C212 ロケット用ターボポンプ開発における可視化について

航技研 渡邊光男^o, 橋本知之, 長谷川敏, 渡辺義明, 山田 仁

Observation in Development of the Rocket Turbopump

Mitsuo WATANABE *, Tomoyuki HASHIMOTO *, Hitoshi HASHEGAWA *,
Yoshiaki WATANABE * and Hitoshi YAMADA *

Research on rotating cavitation progressed the development of the liquid oxygen turbopump for the LE-7 engine of the H-II rocket. In order to investigate rotating cavitation in more detail, a further experimental study with high speed filming was started. In the present study, some visual observations of rotating cavitation were mainly conducted using the inducer test facility, and the manners of cavitation fluctuations for rotating cavitation and low cycle oscillations were clarified.

1. 緒言

H-II ロケットの第一段LE-7 液酸ターボポンプの開発過程において初めて旋回キャビテーションによる回転非同期の軸振動が問題とされた^{1)~3)}。しかし、実機のターボポンプではインデューサに発生するキャビテーションを可視化等で詳しく調べることは困難であるため、キャビテーションタンネルにおいてターボポンプケーシングを模擬した透明ケーシングを用い、高速度カメラ及びビデオカメラなどによる可視化観察によりインデューサに発生するキャビテーション振動の解明を行った。

2. 試験装置と方法

試験は航技研角田宇宙推進技術研究センターのキャビテーションタンネル試験設備⁴⁾を用いて行った。作動流体には水を用いた。試験はインデューサ単体で行われ、インデューサケーシング部をアクリル製透視管とし、発生したキャビティ形状を外部より高速度カメラ及びビデオカメラを用いて観察した。試験ではインデューサ入口圧力を徐々に低下させて各キャビテーション係数における軸振動と入口及び出口の圧力振動を測定し、旋回キャビテーションの発生状況を調べた。高速度カメラによる可視化観察には16mmフィルムを使用するナック E-10を用いた。撮影には 6KWの連続光源を用いた。撮影したフィルムは画像解析装置 ナックフィルムモーションアナライザ⁵⁾ 16Fを用いて解析を行った。

またマルチストロボを回転同期させてビデオカメラを用いて観察した。Fig.1 に高速度カメラによる撮影の様子を示す。

Fig.1 Inducer test section.

Fig.2 Maps of the regions of occurrence of rotating cavitation, attached cavitation and low cycle oscillation.

*National Aerospace Laboratory, Kimigaya, Kakuda, Miyagi, 981-15

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領域

旋回キャビテーション⁵⁾によって代表される不安定現象は、軸系を不安定にする大きな要因となっている。Fig.2に回転数 $N=7,000\text{rpm}$ で流量比とキャビテーション係数 σ をパラメータにして、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。タンネルの観察結果においても流量比 $Q/Q_d=0.8 \sim 1.2$ の全ての流量条件下で実機ターボポンプ試験で発生した旋回キャビテーション現象が確認された。またキャビテーション係数 σ がさらに低下すると、定常的に2枚の羽根で長く1枚の羽根で短い定常非対称キャビテーションの発生することが確認された。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のパターンがくずれて周波数約10 Hz程度の低周波の振動パターンに移ることを示している。ここに示した低周波振動現象は、実機ターボポンプの試験においては計測上の制約やキャビテーション係数をポンプ運転の安全上あまり下げられないことから明確には現れなかった現象である。ここでは実機ターボポンプで問題となった回転非同期軸振動を誘発する旋回キャビテーション及び低周波振動の不安定現象についてその可視化観察により詳細に検討した。

3. 2 旋回キャビテーションの観察

Fig.3 (a) に実機ターボポンプにおいて発生した回転非同期の軸振動について FFT周波数解析した結果を示す。ターボポンプでは可視化等での確認が困難であるため得られたデータを詳細に検討した結果、この不安定現象は旋回キャビテーションによるものと結論して振動対策を行った。Fig.3 (b) にタンネル試験において

Fig.3 FFT analyses of shaft vibrations at turbopump test (a) and inducer test (b).

Fig.4 Cavity fluctuations for rotating cavitation on each blade.

Fig.5 Observation of cavity area fluctuation for rotating cavitation.

発生した振動現象を解析した結果を示す。Fig.3 (a) と極めて類似した現象であることがわかる。

Fig.4 に Fig.3 (b) で発生した不安定現象を高速度カメラで撮影した写真を示す。回転数は $N=7,000\text{rpm}$ 、流量比 $Q/Q_d=1.01$ 、撮影条件は毎秒約 7,000 コマである。写真から旋回キャビテーションの特徴である、3 枚のそれぞれの羽根上においてキャビティが伸縮を繰返しながら 3 枚の羽根上を移動している様子が確認できる。Fig.5 に高速度写真を元にそれぞれの羽根に生じるチップキャビティの面積の変化を画像解析した結果を示す。キャビティ面積の広い領域は羽根番号 $3 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 3$ の順で変化しており、キャビティの領域が羽根の回転方向に羽根の回転速度より速く旋回していることが示されている。また図から読み取った振動周波数と FFT 周波数解析した結果とは良く一致する。したがって、キャビテーションタンネルの可視化観察により実機ターボポンプに生じた回転非同期軸振動は旋回キャビテーションによる不安定現象と考えられる。

Fig.6 Spectrum analysis of outlet pressure oscillations for low cycle oscillation.

3. 3 低周波振動の観察

タンネル試験において旋回キャビテーションを解明する過程においておよそ 10Hz の低周波振動が発生した。上條らは、高速度カメラによりキャビティ長さの変化を観察し、全ての羽根上のキャビティが同位相で振動していることを示し、この低周波振動は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⁶⁾。Fig.6 に低周波振動が起きているときのインデューサ出口振動圧力を FFT 周波数解析した結果を示す。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かなり大きな振幅を伴った振動であることが読み取れる。またキ

Fig.7 Cavity fluctuation for low cycle oscillation on each blade.

キャビテーション係数 σ の低下とともに, 巡回キャビテーション→定常非対称キャビテーション→低周波振動の順に発生過程をたどっており, このことから低周波振動は巡回キャビテーションの延長上にある現象と考えられる. Fig.7は羽根上のキャビティ形状の変化を高速度撮影したもので, それぞれの羽根上のキャビティの変化と, 羽根番号1→2→3→1の順での連続的なキャビティの変化を示している. Fig.8にFig.7を画像解析した結果を示す. キャビティは2枚の羽根上で長く1枚の羽根で短い状態(状態A)と, 3枚の羽根上で長い(状態B)が規則的に繰返されている. 状態Aは定常非対称キャビテーションに類似した状態であり, 状態Bはキャビテーション係数の低い領域での定常対称キャビテーションに類似した状態であり, このことは本試験でみられた低周波振動は2つの状態の間を振動する現象であることが判明した.

Fig.8 Obserbation of cavity fluctuation for low cycle oscillation.

4. まとめ

実機ターボポンプに生じた不安定現象が巡回キャビテーションによることを明らかにし, また解明の過程において生じた低周波振動についても可視化観察の結果明らかにすることができた. 今後は次期ロケットH-II A用ターボポンプインデューサについてもキャビテーションタンネルを用いた可視化技術を駆使し開発支援を行う予定である.

最後に, 本研究に関し, 東北大学・流体科学研究所上條謙二郎教授からご指導を頂いた. 深甚なる感謝の意を表する. また本試験を行うにあたり(株)コスモテック・亀井航君の協力を得た. 記して感謝の意を表する.

5. 参考文献

- 1) Kamijo, K. et. al.; Hydraulic and Mechanical Perfomance of LOX Pump Inducer, AIAA Journal of Propulsin and Power, vol. 9, NO. 6, (1993), pp. 819-826.
- 2) Tsujimoto, Y. et. al.; A Theoretical Analysis of Rotating Cavitation in Inducers, ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 115, NO. 1, (1993), pp. 135-141.
- 3) 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.
- 4) 渡邊光男, 橋本知之, 長谷川敏, 渡辺義明, 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巡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, 日本機械学会講演論文95, (1995), pp. 121-122.
- 5) Kamijo, K. Shimura, T and Watanabe, M.; An Experimental Investingation of Cavitating Inducer Instability, ASME Paper, 77-WA/FE-14, (1997).
- 6) Kamijo, K. Shimura, T and Watanabe, M.; A Visual Observation of Cavitating Inducer Instability, NAL TR-959T, (1980).