

博士論文（要約）

経皮的心肺補助装置小型化のための 新しい血液ポンプの開発

原伸太郎

論文の内容の要旨

論文題目：経皮的心肺補助装置小型化のための新しい血液ポンプの開発

氏名 原伸太郎

【背景・目的】

経皮的心肺補助装置による救命率は、2005年のPCPS研究会における国内調査では1987年から2005年の間で5788例の報告がある。これらは主に開心術や救命救急での利用であるが、その使用報告は毎年増加している。しかし、経皮的心肺補助装置を利用する患者は急性期の患者が多く、また一刻を争う状況であることも少なくない。このような現状から、今後、ドクターカーやドクターヘリ、一般病棟などでも導入されることで、より救命率を上げることが可能となると思われる。このとき現行の装置では、装置本体の可搬性に乏しく、また操作性も悪いため、小型軽量ポータブルな経皮的心肺補助装置の開発は急務である。経皮的心肺補助装置の小型化を推進するに当たり、高揚程な特性をもつポンプ性能、耐久性、サイズ、溶血特性といったものをすべて満たす経皮的心肺補助装置を小型化することが可能な既存の血液ポンプは存在しない。これらの現状を打破するためには、これまでにない新しい原理の血液ポンプを開発する必要がある。

本研究は、経皮的心肺補助装置を小型化するために、新しい原理と構造を持つ血液ポンプとしてシーケンシャルフロー型遠心ポンプを提案し、数値流体解析や実験モデルによる性能試験などを駆使して、これまでにない新しい血液ポンプであるシーケンシャルフロー型遠心ポンプを開発することを目的とした。

【シーケンシャルフロー型遠心ポンプの開発】

図1にシーケンシャルフロー型遠心ポンプを示す。ポンプ流入口より流入した流体は、インペラーの中央部からインペラー外周部に移動する際、1回目の遠心力が付加される。この昇圧された液体が再度、インペラーの中心部に戻るようなハウジング構造にすることで、同一のインペラーで2回目の遠心力を加える。2回目の昇圧を行った流体は流出口より駆出されることで、同一サイズで高揚程な遠心ポンプとなる。さらに複雑な昇圧構造でありかつ、昇圧前、1段階昇圧、2段階昇圧の流体がポンプ内部に併存することから、ポンプ内部の圧バランスがとりにくい。そこで、インペラーを4つの部分に分けて、ダブルボリュート構造を採用した。駆動方式は外部駆動モータを利用した、マグネットカップリングで非接触駆動、軸・軸受にはモノピボット軸受または動圧軸受の採用を想定した。

一次モデル

数値流体解析ソフトを用いて、シーケンシャルフロー型遠心ポンプの昇圧原理が起こりうるのかどうかを確認した。その結果、図 2 に示すような圧力分布を確認することができた。また図 3 に数値流体解析モデルにおける差圧流量曲線を示す。一般的な遠心ポンプと比べて、低い回転数で高揚程を達成することが確認できた。しかし、流体の昇圧する力が弱いこと、および無駄な旋回流や渦が多いことが明らかになったことから、できるかぎり渦の発生を抑えるように無駄な流路を除外する必要があることが分かった。

二次モデル

二次モデルでは一次モデルの問題であった渦流をできる限り除外するために流路を狭くしかつダブルボリュート構造が安定するように改良を行った。改良したものを数値流体解析および実機を製作し、性能を検討した。その結果として図 4 に数値流体解析で求められた流速ベクトル図を示す。流路を狭くすることで渦流を小さくすることができた。また実機で測定した差圧流量性のおよびポンプの流体効率を図 5 および図 6 に示す。その結果、3400rpm で目標性能である 5l/min 350mmHg をポンプ効率 11% で達成することができた。

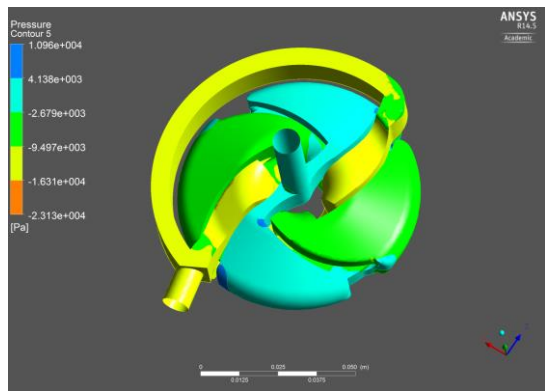
三次モデル

三次モデルでは二次モデルまでに解決されなかった動圧軸受けの安定性の問題もあり、溶血試験を実施するに当たり解決すべき問題が多いと考えられた。また二次モデルにおける軸受け流れの増加と高効率化をめざし、三次モデルの設計を行った。数値流体解析ではせん断応力について検討した。得られた画像を図 7 に示す。インペラーの羽根の位置によっては高せん断応力がかかる領域が明らかになった。しかし、実機において溶血試験を行ったところインペラー周辺の圧力バランスが不均等であること、動圧軸受けがまだ安定していないことがわかり、インペラーの改良および真円動圧軸受の精度向上または 3 円弧動圧軸受への変更を行った。その結果、初期の状態では一般的な遠心ポンプである BPX80 と比べて当初、778 倍であった NIH が 3 円弧動圧軸受けと上下バランスを整えたインペラーでは 7.8 倍まで溶血を低減することができた。

【まとめ】

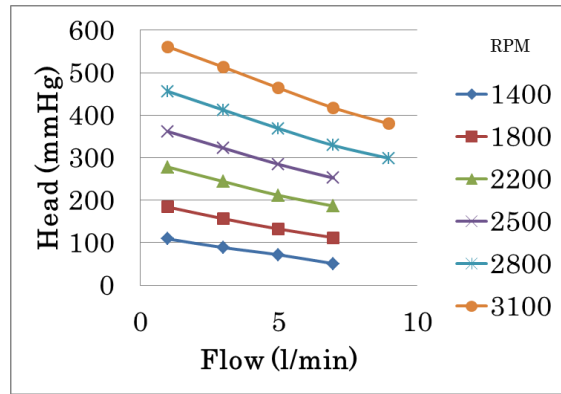
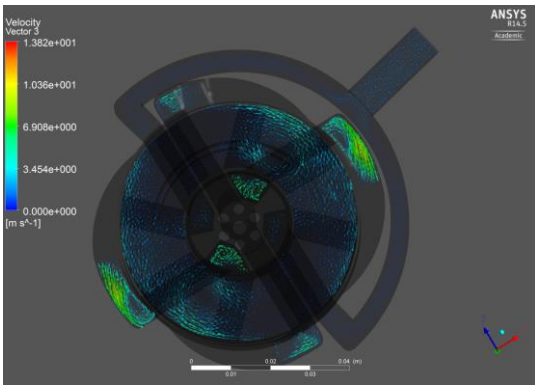
開発したシーケンシャルフロー型遠心ポンプは、圧損失を考慮した 5 l/min、350 mmHg の性能を 3200 rpm で達成することができたことから、経皮的心肺補助装置に必要な流量を駆出することが可能であることが示された。

形状的特性に関しては一般的な遠心ポンプに比べ、人工肺との接続が容易であるポート配置を実現することができた。さらに動圧軸受けを用いたインペラーの非接触支持機構により、現状の溶血量は市販の遠心ポンプ (BPX-80) の 7.6 倍まで低減することができた。今後、溶血特性のさらなる改善と動物実験による抗血栓性の検討が必要である。



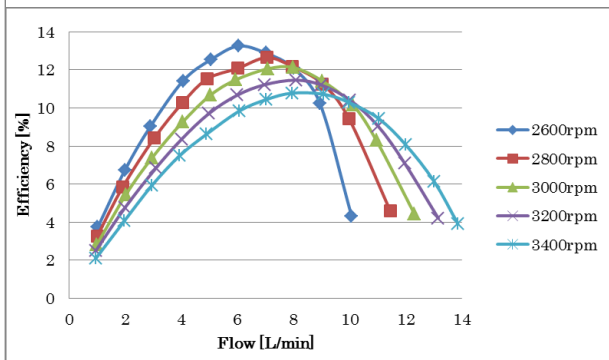
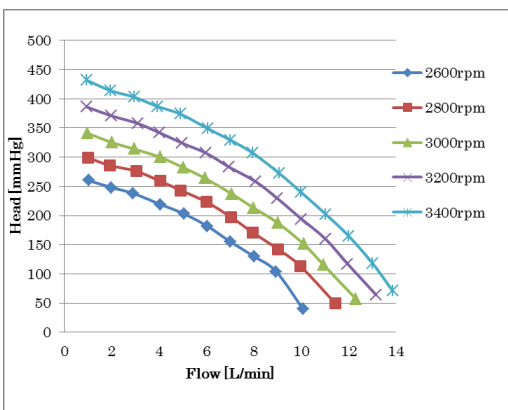
左：図1 シーケンシャルフロー型遠心ポンプ（3次モデル）

右：図2 シーケンシャルフロー型遠心ポンプ1次モデルにおける圧力分布



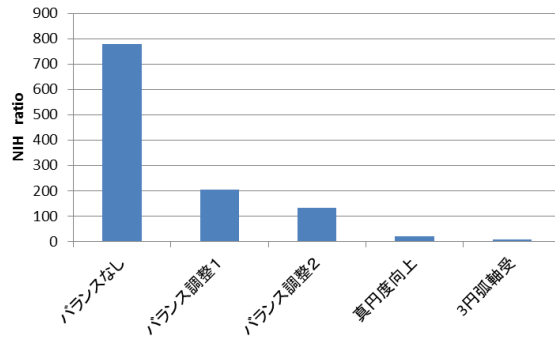
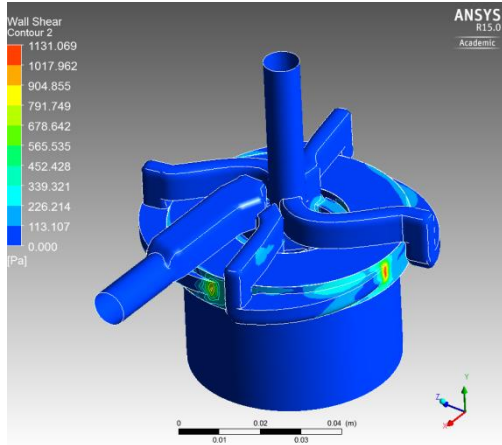
左：図3 シーケンシャルフロー型遠心ポンプ1次モデルにおける圧力分布

右：図4 シーケンシャルフロー型遠心ポンプ2次モデルにおける流速分布



左：図5 シーケンシャルフロー型遠心ポンプ2次モデルにおける差圧流量曲線（実機）

右：図6 シーケンシャルフロー型遠心ポンプ2次モデルにおけるポンプ全効率曲線（実機）



左：図7 シーケンシャルフロー型遠心ポンプ3次モデルにおけるせん断応力分布

右：図8 シーケンシャルフロー型遠心ポンプ3次モデルにおけるNIH比較