

偏心駆動型軸流式血液ポンプの内部流れの解明と溶血特性の評価

Clarification of the Internal Flow and Estimation of Cythemolysis

Characteristics on the Axial Flow Blood Pump with Eccentric Drive

○久保孝文¹,岩崎純¹,鈴木康方²,大内克洋³

*Takafumi Kubo¹, Jun Iwasaki¹, Yasumasa Suzuki² and Katsuhiko Ouchi³

Abstract: In this study, the decrease in rotating speed was investigated by a hydraulic test. As a result, rotating speed of the pump with the eccentric drive achieved reduction of 8.2 % to 9.3 %, and the loss factor was reduced by 33 %. The measured results by PIV show that reverse flow in axial direction were controlled but velocity gradient around the impeller tip was high in narrow clearance side between the tip and the pump casing for the pump with eccentric drive. Also, high cythemolysis characteristics were observed for the pump with eccentric drive.

1. 序 論

Suzuki ら¹⁾は、軸流式血液ポンプにおいて回転数 ω で回転する羽根車の回転中心を流路中心から ad ずらし、回転数 Ω で流路の同心円上を公転させる偏心駆動により、水力性能の向上を示した。そこで、本研究では偏心駆動による同一水力性能での回転数低減率を調査し、PIV (粒子画像流速測定法) を用いた内部流れのせん断応力の計測結果から血球の損失を試算した。また、血液試験を行い、偏心駆動によるポンプの内部流れと溶血特性の関係を調べた。

2. 実験装置

本研究に用いる羽根車およびケーシングは難波ら²⁾のものと同じのものを使用した。羽根車の概観と流路を図1に示す。通常駆動用に外直径 $D=10.0$ mm および $D=10.8$ mm の羽根車と偏心駆動用に外直径 $D=10.0$ mm の羽根車を用いた。外直径 $D=10.8$ mm の羽根車のチップとケーシングとの隙間は約 0.1 mm であり、偏心駆動時の最も狭くなる隙間と同一の寸法となるように設計した。また、ケーシングは透明なアクリル製で、流出口をケーシング側方 60° の方向に設置した。流路の内径は 11 mm である。模擬循環回路を図3に示す。ケーシングや計測機器はポリ塩化ビニル製チューブで接続した。

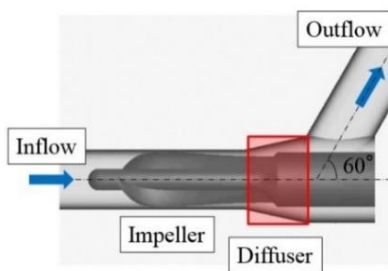


Figure 1 Cross-sectional view of the axial flow pump

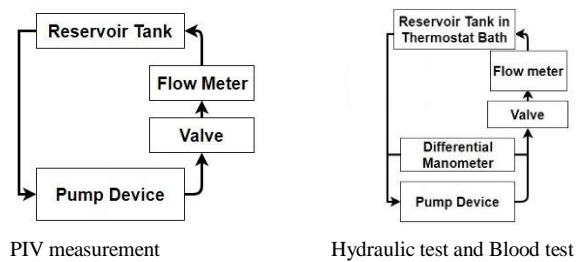


Figure 2 Schematic diagram of circulation circuit

3. 水力性能および血球の損失

作動流体には水を用い、設計点における流量および揚程はそれぞれ 2 L/min, 80 mmHg である。計測結果より、設計揚程での偏心駆動の通常駆動に対する回転数の低減率は 8.25 % であった。この結果をもとに、(1) 式および Giersiepen ら³⁾によって提案された(2)式より、血球がせん断応力に曝露される時間が等しいとしたときの血球の損失係数 $d(\tau, t)$ を算出して比較したところ、偏心駆動ではこれが 33% 低くなっていた。ただし、偏心駆動の血球に作用するせん断応力 τ_e 、羽根車外径 D_e 、羽根車回転数 N_e とし、通常駆動時の血球に作用するせん断応力 τ_n 、羽根車外径 D_n 、羽根車回転数 N_n である。

$$\frac{\tau_e}{\tau_n} = \left(\frac{D_e}{D_n}\right)^2 \left(\frac{N_e}{N_n}\right)^2 \quad (1)$$

$$d(\tau, t) = \frac{dHb}{Hb} = 3.62 \times 10^{-7} \times \tau^{2.416} \times t^{0.785} [-] \quad (2)$$

4. 内部流れの特性

作動流体は水であり、流量 2.0 L/min, モータ回転数 10000 rpm として、内部流れに対して YAG レーザを用いた PIV 計測を行った。羽根車に対するレーザの位置関係および解析領域を図3および図4にそれぞれ示す。偏心駆動では羽根とケーシングの隙間が狭くなる側と

1 : 日大理工・院 (前)・機械 2 : 日大理工・教員・機械 3 : 医科歯科大・医歯総研

広くなる側の両方で撮影を行った。

計測結果より、羽根チップ付近の接線方向流速の速度勾配の等値線図を図5に示し、解析範囲の平均流速値を表1に示す。表より、羽根チップ付近では通常駆動は軸方向で逆流があるが、偏心駆動ではそれはないこと、羽根間流路では軸方向流速が51.5%程度向上していることがわかる。図5より、偏心駆動の羽根チップとケーシングの間隙の狭い側において、通常駆動より羽根チップ付近の接線速度の速度勾配が大きいことがわかる。

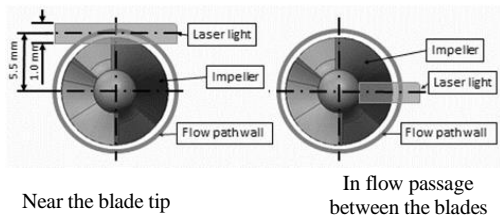


Figure 3 Sectional view of the impeller and laser light sheet

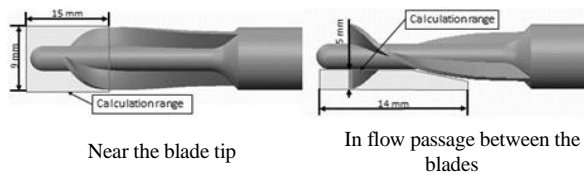


Figure 4 PIV analytic range around the impeller

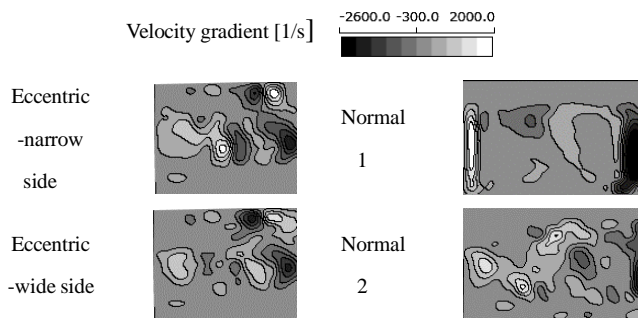


Figure 5 Contour map of tangential velocity gradient near the blade tip

Table 1 Mean velocities in the PIV analytic range

	Near the blade tip		In flow passage between the blades	
	Axial	Tangential	Axial	Radial
Eccentric -narrow side	175	859	973	-4.70
Eccentric -wide side	35.2	425	670	47.8
Normal 1	-473	2,230	642	492
Normal 2	-178	1,640	368	537

5. 溶血特性

作動流体には抗凝固させた豚の血液 500 mL を用いた。リザーバタンクの温度は 37.0 °C に保ち、流量 2.0 L/min、揚程 70 mmHg になるように回転数を調整して

6 時間連続運転させた。1 時間毎に採血を行い、血液を遠心分離して、ヘマトクリット *Hct* [%] と血中遊離ヘモグロビン濃度 *Hb* を測定し、(3)式より溶血指数 *NIH* を算出した。ただし、 $\Delta pfHb$ [g/L] は遊離ヘモグロビンの増加量、*V* [L] は回路内血液量、*Q* [L/min] は流量、*T* [min] は経過時間を表す。

それぞれの駆動方式の溶血指数の比較を図6に示す。図より、偏心駆動での溶血指数は通常駆動より増加していることがわかる。偏心駆動では羽根チップとケーシングの間隙の狭い側において羽根チップ付近の速度勾配が大きく、せん断応力が高くなるが見込まれるので、これが溶血指数の増加につながったものと考えられる。

$$NIH = \Delta pfHb \times V \times \frac{100-Hct}{100} \times \frac{100}{QT} \quad (3)$$

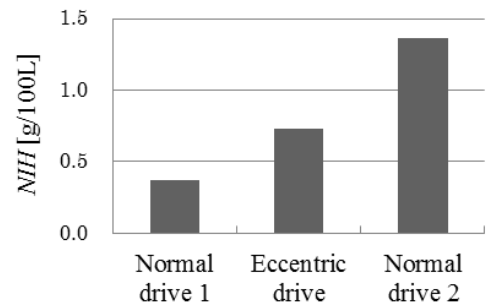


Figure 6 Comparison of NIH

6. 結論

- 偏心駆動により羽根車回転数が 8.25 % 低減され、軸方向平均流速が増大し、逆流が低減する。
- 偏心駆動では羽根チップとケーシングの間隙が狭い領域で接線速度の速度勾配が大きく、これが溶血指数の増加に寄与する可能性がある。

参考文献

[1] Y. Suzuki, et al. : “Performance improvement of an axial flow pump using forced whirling motion effect, Proceedings of the 18th Congress of the International Society for Rotary Blood Pumps.” ISRBP, pp.51 , 2010

[2] 難波陽大他 : 「偏心型軸流式血液ポンプの内部流れの解明と生体適合性の評価」, 第 46 回可視化情報シンポジウム, 2018.

[3] Giersiepen,M.,et al. : “Estimation of shear stress-related blood damage in heart valve prostheses-in vitro comparison of 25 aortic valves”, The international Journal of Artificial Organs, Vol.13,Issue 5 , pp.300-306 ,1990.