

報告番号	甲 第 13633 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 **ロケット用ターボポンプのバランスピストン機構のモデルの拡張と動的安定性
(Dynamic stability and development of the evaluation model of balance piston mechanism for rocket turbopump)**

氏 名 平木 博道

論 文 内 容 の 要 旨

液体ロケットエンジンは、推進薬を燃焼させ、高速のガスにして噴射することで、推進薬のもつ化学エネルギーを推進力に変換するものである。推進薬の燃焼圧力が高い程、よりガスを増速させることが可能なため、ロケットエンジンの性能を向上できる。しかし、ロケットの大半を占める推進薬タンクの圧力を上げることは強度的に困難なため、推進薬を吸い込み圧力を上昇させるポンプが必要となる。ロケットエンジンに用いられるターボポンプは、液体水素や液体酸素といった極低温の推進薬を昇圧し燃焼室へと送る重要な役割を担う部品である。ロケット用ターボポンプの特徴として、高い吐出圧が必要とされること、重量とサイズの制約から高回転数で設計されること、作動流体が極低温の推進薬であり軸受に潤滑油が使用できないことなどが挙げられる。ポンプで発生する高い吐出圧は軸方向に大きなスラストを発生させる一方で、極低温の特殊な環境下で使用されるターボポンプ用の軸受は特殊な潤滑方式を用いており、軸方向の大きなスラストを支持することが困難である。そのため、軸スラストを調整するための工夫が必要となる。

ロケット用ターボポンプはサイズの制約から高速回転で運転するよう設計されるため、軸振動の観点、またターボポンプのサイズを小さくするという観点から、バランスディスクなどの比較的大掛かりな軸推力バランス装置を採用することは難しい。そのため、バランスピストン機構と呼ばれる軸方向の推力調整機構が用いられる。バランスピストン機構は、インペラ外径側の No1 オリフィス、内径側の No2 オリフィスという 2 箇所を絞る機構と、その間のバランスピストン室から構成される。インペラ出口から No1 オリフィス、バ

ランスピストン室, No2 オリフィスへと流体が流れることで圧力損失が発生する. ロータ全体が軸方向に動くことが可能な構造になっており, ロータが変位するとオリフィス隙間が変化し, 圧力損失が変化することで, 変位方向と逆向きに圧力荷重が変化し, 軸方向荷重が自動的に調整される.

バランスピストン機構は, 上記のような軸方向荷重の自動調整機能を有しており, 静的には安定な特性を持っている. しかし, 動的な特性としては不安定になる場合があり, ロケットエンジンの燃焼試験において振動問題が発生してきた. 軸方向の振動が過大となった場合, No1 オリフィスや No2 オリフィスが接触し, ケーシングやインペラを損傷するリスクがある. 更には, 本来圧力による軸方向荷重が印加されない軸受に対して過大な荷重が発生し, 軸受を損傷することでターボポンプが作動不能に陥る可能性がある. そのため, 軸方向の振動問題は, ロケットエンジンの正常な作動を維持するために解決しなければならない課題である.

ロケット用ターボポンプは, サイズに比して出力が大きいことから, エネルギー密度が高く, ひとたび振動問題がおこると容易には解決できず, 多大な労力が必要となる. 本論文で対象とする軸方向の振動に限らず, 径方向振動や流体的な振動の問題は, 開発フェーズから運用フェーズに至るまで, 数多く発生してきた. 特に, 径方向の振動問題では, インペラやシールなどの要素により発生する流体力が不安定化に寄与することが知られており, 実験的, 解析的な研究がおこなわれている. 軸方向の流体力についても, インペラ前面や背面の隙間流れに関して流体力を把握するための研究がおこなわれてきた. また, バランスピストンの流路に対し, バルクフローモデルを用いた解析や CFD を用いて特性を調べる研究がおこなわれている. 一方で, バランスピストン機構は No1 および No2 オリフィス隙間が変化することで軸方向の荷重を調整するものであり, オリフィスの隙間変化が動特性に支配的である, という考え方に基づいた研究についてもおこなわれている. これは, バランスピストン室の圧力を中間圧力で代表して表現し, 変位 (オリフィス隙間の変化) によるバランスピストン室圧力の変化に主眼を置いたモデルである.

これらの研究により, バランスピストン室流体の圧縮性が安定性に影響していることが明らかとなってきた. ターボポンプの作動流体である液体水素は, 比較的圧縮性が大きい流体であり, 水や液体酸素と比較すると, 体積弾性率が小さい. このような液体水素の特性 (圧縮性) に起因し, ロータが変位した際のバランスピストン室圧力の応答が遅れ, 軸方向に不安定となりうる. このように, バランスピストン機構が軸方向に不安定化するメカニズムが把握されてきたものの, 未だ十分に検討がなされていない部分も多い. 実験的な検証は事例が少なく, 詳細なモデルの検証はおこなわれていない. また, 軸方向の安定性と, 設計的に必要な性能との関連についての研究は十分とは言えない. 更に, オープンインペラを用いた H3 ロケットのターボポンプの開発において従来の 1 次元モデルによる振動モードと異なる点がみられており, 大口径のオープンインペラの採用したことでインペラの弾性変形が安定性に影響した可能性や, バランスピストン室流体の音響モードがイン

ペラの弾性変形と連成した可能性などが考えられている。しかし、これらの事象についての研究はおこなわれていない。

本論文の目的は、ロケット用ターボポンプに用いられるバランスピストン機構の動的安定性について、以下の3つの項目について検討をおこない、知見を得ることを目的とした。

- (1) バランスピストン機構の1次元モデルの実験的な検証
- (2) バランスピストン機構の性能と動的安定性を両立する設計指針の提案
- (3) 弾性変形や音響振動を考慮した評価

以下に、各章の内容を示す。

2章では、バランスピストン機構の1次元動特性モデルを検証するための実験装置を示し、モデルによる解析結果と実験結果を比較し、検証した。バランスピストン機構のパラメータ変化による安定性の変化が、1次元的なモデルにより予測可能であることを実験的に確認した。バランスピストン室容積の増加、バランスピストン総隙間の減少、上下流差圧の増加は軸方向の安定性を低下させ、自励振動が発生することを実験的に検証し、バランスピストン機構の1次元的なモデル化の有用性を確認することができた。また、バランスピストン機構の実験をする際、ロケット用ターボポンプの実機環境を用意するためには多大な費用と期間が必要となるが、本章で示した簡易的な実験装置により1次元的なバランスピストン機構の特性の再現が可能であることを示した。

3章では、バランスピストン機構の1次元動特性モデルを用いたモンテカルロシミュレーションを実施し、バランスピストン機構の性能と動的安定性の関係について考察した。性能である荷重調整能力と動的安定性（減衰比）はトレードオフ関係にあり、荷重調整能力を重視して設計すると必然的に減衰比が悪化することが分かった。制約条件を満足する設計パラメータの組合せを探索するには性能と動的安定性を同時に考慮した網羅的な計算をおこない、解の分布を把握することで制約条件に対する余裕の大きさを把握することが可能となった。また、理論解析の式から導かれる安定判別式により減衰比の正負を判別可能であること、軸方向の剛性は減衰比と強い相関があり、動的な安定性を確保するには剛性を過度に高くする設計を避けるべきであることを示した。

4章では、バランスピストン機構が設置されるインペラの弾性変形に着目し、はり状のモデルを用いて弾性変形の影響について検討した。はりの等価質量および等価剛性に置き換えた集中定数系のモデルで線形解析を実施することで安定性を調査した。剛体モデル、はりモデル、剛体とはりの組み合わせモデルの3つについて調査し、はりの曲げに関する安定性の特性および従来の剛体モデルとの差異について考察した。はりと剛体と組み合わせたモデルでは、周波数の異なる2つのモードが現れるが、低周波数のモードは前章まで議論してきた剛体モデルと同様の傾向を、高周波数のモードははりモデルと同様の傾向を示すことが分かった。また、高周波数のモードは、はりの剛性が高いほどバランスピストン室容積の影響を受けにくく減衰比の絶対値が小さくなる一方、減衰比の正負には影響しないことを確認した。はりモデル（高周波数のモード）の減衰比は、減衰比の絶対値が剛体

モデル（低周波数のモード）よりも小さくなるが、安定／不安定の閾値は剛体モデルと大きく差異がない。すなわち、剛体モデル（低周波数モード）の安定化を図れば、はりモデル（高周波モード）の安定化に対しても効果があることを示した。

5章では、バランスピストン機構を備えたインペラの0直径節の振動モードに着目し、はり形状に単純化したモデルを用いてはり構造とバランスピストン室流体の音響の連成振動の発生有無について検討した。構造周波数に対し音響周波数が小さいと流体圧力応答は不安定な特性を示すが、構造の周波数が高いほど減衰比の絶対値は小さくなることがわかった。バランスピストン機構の設計パラメータの安定、不安定への影響を確認したところ、いずれも剛体モード（弾性変形や音響を考慮しないモード）と同じ傾向を示した。剛体モードへ対策をとることで、弾性変形を伴う不安定振動への対策になることを示した。

以上の結果により、本論文で目的とした事項についての知見を得ることができたと考える。今後の展望としては、本論文で得られた知見をロケット用ターボポンプの設計に生かし、製品開発における振動不適合を低減していくことを目指す。本論文で示された振動評価手法を用いて設計の初期段階から考慮することで、製品開発期間の短縮化に貢献することが期待される。