

全身動脈モデルによる CAVI 検査のシミュレーション解析

福嶋 梨乃

指導教員：神山 斉己

1 はじめに

日本人の主要な死因の一つである循環器系疾患は、動脈硬化の進行によって発症することが知られている。動脈硬化の進行状態を把握し、早期に対応することが重要であるが、進行状態を把握する方法の一つとして CAVI 検査が挙げられる。CAVI は血圧値に影響を受けずに計測できる動脈硬化指標であり、8 未満が正常範囲とされている。

末藤は MATLAB/Simulink を用いて、任意の位置にカフ圧を加えた際の数値シミュレーションを行う全身動脈モデルを作成した [1]。櫻井は末藤が作成した全身動脈モデルを基に、CAVI 検査を再現できるシミュレーションモデルを作成した [2]。

本研究では、これらの先行研究によって作成された全身動脈モデルを用いて CAVI 検査のシミュレーションを行い、実際の CAVI 検査によって得られる実験データとの比較を行う。そして、モデルの解析を行い、CAVI の特徴である血圧変動の影響について確認することで、CAVI 検査のシミュレーションモデルとしての評価を行う。

2 CAVI の原理と血圧非依存性

CAVI は、血圧に依存しない血管固有の硬さを示す指標である stiffness parameter β 理論を基に、Bramwell-Hill の式を応用することで血管の硬さを定量化して導出する。

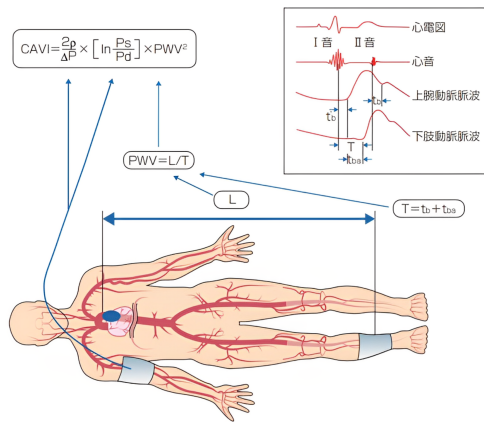


図1 CAVI 測定概念図

$haPWV$ は、弁口から足首動脈までの距離 L を上腕動脈および足首動脈の伝達時間差 t_b と心 II 音と上腕動脈切痕の時間差 t_{ba} の和 T で割った値としている。最終的には、定数 a, b を用いて PWV 原法にスケール変換させた結果、以下の式で表される。

$$CAVI = a \left(\frac{2\rho}{\Delta P} \times \log \frac{P_s}{P_d} \times haPWV^2 \right) + b \quad (1)$$

ρ : 血液密度 P_s : 収縮期血圧
 ΔP : 脈圧 P_d : 拡張期血圧

血圧非依存性について、健康人 22 人 (平均 41 歳) を対象とし、各々 5 回測定した結果、変動係数 (CV) が平均 3.8% とし安定した結果を得ることもできている [3]。

3 モデルの構成と CAVI の導出

全身動脈モデルは Naik らのモデルを参考に構築されており [4]、動脈を 91 個のセグメントに分割、それぞれに血管の長さ、血管径、血管壁の厚さ、ヤング率を定義することでセグメントごとの血圧波形を確認することができる。動脈は先頭部、中間部、末梢部の 3 つに分類されており、末梢部の動脈については周波数や反射率が反映されるように構築した。

従来、モデルによって得られる血圧波形から、5 拍目または 6 拍目における上腕動脈立ち上がりと切痕、足首動脈立ち上がり の時間を定め、CAVI を導出していたが、切痕の時刻を定めるにおいて精度が低く、CAVI の値に大きなブレが生じることがあった。そこで、切痕を定める範囲を限定するようにプログラムを改良、妥当な切痕の時刻を求めることができるようになった。また、実際の検査における CAVI の導出と同様に、各心拍でそれぞれ CAVI を計算、それらを平均して最終的な CAVI を求めることで、実際の測定により近い方法で CAVI を導出するように改良を施した。

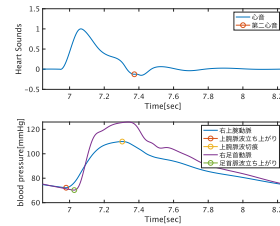


図2 改良前のシミュレーション結果 (CAVI=221.7)

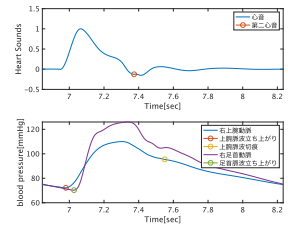


図3 改良後のシミュレーション結果 (CAVI=6.663)

4 まとめ

本研究では、全身動脈モデルを用いた CAVI 検査のシミュレーションについて、シミュレーション結果から求められる CAVI 値の精度を高めるとともに、実際の測定に近い方法で CAVI を導出できるようになった。そして、実際の測定結果とシミュレーションによって求められる CAVI 値を比較することで、CAVI の特徴である血圧非依存性についても評価することができた。今後は、年齢や性別など個人に合わせたパラメータの推定を行うことが課題である。

参考文献

- 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
- 櫻井一葉 (2022), “全身動脈系モデルのシミュレーション解析と評価”, 令和3年度卒業論文
- 折茂肇ほか, “新しい動脈硬化指標 CAVI のすべて 基礎から臨床応用まで”, 日経メディカル開発, 2012
- Naik, K and Bhathawala, P H., “Mathematical Modelling and Simulation of Human Systemic Arterial System”, IJEIT, 4, 1, 2014