

軸流血液ポンプ用羽根形状の最適化に関する検討

Optimization of the vane design for an enclosed-impeller type axial flow blood pump

○ 熊井久人 (東京電機大学) 住倉博仁 (国立循環器病研究センター研究所)

大沼健太郎 (国立循環器病研究センター研究所) 三田満男 (東京電機大学)

大越康晴 (東京電機大学) 福長一義 (杏林大学) 本間章彦 (東京電機大学)

舟久保昭夫 (東京電機大学) 福井康裕 (東京電機大学)

Hisato KUMAI, Tokyo Denki University, Hirohito SUMIKURA, National Cerebral and Cardiovascular Center Research Institute, Kentaro OHNUMA, National Cerebral and Cardiovascular Center Research Institute, Mituo MITA, Tokyo Denki University, Kazuyoshi FUKUNAGA, Kyorin University, Yasuharu OHGOE, Tokyo Denki University, Akihiko HOMMA, Tokyo Denki University, Akio FUNAKUBO, Tokyo Denki University, Yasuhiro FUKUI, Tokyo Denki University

Abstract: We have been developing an enclosed-impeller type axial flow blood pump. In terms of the vane design of the axial pump, we have determined a geometry of vanes as several design variables and have tried optimization of the vane design by using an automatic optimization system that employed a genetic algorithm and CFD analysis. However, it is not clear whether these design variables of vanes are effective to improve the pump performance in optimization system. The purpose of this study is to examine the design variable of vanes which contribute to the increase in the pressure head. The design variable which affected the increase in the pressure head most was shaft diameter of diffuser, and a 5.6% improvement in the pressure head was confirmed. This analysis is useful in the selection of the design variables in the automatic optimization system, and improvement in pump performance.

Key Words: Enclosed-impeller, Axial flow blood pump, Genetic algorithm, Optimization system,

1. はじめに

我々は、左心補助人工心臓 (LVAD) として動圧軸受を有する軸流血液ポンプの研究開発を行っている。現在、本ポンプは圧揚程 100 mmHg、回転数 9,500 rpm 時において流量 5L/min を達成しており、LVAD として十分な性能が得られている。しかしながら、消費電力が高く低効率であり、血球破壊の程度を示す溶血性能も低いため、これらの改善が必要となっている。

現在までに本ポンプの羽根形状に関し、数値流体力学解析によるポンプ内流れの解析と遺伝的アルゴリズムを用いた最適化システムを構築し検討を行ってきた⁽¹⁾。しかしながら、最適化の際に用いる設計変数について検討が行われておらず、より効率の良い最適化システムを構築するにはその検討が必要である。

そこで本研究では、最適化システムの高効率化を目的とし、羽根の設計変数について検討を行ったので報告する。

2. エンクロード型軸流血液ポンプ

本軸流血液ポンプは、流入部と流出部に血液の流れを整流するためのフローストレートナとディフューザ、中央部に血液を駆出するためのエンクロードインペラを有する構造となっている。エンクロードインペラはスピンドルロータ内に設置され、その両端に円錐型動圧軸受を有している。本ポンプはスピンドルロータとポンプハウジングの外部に設置したステータから構成されるブラシレス DC モータによりインペラが回転し、血液が駆出される機構となっている⁽²⁾ (Fig. 1)。本血液ポンプは構成部品点数が少なく、構造が簡素であるため小型である。また、動圧軸受の採用により、センサレス、非接触駆動を可能とし、制御も簡易という特徴を有しており、高耐久性、および高信頼性

が期待できる血液ポンプとなっている。

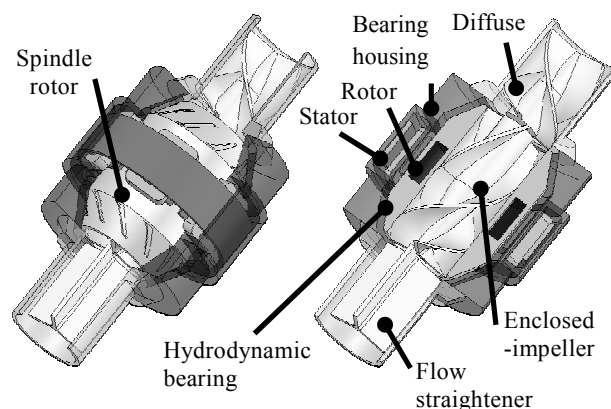


Fig. 1 Pump outline of the axial flow blood pump

3. 実験方法

3-1 設計変数の最適化

3-1-1 設計変数

各羽根車の全長は 20 mm、直径は $\phi 14$ mm とした。羽根の設計変数として、インペラとディフューザに対し、羽根ピッチ (4 変数 P1-P4) とシャフト直径 (3 変数 D1-D3) を与えた。各設計変数の変化幅は、上位 10 モデルにおける設計変数値の最大値と最小値の範囲とした。なお、血液の流れの観点から、最も流入側に近い軸径と最も流出側に近い軸径は最小値である 4 mm に固定した (Fig. 2)。

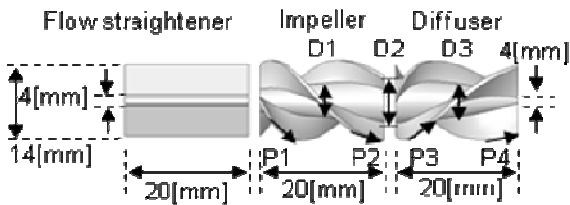


Fig. 2 Design variables

3-1-2 寄与度評価

コントロールモデルとして、最も高い圧揚程が得られたモデルを選出した。そのコントロールモデルを基に、1つの設計変数のみ変化幅の範囲内で値を変化させた際の圧揚程の解析を行った。全ての設計変数に対して同様の解析を行い、どの設計変数が圧揚程の向上に寄与するのかを検討した。また、各設計変数にて圧揚程が最大を示した値を組み合わせたモデルを設計変数最適化モデルとした。

3-2 羽根特性試験

閉ループ模擬循環回路を用いて、コントロールモデルおよび設計変数最適化モデルに対する *in vitro* 評価試験を行った。実験は、シャフトにより羽根を直接回転させることで、羽根のみの特性を評価することが可能な試験用ポンプを用いた(Fig. 3)。羽根形状は3D-CADソフトウェアにて設計し、光造形機を用いて製作した。実験は Table 1 に示す条件にて行った。流量変化に対する圧揚程の測定を行い、P-Q特性、および効率特性の評価を行った。なお、作動流体にはグリセリン水溶液を使用し、粘性は血液と同等の3.3 cPとした。

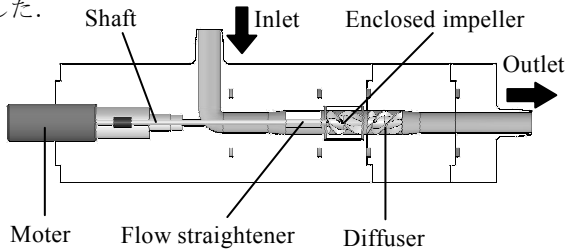


Fig. 3 Schematic of the Examination pump

Table 1 Experimental conditions

Working fluid	Glycerin solution
Viscosity	3.3 cP
Initial fluid value	500 mL
Flow rate	1~8 L/min
Circuit length	2 m (3/8" tube)

4. 実験結果

4-1 設計変数の最適化

解析の結果、圧揚程に対する影響が高い設計変数は、D3, P1 であるということが示唆された。また、各変数の中で圧揚程の向上が見られたのは、D1, D3, P3, P4 であり、逆に圧揚程が減少した変数は、D2, P1, P2 であった。それぞれ、コントロールモデルより 3.5%, 5.6%, 1.7%, 2.3% (D1, D3, P3, P4), -6.6%, -8.0%, -2.3% (D2, P1, P2) の圧揚程の変化が見られた。

4-2 羽根特性試験

in vitro 評価試験による P-Q 特性を Fig. 4 に、ポンプ効率特性を Fig. 5 にそれぞれ示す。実線は設計変数最適化モデルを、破線はコントロールモデルの結果をそれぞれ表している。Fig. 4, 5 より、設計変数最適化モデルの圧揚程と効率は、全ての計測流量値においてコントロールモデルより改善がみられた。

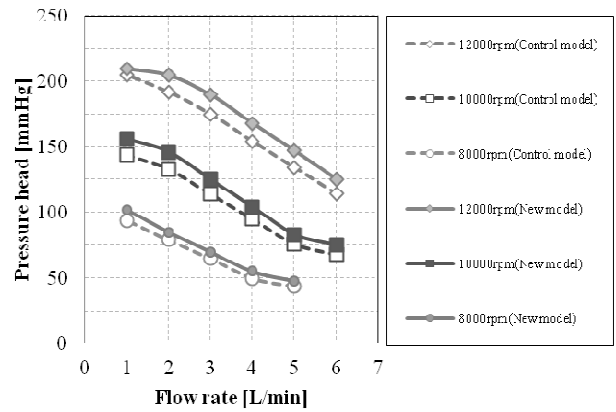


Fig. 4 P-Q characteristics

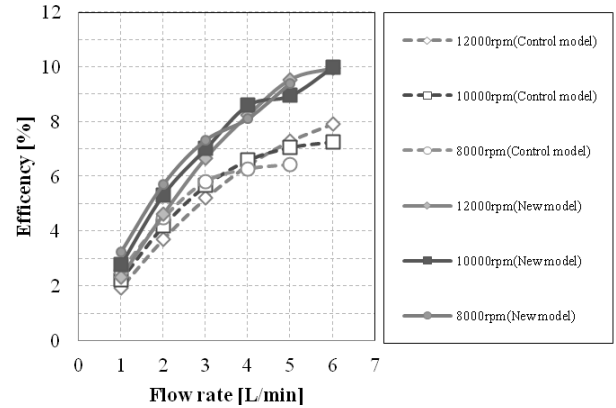


Fig. 5 Efficiency characteristics

5. 考察

5-1 設計変数の最適化

解析の結果、圧揚程に対する影響が高い設計変数は、D3, P1 であるということが示唆された。これらのことから D3, P1 付近に新しく設計変数を設定することで、最適化システムを向上させることができると示唆された。また、この手法では各設計変数が圧揚程に与える影響に着目して最適化を行ったため、各設計変数の相互効果については検討を行っていないことから、各設計変数が互いに及ぼしあう影響を検討する必要があると示唆された。

5-2 羽根特性試験

コントロールモデルと設計変数最適化モデルにおける P-Q 特性を *in vitro* 評価試験より比較した結果、設計変数最適化モデルにおいて圧揚程およびポンプ効率の向上が確認された。これは設計変数を最適化したことにより、圧力の損失が減少したことが原因と考えられた。

6. まとめ

本研究では、最適化システムの高効率化を目的とし、羽根の設計変数について検討を行った。

設計変数を最適化することにより性能が改善することが確認された。

参考文献

- (1) 春日晃, 住倉博仁, 福長一義, 大越康晴, 矢口俊之, 舟久保昭夫, 福井康裕: 遺伝的アルゴリズムを用いた軸流血液ポンプ用羽根形状に関する検討, 日本生体医工学学会: p.184, vol.47
- (2) 住倉博仁, 福長一義, 舟久保昭夫, 福井康裕: 軸流血液ポンプ用エンクローズドインペラの提案とCFDを用いた工学的検証, ライフサポート学会, pp.9-16, vol.20, 2008