E101 モノピボット遠心式人工心臓のせん断速度場の可視化解析

木暮 尚登^{○1}, 千田 高寛¹, 西田 正浩², 丸山 修², 山根 隆志², 河村 洋¹

¹東京理科大学, ²産業技術総合研究所

Flow visualization analysis of the shear rate distribution in a monopivot centrifugal pump
Hisato KOGURE, Takahiro CHIDA, Masahiro NISHIDA, Osamu MARUYAMA, Takashi YAMANE,
Hiroshi KAWAMURA

ABSTRACT

A circulatory assist pump, which can be used for around two weeks after an operation, is under development by AIST. For R&D of a centrifugal blood pump, it is important to prevent the hemolysis, which is caused by high shear rate. Since the back gap of the impeller and the volute are the typical high shear regions, flow visualization analysis was conducted to investigate the shear rate distribution. Judging from the shear rate at impeller back space and on the volute surface, it was found that the shear rates were far below the hemolysis level. The results of the flow visualization well explained the hemolysis test results, where the hemolysis level was found to be 40% of a commercial centrifugal pump. So it was proved that this centrifugal blood pump had good fluid dynamic characteristics to prevent hemolysis.

Keywords: Flow visualization analysis, hemolysis, shear rate, centrifugal blood pump

1. 緒論

現在の人工心臓は、小型であること、耐久性の向上、溶血と血栓の防止が、開発する上での主な課題となっている。産業技術総合研究所では、手術後2週間程度使える補助循環ポンプの実用化を進めている。本研究では、血液ポンプ内で溶血の原因となる、高せん断域のインペラ背面隙間、ボリュート部において、せん断速度を定量化し、流体力学的観点から人工心臓ポンプとしての血液適合性の検討を加える。

2. 実験方法

解析モデルとして、産業技術総合研究所モノピボット血液ポンプの亚克力製2.5倍模型を用いた。作動流体には、亚克力と屈折率の等しい64wt%NaI水溶液(屈折率1.49,比重1.9)を、トレーサ粒子には $\phi 10\mu\text{m}$ の銀コーティングガラス粒子(比重1.4)を用いた。まず、インペラ背面隙間(原寸ポンプで2.6mm)では、ダブルパルスYAGレーザとそれに連動したプログレッシブスキャンカメラで、羽根の周期とカメラの撮影タイミングを同期させる方法で撮影を行った。解析法は画像相関速度計測法である。また、ボリュート部では、高速ビデオカメラとArイオンレーザ連続光を組み合わせて各トレーサ粒子の移動を追跡する粒子追跡速度計測法を用いた。可視化断面をインペラ背面隙間の半径90%の位置と、ボリュート部の厚みの中央にとって実験を行った。

3. 実験結果

3.1 インペラ背面隙間

インペラ背面隙間において、Fig.1,2に示すように、接線方向速度は、一様速度分布の主流とせん断速度を持った境界層から構成されることが分かる。また、境界層内速度分布はレイノルズ数の影響を受けやすいが、他方、比速度変化の影響はほとんど受けないことが分かる(Fig.1, Fig.2)。境界層厚さは静壁・動壁合計で0.5~1mmであった。最大せん断速度は、低流量状態(3.5L/min・1900rpm・110mmHg)でおよそ $20,000\text{ s}^{-1}$ 、一定比速度でレイノルズ数を大きくした高揚程状態(5.2L/min・2850rpm・250mmHg)でも、 $30,000\text{ s}^{-1}$ ほどであり、本血液ポンプのインペラ背面において、以下に示す溶血が心配されるようなせん断速度は存在しないことが分かった。ここで、溶血に関しての経験的判定基準は、せん断速度 $100,000\text{ s}^{-1}$ 以下(NIH<0.01相当)を許容値として、若干厳しい条件で評価を行った。

3.2 ボリュート部

ボリュート部は、インペラから噴出した血液が、ボリュート壁に衝突するため、高せん断域が形成され、血球破壊が生じやすい場所であると予測される。壁近傍を詳細に精度良く可視化するため、高拡大率系での実験を行った。本ポンプでは、アウトレット始点付近は、せん断速度が低いため、Fig.3に示すボリュート部2点において計測評価した。その結果、せん断速度は、低流量・標準揚程状態(3.5L/min・1900rpm・110mmHg)で、2点とも $25,000\text{ s}^{-1}$ ほどであった。よって、本血液ポンプのボリュート部においても、溶血の心配はないことが確かめられた(Fig.3)。

3.3 考察

本血液ポンプを用いて行った溶血試験において、溶血率は市販の手術用ポンプの40%(MC101:NIH=0.0013, Biopump:NIH=0.0033)と、優位の差をもって低い結果であった。このことは可視化結果と良く対応している。

4. 結論

本血液ポンプの代表的な高速域である、インペラ背面隙間とボリュート部において溶血の心配されるようなせん断速度は確認されなかった。本研究により流体力学的観点からも、本血液ポンプが溶血に対して非常に良好な特性を持つことが裏付けられた。

参考文献

Nishida M et al, Shear Evaluation by Quantitative Flow Visualization Near the Casing Surface of a Centrifugal Blood Pump, JSME International Journal Series C, Vol.45, N.04 (2002) 981-988

Fig.1 Effect of specific speed

Fig.2 Effect of Reynolds number

Fig.3 Shear rate near the casing surface in the volute, 1900rpm-3.5L/min-110mmHg