

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500130

研究課題名(和文)大動脈弁にかかる応力分布の可視化に関する研究

研究課題名(英文)A Study on Visualization of Stress Distribution loaded on the Aortic Valve

研究代表者

向井 信彦(MUKAI, NOBUHIKO)

東京都市大学・知識工学部・教授

研究者番号：20350233

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、人体内の最も太い血管である大動脈内の血流と大動脈弁の開閉シミュレーションを行うことで、大動脈弁にかかる応力の分布を可視化することを目的としている。このため、大動脈壁や大動脈弁という弾性体と、血液である流体を共に粒子でモデル化し、流体の支配方程式を流体だけでなく、弾性体にも適用できるように工夫することで、大動脈内の血流と大動脈弁の開閉シミュレーションを行った。また、シミュレーション結果を基に、テンソルである応力をスカラー量に変換し、コンピュータグラフィクス技術を用いることで大動脈弁にかかる応力の分布を可視化することを可能とした。

研究成果の概要(英文)：The purpose of the research is to visualize the stress distribution loaded on the aortic valve by using the simulation results for the blood flow and the opening/closing of the aortic valve, which are in the aorta that is the biggest blood vessel in our body. Then, we have generated simulation models with particle for both elastic body such as the aorta and the aortic valve, and fluid that is blood, and then performed the simulation of the blood flow and the opening/closing of the aortic valve by applying the governing equations of fluid with some arrangement to not only fluid but also elastic body. In addition, we have succeeded in visualization of the stress distribution loaded on the aortic valve with computer graphics by translating the tensor of the stress, which is obtained by the simulation, to a scalar.

研究分野：画像工学

キーワード：シミュレーション グラフィクス バーチャルリアリティ 医療応用

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、コンピュータグラフィックス(CG)やバーチャルリアリティ(VR)技術を利用した様々な医療システムが開発されている。例えば、一般的な臓器モデルを基にして手術練習を行う手術シミュレータ、個々の患者の症例データを基にした術前計画(手術シミュレーション)、手術中に術者の支援を行う手術ナビゲータなどがある。これらの医療システムは、様々な研究機関で開発されており、例えば、東京慈恵会医科大学では肝臓に触れた感触を体験できる肝臓の手術練習システムや、日本とドイツのような遠隔地で実手術の映像を伝送できる手術支援システムを開発している。また、名古屋大学では医療画像から構築した人体内のCGモデルを用いて体内を観察できる仮想内視鏡を、さらに、大阪大学では実患者のデータを用いた人工股関節手術の術前計画システムを開発している。このように、各研究機関では、脳、目、鼻、歯、心臓、肺、肝臓、骨など人体のあらゆる部位に対する手術支援システムを開発している。

(2) 一方、人体のあらゆる部位には手術対象となる臓器だけでなく、血管も存在する。しかしながら、血管を対象とした医療システムは従来あまり開発されてこなかった。そこで我々は血管を対象として、「手術シミュレータを対象とした血管の変形と出血の同時処理における高速化に関する研究(科研費番号19500112, 2007年~2008年)」、「手術シミュレータ向け血管内圧力を考慮した血管の変形方式(科研費番号21500125, 2009年~2011年)」を行ってきた。これらの研究により、手術シミュレータで術具が血管に触れた際における血管の変形と、血管に傷がついた際の血管からの出血を同時に、しかも高速に処理することが可能となった。また、術具が血管に触れた際における血管の変形では血管内における圧力を考慮することにより、あたかも血管内に血液が流れており、その血流からの圧力を考慮したかのような変形が可能となった。つまり、血管内を空洞としてモデル化しても血管内に血流がある場合と同等な変形が可能となり、高速処理を実現することができた。

## 2. 研究の目的

これまでの研究成果により、一般的な血管の高速変形が可能となった。そこで、人体内の最も太い血管である大動脈を対象とした手術シミュレーションを研究の目的とした。大動脈の手術としては、大動脈内にある大動脈弁を対象とした大動脈弁置換術や大動脈弁形成術がある。これらは、機能が低下した大動脈弁を人工弁と置換したり、あるいは生体弁の一部を変形したりすることで大動脈弁の機

能を回復する手術である。これらの手術を行うためには、大動脈内を流れる血流のシミュレーションを行い、血流からの圧力により大動脈弁が開閉すると共に、血流により大動脈弁にかかる負荷、つまり、応力を調べる必要がある。さらに、これらのシミュレーション結果を手術に活かすためには、シミュレーションで得られた大動脈弁にかかる応力の分布をコンピュータグラフィックス技術を用いて可視化することが重要である。

## 3. 研究の方法

(1) 本研究の目的である、大動脈内における血流と血流により生じる大動脈弁の開閉動作をシミュレーションするためには、これらの対象物質、つまり、流体である血液と弾性体である大動脈壁や大動脈弁を同一の方程式で解析できるようにシミュレーションモデルを構築する必要がある。通常、弾性体の解析には有限要素法が用いられる。しかしながら、大動脈内を流れる血液は大動脈弁の開閉により連続体としての性質が失われる。有限要素法は連続体の解析に有効な手段であるが、非連続体の解析にはあまり有効ではない。このため、血液の解析手法として有限要素法を適用することは好ましくない。一方、流体の解析には流体を細かな粒子の集合として解析する粒子法が用いられる。粒子法は連続体でも非連続体でも解析可能な手法であり、また、血液のように周囲環境の形状により形を大きく変える物質の解析には有効な手法である。同様な手法として、解析空間を細かな小空間に分割して各空間における物理量を解析する格子法もあるが、空間全体に渡る物理量の保存に大量の計算リソースを必要とする。そこで、本研究では大動脈壁や大動脈弁という弾性体と血液流体を同時に解析する手法として粒子法を採用し、対象物質を粒子でモデル化する。さらに粒子法もSPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)法とMPS(Moving Particle Semi-implicit)法の2種類に大別されるが、本研究で対象とする血液は非圧縮性の流体であるため、非圧縮性流体の解析用に開発されたMPS法を採用する。

(2) 大動脈壁や大動脈弁という弾性体と血液流体を同じ粒子でモデル化することにより、同一の方程式が適用できる。本研究では、大動脈内における血液の流れが基になって、大動脈弁の開閉動作が行われる様子をシミュレーションすることが目的であるから、流体の支配方程式である、連続の式とナビエ・ストークスの方程式を採用する。ただし、同じ粒子でモデル化したものの、弾性体と流体とは元々異なる物質であるから、物質の特性を反映した方程式を解く必要がある。そこで、

ナビエ・ストークスの元になるコーシーの運動方程式を採用し、コーシーの運動方程式の応力項に弾性体と流体とは異なる応力と歪の関係式(構成方程式)を適用する。この結果として得られる、ナビエ・ストークスの方程式を血液に、また、コーシー・ナビエの方程式を弾性体に適用する。式(1)に連続の式を、また、式(2)にコーシーの運動方程式を示す。

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{K} \quad (2)$$

ただし、 $\rho$  は密度、 $t$  は時間、 $\mathbf{u}$  は物質の速度、 $\boldsymbol{\sigma}$  は応力、 $\mathbf{K}$  は単位質量当たりの体積力である。式(2)の応力項 $\boldsymbol{\sigma}$ に対して、式(3)~(6)で示す弾性体の構成方程式を代入すると、式(7)に示すコーシー・ナビエの方程式が得られる。

$$\boldsymbol{\sigma}_e = \lambda \text{tr}(\boldsymbol{\varepsilon}) \mathbf{I} + 2G \boldsymbol{\varepsilon} \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^t) \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (5)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (6)$$

$$\rho \frac{D^2 \mathbf{u}}{Dt^2} = (\lambda + G) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) + G \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{K} \quad (7)$$

ただし、 $\boldsymbol{\varepsilon}$  はひずみ、 $\mathbf{I}$  は単位行列、 $\lambda$  および  $G$  はラメ定数、 $E$  はヤング率、 $\nu$  はポアソン比である。同様に、式(2)の応力項 $\boldsymbol{\sigma}$ に対して、式(8)~(9)で示す流体の構成方程式を代入すると、式(10)で示すナビエ・ストークスの方程式が得られる。ただし、 $\mu$  は粘性係数である。

$$\boldsymbol{\sigma}_v = -p \mathbf{I} + 2\mu \mathbf{D} \quad (8)$$

$$\mathbf{D} = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^t) \quad (9)$$

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{K} \quad (10)$$

(3) 上記シミュレーションの結果、血流により大動脈弁の開閉動作時に大動脈弁にかかる応力を計算することができる。しかしながら、求められる応力はテンソルであるため、

方向を考慮した表示は困難である。また、例え方向を考慮した応力の表示を行ったところで、表示が煩雑になり、逆に視認性を悪くする。そこで、テンソルをスカラーに変換し、変換されたスカラー値に応じた色を表示する。 $(x, y, z)$  3次元空間における応力テンソルの各値 $\sigma_{ij}$  ( $i, j = x, y, z$ ) とこれらのテンソル値をスカラー変換した値 $\sigma_{VM}$  との関係は以下のとおりである。

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 3(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2 + \sigma_{yx}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2 + \sigma_{zy}^2) \right\}} \quad (11)$$

#### 4. 研究成果

##### (1) シミュレーションモデルの作成

大動脈内の血流と血流による大動脈弁の開閉動作をシミュレーションするためには、大動脈壁と大動脈弁のシミュレーションモデルが必要である。そこで、人体のX線CTデータから大動脈を抽出した。元になる胸部X線CTデータと抽出された大動脈の3D表示を図1に示す。赤い部分が抽出された大動脈である。



図1 胸部X線CTデータの3D表示

しかしながら、大動脈内の血流シミュレーションを行うためには大動脈を画像として抽出するのではなく、シミュレーションモデルとして構築する必要がある。また、本研究では粒子法を用いた解析を行うため、血液だけでなく、大動脈壁や大動脈弁という弾性体も粒子でモデル化する必要がある。さらに、大動脈壁はX線CTデータから抽出できるが、大動脈弁はX線CTにほとんど撮像されない。超音波を用いれば撮像は可能であるが、超音波画像にはノイズが多く、正確な大動脈弁のシミュレーションモデルを構築することは

困難である。そこで、X線CTデータ、超音波画像などを基に大動脈弁周辺の粒子モデルを作成した。作成された大動脈壁と大動脈弁のモデルを図2に示す。なお、本モデルは医療データを基にモデリングソフトウェアを用いてポリゴンとして構築されたモデルに対して、ポリゴンで挟まれた部分に粒子を充填する方法で作成した。ポリゴンで挟まれた部分の判断は深度剥離法を用いている。

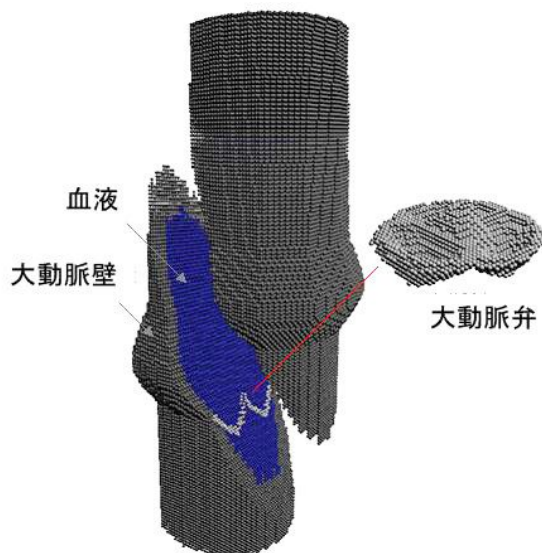


図2 シミュレーションモデル

## (2) 血流と大動脈弁の開閉シミュレーション

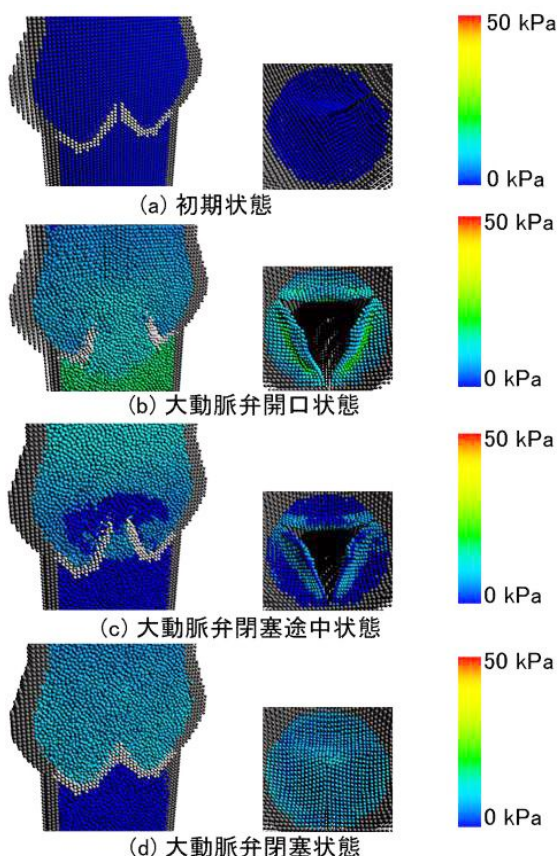


図3 シミュレーション結果

上記シミュレーション用粒子モデルを用いて、血流と大動脈弁の開閉シミュレーションを行い、シミュレーションで得られた大動脈内の圧力と大動脈弁にかかる応力を可視化した。結果を図3に示す。

大動脈の下側が左心室であり、上側が上行大動脈である。シミュレーション開始時期は左心室側も上行大動脈側も圧力は同じ0[kPa]としておく(図3(a))。次に、血液粒子を左心室側から上行大動脈側に向けて1[m/s]で流入させると、血液の流入に伴って大動脈弁には圧力がかかり、一定以上の圧力がかかると大動脈弁が開く(図3(b))。このときの左心室側の圧力は約20kPaであり、大動脈弁には約10[kPa]の応力がかかっている。血液が左心室側から上行大動脈側に流れると左心室側にあった血液粒子の数が減少し、粒子が完全になると左心室側の圧力はほぼ0[kPa]となると同時に、上行大動脈側に流れた血液粒子の一部が反射により左心室側に戻ってくる。つまり、血液が上行大動脈側から左心室側へ逆流し始める。血液が逆流し始めると大動脈弁が外側から内側に向かって血液粒子によって押されるため、大動脈弁が閉じ始める。このとき、大動脈弁にかかる応力は開口時の圧力よりも低い(図3(c))。大動脈弁が完全に閉じると血液の漏れはなく、左心室側に血液粒子がなければ左心室側の圧力はほぼ0[kPa]となるが、上行大動脈側の圧力は0ではないため、血液を漏れさせないために、大動脈弁には約15[kPa]の応力がかかっている(図3(d))。

なお、シミュレーションはCore2Quad Q9660のCPU、GeForce GTX 460のGPUを搭載したPCで実行したところ、1ステップ(実時間で約0.2[ms]に相当)当たりのシミュレーション時間は約1[s]であった。つまり、実時間で1[s]に相当するシミュレーションには約5,000ステップ(5,000[s])の処理時間が必要である。

## 4. 成果の位置付けと今後の展望

従来の研究では、人体のあらゆる部位に存在する血管を対象とし、術具が血管に触れた際の変形と血管が傷ついた際の出血について高速処理手法を検討してきたが、本研究では血管そのものの手術を対象とした検討を行った。人体にある最も太い血管は大動脈であるから、大動脈を対象とし、大動脈内にある弁が正常に機能するかどうかのシミュレーションを行った。この結果、従来では対象とされていなかった血管が、本研究により手術シミュレーションの対象となり、今まであまり研究されてこなかった大動脈弁の手術シミュレーションが可能となった。

しかしながら、本研究は大動脈弁形成手術



を対象とはしているものの、まだまだ不十分な点も多い。例えば、シミュレーションの対象としている大動脈壁や大動脈弁のモデルも X 線 CT データを元にしていない。また、症例のある実データそのものではない。また、左心室から上行大動脈へ流れる血流も一定であり、心臓の拍動に応じた速度を与えてはならない。さらには、シミュレーションモデルは左心室の出口から上行大動脈の入口までのほぼ直線部分のみである。したがって、今後は症例患者の実データや、心臓の拍動、さらには心臓全体を考慮したシミュレーションを行う必要がある。

## 5. 主な発表論文等

### [雑誌論文](計 8 件)

Nobuhiko Mukai, Yusuke Abe, Youngha Chang, Kiyomi Niki, and Shuichiro Takanashi, "Visualization of Pressure and Stress Distributions in Aortic Valve Simulation by Considering Heart's Pulsation and Axial Flow", The Journal of the Society for Art and Science, Vol.14, No.1, pp.1-8, 平成 27 年 (2015 年) 査読有 <http://www.art-science.org/journal/v14n1/>

向井信彦, 中川真志, 張英夏, 仁木清美, 高梨秀一郎, "粒子法による大動脈弁の開閉シミュレーション", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.18, No.4, pp.447-453, 平成 25 年(2013 年), 査読有 Nobuhiko Mukai, Yoshihiro Tatefuku, Youngha Chang, Kiyomi Niki, and Shuichiro Takanashi, "Automatic Extraction of the Aorta and The Measurement of Its Diameter", British Journal of Medicine & Medical Research, Vol.4, No.2, pp.671-682, 平成 25 年(2013 年), 査読有

Masashi Nakagawa, Nobuhiko Mukai, Kiyomi Niki, and Shuichiro Takanashi, "Particle Based Visualization of Stress Distribution Caused by the Aortic Valve Deformation", ECTI Transactions on Computer and Information Technology, Vol.6, No.1, pp.33-39, 平成 24 年(2012 年), 査読有

Nobuhiko Mukai, Yoshihiro Tatefuku, Kiyomi Niki, and Shuichiro Takanashi, "Construction Method of 3D Aorta Model", Journal of Mathematics and System Science, Vol.2, No.4, pp.272-279, 平成 24 年(2012 年), 査読有

### [学会発表](計 22 件)

Nobuhiko Mukai, Yusuke Abe, Youngha Chang, Kiyomi Niki, and Shuichiro Takanashi, "Aortic Valve Simulation by Considering Heart's Pulsation and Axial

Flow", NICOGRAPH International 2014, pp.18-22, May 31<sup>st</sup> 2014, Visby(Sweden)  
Nobuhiko Mukai, Yusuke Abe, Youngha Chang, Kiyomi Niki, and Shuichiro Takanashi, "Particle Based Simulation of the Aortic Valve by Considering Heart's Pulsation", Medicine Meets Virtual Reality 2014, IOS Press, pp.285-289, Feb. 21<sup>st</sup> 2014, Los Angeles(USA)

Nobuhiko Mukai, Yusuke Abe, Youngha Chang, Kiyomi Niki, and Shuichiro Takanashi, "Aortic Valvular Simulation based on Heart's Pulsation", Official Journal of the Society for Medical Innovation and Technology, Vol.22, Supplement 1, Sep. 6<sup>th</sup> 2013, Baden-Baden(Germany)

Nobuhiko Mukai, Masashi Nakagawa, Yusuke Abe, Youngha Chang, Kiyomi Niki, and Shuichiro Takanashi, "Simulation of the Aortic Valve Deformation by Considering Blood Flow Reflection", Medicine Meets Virtual Reality 2013, IOS Press, pp.286-292, Feb. 21<sup>st</sup> 2013, Sandiego(USA)

阿部雄介, 張英夏, 向井信彦, "粒子法による大動脈弁の開閉シミュレーション", 日本生体医工学会, 生体医工学シンポジウム, pp.264-266, 平成 24 年(2012 年)9 月 7 日, 大阪大学(大阪)

Nobuhiko Mukai, Masashi Nakagawa, Kiyomi Niki, and Shuichiro Takanashi, "Visualization Method of Pressure and Stress inside the Aorta", Society for Medical Innovation and Technology, O-19, Feb. 20<sup>th</sup> 2012, Barcelona(Spain)

### [その他]

ホームページ

URL: <http://www.vgl.cs.tcu.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

向井 信彦 (MUKAI Nobuhiko)  
東京都市大学・知識工学部・教授  
研究者番号: 20350233

### (4) 研究協力者

中川 真志 (NAKAGAWA Masashi)  
東京都市大学大学院・工学研究科・博士後期課程

阿部 雄介 (ABE Yusuke)  
東京都市大学大学院・工学研究科・博士前期課程