

人工心臓の開発における可視化技術の応用

苫小牧高専 ○金子 雄大 見藤 歩 田島 勲 北海道大学 三田村 好矩 矢野 哲也

要 旨

人工心臓は使用者の QOL を考えて小型化、コスト減が求められており、これらの特性に対しては軸流型のポンプを用いるのが望ましい。ただし、血液ポンプとして用いる際に発生する溶血や血栓等の血液適合性に関する問題を解決せねばならず、そのためには内部の流れの状態を詳しく知る必要がある。そこで我々はその方法として、特別な装置の必要のない油膜法に着目し、これを用いて内部の流れの可視化を行い、流れの解析を試みた。

1. 研究目的

脳死に関する臓器移植法が施行されたが、今日の日本では未だに多くの心不全患者が移植待ちの状態であり、心臓移植は万全の体制とは言えない。¹⁾ 重度心不全患者の待機中 1 年間の生存率は 50% 未満であり、心臓移植までのブリッジとして人工心臓を使わざるを得ないのが現状である。そこで、早急な人工心臓の開発が求められる

人工心臓には完全人工心臓と補助人工心臓とがある。完全人工心臓は患者の自然心臓を取り去り、全心機能を代替するもので、対する補助人工心臓は患者の自然心臓を残してケーシングとして用いる方法をとる。人工心臓は機構が複雑なほど高価になるので、心臓移植へのブリッジとしては、コストが半分程度で済む補助人工心臓の方が適していると言える。ただし、補助人工心臓の場合は自然心臓を残すので、体の小さな日本人にはスペースの問題から体内への装置埋め込みが困難な場合が多い。患者の QOL を考えると完全埋め込み型が理想であるので装置の小型化が重要な要素となる。

血流の出力形態は、拍動流型と連続流型との二つが挙げられる。拍動流型のポンプは機構が比較的複雑になるのでコスト減、小型化に関しては連続流型の方が優れている。そこで、連続流型である軸流型のポンプで人工心臓を開発する事とした。ただし、連続流型ポンプは溶血、血栓など血液適合性の問題が発生しやすいので、ポンプ内部の流れの状態を詳しく調べこれらの問題を解決する必要がある。そこで、今回我々は特別な装置を必要としない流れの可視化技術である油膜法に着目し、その解析を人工心臓開発に役立てようと試みた。

2. 油膜法

2-1 原理

油膜法とは流れの可視化技術の一つであり、比較的簡単に流れの状態を知る事ができる手法である。その原理は物体表面に顔料と油の混合物からなる油膜を塗布し、これを流れに晒す事によって物体表面の油膜に縞模様が生じる現象である。これを観察して主に物体表面近傍の流れの方向、流速及び境界層の遷移などを調べる事ができる。²⁾ また、物体表面を複数の色で塗り分ける方法を多色油膜法³⁾ と言い、その色合いから流線の発生源や道筋、二次元的な流れの干渉の有無などをより判りやすくする事ができる。

2-2 油膜の組成による性質

油膜の組成は、油膜自体の硬さや粘性に大きく影響を

与える。一般に硬く粘性の大きな油膜ほど物体の表面に残りやすいので、高速で粘性の大きい流体に適する。しかし、鮮明な縞模様を得るためにはできるだけ軟らかい油膜のほうが好ましいので、使用目的ごとに油膜の組成を調整する必要がある。

2-3 評価法

油膜法を実施すると、壁面の油膜が流れて流線が縞となって現れるばかりではなく、油膜の剥がれ具合が物体表面の各点にごとに異なって現れる。これらの特徴を大まかにまとめると以下のようになる。

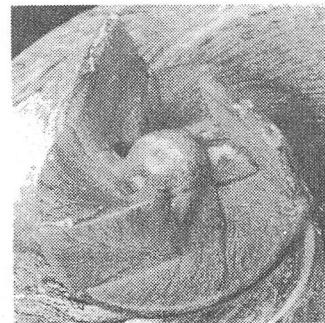


図 1 油膜法による可視化例

縞模様は大方流線と一致し、縞が細かいほどその部分の流速は早く、逆に流速の遅い部分ほど縞が粗くなったり、油膜が塊になったりする。

油膜の多くがはがれている点は流速が早い点で、特に全く油膜が残っていない部分では、壁面との速度差によって高せん断応力領域になっていると

考えられる。逆に油膜の多くが残っている点は流速が遅い点で、明確な流線が見出せない場合や、流線との境界が曖昧な場合は特に流速の遅い点、もしくは渦み点となっていると考えられる。本実験では特に血液適合性に関係の深い高せん断応力領域と渦み域について注目する

3. 実験方法

3-1 油膜の組成

実験に用いた油膜は大きく分けると顔料が二酸化チタンのもの、蛍光顔料のもの二つで以下にその組成を示す。前者は二酸化チタン、エンジンオイル、流動パラフィン、オレイン酸をそれぞれ質量比で、5:2:0:1 で混合したもの(①)、10:0:5:2 で混合したもの(②)、後者は蛍光顔料 2[g]:オレイン酸 2[cc]で混合したもの(③)、これら三種類の油膜を用いた。

3-2 実験環境

可視化を行ったポンプは 4 枚羽根軸流型で、その寸法は、入口角 16.4[°]、出口角 19.2[°]、軸径 13[mm]、羽根外形 22[mm]、円筒流路径 23[mm]、全長 13.45[mm]、ギャップ長 0.5[mm]である。

二酸化チタンは粒子を細かくするため乳鉢にてすり潰した後に配合した。油膜を絵筆にてできるだけ均一に物体表面へ薄く塗り、流路を生理食塩水で満たす。回転数 6000[rpm]、揚程 1.5[m]、流量 5[L/min]としてポンプを5分間稼働した後、壁面の油膜を観察した。

4. 実験結果

4-1 インペラ流入側

図2,3はインペラを流入側から観察したものである。回転の中心であるインペラ先端部分に近いほど多くの油膜が残されている。先端部分から発生して外周に向かう螺旋状の流線が確認できる事からも先端付近が澱み点となっている事が判る。

図2,3を比べると、図3の方が残っている油膜が多く、中心付近の流線が粗くなっている事から、多色油膜法に用いた油膜の方が高速流体に向いている事がわかる。

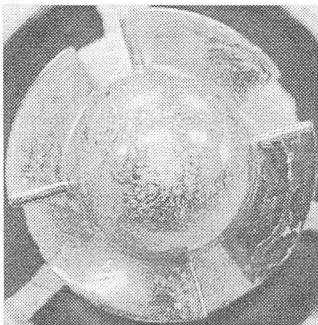


図2 インペラ流入側の様子

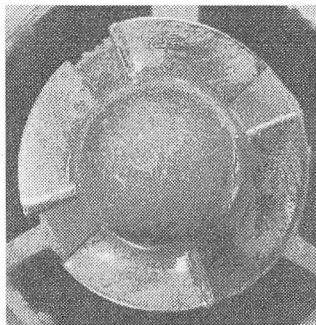


図3 多色油膜法による様子

4-2 インペラ側面および流出側

図4ではインペラ側面の流線が確認できる。特に、羽根の裏側に羽根に対して垂直な流線があるため、この部分は逆流状態である事が判る。また、羽根の外端面にも流線があるため、羽根の裏面から表面へと巻き込む流れが生じている事が判る。

図5では羽根の付根及び回転部と非回転部との隙間に多くの油膜が残っている事からこの部分が澱み域となっている可能性がある事がわかる。

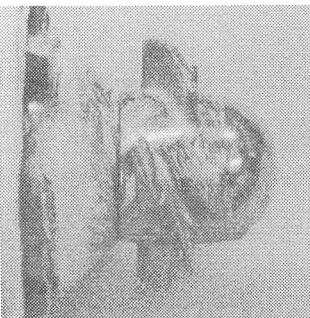


図4 インペラ側面の様子

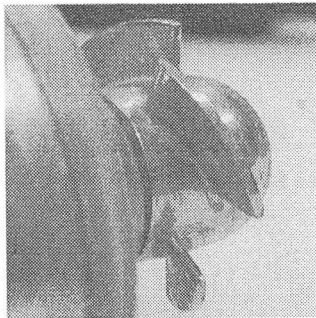


図5 インペラ裏面の様子

4-3 流入側ケーシング

流入側のケーシングを下流方向から見たものが図6である。壁面に粗い流線が見られ、この部分は旋回流になっている事が判る。この旋回流は流路拡大部の端まで及び、入口端では油膜が塊になっている。流線も粗いので流速が遅い部分である事が判る。流入直後の流速が大き

く、流れが上手く拡大している場合には入口端に油膜の塊は残らないので、流れの拡大時に剥離が生じて壁面付近では逆流及び澱み域が発生していると考えられる。そこで、この場所に多色油膜法を適用してみた結果、流れが入口に向かう傾向が見られた。

図7ではケーシングがインペラを覆っていた部分のみほとんどの油膜が剥がされており、両者の隙間で局所的に高せん断応力が発生している事が判る。

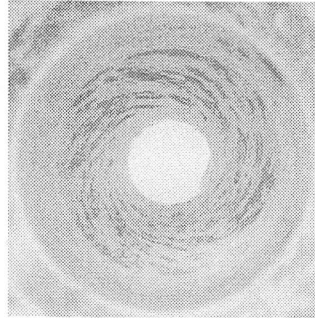


図6 旋回流の様子

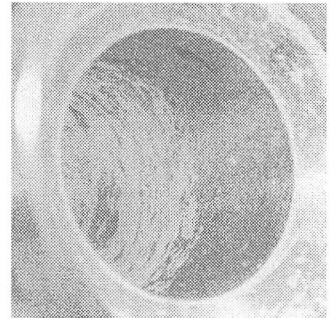


図7 高せん断応力領域

5. 実験結果と血液適合性に関して

溶血は血液中の赤血球などの組織が破壊される現象であり、流れの中にかかるせん断応力が主な原因と考えられている。このポンプではインペラとケーシングとの隙間における溶血の危険性が高い事がわかる。

血栓は血液組織が凝固して血管を塞いでしまう現象であり、常に血液が流動していないと発生する。このポンプではインペラ先端、羽根の付根、回転部と非回転部との隙間が流速の遅い点、澱み点と判り、加えて逆流の発生点付近にも澱み点が存在するはずである。これらの場所において血栓の可能性が高い事がわかる。

このポンプに血液適合性などの問題が発生した場合には、これらのデータを元に、インペラやケーシング等の形状の変更を行う事ができるようになった。

6. まとめ

ポンプ内には場所ごとに様々な流れがあり、全ての流れに適した油膜を作ることは不可能である。しかし、せん断応力や澱みと、溶血や血栓、油膜の挙動との関係を詳しく調査すれば、血液適合性上危険な流速の上限、下限を設定した油膜を作ることは可能だろう。油膜法はポンプ開発に当たって十分に有用であると言える。

今回の実験結果を、数値流体工学(CFD)の結果と比較したところ、結果はほぼ一致し CFD の正確さが裏付けられたと言える。そこでポンプ開発に CFD を導入するのも有効な手段と言える。

7. 参考文献

- 1) 西中知博「人工心臓(臨床)」
人工臓器 31 巻 3 号, 71-74, 2002
- 2) 浅沼強「流れの可視化ハンドブック」
朝倉書店, 54-142, 1997
- 3) 勝俣辰善 後藤彰「多色油膜法によるポンプ内部流れの可視化」
エバラ時報, 3-9, 1999