変形する血管内の血流の1次元モデルによる解析

東京大学理科1類2年 樋口 卓也

2005/03/29

1　研究の背景

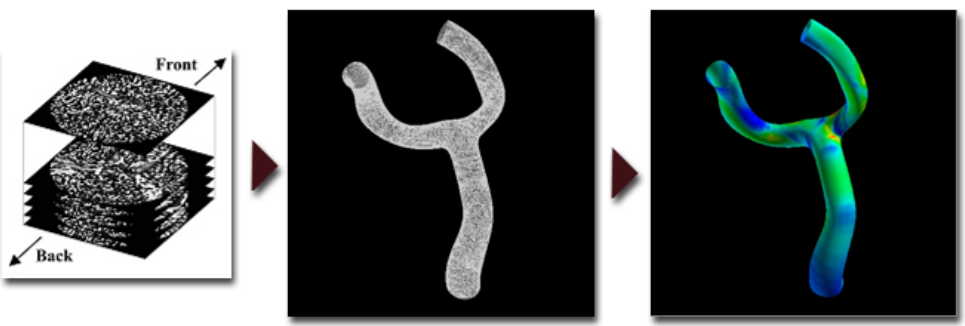
血流解析の必要性

- 脳動脈瘤の破裂は, くも膜下出血の原因の 1 つ
- その発生, 破裂のメカニズムの解明は治療, 予防に役立つ情報
- 動脈瘤は血管の分岐部に多く発生し, 血流の作用がその発生要因

$\Rightarrow$ 分岐部の血流の解析が必要

血流解析の流れ

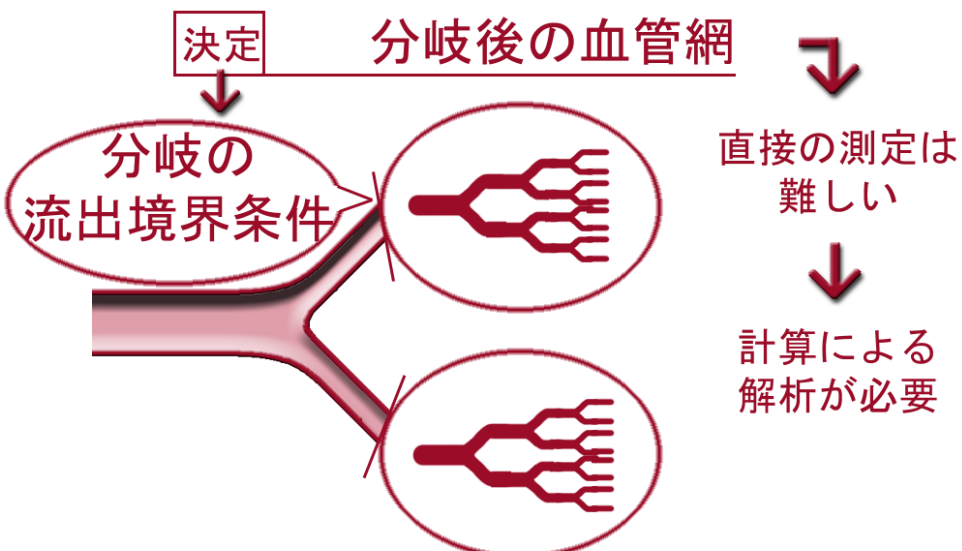
- 医用画像 (CT, MRA) から血管の形状を抽出
- 抽出画像から 3D モデルを復元
- 数値計算による血流のシュミレーション



流出境界条件

分岐の適切な流出境界条件の設定が必要

[Irene E. Vignon, the journal *Wave Motion*, 2003]

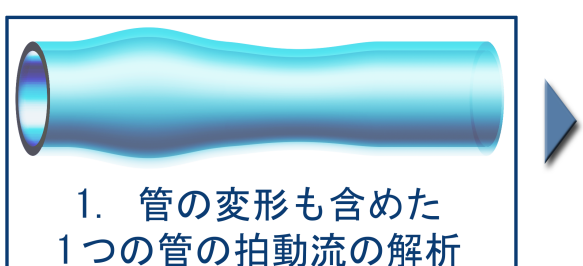


2　研究の目的

最終的な目標

下流の血管網を考慮した分岐の流出境界条件の設定

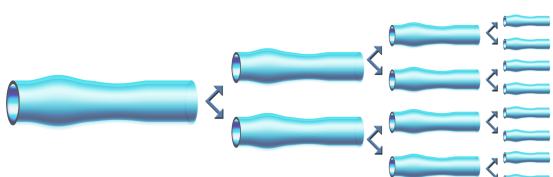
方針



1.　管の変形も含めた
1つの管の拍動流の解析

本研究の目的

（1つの管の拍動流の
圧力伝播を調べる）



2.　血管網をツリー型モデルで表し
1. の結果から拍動流を解析する

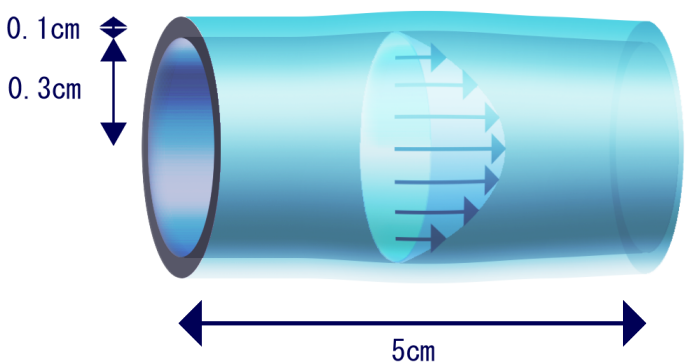
分岐の流出境界条件を得る

3　研究の方法

3.1　解析モデル

管壁：軸対称に変形　　管内流れ：軸対称放物流

血液の質量密度 ρ, 動粘性係数 ν は一定



位置 X と時間 (t) の
関数となる物理量：

Q: 流量
P: 圧力
S: 断面積

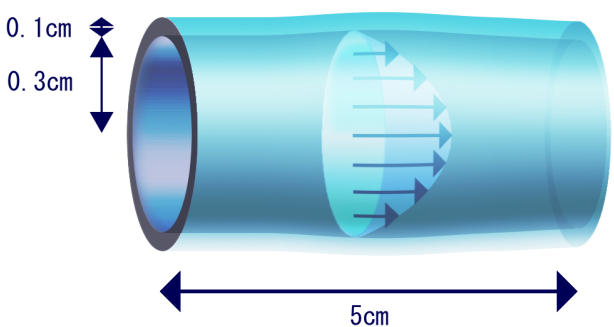
3.2　解析条件

基準となる物理量

管の半径	$R_0 = 0.3\mathrm{cm}$
平均流速	$v_0 = 10\mathrm{cm/s}$
断面積	$S_0 = \pi {R_0}^2$
流量	$Q_0 = v_0 \times S_0$
圧力	$P_0 = 6 \times 10^3\mathrm{Pa}$
軸方向の長さ	$X_0 = 1\mathrm{cm}$

物理定数

血液の質量密度	$\rho = 1.06 \times 10^{6}\mathrm{g}$
血液の粘性係数	$\mu = 4.7 \times 10^{-3}\mathrm{Pa \cdot s}$
血液の動粘性係数	$\nu = \mu/\rho$
血管のヤング率 (硬さ)	$E = 1 \times 10^{6}\mathrm{Pa}$
血管壁の厚さ	$h = 1 \times 10^{-1}\mathrm{cm}$



3.3 基礎方程式

連続の式

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial X} = 0 \tag{1}$$

運動量保存の式

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X}\left(\frac{4}{3}\frac{Q^2}{S}\right) = -\frac{S}{\rho}\frac{\partial P}{\partial X} - 8\pi\nu\frac{Q}{S} \tag{2}$$

圧力と断面積の間の関係式

$$P - P_0 = \frac{Eh}{2\pi R_0}\left(1 - \sqrt{\frac{S_0}{S}}\right) \tag{3}$$

3.4 解析手法

小文字は基準量で割って無次元化した量をあらわす.

3.5 初期条件・境界条件

初期条件

どの x に対しても, $s = 1$, $q = 1$

流入境界条件

圧力 p が $\pm 20\%$ の振幅, 1/3 秒の長さを持つようなパルス波を考え, それに対応する s, q を流入条件として入れた. ただし, 流入する流速は一定とした.

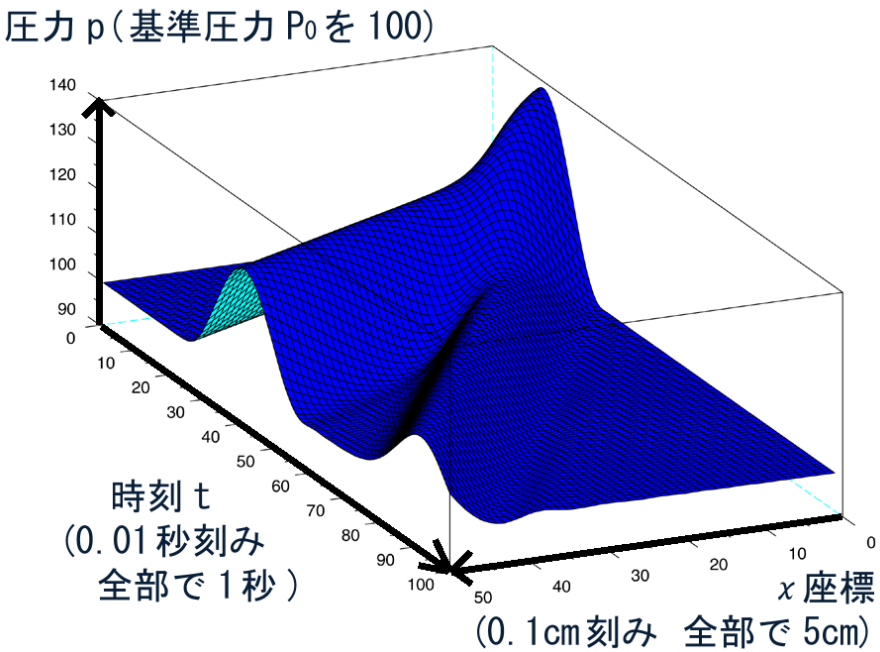
流出境界条件

流出境界条件が問題になるのは, 空間方向の微分においてだけ.

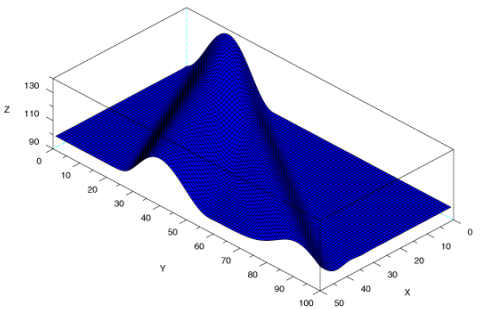
$\Rightarrow$ 末端にダミーセルを 1 つ加え, 同じ条件が継続している状況になるようにしたものを考えた結果を, 中心差分近似の行列の中に含めた.

4　研究結果

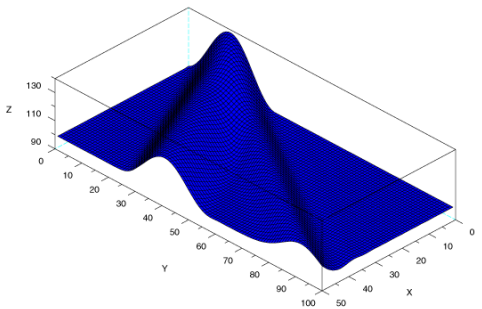
4.1　解析結果



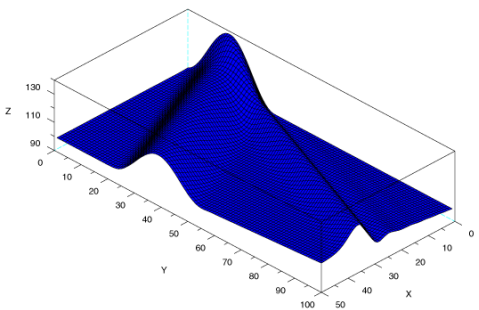
管壁のヤング率を変化させた結果 (軸は前図と同じ)



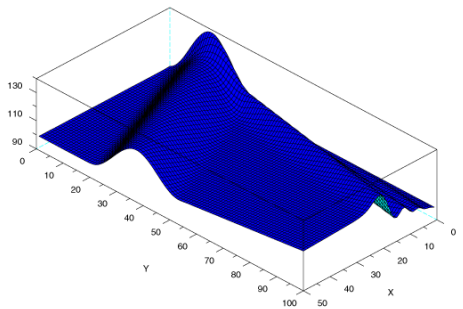
E = 1 × 10^6 Pa （前図と同じグラフ）



E = 1 × 10^8 Pa



E = 5 × 10^9 Pa



E = 1 × 10^10 Pa

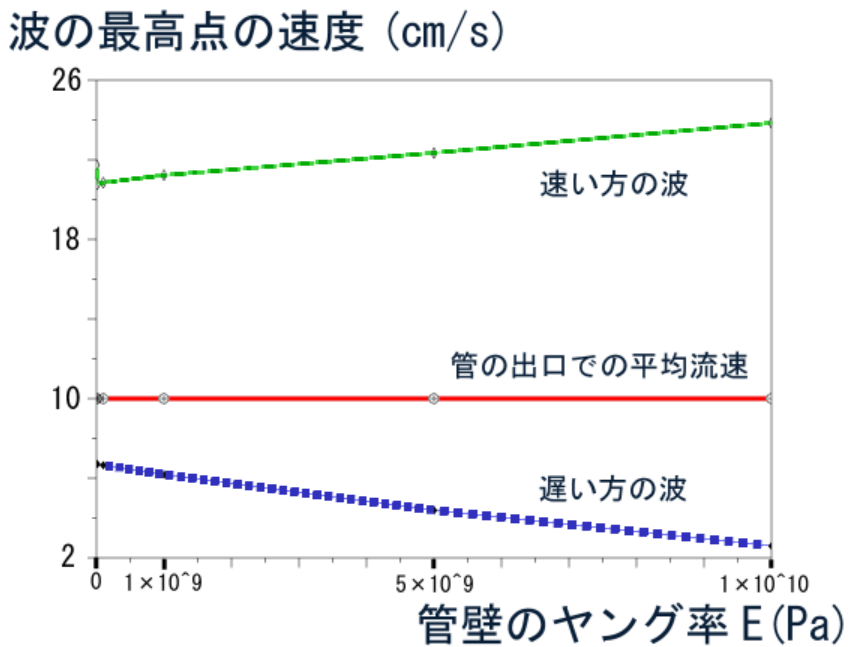
4.2 考察

以下が結果からわかる.

- 圧力波が, 2 つの波に分離して伝播する.
- 管壁のヤング率を変えると, 分離の仕方, それぞれの波の伝播速度が変わる.

この分離はもともと非圧縮性の流体が, 血管の変形によって, 圧縮性流体のように振る舞い, 圧力波だけが先に伝播する効果による.

$\Rightarrow$ ヤング率と 2 つの圧力波の群速度, 及び管出口での平均流速の関係をプロットした.



管壁が硬い (ヤング率が大きい) ほど分離した圧力波の流速の違いは大きく, 波束が崩れやすい.

⇒ 硬いほど, 圧力の山が減衰されやすいと考えられる.

5　結論

- 変形する管の中の圧力の流れには, 管壁の硬さにより定まる, 2 種類の速度を持った, 安定に伝播するモードが存在する.
- 管壁は抹消部に行くほど硬くなる.

$\Rightarrow$ 分岐を繰り返しながら, 徐々に硬い血管を血液は通り, モードの数は増えていく.

$\Rightarrow$ 実際の血流ではさまざまなモードの波が混ざり合って, 圧力波の波束が崩れていくと予想される.

6　今後の展望

本研究では, 方針の 1 しか扱わなかった.
$\Rightarrow$ 方針の 2 を扱いたい.

今後のテーマ

- 分岐部での伝播の様子を解析する.
- 本研究で扱った 1 つの管内の流れを, 管の大きさ, 硬さを変えながら分岐でつないで, ツリー構造の血管網内の流れを解析する.