

jh230047

流体-構造連成解析を基にした大動脈解離シミュレーションモデルの構築

武田 量 (北海道大学)

概要

本研究では臨床現場での利用を想定した大動脈解離の治療方法を評価可能なソフトウェア開発を目的としている。本年度は主に大動脈の血流モデルと血管壁モデルの構築と流体-構造連成解析(FSI)環境における品質検証を実施した。医療用画像群から大動脈の STL モデルを作成し、ボリウム抽出処理を実施することにより、血管壁と血液部分のソリッドモデルを作成した。ソリッドモデルに弱連成(Weak FSI)・強連成解析(Strong FSI)に適したメッシュアルゴリズム及び境界条件を与えた。これにより同形状の大動脈モデルでの弱連成・強連成解析の結果比較が可能となった。結果、本研究で構築した強連成解析では弱連成解析と比較して、流体と構造の境界面における圧力や流路内での流速が小さくなる傾向があり、流入出境界近傍における壁面せん断応力(WSS)及び流速パラメータでは勾配も大きいことから妥当性は低いことが示された。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同利用・共同研究を実施している拠点名

北海道大学 情報基盤センター

(2) 課題分野

大規模計算科学課題分野

(3) 共同研究分野 (HPCI 資源利用課題のみ)

超大規模数値計算系応用分野

(4) 参加研究者の役割分担

武田 量 総括, コード開発, モデル作成

佐々木 克彦 構造解析の評価

大島 伸行 流体解析の評価

横山 博一 画像解析の評価

高橋 裕介 コード開発

黒田 明慈 流体解析の評価

柴田 良一 開発環境の評価

高嶋 英巖 開発環境の評価

李 辰宇 コード開発・検証

2. 研究の目的と意義

本研究では大動脈疾患に関するリスク及びその治療方法の評価可能な数値解析シミュレーション方法を開発する。まず、医療用画像群から大動脈の形状データを取得し、このデータを汎用の CAD ソフトにインポートし 3 次元の大動脈表面モデルを作成する。この表面形状モデルより上行大動脈・下行大動脈をそれぞれ入口と出口とした血流部分の流体 (CFD) モデルを構築する。また、表面モデルに血管壁の厚さ分の要素を追加して血管壁の有限要素 (FE) 構造モデルを構築する。さらに、流体モデルと構造モデルの変化の相互作用を計算可能な弱連成による流体-構造連成 (FSI) 解析用の開発環境を構築する。FSI を構築することにより、それぞれ CFD と FE 単体の数値計算では考慮できない、心臓脈動時における血管壁の変形が血流の流れ場に影響を及ぼす影響を推定可能とする。大動脈の FSI 解析では血管損傷に影響すると報告されている、圧力、流速-流線、壁面せん断応力 (WSS) と血管壁変形のパラメータを主に

推定する。

3. 当拠点の公募型共同研究として実施した意義
研究代表者らは主に機械工学のバックグラウンドを応用し、医療現場での使用を目的としたハードウェア及びソフトウェアの研究・開発を中心に取り組んできた。本課題分担者を含む多数・他分野の研究者・技術者と共同研究を実施し、北海道大学アカデミッククラウドを活用した成果を上げてきた。本年度も昨年度と同様に、多機関の研究分担者ら（横山，柴田，高嶋，李）とは緊密な連携をとるためには本拠点の継続的な利用は必要不可欠である。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

これまでの申請者らは大動脈分離解析手法の開発に着手してきた。主に医療画像からの大動脈の3次元形状抽出手法の確立と解析環境（CFD, FSI）の構築であった。昨年度の jh220026 では主に以下の研究成果が得られた：

- 大動脈の形状抽出方法の課題：使用したメッシュ生成アルゴリズムの内、NETGEN と Gmsh を比較した。複雑な大動脈モデルに対して元形状を保持し、且つ計算精度向上を果たす解析モデル作成方法を見出すことができた。
- 解析モデルの構築：FSI 解析環境である、Elmer による強連成解析の結果と OpenFOAM- CalculiX による弱連成解析の結果を比較した。強連成解析と弱連成解析環境の方が壁面せん断応力(WSS)が大きな数値となることが判明した。
- 実物大の大動脈流路実験：大動脈を対象とした数値解析の妥当性を実験的に検証し精度向上を目指すこととした。本研究ではウレタン製の動脈モデルを使用した流路実験を構築し、実験と同様の条件での数値解析を行うためのパラメータ導出を行った。

5. 今年度の研究成果の詳細

本研究課題では以下の研究目標を設定した：

A) 大動脈の血流モデルと血管壁モデルの構築

B) FSI 解析環境によりモデルの要素品質検証

研究目標 A)では2種類の FSI 手法を用いて解析を実施した。構造と流体の現象を1つの統合された支配方程式で解く強連成及び2つの現象を個別のソルバーで解き、圧力と変形量のデータを相互交換する弱連成。強連成の場合は本研究ではマルチフィジックスソフトウェアである ELMER の環境下で解析を行っている。本環境下では血管壁及び血流のモデルを同一の形状モデルから作成した。弱連成解析の場合は計算流体解析用の OpenFOAM と構造解析用の CALCULIX と異なるソルバーを組み合わせて解析を実施した。この場合は、血流モデルは OpenFOAM で、血管壁は CALCULIX で解析を実施するため、それぞれのソルバーの仕様に沿ったモデルを用意する必要がある。

主な工夫としてはまず、大動脈モデルの STL モデルは流入出口断面及び血液と血管壁の境界の表面形状データであるため別途血管壁部分と血液部分のソリッドモデルを作成。その後、表面形状に対して厚みを付け、ソリッド化を行った。流入口と流出口に境界を設定し、血管壁のソリッドモデルを完成した(図4)。さらにボリュームの抽出処理を実施する事により血液部分のソリッドモデルを作成した。

解析用のメッシュ作成には数値解析用のプリポスト処理を行うことができるオープンソースソフトウェア SALOME (9.9.0, OPEN CASCADE) を使用した。SALOME において FSI 解析で必要となる境界を定義し UNV フォーマットでエクスポートした(図1)。

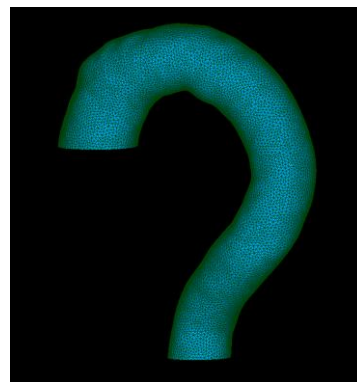


Fig. 1 Final meshed aorta model.

研究目標 B)では強連成解析では大動脈モデルを作成する際にメッシングアルゴリズムの選択により計算収束性に影響する事が判明した。これまで、同一の

大動脈モデルを NETGEN と Gmsh のアルゴリズムによりメッシングを行った結果、前者が 6 モデル中 2 モデルしか解析が収束しないのに対し、後者は全 6 モデル完了した。弱連成環境は 2 つの異なるソルバーで解析を実施するため、強連成よりもメッシュや材料物性値の選定の影響が結果に強く影響する事が判明した。

強連成環境と弱連成環境で同大動脈モデルで解析を実施した。結果、Elmer の WSS 結果は OpenFOAM-CalculiX の結果と比較して小さな値を示した(図 2、3)。 Elmer は血管壁から血管内中心にかけて血流路断面内での速度差は大きくなるが、血管壁近傍においては速度の小さな領域が層状に存在するため速度勾配が小さくなり、結果的に WSS も小さくなっていると考えられる。

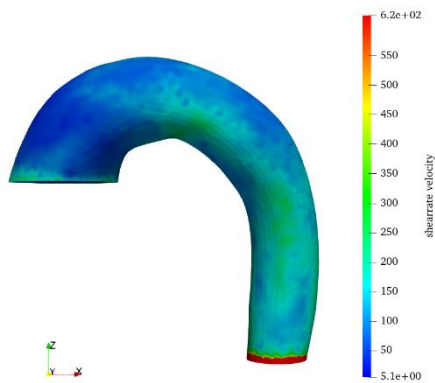


Fig. 2 Wall shearrate distribution using strong FSI

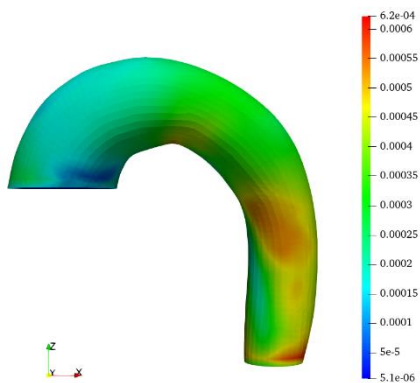
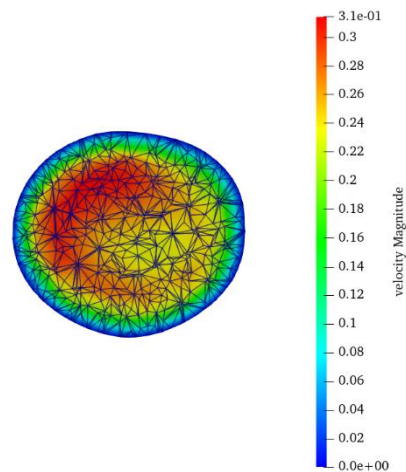


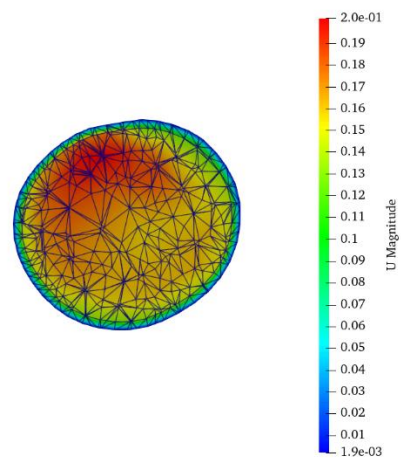
Fig. 3 Wall shear stress distribution using weak FSI

図 4 は下行大動脈の断面内における速度分布である。Elmer は OpenFOAM-CalculiX に比べて血管壁近傍において青色の低速度の領域が広く分布していること

がわかる。Elmer と OpenFOAM の離散化手法はそれぞれ有限要素法と有限体積法である。各節点の値を計算する有限要素法に対して、各節点で囲まれたコントロールボリューム内の平均値を計算する有限体積法の違いも結果に影響している。同様の精度でメッシングを行ったとしても壁面における速度が 0 となる境界条件を結果に直接反映する有限要素法と、壁面の条件を計算に反映し直接の出力は行わない有限体積法とでは壁面近傍の速度分布に違いが生じたと考えられる。



(a) Strong FSI



(b) Weak FSI

Fig. 4 Velocity distribution cross-section of descending aorta

6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

現状、Elmer の解析では OpenFOAM-CalculiX に比べ、流体と構造の境界面における圧力や流路内での流速が小さくなる傾向があり、流入境界近傍における各パラメータの勾配も大きいことから妥当性は低いことが示された。Elmer 内部での流体計算を、ソース

コードを精査しながら修正を加えることが解析精度の向上に寄与すると考えられる。

また、今後は実験と FSI 解析と同じ大動脈モデルで実験を実施し、精度を検証する課題が残っている。

大動脈は複雑な形状のため、3 次元デジタル画像相関法技術を導入することにより、精緻な検証を目指す必要があると考える。

7. 研究業績

(1) 学術論文 (査読あり)

(2) 国際会議プロシーディングス (査読あり)

- [1] Ryo Takeda, Kota Kitashima, Hiroichi Yokoyama, Katsuhiko Sasaki, Shinya Honda, Nobuyuki Oshima, Akiyoshi Kuroda, Hideyoshi Takashima, Chenyu Li. T. The challenges of utilizing open-source software for analyzing aortic dissections. JSB2023. 2023. 09.01.

(3) 国際会議発表 (査読なし)

(4) 国内会議発表 (査読なし)

- [1] 船水光太郎、武田量、佐々木克彦、本田真也、横山博一、大島伸行、黒田明慈、高嶋英巖、李辰宇. 大動脈解離評価を目的とした数値解析及び実物大実験モデルによる検証. 第 62 回日本生体医工学会北海道支部大会. 2023.10.21.

(5) 公開したライブラリなど

(6) その他 (特許, プレスリリース, 著書等)