

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 11 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24591760

研究課題名(和文)MRI-CFD融合解析を用いた脳動脈瘤発生機序、成長予測に関する研究

研究課題名(英文)MRI-CFD combined analysis of brain aneurysm for initiation and growth factor of aneurysm

研究代表者

渡邊 嘉之(WATANABE, Yoshiyuki)

大阪大学・医学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：20362733

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：4D-PC-MRAの血流データを用いてCFD解析の入口、出口条件が合致するように条件設定し、CFD計算を行う方法を確立した。

5例での検討結果では、出口境界条件を合わせた結果は、合わせない場合に比べ、分岐後の遠位血管において計測データとの速度場の差異が小さくなる傾向が得られたが、両者の条件下で血流差に有意差を認めなかった。部位別では動脈瘤内の差異は周囲血管と比べ大きな血流差を認めた。MRI-CFD融合解析ではCFD計算精度を上げることが確認できたが、今回の方法では4D-PCデータの一部しか使用しておらず、より精度を上げるには4D-dataすべてを用いる計算方法の確立が今後の課題と考えられた。

研究成果の概要(英文)：We developed the new CFD analysis method using the 4D-PC-MRA flow data. Our CFD results were compared to the flow data by 4D-PC-MRA. Five unruptured cerebral aneurysms were included in this study. 3D-computational meshes were created from 3D-DSA images and CFD simulations were performed for two conditions: I= patient-specific inflow measured by 3D-PC MRA, II= patient-specific inflow and outflow measured by 3D-PC MRA. Difference in flow vector between CFD and PC-MRA was calculated at parent artery, aneurysm and distal arteries. The flow features such as vector map were similar between CFD and 4D-PC-MRA. There are no significant difference between condition I and II, but aneurysm showed statistically large flow difference compared to parent artery and distal arteries. Further study is needed to combine whole flow data of 4D-PC-MRA for CFD simulations.

研究分野：放射線医学

キーワード：脳動脈瘤 磁気共鳴画像 流体解析 CFD

1. 研究開始当初の背景

脳動脈瘤の発生については遺伝的な血管脆弱性と血行力学因子の関与が考えられている。血管壁の適切な剪断応力は血管内皮機能を保つのに必要とされ、高すぎる剪断応力は動脈壁の内弾性板の断裂や中膜の非薄化を来し、逆に低い剪断応力は動脈硬化を起しやすいとされている。脳動脈瘤症例を対象として、今までにも多くの血流解析研究が行われているが、確立した結論は得られていない。その理由としていろいろな部位に発生する動脈瘤がその母血管の形状にかかわらず同じように解析され議論されていること、また生体において詳細な血流情報を得ることが困難であり、Computational fluid dynamics (CFD)においては一般的な入力値を用いられていることで、計算値に大きなばらつきがあることなどが考えられる。

心電図同期位相コントラスト MRA (4D-PC-MRA)は心電図同期下に 3D-位相コントラスト法を撮影する技術であり、心位相を 15-20 分割した各時相でのボクセル内の血流速度を計測可能である。また、既存の 4D-PC-MRA 報告の多くは 1.5T-MR を用いたものであるが、2 倍の信号ノイズ比を持つ 3T-MRI を用いることでより高分解能での撮影が可能となり、詳細な動脈内での血流計測が可能である。しかし、PC-MRA は空間解像度が低く、血管壁の位置情報を正確に得ることは困難であり、剪断応力の正確な計算は困難である。CFD 解析では形状から詳細な剪断応力を計算可能であるが、境界条件は一般値を用いることが多い。より詳細な血流動態解析では、患者個人の血流値を反映した CFD 解析の構築が望まれている。

2. 研究の目的

本研究では流入境界条件として 4D-PC MRA から得られた血流速度を与え、また、計測結果から目標関数を構築し、現代制御理論の一分野である追従制御技術を用いて CFD 解析

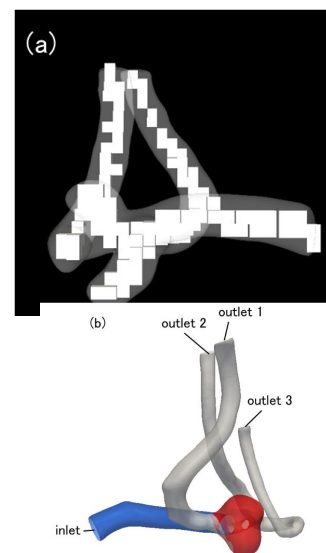
に用いる境界条件を設定し、個々の計測結果に最適化した境界条件を作成する。計測結果と合致した流れ場を CFD 解析により作成し、計測結果では得られなかった血管壁面の位置情報を用いて血管壁面の力学場の評価を行い、高分解能でより患者個人の血流情報に基づいた CFD 解析法を確立し、脳動脈瘤の発生や成長にかける血行力学動態を明らかにすることが本研究の目的である。

3. 研究の方法

大阪大学病院にて脳動脈瘤精査目的で血管造影を行う患者を対象とした。倫理委員会の承認後に全患者において文書による同意を得て行った。対象者は 3T-MRI にて 3D-TOF MRA、4D-PC-MRA、血管造影にて 3D-DSA を施行した。3D-DSA と 4D-PC-MRA 画像の位置あわせを行い、入口条件として母血管の流速値を用いた。出口条件としては圧力 0 に設定したもの(条件 1)と、出口条件も PC-MRA で計測された流速値の配分に一致するように圧力配分を設定したもの(条件 2)で計算を行った。MRA と CFD では空間解像度が異なるため、3D-DSA から作成した 3D 血管像ですべてのボクセルが血管内に位置するボクセルのみを選択した(右図)。

3D 画像から各血管を動脈瘤、母血管、遠位血管の 3 部位に分け、各部位での評価を行った(右図)。

得られた CFD 結果と 4D-PC-MRA との流速ベクトルの差異を以下の指標を用いて検討した。



$$E_u = 100 \frac{\sum_{i=1}^N |v^{vm} - v^c|}{\sum_{i=1}^N |v^{vm}|}$$

Eu: difference of flow vector, N=number of voxel,
vm=flow by PC-MRA, vc=flow by CFD

4. 研究成果

症例 2 の拡張期における PC-MR 画像，出口圧力ゼロ条件および出口圧力を同定した CFD 解析から得られた速度場をそれぞれ図 A(a), (b), (c)に示す．出口圧力ゼロ条件および出口圧力を同定した CFD 解析の PC-MR 画像との速度場の差異をそれぞれ図 B(a), (b)に示す．どちらの結果も入口血管において，速度ベクトルの差異は小さく，瘤内において差異が大きい．出口圧力を同定した結果は，出口圧力ゼロ条件の結果と比較して，分岐後の血管における速度ベクトルの差異は小さくなった．

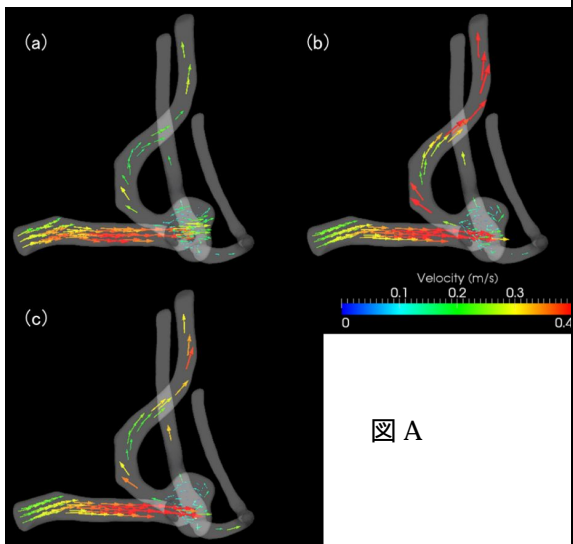


図 A

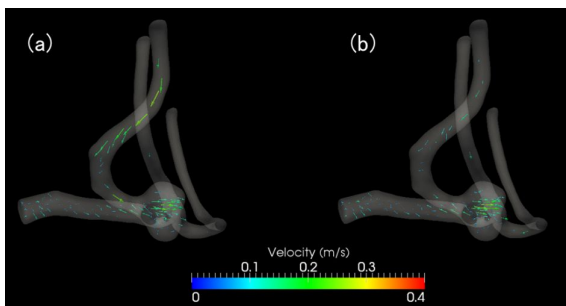


図 B

Eu	拡張期	
	条件 I	条件 II
Parent	25.6±5.5	25.6±5.6
Aneurysm	72.3±19.7	65.8±11.2
Distal	41.7±17.7	35.7±10.1

Eu	収縮期	
	条件 I	条件 II
Parent	31.2±9.5	31.1±9.6
Aneurysm	101.5±40.5	95.2±28.2
Distal	52.7±16.6	50.2±18.6

拡張期、収縮期における条件 I,II での速度ベクトルの差を上記表に示す。条件 I,II 間で値に有意差を認めなかった。動脈瘤内は母血管、遠位血管に比べ有意に大きな速度差を示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

1. [Watanabe Y](#), Tsukabe A, Kunitomi Y, et al. Dual-energy CT for detection of contrast enhancement or leakage within high-density haematomas in patients with intracranial haemorrhage. *Neuroradiology*. 2014 Apr;56(4):291-5. 査読有
2. [Watanabe Y](#), Tanaka H, Tsukabe A, et al. Neuromelanin magnetic resonance imaging reveals increased dopaminergic neuron activity in the substantia nigra of patients with schizophrenia. *PLOS ONE* 2014 Aug 11;9(8):e104619. 査読有
3. Nakamura-M, Bessho-S, [Wada-S](#). Analysis of Red Blood Cell Deformation under Fast Shear Flow for Better Estimation of Hemolysis. *Int. J. Numer. Meth. Biomed. Engng*. 2014, 30, 2014, 42–54. 査読有
4. Otani T, Nakamura M, [Fujinaka T](#), [Wada S](#) et al. Computational fluid dynamics of blood flow in coil-embolized aneurysms: effect of packing density on flow stagnation in an idealized geometry. *Med Biol Eng Comput*. 2013 Aug;51(8):901-10. 査読有
5. Kuroda J, [Watanabe Y](#), [Fujinaka T](#), et al. Cardiac Cycle-Related Volume Change in Unruptured Cerebral Aneurysms: A Detailed Volume Quantification Study Using 4-Dimensional CT Angiography. *Stroke*. 2012 Jan;43(1):61-6 査読有

〔学会発表〕(計 5 件)

1. [Watanabe Y](#), [Fujinaka T](#), [Wada S](#). et al. Comparison of flow characteristics of

intracranial aneurysm between
4D-phase-contrast MR measurement and
computational fluid dynamics simulations
Annual meeting of Korean Society of
Neuroradiology and Head & Neck Radiology
April 2014, Incheon, Korea

2. 渡邊嘉之、藤中俊之、和田成生,他
MRI-CFD 融合解析を用いた脳血管血流動
態解析の試み 第40回日本磁気共鳴医学
会 2012年9月 京都
3. 渡邊嘉之、藤中俊之、和田成生,他
MRI-CFD融合解析を用いた脳動脈瘤血流動
態解析：計測値による入力、出口条件設定
の有用性について 第42回日本神経放射
線学会 2013年2月 北九州
4. 渡邊嘉之、藤中俊之、和田成生,他 頭蓋
内脳動脈瘤における 4D-PC-MRA と CFD
解析による速度データの比較 第41回日
本磁気共鳴医学会大会 2013年9月徳島
5. 渡邊嘉之、國富裕樹、藤中俊之,他 4
D-FLOW MRI を用いた脳動脈瘤内におけ
る血流動態の可視化 第42回日本磁気共
鳴医学会 2014年9月 京都

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡邊嘉之 (WATANABE, Yoshiyuki)
大阪大学・大学院医学研究科・准教授
研究者番号：20362733

(2) 研究分担者

藤中俊之 (FUJINAKA, Toshiyuki)
大阪大学・大学院医学研究科・助教
研究者番号：00359845
和田成生 (WADA, Shigeo)
研究者番号：70240546

(3) 連携研究者

()

研究者番号：