

jh220026

数値シミュレーションを用いた大動脈解離及びその治療方法の評価

武田 量 (北海道大学)

本研究では大動脈解離のリスク及びそ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。ここでは本年度成果について報告する。まず、大動脈の医療用 CT 画像群から形状データを取得した。このデータを汎用の CAD ソフトにより 3 次元の大動脈表面モデルを作成し、上行大動脈・下行大動脈をそれぞれ入口と出口とした流体モデルを構築した。また表面モデルを基に血管壁の有限要素構造モデルを構築した。流体モデルと構造モデルを複数の物理モデルを同時に計算可能なマルチフィジックス解析ソフトウェアで読み込み、ヒト脈動と同じ流速と圧力条件を与えた。これにより心臓脈動時における血流の血管壁への影響を考慮した大動脈の流体-構造連成解析(FSI)を可能とした。本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推定した。また、解析結果の検証を目的として実物大の大動脈モデルでの実験を実施した。

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 (該当するものを残す)

大規模計算科学課題分野

(3) 共同研究分野

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, モデル作成・計算実装

佐々木 克彦 構造解析の評価

大島 伸行 流体解析の実装と評価

横山 博一 大動脈解析の評価

黒田 明慈 流体解析の評価

柴田 良一 構造解析の実装

高橋 裕介 流体解析の実装と評価

高嶋 英巖 構造解析の実装

李 辰宇 流体解析の実装

2. 研究の目的と意義

大動脈解離とは大動脈内膜表面にできた裂け目から血液が中膜に入り込み、大動脈壁が長軸方向に剥がれる疾患である。解離した大動脈は多くの場合、偽腔が拡大して瘤を形成した後で破裂する。発症すると短期間のうちに死亡するリスクの高い病気であるため血管壁が破裂したら直ちに手術を行う必要がある。大動脈解離の治療方法の一つには、カテーテルを用いて損傷部位に自己拡張型金属を編み込んだ人工血管ステントグラフトを留置する手法が存在する。大動脈内に留置されたステントグラフトは新たな血流の導管となり、解離で形成された偽腔への血流を遮断し、破裂のリスクを下げる。しかし、この手法にはステントグラフトが上手く固定されず移動し、人工血管周囲から血液が漏れるエンドリークやステントグラフト自体が折れ曲がって内腔が狭くなってしまいう懸念もある。よって、大動脈解離による死亡を防ぐためには血管径が拡大しそうな箇所や損傷を受けやすい箇所を早期に発見し速やかにステントグラフトを正しく留置することが極めて重要である。しかし、現状の課題として医療現場の多くで使われ

ている CT 画像では血流が血管壁に及ぼす影響が判断できないためこのような血管の状態を見つけ出すことは困難である。また、プログラムコードが多くの場合公開されておらず計算精度の検証が不可能である。血流の影響を計算するには現在の技術では大規模な計算コストがかかる。また、同様の理由によりステントグラフトが正しく留置されているかを治療後に判断することも困難である。そこでモデルを用いた数値計算方法の開発によりこれらのリスク、治療方法を定量的に評価できないかと考えた。

3. 当拠点の公募型研究として実施した意義

研究代表者らは、これまで特に医療応用を目的としたバイオメカニクスの研究を中心に、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。本年度も他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

これまでの課題では大動脈解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。jh210029-NAH ではこれまでの課題を発展して、大動脈解離の①流体-構造連成解析手法の検証と②ステントグラフトを留置した胸部大動脈の解析を実施した。

5. 今年度の研究成果の詳細

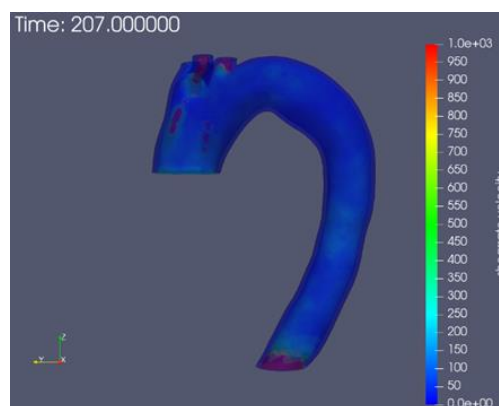
本年度は主に以下の研究成果が得られた：

- [A] 大動脈の形状抽出方法の課題
- [B] 解析モデルの構築
- [C] 実物大の大動脈流路実験

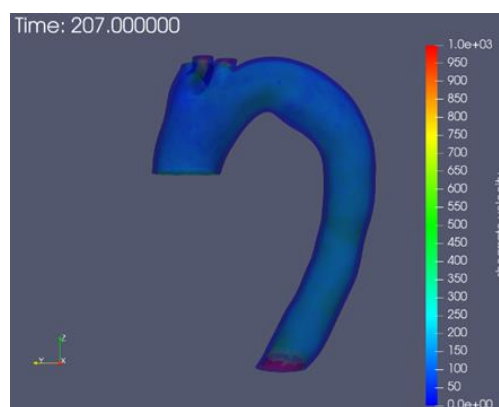
[A] 大動脈の形状抽出方法の課題

流体が構造に与える影響を考慮した流体構造連成解析（FSI 解析）において、解析モデルのジオメトリとメッシュ作成が解析結果に及ぼす影響について調査した。メッシュの要素品質は解析結果に大きく関わ

るため、重要であるものの、解析対象の大動脈は複雑な形状故、整列したメッシュを作成することは困難である。メッシュ作成に対する負担の軽減を目的として、先行研究ではジオメトリ段階の三角形要素を削減していたが、実際の患者の大動脈形状を崩してしまっている問題があったため、元の形状を保ったまま解析精度が向上できるように試みた。本研究で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。結果、用意した6つの大動脈モデルの内 NETGEN が2例、Gmsh で6例解析が成功した。両アルゴリズムで作成された同一モデルメッシュさらに図 1.のように NETGEN では圧力と WSS の結果において上行大動脈部分に不適切と思われる局所値が出現した。以上の結果より、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。



(a) NETGEN



(b) Gmsh

Fig. 1 Wss result comparison of mesh difference.

[B] 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 (図 1.(b) vs 図 2.). 健康モデルでは湾曲部内側の曲率が小さくなる付近や形状が滑らかでなく流路断面が狭まる位置において WSS が大きくなるという点であった. Elmer による解析結果では滑らかな流路における WSS は大部分が 1 Pa 以下であった. 対して OpenFOAM-CalculiX による解析では 3.2 Pa を超えていた. 他の多くのパラメータにおいて Elmer による強連成解析と比べて OpenFOAM-CalculiX による弱連成解析環境の方が大きな数値となっていたが, 周囲との定性比較では該当部が概ね一致していた.



OpenFOAM-CalculiX

Fig. 2 WSS result comparison of FSI type.

[C] 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大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. 図 3.(a) に実験装置の全体図を示す. 実験装置はポンプ, 流量計, 圧力センサ, 流路弁, 変形量測定用のレーザー変位計, 実験モデルおよび測定した各データを記録するソフトウェアで構成される. 図 4.(b) に実験で使用したウレタン製の大動脈モデルを示す. この大動脈モデルは一般的な成人男性の CT データを基に作成されている. 実験で使用する流体は水であり, 血流を模擬した 1 周期 1 s の流れを再現し圧力, 流量, 変形量の測定を行った. また数値解析用の 3 次元モデル作成のために造影剤を水に溶かし実験中の CT 画像を取得した.



(a) aortic flow path



(b) 3D printed healthy aorta

Fig. 3 Experimental setup.

6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

本研究の大動脈解離のリスク及びそ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ため, 今後は医薬品・医療機器等として実用化すること目的した準備を進めている. 本課題で得られた成果の一部を特許申請に使用するため, 本報告では詳細な計算結果や実験データを控えさせて頂いた. 今後は更なる, 医療現場での利用法や認証等の申請の準備のためのデータ取得を目指す.

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)
- (3) 国際会議発表 (査読なし)

(4) 国内会議発表（査読なし）2 件

[1] 北嶋航太, 佐々木克彦, 武田量, 本田真也, 横山博一, 大島伸行, 黒田明慈, 高嶋英巖, 李辰宇. Elmer による胸部大動脈解離を対象とした流体-構造連成解析. 第 35 回計算力学講演会. オンライン. 2022. 11. 17.

[2] 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. 大動脈数値解析評価用の実験プラットフォームの開発. 日本機械学会 第 34 回バイオエンジニアリング講演会 2022. 06. 25.

(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）