

脳動脈瘤の 3D cine PC MRI 流体解析とこれを境界条件とした 計算流体力学解析の比較 [大会長賞記録]

磯田 治夫¹, 大倉 靖栄², 小杉 隆司², 山下 修平¹,
竹原 康雄¹, 竹田 浩康¹, 平野 勝也³, 難波 宏樹⁴,
Marcus T. Alley⁵, Roland Bammer⁵, Norbert J. Pelc⁵, 阪原 晴海¹

¹浜松医科大学医学部放射線科 ²㈱アールテック ³㈱GE 横河メディカルシステム
⁴浜松医科大学医学部脳神経外科 ⁵スタンフォード大学医学部放射線科

はじめに

脳動脈瘤の発生、進行、破裂に血流動態が大きな役割を果たす。このため、正確な血流動態が分かれば、将来の脳動脈瘤発生の推定・予防、脳動脈瘤の予後推定や治療方針決定に役立つ可能性がある。

3D cine phase-contrast (PC) MRI (3D cine PC MRI, time resolve three dimensional phase-contrast MRI, 4D-Flow)^{1)~4)}は計算流体力学解析 (computational fluid dynamics, CFD)^{5),6)}と比較すると時間分解能や空間分解能は劣るが、生理的な条件下でヒトから直接血管内血流速度ベクトルを得る方法として有望である。現在、血流解析のゴールドスタンダードはないが、空間分解能と時間分解能に優れた CFD の結果が一般的に信じられている。今までに 3D cine PC MRI による血流解析と CFD の比較はなされていない。

本研究の目的はヒト脳動脈瘤の 3次元速度ベクトル場、3次元流線、血管壁剪断速度ベクトル、血管壁剪断応力 (wall shear stress, WSS)、振動剪断指数 (oscillatory shear index, OSI) について 3D cine PC MRI による MR 血流解析 (MR fluid dynamics, MRFD) と 3D cine PC

MRI データを境界条件とした CFD の比較を行うことである。

方 法

対象は未破裂脳動脈瘤 5 個 (脳底動脈上小脳動脈瘤 1 個, 内頸動脈後交通動脈 2 個, 中大脳動脈分岐部動脈瘤 1 個, 内頸動脈眼動脈瘤 1 個, 径 3~8 mm, 平均 5.7 mm) で, GE 社製 1.5T MR 装置と頭部用コイルを用いて 3D cine PC MRI を撮影した。撮影パラメータは TR/TE/NEX=5.8/2.1/1, FA=15, FOV=160×160×32 mm, matrix=160×160×20, voxel size=1×1×1.6 mm (再構成後 1×1×0.8 mm), VENC=60~100 cm/s, 撮影時間=10~15 分, 横断像, 20 フェーズ, 心電図同期であった。画像再構成に 90 分を要した。血管壁抽出のために MRA を施行した。MRA 又は 3D cine PC MRI の信号強度図からリージョンローイング法で血管形態を作成した。全動脈瘤の流入と流出血流のピーク時期は一致していた。CFD は MRFD と同じ血管形態を用い, ナビエストークスの運動方程式, 連続の式を用い有限要素法で仮想血管内の非構造格子に血流速度ベクトルを取得した。このとき, 流入条

キーワード cine phase-contrast MR imaging, intracranial aneurysms, hemodynamics, MR fluid dynamics, computational fluid dynamics

件は3D cine PC MRIにより得られた格子流速データを元に、テトラ格子節点上の流速を線形補間により設定した。流出部が複数ある場合、分岐部の血流量比は3D cine PC MRIデータに従った。MRFD, CFDともに同様の方法で3次元速度ベクトル場, 3次元流線, 血管壁剪断速度ベクトル, 血管壁剪断応力 (wall shear stress, WSS), 振動剪断指数 (oscillator shear index, OSI) を計算し⁷⁾, 可視化した。MRFDとCFDで求めた3次元速度ベクトル場とWSSについて, 3次元的に分布する個々のデータポイントの相関を調べた。MRFDとCFDの剪断速度ベクトル, OSIを定性的に比較した。

結 果

MRFDとCFDで求められた脳動脈瘤の3次元速度ベクトル場には中～強い相関があり ($0.213 < R < 0.876$, $P < 0.01$), MRFDとCFDの3次元流線図は良く一致していた。

MRFDとCFDで求められたWSSには弱～中等度の相関があり ($0.095 < R < 0.476$, $P < 0.01$), CFDとMRFDのWSS差分画像ではおおむね一致していたが, 一部で大きく違っていた。

3次元流線図の螺旋流頂点に一致して回転する小さな剪断速度ベクトルや高OSI領域が観察された。MRFDで得られたこれらの位置や領域の大きさはCFDのそれらと一致しない場合もあるが, 5症例共にこれらの位置はCFDとMRFDで近接していた。

考 察

MRFDとCFDによるWSSには弱～中等度の相関はあったが, 3次元速度ベクトル場に比べると相関は低かった。血管壁近傍のわずかな

速度ベクトルの違いが血管壁近傍の速度勾配である血管壁剪断速度ベクトルに違いをもたらすためと思われた。

また, 剪断速度ベクトルの回転中心やOSI高値の位置はMRFDとCFDで異なるが, 近接し, 同様の傾向を示していた。脳動脈瘤の流線の螺旋流頂点は剪断応力が揺らぐため, 臨床的に重要と思われる。今後の検討を要する注目すべき点と考えられる。

CFDはコンピュータの性能, メッシュ数や計算条件にも依存するが, 計算に1～2日掛る。これに対して3D cine PC MRIの検査は10～20分程度, 画像再構成は90分, 血流解析は1時間以内である。このためMRFDはCFDに比して相対的に簡便である。現時点でMRFDがCFDに完全に一致する結果は得られていないが, MRFDとCFDには比較的良好な相関があることが明らかになった。また, CFDと比較すると精度が悪い可能性があるが, 簡便にデータ収集できるメリットがあることから, MRFDに限界があることを十分に理解した上でMRFDが臨床的に有用かどうかを今後検討して行くべきと考える。今後, 高磁場化に伴い, 空間分解能と信号強度が高くなるにつれて精度は更に高まると思われる。

結 論

5個のヒト脳動脈瘤のMRFDとCFDの3次元速度ベクトル場, 3次元流線, 血管壁剪断速度ベクトル, WSS, OSIを各々比較したところ, MRFDとCFDに良好な相関が認められた。

文 献

- 1) Markl M, Chan FP, Alley MT, et al.: Time-resolved three-dimensional phase-contrast MRI. J

- Magn Reson Imaging 2003 ; 17 : 499-506
- 2) Yamashita S, Isoda H, Hirano M, et al. : Visualization of hemodynamics in intracranial arteries using time-resolved three-dimensional phase-contrast MRI. J Magn Reson Imaging 2007 ; 25 : 473-478
 - 3) Bammer R, Hope TA, Aksoy M, Alley MT : Time-resolved 3D quantitative flow MRI of the major intracranial vessels : initial experience and comparative evaluation at 1.5T and 3.0T in combination with parallel imaging. Magn Reson Med 2007 ; 57 : 127-140
 - 4) Wetzel S, Meckel S, Frydrychowicz A, Bonati L, Radue EW, Scheffler K, Hennig J, Markl M : *In vivo* assessment and visualization of intracranial arterial hemodynamics with flow-sensitized 4D MR imaging at 3T. AJNR Am J Neuroradiol 2007 ; 28 : 433-438
 - 5) Shojima M, Oshima M, Takagi K, Torii R, Hayakawa M, Katada K, Morita A, Kirino T : Magnitude and role of wall shear stress on cerebral aneurysm : computational fluid dynamic study of 20 middle cerebral artery aneurysms. Stroke 2004 ; 35 : 2500-2505
 - 6) Cebal JR, Castro MA, Burgess JE, Pergolizzi RS, Sheridan MJ, Putman CM : Characterization of cerebral aneurysms for assessing risk of rupture by using patient-specific computational hemodynamics models. AJNR Am J Neuroradiol 2005 ; 26 : 2550-2559
 - 7) 礒田治夫, 平野勝也, 竹田浩康, 他 : MR による脳動脈瘤血流解析. 臨床放射線 2008 ; 53 : 797-808

Comparison of Hemodynamics of Intracranial Aneurysms between MR Fluid Dynamics using 3D Cine Phase-contrast MRI and MR-based Computational Fluid Dynamics [Presidential Award Proceedings]

Haruo ISODA¹, Yasuhide OHKURA², Takashi KOSUGI²,
Shuhei YAMASHITA¹, Yasuo TAKEHARA¹, Hiroyasu TAKEDA¹,
Masaya HIRANO³, Hiroki NAMBA⁴, Marcus T. ALLEY⁵,
Roland BAMMER⁵, Norbert J. PELC⁵, Harumi SAKAHARA¹

¹*Department of Radiology, Hamamatsu University School of Medicine
1-20-1, Handayama, Higashiku, Hamamatsu, Shizuoka 431-3192*

²*Renaissance of Technology Corporation*

³*GE Yokogawa Medical Systems*

⁴*Department of Neurosurgery, Hamamatsu University School of Medicine*

⁵*Department of Radiology, Stanford University*

We performed magnetic resonance fluid dynamics (MRFD) using 3-dimensional cine phase-contrast (PC) MR imaging and calculated computational fluid dynamics (CFD) using the 3D cine PC MR imaging data set as boundary conditions for 5 intracranial aneurysms. We compared 3D velocity vector fields, 3D streamlines, shearing velocity, wall shear stress (WSS), and oscillatory shear index (OSI) of MRFD and MR-based CFD. We correlated the 3D velocity vector fields and WSS of MRFD with those of MR-based CFD using regression analysis. Between MRFD and CFD, correlation in 3D velocity vector fields of aneurysms was moderate to high and in WSS of aneurysms, low to moderate. The pattern and location of shearing velocity in MRFD and CFD were similar, and the location of high OSI obtained by MRFD was near that obtained by CFD.