

[研究区分 : 学際的・先端的研究 (A)]

研究テーマ : 総頸動脈の幾何学的形状解析に基づく頸動脈狭窄の発生部位と頻度の推定	
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	
【研究概要】 臨床の患者データを用いて総頸動脈分岐部の角度 (ICA と ECA) を計測し、平均分岐角度から 3D-Printer を用いて形状を抽出し、模擬血流からの各部位における流速や渦流を可視化する。分岐角度が大きいほど (30 < 40 < 60 度) 壁面にかかる流量率は減少していた。また、それに連動して壁面の WSS 値も分岐角度の増大に従って優位な負の相関 (p < 0.05) が見られた。ECA における内側面の WSS (150 Pa) は外側面 (34 Pa) のそれに比較して高値を示し有意差が生じた。作成した形状ファントムもシミュレーション同程度の視覚化ができた。	

【研究内容・成果】

緒言 :

頸動脈分岐部は動脈硬化の最も代表的な好発部位であり、また内頸動脈 (Internal carotid artery: ICA) 下端に頸動脈洞 (Sinus) と呼ばれる拡張部を有する特徴的な幾何学的形状をもつことでも知られている。総頸動脈 (Common carotid artery: CCA) から ICA に向かう血流は Sinus 外壁部で剥離・循環・再付着を起し、複雑な壁面せん断応力 (Wall shear stress: WSS) 場を形成する。動脈硬化の発症・進展には WSS の大きさ・分布が強く関与することが示唆されており、特に頸動脈分岐部の幾何学的形状・WSS 分布と、動脈硬化の前駆症状である内膜肥厚 (Intima-media thickening: IMT) の分布状態との関連については過去に多くの議論がなされている。Fisher らは ICA と外頸動脈 (External carotid artery: ECA) の開き角度と ICA の狭窄率との相関について 300 以上の臨床データをもとに検討を加えている。近年の血管造影や MRI 技術の著しい発達により数値流体力学解析 (computational fluid dynamics: CFD) による CCA, ICA, ECA などの血流流量や WSS が精度よく計測されるようになってきており、これらの値と動脈硬化疾患の関連などについて報告例が出始めている。

本研究は、頸動脈分岐部の開き角度を MRA 臨床例から抽出し、3D-Printer にて模擬血管形状を作成して、実際の血管形状での角度変化による渦流の出現の有無の可視化を行い、同時に血流および WSS を CFD にて CCA, ICA, ECA などの血流評価を行う。

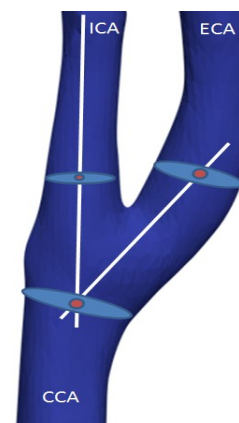
1. 方法 :

1.1 頸動脈分岐部の可視化

研究協力施設での臨床 MRA データ (50 名程度) から ICA と ECA との開き角度 (Arc<ICA-ECA>) を算出する。算出方法は ICA, ECA 及び CCA の各部位の円形断面積の重心部を通る直線が交わる角度と定義して算出した (Fig-1)。平均 Arc<ICA-ECA> を求め、その角度から平均角度 (0), ±5, ±10 度の 5 種類の頸動脈形状シミュレーションデータを作成し、それを 3D-Printer で形状作成する。その作成された分岐部ファントムの中に模擬血流を流し、高速度カメラ (1Frame=1/1000 sec) を用いて可視化を行い、高速度画像から実際の流速測定を行う。

1.2 頸動脈分岐部のシミュレーション化

上記の臨床 MRA データから角度変化モデルを作成し、シミュレーションの入力条件はボランティアの PC-MRI データ条件から算出 Fig-1. ICA&ECA Mode



入力条件を用いて角度の違いによる臨床に近い状態で CFD 解析を行った。

2. 結果 :

患者の MRA データから、頸動脈分岐部の ICA と ECA との分岐角度を計測した。頸動脈分岐部の平均角度は 41.6 ± 5.2 度を示し、男女別では男性 : 38.9 ± 11.7 度、女性 : 42.1 ± 7.7 度となり、女性の方が分岐角度は大きい(Welch's test, $p < 0.05$)ことが示唆された。その平均角度(0), ± 5 , ± 10 度の 5 種類の頸動脈形状シミュレーションデータを作成し、それを 3D-Printer で形状作成した。実測値と計算値の流速の誤差は、5~10%を示した。

総頸動脈の血流量は心臓の拍動により大きく変化するが、今回用いた血流速度は 50 ms を用いて、各分岐角度の変化のシミュレーションの CFD 解析を行った。分岐角度が大きいほど WSS の変化は、心臓の収縮期で有意差($p < 0.05$)が生じ、流速が早い部位においてより分岐角度の影響を与えることが判明した。高い WSS 値(150 Pa)は内側面分岐領域(分岐部, 内側 ICA, 内側 ECA)で狭い分岐角度モデルで生じ、従って、低い WSS 値 (< 50 Pa) は, CCA と分岐部(外側面 ICA, 外側面 ECA)で生じた。また、角度の変化による高 WSS と低 WSS との変化率は 6.5 倍を示した。シミュレーションモデルとボランティアモデルの結果の整合性が証明された。

3. 考察 :

拍動流解析は、体内の血流動態を再現するには不必要不可欠な解析法であり、拍動流は心位相に大きく関与する。本研究は、拍動流を用いて頸動脈分岐部の ICA と ECA との分岐角度の変化による WSS の変化を評価した。高い WSS 値(150 Pa)は内側面分岐領域(分岐部, 内側 ICA, 内側 ECA)で狭い分岐角度モデルで生じ、従って、低い WSS 値 (< 50 Pa) は, CCA と分岐部(外側面 ICA, 外側面 ECA)で生じた (Fig-2)。そのため、流れの血流エネルギー損失が流れの方向に対して垂直な方向に二次的流量を発生させ、分岐角度が増加すると渦流の分布も大きく広がるように考える。

特に、Fig-3 に示すように、分岐部の起始部において、大きな渦流を検出することが明確になった。過去の研究報告では、長期間にわたる低い WSS の部位は動脈硬化の原因となることが報告されており、我々の研究も同様な結果を示した。また、本研究は分岐角度に基づく低い WSS 領域を同定することが可能であり、それに基づく頸動脈狭窄の発生部位の推定と推測が可能となる結果を得た。また、大きな分岐角度は、WSS などの結果から、アテローム性硬化症の発生リスクも予測可能なパラメータとして有用であることが示唆された。

4. 結論 :

頸動脈分岐角度が WSS 値に非常に関連し、血行力学的ストレスが頸動脈の形状により推定することが可能である基礎データが示された。また、頸動脈分岐角度による頸動脈狭窄の発生頻度の予測などに有用であることが明白となった。

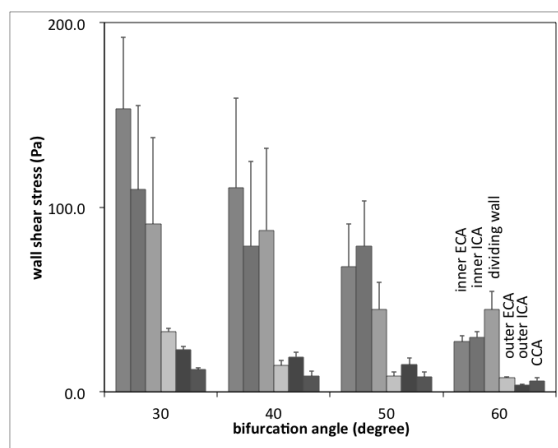


Fig-2 Systolic phase of WSS

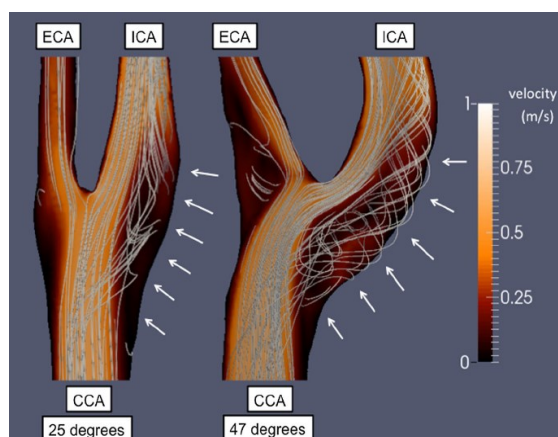


Fig-3 Visualization of streamlines