

血流動態モデルにおける末梢抵抗推定の実験的評価

情報科学科 北川 潤

指導教員：神山 齊己

1 はじめに

日本人の死因の大きな割合を占めている循環器系疾患は、動脈硬化が主な原因になっている。動脈硬化の初期段階では内皮機能が低下することが知られており、これを評価する方法として、FMD 検査がある。FMD 検査では、前腕部の駆血操作により生じる急な血流の増加に伴う血管の拡張反応（以下、FMD 反応）の大きさに基づいて内皮機能を評価する。

しかし、FMD 検査は超音波プローブにより検査中に変化する血管径を観察し続ける必要があり、血圧計測などの計測法と比較して検者、被験者の双方への負担が大きい。そこで先行研究では、計測が容易な血流波形から内皮機能を評価することを目的として、FMD 検査時の動脈系の変化が血流波形や血圧波形に及ぼす影響を解析するために数理モデルの構築がされてきた [1]。

しかし先行研究モデルにおいて、シミュレーションから推定される生理学的パラメータのうち、末梢抵抗の妥当性評価が実験的に行われていない。そこで本研究では、先行研究で構築されたモデルの追試を行なうとともに、推定された末梢抵抗の実験的に妥当性評価を行なう。

2 モデルの構成

Avolio によって提案された血流動態モデル [2] は、ヒトの動脈を 128 個のセグメントに分割し、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。各セグメントにおいて血流波形と血圧波形を計測することができるため、全身の動脈系の血流及び血圧の基本的な特性を再現できる。しかしこのモデルでは、血管を単純な弾性体として仮定しており、動的な形状変化はしないため、FMD 検査時の血管壁の動的な状態を再現することが出来ないという問題がある。

そこで先行研究では、Avolio のモデルにデータ同化技術を導入した。FMD 検査時の観測データをフィードバックすることで、FMD 反応時に変化すると考えられるモデル内パラメータを推定する。モデルの概念図を図 1 に示す。データ同化技術とし

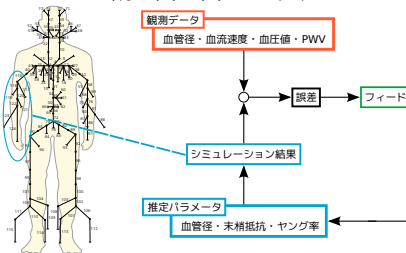


図 1 モデルの概念図

ては PI 制御を用いている。以下に末梢抵抗推定の式を示す。ここで Q_{sim} , Q_{exp} は、シミュレーション結果、観測データでの血流速度を表しており、 K_P , K_I は比例ゲイン、積分ゲインを表す。また、 Γ は末梢抵抗を決める反射係数を表している。

$$\Delta y(t) = Q_{sim} - Q_{exp} \quad (1)$$

$$\Gamma(t) = K_P \cdot \Delta y(t) + K_I \cdot \int_0^t \Delta y(\tau) d\tau \quad (2)$$

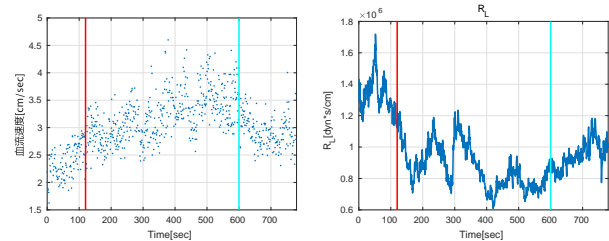
本モデルでは、計測が困難な末梢抵抗を推定することができるが、この変化について実験的な妥当性の評価がされていない。そこで本研究では実験的に妥当性の評価を行なう。

3 末梢抵抗の実験的な評価

末梢抵抗とは、手足などの末梢血管での血液の流れやすさを表すパラメータである。末梢抵抗が下がると、末梢部へ血液が流れやすくなり、血流量が増加する。冷環境で末梢部の温度をあげることによって、末梢部血流量が上昇することが報告されている [3]。

そこで、冷環境において末梢部の温度を変化させ、末梢抵抗を下げる実験を行なった。その際にモデルにフィードバックする観測データの計測を行なう。実験の流れを次に示す。(1) 安静時の状態で 2 分間測定する。(2) 右手をお湯 (45 度) の入った袋により 8 分間温める。(3) 袋を手から離し、3 分間測定する。

末梢抵抗が低下すると末梢部への血流が流れやすくなるため、上腕部での血流速度が上昇すると考えられる。そこで、末梢抵抗の変化が実際に起こっているかを確認するため、上腕部の血流速度を測定した (図 2(a))。図中の赤線、青線は温度操作の開始、終了時刻を示している。



(a) 血流速度の変化

(b) 推定された末梢抵抗

図 2 実験結果

図 2(a) から血流速度が温度操作開始後に上昇していることがわかり、末梢抵抗に変化が生じていることが確認できた。この観測データをモデルにフィードバックした場合、推定される末梢抵抗の低下が期待される。

次に妥当性確認のために、実験で得られた観測データをモデルにフィードバックし右手の末梢抵抗を推定した。その結果を図 2(b) に示す。図 2(b) から、末梢部の温度操作後に末梢抵抗が下がっていることがわかる。従って、温度変化に伴い末梢抵抗が下がるという期待した結果が得られたため、本モデルにおける末梢抵抗推定の妥当性を確認することができた。

4 まとめ

本研究では、先行研究で構築された血流動態モデルにおける末梢抵抗推定の実験的な評価を行なった。その結果、シミュレーション解析によって推定された末梢抵抗に予想された変化が生じることが確認できた。

今後は、内皮機能障害を持つ被験者など様々な観測データをモデルにフィードバックし、それぞれで比較を行なうことで血流波形から内皮機能を評価する手法の開発を進める。

参考文献

- [1] 浅見 直弥 (2017), 平成 29 年度修士論文。
- [2] A.P.Avolio(1980), Medical & Biological Engineering & Computing, 18, 709-718, 1980.
- [3] 入来 正躬 (1989), BME3 巻 7 号, 9-15, 1989