

数値流体解析を応用した選択的腎灌流用カテーテル式血液ポンプの流路形状に関する検討

Study on flow path of a catheter-based intravascular rotary blood pump for assisting selective renal blood circulation applying computational fluid dynamics analysis

○住倉博仁(国循研) 大沼健太郎(桐蔭横浜大) 花田繁(大星クリニック)

築谷朋典(国循研) 水野敏秀(国循研) 本間章彦(東電大) 向林宏(イワキ)

小嶋孝一(イワキ) 武輪能明(国循研) 巽英介(国循研)

Hirohito SUMIKURA, National Cerebral and Cardiovascular Center Research Institute

Kentaro OHNUMA, Toin University of Yokohama

Shigeru HANADA, Taisei clinic

Tomonori TSUKIYA, National Cerebral and Cardiovascular Center Research Institute

Toshihide MIZUNO, National Cerebral and Cardiovascular Center Research Institute

Akihiko HOMMA, Tokyo Denki University

Hiroshi MUKAIBAYASHI, IWAKI Co., Ltd.

Koichi KOJIMA, IWAKI Co., Ltd.

Yoshiaki TAKEWA, National Cerebral and Cardiovascular Center Research Institute

Eisuke TATSUMI, National Cerebral and Cardiovascular Center Research Institute

Abstract: We are developing a catheter-based intravascular rotary blood pump for assisting selective renal blood circulation (Renal-RBP). This time, we investigated the flow path of the Renal-RBP using the computational fluid dynamics (CFD) analysis in order to improve the pump performance of the Renal-RBP. The Renal-RBP consists of an impeller, a pump casing, a brushless direct current motor and a catheter. The Renal-RBP is positioned in the abdominal aorta near the renal artery and it perfuses blood to both kidneys. Therefore, the Renal-RBP has two outlet ports against one inlet port. The influence on the pump performance of the outflow width of the pump casing was investigated using CFD analysis. The results of CFD analysis, it was showed that the outflow width of pump casing has large influence on pressure head. The suitable outflow width of pump casing contributes to improve the pump performance of the Renal-RBP.

Key Words: Rotary blood pump, Renal blood circulation, Computational fluid dynamics analysis, Pump performance

1. 緒言

急性心腎症候群における急性腎不全の原因として、腎虚血が挙げられる。このような急性虚血性腎障害に対し、我々は、先行研究において、ローラーポンプからなる体外循環回路を用いた選択的腎灌流による腎血行動態の最適化に関し検討を行い、その有効性を示してきた⁽¹⁾。しかし、本手法で用いる体外循環回路は患者に対する侵襲が大きく、適用は困難である。

本研究では、選択的腎灌流を迅速・低侵襲で実現可能なカテーテル式血管内留置型血液ポンプ(Renal-RBP)の開発を目的としている。現在までに、血液ポンプ(最大直径 15 mm, 全長 65 mm)を試作し、模擬循環回路を用いた性能試験を実施した。試験の結果、目標とする流量 1 L/min, 揚程 50 mmHg を回転数約 25,000 rpm にて達成し、選択的腎灌流に使用可能な性能が得られることが確認された。

Renal-RBP の更なる性能向上と小型化を実現するためには、Renal-RBP の流路形状の性能に対する影響を把握する必要がある。今回、数値流体解析(Computational Fluid Dynamics: 以下、CFD)を応用し、Renal-RBP の流路形状について検討を行ったので報告する。

2. 方法

2.1. 腎灌流用カテーテル式血管内留置型血液ポンプ概要

Renal-RBP は、小型血液ポンプ、駆動装置、およびカテーテルから構成した。カテーテル先端部に設置する小型血

液ポンプは、インペラ、ブラシレス DC モータ、ポンプケーシングから構成し、ポンプケーシング内部に設置したインペラをブラシレス DC モータによって回転させることで血液を拍出する機構とした。小型血液ポンプは、腎動脈近傍の腹部大動脈内に留置し、左右腎動脈に対し同時に補助を行うために、流入口 1 箇所に対して流出口 2 箇所を有する形状とした(図 1)。

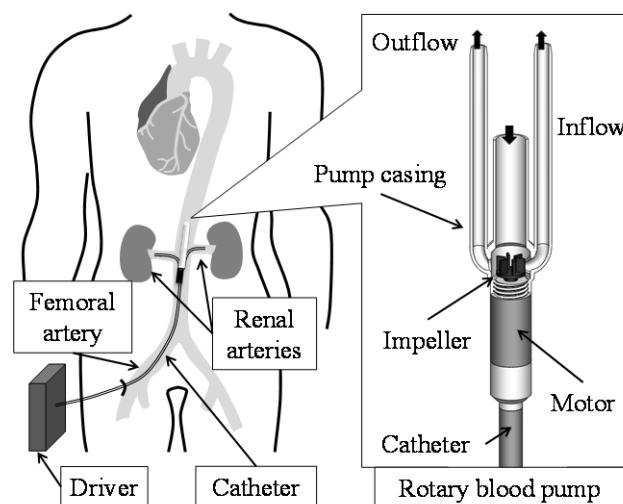
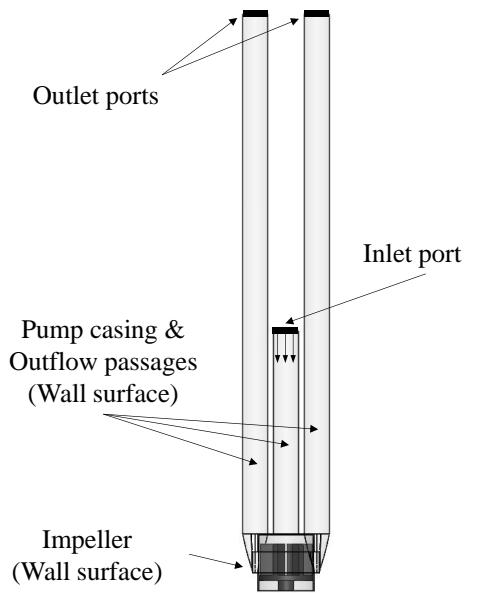


Fig. 1 Schematic drawing of Renal-RBP

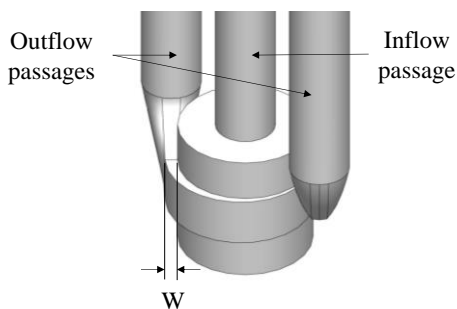
2.2. 実験方法

Renal-RBP の流路形状の性能に対する影響について把握するために、CFD を用いたシミュレーションを行った。図 2(a)に解析モデルを示した。解析モデルは血液の流れるポンプケーシング部の流路より構築し、流入口、流出口、およびインペラから構成した。解析モデルを 2 分割し、流入部と流出部を含む流路を静止部とした。また、インペラの周囲の流路を回転部とした。ポンプケーシングの流入口、流出口の径はそれぞれ 2.4 mm とした。インペラの直径は 5 mm、全長は 10 mm とした。ポンプケーシングは、2 つの流出口に向かうにつれ流路が広がるポリユート形状である。この解析モデルをコントロールモデルとして検討を行った。解析のパラメータについて、ポンプケーシング舌部における流出路幅 W をパラメータとして解析を行った(図 2(b))。ポリユートの有無、およびその程度による揚程への影響を調査するために、ポリユートの無い状態から、端部より 1.25 mm まで増加させて検討を行った。尚、上記パラメータ以外はすべて同一として解析を行った。

血液流動状態のシミュレーションには、汎用熱流体解析ソフトウェア STAR-CCM+ (CD-adapco Japan CO.)を使用した。解析条件および境界条件を表 1 に示した。この条件下、ポンプ全体における圧力分布の結果から、流入および流出口の断面における圧力の平均値を求め、その差圧から揚程を算出し、ポンプ性能に対する影響について評価を行った。また、ポンプ全体における平均壁面せん断応力を算出し、溶血性能に対する影響について検討を行った。



(a) Entire analysis model



(b) Parameter of analysis model
Fig. 2 Overview of analysis model

3. 結果

図 3 に流出路幅 W を変化させた際の、CFD 解析より算出した揚程を示した。尚、図中 0.00 mm はポリユートの無い状態を示している。先ず、ポリユートの有無(0.00, 0.25 mm)について、ポリユート形状を加えることで本血液ポンプは 2 倍以上の揚程が得られることが予測された。また、流出路幅 W の程度について、0.25 から 0.50 mm に変化させると、約 80 mmHg の揚程の増加が予測されたが、その後 0.25 mm づつ 1.25 mm まで流出路幅 W を増加させたところ、0.50 から 1.25 mm まで揚程に大きな変化は無く同等であると予測された。

平均壁面せん断応力について、0.00 から 1.25 mm まで緩やかに低下し、0.00 と 1.25 mm を比較すると、約 16% の平均壁面せん断応力の減少が予測された。これは流出路幅 W の増加によりインペラ-ポンプケーシング間の距離が増加したため、壁面せん断応力が減少したと考えられた。

流出路幅 W を増加することにより、揚程の増加と共に平均壁面せん断応力の低下が予測された。本パラメータを適切に設計に反映させることで、Renal-RBP の性能向上に寄与できると考えられた。

Table 1 Analysis and boundary conditions

Analysis	Steady state
Turbulence model	k-ε Reynolds number
Rotational speed	30,000 rpm
Wall surface condition	Nonslip
Inlet flow rate	1 L/min
Outlet flow condition	Pressure 0 mmHg
Fluid type	Newtonian fluid
Viscosity	0.0033 Pa·s
Density	1060 kg/m ³

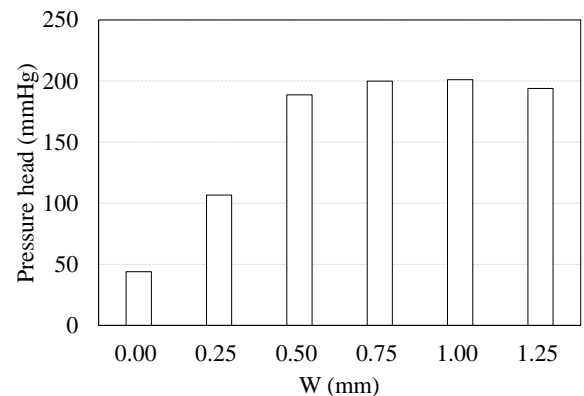


Fig. 3 Analysis results

4. 結語

本研究では、Renal-RBP の流路形状の性能に対する影響について、CFD による検討を行った。流出路幅 W は揚程、および平均壁面せん断応力に影響を与えることが確認され、適切な流出路幅 W は Renal-RBP の性能向上に大きく寄与すると考えられた。

参考文献

(1) Hanada S, Takewa Y, Mizuno T, Tsukiya T, Taenaka Y, Tatsumi E., Effect of the technique for assisting renal blood circulation on ischemic kidney in acute cardiorenal syndrome, J Artif Organs, Jun;15(2), pp. 140-5, 2012.