

LNG（液化天然ガス）ターボポンプの CFD シミュレーション

木村俊哉、長谷川恵一、吉田義樹、
宇宙航空研究開発機構 総合技術研究本部 ロケットエンジン研究開発センター

安富義展
石川島播磨重工業（株）

CFD Simulation of LNG Turbopump

by
Toshiya Kimura, Keiichi Hasegawa, Yoshiki Yoshida, and Yoshinobu Yasutomi

ABSTRACT

3D CFD simulation was performed to examine the internal flow in a LNG turbopump. Rocket Engine Research Center of JAXA has been constructing an engine test bed, in which LNG (Liquid Natural Gas) is used as a propellant. The engine test bed has a LOX/LNG turbopump to pressurize propellants. The LNG turbopump section was built so far and the preliminary tests of this section have been started. The LNG turbopump uses an open impeller to meet the requirement of a low specific speed of 87 ($m, m^3/min, rpm$) and to avoid manufacturing complexity. A balance piston is adopted to keep thrust balance. The internal flow network is very complex and hard to estimate flow rates inside the pump in experiments. CFD analysis was performed for the LNG turbopump section to estimate internal flows and to predict performances of the pump. The calculated results were compared with experimental data and showed reasonable agreements.

1. はじめに

ロケットエンジン研究開発センターでは、将来のロケット推進剤の候補である LNG（液化天然ガス）を用いたエンジンテストベッドを構築している^{1,2)}（図1）。これは推力1トン級のエンジンシステムであり、LOX/LNG ターボポンプ、燃焼器、電動バルブ等から構成されるが、現在まで LNG ターボポンプが完成し、ポンプ単体試験の一部が完了している。本システムの LNG ターボポンプは高回転、小流量、高揚程型で、インデューサの無いオープンインペラ形式である。また、軸推力調整のためにバランスピストン方式を採用している。そのため、インペラ周りの循環量が多く、フローネットが複雑なポンプである。

そこで、複雑な内部流れの様子を把握するために CFD 解析を行った。また、このようなポンプの特性を CFD でどの程度模擬出来るかを調べた。

比速度のポンプである。また、オープンインペラ形式を採用しており、軸方向のスラストバランスにはバランスピストン方式を用いている。

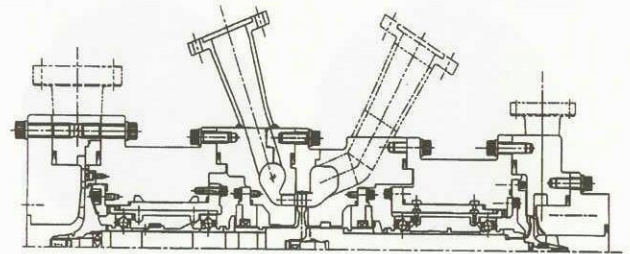


図 2a LOX/LNG ポンプ全体図



図 2b インペラ



図 2c ポンプ単体試験セットアップ

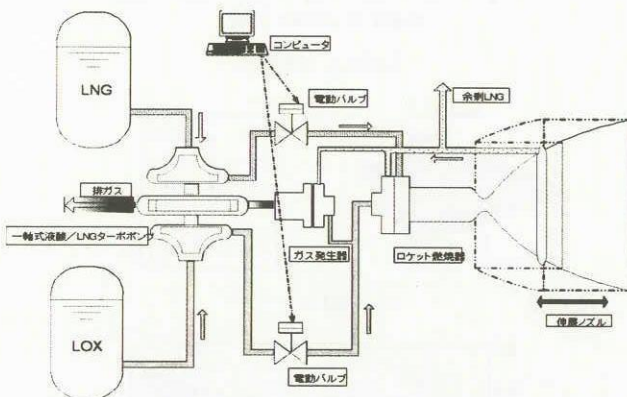


図1 LNG エンジンテストベッド概念図

2. LNG ターボポンプ

LOX/LNG ターボポンプは1軸式でタービンを挟んで回転軸の両端に LNG ポンプと LOX ポンプが配置している。図2a はターボポンプの概念図である。図において、左側に LNG ポンプ、右側に LOX ポンプが設置されている。現在 LNG ポンプが完成して、その単体試験が IHI（石川島播磨重工業（株））の相生工場で行われた。図2bと2cはポンプインペラの写真と単体試験時のポンプ全体の写真である。

本ポンプの特徴は、50,000rpm を超える高回転・高揚程、かつ低流量であり、比速度は $87[m, m^3/min, rpm]$ となる極低

インペラは、6枚の長翼と6枚の短翼からなり、主板には12個のバランスホールが開いている(図3参照)。インペラの外周には7枚のデフューザベーンが配置されていて、さらにその外側にポリウートケーシングがある。インペラ背面には外周と内周の2ヶ所にオリフィスがあり、それぞれのオリフィスを通して流体はバランスホールを通してインペラ前面に戻り、一部は軸受冷却流れと合流してケーシングに設けたドレン部より排出する(図4参照)。

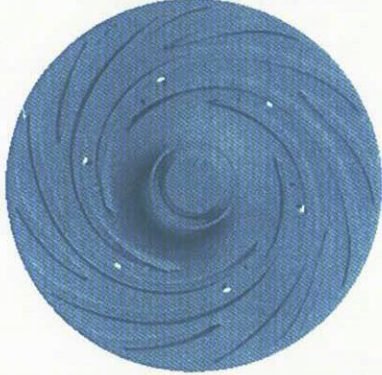


図3 インペラ正面図

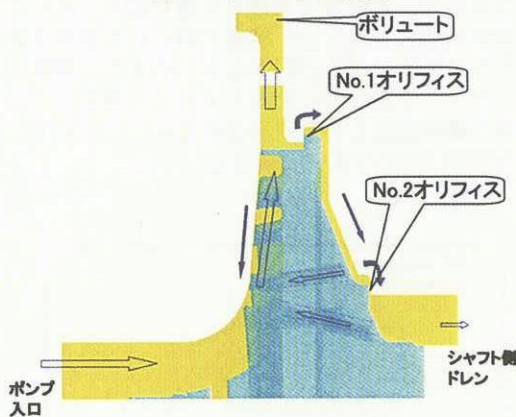


図4 ポンプ内部フローネットワーク

3. 数値計算

計算は市販の汎用熱流体コード (STAR-CD, ver.3.15)を用いて、定常・非熱解析を行った。解析領域はポンプの上流管から下流管まで、インペラ、ケーシング、ポリウートケース等の図面及びCADデータを基にして計算格子の生成を行った。図5aは解析モデルにおける各パーツの形状を示しており、図5bはインペラ表面格子の様子を示している。物体表面はプリズムセル、内部はテトラセルで構成し、全部で約340万セルである。

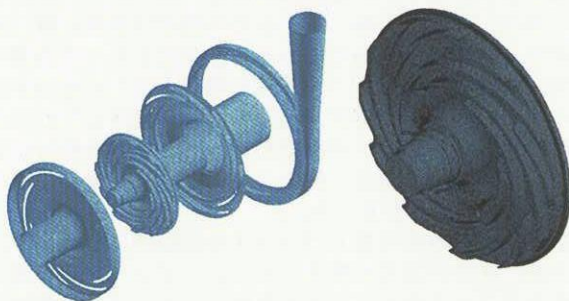


図5a LNG ポンプ構成 図5b インペラ表面格子

解析条件は、単体試験時の設計流量、低流量比、高流量比の3通りを設定した。それぞれの場合における、ポンプ回転数、入口圧、流量については表1に示す。

表1 解析条件

試験番号	回転数 [rpm]	入口圧 [Mpa]	流量 [l/sec]	Q/Qd
TPC808	50400	0.79	3.31	0.99
TPC809	50100	0.66	2.96	0.89
TPC810	53675	0.52	3.79	1.06

4. 計算結果

4. 1 圧力・速度分布

本節では主に設計流量時(試験番号 TPC808)の結果を示す。図6aはポンプ内部において回転軸に垂直な断面及びインペラ表面の圧力分布を示している。図6bは回転軸を含む面内の圧力分布を示しており、()内は試験時の測定値を示す。

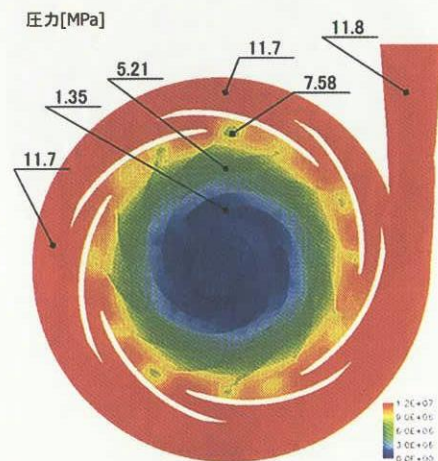


図6a 回転軸に垂直な断面における圧力分布

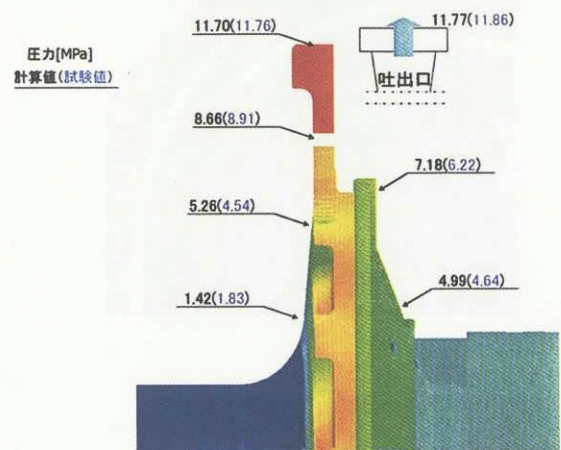


図6b 回転軸を含む断面における圧力分布

メタンは、インペラ内で加圧されるが、デフューザベーンからポリウート内ではほぼ様な圧力となっている。またインペラ出口からデフューザベーン入口間では周方向に圧力が不均一になっており、部分的に島状に低圧部が生じている。ベーン入口での不均一性はベーン形状を改良することで改善されると期待される。計算結果ではインペラ出口からデフューザベーン入口までの圧力回復は大きい、デフューザベーン内での圧力回復は小さく、デフュー

ザ内で圧力はほぼ均一になっている。しかし計算結果は、試験での測定値とほぼ試験値に近い値が再現されている。

図7aは図6aの圧力分布と同一面での速度分布、図7bはその一部の拡大図を表している。図に示されるようにディフューザペーンからの流出が、ペーンごとに異なっており、またディフューザ入口で部分的に閉塞が起こっている。図7bは閉塞している領域を拡大しているが、ディフューザペーンの入口で渦が生じて、ポリュートからは逆流が生じている様子がみられる。この渦によって図6に示した圧力の低下が生じている。しかしながら、試験では異常な振動等は観察されてなく、これらのディフューザの部分的な閉塞や圧力の不均一性はポンプの性能に特に大きな影響を与えているものではない。

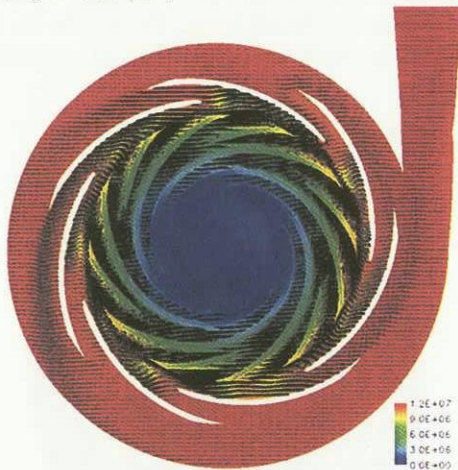


図7a 速度分布

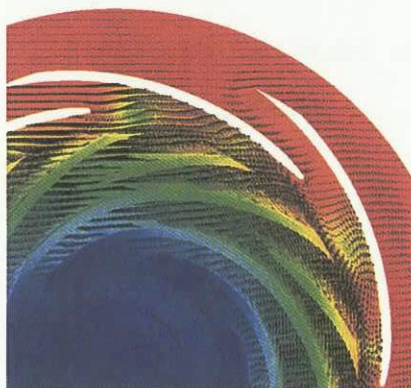


図7b 速度分布（拡大図）

4. 2 流量分布

図8は、ポンプ内の流量分布を調べたものであり、試験での測定値と推定値を（）内に示している。試験で実際に測定されているのは入口と出口の流量のみで、他は付近の圧力分布からの推定値である。解析値において、全面の翼とケーシングの隙間を流れる漏れ流量については、一定半径の断面での半径方向の流束を積分したものであり、翼端隙間の部分の漏れ流れだけを見積もったものではないので、ある程度の誤差があると思われる。入口、出口に関してはほぼ測定値を再現しており、前面漏れ流れ以外の流量も、推定値とほぼ同等な値となっている。

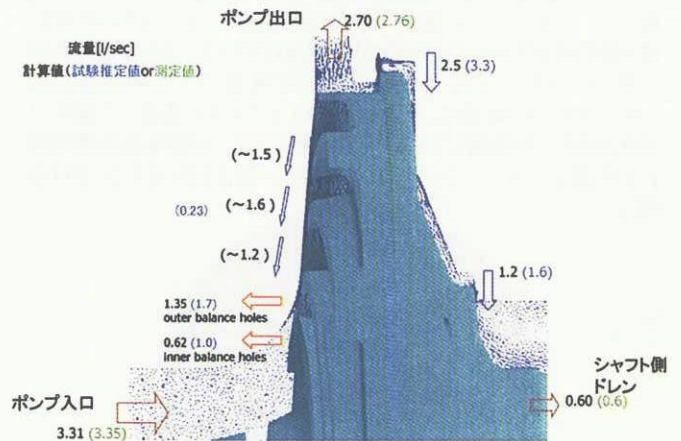


図8 流量分布

4. 3 揚程特性

極低比速度のポンプでは圧力上昇の大部分は遠心力に依るので、流量に対する揚程の変化が小さくほぼフラットな揚程特性を示す。本解析で流量を3通り変えてそれぞれについて揚程係数を計算した。試験で得られた揚程係数と比較したものが図9である。図から分かるように試験データはほぼフラットな揚程特性を示しており、解析においてもほぼ同等の揚程係数とフラットな特性を示しており、揚程特性の再現性は極めて良いと言える。

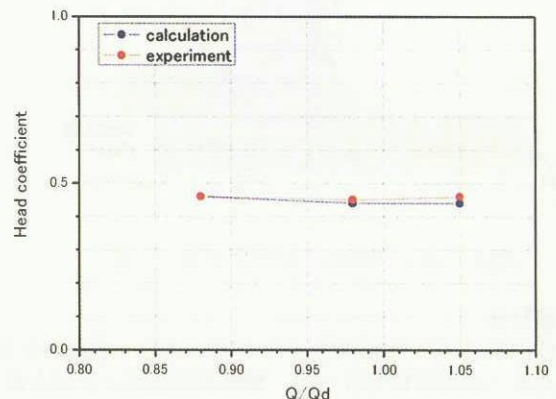


図9 揚程特性

4. 4 推力バランス

ポンプは流体を昇圧すると同時に羽根車まわりの圧力分布により流体力を受ける。回転軸方向の過大な力は軸受けの破損を引き起こし、回転軸に垂直な方向への力は振動の原因となる。従って、軸に加わる力の推定は重要な設計要素となる。試験で直接軸に加わる力を測定するのは困難であるが、CFD解析ではポンプ表面の格子点全ての圧力が分かるので、計算結果の精度の範囲でポンプ全体に加わる力を正確に見積もることが可能である。そこで、本解析においてインペラ表面の圧力を積分して軸方向及び軸に垂直な方向に加わる推力を計算した。

本ポンプは軸方向の推力バランスを自動的に取るようにバランスピストン方式を採用している。インペラの背面に2ヶ所オリフィスがあり（図4参照）、インペラが前後に移動すると片方の隙間が狭く、他方が広くなるようになっている。すなわち、インペラが力を受けて入口方向に移動すると、No.1オリフィスが狭くなり、No.2オリフィスが広

くなる。No.1 オリフィスが狭くなることで背面に流れ込む流体の圧損が大きくなり、背面の圧力が低下する。その結果、インペラ前面の圧力が相対的に大きくなり、インペラは入口と反対方向に力を受け、戻されることになる。逆に、インペラが入口と反対方向に移動すると、No.1 オリフィスの間隔が広くなり、そこでの圧損が小さくなることで背面の圧力が高くなり、結果としてインペラは入口方向に押されるようになる。

試験では、定常回転時は推力バランスが成り立っていると仮定して、No.1、No.2 オリフィスの隙間を推定している。そこで、CFD 解析ではバランスしていると推定されるオリフィス隙間を解析モデルに採用した。また、No.1 オリフィスと No.2 オリフィスの隙間を半分にした状態を設定した解析も行い、それぞれの場合について軸推力の見積もりを行った。その結果を、図で表したものが図 10a である。

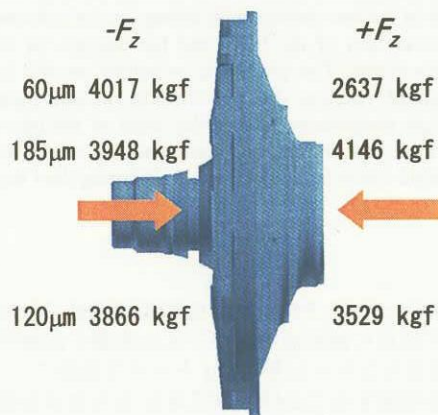


図 10a オリフィス隙間の違いと軸推力

左端の数字は No.1 オリフィス隙間の間隔で、 $-F_z$ は入口方向から押される推力、 $+F_z$ は入口方向へ向かう推力である。隙間間隔 120μm は、バランスしている状態での推定隙間である。60μm は No.1 オリフィスが狭くなったときで背面の圧力が下がることで入口方向からの推力が相対的に大きくなっている。また、185μm は No.2 オリフィスを半分にしたときで、相対的に入口方向への推力が大きくなっている。

表 2 推力[kg・f]

#1隙間	$+F_z$	$-F_z$	$ F_x $	$ F_y $
60	2637	4017	9	12
120	3529	3866	3	15
185	4146	3948	6	7

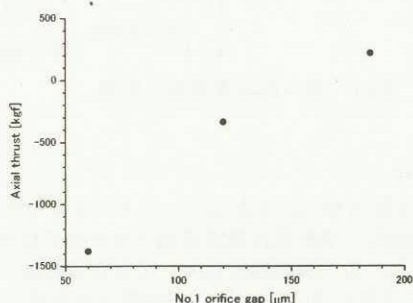


図 10b オリフィス隙間と軸推力の関係

軸に垂直な方向に加わる力(F_x, F_y)も含めて表にしたものが表 2 である。表から分かるように、軸に垂直な方向の力

のバランスは極めて良く取れていることが分かる。図 10b は隙間間隔と推力の関係を描いたものである。以上の結果から、軸方向にバランスする時の No.1 オリフィス隙間は設定値より大きいと考えられるが、実際には回転によるインペラの変形があるので、変形まで考慮して議論する必要がある。

しかしながら、以上の結果から、CFD 解析でバランスピストンの特性は良くシミュレーションされていると言える。

4.5 ポンプ効率

ポンプ効率 η_p は一般的に次のように求められる。

$$\eta_p = \eta_m \cdot \eta_l \cdot \eta_h$$

ここで、 η_m 、 η_l 、 η_h はそれぞれ、機械効率、体積効率、水力効率である。体積効率は、流入流量 Q_1 、流出流量 Q_2 、内部循環量 Q_{int} を用いて以下のように表される。

$$\eta_l = \frac{Q_2}{Q_1 + Q_{int}}$$

CFD 解析から得られる、 Q_1 、 Q_2 、 Q_{int} から体積効率を見積もると 0.42 となる。機械効率については、インペラの円盤摩擦の推定値 0.8、水力効率についてはポンプの形式と比速度から経験的に得られている値 0.64 を用いるとポンプ効率は 0.23 となる。試験において測定された入口と出口のエンタルピー差とヘッドから見積もられる効率は約 0.21 となり、CFD から見積もった効率は試験から見積もられた効率を良く再現している。

5. まとめ

LNG エンジンテストベッドで用いる LNG ポンプの CFD 解析を行い、試験データと比較し解析結果を検証した。本ポンプはオープンインペラ形式で、バランスピストン方式を採用しているので内部循環が複雑でかつ極低比速度のポンプである。

そこで、CFD を用いて、内部循環量、圧力分布、揚程特性、軸水力、そしてポンプ効率を見積もった。

試験データとの比較検証の結果、圧力分布については試験を良く再現することが示された。内部循環量は試験においても見積もりが困難な量であるが、解析で得られた内部循環量を元にポンプ効率を求めると、試験でエンタルピー差とヘッドから得たポンプ効率に近い値となることが分かり、妥当な計算をしていることが示された。また、揚程特性については、ほぼ試験と同等の結果が得られ、軸推力についてもバランスピストンの効果を良く再現することが示された。

以上より、CFD はポンプの各特性を良く再現し、設計ツールとしても有用であることが示された。今後は、メタンの実液の効果も含めより精度の高い解析が出来るようにしていく予定である。

参考文献

- 1) LOX/LNG エンジンテストベッドの構築、長谷川他、宇宙輸送シンポジウム (平成 16 年 1 月)
- 2) Experimental Setup of LOX/LNG Engine Test Bed, K.Hasegawa, et al., 24th ISTS, ISTS2004-a-20