238 流れの可視化による遠心血液ポンプの抗血栓性向上

山根隆志、豊田将弘*、西田正浩、Ahmed Aouidef、小西義昭**

機械技術研究所、*東京理科大学、**日機装

Enhancement of antithrombogenicity of a centrifugal blood pump through flow visualization

T.Yamane, M.Toyoda*, M.Nishida, Ahmed Aouidef

Mechanical Engineering Lab., *Science Univ. of Tokyo, **Nikkiso Co. Ltd.

Though evaluation of thrombus formation for blood pumps depended on animal experiments, flow visualization analysis would be able to assist or to save animal experiments. Using a scale-up pump model and 4-time particle tracking velocimetry software, correlation study was conducted between thrombus contour and relative stagnation contour for two kinds of centrifugal blood pumps. It was found that impeller surface with small relative velocity has a close correlation with platelet deposition or thrombus formation.

1. はじめに

埋込み型人工心臓の開発課題は、血栓形成（血液凝固）および溶血（血球破壊）の防止、システムの小型化および耐久性・安全性である。血栓や溶血の原因は大部分流れの改善で除去できるので、動物実験を補って血栓・溶血を防止する設計を行うには、見えない血流状態を見る可視化技術が、有用な研究開発ツールとなっている。

2. 模型および装置概要

可視化対象は、機械技術研究所で現在開発している、人工心臓用遠心ポンプ（クローズ型、DD1～DD6）および市販の手術用遠心ポンプ（セミオープン型、日機装HPM-15改）の角型アクリル可視化模型である。レイノルズの相似則に基づいて、3倍模型では同一流体なら回転数を1/9に落とせる。作動流体にヨウ化ナトリウム溶液（屈折率1.49）、トレーサにシリカ粒子（径 $150\mu\text{m}$ ）を用い、高シア領域および相対速度の意味での淀み領域を、溶血および血栓の発生部位として特定を試みている。撮影は最高速4500f/sの高速ビデオ(Photron Ultima-UV)、照明にはArレーザライトシート(4Wで使用)、収録した映像の解析には、4時刻粒子追跡法(カノマックス社 Current)を用いた。

3. 可視化結果

血栓には原因別に、1) 主に血小板が関わる白色血栓、2) 赤血球が関わる赤色血栓、3) 白血球等が関わる補体系の血栓、がありしかも、A) 流れ・表面粗さ由来の血栓、B) 材料特性由来の血栓、等がある。従来、血液単独の研究もあるが、定量化はなかなか難しく、かろうじて定量化できるのは、流れによって血小板が材料表面に付着し始める現象(1-A)であると思われる。

われわれは筑波大学臨床医学系の協力を得て、遠心型人工心臓の、動物実験と可視化実験の相関研究を実施している。インペラ中心付近の流れ改善のために設けられたインペラ貫通孔(Washout hole)の働きとしては、半径流れを誘導するよりむしろ、先端部の高い運動量を中心付近に誘導して周方向速度を高め、淀みを解消している。Washout hole近傍の流れを、インペラに対する相対速度ベクトルとして表示すると、ホール周辺の螺旋状流れが把握できる(図1-a)。比較検討により、動物実験で生

じた血栓の領域が、可視化での剪断速度 1700sec^{-1} 以下の鬱滞領域と相関していることがわかり始めている(図1-b,c)。

血栓については、このほか、発生部位について再現性の取れる事例が数少ないため、体外循環用遠心ポンプ(手術用)のインペラ裏面への血小板付着というイヌの事例について、原因の検討を行った。その結果、Washout holeに向かう内向き流れのために高速流が中心に向かって流入し、どこかの半径位置でインペラ回転速度に追いつき、相対速度が0、したがってシア0となった点で血小板付着が生じ得るとの可視化結果を得た(図2)。これは、動物実験結果と一致し、日機装で実施された $k-\epsilon$ 乱流モデルを用いた数値流体解析でも追認された⁷⁾。

4. おわりに

流れの可視化計測は、血液ポンプの開発等において、場所を特定した血液適合性の改良設計に有用であることを示した。遠心血液ポンプなどの近年の人工心臓では、血液の流れを可視化して、動物実験にのみ頼ることなく血液適合性の検討を行い、設計指針や改良指針を立てることが、重要である。最近では、このような医療デバイスの承認申請の際の成績証明として、可視化データの提出が求められる動きも出ている。効率的な人工臓器開発のため、これらのツールを目的に合わせて有効に利用する必要がある。

5. 参考文献

- 1) 立石哲也編著：メディカルエンジニアリング，米田出版(2000)
- 2) 山根隆志他：実践集中講義PIVの要点(1998)79-91
- 3) B.Asztalos他：Journal of Visualization,3-1(2000)79-92
- 4) 西田正浩：可視化情報,20-76(2000)25-30
- 5) 豊田将弘他：日本機械学会バイオエンジニアリング講演会論文集(2000)211-212,
- 6) A.Aouidef他：医用電子と生体工学,37-Suppl.2(1999)181.
- 7) 小西義昭他：医用電子と生体工学,37-Suppl.2(1999)180.

図1⁵⁾ ピボットおよびウォッシュアウトホール付近の流れ
(a)インペラと共に回転する系から可視化した相対速度

(b)同相対速度の等速線 (0.3m/s線が(c)と相関)

(c)動物実験で観察された血栓
(筑波大学におけるヒツジの実験)

図2⁶⁾ 手術用血液ポンプのインペラ背面流れ
(a)可視化による相対速度分布

(b)動物実験で観察された血小板付着
(日機装におけるイヌの実験)