

LE-X エンジン用ターボポンプの研究

Development of Turbopump for LE-X Engine

水野 勉 航空宇宙事業本部技術開発センター 宇宙技術グループ 主査 技術士（機械部門）
小林 聡 航空宇宙事業本部技術開発センター 宇宙技術グループ 部長 技術士（機械部門）
小口 英男 航空宇宙事業本部宇宙開発事業推進部 技術グループ 部長

LE-X エンジンは高い信頼性を持ち、性能やコスト面でも国際競争力をもつことを目指した現在研究中の液体酸素・液体水素ブースターエンジンである。開発手法としては品質工学的な手法を取り入れた設計アプローチを用い、従来のエンジン開発手法と一線を画している。また推力 100 トン級であるがエンジンサイクルとしてはエキスパンダブリードサイクルを採用しており、ターボポンプには特長な仕様が要求されている。本稿では、LE-X エンジン用ターボポンプの基本仕様や技術的特長について述べる。

The LE-X is a new cryogenic booster engine with high performance, high reliability, and low cost, which is designed for the next generation Japanese launch vehicle. It will be the first booster engine in the world with an expander cycle. In the designing process, the characteristics of a turbopump and other components can simultaneously be evaluated in engine system calculation with response surface models that have the characteristics of information of turbopump of various shapes. This paper reports the characteristics of LE-X engine, and baseline specifications of turbopump.

1. 緒 言

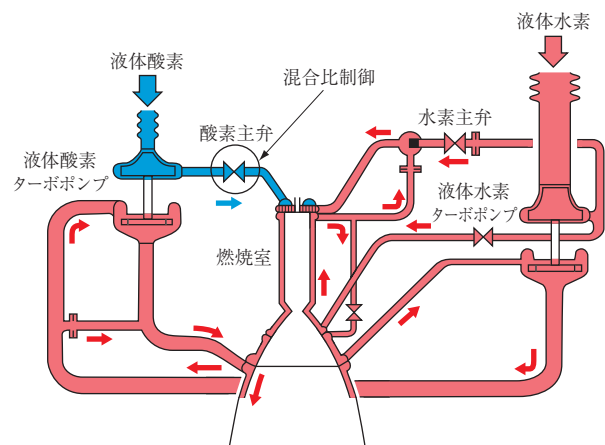
H-I ロケットが打ち上げられたのは 1986 年 8 月であり、このロケットの 2 段目に搭載された国産初の液体酸素・液体水素エンジン LE-5 のターボポンプは IHI 製であった。以来 24 年、H-II、H-IIA、H-IIB とロケットは変遷し、エンジンも LE-5A、LE-5B、LE-7、LE-7A と開発されてきたが、当社は JAXA（独立行政法人宇宙航空研究開発機構）契約のもとにすべてのターボポンプの設計および製造を担ってきた。

一方で将来の再使用ロケットや有人ロケットに使用する発展性を考慮した機能と性能をもちつつ、信頼性を高く向上させることで国際競争力を確保したブースターエンジンが必要であるという認識から、現在 JAXA とメーカーが LE-X エンジン⁽¹⁾を共同で研究している。第 1 図に LE-X エンジン外観を示す。LE-X エンジンは液体酸素と液体水素を推進薬として、シンプルでロバストなエンジンサイクルであるエキスパンダブリードサイクル⁽²⁾を大推力化するものである。第 2 図に LE-X エンジンサイクルを示す。エキスパンダブリードサイクルでは、タービン駆動ガスが燃焼ガスではないため、エンジン出力が緩やかに変化し、破滅的事象を起こす可能性が極めて少なく、将来の有人輸送システムに本質的に適応していると考えられる。

本稿では LE-X エンジンの基本仕様や当社が設計を担当しているターボポンプの技術的特長について述べる。



第 1 図 LE-X エンジン外観図
Fig. 1 Image of LE-X engine



第 2 図 LE-X エンジンサイクル
Fig. 2 LE-X engine cycle

2. LE-X エンジン研究開発概要

2.1 エンジンコンセプト

LE-X エンジンのトップコンセプトの一つとして信頼性の向上があげられる。エンジンサイクルとしてエキスパンダブリードサイクルを採用することによってガスジェネレータサイクルや2段燃焼サイクルに必要な副燃焼器を持たず、エンジンシステムを簡素化して信頼性を向上させている。

一方で、エキスパンダブリードサイクルはタービン駆動ガスを予燃焼させないために、所要出力を得るには高いタービン効率が必要とされる。また大出力を得る別の方法としてタービン駆動ガス流量を増加させる手段もあるが、エンジンの比推力を低下させることになるため、一般的には大推力エンジンにはエキスパンダブリードサイクルは適さないとされてきた。LE-X エンジンではその課題解決に向けて、品質工学的な手法を取り入れた設計アプローチを行い、網羅的な設計解空間から多目的最適解を選定することによって、高いターボポンプ効率およびエンジン比推力を確保する研究を進めている。

またエンジン最適設計を行うに当たり、エンジンシステムとターボポンプ間に独創的なインタフェースモデルを構築することによって⁽³⁾、従来多大な労力を費やしていたエンジンとターボポンプ間インタフェース仕様の仮設定と、ターボポンプ局所最適設計の繰り返し計算を不要にし、ターボポンプを含めたエンジンシステム全体の最適設計を行うことを可能にした。

2.2 エンジン諸元および仕様

LE-X エンジンの主要諸元（暫定）を第1表に示す。

LE-X 技術実証エンジンの推力は1448 kN、燃焼室圧力は12.5 MPaである。

またターボポンプの仕様を第2表に示す。

液体水素ターボポンプ（以下、FTP と呼ぶ）については、ノミナル回転数が40144 rpm と LE-7A エンジン（以下、LE-7A と呼ぶ）並であるが、タービン膨張比については9.3 と高い値となっている。またポンプ側については副燃焼器に送り込む高い圧力を必要としないため、吐出圧力は18.3 MPa と LE-7A と比較して約6割程度に低くなっている。

さらに、液体酸素ターボポンプ（以下、OTP と呼ぶ）についても、ノミナル回転数は16573 rpm と LE-7A 並であるが、タービンの入口圧力は1.22 MPa と極端に小さい。

第1表 LE-X エンジン主要諸元

Table 1 LE-X engine characteristics

項目	単位	LE-X
推力（真空中）	kN	1448
燃焼圧力	MPa	12.5
混合比	-	5.9
膨張比	-	37

第2表 ターボポンプ仕様

Table 2 LE-X turbopump characteristics

項目	単位	FTP	OTP
回転数	rpm	40144	16573
ポンプ流量	kg/s	49.7	293.3
タービン流量	kg/s	7.9	6.8
ポンプ吐出圧	MPa	17.6	19.2
タービン膨張比	-	9.3	2.4
ポンプ効率	-	0.75	0.75
タービン効率	-	0.50	0.70
動力	kW	16148	6277

一方で、タービン膨張比は2.35 と LE-7A と比較して高いが、タービン出口温度はノミナル359K と極めて低い値を示していることが LE-X エンジンターボポンプ仕様の特長として挙げられる。

LE-X エンジンの信頼性において重要性の高いアイテムおよび一部の新規技術については、事前にコンポーネントレベルでの実証を予定しており、ターボポンプ関連についてはポンプリグ試験およびタービンリグ試験を実施し、その後ターボポンプ単体試験および燃焼器単体試験を行い、最終的には原型エンジン技術実証試験で LE-X エンジンシステム技術的成立性を見極めを行う予定になっている。

3. LE-X エンジンの特徴

3.1 エンジン作動点選定

従来、エンジンシステムの間作動点選定は、エンジンシステムにおける幾つかの制約条件に適合する作動点を限られた項目に対して比較検討することで決定してきた。ただし近年、設計開発における QCD 改善を目指し、より多目的な最適化設計が提唱されている。

本研究ではエンジンシステム作動点選定作業において、従来行われていたインタフェース仕様設定とターボポンプの繰り返し設計をなくし、エンジンシステム全体の最適検討を円滑に行うことを目的として、エンジンシステムとターボポンプ間に独創的なインタフェースモデルを構築し試行した⁽³⁾。

具体的には以下に示すターボポンプ特性をまとめて表す

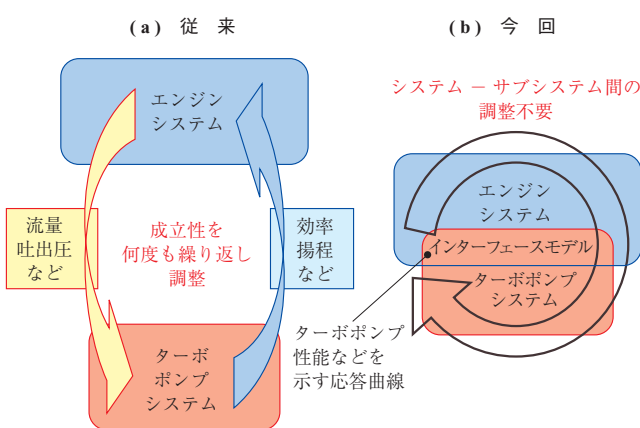
ことのできるターボポンプインタフェースモデル（エンジンシステムと共有する設計パラメータを引数とした応答曲面）を構築した。

- ・ターボポンプ特性：設計線図
- ・ターボポンプ特性：性能曲線
- ・ターボポンプ成立性を示す評価指標

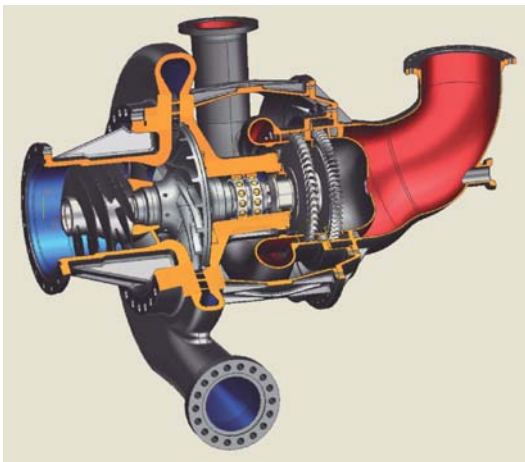
インタフェースモデルをエンジンシステムに統合することによって、今まで頻繁であったインタフェース調整情報交換を削除することを可能にした。また個別に局所最適を行っていたエンジンとターボポンプの設計マージンを横並びで配分することで、エンジンシステム全体の最適化作業を円滑に実施することを可能にした。第3図にイメージ図を示す。

3.2 液体水素ターボポンプ

第4図にFTP外観図を示す。エキスパンダブリードサイクル採用に伴う要求吐出圧力の緩和から、ポンプ揚程は



第3図 インタフェースモデル
Fig.3 Interface model



第4図 液体水素ターボポンプ外観図
Fig.4 Image of FTP

2段インデューサならびに単段の高揚程インペラで確保する。一方でインペラの単段化などによって軸長を短縮することで、40 000 rpm 以上という高回転ながら二次危険速度以下の運転を可能にする。また低コスト化と製造制約条件の緩和および構造強度の余裕を確保するという観点からインペラはオープンシュラウド形態を採用する。

第5図に2段インデューサ試験状況を示す。

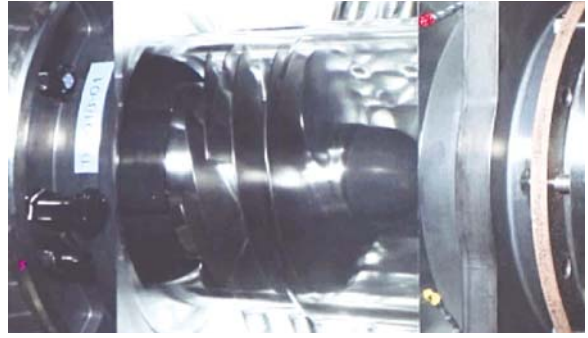
2009年3月に行った試験の結果ではLE-Xエンジンに要求される機能と性能を満足していることを確認した。またインペラ水流し試験状況を第6図に示す。インペラについても2009年2月に水流し試験を実施し、LE-Xエンジンに要求される機能と性能を満足していることを確認した。

さらに、軸受は軸受冷却流量の低減によってポンプ効率を向上させる目的でハイブリッドセラミック軸受を選定し、タービンは低エンタルピーのタービン駆動ガスから大出力を得るためにタービン膨張比を大きく設計した超音速タービンを採用する。

なお、全デバイスおよびターボポンプシステム設計において品質工学的な設計アプローチを適用する⁽⁴⁾。

3.3 液体酸素ターボポンプ

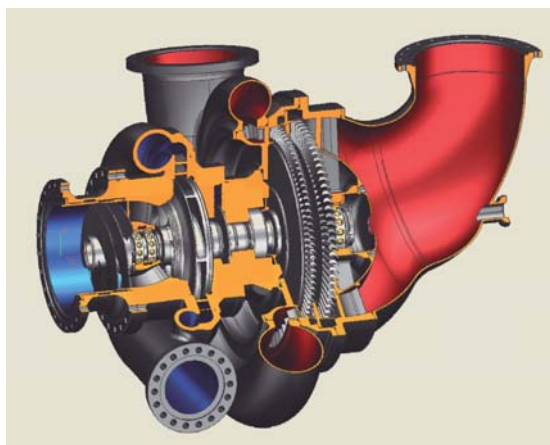
第7図にOTP外観図を示す。エキスパンダブリードサ



第5図 FTP 2段インデューサ
Fig.5 FTP 2 stage inducer



第6図 FTP オープンインペラ
Fig.6 FTP open impeller



第7図 液体酸素ターボポンプ外観図
Fig.7 Image of OTP

イクル採用によって OTP タービン入口圧力は低下し、ターボポンプに大出力を発生させるためには速度比およびノズル面積を大きく設計する必要があることから、タービンディスク直径は非常に大きくなる。OTP の一次危険速度における振動モードはタービン端が最も振れ回るモード形状であり、一次危険速度を超える領域で定常運転させることは、内部減衰に起因した減衰不足による不安定振動の発生が懸念される。したがって OTP は、一次危険速度以下を運転領域とする剛性ロータ形態を採用する。

具体的にはタービン背面側に軸受を設置し、インデューサ、インペラ、シールおよびタービンなどの主要な構成部品を2つの軸受間に配置する。従来は自己潤滑方式を採用していた軸受の潤滑方式については揮油含浸潤滑方式を予定している。これはエキスパンダブリードサイクルの採用によって、タービン出口温度が360 K程度まで低下する特徴を生かしたものである。なおインデューサとインペラについては LE-7A で培った高吸込比速度設計を適用する。また軸封シールおよびポンプ側軸受けについては LE-7A で適用した実績のあるデバイスを最大限に活用する。

なお、FTP と同様に全デバイスおよびターボポンプシステム設計において品質工学的な設計アプローチを適用する。

4. 結 言

LE-X エンジンに関する研究の概要、エンジン基本仕様やターボポンプの技術的特長について紹介した。

LE-X エンジンは、世界で初めて大推力エンジンにエキスパンダブリードサイクルを適用したエンジンであり、設計アプローチとしては品質工学的な設計手法と高度な解析技術を採用し、エンジンとターボポンプ間での独創的なインタフェースモデルによる統合的な設計を採用したエンジンである。

今後、各種要素試験を行った後、ターボポンプ単体試験によって所定の機能および性能を確認したうえで、原型エンジンの技術実証試験で LE-X エンジンシステムの技術的成立性を見極めを行う予定である。

— 謝 辞 —

本研究に当たっては、JAXA 宇宙輸送系推進技術研究開発センターの関係者各位から多くのご助言とご協力をいただきました。ここに記し、深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 沖田耕一：LE-X エンジンの研究開発 JAXA 宇宙航空技術研究発表会前刷集 2008年11月 pp.42 - 43
- (2) H. Sunakawa, A. Kurosu, K. Okita, T. Tamura, T. Onga, A. Ogawara, K. Mitsuhashi, T. Mizuno and S. Kobayashi : Visualization and Optimization of LE-X Engine System ISTS 2009-a-04 (2009)
- (3) 三橋ほか：LE-X エンジンシステムの統合化設計に用いるターボポンプインタフェースの構築 第53回宇宙科学技術連合講演会 京都 2009年9月
- (4) 呉 宏堯, 森 初男, 鈴木秀男, 松浦 峻, 長谷川雄大：統合的設計管理手法に関する研究(その1) - 「セット・ベースド・デザイン」と「モデル・ベースド・リスクマネジメント」- 品質管理学会第38回年次大会研究発表会発表要旨集 2008年 pp.13 - 16