

分岐した血管内の流れの三次元シミュレーション

藤田 真衣 (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。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、本研究では脳梗塞を取り上げ、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とする。計算に利用した格子はx、y、z方向に100×30×60である。

[Case1] 二つに分岐した血管を用意し、一方の血管を閉塞させる。その閉塞部の大きさによって、流れがどう変化するかを調べる。

- ・閉塞していない血管



Case1-1

- ・閉塞している血管
(閉塞部：分岐部近くの下側の血管)



Case1-2 (閉塞小)

Case1-3 (閉塞大)

[Case2] 脳梗塞の治療法の一つであるバイパス手術の効果を検証する。(バイパス手術：流れの悪くなった血管のわきに別の血管をつないで、流れをよくする手術)



3 計算方法

3.1 基礎方程式

血液の流れは非圧縮性流体とみなせるので、連続の式(1)、非圧縮性 Navier-Stokes 方程式(2)を使用する。

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla)V = -\nabla p + \frac{1}{Re} \Delta V \quad (2)$$

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(1)(2)から導かれる圧力のポアソン方程式(3)

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

を用いて n ステップ目での速度 V^n から未知の圧力 p^{n+1} を求める。次の時間ステップの速度は式(2)の近似である式(4)

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

から求めた。これに境界条件を組み込み、初期条件から始めて、繰り返し計算し、各時刻の速度と圧力を順次計算した。

3.2 血管の形状の計算法

血管は複雑な形をした物体であるため、形状を計算に組み込むのは用意ではない。そこで、血管を内部に含むような大きな長方形領域を考え、それを等間隔格子で分割したうえで、血管の形状を現す三次元配列 $MSK(x,y,z)$ を別に用意した。配列 MSK には血管内=1、血管外=0、血液の詰まった狭窄部分=0 という値を入力する。

計算をする際に、初めは血管でない部分にも流れがあると仮定し、すべての格子で流れを計算する。そのようにして得られた速度の結果に先ほど作った配列 MSK を掛け合わせる。その結果、血管内部である流体はそのままの値になり、それ以外の部分で、速度は0になる。

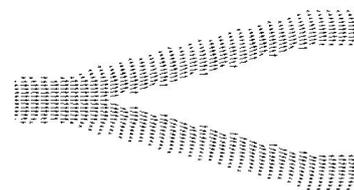
4 計算結果

レイノルズ数：100 時間刻み幅：0.01

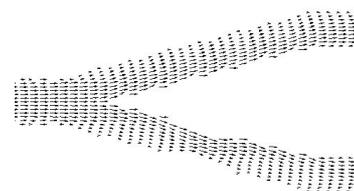
時間ステップ数：1000

[Case1]

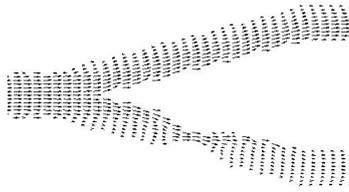
速度ベクトル



Case1-1



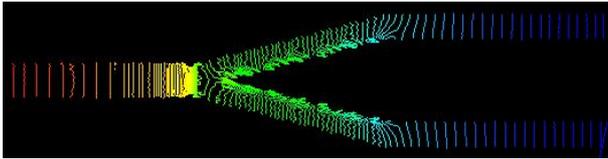
Case1-2



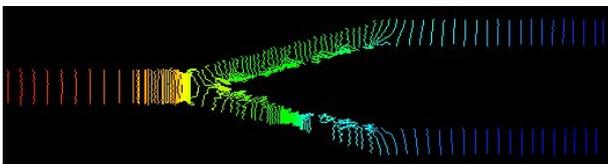
Case1-3

圧力

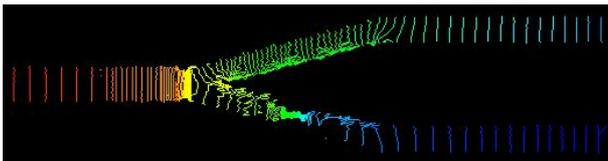
1. 等圧線



Case1-1

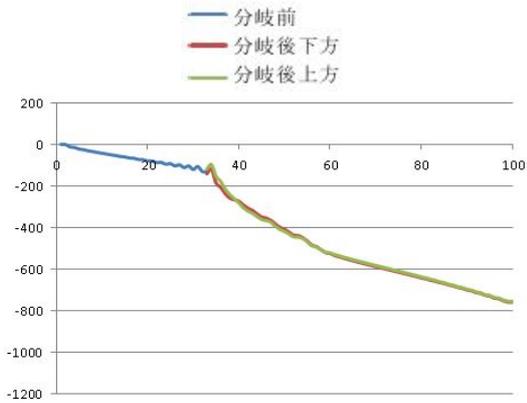


Case1-2

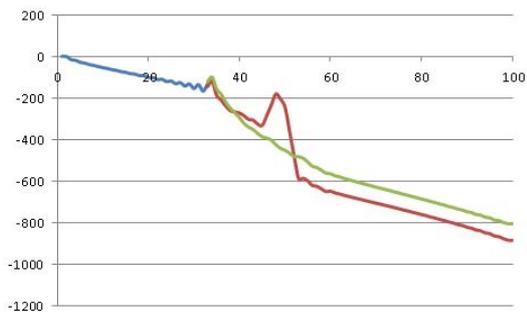


Case1-3

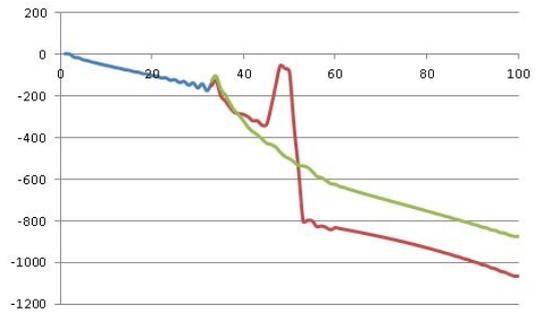
2. 血管中心部の圧力のグラフ



Case1-1



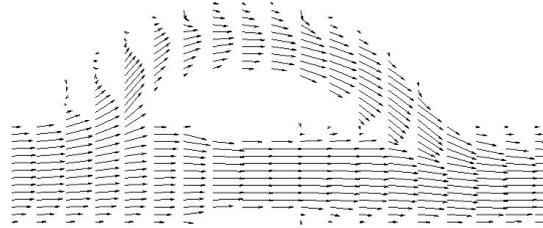
Case1-2



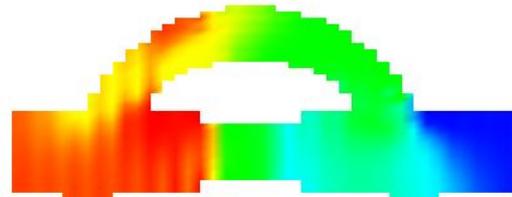
Case1-3

[Case2]

速度ベクトル



圧力



5 考察

[Case1] 血管の閉塞部が大きくなるにつれ、閉塞部の圧力が高くなる。高い圧力がかかると、血管が破れ脳出血が起こる危険性がある。また、閉塞部の後ろの速度と圧力は小さくなる。つまり、閉塞部が大きくなるにつれ、血液の流れが悪くなる可以说。血液の流れが滞ると、そこに血のかたまりができ、血管が詰まりやすくなる。

[Case2] 血管合流部は流れが少し乱れる。バイパスの上側に圧力がかかっている。閉塞部の前後では圧力が急に変化するが、バイパス側では緩やかに変化している。

6 今後の課題

本研究は格子が粗く、また直交格子を用いているため血管壁面が階段状になっているので、格子生成方法を改めて考えていきたい。また、今回検証した以外の場合のシミュレーションも行いたいと思う。

参考文献

[1] 河村哲也：「数値シミュレーション入門」サイエンス社