

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：24506

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23791438

研究課題名(和文) 脳動脈瘤血管内治療の術前力学シミュレーション技術の開発と実症例モデルへの応用

研究課題名(英文) Development of computational techniques for the preoperative evaluation of endovascular treatment of cerebral aneurysms and its application to realistic geometries

研究代表者

下権谷 祐児 (Shimogonya, Yuji)

兵庫県立大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：30552575

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：Flow diverterと呼ばれるタイプのステントを用いた脳動脈瘤治療を対象として、親血管に対する瘤の発生位置およびステント留置時の回転がステントの血流障害効果に及ぼす影響を調べた。その結果前者については、血管の走行に対して垂直な位置に瘤が形成されている場合に、断面二次流れの影響により、他の瘤位置の場合よりも流入流量が著しく多くなることが示された。また後者については、ステントの回転による開口率の変化はごく僅かであったにもかかわらず、局所的な流れの変化を介して血流障害効果に顕著な変化が生じるケースが認められた。

研究成果の概要(英文)：The influences of the cerebral aneurysm location relative to its parent artery and the stent rotation angle in endovascular treatments with a flow diverter-type stent on inflow into aneurysm were examined using 3D geometric modeling and computational fluid dynamics techniques. In the former examination, the inflow into aneurysm was elevated for the cerebral aneurysm located laterally to the parent artery path due to a secondary flow effect. In the later examination, a striking change in the inflow into aneurysm via local alterations of flow field was observed in a certain combination of the cerebral aneurysm location and the stent rotation angle, regardless of small changes in the aperture ratio with varying angles of stent rotation.

研究分野：生体流体力学

科研費の分科・細目：内科系臨床医学・放射線科学

キーワード：脳動脈瘤 血管内治療 ステント 血流 血行力学 計算流体力学

### 1. 研究開始当初の背景

脳動脈瘤に対する血管内治療は、開頭手術と比較して侵襲性の低い治療法であり、近年広く用いられるようになってきている。血管内治療においては、「デバイス-血管壁-血流が相互作用する力学過程」が治療の成否（瘤への血液流入をいかに阻害できるか）に決定的な影響を及ぼすため、それを術前に評価あるいは予測できるようになることは重要な意義を持つ。

### 2. 研究の目的

瘤を伴う脳動脈形状および血管内治療デバイスの3Dモデル化、および、それに対する計算流体力学的手法の適用により、脳動脈瘤血管内治療の血行力学的評価技術の基礎を築くことを目的とした。なお当初の計画では、対象とする血管内治療デバイスとしてカバードステント（ステントの周りを薄い膜材で被覆した医療デバイス）を想定していたが、脳動脈瘤治療用としては、近年欧米での報告件数が増加している flow diverter と呼ばれるタイプのステントがより現実的であると判断し、この flow diverter ステントを対象とすることとした。

### 3. 研究の方法

(1) U字血管の湾曲部において、45°刻みで5通りの角度に瘤が形成された場合の3Dモデルを作成した。続いて、欧米で市販されている flow diverter ステントを再現した3Dモデルを作成し、上記の血管モデルに合成（実際の留置状態を模擬）したうえで、後述する血流解析に用いる計算格子を作成した。また比較のために、コイル塞栓術の補助用として従来から用いられている比較的網目の粗いステントについても3Dモデルを作成し、同様の方法で計算格子を作成した。特に、ストラット（ステントを構成するワイヤ状の骨格要素）の巻き数の影響を調べることを目的として、従来型ステントについては巻き数が12と18の2種類のモデルを作成した。

(2) 上述した血管とステントの合成モデルに対して、流体解析ソフトウェア OpenFOAM を用いた血流解析を行った。血液は密度  $1.05 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、粘性係数  $3.5 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$  の非圧縮ニュートン流体として扱い、血管壁は剛体と仮定した。また流入口における速度境界条件として、 $0.333 \text{ m/s}$ （流入口直径に基づくレイノルズ数が  $Re=300$  となるように設定）の断面一様分布を与え、定常流の解析を行った。

(3) U字血管の湾曲部に対する瘤の位置を変化させた場合の血流解析を行った。共通の評価面を瘤の頸部に定義し、その面を横切って瘤内へ流入する血液の流量を算出し比較す

ることで、瘤の位置がステントの血流阻害効果に及ぼす影響を調べた。

(4) flow diverter ステントのモデルを用いて、ステント留置時の回転によって血流阻害効果にどのような影響が生じるかを調べた。具体的には、flow diverter ステントモデルを血管モデルに合成する際の中心軸周りの回転角を5°刻みで3通りに変化させた。(3)と同様に瘤への流入流量を評価することで、ステントの回転が血流阻害効果に及ぼす影響を調べた。

(5) 以上により、ステントによる脳動脈瘤血管内治療の血行力学的評価の基礎技術を構築するとともに、その応用に関する研究を進めた。

### 4. 研究成果

(1) 血管湾曲部に対する瘤の位置がステントの血流阻害効果に及ぼす影響について調べた結果、血管の走行に対して垂直な位置に瘤が形成されている場合に、断面二次流れの影響により、他の瘤位置の場合よりも流入流量が著しく多くなることが示された。

(2) 従来型ステントと flow diverter ステントの血流阻害効果を比較した結果、いずれの瘤の位置においても flow diverter ステントがより優れた血流阻害効果を示したが、その変化の割合（流入流量の減少割合）には瘤の位置によって差異が生じていた。

(3) ステントの違いによる血流阻害効果の変化の傾向に関して、瘤への血液流入部断面における「開口率」の観点から考察した。ここで開口率とは、流入部断面において流体が通過できる面積割合として定義され、ステント無しの場合を基準の開口率 100%としている。従来型ステント（巻き数 12, 18）および今回用いた flow diverter ステントについて算出された開口率は、それぞれ 62%, 56%, 69%であった。すなわち、巻き数 18 の従来型ステントが最も開口率が小さく（空いている領域が狭い）、flow diverter ステントが最も開口率が大きくなっていった（空いている領域が広い）。これは、flow diverter ステントは従来型と比較して巻き数が多いものの、各ストラットが非常に細いことから、全体としての開口率は、今回用いたモデルでは従来型を上回っていたためである。それにもかかわらず、どの瘤の位置においても、血流阻害効果としては flow diverter ステントが最も優れていた。このことから、たとえ開口率が相対的に大きい、すなわち血流を遮ることのできる面積が小さい場合でも、flow diverter ステントのように網目の個々の開口部を小さくすることができれば、全体として血流阻害効果の実質的な向上に繋がることが示唆された。

(4) flow diverter ステントを対象として、ステントを血管に留置する際の回転角が血流阻害効果に及ぼす影響を調べた。その結果、ステントの回転による開口率の変化はごく僅かであったにもかかわらず、局所的な流れの変化を介して、血流阻害効果に顕著な変化が生じるケースが認められた。

(5) 以上の結果より、ステント留置術が将来的により効果的な治療法として発展していくためには、脳動脈瘤の位置によらず一定以上の効果を示し、かつ留置時の回転 - 実際の手技においてこれを制御しようとする事は現実的でない - に対してもロバストに血流の阻害を行えるようなステントを、開口部のデザインと加工上の制約とのバランスを取りつつ開発していくことが重要だと考えられる。またそのような場面において、本研究で行ったような血流解析の手法は有効なアプローチとなるだろう。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

##### [雑誌論文](計1件)

Y. Shimogonya, H. Kumamaru, K. Itoh, Sensitivity of the gradient oscillatory number to flow input waveform shapes, *Journal of Biomechanics*, 査読有, 45, 2012, 985-989.  
doi: 10.1016/j.jbiomech.2012.01.008

##### [学会発表](計14件)

大谷謙吾, 下権谷祐児, 熊丸博滋, 伊藤和宏, ステントを用いた脳動脈瘤治療における血流阻害効果の数値解析, 日本機会学会関西支部第89期定時総会講演会, 2014年3月19日, 大阪府立大学(大阪府)。

西野修平, 下権谷祐児, 熊丸博滋, 伊藤和宏, 磁性微粒子の脳血管内磁気輸送に関する数値解析, 日本機会学会関西支部第89期定時総会講演会, 2014年3月19日, 大阪府立大学(大阪府)。

S. Fukuda, Y. Shimogonya, T. Tsukahawa, Y. Imoto, M. Fukuda, Computational fluid dynamics analysis in roles of hemodynamic factors on the development of cerebral aneurysms, *International Stroke Conference 2014*, Feb. 2014, San Diego (USA).

S. Fukuda, Y. Shimogonya, T. Tsukahawa, Y. Imoto, S. Morikawa, M. Fukuda, The influence of inlet boundary conditions upon hemodynamic analysis of human cerebral aneurysms with computational fluid

dynamics, *Experimental Biology 2013*, April 2013, Boston (USA).

福田俊一, 下権谷祐児, 塚原徹也, 青木友和, 川端康弘, 松井雄哉, 井本恭秀, 福田美雪, 脳動脈瘤CFD解析における流入条件の設定について~既成値と実測値での相違~, 第38回日本脳卒中学会総会, 2013年3月21日, グランドプリンスホテル新高輪(東京都)。

井本恭秀, 下権谷祐児, 福田俊一, 熊丸博滋, 伊藤和宏, 脳動脈瘤実症例データに基づく個別モデルの構築と瘤発生要因の検討への応用, 日本機会学会関西支部平成24年度学生員卒業研究発表講演会, 2013年3月15日, 大阪工業大学(大阪府)。

下権谷祐児, 福田俊一, 井本恭秀, 里啓太郎, 熊丸博滋, 伊藤和宏, 脳動脈瘤形成部位における血行力学的負荷の評価: 流入条件の影響, 第25回バイオエンジニアリング講演会, 2013年1月10日, 産業技術総合研究所つくばセンター(茨城県)。

里啓太郎, 下権谷祐児, 熊丸博滋, 伊藤和宏, 流入条件の違いが脳動脈瘤形成部位における血行力学的負荷に及ぼす影響, 可視化情報全国講演会(姫路2012), 2012年10月4日, 姫路商工会議所(兵庫県)。

Y. Shimogonya, H. Kumamaru, K. Itoh, Hemodynamics in cerebral arteries before aneurysm formation: influence of flow input waveform, 8th European Solid Mechanics Conference, 9th Sep. 2012, Graz (Austria).

下権谷祐児, 西野修平, 熊丸博滋, 伊藤和宏, 拍動流中に投与された微粒子の磁気送達に関する基礎的研究, 第17回計算工学講演会, 2012年5月30日, 京都教育文化センター(京都府)。

大谷謙吾, 下権谷祐児, 熊丸博滋, 伊藤和宏, 脳動脈瘤ステント留置術における血流阻害効果の数値解析, 日本機会学会関西支部平成23年度学生員卒業研究発表講演会, 2012年3月15日, 関西大学(大阪府)。

西野修平, 下権谷祐児, 熊丸博滋, 伊藤和宏, 血流中に投与された微粒子の血管内輸送挙動に関する数値的研究, 日本機会学会関西支部平成23年度学生員卒業研究発表講演会, 2012年3月15日, 関西大学(大阪府)。

Y. Shimogonya, H. Kumamaru, K. Itoh, Image-based computational modeling of blood flow dynamics in cerebral arteries, Kickoff Symposium on Himeji Initiative in Computational Medical and Health Technology, 1st Nov. 2011, University of Hyogo (Hyogo, Japan).

下権谷祐児, 田代一馬, 伊藤和宏, 熊丸博滋, 計算流体力学による脳動脈の拍動流解析と瘤形成部位における血行力学的負荷の評価, 第 34 回日本バイオレオロジー学会年会, 2011 年 6 月 3 日, 関西大学 (大阪府).

〔図書〕(計 1 件)

(Chapter in Book) Y. Shimogonya, T. Ishikawa, T. Yamaguchi, H. Kumamaru, K. Itoh, Computational Study of the Hemodynamics of Cerebral Aneurysm Initiation, Chapter 28 in the book of Technological Advancements in Biomedicine for Healthcare Applications (Editor: J. Wu), 267-277, IGI Global, 2012.

〔その他〕

高校 1 年生大学体験 (出張講義): 「体の中にある “流れ” をのぞいてみよう」, 2012 年 1 月 17 日, 兵庫県立北摂三田高等学校 (兵庫県).

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

下権谷 祐児 (SHIMOGONYA, Yuji)  
兵庫県立大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 3 0 5 5 2 5 7 5