

流体動圧軸受を採用した軸流血液ポンプの改良と評価

Improvement of Axial Flow Blood Pump with Hydrodynamic Bearing

○ 住倉博仁(国循研) 大沼健太郎(国循研) 福長一義(杏林大) 大越康晴(東電大)

本間章彦(東電大) 舟久保昭夫(東電大) 福井康裕(東電大)

Hirohito SUMIKURA, National Cerebral and Cardiovascular Center Research Institute

Kentaro OHNUMA, National Cerebral and Cardiovascular Center Research Institute

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 are developing an axial flow blood pump with hydrodynamic bearings as ventricular assist device for destination therapy. The axial flow blood pump is composed of a spindle rotor, a diffuser, a pump housing and a brushless DC motor. The spindle rotor consists of the enclosed impeller, permanent magnets and two conical spiral groove bearings. The vane shape was redesigned based upon the computational fluid dynamic simulation. And the brushless DC motor was also improved in order to increase the pump efficiency. The prototype pump has a diameter of 54 mm, a length of 121 mm. The basic performance was evaluated using a closed-loop mock circulation. A flow rate of 5 l/min with a pressure head of 100 mmHg was achieved at a rotational speed of 8,500 rpm. Then a levitation distance of approximately 20 microns was obtained. The improved axial flow blood pump displayed sufficient hydraulic performance and durability.

Key Words: Axial Flow Blood Pump, Ventricular Assist Device, Hydrodynamic Bearing, Impeller, Mock Circulation

1. 背景

年々増加傾向にある心不全に対し、心臓移植は効果的な治療方法である。しかし、本邦ではドナー数は極めて少なく、1997年の臓器移植法の施行以来、僅か126例(2012年3月)しか行われていない。そのため心臓移植に代わる治療方法として補助人工心臓(Ventricular Assist Device: 以下VAD)の必要性は高い。また、近年ではVADを装着したまま社会復帰を目指すDestination therapy(VADの恒久的使用)という新たな治療も注目されている。

我々は、Destination therapyに使用可能な高い耐久性を有するVADを実現するために、流体動圧軸受、およびエンクロードインペラを採用した軸流血液ポンプを開発中である^{(1),(2)}。現在までに回転数12,000 rpmにて最大揚程220 mm Hg、最大流量8.13 l/minが得られ、左心補助条件である流量5 l/min、圧揚程100 mm Hgは9,500 rpmにて達成可能であった。

今回、本軸流血液ポンプの更なる性能向上を目的とし、ポンプ形状の改良、および評価を行ったので報告する。

2. 方法

2-1. 軸流血液ポンプの概要

本軸流血液ポンプは、紡錘型ロータ、静止羽根であるディフューザ、ポンプハウジング、流入・流出ポート、およびブラシレスDCモータから構成した。紡錘型ロータは永久磁石、ロータヨーク、エンクロードインペラ、および流体動圧軸受である円錐型スパイラル溝付動圧軸受(Conical Spiral Groove Bearing: 以下CSGB)から構成した。本軸流血液ポンプは、ポンプ内部に設置した紡錘型ロータを外部のブラシレスDCモータにより回転させることで非接触にて血液を駆出することが可能である。

本軸流血液ポンプの羽根形状に関し、我々は数値流体解析と遺伝的アルゴリズムを応用した羽根形状の自動最適化

システムを構築し、ポンプ性能を向上させるための圧揚程の最大化を実現する羽根形状に関し検討を行ってきた⁽³⁾。今回、その解析結果を基に各羽根を試作した。エンクロードインペラとディフューザの全長は20, 10 mm、直径はそれぞれ14 mmである。

本軸流血液ポンプには、6スロット4極のインナーロータ型ブラシレスDCモータが組み込まれている。このモータのヨークと永久磁石形状に関しては、高効率化を目的として三次元磁場解析による形状の検討を行った。モータのステータおよびロータヨークは積層珪素鋼版にて作製し、永久磁石はネオジウム磁石とした。また、ステータのコイル巻数は一極あたり45巻とした。

紡錘型ロータに組み込まれているCSGBの溝の設計は、Muijdermanによる理論計算を参考に設計を行った⁽⁴⁾。ここで、エンクロードインペラの形状変更に伴い羽根の全長を35 mmから20 mmに縮小したため、CSGBのテーパ角を従来の30 degreeから45 degreeに変更することで全長を縮小した。CSGBは直径15-25 mm、全長10 mm、溝数10本、溝の深さ50 μmとした。

改良した軸流血液ポンプは全長121 mm、直径54 mm、紡錘型ロータは全長20 mm、直径25 mmである(Fig.1)。

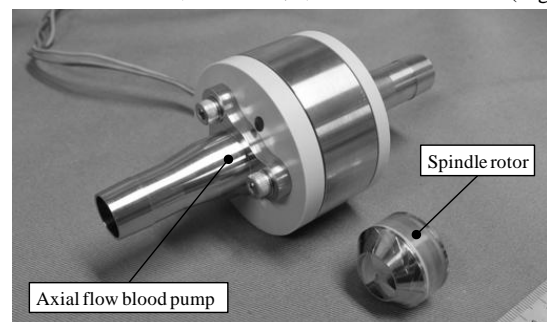


Fig. 1 Picture of axial flow blood pump with spindle rotor

2-2. 実験方法

本軸流血液ポンプを閉ループ模擬循環回路に接続し、ポンプ特性試験を行った。閉ループ模擬循環回路は、試作軸流血液ポンプ、リザーバ、1/2 インチチューブ、超音波流量計(T106, Transonic Systems Inc.)、圧力センサ(PA-500, 日本電産コパル電子)、およびスロットル弁から構成した。超音波流量計にてポンプの流量、圧力センサにてポンプの流入・流出側圧力をそれぞれ計測した。また、紡錘型ロータに組み込んだCSGBの浮上性能を評価するために、直径3.8 mmの渦電流式変位センサ(GP-X3S, SUNX)を使用し、CSGBの浮上距離の測定を行った(Fig.2)。紡錘型ロータには圧揚程により流入側への軸推力が生じる。そこで、流入側のポンプハウジングに3つの渦電流センサを設置し、3点同時に測定を行った。センサはCSGBの円錐表面に対して垂直になるよう設置した。また、ポンプ停止時にCSGBをポンプハウジングに接触させCSGBを数度毎回転移動させた際のセンサの値を100点計測し、その平均値をCSGBの原点とした。

実験は、閉ループ模擬循環回路を使用し、各回転数において流路の後負荷を変化させた際の流量、流入・流出側圧力、および浮上距離を計測した。計測した各圧力より本軸流ポンプの圧揚程を算出した。回路還流液は、粘性3.3cPの一般的な血液の特性を模擬した35 wt%のグリセリン水溶液を用いた。

データ計測に関しては、データ収録システム(PowerLab16/30, ADINSTRUMENTS)を用いて、サンプリング周波数20kHzにて計測を行った。

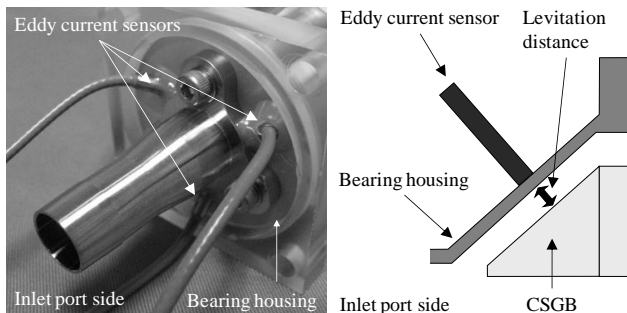


Fig. 2 Eddy current sensors position

3. 結果、および考察

ポンプ特性試験結果をFig.3に示した。回転数12,000 rpmにて最大揚程335 mm Hg、最大流量9.4 l/minが得られた。また、左心補助条件である流量5 l/min、圧揚程100 mm Hgは8,500 rpmにて達成された。従来開発した軸流血液ポンプと比較し、同じ回転数において最大流量・最大圧揚程は高値を示した。また、左心補助条件はより低い回転数で達成可能であったことから、改良した軸流ポンプの性能の向上が確認された。

Fig.4にCSGBの浮上性能試験結果を示した。紡錘型ロータの浮上距離は、各回転数における3つの渦電流センサの浮上距離から平均値、および標準偏差を算出した。CSGBの浮上距離は圧揚程の増加に伴い減少傾向を示した。回転数8,000, 10,000, 12,000 rpmにおける浮上距離の平均値は各々20, 18, 16 μm であった。また、左心補助条件においては、回転数8,500 rpmにて浮上距離約20 μm が得られ、紡錘型ロータの非接触駆動が確認された。しかし、標準偏差は約7 μm と得られた浮上距離に対して大きいことが確認された。このことから、紡錘型ロータが振動していると考えられた。

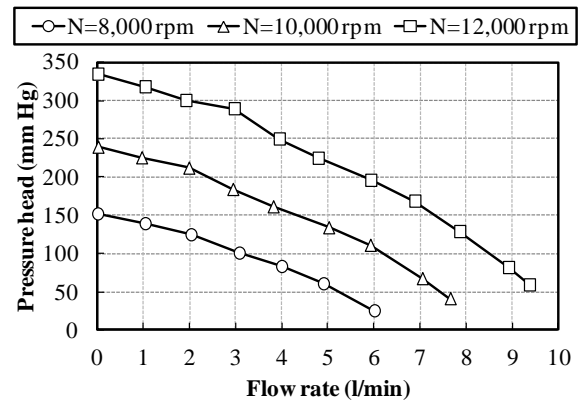


Fig. 3 hydraulic pump performance

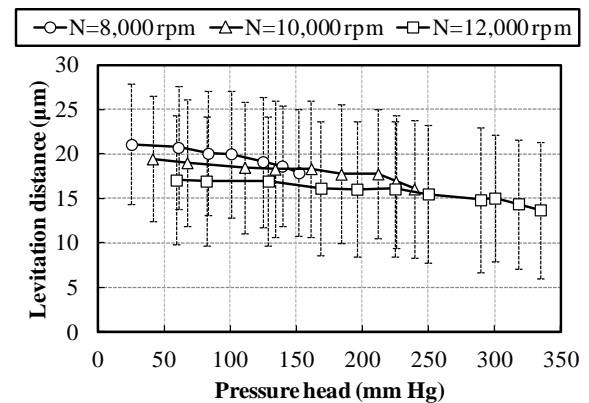


Fig. 4 Levitation performance

4. 結語

本研究では、流体動圧軸受を採用した軸流血液ポンプの改良を行った。作製した実機を用いて *in vitro* 性能試験を行い、ポンプ性能、および浮上性能に関し検討を行った結果、以下の結論を得た。

1. ポンプ特性試験の結果、改良した軸流血液ポンプの左心補助条件は回転数約8,500 rpmにて達成可能であり、性能の向上が確認された。
2. 浮上性能試験の結果、回転数8,500 rpmにて約20 μm の浮上距離が得られ、紡錘型ロータの流体動圧軸受による非接触駆動が確認された。

参考文献

- (1) 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, vol.20, no.1, pp9-16, 2008
- (2) 住倉博仁, 福長一義, 舟久保昭夫, 福井康裕: 流体動圧軸受を採用した軸流血液ポンプの研究開発, 第21回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム 講演論文集, pp265-266, 2009
- (3) Sumikura H, Kumai H, Fukunaga K, Ohnuma K, Ohgoe Y, Homma A, Funakubo A, Fukui Y, A study on optimization of vane design for an axial flow blood pump with an enclosed-impeller using multi-objective genetic algorithm, 20th International Society for Rotary Blood Pumps, abstract book, pp123, 2012
- (4) Muijderman EA: Spiral Groove Bearings, Dissertation, Technological University, Delft, The Netherlands, (1964)