

1次元血流動態モデルにおける血管狭窄シミュレーション

情報科学科 小林 航也

指導教員：神山 斉己

1 はじめに

動脈硬化症の非侵襲的な診断手法の代表的な手法として、PWV(脈波伝播速度, Pulse Wave Velocity),ABI(足関節/上腕血圧比, Ankle-Brachial Index) 等がある。これらの方法は拍動波形上の特徴点のみが利用されており、単純な弾性を示す導管モデルの上で構成されている。しかし動脈系の性質として末梢に近づくほど血管は細くなり、反射波が生成されることが知られている。拍動に伴う血流や血圧、血管容積の変化は、前進波と反射波によって形成される。現在の特徴点を利用したモデル化では、単純な導管モデルの上で構築されているため、これらの情報を十分に利用できていない。この問題を解決するには動脈系の構造を考慮した新たな分析が必要である。

本研究では1次元血流動態モデルを用いることで、血管の先細り構造までもを考慮した、より詳細な数値シミュレーションを可能にする。さらに動脈硬化症が進み、血管狭窄が起きた場合のシミュレーションを実現することで、血管狭窄が及ぼす血流への影響を解析することを行った。血管狭窄が血流に与える影響を明らかにすることで、より動脈硬化診断技術の向上に繋がると考えられる。

2 1次元血流動態モデル

動脈内の血流は Navier-Stokes 方程式により表すことが可能である。特に血流方向に分解能を持たせたものとして1次元血流モデルが知られている。Olufsen らにより、1次元血流モデルを用いた全身動脈系シミュレーションが報告されている。[1][2]

セグメント上において血流方向任意の点 x での血管径 r_0 は、先細り構造の入口血管径 r_{top} と出口血管径 r_{bottom} 、また血管の長さ L から以下の式により計算される。

$$r_0(x) = r_{top} \times \left(\frac{r_{bottom}}{r_{top}} \right)^{\left(\frac{x}{L} \right)} \quad (1)$$

Kroon ら [3] は、1次元血流解析モデルにおいて、動脈系の末梢と静脈への接続部について、末梢部のふるまいを0次元モデル(Windkesselモデル)で近似することにより表現する手法を提案しており、これを利用する。

構築したモデルの外形を図1で示す。提案した1次元血流動態モデルを用いることにより、動脈系の血管方向任意位置での血流量、血圧、血管径変化のシミュレーションが可能である。

3 血管狭窄

血管狭窄は血管径 r_0 に対して以下の式のような作用を加えることで実現した。

$$r = r_0 \sqrt{1 - R} \quad (2)$$

r は血管狭窄が生じた場合の血管径、 R は血管狭窄進行度を表している。

セグメント17(腹部大動脈)における入口血管径から血流方向に30cmの位置に1cmの血管狭窄が生じたと仮定してシミュレーションを行った。血管狭窄進行度 R は0%, 20%, 35%, 50%と変化させ、血管狭窄部の血流量と血圧の比較を行った結

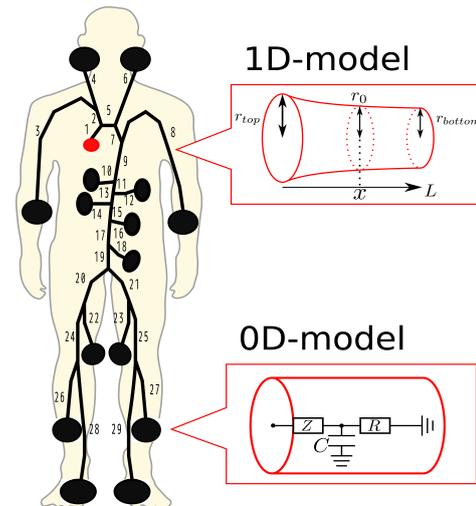


図1 動脈系二分木モデル

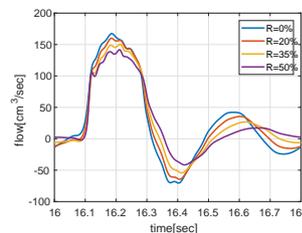


図2 血流量の比較

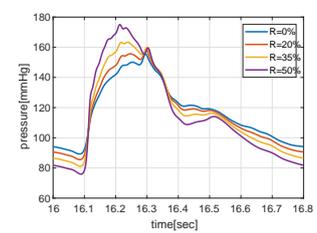


図3 血圧の比較

果を図2～図3に示す。この結果から血管狭窄進行度を高くなるにつれ、血流量は低くなり、最高血圧と最低血圧の差が大きくなる傾向が見られる。ピーク時の比較から血流量は約20%の低下が見られ、その後の変化も小さくなっている。血圧は最高血圧は約20%の増加、最低血圧は約10%の低下が見られた。

4 まとめ

本研究では、1次元血流動態モデルを用いた血管狭窄シミュレーションをすることが出来るように改良を行った。その結果血管狭窄が与える血流への影響を解析した。しかし現在のプログラムでは狭窄進行度 R は約50%までしかシミュレーションすることが出来ない。これは数値計算において急峻な変化に対応出来ないためであると考えられる。したがって完全閉塞が生じた場合などの、50%以上の血管狭窄が起きた場合の血流影響が、血管狭窄が0%～50%の時と同様な傾向になるかどうか分析出来ない。

今後の課題として、完全閉塞が生じた場合までシミュレーションが行えるように、適切な数値計算アルゴリズムを見出し、プログラムの修正、改良する必要がある。

参考文献

- [1] M. S. Olufsen et al., Annals of Biomedical Engineering, Vol.28, pp. 1281–1299, 2000.
- [2] M. S. Olufsen, Ph. D. Thesis, 1998.
- [3] W. Kroon et al., Computational and Mathematical Methods in Medicine, 2012, Article ID 156094.