

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 27 日現在

機関番号：14303

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25870385

研究課題名(和文)血管壁の粘弾性特性が壁せん断応力に与える影響のバイオメカニクスの解析

研究課題名(英文)Effect of arterial wall viscoelastic properties on wall shear stress distribution

研究代表者

福井 智宏 (Fukui, Tomohiro)

京都工芸繊維大学・機械工学系・助教

研究者番号：00451542

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、血管壁の力学特性が脈波伝播現象に与える影響を考察するために、数値シミュレーション手法の開発ならびに水槽実験装置の開発を行った。
数値シミュレーションにおいては、デカルト座標系にてオイラー的記述による流体-構造連成解析手法の開発を行った。また、これまでの既存のコードを使用した数値解析においては、ALE定式化を施すことにより流体と固体の離散化の結合を行い、脈波伝播に伴う反射波に着目した解析を実施した。
水槽実験においては、シリコンチューブを血管に見立てた脈波伝播現象の再現を試み、脈波伝播速度をMoens-Korteweg式から算出される理論解と比較することにより、計測精度の検証を行った。

研究成果の概要(英文)：Computational and experimental developments for pulse wave propagation phenomenon are conducted to investigate effects of arterial wall viscoelastic properties on wall shear stress distribution.
To solve the interactions between fluid and structure on a Cartesian grid, virtual flux method and regularized lattice Boltzmann method are applied. The commercial code Radioss was also used to solve the interactions by using ALE method.
Pulse wave propagation phenomenon is reproduced using silicon tubes and evaluated in terms of pulse wave velocity to compare that from the Moens-Korteweg equation.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：脈波伝播 壁せん断応力

1. 研究開始当初の背景

動脈硬化症の発症と病変部位の進展には、血行力学的な要因が深く関わっていることが知られている。そのため、3次元的に複雑な血管内の血液流れを詳細に調べることは、動脈硬化症の定量的評価ならびに非侵襲的診断につながる事が期待されており、計算機シミュレーションの生体への適用は有効な手段となる。これまでの先行研究では、主に、Caroらの低ずり応力説に基づき、血液流れに起因する壁面せん断応力分布を計算流体解析により行われてきた。このような流体解析では、一般的に、血管壁が剛体であると仮定することから、壁面せん断応力分布は血液流れのみによって決定される。ところが実際の血管は、心臓から拍出される血液によって大きく拡張し、その振動波は高速度で末梢側へと伝播していることから、より詳細な壁面せん断応力分布を得るためには、血液と血管壁との相互作用的な連成問題を解く必要がある。

申請者の研究グループはこれまでに、3次元流体-固体連成解析により圧力波の伝播に伴う血管壁の変形運動を考慮に入れた脈波伝播解析を行い、血管的の運動が動脈硬化症の好発部位に関わっている可能性を示唆してきた。本研究では、水槽実験により血管を模擬したシリコンチューブの圧力波伝播解析を行い、また、実験結果およびこれまでに得られた生体計測結果を、計算力学解析に組み込むことにより、より詳細な血流解析ならびに壁面せん断応力解析を行い、動脈硬化症の発症と病変部位の進展に関わる要因を統合的に考察する。

2. 研究の目的

脈波伝播に伴う血管壁の運動は、主に、互いに伝播速度の異なる横波（血管の半径方向）と縦波（血管の長軸方向）とがあり、共に壁面せん断応力を変化させる。伝播速度の速い縦波は、血管の分岐部や末梢で反射し、ある軸方向位置において伝播速度の遅い横波と重なる。このとき、血管壁の運動が壁面せん断応力に与える影響が最大となり、そのときの大きさは生体力学的に有意である。生体内においては、例えば、動脈硬化症の好発部位として知られている頸動脈は、大動脈分岐、頸動脈分岐、末梢の脳動脈と複数の主要な反射点に囲まれており、多数の往来する波が存在していると考えられる。これに加え、血管の複雑な幾何学形状や血管壁の局所的な力学特性の違い、血管壁を取り巻く力学環境の違いが、脈波伝播現象をさらに複雑にしている。

本研究では、血管壁の力学特性ならびに血管壁を取り巻く力学環境に着目し、血管壁の粘弾性特性が脈波伝播および脈波波形に与える影響を考察するために、血管を模擬したシリコンチューブを用いた水槽実験を行う。このような水槽実験から得られたデータを、

計算力学解析における境界条件にフィードバックさせることで、より生体内に近い力学環境をコンピュータ上に構築し、これまでに得られた生体計測結果とを合わせることで、より、より詳細な血流解析ならびに壁面せん断応力解析を行う。

3. 研究の方法

(1) 水槽実験

シリコンチューブを用いた模擬血管壁による水槽実験装置の開発を行う。チュービングポンプ（ニイガタ株式会社）を用いて任意の拍動数にて流体の駆出を行い、シリコンチューブに圧力波を与える。このとき、圧力波をひずみゲージ（株式会社東京測器研究所、GFLA-3-70-3LT）により測定し、PCコントロール型動ひずみ測定器（株式会社東京測器研究所、DC-004P）を用いてサンプリング周波数 12,500 Hz にてデータを取得する。取得したデータからノイズ成分を除去するために離散フーリエ変換を行い、圧力波データのスペクトラムを調べる。脈波伝播速度の計測においては、2点間にて伝播時間差を求めることにより算出する。また、脈波伝播に伴う粘性散逸の評価としては、フーリエ解析におけるスペクトルの振幅を一つの指標とする。

(2) 計算力学解析

水槽実験と同等な計算解析モデルをコンピュータ上に構築し、水槽実験で得られた計測結果を適用する。ゴムチューブの力学特性のモデル化は、圧力波伝播に伴うシリコンチューブのひずみ速度と、脈波解析によるエネルギー散逸評価を基に、フォークトモデルによる粘弾性体を考える。また結合組織のモデル化にも、線形バネとダッシュポットとの組み合わせによる表現を考える。流体と固体との境界におけるセルはALE定式化による離散化の結合を行う。これにより流体と固体との相互作用を解き、脈波伝播現象を再現する。

また、これまでに確立してきた計算手法の他にも、流体と固体との連成問題を解く新しい計算手法の開発を行う。前述のALE定式化による直接的な計算手法は、血管の大変形を伴うような解析において多大な計算時間を要する。そこで、デカルト座標系にてオイラー的記述による流体-構造連成解析手法を開発し、任意物体形状まわりの流動現象解析を可能とする仮想流束法や、計算の安定性と精度を向上させることが可能な正規化格子ボルトマン法を組み込むことにより、脈波伝播解析ならびに壁面せん断応力解析に適用する。

4. 研究成果

水槽実験より得られた圧力波形（生データ）を図1に示す。脈波伝播速度の算出には、これらの波形の伝播時間差を求める必要があるが、図1からもその決定は容易ではない。特に、脈波伝播速度は生体内においては10

m/s にも及び、その高精度な計測は非常に困難である。本解析では、計測精度の向上を目指し、これらの波形にDFT解析を施し、ノイズ成分のみを効果的に除去する方法を採用した。ノイズ除去後の圧力波形を図2に示す。これにより、伝播時間差を精度良く計測することが可能となり、本実験での脈波伝播速度は 57.70 ± 3.77 m/s と求まり、シリコンチューブの参考ヤング率（ショア A:54 より約 20MPa と算出）を考慮に入れた解析解 56.20 m/s と比べて数%の誤差で求めることができた。また、粘性散逸の評価としては、DFT解析におけるスペクトルの振幅を用い、後述の数値解析結果と定性的に一致することを確認した。

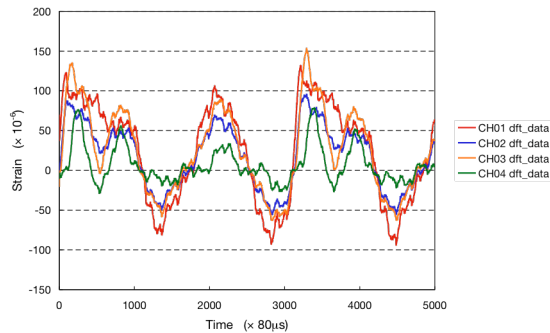


図1 圧力波形（生データ）

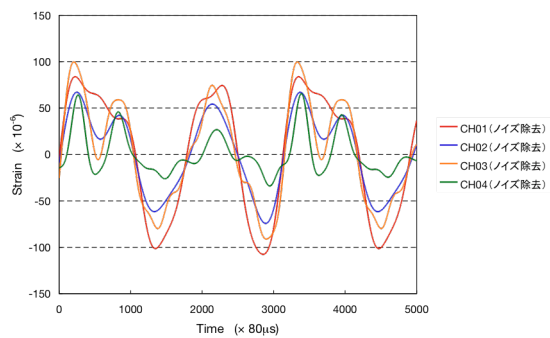


図2 圧力波形（ノイズ除去後）

水槽実験から得られたデータを参考に、数値シミュレーションによる脈波伝播解析を行った。流体と構造との安定的な連成解析を可能にするために、流体には僅かな圧縮性を考慮に入れた。離散化の結合にはALE定式化を用い、解析コードにはAltair社製Radiossを使用した。これにより、入口境界において与えた単一の矩形波が圧縮波を伴いながら伝播する現象の再現を行った（図3）。

血管壁面せん断応力解析をデカルト格子上で精度良く行うために、仮想流束法ならびに正規化格子ボルツマン法を用いた。仮想流束法は、デカルト格子上で任意物体形状を表現するための手法であり、界面上に流体力学的な境界条件を与えることが特徴であり、他の手法と比べて、比較的粗い格子においても計算精度が下がりにくいという利点

がある。これらの手法を組み込むことにより、大動脈内流れ解析を行った。計算モデルは、医用画像より中心軸を抽出することにより作成した。また、各モデルの幾何学形状を曲率と振率の2つのパラメータにより評価することにより、それらの大きさが内部流れやせん断応力分布に与える影響を詳しく調べた（図4）。

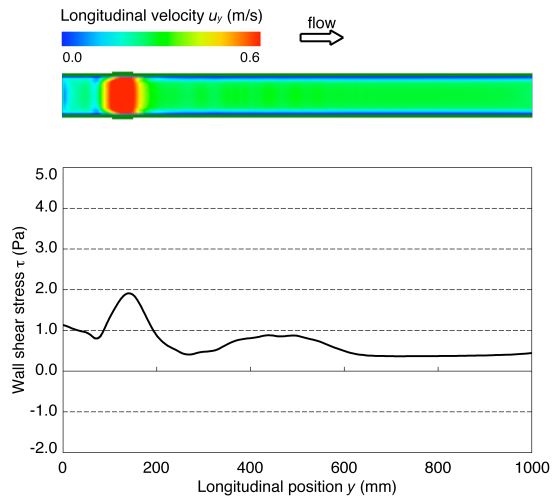


図3 脈波伝播解析

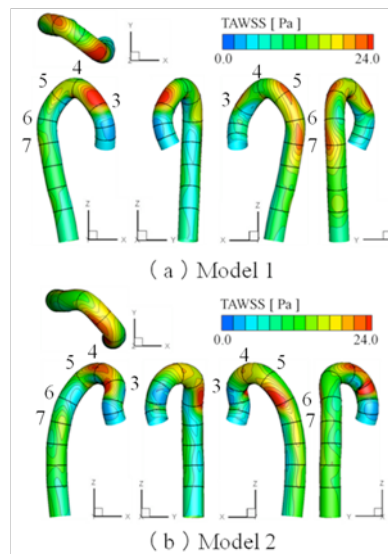


図4 せん断応力解析

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計4件）

- ① 浅間浩明, 福井智宏, 木村学, 糸井利幸, 森西晃嗣, 大血管転換術が胸部大動脈の血行力学におよぼす影響の数値解析, *ながれ*, 34(2), pp. 167-174, 2015, 査読有り.
- ② Muhammad Izham, Tomohiro Fukui, and Koji Morinishi, Simulation of Three-dimensional Homogeneous Isotropic Turbulence using the Moment-based Lattice Boltzmann Method and LES

-Lattice Boltzmann Method, Journal of Fluid Science and Technology, 9(4), pp. 1-13, 2014, 査読有り.

DOI: 10.1299/jfst.2014jfst0064

③ 浅間 浩明, 福井 智宏, 木村 学, 糸井 利幸, 森西 晃嗣, 大血管転換術後の胸部大動脈における血液流れの数値解析, 日本 VR 医学会誌, 12(1), pp. 1-8, 2014, 査読有り.

④ Tomohiro Fukui, and Koji Morinishi, Influence of Vortices in the Sinus of Valsalva on Local Wall Shear Stress Distribution, International Journal of Life Science and Medical Research, 3(3), pp. 94-102, 2013, 査読有り.

DOI: 10.5963/LSMR0303002

[学会発表] (計 5 件)

① Tomohiro Fukui and Koji Morinishi, 2-D Numerical Study on the Depth Filtration by Virtual Flux Method, IV International Conference on Particle-Based Methods. Fundamentals and Applications, September 28-30 2015, Barcelona (Spain).

② Tomohiro Fukui, Hiroaki Asama, Manabu Kimura, Toshiyuki Itoi, and Koji Morinishi, Influence of Geometric Change of the Thoracic Aorta due to Arterial Switch Operation on Wall Shear Stress Distribution, 27th International Conference on Parallel Computational Fluid Dynamics, May 17-20 2015, Montreal (Canada).

③ Tomohiro Fukui and Koji Morinishi, Blood Flow Simulation in the Aorta related to Initiation and Progression of the Aortic Valve Stenosis, The 10th International Conference for Mesoscopic Methods in Engineering and Science, July 22-26 2013, Oxford (United Kingdom)

④ Tomohiro Fukui and Koji Morinishi, Blood Flow Simulation in the Aorta passing through the Aortic Orifice by Virtual Flux Method, 3rd South-East European Conference on Computational Mechanics, June 12-14 2013, Kos Island (Greece).

⑤ Tomohiro Fukui and Koji Morinishi, Blood Flow Simulation in the Aorta with Aortic Valves using the Regularized Lattice Boltzmann Method with LES Model, Fluid Structure Interaction 2013, April 10-12 2013, Gran Canaria (Spain).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.feslab.kit.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福井 智宏 (FUKUI, Tomohiro)

京都工芸繊維大学・機械工学系・助教

研究者番号: 00451542