

[研究区分：学際的・先端的研究 (A)]

研究テーマ： 数値流体力学(computational fluid dynamics)を応用した血流動態解析の基礎的検討	
研究代表者： 保健福祉学部 コミュニケーション障害学科 教授・大西英雄	連絡先： onisi@pu-hiroshima.ac.jp
共同研究者： 教授・瀧川厚	
【研究概要】 近年、脳血管障害の患者が急増している。この研究の目的は、オープンソースソフトウェアを駆使して頸動脈分岐部の血管壁面剪断応力(wall share stress: WSS)の評価を行い、WSS のデータに基づき数値流体力学(computational fluid dynamics: CFD)を用いて、脳動脈瘤の発生、成長のメカニズム及び破裂予測を解明するための血流動態解析の基礎的検討を行う。CFD 解析のシステム構築を行い、簡単な血管モデルのシミュレーション実験および単純な MRA 画像を用いて血流分布や流速などの検証を行い、精度あるシステムを構築した。	

【研究内容・成果】

緒言：現在、本邦において血管疾患による死亡率は死亡原因全体の 25.4%を占め、血管疾患の中でも特に動脈硬化性疾患は血管の壁面剪断応力(wall share stress: WSS)が関連していることが報告されている。WSS は数値流体力学(computational fluid dynamics: CFD)によって算出される物理パラメータであり、血流動態の血行力学的な解析は WSS の正確な評価が求められている。研究の目的は、オープンソースソフトウェアを用いた解析環境で、WSS がもたらす頸動脈分岐部血管壁への影響を評価することである。方法及び評価はオープンソースソフトウェアを利用して CFD 解析環境を構築し、既知の 3 次元モデルを解析してシステムの解析精度の検討及び評価を行った。また、臨床画像に応用するために、CFD 解析環境を用いて頸動脈分岐部 MRA 画像より解析モデルを作成し、解析を行った。

1. 方法：

既知のジオメトリを持つ模擬血管モデルを用いて、解析モデル作成して計算要素数の時間依存性と計算処理の精度について検討を行った。さらに模擬血管モデルの結果に基づいて頸動脈分岐部 MRA 画像によるモデル作成を行い、そのモデルは WSS, 流速, 流体の軌跡について可視化を試み、評価を行った。

1.1 CFD システム構築：

Windows 上に Linux の環境を作り、3D モデリングソフトである Blender, オープンソース CFD 解析である OpenFOAM を導入し、Linux 上の GUI で動作する Helyx OS を用いて解析を行った。また、解析結果は Paraview を用いて可視化を試みた。尚、DICOM 画像などは Mac-OS 上で動作する Osirix を用いて CFD 解析に必要な STL 形式ファイルを作成した。

1.2 評価方法：

(1). CFD 解析における基礎的な検討を行うために単純な形状を持つ 2 種類の模擬血管モデルを作成した。模擬血管モデル(A)は直径 5 mm、長さ 50 mm の円柱状と、(B)は血管狭窄部位を想定して同じ形状の中央部に直径 2.5 mm、長さ 15 mm の狭窄部を設定した。

(2). Osirix にバンドルされている頸部 MRA のサンプルデータを用いて、頸動脈部のみを抽出し、サーフェイスレンダリング処理などを行い頸部動脈分岐部血管モデル(頸動脈モデル)を作成した。この頸動脈モデルの体軸方向の長さは 50 mm、血管直径 50 mm、血管直径は、流入面(Common carotid artery: CCA), 流出面 1(internal carotid artery: ICA), 流出面 2(external carotid artery: ECA) でそれぞれ 8 mm, 6 mm, 5 mm に設定した。

尚、境界面条件は、流入面での血流は定常流とし、流速値($u=0.5$ m/s)を用いた。頸動脈モデルは流出面が複数あるが、本研究は流出面の境界条件設定を圧力 $p=0$ m²/s² とし、流体組成

は血液と仮定した。尚、血液は非圧縮性、ニュートン流体とし、流体の物性値は $\rho=1050 \text{ kg/m}^3$, $\eta=4.0 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、レイノルズ数は 600 に設定し、解析を行った。

2. 結果

図 1 に模擬血管モデル(A, B)の流速マップを示す。壁面近傍では流体が壁面から受ける摩擦力のため流速が低下した。また、計算要素数(メッシュ数)は、モデル中心部の流速の変化及び境界壁近傍の流速低下に影響した。モデル中心部の流速は、計算要素数が 10^5 を超えない場合は高値を示した。境界 5 層モデルは壁面近傍の血流低下が生じなかった。流速の理論値とシミュレーション計算結果は 1% 以内に収まっていた。

図 2 に頸動脈モデル解析を結果の圧力ベクトル表示、流線及び流速分布を示す。ベクトル表示では divider wall 部分で特に高い圧力が認められた。流線表示では、分岐部領域で渦流の形成が認められた。(流速分布は、outer ICA, outer ECA の領域で流速が低下した領域を認めた。

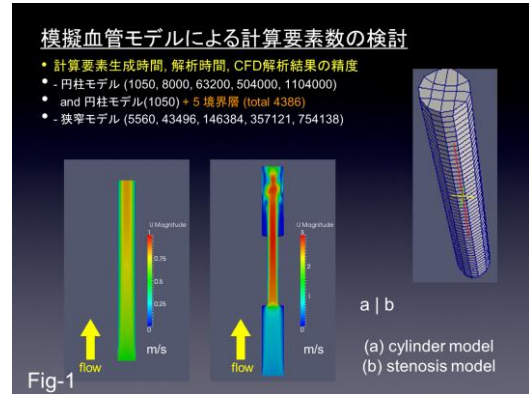


図 1 血管モデルによる流速評価

3. 考察

我々が作成したシステムは全てがオープンソースソフトウェアで構成されているため、コストパフォーマンスに優れたシステム開発が可能となった。しかし、市販のハードウェアでシステムを構築する限りは、計算処理時間を考慮すると計算要素数は可能な限り少ないことが望ましいと考える。しかし、作成する計算モデルは少なくとも 10^5 以上の計算要素数を有することが必要である。さらに境界層を設定することで、計算要素の増加を抑えながら壁面近傍の計算精度を向上させることが可能であると示唆された。頸動脈モデルの解析は、divider wall 領域で高い WSS が認められた(図 3)。

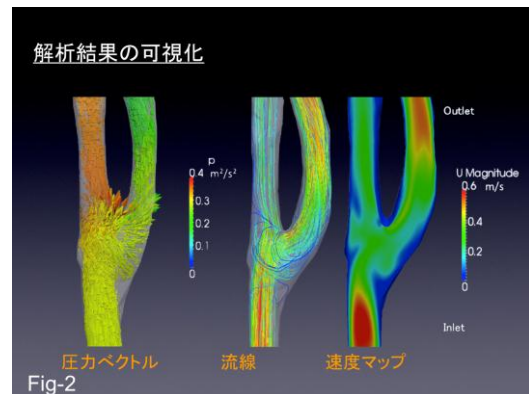


図 2 圧力ベクトル、流線、速度マップ

Papath & Sopoulou らによる報告でも、我々の結果と同様に、分岐部で高い WSS を検出している。また、図 3 において outer ICA, outer ECA に流速の低下している領域を認め、Marshall らによってこの領域の流速低下が報告されている。両者の報告は共に商用のソルバーを用いて解析を行っており、オープンソースソフトウェアを用いて同様の結果が得られたことは、我々の本研究におけるシミュレーション手法が正しいということを示唆する結果となっている。

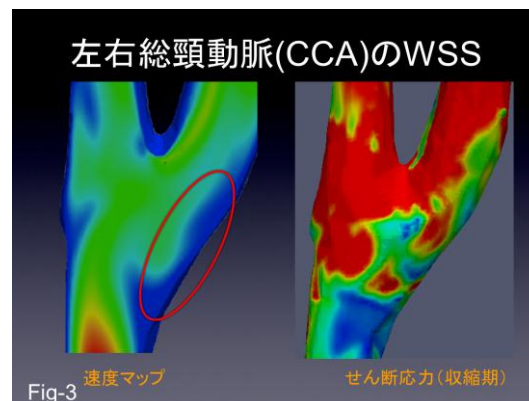


図 3 左右総頸動脈の壁面せん断応力分布

4. 結論

オープンソースソフトウェアを用いて CFD 解析環境を構築し、理論値と計算値との精度を確認した。頸動脈モデルの解析では、血流の挙動が頸動脈狭窄症の発症に寄与していることが示唆された。今後は拍動流や血管壁の物性値を考慮した構造連成解析を行い、またボランティアなどの臨床データを用いて精度の向上をはかりたいと考えている。

[研究区分：学際的・先端的研究 (A)]
