

[ 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：	
<b>【研究概要】</b> 人体モデルを模した血流流速システムを構築して PC-MRA 画像を用いて、実測値の流速及び壁面せん断応力 (WSS) と MRA 画像を用いた流速, WSS の精度の検証を行った。また、ボランティアにおける総頸動脈分岐部の心位相に対応した流量測定及び WSS 算出の評価を行った。模擬血管モデルの入力流速に対して測定誤差は 6%-15%の低値を示し、MRA 及び CFD の精度ある計測が可能であった。ボランティアの流速、WSS 算出は各時相で大きく変化した。(流速：0.21-1.07 m/s, WSS: 25.6-2.28 Pa)	

#### 【研究内容・成果】

**緒言：**動脈硬化性疾患は、血液が血管を流れることにより生じる血行力学的作用と関連があることが以前より知られている。血流によって生じる壁面剪断応力 (wall shear stress: WSS) が血管壁に与える影響についての報告は、1980 年代より多く散見されている。近年、血流などの数値流体力学解析 (computational fluid dynamics: CFD) はコンピュータハードウェアの進歩により、より正確なシミュレーションを行うことが可能になって来た。我々は、CFD 解析を用いることができる十分な根拠が、瘤破裂や動脈硬化性疾患発症の予測に必要なだと考える。そのため、人体における拍動による流速の変化に基づく血流動態の評価は非常に重要視されている。流速の変化を時間平均した解析は、収縮期の流速の急峻な変化を反映することができない。本研究の目的は、人体モデルを模した血流流速システムを構築して MRA(magnetic resonance angiography)画像を用いて、その精度を検証した。また、実測値の流速及び壁面せん断応力 (WSS) と MRA 画像を用いた流速, WSS の精度の検証を行い、ボランティアにおける総頸動脈分岐部の心位相に対応した流量測定及び WSS の算出シミュレーションの評価を行うことである。

#### 1. 方法：

人体モデルを模した血流流速システムを構築して PC-MRA 画像を用いて、実測値の流速及び壁面せん断応力 (WSS) と MRA 画像を用いた流速, WSS の精度の検証を行った。また、ボランティアにおける総頸動脈分岐部の心位相に対応した流量測定及び WSS 算出の評価を行った。

##### 1.1 血流流速システム構築及び測定精度：

PC-MRA( phase contrast- MRA)画像を用いて血流計測の精度及び CFD 解析の計算結果の精度の検証を行うために、簡単な模擬血管モデル (模擬血流：40%グリセリン：粘度人等価) を用いた血流計測 (KEYENCE 流速計) 閉鎖回路を構築し入力 (ポンプ出力：ヘーシンクモノポンプ) と PC-MRA からの算出される血流 (出力： m/s) の精度の比較検討を行った。今回のポンプは定常流を使用し、模擬血管モデル (正常例) チューブ径 2 mm を使用した。本実験は、2 mm を採用した。実験系の再現性を重視するために、画素値を変化させることにより、チューブ径による効果を間接的に評価した。また、ボランティア収集のための収集条件を算出するために、PC-MRA の最適な撮像条件も併せて評価を行った。

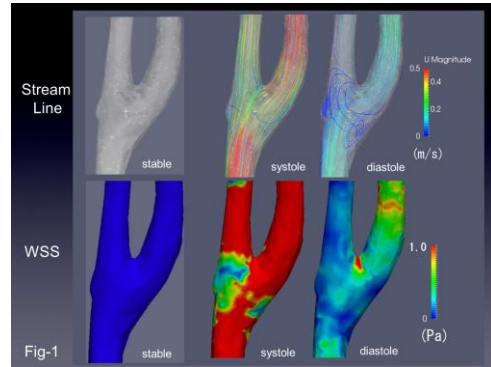
##### 1.2 心位相に対応した流量測定及び WSS 算出：

健康成人 14 名 (男子 6 名、女子 8 名：平均 30.2±2.5) を対象に PC-MRA を用いて収集を行った。計測は、GE 社製の MRI 装置に組み込まれている Advantage Workstation ver. 4.5 を

用いて総頸動脈の横断面画像から PC-MRI 用流速測定システムを用いて流速値を測定した。得られた流速値は、左右の平均値で算出した。血流速度は、横断面画像の総頸動脈を充分カバーする大きさの円形関心領域(region of interest: ROI)を設定し (ROI : 40pixel)、得られた dynamic データより ROI 内の最大値を経時的に測定した。なお、本研究は研究協力者の所属する小倉記念病院内に設置されている臨床研究審査委員会の承認を受けて実施した。

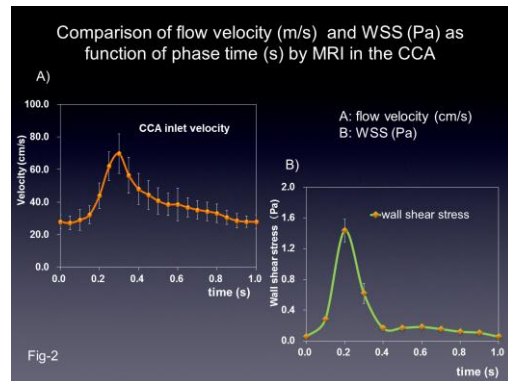
## 2. 結果

実際の流速測定は、MR データ収集時での画素サイズ(0.4-0.1 mm)が変化すると、28.2 ~ 20.7 cm/s を示し、入力値の 30 cm/s の値を 6%-15%程度、過小評価する結果となった。しかし、ほぼ、真値に近い値を示した。心位相に対応した頸動脈モデルの解析は、各位相 (収縮期、拡張中期および拡張末期で、流速および WSS は各位相および各部位で比較評価した。得られた頸動脈に血流速度が 0.21-1.07 m/s まで、収縮期において急激に変化した。分岐部領域は渦流と各位相の変化に伴う WSS の大きな変化が認められた。Dividing wall (25.63 → 2.38 Pa), CCA(2.79→0.52 Pa), Bifurcation (6.92→0.53 Pa) など、収縮期—拡張末期変化率は 12.03 を示した。分岐部領域で大きな変化が生じ、それらの領域は動脈硬化の好発部位と良く一致した。



## 3. 考察

血流流速システムの構築及びその精度測定に関しては、予備実験で 2 mm 以上の径 (3, 6, 9, 12, 15 mm φ) で計測を行うと流速測定誤差が 20-50%生じたため、本実験は、2 mm を採用した。この結果は、MR 装置の得所な環境下においてチューブの長さが 5-6 m ほどあり、駆動ポンプの性能に制限されたと考える。しかし、模擬血管モデルチューブ 2 mm 径では、測定精度は入力流速に対して測定誤差は 6%-15%の低値を示し、この血流流速システムは MRA 及び CFD の流速の精度ある計測が可能であることが示唆された。



心位相に対応した頸動脈流速波形は、Marshall らによって報告された流速波形とほぼ同一の形状となり、我々の PC-MRI の計測精度の妥当性が示された。頸動脈モデルの解析は、各位相 (収縮期、拡張中期および拡張末期で、流速および WSS は各位相および各部位で比較評価した。得られた頸動脈に血流速度が 0.21-1.07 m/s まで、収縮期において急激に変化し、分岐部領域は渦流と各位相の変化に伴う WSS の大きな変化が認められ、Groen らの結果と一致している。特に、この渦流現象は剥離流と呼ばれ、Bifurcation 領域周辺で認められた流速低下と渦流の原因と考えられる。また、Bifurcation 領域 ICA 側は低壁面剪断応力や、拍動に伴う壁面剪断応力の変化が大きい特異的な血流動態を示す領域であり、動脈硬化のリスクが高いということが示唆された。

## 4. 結論

我々は、血流流速システムの構築とその測定精度を検証し、CFD の計算値とほぼ同等な精度を示した。心位相の頸動脈分岐部モデルにおける壁面剪断応力を評価し、Bifurcation 領域 ICA 側は収縮期、拡張期共に低壁面せん断応力分布領域であり、頸動脈狭窄症の好発部位と一致した。