

審査の結果の要旨

氏名 谷 直樹

修士（工学）谷 直樹の提出論文は、「ロケットターボポンプの極低温キャビテーション流れに関する研究」と題し、本文 7 章及び付録から構成される。

国際宇宙ステーション、気象衛星、GPS 衛星というように、人工衛星に代表される宇宙利用の進展につれ、ロケット打ち上げがビジネスにまで捉えられる様になり、以前にもまして高性能・高信頼化の要求が強い。液水・液酸ロケットエンジン開発上の難点のひとつは、ターボポンプ・流入インデューサに発生するキャビテーションであり、ポンプ性能の低下をもたらすばかりでなく、内部流れの非定常・不安定性を誘起し、軸振動などのエンジンにとり致命的トラブルに通じる危険性が、1999 年の H-II 8 号機の事故にみるように、指摘される。水中のキャビテーション現象は船用スクリュや汎用ポンプで観察され、その研究例も非常に多く古典的な課題である。従って、ロケットポンプ中に発生するキャビテーションの研究のほとんどが、作動流体であるロケット推進剤を通常の水と同一に取り扱い、実験・解析を進めてきた。しかし、高い比推力を実現するための液水・液酸など極低温推進剤の流体中に発生するキャビテーションは、常温水に発生するものと異なり、熱力学的効果、すなわち、キャビテーションという液体から気体への相変化潜熱を奪う自己冷却効果というものが顕著になって、一般には、常温水中に比べてキャビテーション性能が向上する(発生しにくくなる)といわれる。しかも、極低温流体のように気液間の密度差が小さい流体では特徴的に現われることになり、従来の知見をキャビテーション現象の解明やインデューサ設計指針に適用する根拠は非常に乏しい。そうした理由から、至急に、極低温キャビテーション現象と気液流動の詳細研究の必要性が生じている現状と認識される。

著者は、本論文において、極低温キャビテーション流れの特性の解明及びその特徴を考慮できる理論モデルと数値計算手法の構築、さらに、それを適用し、ロケットポンプインデューサでのキャビテーション流れに関する詳細な知見を得て、現行のインデューサ設計法に比べ、より精確な指針に立ち、コストパフォーマンスの高い設計支援ツールの構築につなげることを目的に掲げている。

本論文は、第 1 章から第 7 章までの構成となっている。

第 1 章では極低温キャビテーションに関するこれまでの研究と、研究背景、そして本論文の目的が述べられている。

第 2 章では、極低温キャビテーション流れのモデル化と支配方程式について述べている。キャビテーション流れに均質流モデルを採用することで、熱力学的効果に必須のエネルギー方程式まで連立させる高次解析が容易となること、また、キャビテーション気泡の非線形運動を気泡流モデルで記述することで現実的なキャビテーション流れのシミュレーション

が可能となることを示している。

第 3 章では、導かれた支配方程式の数値解析法に関して述べ、また、検証計算の結果をまとめている。キャビテーション流れは、ほぼ非圧縮の液体中に、高い圧縮性を持つ気泡領域が存在する流れ場であり、両者を効率良く解ける計算アルゴリズムが必要となる。加えて、本研究では温度変化が重要で、熱の移動に関しても高い精度が必要となる。これらの要求を満足する数値解析手法として、Thermo-CCUP 法の適用ならびに気泡運動に対し内部反復による計算の硬直性回避などが施策され、圧縮性・粘性の流れ場、気泡運動、さらに相変化を考慮した混相流れのそれぞれにつき検証計算の結果が吟味されている。

第 4 章では、2 次元ラバールノズル内部でのキャビテーション流れに関して、液体窒素と常温水に対する実験、数値計算双方の比較検討を行い、極低温キャビテーションの特徴、すなわち、キャビテーション内部の潜熱吸収による顕著な圧力低下を、液体窒素の実験と数値解析の両者で捉えた点が述べられている。これは、熱力学的効果の影響が温度低下のみならず圧力まで及ぶことを示すもので、圧力、温度、ボイド率の 3 つの分布間の強い相関の存在が新たな知見として明解にされている。

第 5 章では、単独翼周りに発生するキャビテーションに関して、水、液体窒素、さらに液体酸素の流体間で比較を行い、キャビテーション形状の違いを明確にして、揚力係数のキャビテーション係数に対する変化を調べ翼性能の比較を行っている。その結果、液体窒素と液体酸素では、類似のキャビテーション形状と性能的な一致傾向が示され、一方、水ではキャビテーション形状、翼性能ともに極低温流体と全く違う傾向を示し、従って、水を用いて極低温流体機器で発生するキャビテーションを予測することに警告している。

第 6 章では、最終的にインデューサ翼列を対象に、2 次元、3 次元双方の計算結果から、翼形状とキャビテーションの関係を考察している。まず、2 次元解析で、主に前縁クサビ形状に関して比較を行うと、現行の設計指針よりもクサビ長さを短くした方がキャビテーション発生は抑制される。しかし、短くしすぎると、翼加圧面側からのキャビテーションを誘発し、かえって望ましくない。さらに、3 次元計算を行い上記の影響を調べると、翼の後退角無しでは正しいが、後退角がある場合、半径方向流れによるキャビテーションの集積により、クサビ長さを短くするとかえってキャビテーションが激しく発生する。これらの知見を基に、キャビテーション体積と逆流域の双方の観点から改良が見込まれる改良型のインデューサ形状を提案している。

最後の第 7 章は結論であり、本研究で得られた知見をまとめている。

以上要するに、本論文は、極低温流体中のキャビテーションを取扱える数値解析手法を新たに構築し、検証実験を踏まえ、熱力学的効果によるボイド率、温度、圧力の相関を流れ場の特徴と併せて明らかにするとともに、常温水中の現象観察を拠り所とするロケットポンプインデューサの経験的な従来設計手法に警鐘を与え、ロバストな設計支援ツール構築の可能性を示したものであり、その結果は航空宇宙工学上貢献するところが大きい。

よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。