

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：31202

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26350669

研究課題名(和文) 下肢の筋シナジーと腱反射の協関を指標とした転倒予防トレーニング効果の評価

研究課題名(英文) Estimating the effect of fall prevention exercise in elderly persons from the view point of muscle synergy and tendon reflex

研究代表者

金子 賢一 (KANEKO, KENICHI)

富士大学・経済・経営システム研究科・教授

研究者番号：50337177

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：1. 例え高齢者であっても、適度な負荷を加えたペダリングトレーニングにより下肢筋力は維持、改善される。2. 複雑な運動をつかさどる筋シナジーに対して高い寄与を示す単一筋群に着目することで、簡便にトレーニング効果を評価することができる。3. 筋電図信号をウェーブレット変換することで得られた周波数情報は、既存の短時間フーリエ変換による分析よりも時間分解能に優れている。モルレーのカラマップを作成することで、トレーニング効果を視覚的に容易に捉えることができるため、高齢者のトレーニングに対するモチベーションの維持、向上につなげることが可能となる。4. 高齢者のペダリングトレーニングは転倒予防に効果的である。

研究成果の概要(英文)：We studied on a characteristic of lower limb muscle activities in elderly persons after the ergometric pedaling exercise for a month. To estimate the effect of the exercise, the surface electromyography (SEMG) of lower limb muscles were subjected to Daubechies-4 wavelet transformation, and mean wavelet coefficients were compared with the pre-exercise and the post-exercise in each wavelet level. For the elderly persons, the mean wavelet coefficients as an energy of muscle activities during the pedaling movement were significantly decreased in the tibialis anterior (TA) and the gastrocnemius medialis (GM) by the pedaling exercise. On the contrary, the mean energy of wavelet levels of -2 and -3 (125-250 and 62.5-125 Hz) within the rectus femoris (RF) and the biceps femoris (BF) were significantly increased in the healthy young persons. These results suggest that the effect of the pedaling exercise is different from the effects of heavy-resistance trainings as a power training.

研究分野：福祉工学

キーワード：福祉工学 リハビリテーション 老化

1. 研究開始当初の背景

2007年に高齢化率21%の超高齢社会を迎えたわが国では、高齢者介護に関する対策が喫緊の課題であることは言うまでも無い。WHO(世界保健機関)の「BONE AND JOINT DECADE(運動器の10年)」宣言により、高齢者の寝たきり予防やQOL(生活・人生の質)向上の観点から、高齢者の能動的な運動トレーニングの必要性が叫ばれるようになった。本学が立地する岩手県は積雪寒冷地域に属し、冬期には転倒事故が地域特有のバリアとして続発する。屋外で気軽に運動トレーニングを行うことが難しい環境でもある。国民生活基礎調査によると、「骨折や転倒」は介護が必要となった原因の第3位(12%)となっており、予防医学の視点に立った転倒の研究が強く求められている。さらに、東日本大震災により避難所での生活を余儀なくされた高齢者を中心に転倒事故が急増している実態がある。狭小居住環境曝露に伴い、通常に加齢効果(変化)とは異なる急激な下肢筋力低下が主な原因として考えられ、筋力低下が転倒事故を誘引するメカニズムの解明も急がれるところである。

高齢者における筋のトレーニング効果に関しては、相当数の研究が1980年代以降に行われ、高齢者や超高齢者でも高強度のレジスタンストレーニングを行うことで筋力が向上することが確認されている。しかし、下肢筋群の協調性という視点からトレーニング効果を評価しようとする研究は少なく、評価方法は未だ確立しているとは言い難い。一方、高齢者の転倒予防の視点からの研究では、下肢筋力や重心動揺を指標としたものなど数多く見受けられ、膝伸展筋力低下が高齢者の易転倒性を示す指標になると言われている。しかし、これまで科研費の支援を得ながら行った「歩行と転倒」に関する我々の研究からは、単に下肢筋力を向上させるだけでは転倒を防ぐことはできないと考えている。転倒を予防するためには、下肢筋群の協調運動を実現する脊髄中枢での下肢運動パターン発生ジェネレータの賦活が重要であり、ペダリング運動トレーニングを行うことでジェネレータの賦活が可能であると推測している。トレーニング効果を中枢レベルで評価する方法の構築が望まれている。

2. 研究の目的

本研究では、高齢者の転倒予防トレーニングとしてのペダリング運動の有効性を明らかにすることを目的とし、ペダリング運動に関する下肢の筋シナジー(Muscle Synergy)に寄与が高い下肢筋群を対象にトレーニング効果の評価を行う。ペダリングトレーニング前後の下肢筋群の表面筋電図(SEMG)をウェーブレット変換し、周波数領域の情報を分析することで、MU(motor unit)のリクルートメントや発火頻度を推定し、抹消と中枢の両面からトレーニング効果を捉える。転倒しや

すいとされる高齢者と若者とを比較することで、若者とは異なる高齢者特有のトレーニング効果を定量的に評価することを目的とする。

3. 研究の方法

ペダリングトレーニングは、自転車エルゴメータ(M3 INDOOR CYCLE, KEISER, USA)を使用して、1回15分間を週1回、1カ月間にわたり本学のスポーツトレーニングセンターで行った。ペダリングトレーニングを実施する前とトレーニング行った1カ月後に、下肢筋群のSEMGを測定した。得られたSEMG信号にDaubechiesの離散ウェーブレット変換を適用し、20Hzから450Hzの周波数帯域を5つに分割した後、それぞれの周波数帯域ごとにエネルギー情報の平均値を求め、トレーニング前後で比較を行った。被験者は地域住民と本学学生のボランティアに協力をいただき、高齢者8名(平均年齢 72.1 ± 12.1)、および、若者9名(23.6 ± 3.3)とした。全ての被験者は日常的に自転車を利用しない者に限定した。

ペダリングの負荷強度は60% MVC(Maximum Voluntary Contraction)とした。MVCに関しては、これ以上ペダルを漕ぐことが出来ない負荷とし、被験者ごとに毎回決定した。ケードンスは約75rpm、サドルの高さはペダル位置が下死点において膝関節角度を40度に保つように調整した。膝関節角度はゴニオメータ(MLTS700 Goniometer, ADInstruments, New Zealand)にて測定した。ペダリング姿勢はドロップハンドル姿勢とし、トークリップを用いて脚をペダルに固定した。ペダリングに伴う筋活動は、ワイレス筋電計(Trigno Wireless System DELSYS, USA)を用いて計測した。増幅された筋電図信号は、A/D変換機(Power Lab4/25, ADInstruments, New Zealand)を介して、分解能16ビット、サンプリング周波数1kHzにてPCに取り込んだ。ペダリング運動中のペダルの位置を確認するために、ビデオカメラ(DCR-HC30, SONY, Japan)でモニタリングすると同時に、ビデオ画像をSEMG信号と同期させた。実験終了後、オフラインにてPCを用いて解析を行った(図1)。

本研究ではSEMG信号の処理に際して、離散ウェーブレット解析を行った。連続ウェーブレット変換 $T_{(a,b)}$ の伸張パラメータ a 、位置パラメータ b の代わりに整数パラメータ j と k をそれぞれ用いて $a = 2^j$ 、 $b = k \cdot 2^j$ と離散化する。 j と k により制御される2進格子ウェーブレット $\psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} (2t-k)$ により、離散ウェーブレット変換は原信号 $x(t)$ と正規直交基底 $\psi_{j,k}(t)$ の積分により以下のように示される。

$$C_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{j,k}(t) dt \quad (1)$$

正規直交基底 $\psi_{j,k}(t)$ を選ぶことで、原信号

$x(t)$ は離散ウェーブレット逆変換により，ウェーブレット係数 $C_{j,k}$ を用いて次のように再構成することができる．

$$x(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_{j,k} \Psi_{j,k}(t) \quad (2)$$

以上のように変換することで，ウェーブレット係数 $C_{j,k}$ は冗長性無しに原信号 $x(t)$ の完全な再生を可能とする．

直交変換ではウェーブレット係数の2乗が時刻 k に対応するレベル j の持つエネルギーとして解釈可能であるが，本研究では解析時間長によるエネルギーの和への影響を減ずるために，1秒あたりのエネルギーを求めることとした．レベルごとの平均エネルギー E_j は次式により計算するものとする．

$$E_j = \frac{\sum_k^N (|C_{j,k}|^2 / \Delta t_j)}{N} \quad (3)$$

(t_j は $2_j \times$ サンプル時間)

本研究では，被験筋をペダリング運動に関連する筋シナジーに寄与が高い外側広筋(RF)，大腿二頭筋(BF)，前脛骨筋(TA)，腓腹筋(GM)とし(図2)，それぞれの筋から得られるSEMG信号から512点を抽出し，マザーウェーブレットとしてDaubechies-4ウェーブレットを用いて多重解像度分析を行った．SEMG信号は5つの周波数帯域 ($j = 1: 450-250\text{Hz}$, $j = 2: 250-125\text{Hz}$, $j = 3: 125-62.5\text{Hz}$, $j = 4: 62.5-31.25\text{Hz}$, $j = 5: 31.25-20\text{Hz}$)に分解し(図3)，比較を行った．さらに，筋活動の主要な周波数帯域を明らかにするために，5つの周波数帯域ごとに全体の活動量に対する割合を算出し($\%E_j$)，比較を行った．

統計解析としては，周波数帯域ごとに算出した平均エネルギー(E_j)について二元配置分散分析を行った．等分散性の検定をF検定により行い，有意差が認められた時にはTukey's HSDによる事後検定を行った．有意水準は5%とした． E_j を基準化するために算出した $\%E_j$ に対しては，有意水準5%で χ^2 検定を行った．全ての統計処理はアプリケーションソフトウェア(IBM SPSS Statistics for Windows, Version 20.0)を用いて行った．



図1 実験システム．SEMGは無線式筋電計で計測し，ペダリング画像と同期させた．

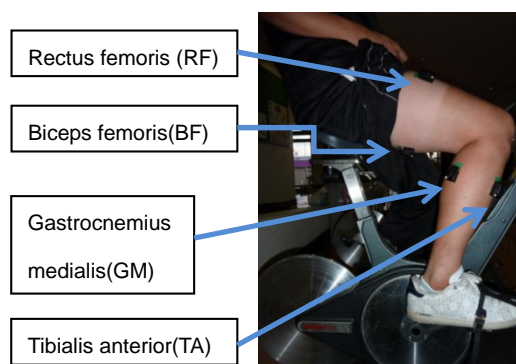


図2 ペダリング運動に関連する4つの被験筋と電極の設置位置．ペダリング運動を妨げないようにコードレス電極を使用した．

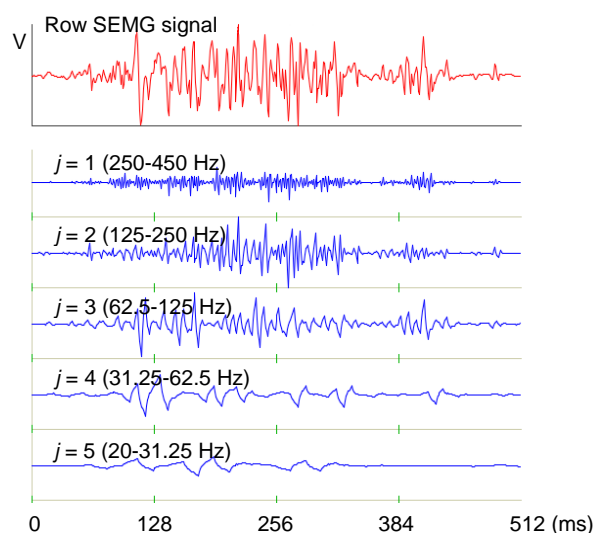


図3 Daubechies-4ウェーブレットアルゴリズムを用いた多重解像度分析の一例．表面筋電図の原信号(最上部，赤色の波形)を5つの周波数帯域 ($j = 1: 450-250\text{Hz}$, $j = 2: 250-125\text{Hz}$, $j = 3: 125-62.5\text{Hz}$, $j = 4: 62.5-31.25\text{Hz}$, $j = 5: 31.25-20\text{Hz}$)に分解した．

4. 研究成果

(1) 結果

ペダリング運動に関連する筋活動のパワーを示す値として E_j を算出し，4つの被験筋(RF, BF, GM, TA)から得た5つの周波数帯域 ($j = 1, 2, 3, 4, 5$)ごとの平均 E_j について，高齢者と若者とのグループでトレーニング前後の変化を評価した．

まず，高齢者のグループでは，平均 E_j の値はRFとBFにおいて $j = 2$ (250-125Hz)， 3 (125-62.5Hz)，および 4 (62.5-31.25Hz)の帯域でペダリングトレーニング後に増加する傾向が認められた．しかしながら，統計的な有意差は認められなかった (RF: $F_{(1,54)} = 0.088$, n.s.; BF: $F_{(1,54)} = 1.664$, n.s.). ペダリングトレーニング前に平均 E_j の値が最も高い値を示したのは $j = 5$ (31.25-20Hz)の帯域であったが，一カ月のトレーニング後では $j =$

4 (62.5-31.25Hz)の帯域で最大値を示しており、トレーニングにより筋活動がより高周波数帯域へシフトしたことが判明した。一方、TAとGMにおいては、ペダリングトレーニング後に E_j の平均値は減少した。分散分析の結果、トレーニングの主効果が認められた(TA: $F_{(1,54)} = 11.955$, $p < 0.01$; GM: $F_{(1,54)} = 5.655$, $p < 0.05$)。Tukey's HSDの事後検定の結果、TAの $j = 2$ (250-125Hz)、3 (125-62.5Hz)および5 (31.25-20Hz)の帯域で、GMでは $j = 3$ (125-62.5Hz)と4 (62.5-31.25Hz)の帯域でペダリングトレーニング前後に有意差が認められた(図4)。

一方、若者のグループでは、 E_j の値はペダリングトレーニング後に増加傾向を示した。RF、BF、TAの3つの被験筋でトレーニング前後に統計的な有意差が認められた(RF: $F_{(1,63)} = 8.417$, $p < 0.01$; BF: $F_{(1,63)} = 6.850$, $p < 0.05$; TA: $F_{(1,63)} = 4.715$, $p < 0.05$)。しかしながら、GMでは有意な差は認められなかった($F_{(1,63)} = 0.328$, n.s.)。Tukey's HSDの事後検定によると、RFの $j = 3$ (125-62.5Hz)とBFの $j = 2$ (250-125Hz)および3(125-62.5Hz)の帯域で、5%有意でトレーニング後に E_j の値は増加することが明らかとなった。

最後に、 E_j の全体に対する周波数帯域ごとの割合を求めた% E_j を用いて、高齢者と若者との比較を行った。その結果、全ての被験筋において高齢者の方が若者よりも、より低周波数帯域の活動が多いことが判明した。² 検定の結果4つの全ての被験筋において1%有意で高齢者と若者とで差が認められた。

(2)考察

高齢者で一か月間のペダリングトレーニング後にTAとGMの E_j の平均値が減少したのは、トレーニングによってペダリング運動に習熟したためであると考えられる。ペダリング運動に対する学習効果により、より少ないパワーの筋活動で同じ負荷のペダルを漕ぐことが可能になったものと思われる。この E_j の減少は高強度の負荷を課すスクワット運動のようなレジスタンストレーニングとは異なるトレーニング効果の表れであり、トレーニングによって筋力が増加したというよりも、筋活動の協調関係に変化が生じたことに起因するものと考えられる。本研究で実施した60%MVCのペダリングトレーニングは、高齢者にとっても比較的負荷の軽いものである。高齢者は一か月のペダリングトレーニングにより、下肢筋群の筋活動の協調性が向上した結果、よりスムーズにペダルを漕ぐことが出来るようになったものと推察された。

一方、高齢者のRFとBFではトレーニング前後で E_j に顕著な変化は認められなかった。しかし、% E_j の値で比較してみると、トレーニング後に高周波数帯域の筋活動へシフトした様態が確認できた。SEMG信号のパワースペクトルとMUのリクルートメントや発火頻度との関係は興味深い研究テーマである。Moritaniら(2004)⁽¹⁾によると、

SEMGのパワースペクトルのMPF(Mean power frequency)の増加や高周波数化は、より規模が大きく高い閾値を持ったMUの追加的なリクルートメントと関連があることを指摘している。本研究から得られた結果から、例え高齢者であっても、比較的強度の負荷であるペダリングトレーニングを実施することで、大腿部を構成する筋群のMUの発火頻度やリクルートメントの規模が増大することが推察され、中枢性由来のトレーニング効果をSEMGの E_j 値で評価し得る可能性が示唆された。

最後に、転倒予防に効果的であるとされるレジスタンストレーニングに関する複数の文献を横断的に調査しメタ分析を行った結果、下肢筋群のトレーニングと転倒予防との関連が定性的に認められた。本研究で行った一か月のペダリングトレーニングにおいても下肢筋群の活動状態にトレーニング前後で変化が認められたことから、転倒予防に一定の効果があるものと期待できる。自転車エルゴメータを使ったペダリングトレーニングは季節や天候に左右されることなく、転倒の危険性が少ないこと、さらに、比較的強度の負荷でトレーニングを行うことが可能であることなど、安全面においても優れたトレーニング法であることが確認できた。

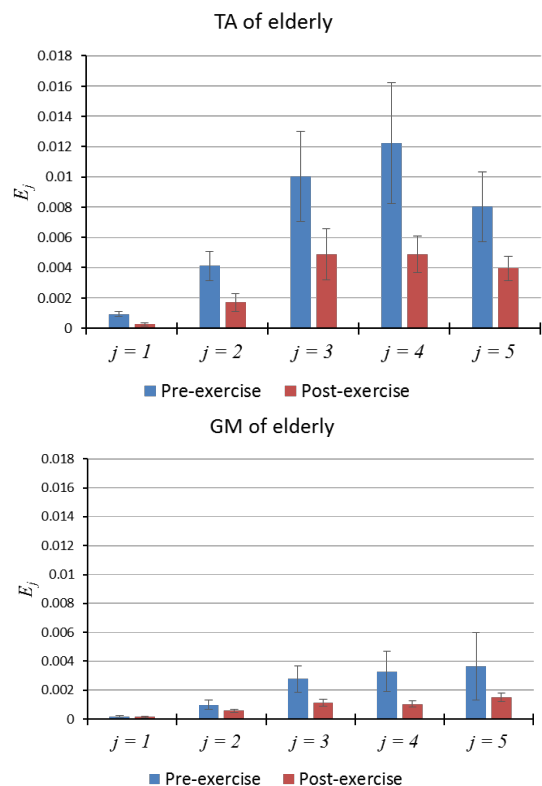


図4 高齢者のペダリングトレーニング前後の E_j (\pm SE)の比較。ペダリング運動中の膝伸展相から膝屈曲相への移行期前後で筋活動量が多いTAとGMで、1か月のトレーニング後に有意な減少が認められた。事後検定による5%の統計的有意差を表す。

参考文献

- (1) Moritani T, Stegeman D, Merletti R (2004) Basic physiology and biophysics of EMG signal generation. In: Merletti R, Parker PJ(eds) Electromyography: Physiology, Engineering, and Non-Invasive Applications. Wiley-IEEE Press, New Jersey, pp 1-25.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

Kenichi Kaneko, Hitoshi Makabe, Kazuyuki Mito, Kazuyoshi Sakamoto, Continuous frequency change of SEMG for a transition period between knee extension and knee flexion during pedaling, International Society of Electrophysiology and Kinesiology XXI ISEK Congress, 査読有, 2016, pp.44.

Hitoshi Makabe, Yuka Takahashi, Hitomi Take, Kenichi Kaneko, Kazuyoshi Sakamoto, Influence of using T-Cane on variability of stride interval at a self-selected gait speed " International Society of Electrophysiology and Kinesiology XXI ISEK Congress, 査読有, 2016, pp.52.

Kenichi Kaneko, Hitoshi Makabe, Kazuyuki Mito, Kazuyoshi Sakamoto, Estimating the effect of pedaling exercise in elderly persons by use of EMG, International Society of Biomechanics XXVth Congress, 査読有, 2015, pp.1658-1659.

[学会発表](計4件)

金子賢一, 福祉工学分野の海外研究事情, 日本福祉工学会東北支部会第16回総会・研究会, 2016年11月12日, 富士大学.

穴戸昌子, 金子賢一, 筋電図による高齢者のペダリングトレーニング効果の研究, 日本福祉工学会第19回学術講演会, 2015年11月28日, 山梨大学.

穴戸昌子, 金子賢一, 積雪寒冷地岩手における高齢者のためのエルゴメータトレーニングとその評価, 日本福祉工学会東北支部会第15回総会・研究会, 2015年10月31日, 富士大学.

穴戸昌子, 金子賢一, 表面筋電図によるペダリング運動の習熟過程評価に関する研究, 日本福祉工学会第18回学術講演会, 2014年11月29日, 岩手大学.

[その他]

ホームページ等

<http://www.fuji-u.ac.jp/overview/jiko-com>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金子 賢一 (KANEKO KENICHI)
富士大学大学院・経済・経営システム研究科・教授
研究者番号: 50337177

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

坂本 和義 (SAKAMOTO KAZUYOSHI)
電気通信大学・産学官連携センター・名誉教授
研究者番号: 40017398
眞壁 寿 (MAKABE HITOSHI)
山形県立保健医療大学・保健医療学部・教授
研究者番号: 60363743
水戸 和幸 (MITO KAZUYUKI)
電気通信大学・情報理工学部・准教授
研究者番号: 90353325