8F46

EFD と CFD の比較による脳動脈瘤内の血流の衝突ダイナミクスに関する研究

Dynamics of flow impingement in cerebral aneurysm by using EFD and CFD

学 ○高橋彩来 (早大) 正 八木高伸 (早大) 非 戸部泰貴 (早大)
 非 岩渕裕貴 (早大) 非 山梨桃子 (早大) 正 岩崎清隆 (早大) 正 梅津光生 (早大)
 非 村山 雄一 (慈恵医大) 非 高尾 洋之 (慈恵医大)

Sara TAKAHASHI, Takanobu YAGI, Yasutaka TOBE, Yuki IWABUCHI, Momoko YAMANASHI,
 Kiyotaka IWASAKI and Mitsuo UMEZU

Center for Advanced Biomedical Sciences (TWIns), Waseda University,
 2-2 Wakamatsu-cho, Shinjuku-ku, Tokyo

Yuichi MURAYAMA and Hiroyuki TAKAO

Department of Neurosurgery, Jikei University School of Medicine, Tokyo

Key words : EFD, CFD, Cerebral aneurysm, Impingement, Jet, Fluctuation, Transition

1. 緒言

脳動脈瘤の破裂予測に向けた, Computational Fluid Dynamics(以下 CFD)や Experimental Fluid Dynamics(以下 EFD)による瘤内の血流解析が盛んに行われてきた。評価手法に関しては, せん断応力等を用いた指標化の検討が行われている。一方で, 解析手法に関しては様々な設定手法が存在する。例えば, 動脈壁の取り扱いとして, 剛体とする場合と弾性とする場合があるが, 壁の弾性による影響はまだ十分に理解されていない。

早大では, 実形状・弾性の脳動脈瘤モデルを開発し, 数十マイクロメートルの空間解像度で流れを3次元計測する技術の構築に成功した。これまでに, 慈恵医大と協力して, 瘤径が5 mm 程度という小型にも関わらず破裂した3症例に, 共通して「衝突流れ」を確認した¹⁾。

本研究では, EFD と CFD を3次元的に比較する新しい試みを紹介する。EFD では実形状・弾性モデルを用いたステレオ PIV 解析を行った。それに対して, CFD では実形状・剛体モデルを用いた数値解析を行い, それらを比較することによって, 壁の弾性が衝突現象に及ぼす影響を検証することを目的とする。

2. 方法

2.1 EFD 解析

脳動脈瘤症例(63 歳女性, CT 撮影後9日後に破裂, ネックサイズ4.3 mm, アスペクト比1.1)を選択し, 血管造影データより, 正常なヒト内頸動脈と同等のコンプライアンスを有する実形状弾性モデルを作製した。このモデルを用いて, ステレオ PIV 実験を行った。粒子画像の撮影には, 高速度カメラを使用し, 位相固定で毎収縮期ピーク時の30 ms を10サイクル撮影した。空間解像度は94 μm , 時間解像度は2 ms であった。詳しい計測方法については参考文献(2)を参照されたい。

2.2 CFD 解析

マイクロ CT 装置(TDM1300-IS, Yamato)を用いて, 造影剤で満たした弾性モデルの内腔形状を100 mmHgに加圧した状態で撮像し, 三次元構築した形状を CFD 解析用のモデルとした。モデルは剛体として計算を行った。境界条件は, ステレオ PIV 実験において得られた, 内頸動脈(以下 ICA), 中大脳動脈(以下 MCA), 前大脳動脈(以下 ACA), 後交通動脈(以下

Fig. 1 Mesh geometry of CFD model

Fig. 2 Flow pattern in an aneurysm

下 Pcom)の血流量・圧力データを元に設定した。全メッシュ数は約150万であり, 瘤内腔は平均メッシュサイズを瘤ネック径の40分の1程度とし, 最小プリズムメッシュの厚みを15 μm として配置した。また, 層流解析と Large eddy simulation(以下 LES, 動的スマゴリンスキーモデル)を行い, PIV との比較を行った。

3. 結果

3.1 血流パターン

瘤内のフローパターンを Fig.2 に示す。PIV と CFD とともに下流側ネック部に親血管の流れの一部が衝突し, 分岐した流れが瘤壁に沿って流れ, 渦を形成して親血管へと流出する流れと後交通動脈に流入する流れに分かれる様子が見られた。

3.2 壁面せん断速度 (Wall shear rate)

収縮期ピーク時における PIV と CFD の壁面せん断速度(以下 WSR)を Fig.3, 4(a)に示す。衝突部以外では両者の傾向は一致していた。衝突及びその直後では, PIV では頭頂部にかけて緩やかに WSR が低下し, CFD では急激に WSR が低下する様子が見られた。層流解析と LES 解析を比較しても, 顕著な違いは見られなかった。

3.3 時間変動

PIV において位相固定で毎収縮期ピーク時の30 ms を10サイクル撮影した際の, 各点における速度の時間変化を

Fig. 3 (a) Wall shear rate, (b) cross-sectional view of inflow, and (c) temporal variation of velocity by PIV

Fig.3(c)に示す。主流(Inflow)に対して、瘤ネック部で衝突する部位(Impingement)では、100 Hz を超える不規則な高周波振動が発生していることが確認出来た。また、流入流れと流出流れが交差する部位(Intersection)では数十 Hz 帯域の規則的な低周波振動が確認された。振幅は 0.3 m/s 程度であった。

上記と同等な部位で、CFD でも収縮期から拡張期における速度の算出を行った。その結果を Fig.4(c)に示す。実線は層流解析、点線は LES 解析による結果であり、どちらも同様の傾向を示した。主流(Inflow)で見られるような流速変化に対して、交差部(Intersection)においては、PIV と同様の帯域の低周波振動を確認することが出来た。振幅は 0.05 m/s 程度であった。衝突部(Impingement)では PIV で見られた高周波振動は確認されなかった。

4. 考察

4.1 壁弾性が壁面せん断速度に及ぼす影響に関する検討

PIV と CFD における衝突部位の速度分布(Fig.3, 4(b))を比較すると、PIV において、明確なよどみ(Stagnation)が発生している様子が確認された。弾性モデルでは、衝突により局所的に圧力が上昇し、壁が拡張することが確認され、衝突部におけるよどみの違いに、壁の弾性が影響していると考察された。また同様に、PIV ではこの壁の拡張によって WSR の分布がスムーズ化されていると考えられた。

4.2 血流の遷移性に関する検討

壁弾性を考慮したPIVによる瘤内の血流計測において、不規則な高周波振動と規則的な低周波振動を確認した。

PIVで確認された低周波振動は、血流の交差部位におけるせん断層で発生した。剛体モデルで行ったPIVの同部位において確認された低周波振動は、周波数は同等であったが、その振幅は6分の1程度の値を示していた。PIVで顕著に振動が現れたことで、壁の弾性がせん断層の不安定性を増大させる可能性が示唆された。

また、PIVで確認された高周波振動は、衝突直後の壁近傍における境界層で発生した。前述の低周波振動と異なり、

Fig. 4 (a) Wall shear rate, (b) cross-sectional view of inflow, and (c) temporal variation of velocity by CFD

剛体モデルで行ったCFDの同等の部位では振動は確認されなかった。前述したように、弾性壁の場合、衝突部は、圧力の上昇により壁が最も拡張する部位であると考えられ、壁の拡張が境界層における不安定性を増大させると考察された。今後、CFDによって衝突部で発生する高周波振動を再現する際には、壁の挙動に留意した解析法が必要であると考察される。また、本研究のCFDで用いた、衝突部から頭頂部にかけてのプリズムメッシュは、流れに対して水平方向と垂直方向の長さが異なる(Fig.1)。このような異方的なメッシュを用いたことによる影響も考えられた。

5. 結論

本研究によって、壁の弾性を考慮するか否かにより、衝突現象に特に顕著な解析結果の変化を確認した。今後、さらにEFDとCFDの比較を進めることで、前提条件の効果と限界を明らかにしていくことが重要であることが示された。

6. 謝辞

本研究は厚生労働科学研究費補助金 (H20-医工-一般-001) の援助により行われた。関係者諸氏に厚く御礼申し上げる。

7. 参考文献

- 1) T.Yagi, Y. Murayama, M.Umezu et al., 脳動脈瘤の破裂を予測する医工学技術の確立に向けて, 人工臓器39巻3号, pp.227-231, 2010.
- 2) M.Shinke, T.Yagi, S.Takahashi et al., 弾性脳動脈瘤モデルを用いたステレオPIV法による壁面せん断応力3次元計測と時間・空間特性, 第23回バイオエンジニアリング講演会論文集, pp.403-404, 2011.