ロケットエンジンターボポンプ開発にかかわる ローターダイナミックス*

上 條 謙 二 郎^{*1}

Rotor Dynamic Problems in Development of Rocket Turbopumps

Kenjiro KAMIJO

Key Words: Rocket, Engine, Turbopump, Vibration, Cavitation, Rotor, Liquid oxygen, Liquid hydrogen

1. ま え が き

H-2 ロケットは静止軌道に2tのペイロードを打ち上げることが可能な使い捨てロケットで、推進剤としては化学ロケットとして最高級の性能が得られる液体酸素と液体水素を用いている。H-2 ロケット第1段には高性能(単位質量の推進剤でより大きな推力が得られる)の得られる2段燃焼サイクルのLE-7エンジン(真空中推力110t)を用いている。同エンジンは液体酸素と液体水素を高圧にして燃焼器に供給するための液体酸素および液体水素ターボポンプを有している。約13MPaの推力室燃焼圧力を達成するために両ターボポンプは高圧の大出力ターボ機械である。LE-7エンジンはシステムの単純さを優先して主ポンプの前に吸込みを助ける低回転のブーストポンプを採用していない。このためエンジンの軽量化の面から両ターボポンプは、ポンプの吸込性能にかかわる制約を克服してより高速回転にすることが極めて重要となった。両ターボポンプの開発においては、やはり高速回転時のローターダイナミックスにかかわる深刻な問題が発生し、これらを解決するためにかなりの時間と労力が費やされた。

ここでは、両ターボポンプの軸振動抑止の観点から両ターボポンプの設計、発生した軸振動およびその対策について紹介する。なお、ここに紹介するLE-7エンジンのターボポンプで発生した軸振動と極めて類似する軸振動が、改良型スペースシャトル主エンジンやアリアンロケット第1段主エンジン(バルカン)のター

ボポンプの開発においても発生した。これらの問題は大型高性能ロケットエンジンのターボポンプに共通する問題として認識されつつある。

2. LE-7 エンジン

LE-7エンジンの系統を図1に示した。エンジンの主要な構成要素は主燃焼室、液体酸素・液体水素ターボポンプ、プリバーナなどである。毎秒約550lの液体水素はインデューサ付2段遠心ポンプで約28MPaに昇圧され燃焼器壁面やノズルスカートを冷却した後、プリバーナに達する。一方毎秒約180lの液体酸素は同じくインデューサ付1段遠心ポンプで約18MPaに昇圧され、その90%が主燃焼器に送られ残りの10%は同軸のプリバーナポンプでさらに約27MPaまで昇圧されてプリバーナに送られる。プリバーナでは酸素と水素が重量比約1で燃焼してタービン駆動ガスを生成する。未燃の水素ガスを多量に含むこのガスは並列に両タービンを駆動した後に主燃焼室で前記酸素と燃焼してエンジン推力を発生する。プリバーナと主燃焼器で2回燃焼が行われることから2段燃焼サイ

Fig.1 Schematic diagram of LE-7 engine

* 原稿受付 1998年4月1日。

*¹ 正員, 東北大学流体科学研究所 (☎ 980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1)。

クルエンジンと呼ばれる。

この方式においてはタービン駆動ガスが燃焼器とノズル内で有効に推力に変換されることから、燃焼圧力が高いほど高い性能が達成される。しかし図1からも明らかなように、高圧燃焼でありながらさらに推進剤がポンプ、プリバーナ、燃焼器を直列に流れるため、ポンプ吐出圧力は極めて高くなる。この大流量・高圧ターボポンプの開発は難しく、やはり様々な難問を克服する必要があった。

3. ターボポンプの設計

液体酸素は酸化力が強いいため、回転部品と静止部が接触して過度に温度が上れば金属部品であっても着火する可能性がある。液体酸素ターボポンプを開発する上で最も注意すべき点はターボポンプ内部での着火からの爆発の可能性をなくすることである。一方液体水素は低密度(液体酸素の約1/16)であるため、高圧を得るには遠心羽根車の周速を極めて高くする必要がある。小形軽量が必須であるから高速回転によって要求の周速を達成する。したがって液体水素ターボポンプの設計における最重要課題は安定な高速運転を実現する構造にすることにある。

3.1 液体酸素ターボポンプ 液体酸素ターボポンプの構成とその主要諸元を図2、表1に示す。同ターボポンプの回転数はH-2ロケット第1段の全重量を最小とするように決定された。回転数を高くすればターボポンプは小形軽量になるが過度に高くするとインデューサで発生するキャビテーションを抑えるためにポンプの入口圧力を高くしなければならず、タンクはより厚肉となり全体としてむしろ重量が増えてしまうことになる。

同ターボポンプの設計に際してはローターダイナミックスにかかわる問題を避ける目的で構造の単純さを特に優先させた。たとえばタービンは動翼2段方式を

採用すれば効率は若干向上するが、タービン側軸受からのオーバーハング量が倍以上になるため、タービン側の振れが大きくなる。これはまたタービン駆動用水素過濃の高温水素ガスとポンプ側液体酸素を完全に分離しなければならない精密な軸シールに悪影響をもたらす。大流量で高い吸込性能を達成するためにはインデューサの直径を大きくする必要がある。図1のようにインデューサと主ポンプ遠心羽根車を離し、この間に案内羽根を置きこの案内羽根が軸受を支える構造とした。

図3に同ターボポンプ軸系の危険回転数と軸振動モードを示した。一、二次の危険回転数における軸振動モードはそれぞれ主にタービン側、ポンプ側の振れ回りである。図示したように、図1の構造によって二次危険回転数の下で運転が可能となった。このことは液体酸素ポンプ側での回転体と静止部の接触を極力抑えなければならない液体酸素ターボポンプの安全性や信頼性を高めている。

ポンプ側ならびにタービン側の軸受は液体酸素で冷却し、潤滑は軸受保持器に含ませた PTEE(テフロン)

Table 1 Major parameters of liquid oxygen turbopump

Rotational speed, rpm	18,300
Pump	
Required NPSH, m	30
Suction pressure, MPa	0.779
Delivery pressure, MPa	
Main pump	18.13
Preburner pump	24.67
Mass flow rate, kg/s	
Main pump	211.0
Preburner pump	57.05
Turbine	
Inlet pressure, MPa	19.78
Outlet pressure, MPa	14.38
Gas flow rate, kg/s	15.68
Efficiency, %	0.47
Power, MW	4,570
Inlet temperature, K	856

Fig. 2 Liquid oxygen turbopump

Fig. 3 Critical speeds and shape-modes of liquid oxygen turbopump

で行う。したがって軸受にかかる荷重を軽減することが重要になる。回転軸系の軸方向推力は図4に示す主ポンプ遠心羽根車の後面シュラウドをバランスディスクとして利用するバランスピストン方式により調整する。すなわち後面シュラウドとケーシングの間に2個のオリフィスを設け、この間の空間の圧力を2個のオリフィスで調整し、後面シュラウドを押す力の増減により軸方向推力をなくす。

液体酸素ターボポンプの材料として軸受(SUS 440 C)と軸シール(主にカーボン)を除き、低温から高温まで使用可能で着火を起こし難いニッケルベースの超耐熱合金(Inconel 718)が用いられている。

3・2 液体水素ターボポンプ 図5と表2にそれぞれ液体水素ターボポンプの構成と主要諸元を示した。同ターボポンプは大流量・高速・高圧であり当然大出力のターボ機械である。吐出圧力約27 MPaを達成するには遠心羽根車1個では無理で2個直列に用いている。同ターボポンプでは動翼1段のタービンにおいて高い効率が得られるため、液体酸素ターボポンプと同様にタービン部のオーバーハング量が抑えられている。

図6に液体水素ターボポンプの軸系の危険回転数を示した。仕様回転数は毎分41500回転であるので、三次危険速度の上で運転される。液体酸素ターボポンプと同様に二式の軸受は液体水素で冷却される自己潤滑軸受であり、軸方向推力はバランスピストンで調整される。液体水素の粘性が極めて低いいため減衰作用がほとんど期待できないこと、また最近研究が進んではい

るが羽根車やシール部に発生する振れ回り力に関する具体的データが少なく定量的見積もりが正確に行えない、ことなどにより、安定した回転系を開発するまでには多くの試行錯誤が行われた。

インデューサと2個の遠心羽根車はチタン合金(5 Al-2.5 Sn)製である。タービン動翼は一方向凝固材(MAR-M 247 LC.DS)の精密鍛造品である。その他軸受と軸シールの材料以外はニッケルベースの超耐熱合金(Inconel 718)が使用されている。

Table 2 Major parameters of liquid hydrogen turbopump

Rotational speed, rpm	41,500
Pump	
Suction pressure, MPa	0.338
Delivery pressure, MPa	26.85
Mass flow rate, kg/s	35.57
Turbine	
Inlet pressure, MPa	20.52
Inlet temperature, K	869
Outlet pressure, MPa	14.44
Gas flow rate, kg/s	33.14
Efficiency, %	0.754
Power, MW	17,400

Fig. 5 Liquid hydrogen turbopump

Fig. 4 Characteristics of balance piston

Fig. 6 Critical speeds and shape-modes of liquid hydrogen turbopump

4. 液体酸素ターボポンプの キャビテーションに伴う軸振動

液体酸素ターボポンプの開発においてはポンプ入口部のキャビテーションに伴う軸振動が発生し、これを解決するのに多くの時間を費やした。ここではこの中から旋回キャビテーションによって生じた軸振動の問題⁽¹⁾を紹介する。

液体酸素ターボポンプの初期の試験から図7に示した軸振動が発生した。この軸振動は主ポンプ遠心羽根車の前面シュラウドで測定したものである。インデューサの先端で測定した振動振幅はこの値よりかなり大きなものであった。図7の試験では時間とともにポンプ入口圧力が低下している。図7の軸振動は回転同期振動よりも周波数が高い超同期振動である。この回転非同期軸振動が超同期であるため、その発生原因の特定が難しくそれらを明らかにするまでにかなりの時間を費やさなければならなかった。

ここで別の実験で明らかにされている旋回キャビテーションの特徴⁽²⁾を紹介する。直径：127 mm, 入口チップ羽根角度：12.0°, 出口チップ羽根角度：12.0°の3枚羽根ヘリカルインデューサの水実験により旋回キャビテーション発生時の高速度写真を図8に示した。この高速度写真からチップと羽根表面上のキャビティ長さの変化を調べたのが図9である。図9によれば1枚の羽根に対応するチップキャビティと羽根表面上キャビティは同位相で振動し、一定の速度でインデューサの入口を旋回していることになる。この旋回速度はまた図9からインデューサの旋回速度よりも速い(約1.2倍)ことが読みとれる。この事実は旋回キャビテーションが旋回失速とは全く異なる別の現象であることを意味している。同実験でのインデューサの上流

Fig. 7 Spectrum analysis of main pump impeller displacements of liquid oxygen turbopump

Fig. 8 Sequence of cavity fluctuations on three blades in rotating cavitation

Fig. 9 Fluctuations of cavity length in rotating cavitation

Fig. 10 Spectrum analysis of pressure fluctuations upstream and downstream of inducer in rotating cavitation

側と下流側の圧力の周波数解析の結果を図10に示した。下流側に比べて上流側において旋回速度に対応する圧力変動が顕著であり、旋回キャビテーションはインデューサ入口部に限られる現象であることが知られる。

以上紹介した旋回キャビテーションの特徴と前記のLE-7液体酸素ターボポンプの軸振動の比較ならびに超同期軸振動発生時のインデューサの性能変化、などから同ターボポンプの超同期軸振動は旋回キャビテーションにともたらされたものと結論した。幸運にもこの旋回キャビテーションはインデューサの上流側ケーシングの内径をわずかに広げることによってほぼ完全に抑止することができた。図11はLE-7エンジンシステムの試験における軸振動の周波数解析の結果である。改善前に旋回キャビテーションによる超同期の軸振動が認められるが、改善後にはその振動は消滅している。

LE-7液体酸素ターボポンプに発生した超同期軸振動の解明が契機となり旋回キャビテーションの研究は大きく進展することとなった。多くの実験が行われ旋回キャビテーションの特徴が一層明確にされたほか⁽³⁾、最初の理論⁽⁴⁾も構築され旋回キャビテーションの発生原因は正のマスフローゲインファクタ(流量に対するキャビティ体積の変化割合に負の符号を付けた

もの)であることが明らかになった。

5. 液体水素ターボポンプの軸系自励振動

液体水素ターボポンプの開発においても様々な軸振動が発生したが、この中から特に難問であった自励振動の問題⁽⁵⁾⁽⁶⁾を紹介する。

同ターボポンプの開発初期に一次危険回転数を越えた直後に1次危険回転数と一致する周波数の自励振動が発生した。この振動の原因として回転軸系の減衰ならびに剛性の不足が考えられた。この対策として軸受支持部に摩擦ダンパーを組み込んだソフトマウント方式(図12)を採用した。また回転軸系の剛性を高めるためにかん合部に対する軸方向締め付力を強化した。

このように改修した液体水素ターボポンプは二次の危険回転数(約20 000 rpm)はクリアできたが三次危険回転数近くで再び自励振動が発生した。この自励振動の発生状況を図13に示した。この自励振動を究明するためにポンプをほぼ締め切り状態として、すなわち軸受は液体水素で冷却するがポンプ内はほぼ低温の水素ガスで満たされる状態で運転した。この結果、自励振動は消え、回転同期の軸振動が顕著となった。このことから自励振動の発生原因は軸系に作用する流体力が関係しているものと判断された。具体的には流体力によって軸方向締め付け力が減少し、1, 2段遠心羽

(a) Original inducer housing

(b) Modified inducer housing

Fig. 11 Spectrum analysis of main pump impeller displacement of liquid oxygen turbopump in LE-7 engine test

(a) Original design

(b) Modified design

Fig. 12 Soft support of self-lubricated ball bearings

Fig. 13 Self-excited vibration of liquid hydrogen turbopump

根車結合部のすべりが生じたと判断して、次の様な対策が行われた。

① 1 段遠心羽根車にバランスホールを設け、1, 2 段遠心羽根車間の開放力を低下させて遠心羽根の軸方向締付力を大きくした。

② 軸系の剛性を上げるため 1, 2 段遠心羽根車のトルク伝達をスプラインからカーブカップリングに変更した。

さらに軸系の振動振幅を少なくするためにソフトマウントの見直しを含めて以下の対策がなされた。

③ 軸系の計算を行いソフトマウントのパネ定数を振動振幅が最少となる最適値とし、三次危険回転数における減衰比が最大となる最適減衰係数を満足するダンパーの減衰を選定した。

④ 遠心羽根車間シールとリフトオフシール下部を減衰の大きな溝付円筒シールとした。

⑤ インデューサの材質をニッケルベースの超耐熱合金(A-286)からチタン合金に変更してオーバーハング量を少なくした。

⑥ ターボポンプ組立時における軸の曲がりを一定値以下におさえることとした。

以上の対策によって液体水素ターボポンプは許容値内の軸振動振幅で定格運転が可能となった。図 14 に LE-7 エンジンシステム試験において計測された軸振動の周波数解析結果を示した。ロケット打上げ時の作動時間と同じ約 6 分間にわたり自励振動は全く発生していない。

6. あとがき

LE-7 液体酸素および液体水素ターボポンプの開発

Fig. 14 Spectrum analysis of shaft vibrations of liquid hydrogen turbopump in LE-7 engine test.

において発生し、その解決に多くの時間と労力を資やしたローターダイナミクスにかかわる 2 つの問題を紹介した。

液体酸素ターボポンプの限界にも近い運転で起こった旋回キャビテーションの問題は幸運にも解決できた。また超高速の液体水素ターボポンプの主に液体水素の低粘度のための減衰不足に起因して発生した軸振動も試験と解析により解決された。なおここに紹介した 2 つの軸振動の問題は、最近高性能ロケットエンジンターボポンプに共通するものであることが明らかになってきた。

ロケットターボポンプは極めて特殊なターボ機械に思われがちであるが、基々は一般産業用で使用されていたポンプやタービンを高速化したものである。ロケットターボポンプで確立した技術や経験が再び一般産業用ターボ機械の高速・軽量化に役立つことを期待している。

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, 機論, 57-554, B (1991), 4023-4028.
- (2) Kamijo, K., ほか 3 名, An Experimental Investigation of Cavitating Inducer Instability, 77-WA/FE-14, ASME Winter Annual Meeting, Atlanta, GA (1997), National Aerospace Lab., Rept. TR-598T (1980).
- (3) 橋本知之・ほか 3 名, ロケット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振動の観察, 機論, 63-607, B (1997), 765-771.
- (4) 辻本良信・ほか 2 名, インデューサの旋回キャビテーションの解析, 機論, 58-551, B (1992), 2052-2059.
- (5) 岡安彰・ほか 7 名, LE-7 ターボポンプの開発経過と現状, IHI 技報, 31-3 (1991), 1-11.
- (6) Kamijo, K., Suppression of Vibrations in the LE-7 Turbopumps, Proceedings of Asia-Pacific Vibration Conference, 1 (1997), 11-18.