

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：22401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K01518

研究課題名(和文) 運動時呼吸負荷トレーニングによる呼吸応答戦略の解明と効果予測モデルの構築

研究課題名(英文) Elucidation of Respiratory Response Strategy of Physical Exercise Training with Respiratory Load Masks and Development of Efficacy Prediction Model

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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：身体運動と呼吸負荷用マスクの装着を組み合わせる運動時呼吸負荷トレーニングが呼吸機能と心肺持久力の一部を向上させるという報告がある。しかしながら、このトレーニングの方法や適応について具体的な知見が不足している。本研究では運動時呼吸負荷トレーニング中の呼吸応答戦略の解明と、トレーニング継続による経時的な生理学的適応を明らかにするためのデータ取得および、これらの研究を進めるための基盤になる呼吸器モデルを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高齢化社会において、加齢による呼吸機能や心肺持久力の低下に対する効果的なトレーニング方法を追求することは、身体機能維持や生命予後改善に有用である。本研究により構築された呼吸器モデルを基盤として、トレーニング中の生体応答を評価できれば、健康人の運動時呼吸負荷トレーニングのみならず、多様な対象者における様々な運動療法・呼吸トレーニング手技に対する呼吸応答解析に必要な情報が解明される可能性がある。

研究成果の概要(英文)：Physical exercise training with respiratory load masks has been reported to improve certain aspects of respiratory function and cardiopulmonary endurance. However, specific knowledge on the methods and indications for this training is lacking. The purpose of present study was to identify respiratory response strategies during Physical exercise training with respiratory load masks. In addition, data were obtained to identify physiological adaptations over time during this training and to build a respiratory model as a basis for further research.

研究分野：呼吸理学療法学

キーワード：呼吸リハビリテーション 呼吸筋 シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

(1) 呼吸筋トレーニングの必要性

心肺持久力は全身持久力とも呼ばれ、心血管系疾患の罹患率や多くの疾患における死亡率増大に関連することが報告されている (Blair SN. et al., 1995) ため、心肺持久力を高めることは、健康増進に有益である。心肺持久力の指標である最大酸素摂取量は加齢や疾患により低下し、60 歳代では 20 歳代と比較して約 25% 低下する (ACSM 's guidelines 2011) が、最大酸素摂取量はサブシステムとして呼吸器系・循環器系・骨格筋系の機能を包含しているため、個々のシステム系に対するアプローチが必要である。しかしながらランニングや自転車などの全身運動では循環器系・骨格筋系への負荷に偏っており、呼吸器系への負荷を多くかけることが難しい。そのため、スポーツやリハビリテーション分野では従来から心肺持久力の向上を目的とした呼吸トレーニングが実施されてきた。このトレーニング方法は数種類あるが、いずれも呼吸に負荷をかける事で、競技者を含む健康成人および呼吸器疾患患者の呼吸機能と心肺持久力の向上を図ることができる (McMahon ME. et al., 2002, Enright SJ. et al., 2011)。

(2) 呼吸筋トレーニングの現状

呼吸負荷をかけたトレーニングでは、吸気負荷に対しては胸郭を拡張させる役割をする吸気筋群が働き、呼気負荷に対しては胸郭を収縮させる役割をする呼気筋群がより強く働くことで呼吸筋機能を向上させる。さらに、我々がこれまでにを行った研究では、呼吸負荷により、呼吸周期や周期の安定性に影響が見られ、深くゆっくり安定した呼吸により、呼吸仕事量、換気効率が改善して心肺持久力向上に寄与する機序の存在が示唆されている。

従来の呼吸トレーニング方法は大きく分けると、マウスピース型のデバイスを使用して、吸気のみあるいは呼気どちらかのみを設定した負加圧をかける方法: Respiratory muscles training と、外部負荷をかけずに換気量を増大させる方法: Hyperpnea endurance training があるが、いずれも座位や立位の安静状態で実施するもので、身体運動と呼吸負荷を組み合わせる実施できなかった。加えて従来のトレーニング方法では吸気あるいは呼気のみ抵抗負荷を加えるものがあるが、吸気と呼気の両方に設定した負加圧をかけられるデバイスはなかった。

上述した問題に対して我々の研究グループは、身体運動と呼吸負荷を同時に実施できれば効率的にトレーニング効果を得られること、吸気と呼気に抵抗負荷をかけることで吸気筋と呼気筋の筋活動を高め呼吸機能や心肺持久力向上に有利に働くという仮説を基に、鼻からの吸気と口からの呼気のみが可能で、吸気と呼気時に抵抗を生じる Mask-type-device (特許第 4413217 号) を用いた 6 週間の運動時呼吸負荷トレーニング (Combined training with Breathing resistance and Sustained physical exertion: CBS) を考案し、健康若年者と高齢者において、呼吸負荷なしの同強度の身体運動トレーニングと比較して、心肺持久力と呼吸筋機能が大きく向上する結果を得た (Kido et al., 2012)。

以上のごとく、CBS について従来のトレーニング方法より効果が高いことが報告されたが、CBS 中に生体がいかなる呼吸応答をしており、経時的に呼吸筋・呼吸 flow・呼吸運動パターンなどの呼吸戦略がどのように応答しているのかは明らかでなかった。これは、呼吸運動が胸郭の多数の関節と多数の呼吸筋で構成される複雑な構造を有することや、呼吸位相と筋活動の関係、筋同士の関係などの複雑な要因があるため、横断的解析や個別の筋の解析、呼吸 flow のみの解析では明らかにできない部分が多いためである。また、関連する要素が多岐にわたるため、運動中にすべてを計測することは不可能であるし、例えば呼吸時の筋張力は測定することができない。上述のごとく呼吸応答戦略が不明であるため、介入方法、強度・時間・期間を最適化できず、安全性と効果を考慮して対象疾患を確定させることも困難である。

これらを解決する手段として呼吸器のシミュレーションを用いれば、flow、各呼吸筋の張力変化、胸郭運動を関連させて再現することによって、正確に計測することが難しい横隔膜動態の解析を始めとして、トレーニング中の呼吸戦略の解明や長期トレーニング後の呼吸戦略の変化予測ができるため、部位特異的にも全体的にも呼吸戦略の変化を評価することが可能であると考えられた。

2. 研究の目的

本研究では、CBS トレーニング継続による経時的な生理学的適応を明らかにするためのデータ取得、トレーニング中の呼吸応答戦略の解明、およびこれらの研究を進めるための基盤となる呼吸器モデルを構築した。

3. 研究の方法

(1) CBS トレーニング継続による効果の実験的解明

6週間の CBS トレーニングの効果を明らかにするために、中高年・高齢者を対象にして、比較対照試験を実施した。対象者は呼吸負荷マスクを装着して身体運動を行う CBS グループと、身体運動のみを行う CON グループに無作為に分けられた。トレーニング強度・時間・頻度は両グループにおいて共通とした。運動強度は心拍数により低強度から中等度に設定して、自転車エルゴメーターまたはランニングで、1回30分間、週3回実施しトレーニング期間の前後2回で生理学的指標を評価した。健康若年者における CBS トレーニング継続による経時的生理学的効果については、CBS と CON グループで、トレーニング前、2週間後、4週間後、6週間後において生理学的指標を評価した。

(2) 簡易モデルによるトレーニング中の横隔膜動態

トレーニング中の呼吸動態解明に貢献できる呼吸器の初期段階のモデルとして胸郭をカパンジーの提灯モデルを模した簡易的な構造で再現することによりシミュレーション解析を行った。簡易的な構造では横隔膜に加えて、身体運動時などの努力吸気時に上位肋骨を挙上することで換気量増大に大きく貢献する胸鎖乳突筋と斜角筋群による胸郭の容積変化を引き起こすものとした。計測により得られた安静時一回換気量による横隔膜変位の算出を行った。安静時換気においては吸気補助筋活動がほとんど見られないため、本条件での解析は肺容積の変化に伴う横隔膜変位を算出した。この解析での入力値は参考研究と同様であり、横隔膜に境界荷重を発生させた状態で、残気量に安静時一回換気量を加えた容積を肺容積とした条件をグローバル方程式により実現させた。各トレーニングにおける横隔膜動態の解析では残気量位の胸郭モデルに胸鎖乳突筋および斜角筋が発生する応力を加え、さらに横隔膜に境界荷重を発生させて、グローバル方程式により CBS・CON のトレーニング中に計測した各条件での一回換気量の値を初期容積に加えた吸気時肺容積を実現させた。そしてこのときの横隔膜の最大変位を算出した。このとき頭部と脊柱は固定拘束した。

(3) 画像データによる呼吸器構造モデル構築

対象者の胸腹部断層画像取得については、CT 撮影とスパイロメータによる肺活量測定を同時に行い(図1)、最大吸気および最大呼気時の画像取得を行った。取得した DICOM データを画像解析により肺野と胸郭抽出を行った。肺野については最大吸気と最大呼気の体積差分を算出し、妥当性検討に使用した。



図1. CT 撮影時の肺活量測定

4. 研究成果

(1) CBS トレーニング継続による効果の実験的解明

中高年、高齢者における CBS トレーニングでは対象者が有害事象なくトレーニングを完了した。CBS および CON グループともに運動耐容能に関連した指標、呼吸筋耐久力に関連した指標に有意な変化はみられなかった。呼吸筋耐久力に関してはマスクなし群と比較し CBS 群で 7.8% 向上率が高かった。そのため、中等度までの運動強度では CBS を安全に実施できることが示唆された。しかし運動耐容能は両群ともに有意な変化はみられなかった。本研究はリスク管理のため低強度で行ったが、若年を対象とした高負荷な先行研究では CBS 群に有意な運動耐容能の向上がみられたため、今後は強度を検討することで運動耐容能への関与が明らかになる可能性がある。また本研究結果より、CBS により呼吸筋耐久力が向上する可能性が考えられた。

健康若年者における検討では、全例に共通し、最高酸素摂取量、最大パフォーマンス、最大換気量の上昇を示した。CBS トレーニング例においては、換気性作業閾値、呼吸筋力および持久力の上昇も示し、経時的な評価としては、呼吸筋力が4週までに最も変化し、換気性作業閾値は6週間上昇し続けた。持久力運動に呼吸負荷を加えたことにより、呼吸機能とともに心肺持久力を向上させる可能性を示唆し、先行研究を支持した。また CBS トレーニングの経時的な評価により、呼吸機能と一回換気量は4週までに最も変化し、呼吸筋耐久力と換気性作業閾値は少なくとも6週間まで上昇し続ける可能性を示した。これは今回、トレーニング期間中の経時的な評価を行ったことで新たに得られた知見である。今後、健康対象者においてサンプル数を増やした検討を行う必要があるとともに、呼吸循環系などに障害をもつ対象者においても、効果検証を行うことで、CBS トレーニングの有益性が明らかになる可能性がある。

(2) 簡易モデルによるトレーニング中の横隔膜動態

簡易モデルによる動態解析では,安静時換気における横隔膜変位の最大値は 4.42 cm だった(図 2).CBS におけるシミュレーションでは横隔膜荷重は, 1.79×10^5 Pa,横隔膜変位の最大値は 7.29 cm だった(図 3).胸鎖乳突筋・斜角筋群荷重/横隔膜荷重は以下の式より 5.44 だった.

$$9.73 \times 10^5 / 1.79 \times 10^5 = 5.44$$

CON におけるシミュレーションでは横隔膜荷重は, 1.18×10^5 Pa,横隔膜変位の最大値は 6.92 cm だった(図 3).胸鎖乳突筋・斜角筋群荷重/横隔膜荷重は以下の式より 3.07 だった.

$$3.62 \times 10^5 / 1.18 \times 10^5 = 3.07$$

以上の様に提灯モデルを参考にした胸郭モデルを作成し横隔膜を含めた呼吸筋活動の解析を行うことが実現された.トレーニング条件において横隔膜活動を評価できるシミュレーションモデリングの報告はこれまでに見当たらず,機能解剖学的視点において,吸気補助筋と横隔膜による胸郭の前後径および垂直径の拡大を引き起こすことができるこれまでにない機能的な胸郭運動シミュレーションである.しかしながら構造の再現性には限界があるため,引き続いて断層画像を用いた呼吸器構造モデルの作成を行った.

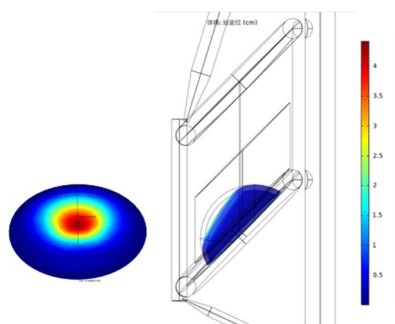


図 2. 本研究モデルによる安静吸気位における横隔膜変位

左が上方からの横隔膜,右が矢状面横隔膜変位.横隔膜変位の最大値は中心付近で 4.42cm だった.

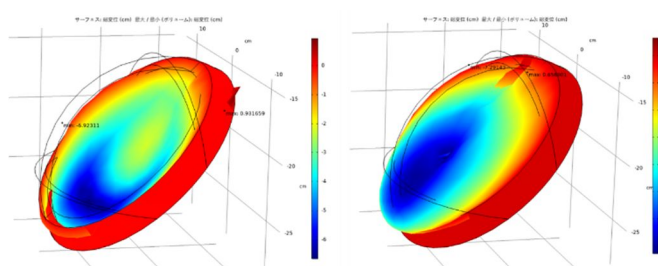


図 3. 胸鎖乳突筋・斜角筋群,横隔膜荷重後の横隔膜変位(左が CON,右が CBS)

(3) 画像データによる呼吸器構造モデル構築

画像処理ソフトを用いて抽出された健常若年成人男性 16 名の肺野は CT 撮影時にスパイロメータで取得した肺活量により相関分析を行なった結果有意な相関関係がみられた ($R^2=0.71$, $p < 0.001$) (図 4).骨については,脊柱,鎖骨,肋骨,胸骨が抽出された.

以上の様に,本研究では肺気量位と紐付けされた最大吸気と最大呼気の肺野および胸郭 3D モデルの作成がなされた.これらは運動時呼吸負荷トレーニングによる呼吸応答を詳細に解析するための基盤となる可能性を有する.また,この技術が確立すれば各種運動療法や呼吸トレーニングにおける呼吸動態解析に応用できると考えられる.

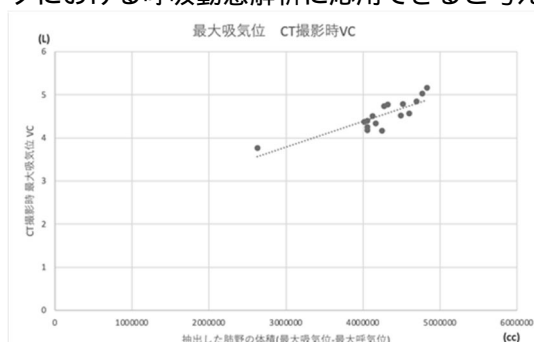


図 4. 抽出した肺野とスパイロメトリによる肺活量の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Satoshi Kido, Wenwei Yu, Yasuhiro Nakajima, Toshiaki Tanaka, Tomoya Miyasaka, Satoshi Shirogane, Hiroshi Maruoka, Kiyomi Takayanagi,	4. 巻 2(2)
2. 論文標題 Cardiorespiratory Response during Combined Training with Breathing Resistance and Sustained Physical Exertion: a Pilot Study	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Phys Med Rehabil Res.	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.15761/PMRR.1000139	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Satoshi Kido, Ayako Katakura, Yasuhiro Nakajima, Toshiaki Tanaka, Tomoya Miyasaka, Syuhei Sakurai, Wenwei Yu	4. 巻 8
2. 論文標題 The Physiological Effects of Combined Training with Breathing Resistance and Sustained Physical Exertion in Healthy Young Adults	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J Nov Physiother	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4172/2165-7025.1000376	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	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 1件）

1. 発表者名 柚口 菜津子、木戸 聡史、原 和彦、松岡 穂奈美、熊谷 雄基、小林 暁史、兪 文偉
2. 発表標題 呼吸動態解明のための胸部CT画像を用いた肋骨・肋軟骨シミュレーションモデルの作成
3. 学会等名 第25回日本基礎理学療法学会学術大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宇佐美友香、赤間美波、佐藤晶子、櫻井秋平、木戸聡史
2. 発表標題 呼吸時間塞条件の健康若年者における座位姿勢の違いが呼吸循環系に及ぼす影響
3. 学会等名 第6回日本呼吸理学療法学会学術集会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松岡穂奈美, 赤間美波, 八重樫健人, 高橋ひとみ, 木戸聡史
2. 発表標題 横隔膜運動とpump-handle motion に着目した胸郭コンピュータシミュレーション
3. 学会等名 第6回日本呼吸理学療法学会学術集会抄録集 PS6-33 2019年11月
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 八重樫健人, 木戸聡史, 佐藤晶子, 高橋ひとみ, 松岡穂奈美, 櫻井秋平
2. 発表標題 健康成人での運動時呼吸負荷トレーニングにおける経時的身体応答
3. 学会等名 第6回日本呼吸理学療法学会学術集会抄録集 PS6-33 2019年11月
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤晶子, 赤間美波, 宇佐美友香, 櫻井秋平, 木戸聡史
2. 発表標題 中高年者および高齢者の運動時呼吸負荷トレーニングの生理学的効果
3. 学会等名 第6回日本呼吸理学療法学会学術集会抄録集 PS6-33 2019年11月
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木戸聡史, 赤間美波, 吉田佑, 櫻井秋平, 宇佐美友香, 佐藤晶子, 兪文偉
2. 発表標題 リハビリテーション介入における呼吸動態を解明するために使用できる胸郭シミュレーションモデル構築のための実現可能性研究 吸気筋トレーニング負荷強度による呼吸筋動態に着目して
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 2018年

1. 発表者名 木戸聡史、宮坂智哉、村田健児、高橋ひとみ、櫻井秋平、濱口豊大、星文彦、久保田章仁、田中敏明
2. 発表標題 トイレ動作においてひとの動きを検出するアルゴリズムの提案および最適パラメータの検討と当該提案手法が転倒転落検知の精度に及ぼす影響 - 健常対象者 1 名における実験室レベルの検討 -
3. 学会等名 第7回日本支援工学理学療法学会学術大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Kido, A. Takahashi, Y. Yoshida, S. Sakurai, W. Yu
2. 発表標題 Respiratory muscle dynamics prediction formulas for inspiration load pressure change
3. 学会等名 European Respiratory Society International Congress 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017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
連携研究者	俞 文偉 (Yu Wenwei) (20312390)	千葉大学・フロンティア医工学センター・教授 (12501)	
連携研究者	田中 敏明 (Tanaka Toshiaki) (40248670)	東京大学・高齢社会総合研究機構・特任研究員(シニアアドバイザー) (12601)	

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