

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：22401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K11267

研究課題名（和文）リハビリテーション評価および治療に使用するための呼吸器シミュレーションモデリング

研究課題名（英文）Respiratory Simulation Modeling for Rehabilitation

研究代表者

木戸 聡史（Kido, Satoshi）

埼玉県立大学・保健医療福祉学部・准教授

研究者番号：50513214

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではコンピュータシミュレーション技術を活用して、呼吸筋の出力による胸郭変位を実現するモデル化手法を提示した。呼気時胸郭形状の胸鎖乳突筋起始部へ荷重を行うことで胸郭を変位させ、実際の吸気時CT画像から求めた変位と比較することによって、胸郭変位モデルの妥当性を確認した。提案した胸郭変位モデルの課題を提示し、複数の呼吸筋へ本手法を適応できることを述べた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

呼吸器疾患患者数は世界的に増大しており、これに伴い呼吸リハビリテーションの必要性も拡大している。呼吸リハビリテーションでは呼吸flow、胸郭運動および呼吸筋活動の動態評価が必要であるが、関連する研究はほとんどがヒトおよび動物における生体計測結果によるものに限られている。本研究により実施された胸郭モデリングの成果は、今後、患者評価および支援に活用できる新手法を確立する基盤となると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we used computer simulation technology to present a modeling method that realizes thoracic cage displacement due to the output of respiratory muscles. The thoracic cage was displaced by applying load to the origin of the sternocleidomastoid muscle during expiration, and the validity of the thoracic cage displacement model was confirmed by comparing the displacement obtained from actual CT images during inspiration. We presented issues with the proposed thoracic cage displacement model and stated that this method can be applied to multiple respiratory muscles.

研究分野：リハビリテーション工学

キーワード：呼吸筋 シミュレーション Chest wall motion

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

呼吸器疾患患者数は世界的に増大しており、代表的な慢性閉塞性肺疾患 (COPD) 患者は 2016 年には全世界死亡原因第 3 位と報告された。このような呼吸器疾患患者などに対する、呼吸リハビリテーション (Pulmonary Rehabilitation: PR) では、全身各部位への介入に加えて、胸郭と腹部の運動 (chest wall motion)、呼吸 flow および呼吸筋活動などの呼吸器系に変化を引き起こすことで、運動パフォーマンスの向上、呼吸困難および生命予後の改善を得ることができる。例えば、COPD 患者では、肺と気道の問題による気流制限により肺過膨張が起こり、このことが胸郭形状拡大や横隔膜の平坦化を引き起こし、吸気筋が短縮することで呼吸効率が悪化して呼吸不全状態に拍車をかける。PR では呼吸法、呼吸筋・四肢および体幹筋へのアプローチにより上述した運動制限増悪機序にアプローチすることで効果が得られる。それゆえ PR 中における、呼吸 flow、chest wall motion および呼吸筋活動を含む呼吸動態を評価することは、介入の安全性を担保することに加え、介入による効果の機序を解明して介入内容の最適化を図るための必要条件である。

呼吸器系は現状の運動療法に関連する研究では、ほとんどがヒトおよび動物における生体計測結果によるものに限定されている。これらの研究によって PR の各種介入効果に関するエビデンスが多数蓄積されてきている。しかしながら、各介入中における生体での呼吸応答の全容は解明されていない。生体における研究では、患者に対する倫理的な課題、人的・金銭的コストがかかり、すべてを網羅する計測が困難であるため、介入の背景となるメカニズムを効率的に探ることに困難さが存在する。

上述した課題に対する解決方法として、コンピュータシミュレーションで患者の呼吸器を再現できれば、実験における抜けを埋められること、患者負担なく多数の条件下で介入評価を行うことができること、および定量的に長期の予測を行うことなどによって、多くの介入メカニズム解明や効果予測に必要な研究を進展させる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究は、PR 活用できるモデル構築を目指すために、以下の点を目的として行った。

- (1) 研究基盤として成人胸郭 3D ジオメトリ作成を行い、多様な対象者の胸郭構造にジオメトリを合理的に適合させるうえで必要になる左右構造の差異を多面的に解明すること。
- (2) 胸郭 3D ジオメトリを用いて、呼吸筋機能を呼吸運動の面からシミュレートするための有限要素モデリングを行うこと。さらに胸郭変位の結果生じる肺気量変化を予測できる可能性を検討すること。

3. 研究の方法

(1) Computed Tomography (CT) および肺機能データの取得

呼吸器及び脊柱疾患の既往と喫煙歴がない成人男性 16 名 (Cobb 角 10° 以上を除外) を対象としてマルチスライス CT80 列により、背臥位で最大呼気位と最大吸気位の 2 条件のデータを取得した。撮影範囲は乳突起部から第三腰椎、スキャンスライス厚 1mm、再構成スライス厚 5mm だった。CT 撮影と同時にスパイロメトリーによる肺活量測定を実施した。本研究は埼玉県立大学研究倫理委員会の承認を受けて実施した (20061)。本研究に際し、事前に全ての対象者には本研究の目的及び方法、調査結果の取り扱い等について説明を行い、参加同意書に署名を得た。同意を得られた者のみデータを測定した。

(2) 肋骨パラメータの定量的解析

最大吸気 CT により取得した DICOM から胸郭の骨および軟骨の 3D モデルを作成し前額面、矢状面および水平面における左右の肋骨角度、肋骨長および肋骨単距離を算出した。

(3) 3D 化した胸郭のメッシングと物性値の設定

最大呼気 CT (exsp) により取得した DICOM から抽出した胸郭形状のラッピングおよびスムージング処理を実施した後、meshing を行った。

(4) 変位評価ポイントの作成

作成した exsp の胸郭において、左右の第 1 から 10 肋骨の最外側に評価ポイントを作成した。

(5) 胸鎖乳突筋による胸郭変位シミュレーション (解析ソルバー: COMSOL Multiphysics 6.1)
固定拘束は各肋骨の肋椎関節回転軸に接する 2 点および左右の鎖骨肩峰端へ設定した。胸鎖乳突筋による収縮力を模倣するため、筋の起始停止の各座標から荷重方向を算出し、筋の停止部に設定した荷重面に対して境界荷重 (N/m^2) を入力した。胸骨上の評価点において CT 撮影により作成した最大吸気時の胸郭形状 ($Insp$) とシミュレーション後の誤差が最小となる荷重量を $F_{1.0}$ として定め、 $F_{1.0}$ の A 倍を F_A として F_0 - $F_{1.2}$ の範囲で荷重し肋骨変位をシミュレーションした。 F_0 を基準として、 $Insp$ の肋骨変位成分を u_{insp} 、シミュレーション後の肋骨変位成分を u_A として求め、比率 u_A/u_{insp} を算出した。

4. 研究成果

(1) 胸郭形状の左右対称性の評価

若年成人 16 例を対象に肋骨毎における、肋骨角度および構造の左右差を明らかにした。算出した各パラメータにおける左右差を解析した結果、下位肋骨の前額面肋骨角度は、右側と比較して左側の方が有意に大きかった ($p < 0.05$)。加えて、下位肋骨の水平面肋骨角度は左側と比較して右側の方が有意に大きかった ($p < 0.05$) (図 2)。

以上の結果より、胸郭の形状には特異的な左右差が存在する可能性があるため、呼吸動態のシミュレーションに用いる構造モデル構築をするためには非対称性を考慮する必要性が示唆された。



図 1. イメージベースの有限要素解析のフロー

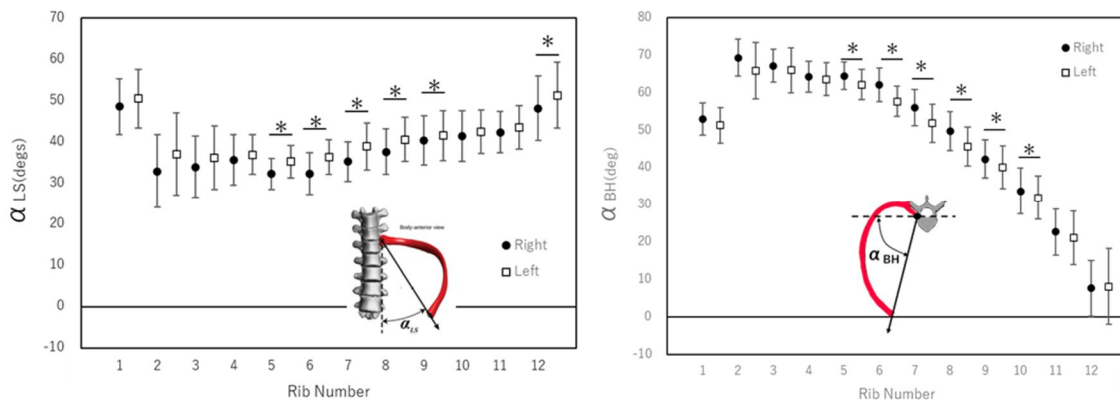


図 2. 左右肋骨角度 (左図は前額面、右図は水平面)

(2) 呼吸筋出力による胸郭変位解析

胸郭変位解析を行うために決定された胸骨および鎖骨の計 4 箇所境界荷重面は図 3 に示した。境界荷重 $F_{0.2}-F_{1.2}$ を実施した結果、正常の運動学で説明し得る胸骨の前上方変位がみられた(図 4)。シミュレーションにおいて全肋骨で荷重量増加に伴い前後方向・上下方向の変位が増加したが、左右径拡大はほとんど見られなかった。第 4-10 肋骨で算出された $u_{1.0}/u_{insp}$ は、前後方向で 1.55-1.98、上下方向で 0.33-0.87 となり、前後方向では $u_{0.6}/u_{insp}$ が 0.92-1.12、上下方向では $u_{1.2}/u_{insp}$ が 0.40-1.04 となり最も 1 に近似した。

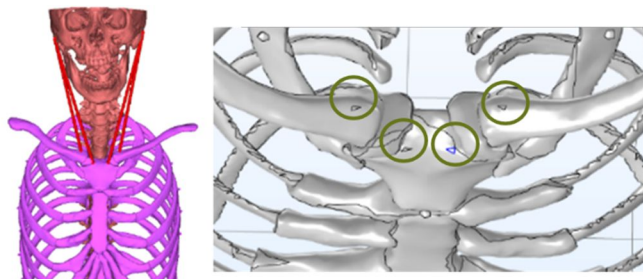


図 3. 左図が CT 画像を基に抽出した胸鎖乳突筋走行、右図が境界荷重面 (上方からの視点)

次に、今回作成した胸郭形状モデルから換気量推定を行うため、胸郭形状に基づいた体積算出を行った。今回 6 名の被験者の insp および exsp のそれぞれの体積モデルの差を算出し、体積変化量 (V_{i-e}) を用いて、CT 撮影時に同時に取得した肺活量を推定するための予測式が算出された。6 名による肺活量実測値と上記推定値は図 5 に示した。今回の結果では肺活量が過大評価された 3 名と過小評価された 3 名がみられたため、今後は胸郭の運動パターンや腹部の挙動を踏まえた体積モデル作成につなげる必要が見いだされた。

これまで、有限要素法を用いた胸郭運動のバイオメカニクス解析事例は非常に限られている。一般に筋骨格シミュレーションでは剛体リンクモデルを用いることが多いが、胸郭においては骨の弾性による運動への影響を何らかの形で反映する必要が生じる。この点において、提案手法は肋骨と肋軟骨弾性を考慮することができるため、今後の呼吸運動解析に利用可能な要素を有すると考えられる。

本研究において胸郭モデルの胸骨柄および胸骨体においては胸鎖乳突筋起始部へ荷重により前上方の変位が引き起こされ概ね運動学的に示されているポンプハンドルモーションが再現さ

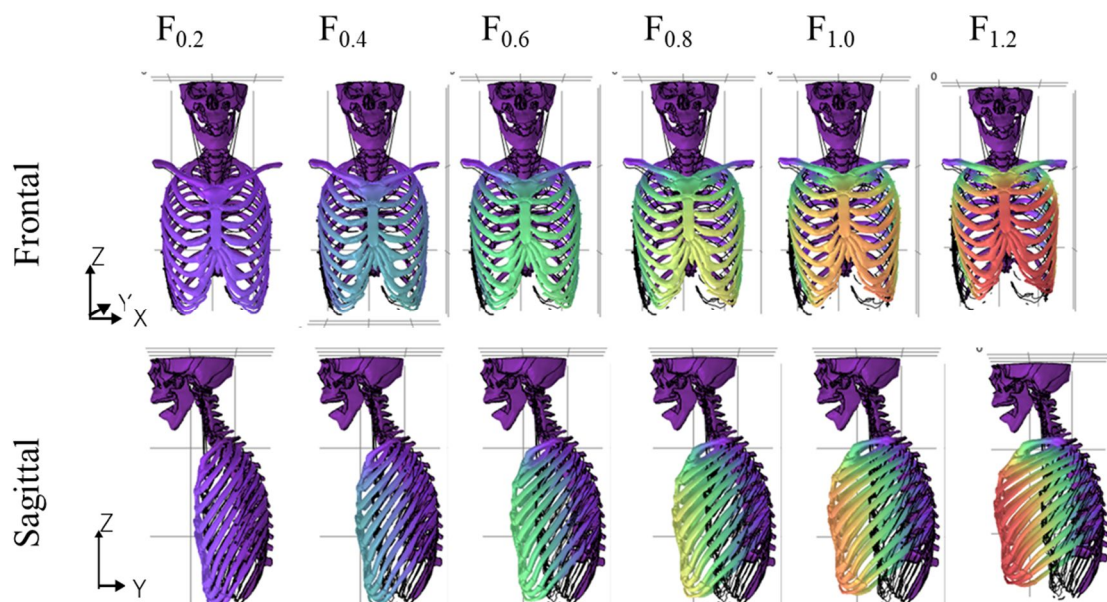


図 4. 境界荷重に対する胸郭変形

れたと言えるため、定性的に胸郭運動を解析できるモデルといえる。本手法においては他の呼吸筋に注目したバイオメカニクス解析に利用できる可能性もある。今後は本研究で得られた知見を基盤として、拘束条件と肋骨関節、骨組織を接続する役割を持つ軟部組織、他の呼吸筋、肺およびその他の胸腹部臓器における課題を解決することで、患者の評価および支援に使用できると考えられる。

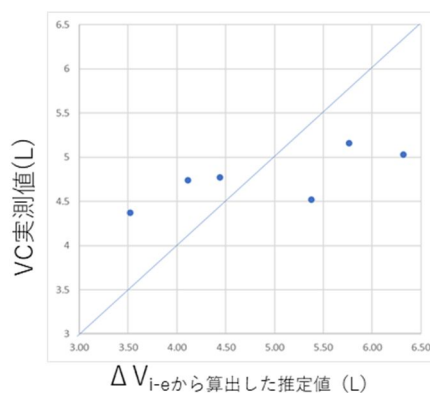


図 5. 肺活量推定値と実測値の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 木戸 聡史, 柚口 菜津子, 赤間 美波, 善田 督史, 熊谷 雄基, 小栢 進也, 兪 文偉
2. 発表標題 健康若年成人男性における肋骨構造および角度の非対称性
3. 学会等名 第8回呼吸理学療法学会学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 柚口 菜津子, 赤間 美波, 善田 督史, 熊谷 雄基, 小栢 進也, 兪 文偉, 木戸 聡史
2. 発表標題 健康若年男性における胸腹部計測による肋骨角度・肋骨形状の予測
3. 学会等名 第32回日本呼吸ケア・リハビリテーション学会学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 善田督史、木戸聡史、柚口菜津子、赤間美波
2. 発表標題 特発性肺線維症患者の肺容積評価は持久力や日常生活動作に関連するか - シングルケーススタディー
3. 学会等名 第28回千葉県理学療法学会学術大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 木戸 聡史, 柚口 菜津子, 熊谷 雄基, 兪 文偉
2. 発表標題 胸郭動力学解析に使用する3D骨格モデリング
3. 学会等名 日本呼吸ケア・リハビリテーション学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柚口 菜津子, 兪 文偉, 赤間 美波, 熊谷 雄基, 丸岡 弘, 木戸 聡史
2. 発表標題 健常男性の肋骨角度から胸郭運動を予測するための要素の抽出
3. 学会等名 日本呼吸ケア・リハビリテーション学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 海津 樹, 川村 和也, 佐々木 勇哉, 熊谷 雄基, 柚口 菜津子, 木戸 聡史
2. 発表標題 呼吸運動パターン分類による慢性閉塞性肺疾患早期発見のための予備的研究
3. 学会等名 第7回日本呼吸理学療法学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 赤間美波, 柚口菜津子, 善田督史, 今北英高, 小栢進也, 沼尻一哉, 木戸聡史
2. 発表標題 有限要素法を用いた胸鎖乳突筋作用による胸郭変位モデル解析
3. 学会等名 日本臨床バイオメカニクス学会第50回学術集会
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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------