

論文の内容の要旨

論文題目 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

氏名 谷 直樹

ロケットエンジン開発時の問題点の一つとして、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が挙げられる。インデューサに発生するキャビテーションは、ポンプ揚程の急激な低下をもたらすだけでなく、軸振動の原因となるため、その予測、予防法の確立が急務とされている。しかし、現在のインデューサ設計時のキャビテーション対策は、単純なポテンシャル法による予測を行い、その後、実験を積み重ねることで試行錯誤的に行うことでなされており、効率的とは言い難い。キャビテーション自体は船用スクリュなどで問題となることから、過去から多くの研究例が報告されているが、これらのほとんどは水に関する研究である。しかし、近年の高性能ロケットの推進剤には、液体水素や液体酸素といった極低温流体が用いられており、これら極低温流体中でのキャビテーションの場合、熱力学的効果というものが顕著になることが知られている。これは、キャビテーション発生時に潜熱を奪う影響で、キャビテーション内部の温度が低下する現象で、気液間の密度差が小さい極低温流体特有の現象である。しかし、熱力学的効果を考慮したキャビテーション流れの研究は非常に少なく、系統的な研究は皆無と言ってよい。

そこで、本論文の第一の目的として、極低温キャビテーション流れの基礎的な理解を掲げ、実験、数値計算の双方から考察を行うこととした。そして、この結果から得られた知見を考慮した上で、キャビテーション抑制効果が高いインデューサ形状の設計に指針を与えることを第二の目的とした。

極低温流体は、その取り扱いが困難であり実験は容易ではないため、数値解析が威力を発揮する。しかし、熱力学的効果を考慮したキャビテーション流れ解析手法は、非常に制約が多い手法しか存在しない。そこで、本論文では、Kubota によって提案された Bubble Two-phase Flow (BTF) モデルに潜熱を考慮したエネルギー方程式を加えることで、気泡の非線形振動と潜熱吸収による温度変化を考慮可能とした。また、数値解析法には Thermo-CUP(Thermo CIP Coupled Unified Procedure)法を用いることで、圧縮性、非圧縮性両方の領域が混在する流れ場における高精度解析を可能とした。

本研究においては、大別して、2次元ラバールノズル、単独翼、インデューサ翼列の3種類の対象に関して解析を行っている。ラバールノズルからは、主に熱力学的効果が物理量に与える影響を明らかにし、単独翼からはキャビテーションの大きさの比較を行っている。そして、インデューサ翼列に関する解析では、現行の設計指針との比較と、キャビテ

ーションを抑制する形状の提案を行っている。

● 2次元ラバールノズル

まず、極低温キャビテーションの基礎的な知見を得るため、単純な形状の2次元ラバールノズルに関して実験と数値計算を行った。作動流体には、ロケット推進剤である液体酸素に物性が非常に良く似ている液体窒素を用い、対照実験として水も用いた。その結果、液体窒素の場合、キャビテーション領域で水には見られない顕著な圧力低下が見られた。この圧力低下領域はキャビテーション領域の大きさに対応していることから、熱力学的効果の影響であると推定された。同様に、数値計算結果から、この圧力低下は熱力学的効果により温度が下がり、それに伴って飽和圧力が低下したためであることが明らかとなった。さらに、この圧力低下の影響でキャビテーション消滅部の圧力勾配が大きくなり、このために逆流が誘起されており、熱力学的効果が流れ全体に影響を及ぼす可能性も示唆された。

● 単独翼

ラバールノズルの考察から、極低温流体と水のキャビテーションにおいて圧力、温度などの物理量分布がどのように異なるかを知ることができた。しかし、ノズルの場合は流路全体にキャビテーションが発生してしまいキャビテーション形状の違いを知ることができなかった。このため、部分キャビテーションが生じる流れ場として単独翼を採用し、水と液体窒素でのキャビテーション形状の比較を行った。加えて、キャビテーション性能の比較も行い、熱力学的効果が揚力に与える影響を考察した。

まず、キャビテーション形状に関しては、水と液体窒素の間でキャビテーション形状が大きく異なり、極低温流体の方が水よりも短く、かつ分厚いキャビテーションが生じることが明らかとなった。キャビテーション長さが短くなるのは熱力学的効果の影響で、気泡運動と、熱力学的効果に伴う圧力分布が連成した結果、気泡崩壊が促進されるためであることが判明した。また、キャビテーションの分厚さに関しては、キャビテーション内部のマッハ数が影響しており、キャビテーション領域のマッハ数が高いほどキャビティが薄くなることがわかった。極低温流体の場合、キャビテーション領域のマッハ数は、水の約10分の1程度であり、分厚さが大きく異なる結果となった。

次に、キャビテーション時の性能に関しては、キャビテーション発生が顕著であるほど、極低温流体の方が熱力学的効果の影響で性能が向上することがわかった。これは、キャビテーション領域で圧力が低くなる領域が大きくなるため、熱力学的効果によってインデューサの性能が向上するとした過去の研究結果を支持するものである。しかし、キャビテーションがわずかしこ発生していない場合は、かえって極低温流体の方が揚力が低くなる領域が存在し、必ずしも熱力学的効果が性能向上に寄与するわけではない。

また、同様の流れ場で、液体酸素に関して性能比較を行った。これは、実際のインデュー

一サの開発時において液体酸素を模擬する流体として液体窒素や水が用いられるからである。性能を比較した結果は、液体酸素と液体窒素はほぼ同様の傾向を示すのに対し、水の場合は全く異なる結果となった。このことから、液体酸素の代替流体として液体窒素を用いるのは妥当であるが、水を用いると全く異なる結果を示す危険性があると言える。

●インデューサ翼列

ラバールノズル、単独翼の解析から、極低温キャビテーションの特性を知ることができた。以上の知見を考慮したうえで、インデューサ翼列に関して計算を行い、現在の設計指針と比較を行い、その改良案を提案する。

現在の設計指針は、ポテンシャル法を利用して平板翼列に発生するキャビテーション形状を予測し、それを翼前縁形状と比較して、両者が干渉しない形状が良いとしている。しかし、このポテンシャル法の導出過程は非常に仮定が多く現実的ではない上、干渉しない方が良くとする指針自体根拠が無い。このため、はじめに2次元翼列に関して計算を行い、現在の設計指針が妥当かどうかを検証した。その結果、現行のポテンシャルキャビティ形状と翼形状が干渉しない形状にした場合でも激しい非定常キャビテーションが発生しうることがわかった。これに対し、ポテンシャルキャビティ形状と翼前縁形状が接するような場合にもっとも安定したキャビテーションが発生した。一方、ポテンシャルキャビティ形状と翼形状が大きく干渉する場合は翼加圧面側からもキャビテーションが生じ、揚程が大きく低下することになった。以上から、現行の設計指針は必ずしも適切とは言えず、むしろ前縁形状をポテンシャルキャビティ形状と接する程度にすることが良いことがわかった。

実際のインデューサは3次元性が非常に強い形状をしているため、2次元翼列とは異なった現象が発生することが予想される。本論文においては、翼後退角の有無の2種類、そして、先の2次元翼列で得られた知見を用いた翼断面形状と、現行の翼断面形状の2種類の計4ケースに関して比較検討を行った。その結果、後退角が無い場合は2次元翼列で得られた知見を用いることでキャビテーション抑制効果があることがわかった。これに対し、後退角がある場合は、翼断面形状が異なっても、後退角が無い場合に比べHub側ではキャビテーションが大きく抑制され、一方、Tip側では後退角が無い場合よりも大規模なキャビテーションが発生することがわかった。これは、どちらも後退角の影響であることが判明した。

以上の知見を総合して、キャビテーション体積を極力抑制するインデューサ形状を考察した。3次元解析の結果から、Hub側では翼断面形状に関係なく後退角の影響でキャビテーションが抑制され、これに対しTip側では後退角が無く、2次元解析の知見を用いた断面形状が良いことが判明したため、Hub側では後退角を有し、Tip側では後退角無し、断面形状も2次元解析の知見を用いた翼型を提案し、数値解析を実施した。その結果、この形状の場合HubからTipにわたってキャビテーション体積を抑制する効果があることがわ

かった。

以上、本論文は、ロケットターボポンプ用インデューサ部分尾設計に深く関連するキャビテーション流れに関して研究を行い、熱力学的効果が卓越する極低温キャビテーションの特性を様々な方向から明らかにし、キャビテーション体積を極力抑制するインデューサ形状について指針を示したものである。