

K3-15

斜流式血液ポンプの溶血可能性に関する流れ解析

Flow Analysis through Mixed Flow Blood Pump Concerning Hemolysis Possibility

○久松篤史¹, 浜崎真吾¹, 鈴木康方², 藤田肇²

*Atsushi Hismatsu¹, Hamazaki Shingo¹, Yasumasa Suzuki², Fujita Hajime²

Research and development of the blood pump demand a prediction of the hemolysis. We investigated the hemolytic property around the impeller and diffuser through the use of steady state of computational fluid dynamic (CFD). When analysis condition of steady state was flow rate 1.0, 1.5 2.0 L/min and revolution 8,000 rpm, we checked the high shear velocity $40,000 \text{ s}^{-1}$ in inlet of diffuser and edge of impeller. In addition, in the light of position relation of the impeller and the diffuser, we investigated the hemolytic property by transient analysis of CFD. Analysis condition of transient state was flow rate only 1.5 L/min and revolution 8,000 rpm. As a result, we could catch place of high shear velocity and we could evaluated hemolysis property.

1. 緒言

現在、心疾患を治療するための定常流血液ポンプの研究開発が盛んに行われている。しかしながら、血液ポンプの性能評価は工業用のポンプと違い、生体適合性の観点を無視することはできない。その中でも溶血の発生は、開発を進めていく上で大きな障壁となっている。産総研の西田氏らによれば、せん断速度 $100,000 \text{ s}^{-1}$ 付近の領域を溶血発生の一つの指標としている^[1]。昨年度の研究で定常解析から得られたデータより、羽根車周りと案内羽根流入部に高せん断速度領域を捉え、溶血発生箇所の予測を定性的に確認した。そこで、本研究の目的は、羽根車と案内羽根の位置関係とそれに伴い時間変化による溶血特性を予測するべく非定常解析を行う。

2. ポンプ概要

ポンプは図1のモノピボット式軸受を用いて、モータと血液に触れないように非接触で設計してある。レイノルズ数は約 3.0×10^4 の低レイノルズ数流れで羽根車外直径 12.8mm, 案内羽根直径 15.0 mm であり羽根車先端から案内羽根終端まで 26.5 mm である。羽根車によってエネルギーを得た作動流体は羽根車通過後、案内羽根によって昇圧する構造になっている。磁石には強力なネオジウム磁石を用い高回転のトルクに対応できるものを選定した。目標性能は流量 2.0 L/min 揚程 80 mmHg である。

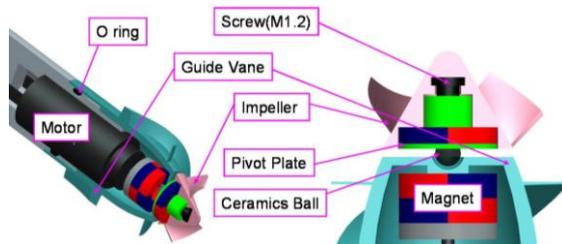


Figure 1. Pump Device^[2]

3. 数値流体解析

3. 1 解析手法・条件

今回使用した解析ソフトは STAR-CD Ver.3.26(CDAJ社)である。解析アルゴリズムは有限体積法による SIMPLE 法を使用し、乱流モデルは $k-\omega/SST$ モデルである。格子点数は約 3,000,000 点であり解析格子はヘキサメッシュを用いている。物性値は密度 $1,060 \text{ kg/m}^3$ ・粘度 $3.6 \times 10^{-3} \text{ Pa/s}$ の非圧縮ニュートン流体で血液を模擬した。流出・流入は逆流などで計算が不安定にならないよう、非定常解析での流出は直径の 6 倍・定常解析では 4 倍の長さを、流入は共に直径の 3 倍の長さを与えた。境界条件は流入口は定常解析で流量 1.0, 1.5, 2.0 L/min の 3 種を非定常解析は 1.5 L/min を与え、流出口は自由流出である。また、壁面は No-slip 条件とした。回転数はともに 8,000 rpm で行った。

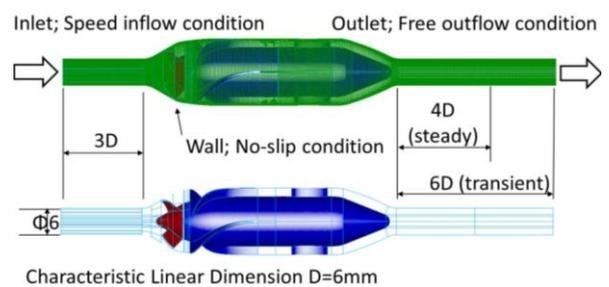


Figure 2. Boundary Condition

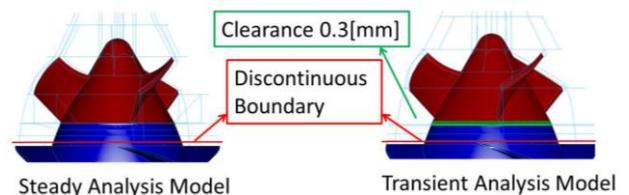


Figure 3. Analysis Model (Around of the Impeller)

過去の研究は定常解析で行っており、図3左図のように案内羽根と羽根車の間に存在するクリアランスを考慮せずに解析を行っている。これは、計算コストの

問題や動翼と静翼の設計においては、再現する必要性が無かったためであるが、そのためにクリアランスに流入する血液の流れを模擬することはできていない。そこで、図.3 の右図のようにを基にクリアランス 0.3mm を設けて、解析格子の改良を行った。

せん断速度算出については、STER-CD からの出力データを基に算出した。以下の式の各項は、円筒座標系の各速度成分 V_r, V_z, V_t で各せん断速度成分は $\gamma_{rz}, \gamma_{rt}, \gamma_{tz}$ である。ポスト処理の段階で、下記の合成ベクトルをスカラー量に変換しせん断速度分布を算出した。

$$\gamma_{rz} = \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial V_r}{\partial z}, \gamma_{rt} = \frac{\partial V_r}{\partial t} + \frac{\partial V_t}{\partial r}, \gamma_{tz} = \frac{\partial V_t}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial t} \quad (1)$$

3. 2 解析結果・考察

流量 1.5 L/min, 回転数 8,000 rpm の定常解析によるせん断速度分布を図 4 に示す。これを見ると、高せん断領域が捉えられている。最も高い値を示したのは、せん断速度約 $40,000 \text{ s}^{-1}$ で案内羽根入口と羽根車端部であり、次はせん断速度約 $30,000 \text{ s}^{-1}$ の羽根車出口付近であった。流入がスムーズに行われ停滞が起こらずに通過した血液は、羽根車端部から案内羽根入口で強いせん断応力により溶血の可能性が起きるだろう。また、次に示す図 5 は羽根車圧力面からの流線である。まず、ボス側羽根車下部 (図 5 右図) からの流線は、図 3 と同様に案内羽根における高いせん断応力に対して、溶血の発生を引き起こす可能性があることが流線からも見て取れる。シュラウド側羽根車上部 (図 5 左図) からは、旋回速度が強い領域への停滞と逆流が懸念される。そのため、せん断速度が高くないとされる領域においても、旋回領域にさらされる時間が長くなり、溶血を引き起こす可能性がある。

3. 3 検証実験

ここで実験との比較を図 6 より行う。本来、検証試験は溶血試験を行い血球の壊れ具合を実験から観る。しかしながら、動物の血液を用いて行う溶血試験は衛生面からのハードルが高く、本学での実験は困難である。そのため、今回は水力特性実験を行い、性能曲線を実験と解析の間で比較し、流れ場の妥当性を図ることにした。血液の物性値を模擬するために、グリセリン水溶液 40 wt% を用いている。図 6 に性能曲線を示す。これを見ると、同じ流量下で約 15 mmHg の差が出ている。これは、実験での羽根車の挙動をモノピボットが支持しきれていないために生まれたもので、解析では挙動を再現しきれていない。そのため、今後は羽根車の挙動を抑える取り組みが必要である。

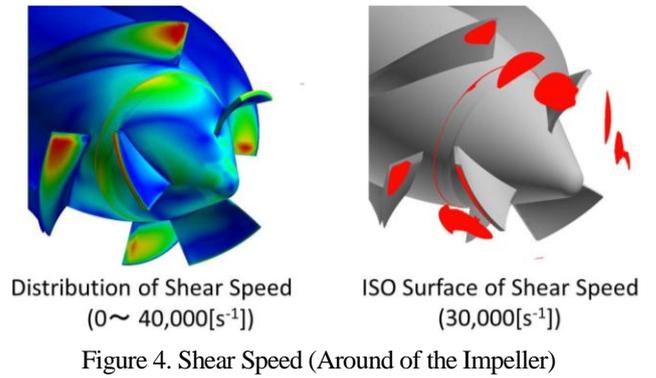


Figure 4. Shear Speed (Around of the Impeller)

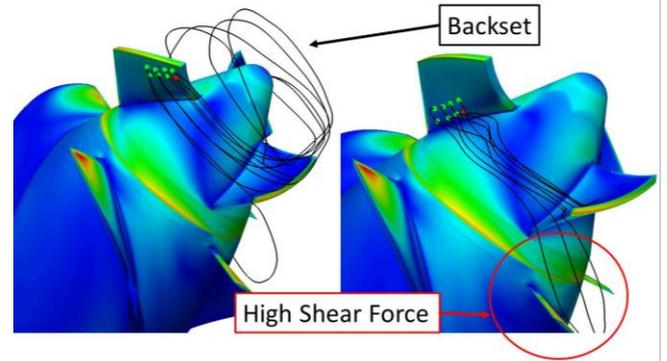


Figure 5. Streamline (Around of the Impeller)

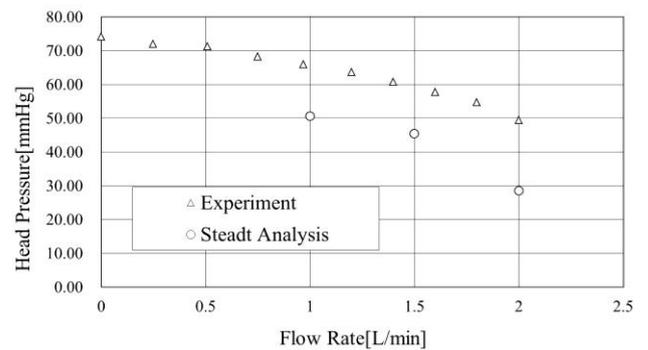


Figure 6. Performance Curve^[3]

5. 結言

定常解析から得られたデータより、案内羽根入口と羽根車端部にせん断速度約 $40,000 \text{ s}^{-1}$ を領域による溶血が危惧される。また、流線から旋回成分が支配的な羽根車流入前にも溶血が危惧される。非定常解析から得られたデータは、せん断速度が高い領域を捉え、羽根車と案内羽根の位置関係と溶血性能を判定できた。

参考文献

- [1]西田ら他5名 2006年度 バイオエンジニアリング講演論文「モノピボット補助循環ポンプの溶血可能性に関する流れの研究」
- [2]今井竜彦 平成 21 年度 修士論文 「小児補助循環用斜流式マイクロポンプの開発」
- [3]久松篤史 平成 22 年度 卒業論文「小型斜流式血液ポンプの研究」