

血管内の流れの数値シミュレーション - 動脈硬化を想定して -

大谷 恵美 (指導教員: 河村 哲也)

1 はじめに

日本人の死因の1位はがん・腫瘍、2位は心臓疾患(心筋梗塞など)、3位は肺炎、4位は脳血管疾患(脳溢血や脳梗塞など)である。[1]心臓と脳の血管疾患による死亡は、合わせると癌よりも多い。これらの諸血管疾患は、血管の狭窄や動脈硬化、動脈瘤の発生とその破裂、さらに血栓の発生など、さまざまな原因で引き起こされ、いずれの場合にも、血流が大きな要因であると考えられる。そこで、本研究では動脈硬化を取り上げ、血管内の流れを解析し検証した。

2 格子生成・モデル化

格子は直交等間隔格子、または曲線格子とする。計算に利用した格子数は、方向に z 、 r 方向に 202×31 であり、軸対称性を仮定した。(z : 軸、 r : 半径)

[Case 1] 正常なまっすぐな血管と、脂肪がついたばこぼことした血管を用意し、ある点での圧力を比較し流れがどう変化するかを調べる。

- ・正常なまっすぐな血管



(i)

- ・脂肪が沢山付いたばこぼことした血管



(ii)

- ・脂肪が1つ付いた血管
- ・脂肪が2つ付いた血管



(iii)



(iv)

[Case 2] 現実に近い血流の流れを想定するため、流入の圧力が加わると血管が広がり、逆に圧力が弱いときには血管が縮む動作を再現するため、上下の壁に動きを加え、Case 1 と同様に血管内の流れを検証する。(※流入: 一定のリズムで入口から血液を送り出したもの。)

血管の変形は次式(1)から計算した。

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = F - K r \quad (1)$$

r : 軸から血管壁までの距離
 F : 血管壁内外の圧力差による力
 K : 血管壁をばねにみなしたときのばね定数

※Case 1、Case 2 どちらも、脈動流を考慮し計算する。(脈動流: 心臓が一定のリズムで収縮と弛緩を繰り返し、全身に血液を送ること。)

3 計算方法

3.1 基礎方程式

血液の流れは非圧縮性流体の流れとみなせるので、連続の式(2)、非圧縮性 Navier-Stokes 方程式(3)を使用する。

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -\nabla p + \frac{1}{Re} \Delta \mathbf{V} \quad (3)$$

\mathbf{V} : 流速 p : 圧力 t : 時間 Re : レイノルズ数

この基礎方程式を標準的なMAC法を用いて解いた。すなわち、式(2)(3)から導かれる圧力のポアソン方程式(4)

$$\Delta p^{n+1} = \frac{\nabla \cdot \mathbf{V}^n}{\Delta t} - \nabla \cdot \{(\mathbf{V}^n \cdot \nabla) \mathbf{V}^n\} + \frac{1}{Re} \Delta (\nabla \cdot \mathbf{V}^n) \quad (4)$$

を用いて n ステップ目での速度 \mathbf{V}^n から未知の圧力 p^{n+1} を求める。 $n+1$ ステップの速度は式(3)の近似である式(5)

$$\mathbf{V}^{n+1} = \mathbf{V}^n + \Delta t \{- (\mathbf{V}^n \cdot \nabla) \mathbf{V}^n - \nabla p^{n+1} + \frac{1}{Re} (\Delta \mathbf{V}^n) \} \quad (5)$$

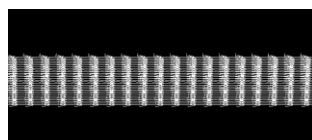
から求めた。(4)、(5)を一般座標で表現し、さらに境界条件を組み込み、初期条件から始めて、くりかえし計算し、各時刻の速度と圧力を順次計算した。

4 計算結果

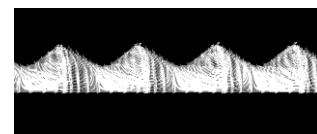
計算の結果、特徴的なものを代表して示す。

4.1 (Case 1) 壁が動かない場合の計算結果

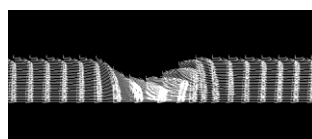
速度ベクトル



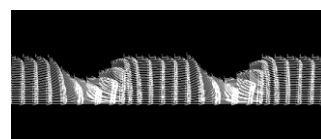
Case1 (i)



Case1 (ii)



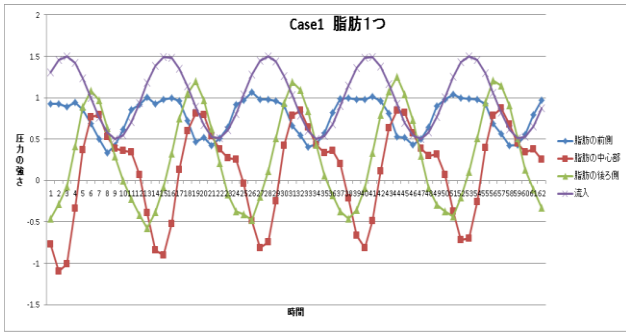
Case1 (iii)



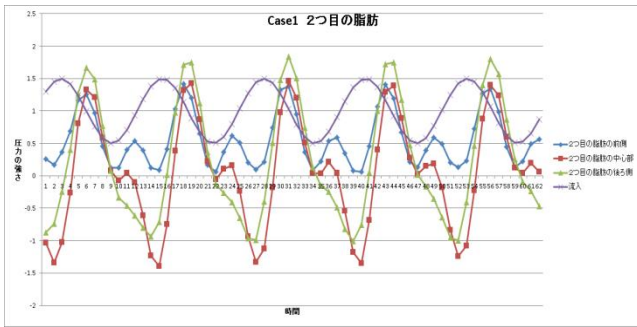
Case1 (vi)

脂肪付近の圧力のグラフ

横軸は時間、縦軸は圧力の強さを表している。

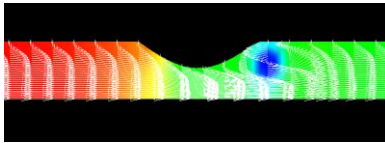


Case1 (iii)

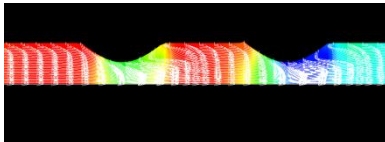


Case1 (vi)

圧力と流速ベクトル



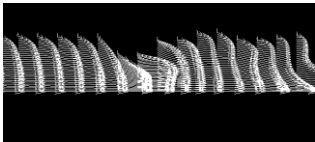
Case1 (iii)



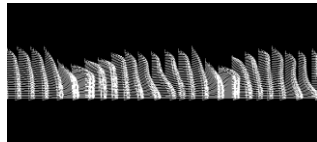
Case1 (vi)

4.2 Case 2 壁が動いた場合の計算結果

速度ベクトル

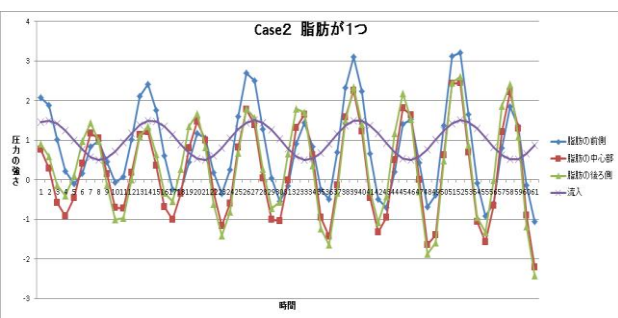


Case2 (iii)

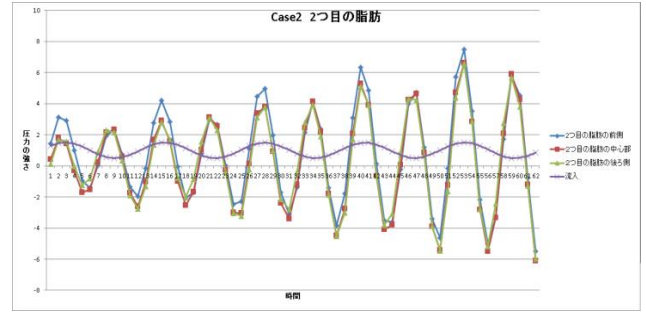


Case2 (vi)

脂肪付近の圧力のグラフ

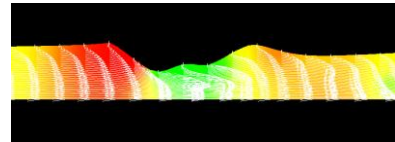


Case2 (iii)



Case2 (vi)

圧力と流速ベクトル



Case2 (iii)



Case2 (vi)

5 まとめと考察

[Case1] 血管の細い部分(脂肪が付いている部分)では流れが速くなる。このとき、脂肪の前側は圧力が高いが、中心部と後ろ側の圧力は下がっている。脈動流で流入が小さくなると、血液が引き戻され、脂肪後ろの低い圧力を中心に逆流してうずが発生し、うしろ部分の圧力が高くなり、変動が大きい。また、脂肪が1つ増えることで、血流が悪くなり2つ目の脂肪の前側部分にかかる負担が増える。

[Case2] 流入の大きさが最小・最大になるとき、脂肪付近の圧力はすべて大きくなり、Case1 と比べて変動が大きく、圧力の強さが倍になり、複雑な動きになることが観察できた。さらに脂肪部分で血管が大きく変形した。

Case1 より基本的な特性を調べることができ、Case2 では、実際の血流に近づけることで、複雑な動きになり、より圧力を受けやすく負担がかかりやすいということが分かった。また、脂肪が増えることで、高い圧力がかかる部分が広がり、血管の変形が大きくなり血管が破れる危険性が高くなる。

参考文献

- [1] 厚生労働省, 「平成25年(2013)人口動態統計の年間推計」, <http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/suikai13/dl/honbun.pdf> (アクセス日:2015/1/26)
- [2] 河村哲也, 「数値シミュレーション入門」, サイエンス社