

変形血管内の流れの三次元数値シミュレーション

永見 真梨乃 (指導教員：河村 哲也)

1 はじめに

近年の日本人の死因の上位ランキングは、癌（悪性新生物）、心臓病、肺炎、脳卒中である。[2]

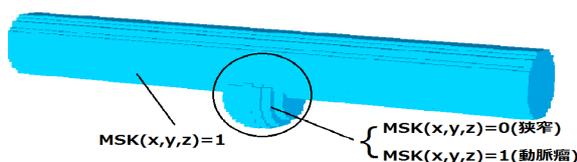
第四位の脳卒中には、脳出血、脳梗塞、くも膜下出血という三つのタイプがある。そこで、本研究ではこの三つのタイプを取り上げ、血管内の流れの解析を行うことにした。

2 格子生成・モデル化

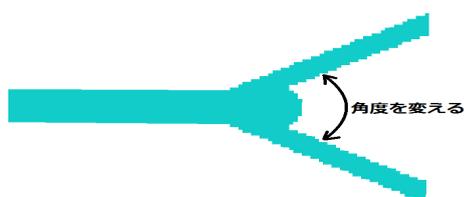
格子は三次元で扱い、直交等間隔格子とする。

《脳出血》 [Case1] 計算に利用した格子数は、x, y, z 方向に $71 \times 101 \times 71$ とする。正常なまっすぐな血管を用意し、一つ瘤（動脈瘤）を作る。動脈瘤がまだ破裂していないという条件のもとで、その大きさや形状によって、血管内の流れの変化を調べる。

《脳梗塞》 [Case2] 格子数は、x, y, z 方向に $71 \times 71 \times 71$ とする。正常なまっすぐな血管を用意し、そこにいくつかの狭窄を作り、狭窄の個数と着き方によって、血管内の流れと圧力の変化を調べる。



《くも膜下出血》 [Case3] 格子数は $101 \times 101 \times 31$ とする。二つに分岐した血管を用意し、血管分岐部の一つの瘤（脳動脈瘤）を作る。脳動脈瘤がまだ破裂していないという条件のもとで、瘤の大きさは変えずに分岐血管の角度を変化させ、それぞれの血管内の流れと圧力の変化を調べる。



3 計算方法

3.1 基礎方程式

血管内の流れの基礎方程式として、血液を非圧縮性ニュートン流体と仮定して、連続の式 (1), 非圧縮性 Navier-Stokes 方程式 (2) を使用する。

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (1)$$

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

V : 流速 p : 圧力 t : 時間 Re : レイノルズ数

上記の方程式をフラクショナル・ステップ法を用いて数値的に計算した。[1]

4 計算結果と考察

レイノルズ数：40 時間刻み幅：0.05
時間ステップ数：5000

4.1 [Case1] 動脈瘤のある血管

速度ベクトル

《瘤の大きさによる比較》

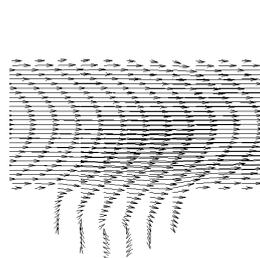


Fig 1 半円状の瘤

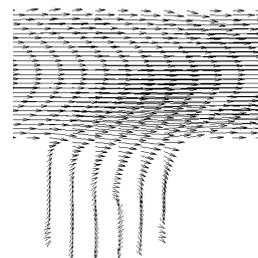


Fig 2 球場の瘤

《瘤の形状による比較》

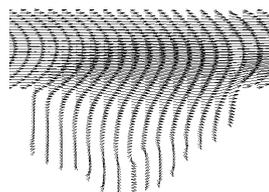


Fig 3 横に瘤が着く時

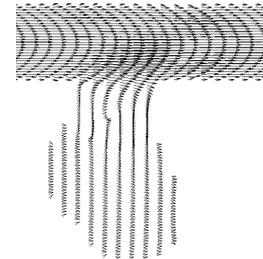


Fig 4 縦に瘤が着く時

動脈瘤内では渦が発生し、瘤が大きくなるほど流れの向きの変化が激しく不安定になる。また、不規則な形で縦に長い方が動脈瘤の先端に血液が滞る。その結果、動脈瘤の壁が弱くなって血圧も直接かかるようになり、動脈瘤が破裂し脳出血が起こる可能性が高いということが考えられる。

4.2 [Case2] 狭窄のある血管

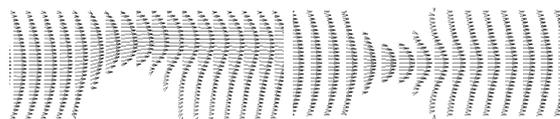
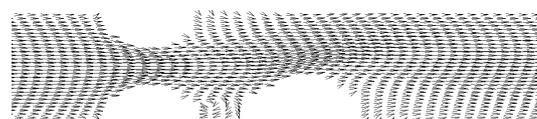


Fig 5 狭窄が一つ

Fig 6 狭窄が二つ



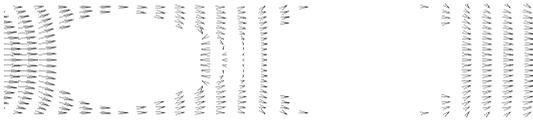


Fig 7 狭窄が三つ (xy 軸と zx 軸)

圧力

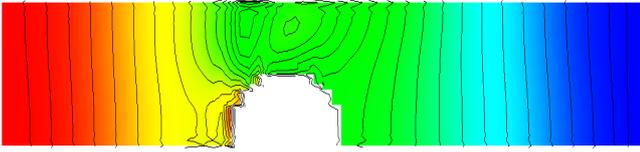


Fig 8 狭窄が一つ

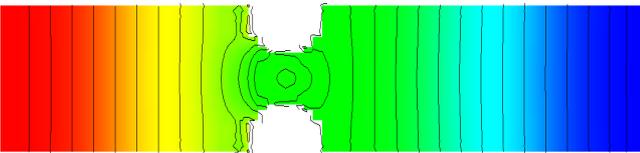


Fig 9 狭窄が二つ

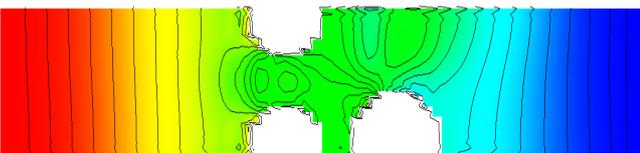


Fig 10 狭窄が三つ

狭窄の前方では圧力が高くなり、血管の狭い部分では血液の流れが速く、狭窄の後方では流れが遅くなる。横に並ぶ二つの狭窄の間では渦が発生しており、そこに血液が滞り、新たな狭窄ができたり今ある狭窄が剥がれて血管が詰まる可能性がある。狭窄が複数個あって閉塞部が大きくなるにつれ、血液循環がうまくいかず血管が詰まり脳梗塞が起こる可能性が高いということが考えられる。

4.3 [Case3] くも膜下出血

速度ベクトル

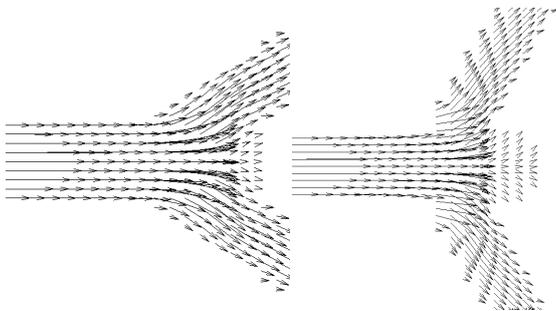


Fig 11 30°

Fig 12 60°

圧力

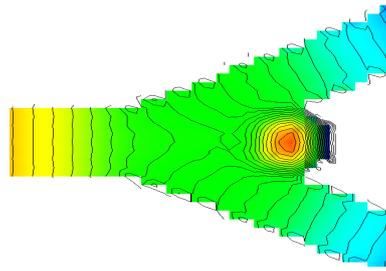


Fig 13 30°

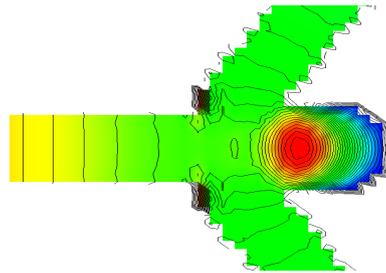


Fig 14 60°

接合の角度を急にすると、接合された部分と瘤の中の圧力が高くなる。瘤の中はどの例も速度が小さく、角度を急にすると、瘤と分岐血管の合流部の流れが乱れることがわかった。これより、接合部の角度を急にすると血液の流れが悪くなり、主血管と分岐血管の接合部や脳動脈瘤が破裂し、くも膜下出血が起こる可能性が高いと考えられる。

5 今後の課題

本研究では格子が粗く、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おり、狭窄部分や接合部分、(脳)動脈瘤などが精度よく計算できていないため、格子生成方法を改めて考えていきたい。また、正常でまっすぐな血管ではなく、壁面がでこぼこした血管の血液の流れを調べるなど、今回検証した以外のシミュレーションも行っていきたいと思う。

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, 2006.
- [2] 厚生労働省 「平成27年(2015)人工動態統計の年間推計」
<http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/kakutei15/>
 (最終アクセス: 2016/12/14)