

# 血流動態モデルによる FMD 検査時の末梢抵抗推定

情報科学科 塚本 白

指導教員：神山 齊己

## 1 はじめに

循環器系疾患は日本国民の死因の第二位を占めており、その主な原因となる動脈硬化の早期発見は重要な課題となっている。動脈硬化の初期段階では血管内皮細胞の機能低下が起これと考えられ、その評価方法として FMD(血流依存性血管拡張反応, Flow-Mediated Dilation) 検査がある。FMD 検査は、5 分間の前腕部の駆血操作による血流速度増大(反応性充血)に伴う血管壁の拡張反応(FMD 反応)を計測するものである。

先行研究 [1] では FMD 検査時の末梢抵抗のパラメータ推定に基づいて動脈硬化症の早期診断技術の研究がされてきた。しかし、パラメータ推定手法の妥当性については十分に検討されていない。そこで本研究では、先行研究の追試を行うとともにその妥当性を評価する。

## 2 モデルの構成

Avolio らが提案した血流動態モデル [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ている。各セグメントは、血圧  $P$  を電圧  $V$ 、血流  $Q$  を電流  $I$  として考え、2 入力 2 出力の電気回路で近似的に表現している。このモデルは、血管を単純な弾性体として仮定しており、FMD 検査時のような動的挙動を再現できない。そこで、数値モデルと観測データを統合して現実を再現したデータを作成するデータ同化(data assimilation)[3] という手法を導入する。

反応性充血は、駆血による代謝物の蓄積により、駆血部位から末梢部位にかけての血管抵抗が低下することで引き起こされる。しかし、末梢抵抗の経時的な変化を非侵襲的に推定することは困難である。そこで、本研究では FMD 検査で得られる血流速度の観測データをフィードバックして、末梢抵抗を決定する反射係数  $\Gamma$  を推定し、反応性充血を再現する。フィードバック則として、PI 制御とカルマンフィルタの二種類を提案する。

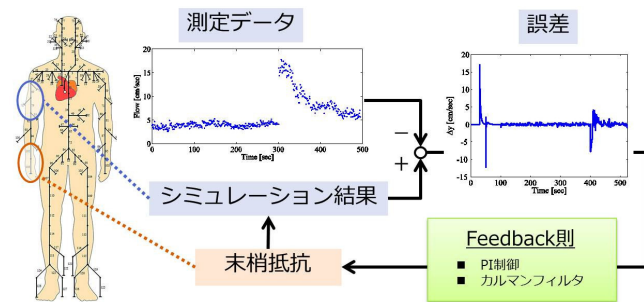


図1 モデルの概念図

## 3 末梢抵抗の推定

### 3.1 PI 制御

PI 制御を用いたフィードバック則を以下に示す。

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

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

ここで、 $Q_{sim}$  は血流速度(シミュレーション結果)、 $Q_{exp}$  は観測データ、 $K_P$  は比例ゲイン、 $K_I$  は積分ゲインを表す。

### 3.2 カルマンフィルタ

カルマンフィルタは反射係数  $\Gamma$  のパラメータ推定問題へ適用する。パラメータベクトル  $\theta$  を状態変数とみなすことで、状態方程式を以下のように記述することが出来る。

$$\theta(k+1) = \theta(k) + bv(k) \quad (3)$$

$$y(k) = \phi^T(k)\theta(k) + w(k) \quad (4)$$

状態方程式に従ったパラメータ推定アルゴリズムを以下に示す。

$$P^-(k) = P(k-1) + \sigma_v^2 bb^T \quad (5)$$

$$g(k) = \frac{P^-(k)\phi(k)}{\phi^T(k)P^-(k)\phi(k) + \sigma_w^2} \quad (6)$$

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + g(k)(y(k) - \phi^T(k)\hat{\theta}(k-1)) \quad (7)$$

$$P(k) = (I - g(k)\phi^T(k))P^-(k) \quad (8)$$

ここで、 $P^-(k)$  は事前誤差共分散行列、 $g(k)$  はカルマンゲイン、 $\hat{\theta}(k)$  は状態推定値、 $P(k)$  は事後誤差共分散行列、 $\sigma_v^2$  はシステム雑音の分散、 $\sigma_w^2$  は観測雑音の分散、 $\phi$  は回帰ベクトルを表す。

### 3.3 双子実験

パラメータ推定の妥当性を確認するために双子実験を行った。双子実験(identical twin experiment)とは、データ同化の分野でよく用いられる用語の1つで、データ同化手法の有効性をテストするものである。方法は、まず反射係数  $\Gamma$  に任意の変化を加えて、その際の血流速度の結果に擬似観測誤差を加えて擬似的な観測データを作成する。次に、擬似観測データをモデルへのフィードバックとして、反射係数を推定する。その反射係数が元の反射係数を推定出来るかを確認する。

### 3.4 反応性充血の再現

実際の観測データをフィードバックをして末梢抵抗を推定する。図2にPI制御、図3にカルマンフィルタの結果を示す。赤が観測データ、青がシミュレーション結果である。どちらも観測データに近い結果が得られ、駆血解放後に血流速度が増大するという反応性充血の特徴を再現出来ている。また、カルマンフィルタではノイズが減少して推定出来ていることが分かる。

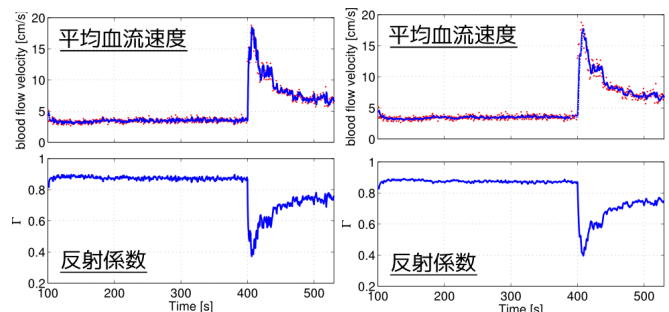


図2 PI制御

図3 カルマンフィルタ

## 4 まとめ

本研究では、全身血流動態モデルにデータ同化手法を導入した FMD 検査時の末梢抵抗のパラメータ推定手法を提案し、反応性充血を再現した。双子実験において任意の推定値が推定出来ることから推定手法の妥当性を確認した。さらに、実際の観測データを用いたシミュレーションで、FMD 検査における駆血解放後の血流速度増大を再現出来ていることを確認した。推定手法にはPI制御とカルマンフィルタを用いたが、どちらも良い推定結果が得られた。

今後は、モデルをより精密化し、血流速度だけでなく、血管内部のパラメータ推定などにも適用することが課題である。

## 参考文献

- [1] 近藤 洋平 (2014), 平成 26 年度修士論文。
- [2] A.P.Avolio(1980), Medical & Biological Engineering & Computing, 18, 709-718.
- [3] 淡路 敏之, 蒲地 政文, 池田 元美, 石川 洋一, 京都大学学術出版会, 2009.