

論文の内容の要旨

論文題目 均質媒体モデルによるキャビテーション計算の
問題点とその改良

氏 名 鈴木 貴之

第1章 序論

キャビテーションは、流体運動の中で動圧の増加に伴う静圧の低下により発生する沸騰現象である。キャビテーションは、ポンプや水車、船舶のプロペラなどの液体を作動流体とする流体機械の内部流れにおいてしばしば発生する。一般に、キャビテーションは流体機械の性能低下、不安定性、振動、騒音や材料の壊食などの弊害を引き起こす。したがって、キャビテーション流れを予測することは、工学的に非常に重要な問題である。過去約 20 年に渡り、媒体の膨張と収縮によりキャビテーションを表現する均質媒体モデルが開発され、商用コードとインハウスコードの両方で広く利用されている。また、均質媒体モデルには流れ場と密度変化の関係の表現の仕方が異なる多くのモデルが存在する。しかし、流れ場の三次元性や乱流モデルの扱いの問題から、過去の研究においては均質媒体モデルの精度限界は明らかにされていなかった。そこで、本研究では、流体機械のキャビテーション発生時の性能予測によく用いられる湧き出し型の均質媒体モデルを用いてキャビテーション流れの LES 解析を行い、実験結果と比較し、キャビテーションモデルの精度検証を行う。また、従来の研究では、キャビテーションに影響を与えると考えられる現象をモデルに取り込むという形でモデル開発が行われていたが、支配方程式に基づき考察を行いキャビテーションモデルの本質的な問題点を示し、さらに、得られた知見に基づき新しいキャビテーションモデルを提案することを本論文の目的とした。

第2章 均質媒体モデルによるキャビテーション流れ解析精度の検証

均質媒体モデルとして沖田モデルと密度変化に修正を加えた改良沖田モデルを用いて LES によりキャビテーション流れ解析を、2つの単独翼 (Clark-Y11.7%, NACA0015) まわりの流れと遠心ポンプ内部流れに対して実施し、実験結果と比較して精度検証を行った。単独翼の解析からは、キャビテーション発生時の翼の揚力を過小評価するとともに、キャビテーションの発達に伴い揚力は緩やかに低下し、実験において見られるキャビテーションの発達に伴う急激な揚力の低下は再現されないことがわかった。また、キャビティの長さを過小評価することと非定常性が再現されないことが揚力の過小評価に寄与していることがわかった。さらに、キャビテーション発生時の翼の後縁付近の静圧係数分布から、運動エネルギーの損失が発生し、揚力が過小評価されていることが示唆された。また、遠心ポンプの解析からは、単独翼の解析と同様にキャビティの長さを過小評価することによりスロート部のキャビティによる閉塞が適切に再現されず、揚程の 3%低下が実験よりも小さい圧力で発生することがわかった。

第3章 均質媒体モデルの問題点に関する理論的考察

単独翼の解析結果から示唆されたキャビテーション発生時の運動エネルギーの損失の発生について運動エネルギーの輸送方程式を基に考察を行った。その結果、バロトロピーモデル以外のキャビテーションモデルでは膨張と収縮が発生する時の圧力が異なることから、運動エネルギーから熱の変換、すなわち損失が発生することを示した。また、二次元のベンチュリ管内流れと NACA0015 翼まわりのキャビテーション流れ解析を行い、これらの計算結果における媒体の膨張収縮に伴う運動エネルギーの損失量を定量的に評価した。その結果、考察において示したように膨張と収縮が発生する時の圧力が異なることで膨張収縮に伴うエネルギー変換の和が負になり損失が発生すること、ならびに、NACA0015 翼まわりのキャビテーション流れにおいては膨張収縮に伴う損失によってキャビティの後方に低速領域が発生することによりキャビテーション発生時の翼の揚力が過小評価されることがわかった。これらの運動エネルギーの輸送方程式に対する考察と前述の計算結果とから、翼の揚力低下の原因は均質媒体モデルの密度の決め方によらず、密度変化によりキャビテーションを表現する均質媒体モデルのモデル化自体にあり、このことから現状の均質媒体モデルでキャビテーション発生時の翼の揚力を正しく評価することは困難であることがわかった。

第4章 キャビテーションモデルの改良提案と検証

媒体の膨張収縮に伴うエネルギーの変換過程において運動エネルギーの損失が必ず発生するという知見に基づき、体積力を付加することにより、発生する損失を補うキャビテーションモデルを提案した。この改良モデルでは、媒体の膨張収縮が発生する時に、付加した体積力による仕事と膨張収縮に伴い発生する損失の和が、飽和水蒸気圧で膨張

収縮している時のエネルギー変換に等しくなり、見かけ上媒体の膨張収縮過程における変化が可逆になる。次に、第3章と同様なスリップ条件を翼面に課した NACA0015 翼周りのキャビテーション流れにおいて、改良モデルの検証計算を行った。その結果、改良モデルでは、既存のモデルにおいて発生していた媒体の膨張収縮に伴う損失によるキャビティ後部の低速領域の発生を抑え、シートキャビティの長さを既存のモデルに比べて長く予測し、揚力を過小評価する既存のモデルの問題を改善することを確認した。よって、膨張収縮に伴う損失を体積力を付加することにより補い、予測精度の向上を狙うという改良モデルの目的は適切に実現されていると考えられる。ただし、今回の検証計算はキャビティの長さがコード長に対して 10%程度の短い、定常なシートキャビテーションに対して行ったものである。また、翼面にもスリップ条件を課した。したがって、ノンスリップの表面と乱流モデルを用いたより成長したシートキャビテーションや非定常なキャビテーションの解析に対する本モデルの検証は今後の課題とする。

第5章 結論

本研究では、LES 解析により均質媒体モデルの精度限界と問題点を明らかにした。また、結果において示唆された運動エネルギーの損失について理論的な考察を行い、媒体の膨張収縮に伴う運動エネルギーの損失量を、ベンチュリ管内と NACA0015 翼まわりのキャビテーション流れを対象とした検証計算において定量的に評価した。さらに、得られた知見に基づき新しいキャビテーションモデルを提案し、その検証を行った。これらに関する結論を以下にまとめる。

- (1) 単独翼のキャビテーション解析結果と実験結果との比較から、キャビテーションの発生と同時に揚力を過小評価し、キャビテーションの成長に伴い緩やかに揚力が減少し、実験でみられる急激な揚力の減少は再現されない。これは、主にキャビティの長さの過小評価による。また、実機ポンプの解析においても、キャビティの長さの過小評価により吸い込み圧力に対する揚程の変化を定量的に予測できない。
- (2) 現状の均質媒体モデルを用いた解析では、媒体が膨張する時と収縮する時の圧力差により、運動エネルギーの損失が発生する。ベンチュリ管内のキャビテーション流れの解析において損失の発生量を定量的に示した。また、NACA0015 翼まわりの流れを対象とした計算では、この損失によりキャビティの後方に低速領域が発生し翼の揚力が低下する。このことが、均質媒体モデルを用いた解析では揚力が過小評価される本質的な原因である。
- (3) 発生する損失を体積力による仕事によって補うモデルの改良案を提案し、スリップ表面を持つ NACA0015 翼まわりのキャビテーション流れ解析において検証を行った。安定なシートキャビテーションでは、改良モデルは現状のキャビテーションモデルと比較してキャビティが長くなり、実験の揚力特性を再現する。