2E09

4D Flow 血流速度測定に基づく CFD 血流解析システム (その2: データの流れと処理)

A vascular CFD analysis system based on 4D Flow velocimetry

(Part 2: data flow and processing)

非	○清水	利恭 (アールテック)	非	小杉	隆司 (アールテック)
正	大西	有希 (東工大)	非	青木	康平 (東工大)
非	磯田	治夫 (名大)	非	竹原	康雄 (浜医大)
正	天谷	賢治 (東工大)			

Toshiyasu SHIMIZU, Takashi KOSUGI, Renaissance of Technology Corporation, Hamamatsu, Japan

Yuki ONISHI, Kouhei AOKI, Kenji AMAYA, Department of Mechanical and Environmental Informatics, Tokyo

Institute of Technology, Graduate School of Information Science and Engineering, Tokyo, Japan

Haruo ISODA, Department of Radiological and Medical Laboratory Sciences, Nagoya University Graduate School of Medicine, Nagoya, Japan

Yasuo TAKEHARA, Department of Radiology, Hamamatsu University Hospital, Hamamatsu, Japan

Key words : MRI, Hemodynamics, Aneurysm, Medical imaging

1. はじめに

脳動脈瘤の「発生」「成長」「破裂」の予測やメカニズム解明に関する研究分野において、血管内の血流の状態や血流が壁面に与える応力などは重要な情報となる。特に、WSS (Wall Shear Stress)は、細胞に対して大きな影響があるとの報告があり^{1,2}、これを正確に求めることが血流解析の分野ではひとつの課題として挙げられる。

WSS を求める方法として、CFD(Computational Fluid Dynamics)解析を用いる方法、4D Flow(3D cine phase-contrast MRI)にて血流速度を実測し、推定する方法などが挙げられる。また、その2つを組み合わせた、4D Flowを入力データとしてCFD解析を行う、MR-Based CFDが提案されている³。しかし、血流解析を実施するのは、CFD解析が専門でない医学系研究者であるケースが少なくない。このような場合、ゼロから解析手法を検討したりシステムを構築することに研究リソースを割くことができないため、簡便に利用できる解析システムが望まれる。

筆者らは、4D Flowによって得られたMRI画像を入力データとして、CFD解析を行うための実用的なシステムを構築した。この試みによって、CFD解析が専門でない研究者でもMRIの臨床データを元に、簡便に血流解析を実施することが可能となった。

2. システム構成とデータフロー

4D Flowによって、様々な血流信号を画像化することができる。血流が存在する位置、すなわち血管の形状を画像化するだけでなく、血流の方向、速度を示す画像も得ることができる。MR-Based CFDにおいては、解析に必要な生体情報を全てMRIで取得する。MRIで血管の形状を撮影するだけでなく、4D Flowによって、境界条件(BC, Boundary Condition)となる流入、流出断面部での流速分布あるいは流量を得る。

MRIでのデータ取得から、結果を可視化するまでのデータの流れ、システム構成をFig.1に示す。サブシステムとして、4つのソフトウェアを利用する。4D Flowの画像群を直接読み込み、形状や境界条件とする流速データを取り込むことができる汎用ソフトウェアはないため、専用のMR画像処理ソフトウェアを開発した。また、CFD解析のプリプロセッサ、ソルバー、ポストプロセッサは、市販の汎用製品を利用する。

Fig.1 System structure and data flow

MRIで撮影したデータは、DICOM規格に従った形式で出力される。これをMR画像処理ソフトにて、2D画像から3D形状の作成、および、流入、流出境界での流速や流量の算出を行う。3D形状はSTLファイル形式でプリプロセッサに渡される。4D Flowで得られた流れ情報から算出された境界条件は、ソルバーで直接読み込むことができる形式で出力される。

プリプロセッサで作成した分割モデルと境界条件などの計算条件をソルバーに与え、計算を実行する。最後に結果をポストプロセッサで確認する。

3. 解析条件の検討

CFD解析を専門としないユーザーが簡便に利用可能とするためには、一連のデータ処理中に発生する意思決定をシステム化、または標準化することが必要となる。これを実現するため、事前に計算条件が結果に与える影響を検討した。ここでは、血液の物性値とメッシュ生成条件を例に挙げる。

血液の物性値

解析に際して、血液の物性値としては、密度、粘性係数のほか非ニュートン性の適用可否を決定する必要がある。検討の結果、密度、粘性係数はある一定の値を用い、ニュートン流体として扱うことでほぼ問題ないという結論に至ったが、計算コストへの影響が比較的少ないことから、念のためCarreauモデルで示される非ニュートン流体を採用する。MR画像処理ソフトでの境界条件出力の際にこの情報も加えることで、自動的にソルバーでの計算条件に組み込まれる。

メッシュ生成条件

様々なメッシュ生成パラメータを用いて作成されたデータを解析し、その影響を調査した。例えば、最大メッシュサイズ、境界層メッシュの厚さなどを検証した。また、境界条件として流速分布を与えない場合、流路を延長し、助走区間を設ける必要がある。この距離を決定するため、一様断面中の流れが十分に発達する距離を知る必要がある。血管断面が円形であると仮定し、この距離の目安を式(1)のように与える。

$$l_E = 0.065 \cdot \text{Re} \cdot d = \frac{0.065 \cdot U \cdot d^2}{\nu} = \frac{0.26 \cdot V}{\pi \cdot \nu} \quad (1)$$

ここで、 Re はレイノルズ数、 U は流体の平均流速、 d は直円管の内径、 ν は動粘性係数、 V は体積流量である。4D Flow により、体積流量が分かるため、必要な延長距離が計算できる。

このようなメッシュ生成条件は明文化することで、標準化されたプロセスとして、一連の処理に組み込んだ。用いるプリプロセッサが、カスタマイズ性が高いものであれば、ソフトウェアにこれらのメッシュ生成条件を組み込むことで、処理をより簡便にすることができる。

4. MR 画像処理ソフトでの処理

MRI から出力されるデータは、大量の 2D 画像画像である。これらから、3D 形状と境界条件となる流速、あるいは流量を算出するための具体的な処理手順について示す。

形状の抽出法

次の手順で 2D 画像から 3D の形状を作成する。まず、3D TOF MRA 画像や 4D Flow の Magnitude 画像から、輝度を値とするボクセルデータを生成する。次に、Region Growing 法などを用い、対象とする血管の連続領域のみを得る。血管の内部領域と外部領域の境界でサーフェスを作成する。さらに、Marching-cubes 法などを用いることで、表面 3 角形パッチを生成する。Fig.2 は説明のため、2 次元でのこれらの処理を図示するが、実際は複数の画像を積み上げて、3 次元の処理を実施している。

Fig.2 Data processing for constructing shape from images.

境界条件の抽出法

速度を示す位相画像は、3 枚の画像から 1 スライスの速度ベクトルを表す。複数のスライスを積み上げることで、速度ベクトルを値として持つボクセルデータを生成する。GUI によるユーザー指定によって、任意の位置で断面を設定することができる(Fig.3)。作成した断面は、格子状にグリッド点を発生させ、Delaunay triangulation によって、微小な三角形要素に分割する。三角形の重心での流速ベクトルを線形補間によって求め、各三角形での面積と流速との積を加算し、流量が計算できる。

4D Flow は TOF MRA や CTA と比較して、得られる領域の範囲が狭く、解析対象領域の流入箇所付近まで、十分な助走

経路が得られない場合もある。そのようなケースでは、流入境界は流速プロファイルで与える。解析対象領域まで流れが十分に発達する区間が得られた場合は、計測値としてより正確である流量を指定することが推奨される。

Fig.3 Cross-section surface for BC.

5. 解析例

3D cine PC 撮像法によって得られた画像から、CFD 解析を実施した例を Fig.4 に示す。

Fig.4 Result of CFD analysis

6. 今後の課題

一般に実施されている血流のCFD解析では、流出境界条件として、圧力をゼロと設定しているケースが多い。MR-Based CFDでは、4D Flowを利用することで、流入だけでなく流出断面での境界条件を生体から得た情報を元に設定することができるという利点がある。

一方で、血管形状の精度という観点から見ると、MRIはCT、DSAと比較して劣っている。この点については、2D画像から3D形状を作成する手法の改良など、今後検討すべき事項である。しかし、根本的な精度向上には元画像の改善が必須であり、MRI機器や撮像法の今後の進歩にも期待したい。

参考文献

- (1) Mantha A, Karmonik C et al (2006) Hemodynamics in a Cerebral Artery before and after the Formation of an Aneurysm. Am J Neuroradiol 27: 1113-1118
- (2) Shojima M, Oshima M et al (2004) Magnitude and Role of Wall Shear Stress on Cerebral Aneurysm : Computational Fluid Dynamic Study of 20 Middle Cerebral Artery Aneurysms. Stroke 35: 2500-2505
- (3) Isoda H, Ohkura Y et al (2009) Comparison of hemodynamics of intracranial aneurysms between MR fluid dynamics using 3D cine phase-contrast MRI and MR-based computational fluid dynamics. Neuroradiology 52(10):913-20