

令和 6 年 6 月 27 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K11852

研究課題名（和文）高精度かつ高速な呼吸系気流シミュレーション手法の開発

研究課題名（英文）Development of a high-precision and high-speed simulation method for respiratory airflow

研究代表者

陳 献（Chen, Xian）

山口大学・大学院創成科学研究科・教授

研究者番号：70313012

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）：有限要素法による気管支変形解析と格子ボルツマン法による気管支気流解析の連成に関する高精度仮想構造法を開発した。本手法は並列計算に適しているため、GPGPUの並列実装による高い計算効率が得られた。困難な気管支モデルの構築では、自動検出アルゴリズムを提案し、高速ボクセルメッシュの構築手法を開発した。さらに、気管支に関しては流体構造連成解析、細気管支に関しては管内気流解析、肺実質微細構造に関しては多孔質体内気流解析を行い、高精度マルチスケール気流解析手法を開発した。また、患者別横隔膜の形態解析結果と呼吸生理データとの関係を解析し、呼吸機能評価指標を開発するアプローチを確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

並列計算により臨床上実用的高速気管支流体構造連成解析、細気管支・肺胞の階層性・区画性を反映した肺実質微細構造気流解析、3D気管支流体構造連成解析・0D肺実質微細構造気流解析・1D気管支気流解析を連結するマルチスケール気流解析を実現することにより、これまでの枠組みを超えた呼吸系気流シミュレーション手法が生まれ、さらに胸郭・肺変形シミュレーション手法と統合することにより、呼吸過程における生体力学現象を解明できる呼吸系生体力学シミュレーションシステムを構築でき、個々人の呼吸系疾患の診断と治療（個別化医療）を支援する強力な手段の創出につながり、呼吸器疾患の診断と治療における革新をもたらす可能性がある。

研究成果の概要（英文）：We developed a high-precision virtual structure method for coupling bronchial deformation analysis using the finite element method and bronchial airflow analysis using the lattice Boltzmann method. This method is suitable for parallel calculation, and high calculation efficiency was achieved by parallel implementation on a GPGPU. For the construction of bronchial model, we proposed an automatic detection algorithm and developed a high-speed method for constructing voxel mesh. Furthermore, we performed fluid-structure interaction analysis for the bronchi, airflow analysis inside the bronchioles, and airflow analysis inside a porous medium for the fine structure of the lung parenchyma, and developed a high-precision multi-scale airflow analysis method. We also analyzed the relationship between the results of patient specific morphological analysis of the diaphragm and respiratory physiological data, and established an approach to develop an index for evaluating respiratory function.

研究分野：計算生体力学

キーワード：呼吸シミュレーション 生体力学 流体構造連成解析 有限要素法 格子ボルツマン法

1. 研究開始当初の背景

呼吸は肋間筋や横隔膜など呼吸筋の働きで胸郭が拡張・収縮することにより、気管支を経由して肺へ空気が出入りする力学現象である。呼吸における生体力学現象の解明は呼吸系疾患の病因特定や治療効果予測につながり、個々人の診断と治療（個別化医療）が可能となるため、呼吸系生体力学シミュレーションに関する多くの研究が展開されてきた。しかし、肺細胞や肺実質の力学モデルから、気管支気流解析に至る幅広い範囲で多くの成果を収めているが、呼吸の原動力となる呼吸筋の収縮・弛緩による胸郭と肺の変形シミュレーションに関する研究例が見られないほか、気管支から肺胞までの気道全体に対する効率的気流シミュレーションも実現されていないため、胸郭と肺の変形から肺胞及び気道内の気流までの呼吸力学現象を統合的に再現できる呼吸系生体力学シミュレーションには至っていない。

2. 研究の目的

上記の背景を踏まえて、本研究では、本研究では、①高速気管支流体構造連成解析；②肺実質微細構造気流解析；③高精度マルチスケール気流解析；との三つの課題を解決することにより、高精度かつ高速な呼吸系気流シミュレーション手法の開発を目的とする。

3. 研究の方法

肺・気管支変形解析と気流解析はそれぞれ有限要素法と格子ボルツマン法に基づいて行う。気管支壁と気流は埋め込み境界法によって連成させる。格子ボルツマン法が並列計算に適している利点に加えて、構造と流体との連成にも並列化しやすい分離型反復解法を用いる。さらに、流体構造連成解析の高効率を実現するため、適合格子細分化法を導入し、GPGPUを用いた高速並列計算アルゴリズムを開発し、ワークステーションに実装する高速気管支流体構造連成解析を実現させる。

細気管支と肺胞の階層性・区画性特徴を考慮して、肺実質メッシュの粗密及び1次元気管支の到達度に対応して、1次元気管支末端の支配領域境界で気流自由度を拘束することにより、階層性・区画性を反映した肺実質多相混合体モデルの定式化を行い、肺実質微細構造気流解析手法を開発する。

太い気管支に対しては気管支流体構造連成解析、細い気管支に対しては、肺実質からの外圧及び気管支の弾性を考慮した1次元管内軸方向流れ解析を行う。細気管支と肺胞に対しては肺実質微細構造気流解析手法を用いる。各次元間では、3次元気管支末端の断面における流量及び圧力を境界条件として接続する1次元気管支に与え、1次元気管支節点と接続する肺実質節点では流量及び圧力の連続条件を満たすように接続させる。このように全次元の気流解析が行われ、かつ各次元間の連続性が保証されるため、高精度マルチスケール気流解析を実現できる。

4. 研究成果

4. 1 肺の変形に伴う気管支気流の流体構造連成解析

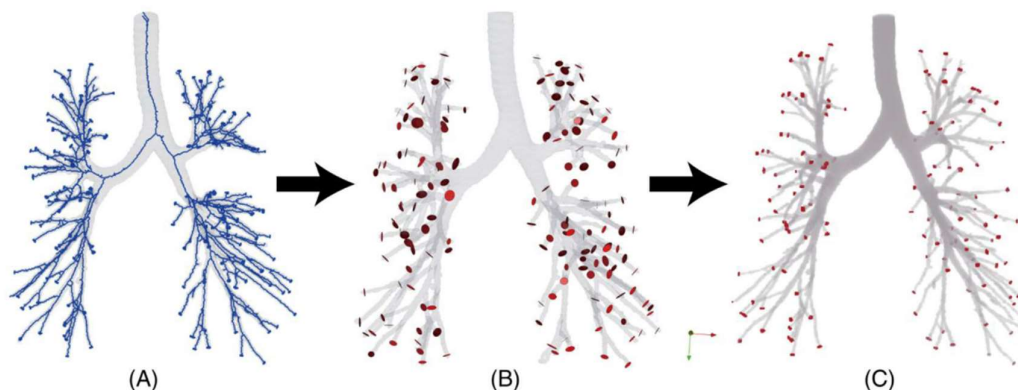


Fig.1 Workflow of the automatic detection algorithm for airway outlets: (a) centerline extraction; (b) determination of the perpendicular disc of the outmost peripheral airways; (c) marking of the outlet voxels from the disc-volume intersection

まず、気管支気流解析における気管支モデルの構築では、複雑な気管支システムの構造と領域識別のため、トポロジー解析を用いた気道出口の自動検出アルゴリズムを提案し、効率的気管支システムのボクセルメッシュの構築手法を開発した。気管支気流シミュレーションを実行するには、すべての末梢気道を手動で抽出する必要があり、膨大な気管支構造に対してはこの作業は

非常に煩雑になる。そこで、本研究では、図1に示すアルゴリズムによる自動抽出法を開発した[1]。このアプローチは、多数の出口に境界条件を自動的に適用することによりシミュレーションプロセスを簡素化し、時間のかかるメッシュ生成プロセスを最小限に抑えます。

さらに、本研究では肺・気管支変形解析は有限要素法により行い、気流解析は微圧縮性流体解析の効率的な方法である格子ボルツマン法により行う。有限要素法による変形解析と格子ボルツマン法による流れ解析は、埋め込み境界法とサブ反復スキームを介して結合される(図2)。また、計算精度を向上させるため仮想構造法を開発した。仮想構造表面に作用するラグランジュ点の流体力が梁要素に投影される処理は、不規則な形状の構造では合計モーメントの一貫性が保証されないため、均一な厚さの薄板を扱う場合にのみ有効となる。仮想構造の両側の合成流体力を外部荷重として直接使用して、構造動力学方程式を解くことができる(図3)。有限要素解析ソルバーが流体からの流体荷重で収束した後、結果として得られたノードの変位、速度、および加速度が、次のステップでIB力を計算するために仮想構造表面に転送される。ラグランジュ点と構造ノードは完全に独立しているため、IBスキームの精度を確保するのに十分な数のラグランジュ点を維持しながら、粗いメッシュを使用して梁を離散化できる。このような場合、ラグランジュ点の変数(変位、速度、加速度)は、粗い梁ノードから線形補間される(図4)。渦によって引き起こされる振動問題を用いて、開発した連成解析手法に対する検証を行った(図5)。解析結果を従来研究と比較し、良い一致が得られた。開発した手法は大規模連立方程式を解く必要はなく、並列計算に適しているため、高い計算効率が得られた[2]。

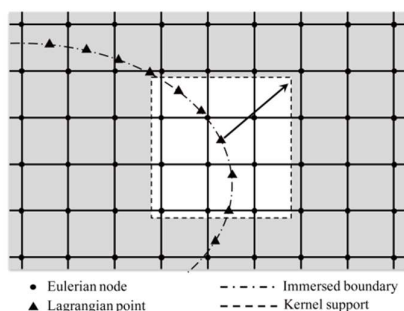


Fig.2 A solid boundary represented by a set of Lagrangian points immersed in the fluid domain

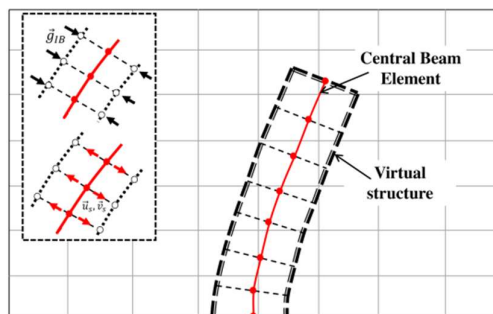


Fig.3 Concept of the virtual structure method

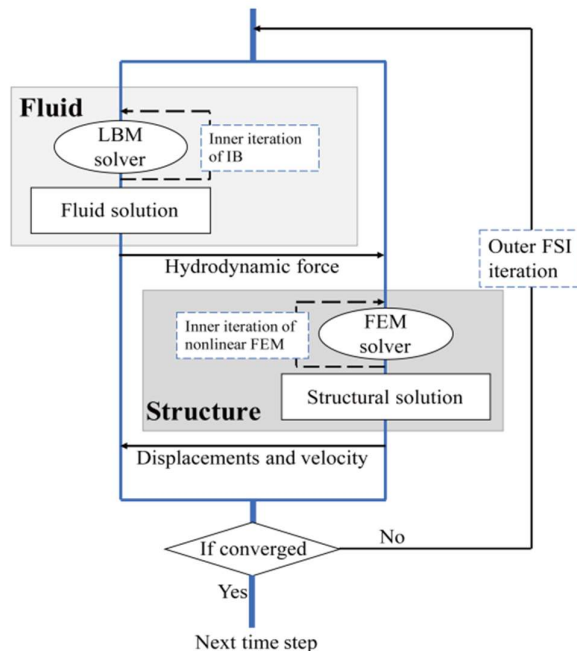


Fig. 4. Flow chart of the coupling algorithm

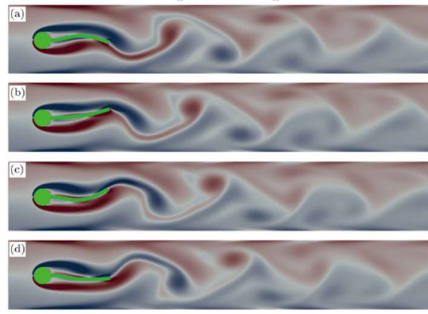


Fig. 5 The vorticity field in the fluid flow at four different instants

4. 2 GPGPU を用いた高速並列計算アルゴリズムの開発

前述の肺の変形に伴う気管支気流の流体構造連成解析手法に GPGPU を導入した高速計算手法を開発した[3]。本手法では、有限要素法と格子ボルツマン法を強力に結合するために、分割された反復ソリューションを採用し、数値安定性を向上させるために、Aitken 動的緩和アルゴリズムで固定小数点反復法を使用している。すなわち、有限要素ソルバーで予測した速度は次の緩和式で更新される。 ω は 0 ~ 1 の間に値を取る緩和係数である。

$$\mathbf{v}_s^m = (1 - \omega)\mathbf{v}_s^{m-1} + \omega\tilde{\mathbf{v}}_s^m$$

流体と構造物との相互作用が質量効果によって強くなる場合は、緩和係数の値を下げる必要があるが、この値が小さすぎると、収束までの反復回数が増加し、計算コストが高くなる。適切な緩和係数を選択することは、シミュレーションの安定性と効率性の両面で重要となる。緩和係数の最適値は、その瞬間の流体と構造物との相互作用の強さに依存する。したがって、緩和係数に定数値を使用することは非効率的である場合がある。緩和係数の最適値を決定するには、物理的な FSI 問題と時間依存の相互作用の両方を考慮する必要がある。したがって、本研究では、さらなる安定化と効率向上のための緩和スキームとして、Aitken 外挿法を使用して緩和係数を動的に決定する。

CPU のホストメモリとデバイスメモリ間のデータ転送には非常に時間がかかるため、CPU では初期状態のみが計算され、GPU デバイスにデータを転送した後、GPU 側ですべての計算が実行される。アプリケーションを GPU で実行できるように変換する場合、最も重要な要素は、データ並列パターンを識別すること、つまり、スレッドインデックスとコンピューティングノードまたはメッシュ間の対応関係を決定することである。LBM では、移流はメモリシフト操作によってマシン精度で実現できる。一方、速度場は分布関数の第 1 モーメントで取得でき、圧力場は圧力のポアソン方程式を解くことなく明示的に評価される。さらに、格子ボルツマンシミュレーションの計算のほとんどは、単純な代数操作であるが、数値実装ではメモリ帯域幅の制限が問題となるが、メモリ帯域幅が大きい GPU の利点を利用すれば、LBM と GPU ハードウェアアーキテクチャの両方の機能により、格子ボルツマンコードを GPU に実装することが自然で適切になる。カーネルをデバイス上で起動するには、スレッドインデックスと流体ノードとの対応を確立する必要がある。3 次元の場合のスレッド構成を図 6 に示す。本研究で提案された方法は、大規模な線形方程式を解く必要がないため、並列計算に適している。グラフィックス プロセッシング ユニット上でのこの方法の並列実装により、計算速度が 18 倍以上向上していることは実証されている。したがって、開発した FSI ソルバーは非常に効率的で、より細かいメッシュでより正確な結果を提供することができる。

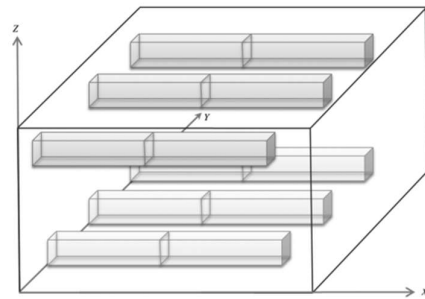


Fig.6 Threads map to the fluid nodes (each block maps to a fluid node in the y and z directions)

4. 3 マルチスケール気流解析

呼吸器系には、複数のスケールで機能する広範な物理的および生物学的プロセスが関与している。したがって、呼吸器系のさまざまな空間的および時間的スケールを統合および橋渡しし、システムの根底にあるメカニズムと動作をよりよく理解するためには、マルチスケールモデルが必要となる。本研究では、肺気流をシミュレートするための 3D-1D-0D マルチスケール法を開発した[4]。呼吸細気管支と肺胞内の気流は、肺の変形と結合した混合体モデル (0D) によって計算され、末端細気管支は、0D 肺実質に接続されたパイプモデル (1D) によって近似された。このような強く結合した 0D-1D システムは、有限要素法によって解決された。気管と気管支内の気流については、CT 画像 (3D) から抽出された実際の気管支形状に基づいて、有限体積法によって 3 次元 (3D) 計算流体力学解析を実行した。マルチスケール呼吸シミュレーションシステムは、異なるスケールで質量と運動量保存則を満たすことによって実現された。さらに、3D-1D-0D インターフェースで圧力の連続条件も保証された。3D 気管支と 1D 末端細気管支の結合は、3D 気管支末端の出口と接続された 1D 細気管支の入口の間で流量と圧力の情報を転送することによって行われた。このようなデータ転送は、シリアルスタガード方式で実行された。全体的な 3D-1D-0D 結合アルゴリズムは、双方向弱結合タイプのクラスに属している。呼吸系モデルを図 7 に示す。解析結果の一例を図 8 に示す。

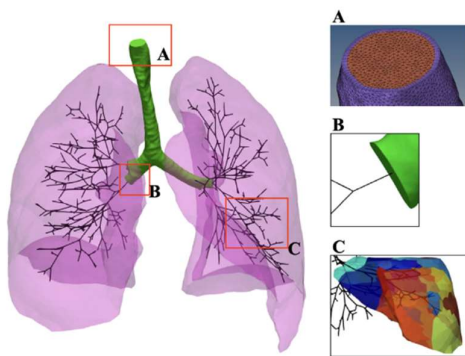


Fig.7 The reconstructed multiscale 3D-1D-0D model for the lung system. (A) The 3D model mesh of the trachea inlet. (B) The linkage between 3D and 1D airway models. (c) The connection between the 1D terminal bronchioles and the lung parenchyma

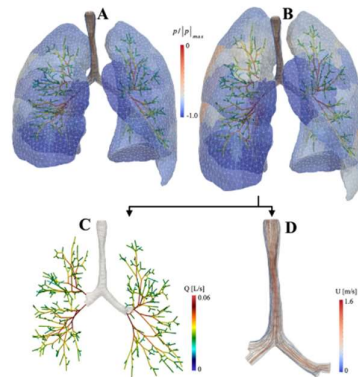


Fig.8 Simulation results of the entire 3D-1D-0D lung model: (A) normalized pressure distribution of lung at $t = 0.1s$ (B) normalized pressure distribution of lung at $t = 1.0s$ (C) flow rate distributions in the 1D bronchial tree at $t = 1.0s$ (D) flow stream line inside the bronchial model at $t = 1.0s$.

参考文献

- [1] Fei Jiang, Tsunahiko Hirano, Junji Ohgi, Xian Chen, A voxel image-based pulmonary airflow simulation method with an automatic detection algorithm for airway outlets, International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering 36(3) e3305 2020. 3. 1.
- [2] Fei Jiang, Kangping Liao, Kazuki Matsumura, Junji Ohgi, Xian Chen, Simulation of Fluid-Structure Interaction Problems with Thin Elastic Plate via the Coupling of Finite Element and Lattice Boltzmann Methods, International Journal of Computational Methods 17(10) 2020. 12. 1.
- [3] Fei Jiang, Kazuki Matsumura, Junji Ohgi, Xian Chen, A GPU-accelerated fluid-structure-interaction solver developed by coupling finite element and lattice Boltzmann methods, Computer Physics Communications 259 2021. 2.
- [4] Jiang Fei, Hirano Tsunahiko, Liang Chenyang, Zhang Guangzhi, Matsunaga Kazuto, Chen Xian. Multi-scale simulations of pulmonary airflow based on a coupled 3D-1D-0D model, Computers in Biology and Medicine, 2024.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Jiang Fei, Chen Xian, Ueda Kazuhiro, Ohgi Junji	4. 巻 1
2. 論文標題 Postoperative Prediction of Pulmonary Resection Based on MCA Model by Integrating the Temporal Responses and Biomechanical Functions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Multidisciplinary Computational Anatomy	6. 最初と最後の頁 201 ~ 206
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-981-16-4325-5_26	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Jiang Fei, Matsumura Kazuki, Ohgi Junji, Chen Xian	4. 巻 259
2. 論文標題 A GPU-accelerated fluid-structure-interaction solver developed by coupling finite element and lattice Boltzmann methods	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Computer Physics Communications	6. 最初と最後の頁 107661 ~ 107661
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cpc.2020.107661	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Jiang Fei, Hirano Tsunahiko, Ohgi Junji, Chen Xian	4. 巻 36
2. 論文標題 A voxel image based pulmonary airflow simulation method with an automatic detection algorithm for airway outlets	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering	6. 最初と最後の頁 e3305
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cnm.3305	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Jiang Fei, Liao Kangping, Matsumura Kazuki, Ohgi Junji, Chen Xian	4. 巻 17
2. 論文標題 Simulation of Fluid-Structure Interaction Problems with Thin Elastic Plate via the Coupling of Finite Element and Lattice Boltzmann Methods	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Computational Methods	6. 最初と最後の頁 2050013 ~ 2050013
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0219876220500139	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Jiang Fei, Hirano Tsunahiko, Liang Chenyang, Zhang Guangzhi, Matsunaga Kazuto, Chen Xian	4. 巻 171
2. 論文標題 Multi-scale simulations of pulmonary airflow based on a coupled 3D-1D-0D model	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Computers in Biology and Medicine	6. 最初と最後の頁 108150
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compbiomed.2024.108150	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Fei Jiang, Xian Chen, Yusuke Sakai, Tsunahiko Hirano, Keiko Doi, Xianghong Li, Kazuto Matsunaga
2. 発表標題 Correlation between Respiratory Function Indicators and Flow Parameters from Bronchial Airflow Analysis
3. 学会等名 the 9th World Congress of Biomechanics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Fei Jiang, Xian Chen and Tsunahiko Hirano
2. 発表標題 Multi-scale Simulations of Pulmonary Airflow based on a Coupled 3D-1D-0D Model
3. 学会等名 15th World Congress on Computational Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Chenyang LIANG, Fei JIANG, Xian CHEN, Junji OHGI, Tsunahiko HIRANO, Keiko DOI, Kazuto MATSUNAGA
2. 発表標題 Dynamic analysis of diaphragm in respiratory diseases
3. 学会等名 The 11th Asian-Pacific Conference on Biomechanics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 蔣 飛, 陳 献, 平野 綱彦, 松永和人, 土居恵子, 大木 順司
2. 発表標題 3D-1D-0D マルチスケール肺気流解析手法の構築
3. 学会等名 日本機械学会 2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 酒井 佑輔, 平野 綱彦, 蔣 飛, 陳 献, 土居 恵子, 李 相紅, 大木 順司, 松永 和人
2. 発表標題 気管支気流解析による肺機能と流体力学的指標の相関性に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会 中国四国支部 第60期総会・講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田原 航希, 平野 綱彦, 蔣 飛, 陳 献, 土居 恵子, 李 相紅, 大木 順司, 松永 和人
2. 発表標題 肺変形と気管支気流の連成解析によるCOPDが呼吸機能に及ぼす影響の検討
3. 学会等名 日本機械学会 中国四国支部 第60期総会・講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 蔣 飛, 陳 献, 平野 綱彦, 松永 和人, 大木 順司
2. 発表標題 気管支のCTボクセル画像に基づく気流解析の自動化
3. 学会等名 日本機械学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Fei Jiang, Tsunahiko Hirano, Kazuto Matsunaga, Xian Chen
2. 発表標題 Computational analysis of respiratory dynamics with fibrosis pathology using a combined 3D-1D-0D multiscale framework
3. 学会等名 Ninth International Conference on Mechanics of Biomaterials and Tissues (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	平野 綱彦 (Hirano Tsunahiko) (00382333)	山口大学・医学部附属病院・准教授 (15501)	
研究分担者	J i a n g F e i (Jiang Fei) (60734358)	山口大学・大学院創成科学研究科・准教授 (15501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------