

可視化解析による人工心臓の血液適合性向上 Enhancement of hemocompatibility of artificial heart with flow visualization analysis

山根隆志, 西田正浩, Ahmed Aouidef; 機械技術研究所, 茨城県つくば市並木1-2, E-mail: yamane@mel.go.jp
豊田将弘, 宮本祐介; 東京理科大学大学院, 千葉県野田市山崎2641-2641

T.Yamane, M.Nishida, A.Aouidef, Mechanical Engineering Laboratory, Namiki 1-2, Tsukuba, 305-8564
M.Toyoda, Y.Miyamoto, Tokyo University of Science, 2641 Yamazaki, Noda, 278-8510

Hemocompatibility for a centrifugal blood pump has been established by modifying impeller hole geometry. The boundaries of thrombus in animal experiments correlated with stagnation in flow visualization. It was found that flow visualization has a potential to predict thrombus locations before animal experiments.

1. はじめに

埋込み型人工心臓の開発課題は、血球破壊および血液凝固の防止、システムの小型化・耐久性・安全性の確立である¹⁾。機械技術研究所では、羽根車の一端を磁気軸受で、他端をビボット軸受（モノビボット磁気支持機構）で支持する、遠心血泵の開発を行っている²⁾。すでに外形体積 160mL という小型化を達成し、発熱が少なく、血球破壊も僅かで、3カ月の耐久試験も実施済みである。現在は筑波大学の協力により、ヒツジによる短期抗血栓性評価を行っている。血球破壊や血液凝固は、その多くが流れに起因しているものが多いため、当所では溶血試験や動物実験に逐一対応させて、流れの可視化実験を行い、血球破壊や血液凝固に対応する流れ条件の定量評価を実施している。

2. 血球破壊と可視化実験

撮影は高速ビデオ（全画面 4500f/s 最速）、照明にはレーザライトシート（連続光 Ar, 4W で使用）、流体には屈折防止のため 64%NaI 水溶液、トレーサーは等比重の SiO₂ ピーズを使用し、収録した映像の解析には粒子追跡法（4 時刻追跡）を用いている。回転数が 300rpm 以下でないと十分な解析精度がとれないため、レイノルズの相似則に基づいて可視化模型を 3 倍で製作し、実回転数 2000rpm を 1/9 以下に落として、相似実験を実施している。

血液単独の試験では、血球にかかる剪断応力 τ と剪断時間 t を用いて、赤血球膜の疲労レベルは、 $\tau^2 t$ を判定基準として推定できるといわれる。ではそのような高い剪断応力がかかる領域はどこなのか。インペラ背面とケーシングとの平行隙間での速度分布を可視化計測した結果、血球が剪断を受けるのは、静止壁および回転壁近傍のごくうすい境界層の中だけであり、レイノルズ数を変えてても境界層厚さは 0.1-0.3mm であることを確認した²⁾。さらに、ポンプ内のどの部位なのか。特定の遠心血泵についてではあるが、インペラ先端から流出口にかけての速度分布および剪断速度分布から、出口直前のケーシング壁の厚さ 0.1-0.2mm の境界層で、最大シアに達することがわかった。並行して国立循環器病センターで実施された、ヤギ血による血球破壊試験結果と比較して、分岐して出口に向かうディフューザ内の乱流よりも、この出口直前の壁面シアが約 100,000sec⁻¹ 以上（ポンプ内通過時間 0.3sec）に達すると血球破壊が急増することが確認できた³⁾。

3. 血液凝固と可視化実験

開発中の遠心血泵では、血液凝固に関わるのは流れがよどむビボット付近であるとの動物実験観察により、短期製作を期してインペラ背面のみを模擬した部分可視化模型で評価している。この場合屈折が関わらない面の可視化なので、トレーサーには映像の質がよい蛍光ポリスチレンビーズ（平均球径 0.3mm）、および作動流体に同比重 1.05 の食塩

水を用いている。

血液凝固の複雑な機構について数多くの研究がなされているが、材料と流れの両側面を持つ血液凝固発生条件の定量化はなかなか難しく、再現性を持って定量化できるのは、血小板が材料表面に付着する現象と、低剪断領域との対応であろうと考え、可視化により低剪断領域の特定を試みた。ポンプモデルとして、インペラ裏面の灌流を促進するための複数のインペラ貫通孔が中心から離れたインペラ、および中央に統合したインペラを比較した。

血液ポンプの抗血栓性を確かめるため、筑波大学動物実験センターにおいて、ヒツジによる 6-7 日間の動物実験を 6 頭延べ 9 例実施した。中心から離れたホールの場合、可視化で計測されたホールより内側の低剪断域（速度 0.3m/s 以下に対応して剪断速度 1000-1700sec⁻¹ 以下）に対応する箇所に、血液凝固が観察された（Fig.1）。ホールを 1 点集中形状（直径の 20% 以下）にしたところ、中心付近まで剪断流を誘導したことを見事に可視化で確認し、短期動物実験でほぼすべての血液凝固を解消できたことを確認した。

4. おわりに

遠心血泵の開発過程で、短期動物実験・血球破壊試験と流れの可視化計測とを並行して実施することにより、血球破壊箇所と高剪断域の相関を調べ、血液凝固箇所と低剪断域との相関も検討して、血液適合性の改善を短期間で効率的に実施することができた。近年は医療機器の承認申請にも、数値解析や可視化実験のデータが要求され始めており、シミュレーションの重要性が一層高まるであろう。

5. 参考文献

- 立石哲也編著：メディカルエンジニアリング，米田出版，208-227，2000。
- T. Yamane et al., ASAIO J. 43:M635-M638, 1997.
- M. Nishida et al., Artificial Organs 23:697-703, 1999.

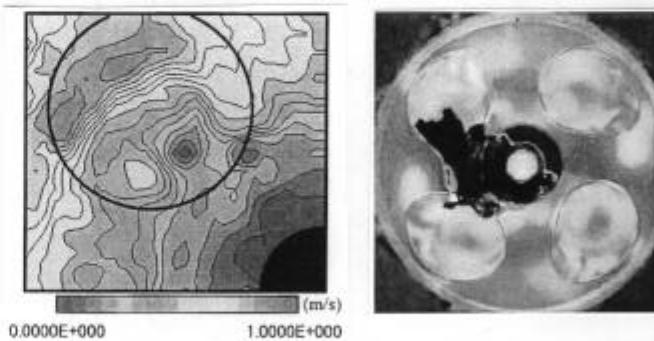


Fig. 1 Correlation of velocity contours in flow visualization with thrombus in animal experiment