼内部に入り込み、その結果、逆流渦とインデューサ翼が干渉して、今回観察された軸振動が生じていると結論付けることが出来る。

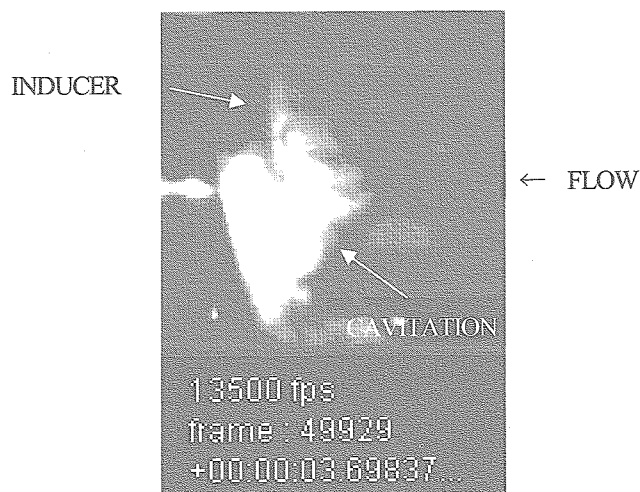


Fig.4 Visual Observation of the Cavitation
around the Inducer Inlet

4. むすび

ターボポンプ試験で発生した軸振動現象についてその発生原因を探求した。その結果、以下の結論を得た。

(1)揚程ブレークダウン点近くで、軸の回転方向と逆方向に、軸回転速度の2倍から2.5倍付近で回転する軸振動現象が存在する。

(2)この現象は、インデューサ上流に発生する逆流渦キャビテーションが翼内部に入り込み、翼と干渉することで発生することが確認された。

参考文献

(1)K. Kamijo et al., "Hydraulic and Mechanical Performance of LE-7 LOX Pump Inducer", J. of Propulsion and Power, Vol.9, No.6 (1993), 819-826.

(2)Y. Tujimoto et al., "A Theoretical Analysis of Rotating Cavitation in Inducers", J. of Propulsion and Power, Vol.115, No.1 (1993), 135-141.

(3)渡邊他, インデューサのキャビテーションとロケットポンプの軸振動, ターボ機械, 27-10 (1999).

(4)S. Hasegawa et al., "Observations of Inlet Flow at Rocket Pump Inducer", Proceedings of 22nd ISTS (1999).

(5)T. Hashimoto et al., "Optimum Geometry of Inducer Liner for Suppression of Cavitation Fluctuations" ISTS 2004-a-19 (2004).

(6)橋本他, 旋回キャビテーションの観察 (4枚羽根インデューサの場合), 機講論, 96-1 (1996), 41-42.

(7)Y. Tujimoto et al., "Observations of Oscillating Cavitation of an Inducer", J. of Fluids Engineering, Vol. 119 (1997), 775-781.

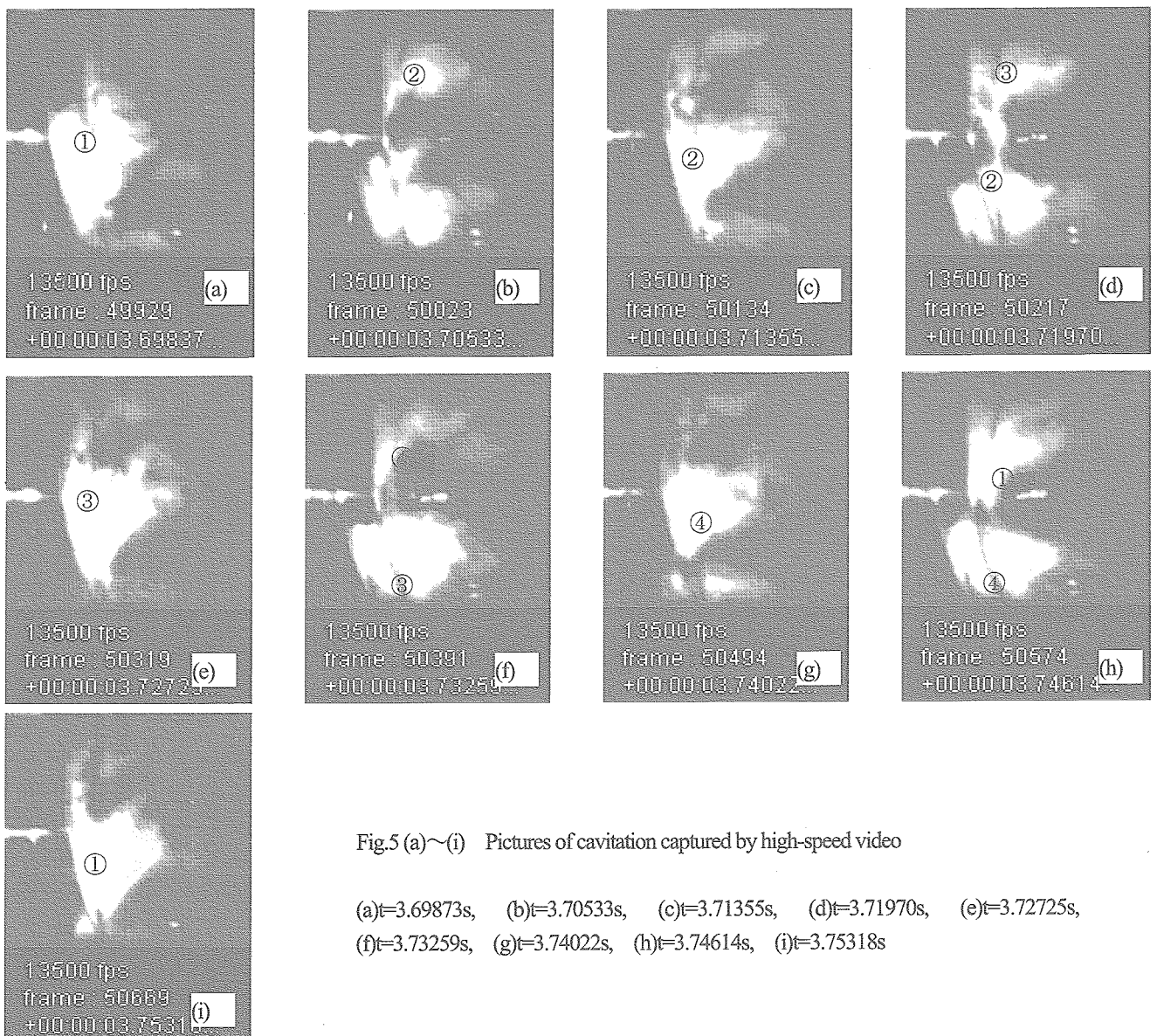


Fig.5 (a)~(i) Pictures of cavitation captured by high-speed video

(a)t=3.69873s, (b)t=3.70533s, (c)t=3.71355s, (d)t=3.71970s, (e)t=3.72725s,
(f)t=3.73259s, (g)t=3.74022s, (h)t=3.74614s, (i)t=3.75318s