

頸動脈内膜剥離術あるいは頸動脈ステント留置術施行後の患者固有データに基づく頸動脈血流の流体力学的シミュレーション

早瀬仁志^{a*}, 徳永浩司^a, 中山敏男^b, 杉生憲志^a, 西田あゆみ^a, 有光帥二^a, 菱川朋人^a, 小野成紀^a, 太田 信^b, 伊達 勲^a

^a岡山大学大学院医歯薬学総合研究科 神経病態外科学, ^b東北大学流体科学研究所 知能流システム研究部門生体流動研究分野

キーワード: carotid artery stenosis, carotid artery stenting, carotid endarterectomy, computational fluid dynamics, wall shear stress

Computational fluid dynamics of carotid arteries after carotid endarterectomy or carotid artery stenting based on postoperative patient-specific medical data

Hitoshi Hayase^{a*}, Koji Tokunaga^a, Toshio Nakayama^b, Kenji Sugiu^a, Ayumi Nishida^a, Seiji Arimitsu^a, Tomohito Hishikawa^a, Shigeki Ono^a, Makoto Ohta^b, Isao Date^a

^aDepartment of Neurological Surgery, Okayama University Graduate School of Medicine, Dentistry and Pharmaceutical Sciences, ^bBiofluids Control Laboratory, Intelligent Fluid Systems Division, Institute of Fluid Science, Tohoku University

はじめに

脳梗塞の原因の一つである頸動脈狭窄症の患者に対する外科的治療の第一選択は頸動脈内膜剥離術（carotid endarterectomy；CEA）であり，血管縫合の際には一次的に閉鎖するよりもパッチグラフトを使用したCEA（Patch CEA）を行い，血管径を適度に拡張させた方が急性閉塞や再狭窄を低減するとされている¹⁾．近年CEA高リスク患者に対して頸動脈ステント留置術（carotid artery stenting；CAS）も治療手段と

して広まりつつあり，CASの臨床成績はCEAに匹敵すると報告されている．2つの治療法の治療概念は全く異なるが，治療成績以外の様々な視点からCASとCEAの違いを研究した報告は少ない．以前に我々はPatch CEAとCASの間には，術後の頸動脈の流速や形状に関して有意な違いがあることを報告した²⁾．本研究では患者固有のデータを使用し，Patch CEAとCAS後の頸動脈血流を計算流体力学（computational fluid dynamics；CFD）の手法を用いて可視化し，比較検討した³⁾．

治療後の頸動脈における血流シミュレーションの方法

対象はPatch CEAとCASを施行した患者それぞれ2例であり，治療後の頸動脈に対する3D-CTAのDICOMデータから術後の血管形状を構築し，超音波

平成24年12月受理

*〒719-3193 岡山県真庭市西原63番地

金田病院 脳神経外科

電話：0867-52-1191 FAX：0867-52-4179

E-mail：leon4977@yahoo.co.jp

プロフィール



早瀬 仁志

昭和49年生まれ

平成13年3月 岡山大学医学部医学科卒業

平成13年5月 岡山大学医学部附属病院 脳神経外科 医員（研修医）

平成14年1月 岡山赤十字病院 脳神経外科 医師

平成16年4月 岡山大学大学院医歯薬学総合研究科 神経病態外科学

平成20年11月 三豊総合病院 脳神経外科 医師

平成22年8月 社会医療法人緑社会金田病院 脳神経外科 医師

現在に至る

検査により計測した頸動脈血流速度を利用し、治療後の血行動態をコンピュータシミュレーションにより解析した。

まず3D-CTAのDICOMデータ(512×512matrix)から頸動脈の3次元形状の再構築を行い、形状追従性の高い四面体メッシュを用いて計算メッシュ生成を行った。

血流シミュレーション計算には東北大学流体力学研究所の協力を得て、スーパーコンピュータ(Altix3700® SGI社製Prism 128CPU)を用い、ナビエ・ストークスの式と連続の式に基づき計算した⁴⁾。

境界条件は5種類の異なるもの(表1)を設定し、シミュレーション上の血流速度と患者に対する実際の頸動脈超音波検査で測定された血流速度との差が最小となる設定を選択し、有限体積法にてFluent 6.2.14(Fluent Inc., NH)を用いて、流線図とwall shear stress(WSS)を求めた。

我々の研究のシミュレーション結果

上記の手法により得られたシミュレーション結果の流線図とWSSを可視化した(図1, 2)。流線解析において、Patch CEAにおける内頸動脈の最大流速はCASの最大流速の3分の2程度であった。Patch CEA後の内頸動脈球部では回旋性の低速流が観察された。WSS解析ではPatch CEAとCASの両方で球部の外側壁近傍に局所的低WSSを認めた。また高WSSがPatch CEAの血管内膜切除部位の遠位末端部やCASの残存する狭窄部で観察された。以上の通り、術後の頸動脈のCFD解析はCASとPatch CEAとの間で流線やWSSに違いがあることを明らかにした。

患者特異的データを元にした頸動脈血流CFD解析の意義

治療前の頸動脈において内膜肥厚が起りやすい部

表1 5つの異なる境界条件

Boundary*	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4	Set 5
Inlet (CCA)	Adjusted velocity (m/s)	Adjusted velocity (m/s)	Pressure 0 (Pa)	Adjusted velocity (m/s)	Adjusted velocity (m/s)
Outlet (ICA)	Pressure 0 (Pa)	Calculated pressure (Pa)	Adjusted velocity (m/s)	Pressure 0 (Pa)	Adjusted velocity (m/s)
Outlet (ECA)	Pressure 0 (Pa)	Pressure 0 (Pa)	Adjusted velocity (m/s)	Adjusted velocity (m/s)	Pressure 0 (Pa)

* : CCA = common carotid artery, ICA = internal carotid artery, ECA = external carotid artery

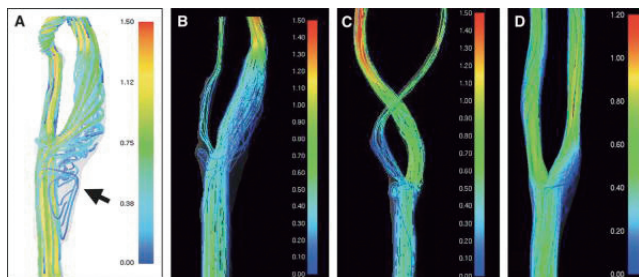


図1 頸動脈内膜剥離術後(CEA: AとB)と頸動脈ステント留置術後(CAS: CとD)の流線図
CEA例はCAS例と比較し頸動脈球部での最大流速は3分の2程度であった。Patch CEA後の内頸動脈球部の外側壁に低速再灌流を認める(A, 矢印)。(転載許諾を得て文献3より引用)

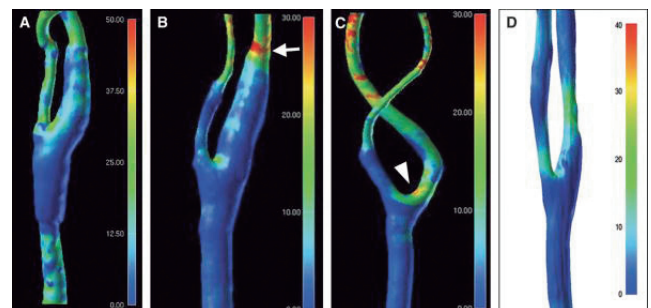


図2 頸動脈内膜剥離術後(CEA: AとB)と頸動脈ステント留置術後(CAS: CとD)のWSS
両群で内頸動脈球部の外側壁で局所的な低WSSを認める。CEAの内膜剥離部遠位(B, 白矢印)やCASの残存狭窄部(C, 白矢頭)に相対的に高いWSSを認める。(転載許諾を得て文献3より引用)

位は低 WSS を示す内頸動脈外側部とされており⁵⁻⁸⁾，治療後の例においても CFD による評価が長期的な治療効果の予想に役立つ可能性がある。CEA と CAS では治療後の頸動脈形状に明らかな差があり，その差に由来する血行動態の違いを理解することがより効果的な治療に繋がるものと考えられる。

これまで血行動態解析にはシリコンなどの血管形状モデルを用いたシミュレーションなどが行われてきたが，旧来の実験方法では血行力学的状況の限られた情報しか得られず，時間・空間分解能や計測精度にも限界を有する。またその形状や条件に関しても試行錯誤のたびに費用がかさむが，CFD 解析では各種条件を任意に変化させることも可能である。

各種画像診断装置を用いて患者の実際の血管形状を再構成し，血流の数値シミュレーションを行うことにより，血行力学的状況を可視化することが可能である。しかし，得られる計算結果が実際の血行力学的状況と一致するかどうかについての議論はこれまでほとんどなされていなかった。この問題点に対する解決策として，我々は5種類の境界条件を設定し，それぞれの条件下の数値シミュレーションで得られた血流速度と実際の患者における超音波検査上の血流速度を比較し，両者間の誤差が最も少ない境界条件を採用した。これにより，患者の血行動態に近似した CFD が施行可能となったと考えている。

文 献

- 1) Tokunaga K, Date I : Carotid endarterectomy with patch angioplasty [in Japanese]. *No Shinkei Geka* (2005) 33, 759-774.
- 2) Tokunaga K, Sugiu K, Hayase H, Nishida A, Date I : Significant differences in the postoperative morphological and hemodynamic conditions of carotid arteries of patients undergoing stenting or endarterectomy with patch angioplasty. *Neurosurgery* (2009) 65, 884-888.
- 3) Hayase H, Tokunaga K, Nakayama T, Sugiu K, Nishida A, Arimitsu S, Hishikawa T, Ono S, Ohta M, Date I : Computational fluid dynamics of carotid arteries after carotid endarterectomy or carotid artery stenting based on postoperative patient-specific computed tomography angiography and ultrasound flow data. *Neurosurgery* (2011) 68, 1096-1101.
- 4) Nayayama T, Hayase H, Tokunaga K, Ohta M : Parameter study of hemodynamics simulation at internal carotid stenosis. *J Fluid Sci Tech* (2008) 3, 544-552.
- 5) Davies PF : Overview : temporal and spatial relationships in shear stress-mediated endothelial signalling. *J Vasc Res* (1997) 34, 208-211.
- 6) Schirmer CM, Malek AM : Prediction of complex flow patterns in intracranial atherosclerotic disease using computational fluid dynamics. *Neurosurgery* (2007) 61, 842-851.
- 7) Stroud JS, Berger SA, Saloner D : Influence of stenosis morphology on flow through severely stenotic vessels : implications for plaque rupture. *J Biomech* (2000) 33, 443-455.
- 8) Slager CJ, Wentzel JJ, Gijzen FJ, Thury A, van der wal AC, Schaar JA, Serruys PW : The role of shear stress in the generation of rupture-prone vulnerable plaques. *Nat Clin Pract Cardiovasc Med* (2005) 2, 401-407.

1) Tokunaga K, Date I : Carotid endarterectomy with patch