

ターボポンプ内部流れのCFD解析の研究

総合技術研究本部 角田宇宙センター ロケットエンジン技術センター
木村俊哉、長谷川恵一、吉田義樹

Research on CFD Simulation for Turbopump Internal Flow

Institute of Space Technology and Aeronautics
Kakuda Space Center
Rocket Engine Technology Center
Toshiya Kimura, Keiich Hasegawa, Yoshiki Yoshida

Abstract

This report summarizes recent progresses of the research on CFD simulations for turbopumps of a rocket engine. The results for the cavitating flow in an inducer, the internal flow of a centrifugal pump for a LNG engine test bed, and the flow in a tandem inducer will be presented, comparing with experimental results.

1. はじめに

ターボポンプはロケットエンジンにおいて最も重要な流体機器であり、ポンプの性能がエンジンの性能を左右すると言っても過言ではない。ロケットエンジン技術センターではこれまで主に大型の試験設備を用いてインデューサやポンプの研究を行っている。

インデューサはポンプの吸い込み性能を決める重要要素であるが、キャビテーションが発生する条件下で運転されるため、キャビテーションによる性能低下や非定常な不安定現象に起因する軸振動がしばしば問題になる。経験的にインデューサ入口部のケーシングに段差を与えることで旋回キャビテーションが抑制されることが知られている。また、流量に対しても非定常現象の発生が変わることも知られている。しかしながら、それらのメカニズムについてはよく分かっていない。

また、ロケットエンジン技術センターでは、液体メタン用の小型遠心ターボポンプや高揚程・高吸い込み型の2段式インデューサ (tandem inducer) の研究も行っている。メタン用ポンプはオープンシュラウド形式で背面にバランスピストン機構を有するポンプで、内部流れが極めて複雑なポンプである。また、2段式インデューサも従来のインデューサに比べると複雑な形状をしている。このようなポンプの内部循環量や内部の流れを予測することは、ポンプの性能予測や設計に重要となる。

そこで、本研究は、シミュレーションの利点を生かし実験的研究と相互に補間しながら、ポンプの研究開発を加速するために、最新の流体数値シミュレーション(CFD)技術を用いて、ロケットエンジン用ターボポンプの性能予測、旋回キャビテーション等の非定常現象の予測とメカニズム解明を目標として進めている。本報告は、平成16年度において得られた成果についてまとめたものである。

2. 研究の概要

平成16年度においては、主に(1)ターボポンプインデューサにおける流れ、(2)液体メタン用ターボポンプ内における流れ、そして(3)2段インデューサ内部における流れの解析を行い、角田宇宙センターにおいて実施された実験結果と比較検証を行った。以下にそれぞれの概要を示す。

(1) ターボポンプインデューサにおける流れ解析

キャビテーションタンネルにおいて水流し試験をおこなっているインデューサに対して3次元定常解析を行った。その際、ケーシング形状や流量の変化に対する、渦構造や逆流構造の変化の様子とそれらの関係について調べた^[1,2]。また、キャビテー

シオンモデルを用いてキャビテーションの効果を導入し非定常解析も行った。キャビテーション数を変化させたときの吸い込み性能の変化を水流し試験結果と比較検証した。また、水流し試験において確認されている旋回キャビテーションがシミュレーションで再現されるかどうかについて調べた^[3]。

(2) 液体メタン用ターボポンプ内における流れ解析

メタンエンジンテストベッド用に開発を行っている液体メタン (LNG) 用ターボポンプ内部の流れ解析を行った。図面と CAD データよりインペラ、ケーシング、ポリアートの詳細な格子モデルを構築した。石川島播磨重工 (IHI) において行われた試験条件を用いて定常解析を行い、内部循環や圧力分布の見積もりを行った。また、流量を変えたときの揚程特性及び内部循環量から見積もったポンプ効率について試験データと比較検証を行った^[4]。

(3) 2 段インデューサ内部における流れ解析

水流し試験を行っている 2 段インデューサについて 3 次元定常解析を行った。その際、前段翼と後段翼の負荷分布の違いや翼面の圧力分布等を調べた。また、前段翼と後段翼の位相の違いや翼間のギャップの違いが圧力分布や流れの構造にどのような影響を与えるかについても調べた。

3. 成果の概要

(1) ターボポンプインデューサにおける流れ解析

図 1 はインデューサ近傍の計算領域外形、格子形状、及びインデューサ入口においてケーシングに与えた段差の形状を示している。

段差の高さ h 、スロープの角度 θ 、段差の起点とリーディングエッジの距離 d (オーバーラップ) をそれぞれ変えて段差形状を変化させた。

計算は定常解析で、解析に用いたコードは市販の熱流体解析ソフト STAR-CD(v.3.15) である。格子は、プリズムとテトラのハイブリッド格子でセル数は約 430 万である。乱流モデルは高レイノルズ数タイプの $k-\epsilon$ モデルを用いた。流体は水で、流入条件、インデューサの回転数等は水流し試験の条件に合わせて設定した。計算セル数は約 430 万である。

図 1 で与えた段差形状と流量を設計流量に対して $\pm 20\%$ 変動させて、主にインデューサ上流側に生じる渦構造と逆流構造が受ける影響について調べた。

図 2 は、段差のない場合 (Type E) と段差の最も大きな場合 (Type C) について、インデューサ上流側から見た、渦中心線の分布の様子である。インデューサ上流部に発生する渦は主に翼端部から発生し、ほぼ翼に沿って発達する翼端渦と、逆流と主流のせん断領域に流れ方向に発達する逆流渦である。翼端渦は段差のない場合の方が発達を示してい

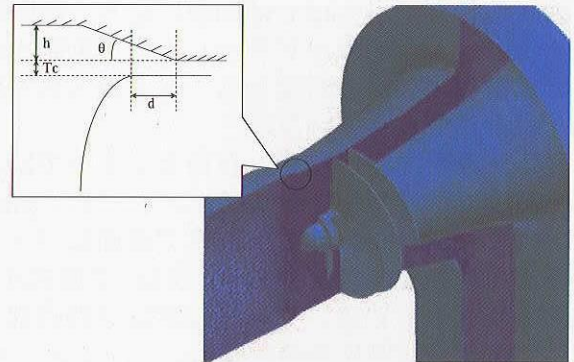


Fig.1 Grid structure and step geometry

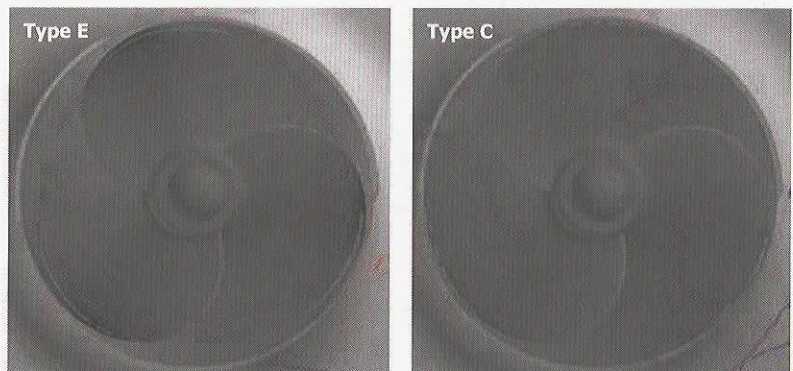


Fig.2 Vortices for different step geometries

るが、逆流渦は段差の大きい方が発達をしている。

段差形状及び流量と逆流領域の発達、渦構造の発達の関係を図3に示している。また、水流し試験で観察されている旋回キャビテーションの発達との関係も示している。図3に示すように、流量、段差の大きさ、逆流の発達、渦の発達、そして旋回キャビテーションの発生には系統的な関係があることが分かる。特に、翼端渦と旋回キャビテーションの間には関連があることが分かった。

本計算にはキャビテーションは含まれていないが、非定常なキャビテーション現象の発生と流れ構造、特に渦構造、の間には密接な関連があることが数値解析によって示唆された。

次に、キャビテーションモデルを考慮して、キャビテーション流れの非定常解析を行った。導入したキャビテーションモデルは Bubble Two Phase Flow モデルである。キャビテーション解析は計算負荷が大きいので、セル数を約 100 万とし、インデューサ下流側は直管とした。

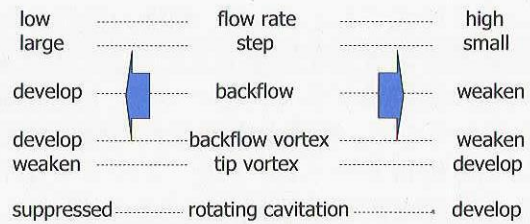


Fig.3 The effect of flow rates and step geometry on flow structure and the relation with rotating cavitation

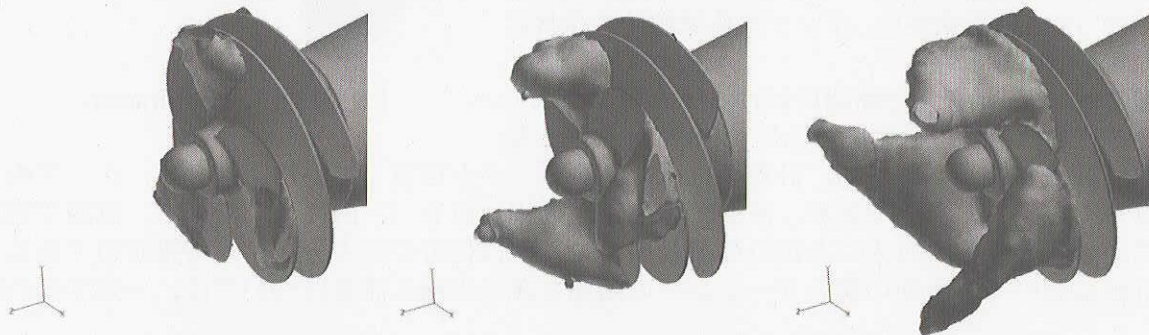


Fig.4 Cavity structure for different cavitation numbers (Left : $\sigma=0.05$, Middle : $\sigma=0.04$, Right : $\sigma=0.02$)

図4はキャビテーション数を変えたときのキャビティの発達の様子を示している。キャビテーション数が小さくなるほど、キャビティは上流側に主に逆流渦に沿って発達を示している。これらの構造は時間と共に変動を示すが、実験で観察されているような、旋回キャビテーション特有の変動は計算では確認できなかった。但し、計算ではキャビティ導入後数回転での結果であり、計算時間が十分でないことも考えられる。

図5は、キャビテーション数を変えたときの揚程の変化を示している。黒丸は試験データ、白丸は計算値である。また、揚程がほぼ一定となる揚程で規格化している。図よりキャビテーション数が小さくなると揚程が低下し、減少の傾きは実験データに近いが、揚程の絶対値には開きがある。実験において、 $\sigma=0.04$ 前後で一旦大きく減少しているのは、強い旋回キャビテーションが生じているためである。この範囲での計算では、キャビテーション導入後数回転の範囲では旋回キャビテーションは生じていない。

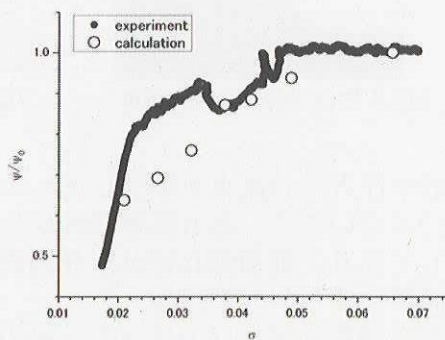


Fig.5 Suction performance

(2) 液体メタン用ターボポンプ内部における流れ解析

現在開発中のメタンエンジンテストベッド用 LNG ターボポンプ内の流れ解析を行った。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。

図6はポンプ内部のフローネットを示している。入口より流入した流体はインペラによって加圧されるが、インペラの圧力バランスを取るために一部は背面に回る。背面に回った流体の一部はインペラに空いたバランスホールを通じて戻り、残りはシャフト側ドレンから排出する。オープンインペラ形式のためインペラ前面では漏れ流れによる循環が生じる。

図7は、ポンプ構成を示すと共に解析モデルの形状を表している。図7に示される計算領域内に約340万セルの計算セルを構成した。

計算は汎用熱流体解析コードSTAR-CD(v.3.15)を用いて行った。解析条件は、ポンプ単体試験時の条件に合わせて設定をした。

図8は、回転軸を含む断面における圧力分布を示している。数値は各位置における圧力[MPa]を表し、括弧内は試験値を示している。計算値はほぼ試験データを再現している。図9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

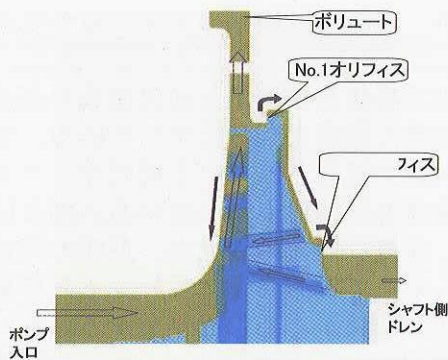


Fig.6 Flow net inside the pump

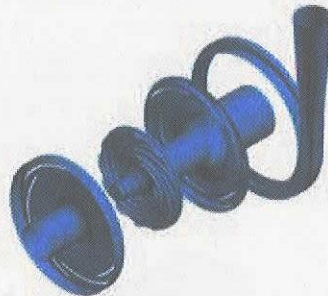


Fig.7 LNG pump structure

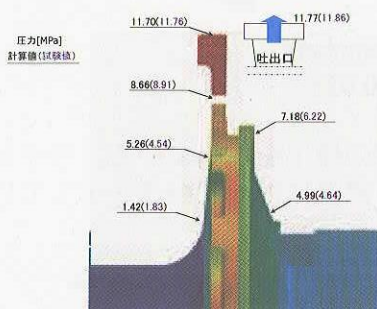


Fig.8 Pressure distribution

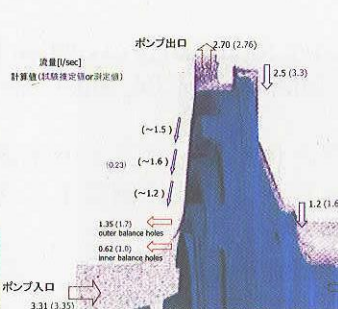


Fig.9 Flow rate distribution

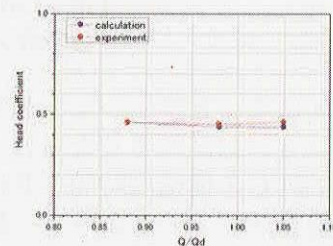


Fig.10 Head coefficient

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。

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10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。

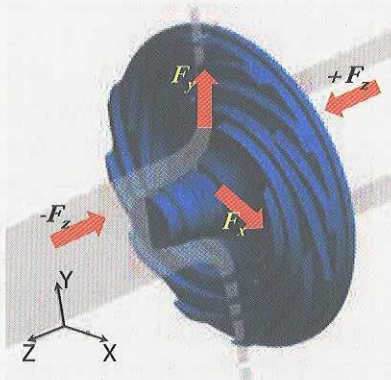


Fig.11 Definition of thrust

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。

Table 1 Calculated thrust

#1隙間	$+F_z$	$-F_z$	$ F_{x,c}$	$ F_{y,c}$
60	2637	4017	9	12
120	3529	3866	3	15
185	4146	3948	6	7

本ポンプは軸方向の推力バランスを自動調整出来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6参照）、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オリフィスが広がる。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。図11はインペラに加わる推力の定義を示しており、表1は第一オリフィスの間隔を変えたときのそれぞれの計算から見積もった推力の大きさを示している。

隙間間隔120 μm は、バランスしている状態での推定隙間である。60 μm 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、185 μm 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。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。

次に内部循環量からポンプ効率を見積もってみた。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。

(3) 2段インデューサ内部における流れ解析

ロケットエンジン技術センターでは、高揚程かつ高吸い込み性能を持つインデューサの一つの可能性として2段インデューサの研究を行っている。図12はその試作モデルの写真である。2段インデューサは写真で見られるように、単段のインデューサに比較して形状は複雑になり設計の自由度も大きくなる。

これまでのポンプに対する CFD 解析の経験から、キャビテーションを含まない場合は、ポンプ内部の圧力分布等流れ場の様子は CFD 解析でもかなり良く再現できることが分かってきている。そこで、複雑な形状を持つ 2 段インデューサに対して CFD 解析を行い、実験では観察することが困難な内部の圧力分布や流れの様子を解析し、実験を補間することによって、2 段インデューサの研究開発を加速することを目的として、数値シミュレーションを行っている。

図 14 は、インデューサ翼及びハブ表面の圧力と回転軸を含む断面における軸方向速度分布を表している。速度分布において、赤い領域は回転軸方向において上流側へ向かう領域であり、インデューサ近傍では逆流を示している。

シミュレーションでは、前段翼と後段翼の負荷分布や前段と後段の位置関係の違いによる流れ場への影響等を調べ、今後はキャビテーションも考慮して解析を行う予定である。

4. まとめ

ロケットエンジン用ターボポンプ内における流れに対する CFD シミュレーションに関する平成 16 年度の成果についての概要をまとめた。主な内容は、インデューサにおける 3 次元定常解析及びキャビテーションを考慮した 3 次元非定常解析、LNG ターボポンプ内部の流れ定常解析、そして高揚程・高吸い込み型 2 段インデューサにおける定常流れ解析である。

キャビテーションを含まない流れに関しては、内部圧力分布や揚程特性等に対して CFD シミュレーションは比較的良い精度で再現可能であることが示された。実験データを用いた検証を進めることによってポンプの研究開発に十分貢献可能であることが期待される。キャビテーション流れに関しては、吸い込み性能や非定常現象等、実験データをまだ十分説明できる段階ではないが、今後実験データと比較検証を行いながら計算技術の向上を図っていく必要がある。

謝辞

LNG ターボポンプの流れに関して試験データの提供等、石川島播磨重工業株式会社の安富義展氏の御協力に対して感謝の意を表します。

参考文献

- [1] “Relation Between Geometries of Inducer Inlet and Backflow and Vortex Structures”, Toshiya Kimura, Yoshiki Yoshida, and Mitsuru Shimagaki, AIAA-2004-4022.
- [2] “インデューサ入口構造と渦及び逆流構造の関係”, 木村俊哉、吉田義樹, 日本流体力学学会誌「ながれ」第 23 巻 4 号
- [3] “ターボポンプインデューサに発生するキャビテーションの 3 次元 CFD 解析”, 木村、島垣、吉田, 第 12 回キャビテーションに関するシンポジウム, 平成 16 年、福岡
- [4] “LNG (液化天然ガス) ターボポンプの CFD シミュレーション”, 木村他, 航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2004



Fig.12 Photograph of tandem inducer

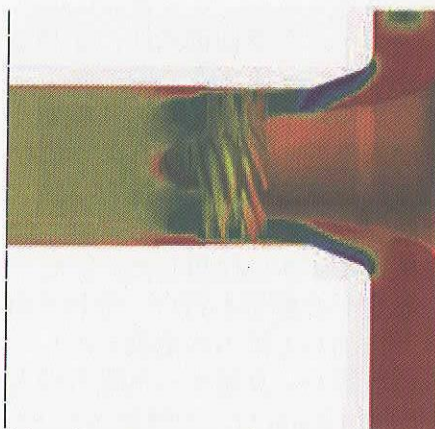


Fig.14 Pressure and axial velocity distribution