

全身動脈系モデルのシミュレーション解析と評価

情報科学科 櫻井 一葉

指導教員：神山 斉己

1 はじめに

現在、脳血管疾患や心疾患を含む循環器系疾患は日本人の主な死因の一つである [1]。循環器系疾患の発症の原因である動脈硬化の進行状況を知り、対策する必要があると考えられる。動脈硬化症の評価は CAVI 検査を用いて行うことが出来る。この検査は、カフを左右上腕と左右足首に巻き、胸元に心音マイクをつけることで動脈硬化度を容易に調べることが出来る検査である。動脈の固さは CAVI という値で表し、高い値になるほど動脈硬化症が進んでいることが分かる。

本研究では、まず、カフ圧変化を導入した全身動脈系の数値シミュレーションモデルを MATLAB/Simulink を用いて再現した。次に、CAVI 検査により得られた実験データのシミュレーション解析を通して、構築モデルの評価を行う。

2 モデルの構築

末藤は Naik らの全身動脈系の数値シミュレーションモデルを MATLAB/Simulink で再現し、右上腕動脈にカフ圧を加えることで全身動脈系において測定が行えない箇所の血圧変動を把握出来るモデルを構築した [2]

Naik らのモデルはヒトの動脈を 91 個のセグメントに分割し、それぞれのセグメントで血管の長さ、血管径、血管壁の厚さ、ヤング率を定義し、解剖学的な知見に基づいて接続したマルチブランチ型モデルである [3]。末藤の Simulink モデルは動脈セグメントを一つのブロックで表し、視覚的に分かりやすいようにヒト動脈に合わせてブロックを並べている。

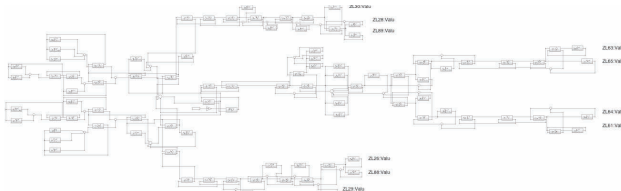


図1 末藤モデル

モデルへの入力刺激波形は John の生理学的な拍出流量を模した波形が用いられている。ヒトの心拍数の平均である 75[bpm] にするために、周期 0.8[sec] と設定し拍出の連続性を再現している。また、カフを巻いた際のカフ圧変化を血管径の大きさの変化により再現している。シミュレーション時間 16 秒間のうち、カフ圧の加圧として 6 秒時から 1 秒間に右上腕動脈の血管径を変化させ、カフ圧の減圧として 11 秒時から 1 秒間に元の値へ戻るように設定している。

3 全身動脈系シミュレーション解析と評価

シミュレーションの評価には血管の固さを表す CAVI を用いる。CAVI の計算方法を以下の式に示す。L と T は心臓弁口部から足首までの距離と脈波到達時間、Ps と Pd は上腕の最高血圧と最低血圧、 ρ は血液密度、a と b は定数を表している。

$$haPWV = \frac{L}{T} \quad (1)$$

$$CAVI = a \cdot 2\rho \cdot haPWV^2 \cdot \frac{\log_{10} \frac{Ps}{Pd}}{Ps - Pd} + b \quad (2)$$

CAVI 検査によって得られる CAVI 値とシミュレーションによって得られた各波形の時間特性から計算することで求めた CAVI 値を比較した。

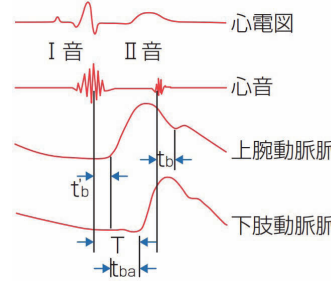


図2 脈波到達時間 T の算出 [4]

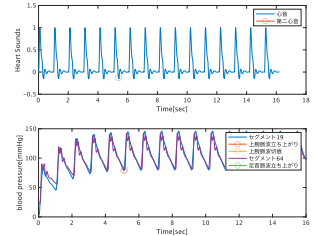


図3 シミュレーション結果

まず、被験者の心拍数を入力することでモデルへの入力刺激波形を変化させ、最高血圧と最低血圧を入力することでシミュレーション後に得られる血圧脈波を正規化し被験者に合わせたスケールの脈波を得られるようにした。次に、血管径の変化を CAVI 検査に合わせシミュレーション開始直後からカフ圧を加えるようにした。また CAVI の計算に必要な T はシミュレーション実行後に得られる血圧脈波から得られ、L は被験者の身長を入力することで得られるようにした。そして、ヤング率などの血管物性パラメータを変化させると Simulink の各セグメントのパラメータ入力に対応する RLC ブロックの値が変化するようにした。これらのプログラム改良によって、より正確な CAVI 値を計算出来るようになり、妥当性の高いシミュレーションを行えるようになった。

4 まとめ

本研究ではカフ圧変化を導入した全身動脈系のシミュレーションモデルの解析と評価を行い、シミュレーション結果から CAVI を計算することが出来るようになった。今後は標準モデルの CAVI をより実測データの CAVI に近づけるために血管系パラメータを推定し、動脈硬化症とパラメータの詳細な関係を明らかにすることが課題である。

参考文献

- [1] 厚生労働省, "令和2年(2020)人口動態統計(確定数)の概況", <https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/kakutei20/index.html>
- [2] 末藤萌々香, (2021), "カフ圧を考慮した全身動脈モデルのシミュレーション", 令和2年度卒業論文
- [3] Ketan Naik, Mathematical Modelling and Simulation of Human Systemic Arterial System, July 2014, pp.142-148
- [4] 血管機能検査ー CAVI, PWV, ABI J-Stage, https://www.jstage.jst.go.jp/article/naika/102/2/102_335/_pdf