

氏 名	志 村 隆
授 与 学 位	工 学 博 士
学 位 授 与 年 月 日	昭 和 61 年 12 月 10 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 5 条 第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 47 年 3 月 埼玉大学理工学部機械工学科卒業
学 位 論 文 題 目	ロケットポンプの動特性に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 大場利三郎      東北大学教授 大宮司久明 東北大学教授 谷 順二

## 論 文 内 容 要 旨

ロケットポンプ（以下単にポンプという）では質量の制約が特に厳しいために、高速化して質量の軽減を図ることが必須となっている。近年、ロケットの性能を向上させるために高性能極低温推進薬の組合せ（液体酸素 $\text{LO}_2$ と液体水素 $\text{LH}_2$ ）を用いたり、エンジンの燃焼圧力をますます高めたる傾向にあり、これに伴って燃焼室に推進薬を送り込むポンプに求められる条件も大変に厳しくなっている。ポンプの高速化、大出力化によってもたらされる大きな問題として、ポンプ単体あるいはシステムとしての振動問題、エンジン起動上の問題があるが、これらの問題に適切に対処するためにはポンプの動特性を良く把握しておく必要がある。このような背景から、ここでは、ポンプの動特性を調べる一連の研究を行った。

ポンプを高速化する場合には、キャビテーションの発生による性能低下を抑制するために、ポンプ入口NPSH（正味吸込水頭）を高くする必要がある。しかしながら、ロケットでは燃料および酸化剤タンク質量の制約も厳しいことから、タンク肉厚を増してタンク圧力を増加させてポンプ入口NPSHを高くすることにも限度がある。このようなことから、十分なNPSHが与えられない場合でも大幅な性能劣化が生じないインデューサを主羽根車の前に置いて、インデューサ内にある程度キャビテーションが生じた状態で運転することにより吸込性能を向上させる形式のポンプがロケット用としては一般的となっている。

インデューサを用いれば、インデューサ内でキャビテーションが発生しても急激なポンプ揚程の

低下が起こらないために、高吸込比速度での運転が可能となり、吸込性能が向上するが、キャビテーションに関係した不安定振動が起こり易くなる。キャビテーションに関係した不安定振動は、羽根車を破損する原因となったり、システムの振動を誘発してロケット全体に影響を及ぼしたりするため、これまでも研究がなされてきているが、この不安定現象は非常に複雑なものであり、明確にされていない点も多く、本質的な理解のためにはより一層の研究が望まれている。これまでに明確にされていなかった点の一つに、軸流圧縮機における旋回失速と類似な現象であると考えられるインデューサの旋回キャビテーションと、システム全体の関係した低周波振動との関係がある。インデューサのキャビテーション発生によって起こされる不安定な現象はこれまでの研究によると、(1)旋回キャビテーション (2)交互羽根キャビテーション (3)システム振動 (4)インデューサ入口逆流の四つに大別されるようであり、ロケット全体が機体軸方向に振動する低周波振動に密接に関係していると考えられているが、これら四つのどれが主原因なのか確かな説明はされていない。このようなことに着目して、まず、キャビテーションタンネルにおいてインデューサ単体の実験を行い、インデューサに生じる不安定キャビテーションの高速度撮影およびストロボによる可視観察ならびに振動圧力データの解析を通して、不安定キャビテーションの特徴をはっきりさせることを試みた。

この結果、旋回キャビテーションにおいては上流側の圧力振動が支配的であり、上流側の圧力振動に対応する下流側の圧力振動がかなり減衰したのに対して、低周波振動においては、上流側、下流側ともに対応する圧力振動が認められたこと、および、旋回キャビテーションにおいては、3枚の羽根上のキャビティが異なった位相で振動したのに対して、低周波振動においては、すべての羽根上のキャビティがほとんど同一周期と同一位相で振動したことから、旋回キャビテーションは、システム全体が関係した低周波振動とは明確に区別されることが示された。また、偶数羽根インデューサでみられる定常交互羽根キャビテーションと類似な現象であると考えられる3枚羽根インデューサの定常非対称キャビテーションは、旋回キャビテーションの特殊な場合で、旋回速度が羽根の回転速度と一致する場合であると考えられることが示された。

インデューサ単体についてキャビテーションに関係した振動を研究した例は比較的多いが、実際にロケットで用いられる主羽根車とインデューサを組み合わせた場合に生じるキャビテーションに関係した振動に関する研究報告は少なく、参考となるデータが不足している。このため次の段階として、主羽根車とインデューサを組み合わせた3種類のロケット用液体酸素ポンプの実験を行い、インデューサ付ロケットポンプの不安定振動現象に及ぼす種々の因子の影響について調べた。調査対象とした因子は、キャビテーション係数、ポンプ流量、回転数、インデューサチップすき間、インデューサ羽根枚数、作動流体の種類である。また、低周波振動が生じた時の流量変動を測定し、キャビテーションに伴う低周波振動が流量変動を伴ったシステムの振動であることを確かめた。更に、系を不安定にしている要因が何であるかを考察するために、ポンプ特性を抵抗、イナータンス、ポンプダイナミックゲイン、キャビテーションコンプライアンスおよび流量コンプライアンスで表わした計算モデルにより実験ループの系の安定性および固有周波数について調べた。ここでは、扱う低周波振動の周波数が低いため、従来より行われている、キャビティを準定常的に表現する方法を用いた。

この実験および計算の結果、流量を絞ったり、インデューサチップすき間を大きくとったりした場合に大きくなる流量コンプライアンス、および、吸込性能曲線の負の傾きに相当する負のポンプダイナミックゲインは、系を不安定にさせる強い性質を有していることが示された。また、不安定な低周波振動の周波数に大きな影響を及ぼす要素はキャビテーションコンプライアンスであり、このキャビテーションコンプライアンスは、系を安定にする方向に作用するものと考えられた。このほか、低周波振動の周波数には、キャビテーション係数および流量の他に、回転数および液体の蒸気圧によって変るポンプ入口の圧力レベルが関係していることなどが示された。

ポンプの動的な特性に深く関係して起こるロケット全体の機体軸方向の振動は、推進系と機体構造が閉ループを形成して起こす自励振動でPOGOと呼ばれており、ポンプを含む推進薬（燃料および酸化剤）供給系の固有振動数と機体構造の固有振動数が一致した時にしばしば大きな振幅で発生し重大な問題となっている。この問題に対処する方法としては、ポンプの吸込ラインにPSD（POGO抑制装置）と称されるアキュムレータを入れ、推進薬供給系の固有振動数と機体構造の固有振動数をずらせることが考えられ、良く用いられている。実際のロケットでPOGOが起こるかどうかを検討したり、PSDを設計するためにシステムを構成する各要素の特性を線形化して解析する手法が良く用いられているが、十分精度良くシステムの計算を行うためには最も重要な構成要素であるポンプの動特性を定量的に周波数の関数として把握する必要がある。スペースシャトルのPOGOに関しても、主エンジン（SSME）用の低速ブーストポンプの動特性を明らかにする必要に迫られ、理論的な解析および実験がなされた。我が国においても、液体酸素／液体水素エンジンを２段目に採用したH-1ロケットのPOGO解析が必要となり、ポンプの動特性データが要求された。このため、本研究での最終段階として、実機に用いられるポンプに強制的に脈動を与えて動特性を定量的に把握するための実験を行い、実際のPOGO解析に必要なポンプの周波数応答を調べた。ポンプの動特性を把握するための実験において困難な問題の一つに動的流量の測定があげられるが、本研究では、極低温流体の動的な流量を測定するために非常に応答性の早い超音波流量計を用い、良好な結果を得た。

以上のように三つの段階を経て調べたポンプ動特性とは性質が異なるがロケットポンプ動特性の別の一面として、起動時に見られるようなポンプ回転数の加速度が非常に大きな場合の動特性が考えられる。ロケットポンプは一般的に高速回転であるため、回転部分の慣性モーメントが小さい割に起動時の駆動軸トルクは大きく、1～2秒といった短時間に数万rpmまで加速されることも珍しくない。このため、加速時の動特性は定常状態の特性とは異なってくることが考えられる。また、極低温推進薬のポンプでは予冷が不足すると液体がガス化して失速を起こすこともあり、ポンプを安全確実に起動することも重要な課題となる。このようなことから、インデューサ付一段遠心型ポンプをガスタービン駆動により急加速する実験を行い、急速起動時のポンプ動特性を調べると共に、ポンプを安全確実に起動する方法について調べた。

この結果、急速起動時にポンプ瞬時揚程が定常値を上回ること、および、ポンプ瞬時効率が定常値を下回ることを示すと共に、安全確実にポンプを起動するための基礎データを取得した。

以上に述べたポンプ動特性研究の結果は、現在我が国で開発が進められている通称H-1ロケットの液体酸素・液体水素エンジンLE-5のターボポンプの設計およびH-1ロケットのPOGO解析に利用され良好な成果を収めている。

## 審 査 結 果 の 要 旨

極低温推進薬を使用し、燃焼圧力を極度に高めた高性能ロケット用の燃料供給ポンプ（以下単にポンプという）においては、質量の制約が過酷なまでに厳しいために今なお非常にしばしば致命的な振動問題に悩まされ続けている。本論文は、ポンプの中でも特に過酷な条件下に作動するインデューサに着目し、その動特性の詳細、特にこれまで不定とされていた伝達マトリックスを定量的に解明して、我国の純国産ロケット H-I の開発を成功に導いた研究の成果を取りまとめたもので、全編 6 章よりなる。

第 1 章は緒論である。第 2 章では、インデューサに生じる不安定キャビテーションの高速撮影、振動圧解析により、そこには旋回キャビテーションとキャビテーション低周波振動が発生している事実を明らかにし、ついで、それらの詳細な挙動も解明している。

第 3 章では、主羽根車とインデューサを組み合わせた 3 種類のポンプの実験より、ポンプの振動に関与する諸因子、すなわち、キャビテーション係数、流量、回転数、インデューサチップすき間、羽根数、作動流体の影響を組織的に詳細に解明している。また上記の低周波振動は流量変動を伴う系振動であることを明らかにし、併せて、系の安定および固有振動数を示している。これらはロケットポンプの設計上有用な知見である。

第 4 章では、動特性に深く関係して起こるロケット全体の軸方向振動（きわめて危険な POGO）の除去を目途として、非常に応答性が高い超音波流量計を用いて、ポンプ振動の伝達マトリックスを、種々の作動条件について定量的に決定した。これはロケット工学に関する非常に重要な知見である。

第 5 章では、ポンプの安全、確実な起動を確保するために、ポンプの起動特性、安全で確実な予冷法などについて述べている。これも上記の H-I ロケットの開発の成功の有力な一因とみられている。

第 6 章は結論である。

以上要するに本論文は、極低温、超高速状態で作動する高性能ロケットポンプの動特性を解明して、安全、確実なロケットの運用を可能としたもので、流体力学ならびに宇宙工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。