

脳血管の血流解析に関する基礎研究

苫小牧工業高等専門学校 ○山田 拓磨 見藤 歩 小藪 栄太郎 蘇武栄治

要旨

本稿では3次元スキャン装置より取り込んだ実物大の脳血管モデルを用いて非定常非圧縮流体解析をし、拍動流の効果及び血管内壁に生じる壁せん断応力についての考察を行った。その結果、交通動脈と大脳動脈の連絡部、大きな湾曲部で高壁せん断応力が発生し、この部位と臨床結果の脳動脈瘤発症部位が一致していることが確認された。また拍動流は血流変動するため、高壁せん断応力部位も変動している様子が見られた。

1. 緒言

脳血管障害とは頭蓋内外の血管病変により生じる脳神経系障害・脳機能障害の総称で、脳卒中と言われている。脳卒中のひとつで致死率の高いくも膜下出血は、脳動脈瘤の破裂が主な原因である。近年、CTやMRA等の機器の普及により未破裂状脳動脈瘤の発見は可能になってきたが、破裂するかどうかの判断が難しく、さらに手術しても5%が後遺症を引き起こしてしまう。現在までに脳動脈瘤に関する研究は数多く行われているが、瘤の成長や破裂に至るまでのメカニズムは明確には解明されていない。

本研究では、実際の脳内血管を解析して、脳血管障害の発生や成長のメカニズムを血液の流れなどの解析結果から推測し、予防治療の糧とすることを目的とする。今回は3次元スキャン装置より実物大の脳血管モデルを取り込んでそのモデルを用いて非定常非圧縮流体解析をし、拍動流の効果及び血管内壁に生じる壁せん断応力についての考察を行った。また解析結果と臨床結果(脳動脈瘤の発生部位など)の比較を行った。

2. 血流・血圧と血管壁の関係

生体内の動脈には、①血圧によって壁の円周方向と半径方向に生ずる応力(法線応力)、②血流によって壁の最内層表面に生ずる応力(せん断応力)、③管軸方向への引張りによってこの方向に生ずる力(法線応力)が作用している[1]。

今回はモデルの拡張・収縮を考慮してないため、③の応力については取り上げず、血圧と血流の変化によって生じる壁せん断応力の影響について述べていく。脳動脈が分岐する地点では大きな壁せん断応力が作用し、それが原因で局所的血管新生が生じ動脈の膨らみが発生する。この膨らみは引き続き作用する高せん断応力によって成長して脳動脈瘤となる。この瘤が分岐部の上部にあるため瘤内の流れは遅くなり、壁せん断応力を著しく減少する。これが原因で血管壁には動脈硬化に類似した血管退行が生じ破裂に至るとされている[2]。つまり壁せん断応力は、多くの脳血管障害の原因であり、これを調べることで脳血管障害の発生のメカニズムなどが解明できる。

3. 研究方法

3.1 解析対象

図1(a)に示すモデルを3次元スキャン装置 VIVID910より点群データとして取り込み、Solid Works 上に表示し、それを基に脳内血管をCADデータとして抽出する方法で解析モデルの作成をした。また、このモデルは毛細血管を省いて主な動脈である内頸動脈(前,中,後大脳動脈)と椎骨動脈(脳底動脈)に前,後交通動脈で構成している。また大脳動脈と交通動脈からなる輪状のものをウィリス動脈輪と呼ぶ。

シミュレーションは数値解析ソフトウェア ANSYS - CFX15.0で一樣流速と拍動流の解析を行った。

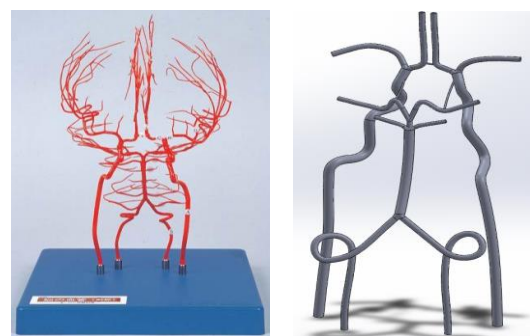
3.2 解析条件

一樣流速条件と拍動流条件ともに総頸動脈から末梢へ流れる解析を行った。

一樣流速では血圧を考慮して流出口に100mmHg負荷し、流入口から速度0.45m/sで血液を流した。

拍動流では周期変動の安定を確認するために解析対象時間を、4.0秒(拍動数4回)とした。出口は一樣流速と同様に血圧を考慮しているため100mmHg、入口は式(1)を用いて近似的に心拍数60回分の正弦波として表した。また式(1)は一樣流速条件と流量を同じにするため、平均流速を0.45m/sとしている。

$$v = 0.45 \times (1 - 0.5 \cos(2\pi t)) \quad (1)$$



(a)脳の血管(動脈) (b)作成したモデル

図1 脳血管モデル

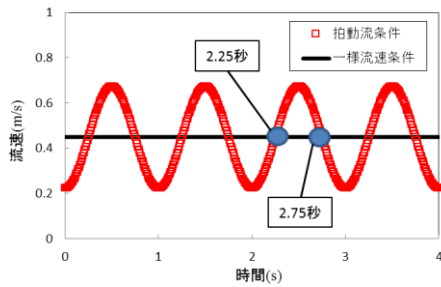


図2 一様流速・拍動流条件の流速

4. 結果

一様流速条件の壁せん断応力分布を図3に示した。拍動流条件は一様流速と比較するため流量が同一となる時刻2.25秒と2.75秒での壁せん断応力をそれぞれ図4と図5に示す。

壁せん断応力は交通動脈と大脳動脈の連絡部、内頸動脈の大きく湾曲しているところで高くなっていて、この部位は実際に脳動脈瘤が発生しやすい場所と一致している。

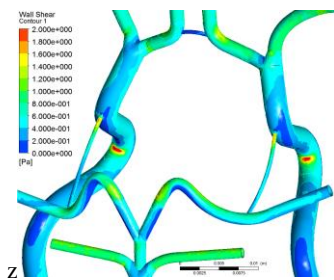


図3 一様流速条件での壁せん断応力

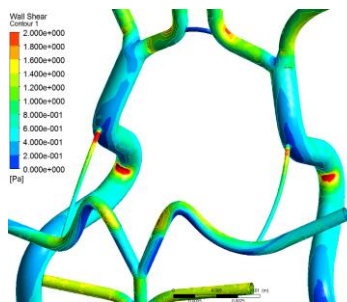


図4 拍動流条件での壁せん断応力(2.25秒)

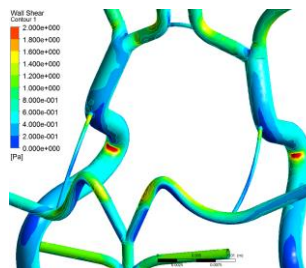
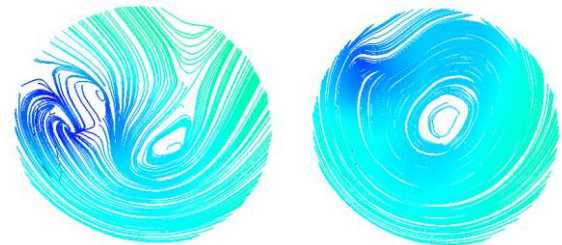


図5 拍動流条件での壁せん断応力(2.75秒)

5. 考察

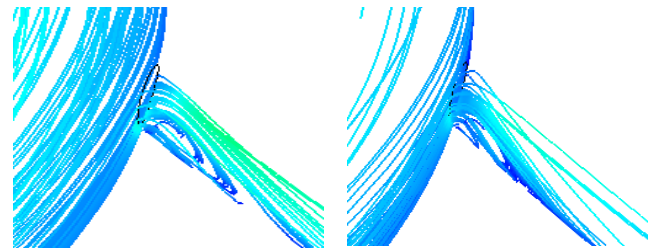
高い壁せん断応力を示した部位は、大きな湾曲部と交通動脈と大脳動脈の連絡部である。湾曲部では遠心力と圧力勾配が生じ、管壁近傍で低速のところでは圧力勾配が大きくなることで、2次流れが生じる[4]。実際の流れでは軸方向の流れと2次流れが合成することで、図6と図7に示したようにらせん状となる。そのため曲がりの外側の管壁(曲がりの凹側)でのせん断速度が直管の場合よりかなり大きく、せん断応力も大きくなるのが図3から図5に示した解析結果からもわかった。交通動脈は大脳動脈よりも細く、管の断面積が急に縮小するため管壁に沿って流ることができず、はく離による渦が生じ縮流になることが図8からも見られた。この部位では縮流による大きな摩擦抵抗が生じるため、交通動脈と大脳動脈の連絡部では高壁せん断応力が生じたと考えられる。

また拍動条件では一様流速条件と異なり、高壁せん断応力部位が血流位相により変動することがわかった。



(a)2.25秒(加速期) (b)2.75秒(減速期)

図7 拍動流条件での2次流れ



(a)2.25秒(加速期) (b)2.75秒(減速期)

図8 拍動条件での後交通動脈と中大脳動脈の連絡部の流線

参考文献

- [1]林紘三郎, 安達泰治, 宮崎浩, 「生体細胞・組織のリモデリングのバイオメカニクス, p84, p87, p91, p109
- [2]船崎健一, 山田和豊, 中村豪, 「動脈瘤を伴う脳動脈分岐部まわりの非ニュートン流体解析」
- [3]斎藤太郎, 高木健次, 「人体物理学」, p449, p460, p493
- [4]菅原基晃, 前田信治, 血液のレオロジーと血流, p80-84