

冠循環微小循環系における末梢抵抗に関する 3 次元数値シミュレーション

程田将平*, 湯博洋*, 清水和弥**, 野田茂徳****, 伊井仁志***, 杉山和靖***, 高木周**

*東京大学大学院 工学系研究科 [〒113-8654 東京都文京区本郷 7-3-1]

**東京大学 工学系研究科 [〒113-8654 東京都文京区本郷 7-3-1]

***大阪大学 基礎工学研究科 [〒560-8531 大阪府豊中市待兼山待 1-3]

**** 理化学研究所 情報基盤センター [〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1]

1. 緒言

冠循環微小循環系は冠動脈と冠静脈の間を接続する直径 5 - 100 μm 程度の血管の複雑なネットワークである[1]. 微小循環系で生じる末梢抵抗は心臓全体の機能に大きく影響しているとされ, 赤血球の流動が顕著に影響する可能性が示唆されている[2]が, そのメカニズムはほとんど不明となっている. こうしたことから著者らは流動の 3 次元解析による赤血球の流動の末梢抵抗への影響の解明を目指しており, 本稿では赤血球の流動を長期的に安定して解析する手法を導入し流動の計算を行ったことについて報告する.

2. 解析手法

本研究では Immersed Boundary 法[3]を用いて解析を行っており, 膜力は赤血球膜上の点の座標を用いて計算している. 通常的手法では面ごとに独立に計算された曲率や膜力を点の周りで平均化して計算するため長時間の計算によって赤血球表面に細かな凹凸が生じ正しく計算できなかった. そこで本研究では有限要素法を用いた膜力の計算手法[4]を用い, 曲率と膜力の面内分布を考えすべての面の情報を考慮した連立方程式として計算を行うようにしている.

この手法によって長時間の解析ができることを確認するために周期境界の直管を用いて赤血球の流動を解析した. 血管径は 10.4 μm , 血管長は 35.1 μm , ヘマトクリットは 31.6 % とし, 圧力勾配は重力項に組み込み $2.27 \times 10^3 \text{ m/s}^2$ としている.

3. 解析結果

図 1 は $dx = 0.16 \mu\text{m}$, $dt = 0.15 \mu\text{s}$ のもとで計算された計算開始後 225 ms の赤血球界面位置を示している. 長時間の計算を行っても赤血球の表面形状に 1 点おきの凹凸ができていないことが確認された. 図 4 は dx 及び dt を変えて計算された流量の変化を示している. この条件では赤血球の存在しないもとのポワズイユ流れの理論的な流量は $0.54 \mu\text{m}^3 / \mu\text{s}$ となり, 流量の減少は赤血球によって圧力損失が増大していることを意味する. いずれの条件でも流量の変化は同様の傾向を示し, 特に赤血球の流動は同様に計算できているものと考えられる. また赤血球の流動を考慮する場合には流量の

変化がかなり長時間に及び, すぐには収束をしないということが確認された.

4. 結言

本稿で示した手法により, 赤血球の長時間の解析が安定して行えるようになった. 著者らは今後微小循環系を模した複雑な形状についても赤血球の流動を考慮した計算を行っていく予定である. 赤血球の流動は, 特に分岐部などにおいてまだ未解明な部分も多く赤血球の流動の末梢抵抗への影響が明らかになることが期待される.

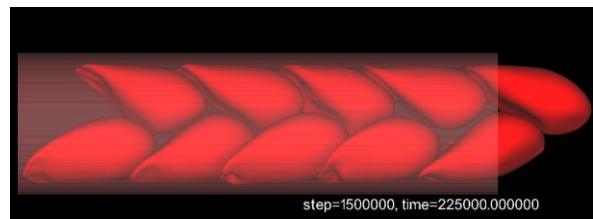


図 1 赤血球界面位置 ($dx=0.16 \mu\text{m}$, $dt=0.15 \mu\text{s}$, 225 ms)

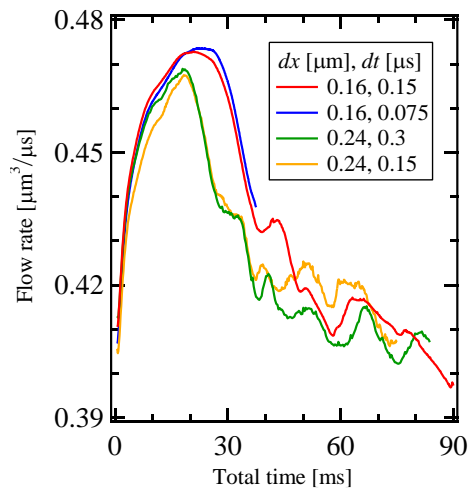


図 2 流量の変化

文 献

- 1) Kaneko, N., et al., Am. J. Physiol. Heart. Circ. Physiol., **300**, 754-761, 2011.
- 2) Kenichi Tsubota, et al., 生体医工学, 47(6): 501-507, 2009
- 3) D.V.Le et al., J. Comput. Phys., **228**, 8427-8445, 2009
- 4) J. Walter et al., Int. J. Numer. Meth. Eng., **83**, 829-850, 2010