

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25286098

研究課題名(和文) 粒子法シミュレーションを用いた肺の呼吸性移動の研究

研究課題名(英文) Study of Respiratory Lung Motion Using Particle Method Simulation

研究代表者

越塚 誠一 (Koshizuka, Seiichi)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80186668

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：粒子法固体解析手法を用いて、肺の呼吸性移動のシミュレーション技術を開発した。具体的には、胸郭の運動モデル、横隔膜の運動モデル、肺モデルを作成し、これらを組み合わせ、計算結果は医用画像と比較してその妥当性確認を行った。おおむねよい一致が見られた。しかしながら、肺外面と胸郭内面のすべりが再現できていないという問題が残った。粒子法による生体力学シミュレーションとしては、他に三半規管内のリンパ液の流動解析および嚥下と誤嚥の解析も行った。粒子法の計算精度の向上のため、高次精度粒子法空間離散化スキーム、これを対流項に用いる任意ラグランジュ-オイラー法、ポリゴンを用いた壁境界条件の研究も行った。

研究成果の概要(英文)：A simulation technology for respiratory lung motion is developed by using a particle method for solid mechanics. A motion model of the rib cage, a motion model of the diaphragm and a lung model are constructed and combined. The numerical results are validated by comparing with the medical images. Overall agreement is good. However a problem of sliding between the outer surface of the lungs and the inner surface of the rib cage is not solved. As the applications of the particle method to biomechanics, lymph flow in the semicircular canal, and swallowing and aspiration are analyzed. To improve the accuracy of the particle method, higher-order spatial discretization schemes, Arbitrary Lagrangian-Eulerian method employing the above schemes in the convection term, and wall boundary conditions using polygons.

研究分野：計算力学

キーワード：計算力学 生体力学 粒子法 肺がん 放射線治療 高精度スキーム 境界条件

1. 研究開始当初の背景

粒子法はメッシュを用いない連続体のシミュレーション手法であり、これまで研究代表者は Moving Particle Semi-implicit (MPS) 法と名づけた粒子法を新たに考案し研究を進めてきた。粒子法はメッシュを必要としないため界面や表面の大変形を扱いやすく、また、医用画像のようなノイズを多く含む場合にもロバストに解析が可能であると考えられる。そのため、これまで MPS 法を用いた固体解析として主に生体力学への適用を行ってきた。

日本では肺がんはがんの中でも最も死亡者数が多く、治療法の進歩が強く望まれている。肺がんの放射線治療では、照射中に呼吸により肺が変形し、肺がんが移動してしまうため、患部に照射を集中することに困難があった。肺の呼吸性移動を精度良くシミュレーションできるようになれば、これと放射線治療を組み合わせ、より患部に照射を集中させることができるようになることが期待できる。

2. 研究の目的

そこで、MPS 法による固体解析を用いて、肺の呼吸性移動を精度良く計算する技術を開発する。具体的には、肺モデル、横隔膜の運動モデル、胸郭の運動モデルを開発し、これらを組み合わせて肺の呼吸性移動のシミュレーションを行う。さらに、粒子法の計算精度を向上させるための離散化に関する基礎的な研究も行う。

3. 研究の方法

(1) 肺モデルの開発

肺は柔らかい一様な弾性体としてモデル化する。形状は患者の CT 画像から作成する。医用画像には東京大学医学部付属病院放射線科の中川恵一先生に協力いただく。

(2) 呼吸の運動モデルの開発

横隔膜と胸郭の運動によって肺が受動的に変形することで呼吸が生じる。そこで、横隔膜と胸郭の運動モデルを開発する。どちらも医用画像に基づいて、患者の特徴が反映できるようにする。

(3) 医用画像との比較によるシミュレーションの妥当性確認

CT による医用画像データとの比較により、本研究で開発したシミュレーションの妥当性確認を行う。

(4) 粒子法の高精度化

粒子法の高精度化に関する基礎的な研究を行う。

4. 研究成果

(1) 肺モデルの開発

CT の医用画像(DICOM 形式)を用いて、患者の肺形状に従って肺モデルを構築できる

ようにした。また、モーフィングの技術を使って、ノイズなどによって生じた肺内部の空洞部を粒子で埋めるような処理を加え、肺形状に合わせた粒子配置ができるようにした。

さらに、肺の変形の計算結果を、元の医用画像を変形することで表示できよう技術を開発し、あたかも呼吸性移動を医用画像として観察しているかのような映像を作成できるようにした。

(2) 呼吸の運動モデルの開発

胸郭の運動モデルとして、まず肋骨の形状を医用画像を元に作成する。次に、胸椎と肋骨の接合部が回転するとし、その回転軸を呼吸と吸気の医用画像より与える。すなわち、各肋骨の回転はポンプハンドル運動とバケットハンドル運動の組み合わせとして、それぞれの運動の大きさを医用画像より決定する。しかしながら、本モデルでは肋骨全体を剛体として扱っているが、実際には一部が軟骨で呼吸中に変形するため、計算モデルとして不整合が生じてしまうという問題がある。

次に横隔膜の運動モデルを作成した。通常、横隔膜は胸部を撮影した医用画像には全体が写っていない。そこで、一般的な人体モデルから横隔膜の形状を作成し、医用画像に写っている部分のみを患者特有の形状としてモデル化し、写っていない部分は一般的な人体モデルの横隔膜を変形させることで患者の形状に接続した。また、横隔膜の材料物性には硬い部分と柔らかい部分の2種類があるとした。ただし、横隔膜の運動は完全に強制変位を与えることで実現しており、腹部との相互作用は考慮していない。

(3) 医用画像との比較によるシミュレーションの妥当性確認

上記の肺モデル、胸郭の運動モデル、横隔膜の運動モデルを組み合わせて(図1)、肺の呼吸性移動のシミュレーションを行った。医用画像には肺の中の気管などが写っていて、コントラストにより肺の各部分が呼吸にそこで、医用画像より移動が追跡できる特徴的な複数の場所について、シミュレーション

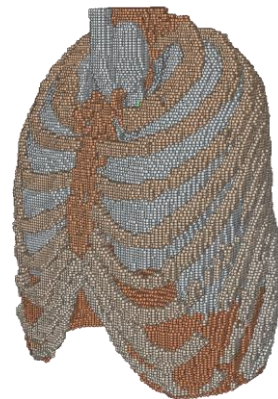


図1 肺、横隔膜、および胸郭を合わせたモデル

結果と医用画像を比較した。なお、比較は最大呼気と最大吸気の間での移動によって行った。

全般的にシミュレーション結果は医用画像をよく再現した。特に、肺の上部では呼吸性移動はあまり大きくなく、肺の下部では横隔膜の運動に近い体長方向への大きな移動が現れた。しかしながら、背面近くでの定量的な一致が悪かった。これは、シミュレーションでは肺の外面を胸郭の内面に固定し、胸郭を運動させることで肺を動かしているが、実際には肺の外面と胸郭の内面は滑っているためである。現状では変形を計算しながら複雑な曲面の間の滑りをシミュレーションすることは難しく、今後の課題である。

(4) 粒子法の高精度化

テイラー展開と最小二乗法を基に、ランダムな粒子配置から任意の空間精度で空間微分を計算できる一般的なスキーム(SLSMPS)を開発した。さらに、差分法で用いられているコンパクトスキームを粒子法においても取り入れ、この場合はより少ない粒子数で高次精度の空間微分を得ることができる。本手法を用いてテスト問題の空間離散化に対する収束性を計算し、理論通りの収束性能が得られていることを確認した(図2)。

この他、上記の高精度スキームを対流項の離散化に適用することで、任意ラグランジュ-オイラー(ALE)法を構築した。本手法を用いると、定常問題に対して差分法と同程度の高い計算精度が得られ、従来、粒子法が不得意とされていた定常問題にも粒子法が有用であることが示された。また、壁粒子を削減して3次元複雑形状を効率的に計算するために、壁境界を粒子ではなくポリゴンで表現できる壁境界条件の改良を行った。

(5) その他の生体力学シミュレーション

肺の呼吸性移動以外の生体力学シミュレーションにも、本研究の成果に基づいて粒子法を適用した。具体的には、三半規管内のリンパ液の流れのシミュレーションおよび嚙下と誤嚥のシミュレーションである。

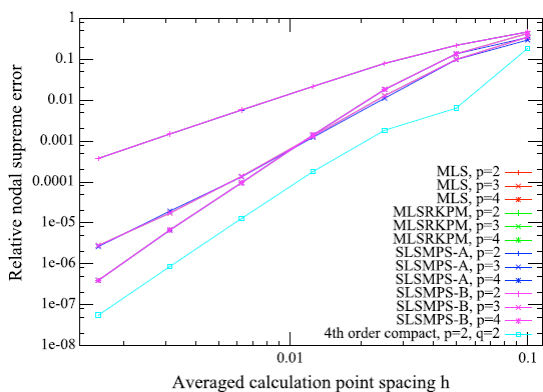


図2 高次精度粒子法(SLSMPS)における空間離散化の収束性

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件)

- ① T. Zhang, S. Koshizuka, K. Murotani, K. Shibata and E. Ishii, "Improvement of Pressure Distribution to Arbitrary Geometry with Boundary Condition Represented by Polygons in Particle Method" *Int. J. Num. Methods Eng.*, 査読有, (2017). DOI: 10.1002/nme.5520
- ② F. Hu, T. Matsunaga, T. Tamai and S. Koshizuka, "An ALE Particle Method Using Upwind Interpolation" *Computers & Fluids*, 査読有, **145**, 21-36 (2017). DOI: 10.1016/j.compfluid.2016.12.011
- ③ T. Tamai, K. Murotani and S. Koshizuka, "On the Consistency and Convergence of Particle-based Meshfree Discretization Schemes for the Laplace Operator" *Computers & Fluids*, 査読有, **142**, 79-85 (2017). DOI: 10.1016/j.compfluid.2016.02.012
- ④ 大倉孝之, 伊藤広貴, 越塚誠一, 野元昭弘, 芳賀昭弘, 中川恵一, "胸郭運動を考慮した横隔膜の運動モデル" *Medical Imaging Technology*, 査読有, **31**, 189-197 (2013). DOI: 10.11409/mit.31.189

[学会発表] (計 3 6 件)

- ① S. Koshizuka, "Moving Particle Semi-implicit Method in Computational Fluid Dynamics: Basic Studies and Application to Industry" 12th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XII), 6th Asia-Pacific Conference on Computational Mechanics (APCOM VI), Seoul (Korea), July 24-29, 2016, 152445. [plenary]
- ② S. Koshizuka, R. Shino, T. Okura, C. Chen and T. Kikuchi, "Biomechanics of Soft Tissues using Moving Particle Simulation" 6th International Conference on Computational Methods (ICCM2015), Auckland (New Zealand), July 14-17, 2015, 487. [Thematic Plenary]
- ③ C. Chen, T. Tamai, K. Shibata and S. Koshizuka, "Simulation of Endolymph Flow Dynamics in the Human Semicircular Canals Based on Magnetic Resonance Images Using the Moving Particle Semi-implicit Method" The 18th Int. Conf. on Finite Elements in Flow Problems (FEF2015), Taipei (Taiwan), March 16-18, 2015, D-001.

- ④ T. Okura, K. Shibata, S. Koshizuka, A. Nomoto, A. Haga and K. Nakagawa, "Lung Deformation Simulation Based on Medical Images and Motion Models of Diaphragm and Ribs Using the MPS" 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), 5th European Conference on Computational Mechanics (ECCM V), 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI), Barcelona (Spain), July 20-25, 2014.
- ⑤ S. Koshizuka, H. Ito, R. Shino, T. Okura, I. Morito and T. Kikuchi, "Deformation of Human Organs Using Moving Particle Simulation" Proc. Particle-Based Methods III - Fundamentals and Applications -, Stuttgart (Germany), September 18-20, 2013, a59.
- ⑥ S. Koshizuka, H. Ito, R. Shino, T. Okura, I. Morito and T. Kikuchi, "Moving Particle Simulation for Medical Application" Proc. 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) and 4th Int. Symp. on Computational Mechanics (ISCM2013), Singapore (Singapore), December 11-14, 2013, abstract 1471. [keynote]

[図書] (計 2件)

- ① 越塚誠一, 柴田和也, 室谷浩平, "粒子法入門" 丸善出版 (2014).

[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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

越塚 誠一 (KOSHIZUKA, Seiichi)
 東京大学・大学院工学系研究科・教授
 研究者番号：8 0 1 8 6 6 6 8

(2) 研究分担者

柴田 和也 (SHIBATA, Kazuya)
 東京大学・大学院工学系研究科・講師
 研究者番号：3 0 4 6 2 8 7 3

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

中川 恵一 (NAKAGAWA, Keiichi)