

ロケットエンジン信頼性向上の研究開発

Research and development to improve reliability of rocket engines

ロケットエンジン研究開発センター

Rocket engine research center

志村隆、田村洋、熊川彰長、吉田義樹、山田仁

Takashi Shimura, Hiroshi Tamura, Akinaga Kumakawa, Yoshiki Yoshida, Hitoshi Yamada

Abstract

Research and development to increase reliability of rocket engines, such as LE-7A and LE-5B, were conducted in the present study. Amplitude of turbopump rotor vibration due to rotating cavitation was suppressed by modification of inducer design and optimization of inducer liner geometry. Cryogenic inducer test facility to investigate various aspects of inducer performance in cryogenic fluids was newly constructed. Tests of a cryogenic inducer have been conducted. Excessive lateral thrust of LE-7A engine during start and stop transients was investigated to find a method to suppress it. Low cycle combustion pressure oscillation encountered in the LE-5B engine was also investigated to suppress the oscillation.

1. はじめに

H-II ロケット 8 号機および H-IIA ロケット 6 号機の失敗から、ロケットエンジンの信頼性向上があらためて求められている。H-II ロケット 8 号機の失敗に関しては、LE-7 エンジン液水ターボポンプのインデューサに問題があったと指摘されている。また、LE-7A の初期設計液水ターボポンプでは、キャビテーション発生に伴う振動現象により過大な軸振動が発生した。この液水ターボポンプに発生した過大な軸振動については、キャビテーション発生に伴う旋回失速類似現象により 2 次の危険速度に近い、回転同期周波数の約半分の周波数を持つ振動によるものと解明された。インデューサの設計改良によりこの現象を抑止し、H-IIA ロケット 2 号機から改良型液水ターボポンプを搭載し、5 号機まで打ち上げに成功している。

LE-7A の液酸ターボポンプに関しては、実液を用いた試験でポンプ流量が多い作動条件において回転同期周波数の旋回キャビテーションにより過大な軸振動が発生する場合があったが、ターボポンプによる個体差が大きかった。このため、軸振動が許容範囲に収まる供試体か否かを技術試験により確かめながら 7 号機までは従来型液酸ターボポンプを用いることとなった。一方、根本的な解決策として、JAXA、大学、企業が合同設計チームを結成しインデューサの改良設計およびインデューサライナ形状の最適化により旋回キャビテーションの抑止と吸込性能向上を図り、改良型液酸ターボポンプを H-IIA ロケット 8 号機から搭載することを目指して、改良効果を確認する技術試験を行っている。また、インデューサ可視化試験により旋回キャビテーション抑止メカニズムの解明を進めている。

ロケットエンジンの心臓部であるターボポンプの中でも特に重要な部品であるインデューサに関しては、極低温液体の特性も性能に密接に関係するため水試験ばかりでなく実際の極低温液体での単体試験が望まれてきた。ターボポンプの形態でインデューサの限界性能を試験することにはオーバースピンなどの危険性を伴うため、電動機駆動でインデューサの極低温試験を安全確実に実施できる極低温インデューサ試験施設の整備を進め、平成 15 年度始めに完成した。この極低温インデューサ試験施設を用

いて、インデューサ試験機を含めた総合調整試験を実施している。

LE-7A エンジンのノズルに関しては、開発試験中に発生した起動/停止過渡条件での過大横力(最大で規定値の3倍)が発生したため、その原因究明と対策を目的に研究を進めてきた。その結果、過大横力の原因は以下の2つであることを示した。即ちノズル形状により発生するRSS(Restricted Shock Separation)とよばれる流れ構造の生成・消滅に伴う過大横力と、ノズル形状の微少な段差に伴う剥離の不安定挙動による過大横力である。諸外国も含め、ノズルの設計及び運用条件から、過大横力が発生するかどうかを判断する手法は確立されていない。そこで、過大横力に対するノズル設計評価法を確立することを目的として、LE-7A エンジンの旧ノズル設計法、改良ノズル設計法、及び欧米で採用されている放物型ノズル設計法の3種の設計法で設計したノズルのサブスケール燃焼試験を実施した。また、燃焼試験を補足するコールドフロー試験を実施し、ノズル形状に対する評価を実施した。

LE-5B エンジンに関しては、燃焼試験で観察された比較的大きな低周波燃焼振動を低減することを目的に研究を進めてきた。過去のサブスケール試験結果等を再検討して、低周波燃焼振動を低減するためには、液体酸素の微粒化を促進させるような噴射器形状の改良が有効であると推論した。この推論結果に基づいて製作した数種の噴射器を用いた燃焼実験をおこない、その改良が低周波燃焼振動の低減のために有効であるか否か調べた。

ここでは、以上に述べたようなロケットエンジン信頼性向上に関わる項目について、平成15年度に得られた成果について述べる。

2. 成果概要

平成15年度の成果について、各項目別に概要を述べる。

(1) LE-7A 改良液酸インデューサ

キャビテーションタンネルにおける水試験で回転同期および超同期の旋回キャビテーション抑止が確認されたインデューサとインデューサライナの組み合わせについて、実液を用いたターボポンプ試験を行い、実際のターボポンプで旋回キャビテーションが抑止されることを確認した。ターボポンプ試験は、図1にロータ系とケーシング系を合成した写真を示したLE-7A 液酸ターボポンプを用いて行った。改良液酸インデューサおよび形状を最適化したインデューサライナを組み合わせで装着したターボポンプについて試験を行った結果を従来型の結果と比較して図2に示した。図2は軸振動のFFT結果をウォーターフォール線図の形で示したもので、縦軸が軸変位の振幅、横軸が振動周波数を1kHzの帯域で示している。試験では定常回転数18,300rpm(回転同期周波数が305Hz)に達してから時間と共にポンプ入り口圧を降下させて、キャビテーション係数((入り口圧ヘッド-蒸気圧ヘッド)/インデューサチップ周速の速度ヘッド)と軸振動の発生の関係を調べた。図2上段の図に示した従来型インデューサの試験結果では、キャビテーション係数を低下させていくと回転同期の旋回キャビテーションにより急激に軸振動の回転同期成分が増大している。また、回転同期の旋回キャビテーション発生前に、振幅は大きくないが、超同期の旋回キャビテーションにより、回転同期周波数の1.2倍程度の周波数を持つ軸振動成分が現れている。

一方、図2下段の図に示した改良型インデューサ試験結果では、キャビテーション係数を低下させて行っても回転同期および超同期の旋回キャビテーションは発生せず、旋回キャビテーションによる軸振動の発生が見られず、実液を用いたターボポンプ試験においても旋回キャビテーションが抑止されることが示された。しかしながら、図に見られるように新たにキャビテーションサージ(周波数約80Hz)

による軸振動成分が発生している。サージ現象に関してはシステムの特性が関係しており、実際のエンジンでは液酸ターボポンプ入り口近傍に設けられた POGO 抑制装置（アキュムレータ）により減衰されることが期待された。また、ターボポンプ試験では液体窒素試験と液体酸素試験を行い、キャビテーションサージ現象は液体酸素試験の方が起きやすいことを示した。

液酸インデューサ改良のもう一つの目的である、吸込性能向上についてターボポンプ試験で調べた結果を図 3 に示した。縦軸のインデューサ基準揚程比はキャビテーション係数が高い領域での揚程を 1.0 とした時のインデューサ揚程を示している。従来型インデューサの吸込性能曲線群はキャビテーション係数 0.035 付近で低下を始めているのに対し、改良型インデューサの吸込性能曲線群はキャビテーション係数 0.02 付近まで揚程の低下が見られず、改良により吸込性能が格段に向上していることが示された。

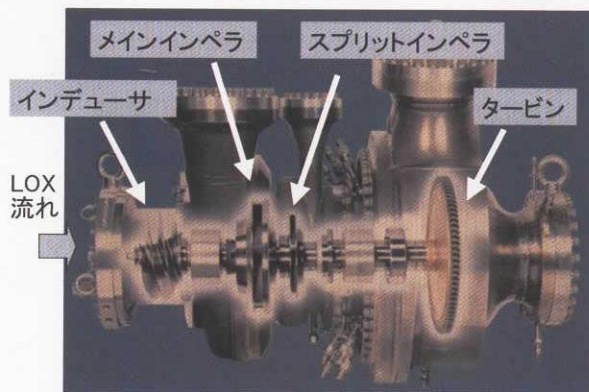


図1 LE-7A 液酸ターボポンプ

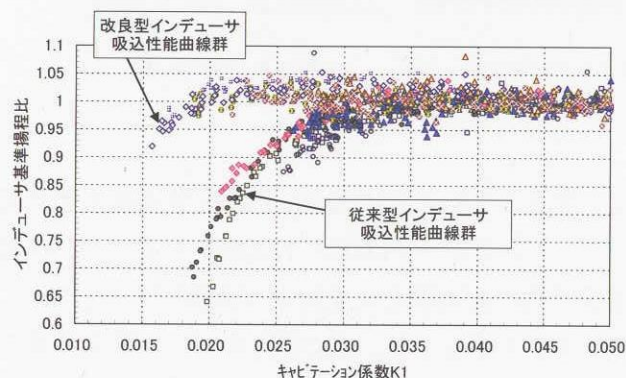


図3 従来型と改良型吸込性能比較

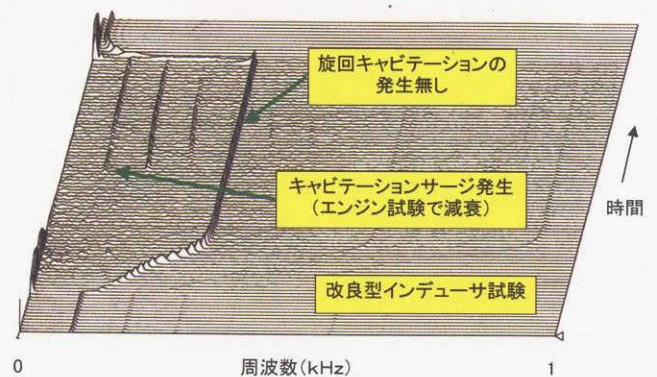
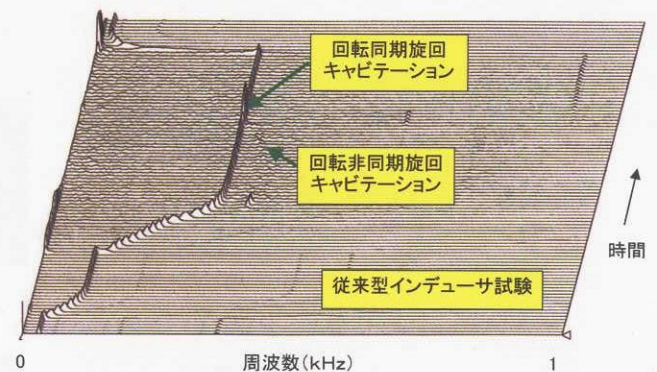


図2 液酸ターボポンプ軸振動

インデューサライナ形状を最適化することにより旋回キャビテーションが抑止されるメカニズムを究明するために、キャビテーションタンネルを用いた可視化試験を実施した。図 4 に試験に用いた二通りのインデューサライナ（ケーシング）形状を示した。上が段差なしケーシングでインデューサ前縁部から上流までケーシング内径が同じである。下が段差ありケーシングでインデューサ前縁部から上流側でケーシング内径が拡大している。これら二つのケーシング形状について PIV 可視観察した結果を図 5 に示した。図 5 中の破線位置は、インデューサ翼前縁部を示す。図 5 の上 2 枚は同じキャビテーション係数で運転した結果であるが、段差なしケーシングでは翼前縁付近ミッドスパン（図中楕円で囲んだ部分）でベクトルが乱れているのに対して、段差ありケーシングではベクトルが乱れていない。これは、

高速度撮影の観察結果と併せて観察すると、段差なしケーシングではキャビテーションが前縁チップ付近に弱く発生しているのに対して、段差ありケーシングでは殆ど発生していないことによると考えられる。即ち、段差ありケーシングの方が段差なしケーシングよりも前縁付近でキャビテーションが発生し難いことを示している。

一方、逆流領域の大きさを図5のベクトルから見てみると、矢印で示した逆流領域は段差ありケーシングの方が段差なしケーシングよりも上流まで至っている。キャビテーションの発生状況と逆流領域の発達状況から旋回キャビテーション抑止メカニズムを推定してみる。段差ありケーシングでは前縁翼端隙間が大きく翼負荷が小さくキャビティの発生量が小さい。また、段差ありケーシングでは逆流量が大きく主流が加速されることにより迎え角が減少してキャビティの発生量が小さくなる。これらのことから段差ありケーシングでは、不安定現象の要因となっているマスフローゲインファクターが小さくなり安定性が増したと推定される。

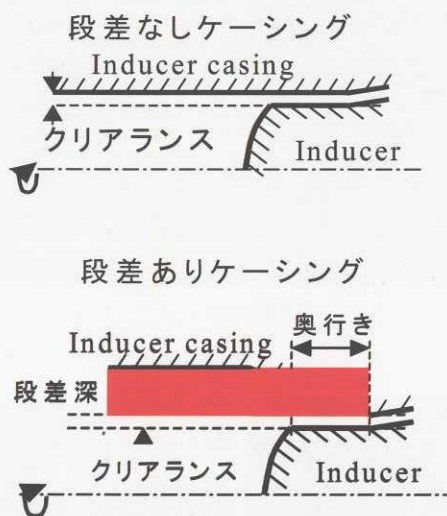


図4 インデューサケーシング形状

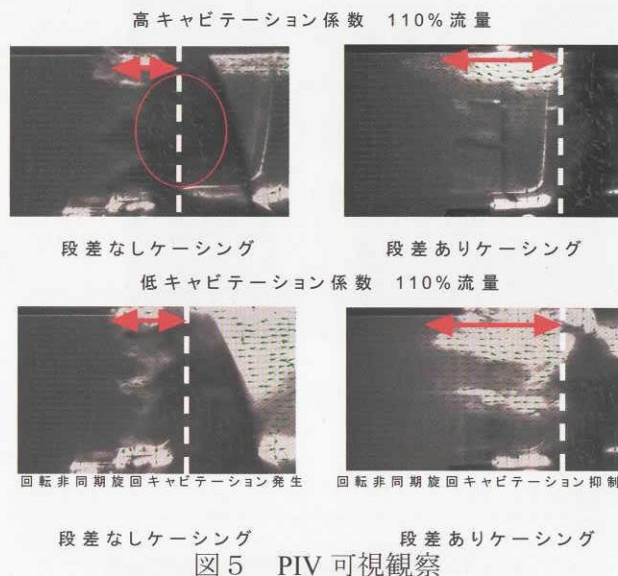


図5 PIV 可視観察

(2) 極低温インデューサ試験施設

図6に概略系統を示す極低温インデューサ試験施設を平成15年4月に完成した。配管系統を切り替えて液体窒素試験と液体水素試験を実施することができる。インデューサは出力1,400kWのインバータ電動機で駆動するため、タービン駆動では危険を伴う限界吸込性能試験を安全確実に実施できる。また、ランタンク内の液体窒素の温度をガス加圧と液の循環により上げること、および真空ポンプによる減圧と液循環により下げることができる機能を有する。試運転により液温上昇側は、 -196°C から -187°C まで 9°C の上昇、液温低下側は -196°C から -200°C まで 4°C の降下をさせる温度制御を達成した。

各機器の調整試験後、LE-7A 改良液酸インデューサを試験機に組み込んで、図7に試験風景を示すような設備の総合調整試験を行い、限界吸込性能および熱力学的効果に関するデータを取得した。図8に吸込性能試験結果を水試験の結果と比較して示す。液体窒素(LN2)を用いた場合の方が水を用いた試験結果よりも吸込性能がかなり良く、改良液酸インデューサでは熱力学的効果が大きく現れている。LN2温度 -197°C と -193°C の結果を比較すると、同一の液体での液温の違いによる熱力学的効果の差が比較できる。液温が高い場合の方が熱力学的効果が大きく、吸込性能が向上している。図8でCI04004Nの吸込性能曲線は他の試験よりも流量を絞った運転条件の試験結果を示している。

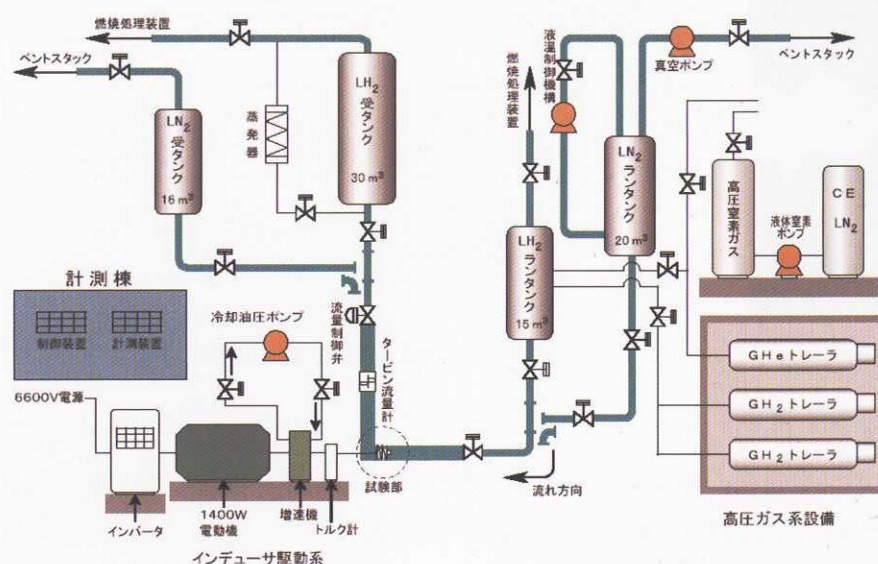


図6 極低温インデューサ試験施設系統

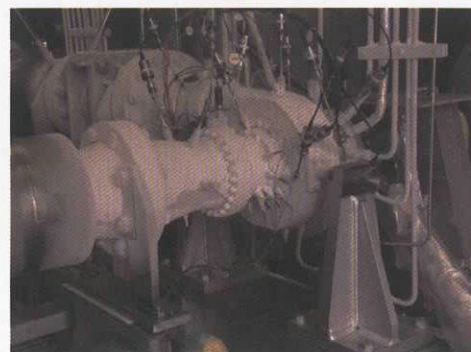


図7 総合調整試験

Cavitation performance

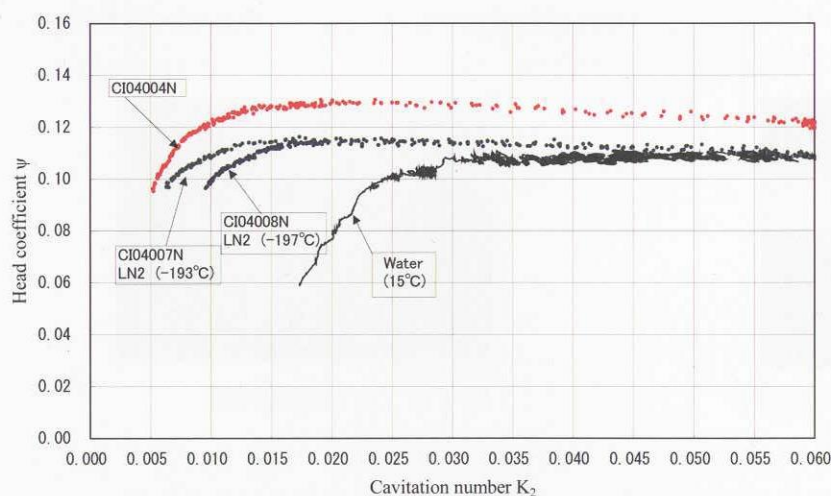


図8 LE-7A 改良インデューサ極低温試験と水試験比較

(3) LE-7A エンジン横推力の低減

LE-7A エンジンの旧ノズル設計法、改良ノズル設計法、及び欧米で採用されている放物型ノズル設計法の3種の設計法で設計したノズルのサブスケール燃焼試験を実施した。図9にサブスケール燃焼試験風景を示す。燃焼試験結果及びTDK解析結果から、RSSの発生条件について評価し、RSS発生に関係する、垂直衝撃波と剥離の相対位置がある閾値を超えるとRSSが発生する可能性があることを示した。図10にRSSが発生する判別条件を示した。この成果により、今後設計するエンジンにおいて、1. ノズル形状、2. 起動時の混合比条件 がわかれば、RSSが発生する可能性があるかを判別できる。

また、発生する横力の大きさは、起動/停止時の燃焼室圧力の変化率に依存することが判った。即ち、燃焼室圧力の変化率が大きいと発生横力は小さく、逆に変化率が小さいと発生横力は大きくなることを示された。

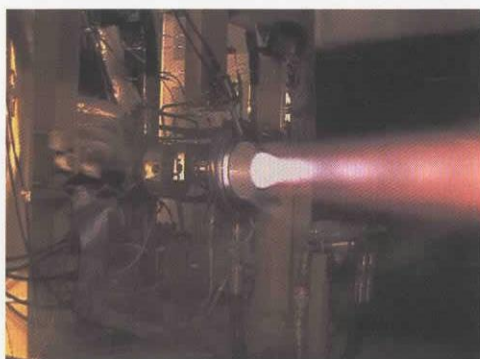


図9 サブスケール燃焼試験

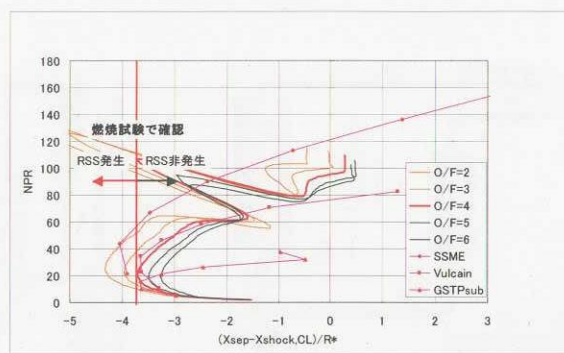


図10 RSS 発生の判別条件

(4) LE-5B エンジン改良噴射器

LE-5B噴射器の高周波・低周波燃焼安定性の向上のための改良型噴射器の性能を評価して、噴孔形状と白色低周波振動および高周波燃焼振動特性の相関データを取得した。図11にサブスケール燃焼試験風景を示す。図12に改良型噴射器の写真を示す。

試験結果を解析した結果、低周波振動のレベルは、液酸分裂周波数の増加、リセスの増加、噴孔出口のテーパー化により低減することを見出したが、一方で、これらの変更は高周波燃焼振動の原因にもなることも判明した。本研究成果は、LE-5Bエンジンの白色低周波振動を低減した噴射器の設計資料として開発に寄与した。

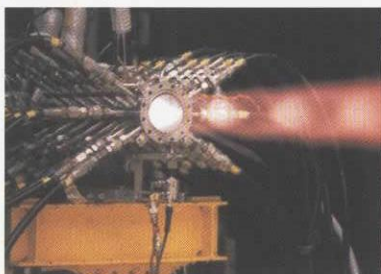


図11 サブスケール燃焼試験の様子

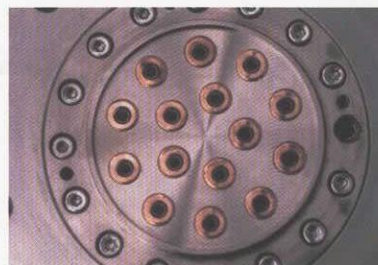


図12 改良型噴射器

3. まとめ

LE-7A 液酸インデューサの改良設計およびインデューサライナ形状の最適化により旋回キャビテーションの抑止に成功したが、新たにキャビテーションサージが発生し、その対策が求められている。現在、旋回キャビテーションの抑止、キャビテーションサージの抑止、吸込性能低下防止のバランスのとれたインデューサライナ形状を見いだす研究を続行している。極低温インデューサ試験施設が本格的に稼働すれば、水試験で性能向上が確認された供試体についてターボポンプ試験に入る前に極低温液体による吸込性能確認試験が実施できるので、目的に合わせて最適な試験形態を選択することができる。

より精度の高い横推力推定を行うためには、ノズル設計・燃焼圧とRSS発生条件の関係を明らかにする必要がある。また、RSS発生条件の境界で、RSSが発生していないにもかかわらず、RSS発生時よりも大きな横力が観察される条件が存在した。この現象の解明及び回避する設計条件について明らかにしていく予定である。

LE-5B 信頼性向上のため、改良噴射器について、エレメント形状が燃焼振動に与える影響を水噴霧試験、サブスケール燃焼試験、および数値解析をおこなって評価し、燃焼振動に関わる噴射器設計の体系化を図って行く。