508 蠕動運動型マイクロポンプ内流れにおける赤血球挙動に関する数値解析

Numerical Study on Red Blood Cell Behaviors in a Peristaltic Micro-Pump

○学 中村真彦 (京大院) 学 黒木 遼 (京大院)
正 巽 和也 (京大) 正 中部主敬 (京大)

Masahiko NAKAMURA, Ryo KUROKI, Kazuya TATSUMI and Kazuyoshi NAKABE
Kyoto University, Yoshida Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501

A peristaltic pump, in which the channel walls periodically fluctuate in the form of a traveling wave, is believed to be an effective technique for micro miniature-sized devices due to its compactness, low fabrication cost and high applicability to various biological fluids. To apply this pump to medical fields, it is important to evaluate the cell behavior in the channel as well as the heat and mass transfer characteristics. In the present paper, numerical simulation using Immersed boundary method is conducted to study the characteristics of deformable red blood cells (RBC) in a channel of the peristaltic micro pump. The results showed that depending on the initial locations of the RBCs in the channel, some of the RBCs were convected into the contraction part of the channel. Most of the RBCs, however, reached around the center of the flow circulation formed in the channel under the condition of large peristaltic amplitude. This indicates the possibility of cell trapping or RBC aggregation at the center of the circulation.

Key Words: Peristaltic pump, Red blood cell, Numerical simulation, Immersed boundary method

1. 緒言

μ -TAS や Lab-on-a-chip と呼ばれる小型集積化学分析システムを指向した、流路内に試料等を高精度・高効率で輸送可能なマイクロポンプとして、図 1 に示すような、流路壁自身が周期的に変動して流体輸送を行う蠕動運動型マイクロポンプが提案されている⁽¹⁾。このような分析装置を医療分野に適用する場合、作動流体中への血液や細胞等の混入、温度管理を目的とした流路壁伝熱、壁面を介した試薬・蛋白等の物質輸送等、種々の条件下におけるポンプ内の諸特性について検討する必要がある。そこで本研究は、作動流体中に血球が含まれる場合の蠕動運動型ポンプ内流れを対象に、単一赤血球の動特性について数値解析的検討を行った。

Fig. 1 Schematic view of peristaltic micro-pump.

2. 数値解析手法と計算条件

本研究で用いた計算領域と座標系を図 2 に示す。流路下壁は、式 (1) に示すように、上下方向に正弦波状に周期変動する。流路平均高さ H は $H = 20\mu\text{m}$ である。変動壁の振幅 A/H および壁進行波速度 c は、それぞれ $A/H = 0.8$ と $c = 2.0 \times 10^{-2}\text{m/s}$ であり、初期位相 $\Theta_{t=0} = \pi/2$ とした。波長 λ は $\lambda/H = 10$ であり、計算領域主流方向長さ L と同一である。

$$y = A \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} (ct - x) + \Theta_{t=0} \right) \quad (1)$$

本計算では二次元構造格子を適用した有限体積法を用い、基礎方程式として、物性値一定の非定常・非圧縮性流体に関する二次元の連続の式と Navier-Stokes 式を解く。離散化法として、対流項に一次精度風上差分を、拡散項に二次精度中心差分を用いた。圧力解法は SIMPLE を用いた。変動壁の境界には Immersed-Boundary Method (IB 法：境界埋め込み法) を適用した⁽²⁾⁽³⁾。壁面には滑り無し条件を適用し、主流方向境界には周期境界条件を用い、主流方向平均圧力勾配を零とした。

流路中に挿入する赤血球は、和田ら⁽⁴⁾のばねのネットワークモデルを用いた。赤血球の膜厚を零とし、その界面と流体間の境界条件には IB 法を適用した。この場合、赤血球内外の

(a) Computational domain (b) RBC shape
Fig. 2 Computational domain and RBC initial shape.

Table 1: Initial locations of RBC.

Label	A8Y0	A8Y2	A8X2	A8X3	A8X5
x_0/H	5.0	5.0	2.0	3.0	5.0
y_0/H	0.0	0.2	0.75	0.75	0.75

流体には、共に水の物性値を適用した。赤血球の初期形状を図 2(b) に示す。赤血球は、100 個の線要素から構成され、その伸縮と曲げのばね定数、および面積変化に関するペナルティ係数は、それぞれ $k_s = 1.0 \times 10^{-8}\text{N}\cdot\text{m}$ 、 $k_b = 1.0 \times 10^{-10}\text{N}\cdot\text{m}$ 、 $k_e = 1.0 \times 10^{-5}\text{N}\cdot\text{m}$ である⁽⁵⁾。

表 1 に計算開始時の赤血球中心の初期位置を示す。計算では、はじめに流れ場が収束するまで計算を行う。その後、赤血球を流路内に挿入し、この時の時刻を $t = 0$ とし流れと赤血球の連成計算を開始する。この場合、赤血球の長軸が y 方向と平行となるように主流との迎え角を設定して、挿入した。

3. 結果および考察

3.1 流れ場 図 3 に赤血球を挿入する時刻 $t/T = 0.0$ における流路内の流線図と主流方向速度の等値線図を示す。 T は、変動壁周期 $T = \lambda/c$ である。なお、同図は進行波速度 c と同速度で主流方向に移動する移動座標系で示した結果である。

変動壁および流路上部の固定壁近傍では、壁面に沿って x 軸の負方向成分を持つ流れが存在する。この流れにより、流路中心部間で強いせん断場が形成され、その結果流路拡大部では、流路上下壁側でそれぞれ、反時計回りおよび時計回りの循環流が形成されることが分かる。

3.2 赤血球の並進運動 図 4 と 5 に、それぞれ A8Y0 と A8Y2 の場合における赤血球の中心位置の軌跡を示す。各図の (a) と (b) は、それぞれ $0.0 \leq t/T \leq 4.0$ および $8.0 \leq t/T \leq 10$ の時刻における結果であり、各図に $t/T = 4.0$ と 10 における流線を併せて示す。また、赤血球界面の形を $t/T = 0.4$ ごとに図中に実線で示し、太線の赤血球位置に対応する時刻を添字として併記する。

Fig. 3 Streamlines and u/c distributions ($t/T = 0$).

(a) $t/T = 0.0 \sim 4.0$

(b) $t/T = 8.0 \sim 10$

Fig. 4 Positions of RBC in case of A8Y0.

(a) $t/T = 0.0 \sim 4.0$

(b) $t/T = 8.0 \sim 10$

Fig. 5 Positions of RBC in case of A8Y2.

A8Y0 の場合、赤血球は流線に沿い、時計回りの方向に弧を描きながら移動する傾向を示す。しかしながら、赤血球は $x/H \sim 2$ で方向を変え、その軌跡は流線から外れる。その後、時間とともに赤血球の移動速度は減少し、図 (b) に示すように、その位置は循環流の中心近傍に収束する。また、赤血球の形状は、図 2(b) に示す初期形状である両凹形からしだいに楕円形へと変化し、時計方向に長軸をやや傾斜させた状態を有する。赤血球は、上述の収束位置に到達するまで、この形状および傾斜角をおよそ維持して移動する。

次に、赤血球が流路のやや上部に存在する A8Y2 の場合、赤血球は流線に沿って反時計回りの方向に弧を描きながら移動する。A8Y0 の場合と同様に、赤血球は完全に流れに沿って移動せず、図 5(b) に示すように、減速しながら流路上側に位置する循環流中心近傍に収束する。また、赤血球の形状は、時間とともに楕円形に変化し、A8Y0 の場合とは逆に、その長軸を y 方向に対して反時計方向に傾斜させた状態で移動する。

以上より、赤血球は、循環流と同一の方向に周回しながら、循環流の中心のやや下流側の位置に収束することが分かった。したがって、蠕動運動ポンプ内に赤血球を混入した場合、赤血球を循環流の中心付近の特定位置に誘導し、捕獲できる可能性を示すことができた。逆に、流路中に複数の赤血球が存在する場合、それらが同一位置に収束することで赤血球同士が密着し、赤血球集合を形成する可能性があることも示唆している。

3.3 赤血球の回転運動 図 6 に、A8Y0 と A8Y2 の場合の $t/T = 10$ における赤血球界面の速度ベクトル線図を全節点の平均速度に対する相対座標系で示す。図では、赤血球はその界面接線方向に速度成分を持つことから、前節で得られた並進運動とともに回転運動することが分かる。その回転方向は、A8Y0 および

(a) Case A8Y0

(b) Case A8Y2

Fig. 6 Velocity vector distributions at RBC surface.

Fig. 7 Trajectory of the RBC in different initial positions.

A8Y2 の場合で、それぞれ時計回りと反時計回りであり、この回転運動は、Tank Treading Motion と同一であると考えられる。また図 3～5 に示す流線分布をそれぞれ比較すると、図 4 と 5 では赤血球を中心とした循環流と、それに対して $x/H = 5.0$ を対称軸として逆側に別の循環流が形成され、対として存在することが分かる。これは、赤血球の Tank Treading Motion による回転運動に伴って誘起される流れと、蠕動運動による循環流が重畳した結果であると考えられる。

3.4 赤血球の初期位置の影響 図 7 に、上壁近傍 $y/H = 0.75$ において、赤血球を異なる主流方向位置 $x/H = 2.0 \sim 5.0$ に設置した場合 (A8X2～X5) に関する計算結果を示す。なお、計算時間は運動の傾向が分かるまでとし、A8X2, A8X3, A8X5 の場合でそれぞれ $0.3T$, $6T$, $4T$ とした。また、図中の細線は時刻 $t/T = 0$ における壁の位置を示す。

A8X5 の場合、赤血球は、はじめに上流へ移動した後に下流へ向かい、上壁側の循環流の中心近傍の方向に移動する。一方、A8X3 の場合、同様に移動した後に下壁側の循環流中心近傍へと向かう。したがって、これらの場合は、A8Y0, A8Y2 と同様に十分経過すると循環流内の特定位置に収束するものと考えられる。これに対して、A8X2 の場合、赤血球は各循環流の中心へ向かわず、流路上流の閉塞部へ移動する。この場合、赤血球は閉塞部を通過し、隣接する流路拡大部へ移動すると思われる。以上のことから、赤血球は、上壁近傍の同一流路高さにあっても、その主流方向位置が異なることによって、流路内の各循環流部および縮流部へ移動することが分かる。

4. 結言

蠕動運動ポンプ内において、変動壁面振幅が大きい場合、流路中に存在する赤血球は、流路内に形成される循環流と同一方向に周回しながら、その中心近傍に収束することが分かった。また、赤血球は、傾斜した状態で回転運動し、その影響によって一対の循環流が形成されることが分かった。赤血球は、その初期位置によって縮流部に向かうものもあるが、多くの場合は循環流中心近傍へと向かう。したがって、単一赤血球をポンプ内の特定位置に誘導し、捕獲できる他、複数の赤血球が存在する場合は赤血球集合を形成する可能性があることが分かった。

謝辞 本研究は (独) 科学技術振興機構から指定を受けた地域結集型共同研究事業の一部として実施された研究成果である。

参考文献 (1) Suzuki, T. et al., *Microsystem Technologies*, 13 (2007), 1391-1396. (2) Peskin, C.S., *J. Comp. Physics*, 25 (1977), 220-252. (3) Fadlun, E.A., et al., *J. Comp. Physics*, 161 (2000), 35-60. (4) 和田・小林, 機論 A 編, 69 (2003), 14-21. (5) 坪田 他 2 名, 機論 B 編, 72 (2006), 1483-1489.