

機関番号：24506

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009～2010

課題番号：21890228

研究課題名（和文） 脳動脈瘤ステントグラフト術の術前評価のための  
複合的力学シミュレーション手法の開発研究課題名（英文） Development of the multi-mechanics simulation techniques for the  
endovascular treatment of cerebral aneurysms with stent grafts

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：30552575

研究成果の概要（和文）：計算流体力学に基づく血流シミュレーションにより，瘤を伴う脳動脈内にステントを留置した場合の血流障害特性について，ステントの巻き数と留置時の回転角の観点から評価した．ステントの巻き数を増やすことによって流入流量は単調に減少する傾向となったが，流入最大速度については，逆に増加する場合もあり得ることがわかった．また留置時の回転角も，瘤への血液流入に対して無視できない影響を及ぼすことが示唆された．

研究成果の概要（英文）：The influences of the number of strata and the rotation angle in the endovascular treatment with stents on inflow into cerebral aneurysms were examined using computational fluid dynamics approach. Inflow rate into the aneurysm decreased monotonically as the number of strata of the stent increased, while maximum inflow velocity into the aneurysm was fluctuated depending on the strata number. The results also showed that the rotation angle of stent placement in the artery could cause non-negligible effects on the inflow into the aneurysm.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,050,000	315,000	1,365,000
2010年度	950,000	285,000	1,235,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,000,000	600,000	2,600,000

研究分野：生体流体力学

科研費の分科・細目：外科系臨床医学・脳神経外科学

キーワード：脳動脈瘤，血管内治療，ステントグラフト，術前評価，血流，血行力学，  
計算流体力学

## 1. 研究開始当初の背景

現在，脳動脈瘤に対する血管内治療の主流はコイル塞栓術であるが，近年では，ステントグラフト（SG）を用いた脳動脈瘤治療が検

討され始めている．特に，コイル塞栓の困難な，頸部の広い（コイルが逸脱しやすい）瘤や巨大瘤に対する有用な治療法として期待されている．以下のような理由から，脳動脈

瘤の SG 留置術において、術前の力学的評価は極めて重要である。

第一に、脳動脈瘤は血管分岐部に好発することから、開窓型 SG が有用となる可能性が高い。一方で、開窓部を設けることは、SG と血管壁の密着度合いや瘤と血管の位置関係によっては、開窓部からのエンドリーク（血流漏れ）の原因ともなり得る。

第二に、脳動脈は屈曲・蛇行が強い傾向にある。そのため SG と血管壁との不完全な密着に起因するエンドリークや、SG の無理な変形に起因する耐久性低下を引き起こしやすい。加えて、脳動脈形態は個人差が大きいため、経験に基づく適応判断が困難なケースも少なくない。

以上のように、脳動脈瘤の SG 留置術において術前の力学的評価は治療の成否に決定的な影響を与えるため、SG の実際の留置状況を精度よく再現したうえで、SG—血管壁—血流の力学的相互作用を定量的に評価することが求められる。

しかしながら、そうした評価は容易ではない。画像診断による術前評価は、血管の形態や性状の把握に威力を発揮するが、SG 留置時の力学的評価に用いるには限界がある。一方、医用画像データをもとに病変部の樹脂モデルを作成して SG の留置実験を行う方法もあるが、モデル作成に要する時間・コストが少なくなく、臨床例に広く用いることは困難である。

計算力学の手法を用いたアプローチはこれらの問題を解決できる可能性があり、一つの有効な方法論となる。

## 2. 研究の目的

本研究では、脳動脈瘤のステントグラフト (SG) 留置術における、SG—血管壁—血流の力学的相互作用を再現できる計算手法を構築する。これにより、

- (1) SG と血管壁の密着性
- (2) SG のひずみ分布
- (3) 瘤内へのエンドリーク（血流漏れ）
- (4) 開窓型 SG 使用時の分岐血管血流量の定量的評価を実現し、SG 留置術の術前力学シミュレーション技術の基礎を築くことを目的とする。

## 3. 研究の方法

まずは（グラフトなしの）ステントを血管内に留置した場合の血流阻害特性を調べる

ことから着手した。ステントの血流阻害特性を把握しておくことは、ステントグラフトとの特性比較において有用であり、よりよいデバイスを開発していくうえでの重要な知見を与えるものと考えられる。

具体的には、ステントの巻き数と留置時の回転角に注目し、これらが瘤内への血液流入に及ぼす影響について、3D-CAD による形状モデリングと血流シミュレーションの手法を用いて調べた。以下に解析手法を示す。

(1) 瘤を伴う脳血管の理想形状を対象とした。血管モデルの作成には、3D-CAD ソフトウェア SolidWorks (Dessault Systems SolidWorks Corporation) を用いた。血管湾曲部の外側が脳動脈瘤好発部位の一つであることから、そのような状況を模擬した形状とした。親血管の断面直径は 3 mm、瘤形状は球形とした。

(2) ステント形状についても同様に、SolidWorks を用いてモデルを作成した。ステントは、螺旋曲線を描く細い柱状体（ストラット）の集合としてモデル化されており、各ストラットの直径は 0.2 mm とした。またストラットの螺旋円の直径は血管直径と同一の 3 mm であり、螺旋角度は 43 度とした。ストラットの本数を 12 本としたものを基準ステント（以下、Base stent）とした。

(3) ステントの巻き数および留置時の回転角（血管中心軸周りの角度）が瘤への血液流入に及ぼす影響を調べるために、巻き数および回転角を Base stent に対してそれぞれ 2 通りに変化させたステントモデルを作成した。巻き数に関しては 18 本 (Stent A1) と 24 本 (Stent A2) の 2 種類とし、また回転角に関しては 15° (Stent B1) と 30° (Stent B2) の 2 種類とした。それらのステントに、親血管の曲率半径に一致するような曲げ変形を加えたうえで血管との合成モデルを作成し、後述する流体解析に使用した。

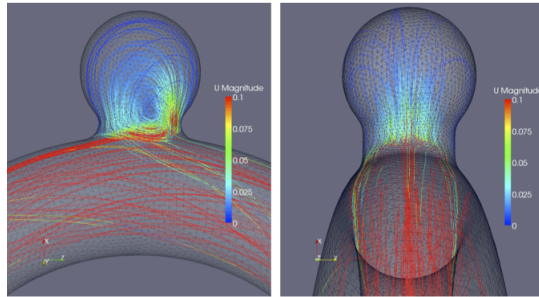
(4) 流体解析ソフトウェア OpenFOAM（オープンソース）を用いて血流計算を行った。流入口では流入速度 0.333 m/s の定常流を与えた。

(5) 瘤への血液流入の評価項目として、流入流量  $Q_{in}$  および流入最大速度  $U_{max}$ （流入断面に垂直な速度成分）を採用し、各ステントの血流阻害特性を比較した。

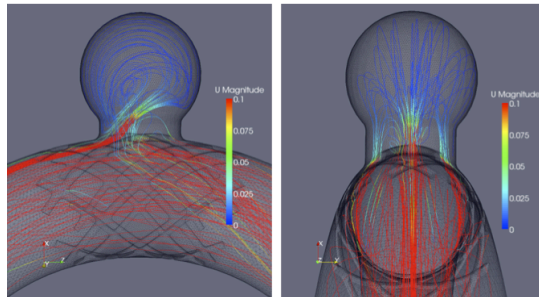
## 4. 研究成果

(1) 流線を可視化することにより、瘤内の流れのパターンを定性的に比較した。図 1 に流

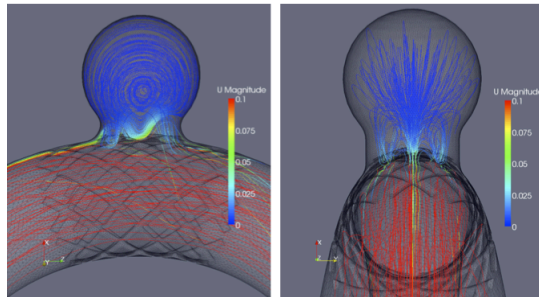
線の可視化結果の一例を示す。上からそれぞれ、(a)ステントなし、(b)Base stent (巻き数：12本)、(c)Stent A1 (巻き数：18本)、(d)Stent A2 (巻き数：24本)である。図中の色は速度の大きさを表している。流れ方向は、各ケースの左図では左から右へ、右図では手前から奥へと流体が流れている。



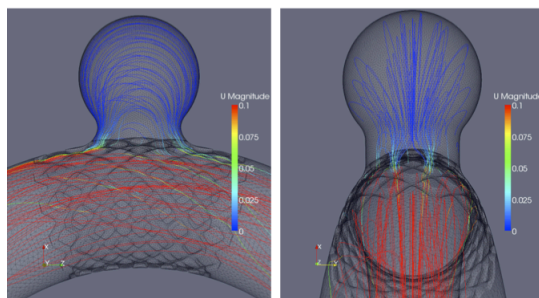
(a) ステントなし



(b) Base stent (巻き数：12本)



(c) Stent A1 (巻き数：18本)



(d) Stent A2 (巻き数：24本)

図1 流線の可視化結果

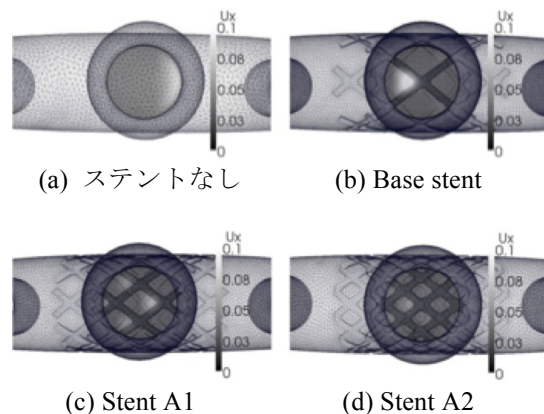
(a)はステントを留置していない状態での流線の様子であるが、この場合は、出口に近

い側の瘤流入部の速度が比較的大きくなっている。そこから流れ込んだ血液が瘤内で大きな循環を形成したのち、再び親血管へと流出している。一方、(b)のBase stentの場合は、瘤断面中央部のストラットで流れが急激に曲げられることにより、速度の大きい領域が入口に近い側に移動していることが確認できる。

(d)の結果からは興味深い流線変化の様子が確認された。ステントなしの場合やBase stent, Stent A1のケースでは循環の回転方向が紙面上で反時計回りであったのに対し、Stent A2ではそれが反転し、時計回りの瘤内循環となった。このような循環の回転方向の違いには、瘤内へ血液が流れ込む際の角度が影響していると考えられる。Base stentのケースでは、流入角度がおよそ $45^\circ$ となっていることが見てとれるが、一方、Stent A2ではそれがより鉛直方向へと傾いている。その結果、流入側の瘤壁に沿うような流れが支配的となって、全体として時計方向の瘤内循環が生じるようになる。

以上のように、ステントの存在および巻き数の変化が、瘤内の流動構造に顕著な影響を及ぼすことが確認された。

(2) 瘤流入部断面の速度分布(断面に垂直な速度成分)を図2に示す。この図より、(a)のステントなしの場合は流入部の面積が他のケースと比較して大きいことがわかる。(b)のBase stentの場合は、流入速度の大きい領域が比較的狭い範囲に集中し、流入速度も上昇している様子が見てとれる。これは、断面中央部のストラットで急激に曲げられた流れが、狭い開口部から集中的に瘤内へと流れ込むためと考えられる。一方、巻き数をより増やした場合((c)、(d))は、瘤内への流入が複数のステント開口部に分散されており、その結果、流入速度が減少している。



(a) ステントなし (b) Base stent (c) Stent A1 (d) Stent A2

図2 瘤流入部断面における速度分布

(3) ステントの巻き数を変化させた場合の流入流量  $Q_{in}$  および流入最大速度  $U_{max}$  を定量的に比較した。その結果、ステントの巻き数を増やすことによって流入流量  $Q_{in}$  は単調に減少する傾向となった。巻き数が 24 本では、ステントなしの場合と比較して流入流量が約 71% 減少した。一方、流入最大速度  $U_{max}$  については、ステントを留置することによって逆に増加する場合もあり得ることがわかった。

(4) ステントを血管内に留置する際の回転角も、瘤への血液流入に対して無視できない影響を及ぼすことが示唆された。実際の臨床現場でのステント留置において、回転角の制御を行うことは事実上不可能に近いことを考慮すると、(仮にステント単独での瘤治療を行おうとする場合には) 血液流入のステント回転角に対する依存性をあらかじめ把握しておくことが重要になると考えられる。また、設計上の観点からは、「留置時の回転角に対して感度の低い血流阻害特性」を有するようなステント設計が望まれるであろう。

(5) 本研究では、ステントグラフト留置術における血流については未評価であるが、以上の成果は、今後のステントグラフトとの特性比較において有用なデータとなるものであり、よりよい血管内治療デバイスを開発していくうえでの基礎的知見を与えると考えられる。

## 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)

- ① Y. Shimogonya, T. Ishikawa, Y. Imai, N. Matsuki, T. Yamaguchi, A realistic simulator of cerebral aneurysm formation: focusing on a novel hemodynamic index, the gradient oscillatory number, International Journal of Computational Fluid Dynamics, 査読有, 23, 2009, 583-593.

[学会発表] (計 6 件)

- ① Y. Shimogonya, K. Itoh, H. Kumamaru, Computational simulation of blood flow dynamics using an anatomically realistic artery model constructed from medical images, World Automation Congress 2010 – 7th International Forum on Multimedia and Image Processing, 21st Sep. 2010, Kobe International Conference Center (Hyogo, Japan).

- ② Y. Shimogonya, K. Itoh, H. Kumamaru, Hemodynamics in pre-aneurysmal artery using virtual removal technique of cerebral aneurysms: the relationship between oscillatory shear stress gradient and aneurysm initiation, LINC Houston 2010 in conjunction with the 7th Intracranial Stent Meeting 2010, 16th Sep. 2010, Houston (USA).

- ③ Y. Shimogonya, K. Itoh, H. Kumamaru, Pre-aneurysm hemodynamics in a human cerebral artery: the relationship between oscillatory shear stress gradient and aneurysm initiation, 6th World Congress of Biomechanics, 5th Aug. 2010, Singapore (Singapore).

- ④ 下権谷 祐児, 熊丸博滋, 伊藤和宏, 脳動脈瘤形成部位における瘤形成前の血行力学解析: 瘤仮想除去手法の実症例への適用, 日本機会学会第 22 回バイオエンジニアリング講演会, 2010 年 1 月 10 日, 岡山理科大学 (岡山県) .

- ⑤ Y. Shimogonya, T. Ishikawa, Y. Imai, N. Matsuki, T. Yamaguchi, On the sensitivity of a hemodynamic index for cerebral aneurysm initiation, the GON, to flow input waveform, Bioengineering 2009, 24th Sep. 2009, Oxford (UK).

- ⑥ Y. Shimogonya, T. Ishikawa, Y. Imai, N. Matsuki, T. Yamaguchi, Computational techniques for virtual removal of cerebral aneurysms in patient-specific artery models to predict the hemodynamics before aneurysm formation, 6th International Intracranial Stent Meeting, 6th Aug. 2009, 戦災復興記念館 (Miyagi, Japan).

[その他]

兵庫県立大学 研究者データベース

<http://kyoin.u-hyogo.ac.jp/staff/eng/shimogonya/>

## 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: 30552575