

氏名	小西 毅
学位の種類	博士 (工学)
学位記番号	博理工 686 号
学位授与年月日	令和 3 年 9 月 1 7 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 1 項該当
学位論文題目	放射・周状流路を有する遠心式ポンプに関する研究
審査会	委員長 西 泰行 稲垣 照美 田中 伸厚 福富 純一郎

論文内容の要旨

近年、医療機器やコンピュータの冷却用などの小型製品に用いられるポンプは、低流量・高揚程化に伴い、低比速度領域での性能向上が求められている。その仕様を満たすため、効率を優先し容積形を採用すると、高い加工精度が要求される上に大型にならざるを得ない。そのため小型化が可能なターボ形ポンプは従来から研究が行われている。その主要な課題は既存の設計法が適用できないことにあり、低い比速度の羽根車に対し、羽根出口角度を大きく設計する提案がなされたが、揚程曲線に右上がり不安定特性（以下、不安定特性）が顕著に現れ、運転中に振動や騒音が発生した。この問題に対しては、オープン形あるいはセミオープン形羽根車を採用することで不安定特性を緩和できた。しかし、いずれの羽根車を採用しても羽根先端隙間の増大による性能の著しい低下や、部分流量領域における羽根間流路の大きな渦による不安定特性が生じるため、全流量領域での安定性が確保されなかった。これらの結果を踏まえターボ形と容積形との比速度領域において効率がよく、かつ、全流量領域で安定的な運転を可能とするポンプを得るには、従来にない発想が求められている。

そこで羽根入口・出口角度 90° のクローズド形羽根車構造を基本として、不安定特性を抑制する目的で羽根車内部に放射状・周状の流路を設けた新たな羽根車を提案した。本羽根車は、内部に幾何学的な複数の羽根を有することから、羽根間流路に発生する渦を抑制させる作用が生じると考えた。羽根車内部の構造設計は、羽根枚数と両流路幅を得ることにより具体的な形状が決まる。このような形状を有する羽根車は他に例がなく、性能特性や流動特性は全く調査されていない。

本論文では、提案する羽根車を搭載したポンプ性能を実験的に明らかにした。さらに、一次元性能予測法や数値流体解析（以下、CFD）の結果に基づく損失解析法を提案し、その妥当性を示すとともに、内部流動や損失発生メカニズムを明らかにした。

はじめに、本羽根車に対し工業上有用な性能予測法を構築するため、一次元性能予測法を提案した。本法は理論揚程から羽根車内の摩擦損失、衝突損失および急拡大損失を引き、全揚程を見積もる手法である。この妥当性を定量的に評価するため、閉ループの流路を用いたポンプの性能試験と 3 次元非圧縮性定常解析による CFD の結果を比較した。また、CFD 結果から理論揚程および羽根車内の摩擦損失とその他の損失、ポリュートケーシング内の摩擦損失と混合損失に分離する損失解析法も提案した。本羽根車搭載ポンプの性能は、比速度が $121[\text{min}^{-1}, \text{m}^3/\text{min}, \text{m}]$ で最高効率点流量 $1.0 \times 10^{-3}[\text{m}^3/\text{s}]$ 時におよそ $40[\%]$ であり、不安定特性を持たないことが明らかとなった。これは、同等の比速度かつ流量の従来の羽根車よりも高い性能と安定性を有した。次に、CFD 結果と性能試験の全揚程は、全流量領域で一致し、CFD 結果の妥当性が確認された。さらに、CFD 結果と損失解析法の全揚程の比較により、本損失解析法は最高効率点流量から過大流量にかけて妥当であるが、部分流量においてはやや過大評価することが示された。一次

元性能予測法は、性能試験の全揚程より高くなった。これは、当該法はポリュートケーシングの損失が含まれないためである。しかし、最高効率点流量から過大流量の羽根車内の全水力損失は見積もれることが明らかとなった。

次に、本ポンプの性能特性の変動と内部流動の詳細を明らかにするため、3次元非圧縮性非定常解析による CFD を実施した。その結果、羽根車の回転に伴う性能の時系列変化は、放射状流路が舌部付近を通過する際に生じることを明らかにした。また、3次元非圧縮性非定常解析による CFD 結果を用いた損失解析法も提案し、全流量領域において CFD 結果の全揚程と良好に一致することにより、本法の有効性が示された。さらに、羽根車の1回転中の内部流動と各種水力損失の時系列変化を調査した。調査により羽根車の回転に伴う全揚程の変動は、ポリュートケーシング内の損失が影響しており、この損失の変動は、放射状流路出口付近の主板および側板内面と中間円板両面から生じる渦の舌部通過に伴う変化が影響していることを解明した。また、流量の減少に伴い渦そのものの大きさと渦の変動の大きさが増大することにより、部分流量において全揚程の変動が大きいことを明らかにした。

以上により、本論文では、新たな羽根車を提案し、低比速度の羽根車で流量が少ないにも関わらず従来の羽根車よりも効率が高く、全流量領域で安定運転が可能な特性を有することを明らかにした。また、簡便な一次元性能予測法を提案し、その妥当性を示した。さらに、羽根車の回転に伴う性能特性と内部流動の変動、および損失発生メカニズムも解明した。これらは、この種の羽根車の設計指針の確立につながり、ポンプ効率の向上ひいてはエネルギー効率の改善に資する。

論文審査の結果の要旨

ターボ形ポンプは容積形ポンプに比べて振動・騒音が少なく、小型・簡素化が可能であるため、近年の低流量・高揚程の仕様に対する要求の高まりから、低比速度化が求められている。本論文は、低流量・高揚程においても高効率かつ広い流量域で安定運転が可能な低比速度ターボ形ポンプの実現に向けて、内部に放射・周状流路を設けた新しい羽根車を提案し、その性能特性および流動特性を詳細に調査したものである。本羽根車は揚程性能を向上させるため羽根入口・出口角度 90° のクローズド形羽根車構造を基本とし、従来のターボ形ポンプの遠心羽根車とは異なり、羽根幅だけでなく、羽根間流路を狭くすることで、低流量・低比速度化と不安定特性発生の原因とされる渦の抑制を図っている。

まず、本羽根車を搭載したポンプの性能特性を実験的に調査し、流量 $0.001\text{m}^3/\text{s}$ のとき最高効率が約40%であること、比速度が $121[\text{min}^{-1}, \text{m}^3/\text{min}, \text{m}]$ と低く不安定特性を持たないことを示し、同等の比速度かつ流量の従来のターボ形ポンプの効率（推定値）よりも高いことを明らかにした。さらに、三次元定常数値流体解析（以下、定常CFD）を行い、本ポンプの性能を概ね予測できることを示すとともに、定常CFD結果に基づく損失解析法を構築し、水力損失の内訳を明らかにした。また、本ポンプの性能を設計段階で簡便に見積もるための一次元性能予測法を提案し、ポリュートケーシング内の損失を考慮していない分だけ全揚程を高く見積もるが、最高効率点流量から大流量にかけて羽根車内の損失をおおよそ見積もれることを示した。

次に、本ポンプの性能特性と内部流動の関連性を詳細に調査するため、三次元非定常数値流体解析（以下、非定常CFD）を行い、羽根車の回転に伴う性能特性の変動は放射状流路が舌部付近を通過する際に生じることを明らかにした。さらに、非定常CFD結果に基づく損失解析法も構築し、本ポンプの全水力損失は流量の増加に比例すること、その要因として摩擦損失以外の羽根車内の損失の増大が影響していることを示した。また、羽根車の回転に伴う全揚程の変動は、摩擦損失以外のポリュートケーシング内の損失が影響していることを示し、この損失の変動は、放射状流路出口付近の主板および中間円板から生じる渦の舌部通過に伴う変化が影響していることを明らかにした。

以上のように本論文は、放射・周状流路を有する新しい羽根車を提案し、低流量・低比速度の性能を有するターボ形ポンプとして有用であることを明らかにしている。また、本羽根車の性能を簡便に見積もるための一次元性能予測法を提案し、その妥当性を示している。さらに、羽根車の回転に伴う性能特性と内部流動の変動、および損失発生メカニズムを明らかにしている。これらの成果は、この種の羽根車の設計指針の確立やエネルギー効率の向上に寄与するだけでなく、高粘度流体や非ニュートン流体を輸送するポンプの開発に資するものであり、学術上寄与するところが大きい。本論文の主たる内容は、学術誌論文1編（英語）に発表されている。また、最終試験における口頭試問により、当該分野における十分な専門知識を有していることが認められた。以上を総合して、当審査会では、本論文は博士学位論文の評価基準を満たし、合格と判断した。

最終試験までの経緯としては、8月4日に開催したオンラインの公聴会に研究科外審査員を含む全審査員が出席し、結果に基づき各審査員は審査報告書を作成した。同日に各審査報告書に基づき審査会および最終試験を行った。